

۱۲	چکیده :
۱۳	دیباچه:
۱۵	۱- معرفی میکروکانال ها
۱۵	۱-۱ نیازمندی به گذرگاه های باریکتر برای عبور جریان
۱۷	۲-۱ دسته بندی کانال ها
۱۸	۳-۱ فرضیات اولیه در انتقال حرارت و افت فشار در میکروکانال ها
۲۶	۲- جریان سیال در میکروکانال ها
۲۶	۱-۲ پیشگفتار
۲۷	۱-۱-۲ خصوصیات منحصر به فرد مایعات در میکروکانال ها
۳۰	۲-۱-۲ هیدرودینامیک محیط های پیوسته برای جریان داخل کانال ها
۳۳	۳-۱-۲ قطر هیدرولیکی
۳۴	۴-۱-۲ جریان در مجراهای باریک دایره شکل
۳۶	۵-۱-۲ طول توسعه یافتگی
۳۷	۶-۱-۲ گذار به جریان مغشوش
۳۸	۷-۱-۲ کانال های غیردایره ای
۳۹	۲-۲ مطالعه آزمایشگاهی جریان درون میکروکانال ها
۴۴	۱-۲-۲ توصیف های ارائه شده جهت تشریح رفتارهای اندازه گیری شده جریان
۴۶	۲-۲-۲ اندازه گیری سرعت در میکروکانال ها
۴۷	۳-۲-۲ کانال های غیرخطی
۴۹	۴-۲-۲ اثرات ظرفیتی
۵۱	۳-انتقال حرارت در میکروکانال ها
۵۱	۱-۳ پیشگفتار
۵۳	۲-۳ اصول انتقال حرارت در میکروکانال ها
۵۳	۱-۲-۳ حالت های انتقال حرارت
۵۴	۲-۲-۳ فرضیه پیوستگی
۵۵	۳-۲-۳ اصول ترمودینامیک
۵۶	۴-۲-۳ قوانین کلی

۵۷	..... ۵-۲-۳ قوانین خاص
۵۸	..... ۶-۲-۳ معادلات حاکم
۵۹	..... ۷-۲-۳ اثرات اندازه
۵۹	..... ۳-۳- انتقال حرارت جابجایی تک فاز در میکروکانال ها
۶۰	..... ۱-۳-۳ ساختار جریان
۶۰	..... ۲-۳-۳ طول ورودی
۶۲	..... ۳-۳-۳ معادلات حاکم
۶۲	..... ۴-۳-۳ جابجایی اجباری در جریان های گازی تماماً توسعه یافته
۶۸	..... ۵-۳-۳ جابجایی اجباری در جریان مایع تماماً توسعه یافته
۷۳	..... ۴- تشعشع در میکرو کانال ها و در حضور نانو سیال ها
۷۴	..... ۱-۴- پیشگفتار
۷۴	..... ۲-۴- روابط انرژی و شرایط مرزی
۷۴	..... ۱-۲-۴ روابط کلی
۷۶	..... ۲-۲-۴ حالت های انتقال حرارت کوپل شده و کوپل نشده
۷۷	..... ۳-۲-۴ رهیافت حجم کنترل برای هدایت در راستای دیواره میکروکانال
۷۹	..... ۳-۴- تشعشع به همراه هدایت :
۹۱	..... ۴-۴- تشعشع توام با هدایت و جابجایی
۹۳	..... ۵-۴- اصل برهم نهی تشعشع جابجائی و هدایت
۹۵	..... ۵-۴- برهم نهی اثرات انتقال حرارت تشعشعی با انتقال حرارت جابجایی و هدایت
۹۵	..... ۱-۴-۵- کلیات:
۹۶	..... ۲-۵-۴ روش های محاسبات انتقال حرارت
۱۰۳	..... ۶-۴- جریان نانو سیال ها در میکروکانال های چاه های حرارتی
۱۰۴	..... ۱-۶-۴ پخشیدگی انرژی توسط ذرات
۱۰۵	..... ۲-۶-۴ پخشیدگی رایلی توسط کره های کوچک
۱۰۶	..... ۳-۶-۴ تقویت انتقال حرارت در اثر تونل زنی فوتون ها
۱۱۹	..... ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۹	..... ۱-۵ نتیجه گیری
۱۲۰	..... ۲-۵ پیشنهادات
۱۲۱	..... کتابنامه
۱۲۹	..... Abstract

فهرست جدول ها

صفحه

عنوان

- ۱-۱: ابعاد کانال برای انواع جریان گازی در فشار اتمسفر [۳] ۱۷
- ۲-۱: شمایی از دسته بندی کانال ها [۳] ۱۸
- ۱-۲: ویسکوزیته دینامیکی و سیستماتیکی چندمایع در مقیاس با هوا در فشار یک اتمسفر ۲۹
- ۲-۲: مقاومت جریان در جریان کاملاً توسعه یافته از درون میکروکانال های مستقیم
با شکل های هندسی گوناگون برای سطح مقطع میکروکانال [۱۶] ۳۹
- ۳-۲: شرایط آزمایشگاهی برای آزمایش های مقاومت جریان ۴۰
- ۱-۴: فاصله بحرانی جهت غالب شدن تونل زنی ها در تبادل تشعشعی [۸۸] ۱۰۸

- ۱-۱ : گستره ای از قطر میکروکانال هایی که دارای کاربردهای مختلف می باشند [۱] ۱۶
- ۲-۱ : اثر قطر هیدرولیکی بر انتقال حرارت در میکروکانال ها [۴] ۱۹
- ۳-۱ : اثر قطر هیدرولیکی بر افت فشار در میکروکانال ها [۴] ۱۹
- ۴-۱ : شمایی از سرورهای نزدیک به هم با چپ های دارای شار حرارتی بالا که با چاه های حرارتی مجهز به میکروکانال، صفحات سرد و خنک کاری موضعی با هوا، همچنین با یک مدار ثانویه آب سرد که از سیستم تهویه مطبوع ساختمان گرفته شده است خنک می شوند. [۷] ۲۳
- ۵-۱ : شمایی از سیستم خنک کاری به وسیله میکروکانال که در سال ۱۹۸۴ توسط توکرمن ارائه شده است [۸] ۲۴
- ۱-۲ : میکرومبدل حرارتی ساخته شده از کانال هایی با سطح مقطع مستطیل شکل که از ماشینکاری در فلز ایجاد شده اند [۱۱] ۲۶
- ۲-۲ : جریان در یک مجرای با سطح مقطع A محیط P و τ_w تنش برشی دیواره می باشد. ۳۲
- ۳-۲ : پارامتر طول ورودی جریان K برای جریان لایه ای در ورودی مجرا [۱۵] ۳۷
- ۴-۲ : مقایسه C^* بر حسب عدد رینولدز ۴۴
- ۵-۲ : انحراف هندسی از نیمرخ مستطیلی شکل در ساخت میکروکانال از جنس سیلیکون [۱] ۴۶
- ۶-۲ : حسگر T شکل و راکتور با میکروکانال خود تنظیم [۳۱] ۴۸
- ۷-۲ : کانال سه بعدی مارپیچ [۳۳] ۴۸
- ۱-۳ : شمای کلی میکروکانال در چاه حرارتی ۵۳
- ۲-۳ : شمایی از جریان در حال توسعه هیدرودینامیکی و حرارتی و به دنبال آن جریان تماماً توسعه یافته هیدرودینامیکی و حرارتی ۶۱
- ۳-۳ : میکروکانالی به عرض ۴۰ میکرون که میکرو حسگرهای فشار به آن متصل می باشند [۵۴] ۶۴
- ۴-۳ : شرح مقایسه ای بین مقادیر محاسباتی (خط تیره) و مقادیر اندازه گیری شده (نمادهای هندسی) جهت توزیع فشار در جهت جریان بر میکروکانال [۵۴] ۶۵
- ۵-۳ : اثرات جریان لغزشی بر نرخ جریان جری بعنوان پاره ای از افت فشار کل برای گازهای مختلف [۵۵] ۶۵

- ۶-۳ : اثرات جریان لغزشی بر نرخ جریان جرمی به عنوان تابعی از افت فشار کل
 برای گاز هیدروژن در دماهای مختلف دیواره میکروکانال [۵۵]..... ۶۶
- ۷-۳ : مدل شبیه سازی عدد نودسن Kn_i بر عدد نوسلت Nu در طول میکروکانالی
 با شرط مرزی دیواره دما ثابت (Nu_T) [۵۸]..... ۶۶
- ۸-۳ : مدل شبیه سازی عدد نودسن Kn_i بر عدد نوسلت Nu در طول میکروکانال هایی
 با شرط مرزی شار حرارتی ثابت (Nu_H) [۵۸]..... ۶۷
- ۹-۳ : اثرات جریان لغزشی روی جریان داخل میکروکانال برای یک میکروکانال
 مجهز به حسگرهای دمایی متعلق [۶۰]..... ۶۷
- ۱۰-۳ : اثرات جریان لغزشی بر جریان داخل میکروکانال ها و توزیع دما در جهت جریان
 که در شرایط مختلف دمای محیط و افت فشار اندازه گیری شده است [۶۰]..... ۶۸
- ۱۱-۳ : اثرات لایه دوگانه الکتریکی بر تغییرات عدد نوسلت موضعی در طول
 میکروکانال [۶۱]..... ۷۰
- ۱۲-۳ : اثرات سیال میکروقطبی بر عدد نوسلت Nu به عنوان تابعی از نسبت ویسکوزیته
 K_0 / μ_0 برای مقادیر مختلف مقیاس طول سیال میکروقطبی T [۶۲]..... ۷۰
- ۱۳-۳ : جریان مایع در حالی که حسگرهای دما به قسمت بالای میکروکانال
 متصل شده اند [۶۷]..... ۷۱
- ۱۴-۳ : مقایسه بین اندازه گیری نرخ جریان مایع به عنوان تابعی از افت فشار
 و محاسبات تئوری براساس مدل کانال پر شده توسط مایع در جریان
 درون میکرو کانال ها [۶۷]..... ۷۲
- ۱-۴ : شرایط مرزی روی سطح قسمتی از دیواره کدر میکروکانال ۷۵
- ۲-۴ : شرایط مرزی روی سطح یک دیواره که شار حرارتی به آن اعمال می شود ۷۶
- ۳-۴ : المان صفحه ای نازک جهت نوشتن معادلات حجم کنترل ۷۸
- ۴-۴ : هندسه آرایه نامحدود میکروکانال از پره های به ضخامت a عرض w
 و طول بسیار زیاد در راستای z که به یک سطح پایه سیاه که در دمای
 ثابت T_v نگاه داشته شده جهت تشریح دماهای موضعی در پره های موازی
 در نقش دیواره میکروکانال ها ۷۹

- ۵-۴ : ضریب شکل بین دو نوار روی دو سطح مجاور که تشکیل یک زاویه داده‌اند ۸۳
- ۶-۴ : تبادل تشعشی بین دو المان سطحی ۸۵
- ۷-۴ : هندسه حاکم به ضرایب شکل بین دو المان مسطحی در حال تبادل تشعشی ۸۷
- ۸-۴ : محیط مادی انتقال حرارت کننده داخل میکروکانال ۹۴
- ۹-۴ : نقشه خطای مدل یک معادله ای برای انتقال حرارت
- درون میکروکانال ها [۷۸] ۱۰۲
- ۱۰-۴ : مکانیزم های انتقال تشعشی معمولی و مکانیزم تونل زنی فوتون ها
- در حالت های ناپایدار [۸۸] ۱۰۷
- ۱۱-۴ : امواج ناپایدار نقشی در تشعشع به محیط خلا نداشته ولی در تشعشع
- به یک دیوار با دمای پایین تر نقش دارند. [۸۷] ۱۰۷
- ۱۲-۴ : شار انرژی خالص میکروکانال برحسب فاصله بین دیوارهای آن [۸۹] ۱۰۸
- ۱۳-۴ : هندسه المان طولی به کار رفته در تحلیل تشعشع در میکروکانال ۱۱۰
- ۱۴-۴ : شمایی از میکروکانال های یک چاه حرارتی ۱۱۰
- ۱۵-۴ : محیط داخلی میکروکانال به شکل یک مکعب مستطیل ۱۱۲
- ۱۶-۴ : هندسه تشعشع بین سطوح کف و سطح میکروکانال ۱۱۳
- ۱۷-۴ : مقایسه توزیع دمای بدون بعد در طول میکروکانال با ضریب کشیدگی ۲
- با و بدون در نظر گرفتن اثر تشعشع [۷۷] ۱۱۴
- ۱۸-۴ : مقایسه توزیع دمای بدون بعد در طول میکروکانال با ضریب کشیدگی ۱۰
- با و بدون در نظر گرفتن اثر تشعشع [۷۷] ۱۱۵
- ۱۹-۴ : مقایسه توزیع عدد نوسلت برای میکروکانال ها با ضرایب کشیدگی مختلف
- با و بدون در نظر گرفتن اثر تشعشع [۷۸] ۱۱۶
- ۲۰-۴ : مقایسه توزیع عدد نوسلت میکروکانال ها برحسب نسبت هدایت موثر
- سیال عبوری به هدایت موثر دیواره میکروکانال با و بدون در نظر گرفتن
- اثر تشعشع [۷۸] ۱۱۷

چکیده :

در این پژوهش تحلیلی بر انتقال حرارت تشعشی در میکروکانال ها انجام شده است. تحلیل حرارتی یک میکروکانال با سطح مقطع مستطیلی شکل که توسط سیال عاملی چون یک نانوسیال تک فاز با جریان لایه ای خنک می شدند. از نتایج کارهای قبلی که در شرایط دیواره دما ثابت به دست آمده بودند در این بررسی استفاده شد و نقشه خطای روش یک معادله ای و دو معادله ای در شناسایی مسائلی که اثر تشعشع در آنها بیشتر است استفاده شد. تبادل تشعشی بین سطوح سقف و کف میکروکانال بررسی شد. به اثر حضور نانوذره ها و اثر تشعشع در فاصله های بسیار کم نیز اشاره شد.

دیباچه:

در چند دهه اخیر افق های جدیدی پیش روی ساخت تجهیزات و سیستم های با مقیاس میکرو قرار گرفته است. هر چه که توانایی بشر در افزایش میزان دفع حرارت از واحد سطح تکامل بیشتری یابد امکان استفاده از فنآوری های پیشرفته برای افراد بیشتری فراهم می شود. یکی از مهم ترین چالش هایی که توسعه سیستم های با مقیاس میکرو با آن مواجه بوده و می باشد، مسئله دفع حرارت ناشی از عملکرد این دستگاه ها می باشد، لذا دستیابی به مدارج بالاتر انتقال حرارت با استفاده از میکروکانال ها مورد توجه قرار گرفت لیکن به سهم تشعشع در انتقال حرارت در میکروکانال ها کمتر پرداخته شده است.

هدف از پژوهش حاضر در نظر گرفتن سهم تشعشع در انتقال حرارت در میکروکانال ها جهت دستیابی به پیشبینی های دقیق تری از انتقال حرارت کل در میکروکانال ها می باشد.

گفتار نخست

معرفی میکروکانال ها

۱. معرفی میکروکانال ها

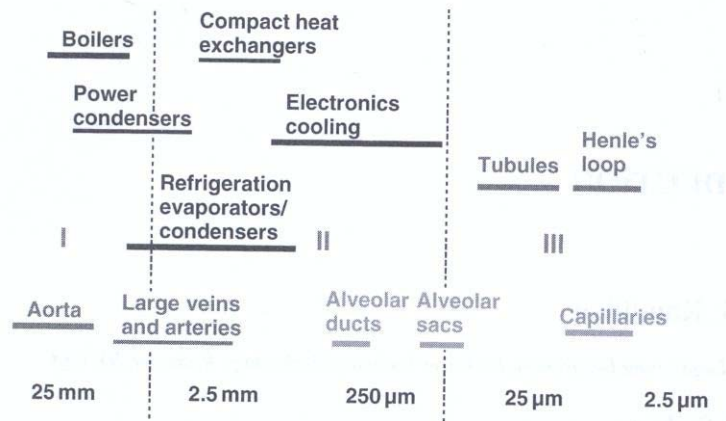
۱-۱ نیازمندی به گذرگاه های باریکتر برای عبور جریان

جریان سیال داخل کانال ها در بطن بسیاری از سیستم های طبیعی و سیستم های ساخته شده توسط بشر قرار دارد، انتقال جرم و حرارت در سیستم های بیولوژیکی در کل طول دیواره های کانال قابل انجام می باشد، مواردی چون مغز، ریه، کلیه، روده و مانند آنها، به مانند آنچه که در بسیاری از سیستم های ساخته شده توسط بشر به وقوع می پیوندد. مواردی چون مبدل های حرارتی، راکتورهای هسته ای، واحدهای تقطیر، واحدهای جداسازی هوا و نظیر آنها. به طور کلی فرایندهای انتقال در طول دیواره کانال ها انجام می شود، چرا که جریان حجمی از روی سطح مقطع کانال عبور می کند بنابراین سطح مقطع کانال می تواند به عنوان عبور دهنده سیال به داخل یا خارج دیواره های کانال ایفای نقش نماید. کانال دو وظیفه اساسی دارد که باید در طول عملکرد خود به انجام برساند:

- ۱- سیال را به برخورد موثر با دیواره های کانال وادار نماید.
- ۲- به منظور اینکه فرایند انتقال به خوبی انجام پذیرد کانال باید همواره سیال جدید را به سمت دیواره فرستاده و سیالی را که در نزدیک دیواره است و وظیفه فرایند انتقال خود را انجام داده از دیدار دور نماید تا سیال جدید در مجاورت دیواره جایگزین آن شود.

نرخ فرآیند انتقال به مساحت سطح تماس با سیال بستگی دارد که این خود برای کانال با سطح مقطع دایره ای به قطر کانال، D بستگی داشته همچنان که نرخ جریان نیز به مساحت سطح مقطع کانال بستگی دارد، که سطح مقطع نیز به طور خطی با D^2 متناسب است، بنابراین نسبت مساحت سطح داخلی کانال به حجم با قطر کانال نسبت عکس خواهد داشت، پر واضح است که با کاهش قطر نسبت مساحت سطح داخلی کانال به حجم افزایش خواهد داشت.

در بدن انسان دوفرایند انتقال حرارت و جرم با اهمیت بسیار زیاد در ریه و کلیه اتفاق می افتد. جایی که قطر کانال ها یا به عبارتی دیگر مجراهای باریک چیزی در حدود چهارمیکرومتر می باشد. گستره ای از میکروکانال ها با ابعاد مختلف با ذکر نوع سیستمی که میکروکانال در آنها به کار رفته است، در شکل (۱-۱) آورده شده است [۱].



شکل (۱-۱): گستره ای از قطر میکروکانال هایی که دارای کاربردهای مختلف می باشند [۱]

جالب است که در سیستم‌های بیولوژیکی فرایندهای انتقال جرم، ابعاد کانال کوچکتری دارند، جایی که از کانال های با ابعاد بالاتر فقط به منظور جابجایی سیال استفاده می شود. از نقطه نظر مهندسی ما شاهد حرکتی از کانال های با ابعاد بالا یعنی حدود ۱۰ تا ۲۰ میلیمتر به کانال های با ابعاد پایین تر می باشیم تا جایی که علاقه به گستره از چند ده تا چند صد میکرومتر، استفاده از کلمه "مقیاس میکرو"^۱ به عنوان یک واژه متداول جهت استفاده در تقسیم بندی های علمی و مهندسی که با فرایندهایی در این مقیاس سروکار دارند، شناخته شده و پذیرفته شده است.

هرچه ابعاد کانال کوچکتر می شود تعداد بیشتری از تئوری هایی که برای توصیف وضعیت سیال، انرژی و انتقال جرم استفاده می شد نیازمند بررسی بیشتر جهت حصول اطمینان از اعتبار این تئوری ها در تشریح مسئله با ابعاد میکرو می باشد. دو عامل اساسی جهت دور شدن از تئوری های معمولی جهت توصیف مقیاس میکرو وجود دارد، به عنوان مثال به دلیل قطر کوچک کانال ممکن است شاهد تغییراتی در نحوه مدل سازی جریان سیال داخل کانال باشیم:

- ۱- تغییر در فرایندهای اساسی مانند انحراف از فرضی محیط پیوسته برای جریان گاز، یا اثر گذاری مضاعف بعضی از نیروها مانند نیروهای الکتروستاتیکی و مانند آن.
- ۲- عدم قطعیت در کاربرد عوامل اساسی که به روش های آزمایشگاهی در مسائل با مقیاس بالاتر به دست آمده است مانند ضرایب افت، ورودی و خروجی، جریان سیال داخل لوله ها.
- ۳- عدم قطعیت در اندازه گیری های مقیاس میکرو مانند ابعاد هندسی و پارامترهای مسئله.

^۱ - Micro Scale

۲-۱ دسته بندی کانال ها

دسته بندی کانال ها براساس قطر هیدرولیکی آنها به عنوان یک راه حل ساده و در عین حال کارا جهت مطالعه مسائل مختلف در دست می باشد. کاهش ابعاد کانال در فرایندهای مختلف، اثرات مختلفی داشته و ارائه یک شرط خاص منطبق بر متغیرهای فرایند ممکن است در نگاه اول گزینه ای بسیار مناسب به نظر برسد، اما چنانچه تعداد فرایندها و متغیرهای حاکم بر انتقال از ابعاد معمولی به پدیده های مقیاس میکرو را در نظر بگیریم همان روش ساده دسته بندی کانال ها براساس ابعادشان را یک روش مناسب می بینیم که با کارهایی که پیش از این در ادبیات این رشته انجام شده است تطابق خوبی دارد. مهنداله^۱ و همکاران [۲] تقسیم بندی را ارائه نموده اند که مطابق آن کانال های به قطر ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر را میکروکانال، از ۱۰۰ میکرومتر تا ۱ میلی متر را مسوکانال^۲، ۱ تا ۶ میلیمتر را گذرگاه های فشرده و از ۶ میلی متر به بالا را گذرگاه های معمولی نامیدند. کاندلیکار و گراند^۳ [۳] اثرات رقیق شدن گازهای معمولی در فشار اتمسفر را در نظر گرفتند و گستره هایی از ابعاد کانال که ممکن بود رژیم جریان در آنها متفاوت باشد را ارائه نمودند که نتایج آنها براساس کوچکترین قطر کانال در جدول (۱-۱) ارائه شده است:

Channel dimensions for different types of flow for gases at one atmospheric pressure.

Gas	Channel dimensions (μm)			
	Continuum flow	Slip flow	Transition flow	Free molecular flow
Air	>67	0.67-67	0.0067-0.67	<0.0067
Helium	>194	1.94-194	0.0194-1.94	<0.0194
Hydrogen	>123	1.23-123	0.0123-1.23	<0.0123

جدول (۱-۱): ابعاد کانال برای انواع جریان گازی در فشار اتمسفر [۳]

در سیستم های بیولوژیکی، جریان در مجاری باریک در عددهای رینولدز^۴ بسیار پایین اتفاق می افتد و رهیافت متفاوتی از مدل سازی برای بررسی این حالت ها مورد نیاز می باشد. همچنین در این سیستم ها نیروهای الکتروستاتیکی نقش مهمی ایفا می نمایند و این درحالی است که برای مثال یک جریان دوفاز در کانالی با عرض کمتر از ۱۰ میکرومتر همچنان ناشناخته باقیمانده است. بنابراین تعریف اولیه ای که توسط کاندلیکار و گراند^۳ جهت تقسیم بندی کانال ها ارائه گردیده بود دستخوش تغییراتی شده و ایشان یک تعریف کلی بر مبنای کوچکترین بعد کانال ارائه نمودند که نتایج آن در جدول (۲-۱) ارائه شده است:

¹ - Mehendale et al.

² - Meso-Channel

³ - Kandlikar and Grande

⁴ - Reynolds

Channel classification scheme.

Conventional channels	$> 3 \text{ mm}$
Minichannels	$3 \text{ mm} \geq D > 200 \mu\text{m}$
Microchannels	$200 \mu\text{m} \geq D > 10 \mu\text{m}$
Transitional Microchannels	$10 \mu\text{m} \geq D > 1 \mu\text{m}$
Transitional Nanochannels	$1 \mu\text{m} \geq D > 0.1 \mu\text{m}$
Nanochannels	$0.1 \mu\text{m} \geq D$

D: smallest channel dimension

جدول (۲-۱) : شمایی از دسته بندی کانال ها [۳]

در جدول (۲-۱) D عبارتست از قطر کانال که در حالت هایی که با کانال های با سطح مقطع غیر دایره ای سروکار داشته باشیم D عبارت خواهد بود از کوچکترین بعد کانال به عنوان نمونه، ضلع کوچک مستطیل در یک سطح مقطع مستطیلی شکل به جای قطر کانال D مورد استفاده قرار می گیرد. این تقسیم بندی در واقع جهت تسهیل در شناسایی واژه ها ارائه شده لیکن این مسئله که آیا فرض محیط پیوسته یا شرایط لغزش جریان برای رژیم گازی وجود دارد یا خیر، می بایست در شرایط متعلق به هر مسئله خاص بررسی و برای هر کانالی به طور مجزا چک شود. لذا این تقسیم بندی جهت شناسایی واژگان متداول در ادبیات میکروکانال ها مناسب بوده لیکن ابعاد ارائه شده به نوبه خود جای استدلال بیشتری دارد.

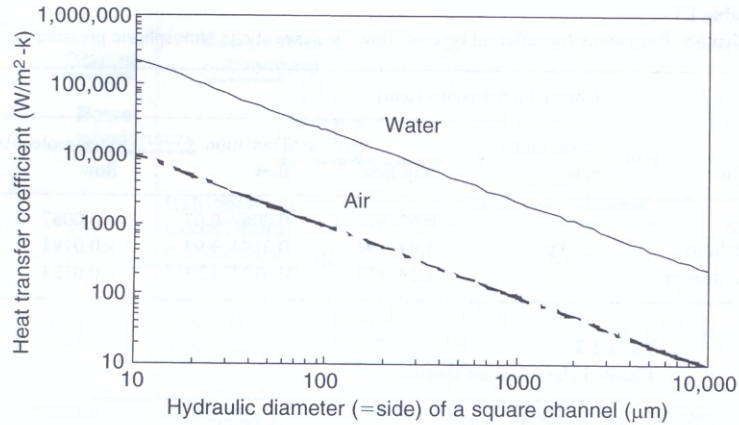
۳-۱ فرضیات اولیه در انتقال حرارت و افت فشار در میکروکانال ها

اثر قطر هیدرولیکی بر انتقال حرارت در شکل (۲-۱) و اثر آن بر افت فشار نیز در شکل (۳-۱) برای جریان آب و هوا در یک کانال با سطح مقطع مربع شکل و تحت اثر یک شار حرارتی یکنواخت و شرایط جریان لایه ای کاملاً توسعه یافته ارائه شده اند [۵ و ۴]. ضریب انتقال حرارت h به توسط عدد رینولدز جریان Re در ناحیه جریان لایه ای تماماً توسعه یافته، تحت تأثیر قرار نمی گیرد. ضریب انتقال حرارت h عبارتست از :

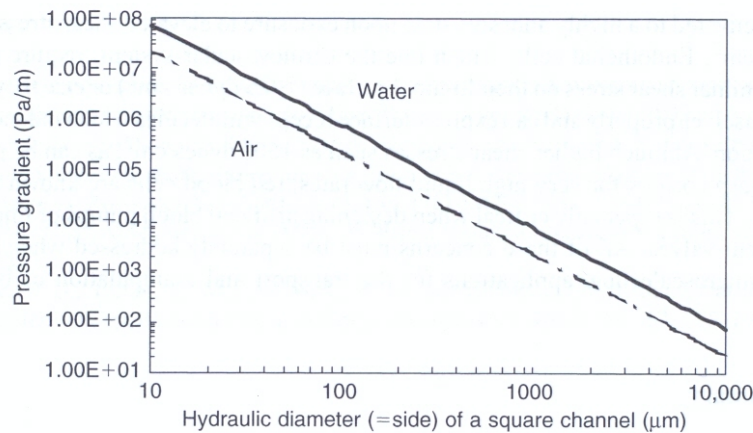
$$h = \text{Nu} \frac{K}{D_h} \quad (1-1)$$

که در آن K هدایت حرارتی سیال و D_h قطر هیدرولیکی کانال می باشد. عدد نوسلت^۱ Nu برای جریان لایه ای تماماً توسعه یافته داخل کانال با سطح مقطع مربع شکل و با شرایط اعمال شار حرارتی ثابت برابر با ۳/۶۱ می باشد. شکل (۲-۱) نمایانگر تغییرات ضریب انتقال حرارت h برای جریان آب و هوا برحسب قطر

^۱ - Nusselt



شکل (۲-۱) : اثر قطر هیدرولیکی بر انتقال حرارت در میکروکانال ها [۴]



شکل (۳-۱) : اثر قطر هیدرولیکی بر افت فشار در میکروکانال ها [۴]

از آنجایی که حاصل ضرب $f \cdot Re$ در جریان های لایه ای تماماً توسعه یافته عدد ثابتی خواهد بود، در این حالت ضریب اصطکاک f با عدد رینولدز Re نسبت عکس خواهد داشت. افت فشار اصطکاکی بر واحد طول جریان برای یک سیال غیرقابل تراکم به صورت زیر ارائه می شود:

$$\frac{\Delta P f}{L} = \frac{\nu f G^2}{\rho D} \quad (۲-۱)$$

که در آن $\Delta Pf/L$ گرادیان فشار اصطکاکی می باشد f ضریب اصطکاک بوده و G شار جرمی می باشد. p نیز چگالی سیال است. برای جریان لایه ای تماماً توسعه یافته می توان نوشت:

$$f \cdot Re = C \quad (3-1)$$

که در آن Re عدد رینولدز و برابر است با :

$$Re = \frac{GD_h}{\mu}$$

که در آن C مقداری ثابت است که برای کانال با سطح مقطع مربع شکل $C = 14/23$ می باشد.

شکل (۳-۱) نمایانگر تغییرات گرادیان فشار بر حسب ابعاد کانال برای یک کانال با سطح مقطع مربع شکل با شار جرمی $G = 200 \text{ Kg/m}^2\text{S}$ و برای جریان غیرقابل تراکم آب و هوا این تغییرات را نشان می دهد. البته نمودارهای ارائه شده در این شکل ها بیشتر از این که به خصوص برای جریان هوا در کانال های با قطر پایین کاربرد داشته باشند، جنبه معرفی و نمایش دارند. از شکل (۳-۱) چنین بر می آید که با کاهش ابعاد کانال گرادیان فشار به نحو چشمگیری افزایش می یابد.

وجود تعادل مابین نرخ انتقال حرارت و افت فشار موضوع مهمی در طراحی گذرگاه های جریان های خنک کننده برای دفع شارهای حرارتی بسیار بالایی است که در خنک کاری چیپ های^۱ ریزپردازنده ها^۲ با آن روبرو می شویم. توسعه سیستم های میکروالکترومکانیکال به طور عمومی مترادف با توسعه سیستم های دفع حرارتی است که متناسب با آن سیستم ها نیز کوچک باشند. خنک کاری آینه هایی که در سیستم های لیزر^۳ به کار می روند شامل سیستم های خنک کننده ای است که باید حرارت بسیار زیادی را از سطح مقطعی بسیار کوچک دفع نمایند، پیشرفت هایی که در بیولوژی و مهندسی ژنتیک رخ می دهد نیازمند انتقال تحت کنترل سیال و همچنین کنترل شرایط دمایی آن در گذرگاه هایی است که ابعاد آن از چندین میکرون بیشتر نمی باشد بنابراین داشتن درک درستی از جریان سیال و انتقال حرارت در این سیستم های با مقیاس میکرو جهت طراحی و بهره برداری از این سیستم ها ضروری می باشد.

در بررسی جریان مایعات در میکروکانال ها و در زمان عدم حضور اثرات سطح دیواره به مانند نیروهای الکترواستاتیکی^۴ و الکترواسمتیک^۱، انتظار نداریم که جریان تغییری بنیادی نسبت به تقریب هایی که با فرض محیط پیوسته در کاربردهای سیال در ابعاد معمولی داشتیم به وجود آید.

¹ - Chip
² - Microprocessor
³ - Lasir
⁴ - electro kinetic

قادلحاك^۲ [۶] چنین دریافت که مایعاتی چون آب را می توان محیطی پیوسته و براساس نتایجی که از تئوری کلاسیک به دست آمده در نظر گرفت که این دریافت برای کانال هایی با عرض ۱ میکرومتر بیشتر کارایی دارد. با وجود این حالت های متعددی از مسائل وجود دارد که نیاز به مطالعات بیشتر جهت اعلام نظر دارد. که برخی از آنها عبارتند از:

۱- بررسی آزمایشگاهی اعتبار معادله های انتقال جریان لایه ای و جریان مغشوش، ضریب اصطکاک جریان لایه ای و معادلات انتقال حرارتی که براساس فرضیات کلاسیک برای کاربرد در میکروکانال هایی که در آنها شاهد تغییری در پدیده های انتقال یا بروز پدیده فیزیکی جدیدی نیستیم، همچنین آزمایشاتی برای بررسی انتقال جرم و مومنتم و حرارت و فرایندهای انتقال جرم.

۲- بررسی پدیده گذار از جریان لایه ای به جریان مغشوش، در مقیاس میکرو و با دقت به ارزیابی های آزمایشگاهی مربوط به این کار.

۳- اثرات بزرگی نسبی مقادیر مربوط به زبری نسبی سطح برای جریان با توجه به این که مقادیر مرتبط با زبری سطح که در میکروکانال ها با آن سروکار داریم بسیار بیشتر از مسائل با مقیاس معمولی می باشد همچنین اثر زبری بر گذار از جریان لایه ای به مغشوش، ضرایب اصطکاک و انتقال حرارت در این گذار.

۴- بررسی اعتبار مقادیر ثابتی که به روش های آزمایشگاهی برای مقیاس معمولی به دست آمده اند، مانند افت های مربوط به تغییر سطح مقطع افت در خمیدگی لوله ها و نظایر آن که این مقادیر که از آزمایشات جریان سیال در مقیاس معمولی به دست آمده اند. مانند افت های مربوط به تغییر سطح مقطع افت در خمیدگی لوله ها و نظایر آن که این مقادیر که از آزمایشات جریان سیال در مقیاس معمولی حاصل شده اند باید با توجه به شرایط حاکم بر مقیاس میکرو نسبت به کار بردن آنها با توجه زیادی عمل کرد.

به چند دلیل ابعاد گذرگاه جریان در کاربردهای انتقال حرارت گرایش به سمت مقادیر کمتر و در مقیاس میکرو دارد:

- ۱- نقش انتقال حرارت در مقیاس میکرو بسیار پررنگ تر و موثرتر است.
- ۲- نیاز تجهیزات میکروالکترونیک برای انتقال بیشتر حرارت هم زمان با توسعه و تحول آن تجهیزات.
- ۳- اضطراری که به واسطه کاربرد روزافزون و تنوع رو به گسترش تجهیزات مقیاس میکرو که نیاز به خنک کاری دارند، به وجود می آید.

¹ - electro osmotic

² - Gad-el - Hak

با استفاده از کانال های با ابعاد کوچکتر به انتقال حرارت با کارایی بالاتری دست می یابیم، هر چند که بر واحد طول افت فشار بیشتری را نیز شاهد خواهیم بود. چگالی حجمی بیشتر انتقال حرارتی - که لازمه تکنیک های تولید پیشرفته و طراحی های مسیرهای جریان پیچیده تر است - بر ضرورت توسعه میکروکانال ها برای انتقال حرارت تأکید دارد، به طوری که بهینه سازی هر یک از کاربردهای متنوع میکروکانال ها نتایج جدیدی برای ابعاد کانال به دست می دهد، به عنوان مثال در صنعت تبرید و سردخانه^۱ استفاده از تیوپ های به قطر ۶ تا ۸ میلیمتر با استفاده از میکروپره ها^۲ دیگر جایگزین تیوپ های تخت با قطر زیاد شده است. در کاربردهای صنایع خودرو ابعاد رادیاتورها^۳ و اواپراتورها^۴ به حدود یک میلیمتر رسیده تا ما بین توان موردنیاز جهت پمپ کردن، انتقال حرارت و تمیزی کل سیستم، توازن خوبی برقرار شود. همچنین در کاربردهای تهویه مطبوع ساختمان امکان اتصال سیستم های خنک کن تجهیزات الکترونیکی و میکروالکترونیکی اتاق سرور^۵ به سیستم تهویه مطبوع ساختمان نیز در حال اجرایی شدن می باشد.

تجهیزات میکروالکترونیک با کاربردهای مختلفی از جمله در رایانه های شخصی، سرورها، دیویدهای^۶ لیزری، همواره خواست عمومی جهت افزایش چگالی شار حرارتی منتقل شده را به مقادیری بالاتر مطرح می نمایند، به گونه ای که عدد $200\text{W}/\text{Cm}^2$ که روزگاری رقمی بسیار بزرگ و دست نیافتنی جهت انتقال حرارت بود، امروزه به مقداری معمولی تبدیل شده است و هم اکنون دانش انتقال حرارت در تصور گذر از مرزهای $600 \sim 1000\text{ W}/\text{Cm}^2$ می باشد همچنین اختلاف دمای موردنیاز جهت انجام فرایند انتقال حرارت نیز در حال کوچکتر شدن در حد چند درجه سانتیگراد می باشد که این مقادیر بالای انتقال حرارت نیازمند کاهش فراوان در ابعاد میکروکانال ها بوده تا به خوبی با اجزای سیستم های خنک کننده جفت و جور شوند تا بتوانند حرکت سیال از منبع حرارتی را بهبود بخشند.

یک سیستم خنک کننده برای یک تجهیز با مقیاس میکرو به کانال های خنک کننده ای به ابعاد چند ده میکرومتر نیاز دارد نه کانال هایی با اندازه های معمولی ۱ تا ۳ میلیمتر، به علاوه چنین دستگاه هایی ممکن است در تعداد بیش از یکی در کنار یکدیگر و در فاصله بسیار نزدیکی به یکدیگر قرار گرفته باشند به گونه ای که در واقع سیستم عبور دهنده مایع مبرد برای سیستم های خنک کننده به صورت مشترک باشد. شکل (۱-۴) شمایی از یک سیستم خنک کن که از چندین مجموعه میکروکانال با کاربرد در خنک کاری یک سرور استفاده شده اند را نمایش می دهند [۷]. در واقع ترکیبی از مبدل های حرارتی دارای میکروکانال که مستقیماً روی یک چیپ یا درون یک چاه حرارتی^۷ که خود روی چیپ قرار گرفته و آب صفحات میکروکانال را که در معرض عبور جریان قرار دارند خنک می کند و آب صفحات میکروکانال را که در معرض عبور جریان قرار دارند خنک می کند و

¹ - Refrigeration

² - Micro fin

³ - Radiator

⁴ - Evaporator

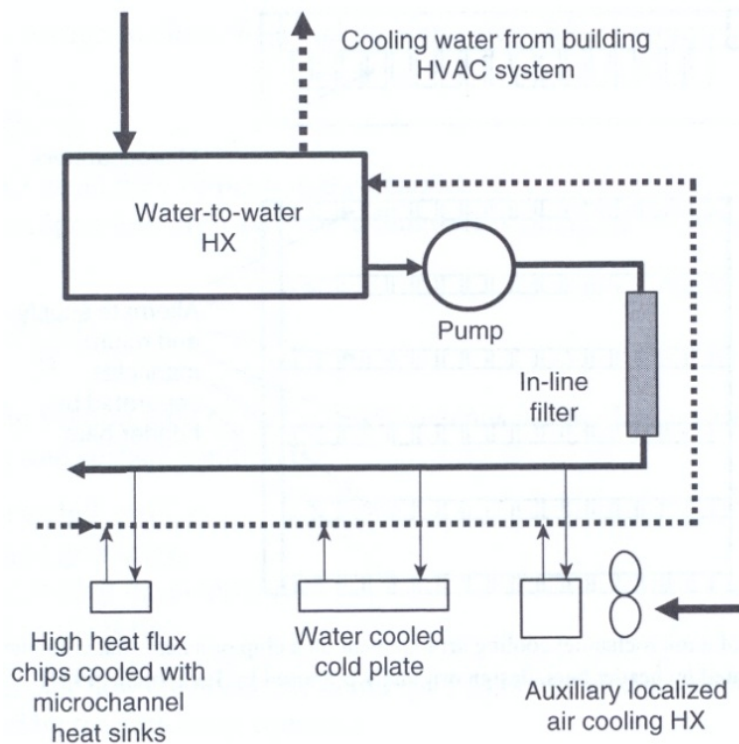
⁵ - Server room

⁶ - Diod

⁷ - heat sink

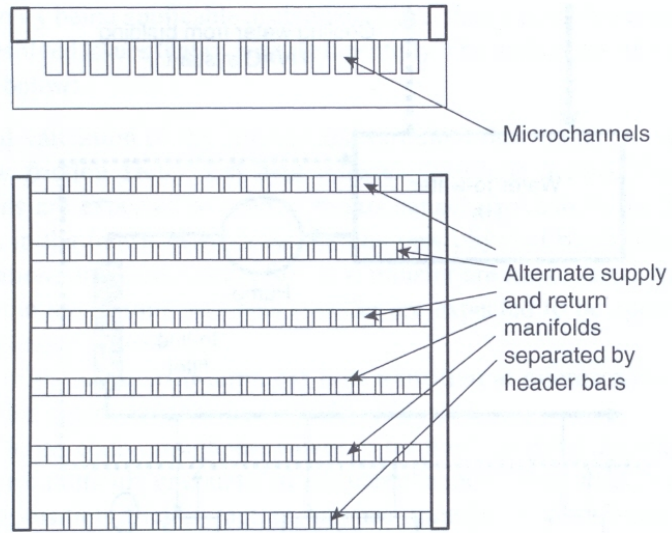
توکرمین و پیژ ۴ نخستین کسانی بودند که در سال ۱۹۸۱ کاربرد میکروکانال ها در چاه های حرارتی با کارایی بسیار بالا برای مدارات با تمرکز بسیار زیاد (VLSI) را مطالعه و آزمایش نموده و در آن زمان با اختلاف ۷۱ درجه سانتیگراد به رکوردی معادل 790 W/Cm^2 دست یافتند، میکروکانال مورد استفاده آنها از جنس سیلیکون و سیال خنک کننده مورد استفاده آب بود [۹].

هم اکنون با استفاده از تکنیک های جدید و عبور دادن نانوسیالاتی با ذرات بسیار ریز مس از داخل میکروکانال هایی از جنس سیلیکون، نرخ انتقال حرارت از میکروکانال ها بسیار بهتر شده است [۱۰].



شکل (۱-۴) : شمایی از سرورهای نزدیک به هم با چیپ های دارای شار حرارتی بالا که با چاه های حرارتی مجهز به میکروکانال، صفحات سرد و خنک کاری موضعی با هوا، همچنین با یک مدار ثانویه آب سرد که از سیستم تهویه مطبوع ساختمان گرفته شده است، خنک می شوند. [۷]

¹ - building HVAC sistem
² - Multichip module
³ - Tuckerman
⁴ - Tuckerman and Pease
⁵ - Very – large – Scale – Integrated Circuit



شکل (۵-۱): شمایی از سیستم خنک کاری به وسیله میکروکانال که در سال ۱۹۸۴ توسط توکرمن ارائه شده است [۸]