

# میکروتکنولوژی و سیستم‌های

## میکروالکترونیک

چاه‌های حرارتی میکروکانال سیلیکونی

نظریات و پدیده‌ها

مؤلفان:

ال. ژانگ

کی. ای. گودسون

تی. دبلیو. کنی

مترجم:

سعید ربیعی

دکتر لیان ژانگ<sup>1</sup>  
 نانوسیستم های ماژولار  
 خیابان 977 کامرشال  
 پالو آلتو، CA 94303  
 ایالات متحده  
 نشانی پست الکترونیک:  
[lian@stanfordalumni.org](mailto:lian@stanfordalumni.org)

پروفسور توماس دبلیو. کنی<sup>2</sup>  
 دانشگاه استنفورد  
 گروه مهندسی مکانیک  
 ترمن 540  
 استنفورد، CA 94305  
 ایالات متحده  
 نشانی پست الکترونیک:  
[kenny@mems.stanford.edu](mailto:kenny@mems.stanford.edu)

پروفسور کنت. ای. گودسون<sup>3</sup>  
 دانشگاه استنفورد  
 گروه مهندسی مکانیک  
 ساختمان 500، اتاق 500S  
 استنفورد، CA 94305  
 ایالات متحده  
 نشانی پست الکترونیک:  
[goodson@stanford.edu](mailto:goodson@stanford.edu)

ISSN 1439-6599

ISSN 978-3-642-07282-6 ISBN 978-3-662-09899-8 (e-Book)

DOI 10.1007/978-3-662-09899-8

---

<sup>1</sup> Lian Zhang

<sup>2</sup> Thomas W. Kenny

<sup>3</sup> kenneth E. Goodson

## پیش‌گفتار مترجم

## به نام خدا

با علم اگر عمل برابر گردد  
 کام دو جهان ترا میسر گردد

مغرور مشو به خود که خواندی ورقی  
 زان روز حذر کن که ورق بر گردد

ابوسعید ابوالخیر

امروزه پیشرفت در زمینه الکترونیک به سمت کوچکتر شدن و افزایش دما و حرارت تولید شده در تجهیزات الکترونیکی پیش می‌رود. از این رو بررسی عملکرد وسایل کنترل حرارت و دما در زمینه‌های مختلف حائز اهمیت می‌باشد. خنک کاری دماهای بالا و شار حرارتی زیاد تولید شده در مقیاس‌های مینیاتوری در مدارهای با عملکرد بالا از چالش‌های اولیه در مدیریت حرارتی در زمینه‌های میکروالکترونیک بوده است. در دو دهه‌ی گذشته، پژوهشگران نوآوری‌های بسیاری برای حل این چالش‌ها ارائه داده‌اند. چاه حرارتی میکروکانال<sup>4</sup> (MCHS) فناوری خلاقانه‌ای برای گرفتن و دفع گرمای زیاد در اندازه‌های کوچک است. کتابی که در پیش رو دارید برگردان فارسی کتاب Silicon Micrichannel Heat Sinks نوشته‌ی ژانگ، گودسون و کنی از مجموعه کتب MICROTECHNOLOGY AND MEM نشر شده توسط انتشارات اشپرینگر در باب سیستم حلقه‌بسته‌ی خنک‌کاری دوفاز میکروکانال سیلیکونی می‌باشد که طی دو دهه گذشته توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است.

در برگردان فارسی کتاب سعی شد تا حداکثر وفاداری به متن اصلی حفظ شود ولی سلاست و روانی خواندن مطالب نیز مدنظر بوده است. در اینجا لازم است از افرادی که در چاپ این کتاب به نحوی به مترجم یاری رساندند، به ویژه از مدیر انتشارات نشر دانشگاهی فرهمند و حروفچینی که چاپ این اثر را ممکن ساختند، و همچنین از دوست عزیزم آقای رئوف خسروی بابت مشاوره‌ی بی دریغ ایشان در این راه تشکر و سپاسگزاری نمایم.

سعید ربیعی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>4</sup> Micro Channel Heat Sink(MCHS)

### تقدیر و تشکر

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستیمان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاران که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

## پیش‌گفتار مؤلفان

افزایش سریع چگالی توان در مدارهای مجتمع (IC)<sup>5</sup> و روند حرکت به سمت بسته‌های الکترونیکی دارای چگالی بالا برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی، چشم‌های زیادی را به تکنولوژی‌های جدید در حوزه IC خیره کرده است. بر اساس قانون مور<sup>6</sup>، تعداد ترانزیستورهای ریزپردازنده‌های پنتیوم اینتل از  $7/5 \times 10^6$  در سال 1997 (پنتیوم 2) به  $55 \times 10^6$  در سال 2002 افزایش یافت. با توجه به رشد خیره‌کننده چگالی مدارهای مجتمع، مدیریت حرارت باید به گونه‌ای طراحی شود که عملکرد مؤثر این تراشه‌های پرسرعت و پرتوان را تضمین نماید. همرفت اجباری هوا<sup>7</sup> از دیرباز برای از بین بردن حرارت در چاه حرارتی بال‌دار و ماژول فن به کار می‌رفته است. در حال حاضر، با نرخ اتلاف توان 82 وات و شار حرارتی حدود  $62 \text{ W/cm}^2$  از یک پردازنده پنتیوم 4 با فرکانس هسته 3/06، نویز تولیدشده از فن‌های دارای سرعت چرخش بالا در حال نزدیک شدن به سقف قابل قبول برای انسان‌ها است. با این حال، انتظار می‌رود اتلاف توان در یک تراشه تکی تا سال 2005 از  $100 \text{ W/cm}^2$  فراتر برود و بنابراین تکنولوژی‌های جدید خنک‌کاری هوا باید جایگزین خنک‌کاری سنتی شوند. در میان روش‌های مختلف خنک‌کاری، چاه حرارتی میکروکانال دوفاز<sup>8</sup> یکی از امیدوارکننده‌ترین راه‌حل‌ها است. درک فرآیند جوشش و رفتار جریان دوفاز در میکروکانال، کلید پیاده‌سازی موفق این ابزار خواهد بود. کتاب حاضر متکی به تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه میکروساختارها و میکرووحسگرها، آزمایشگاه انتقال حرارت در مقیاس میکرو، و آزمایشگاه میکروسیتالات در دانشگاه استنفورد است که سیستم حلقه‌بسته خنک‌کاری دوفاز میکروکانال سیلیکونی در آن ابداع شد. هرچند چاه حرارتی میکروکانال طی دو دهه گذشته توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است ما اکثر تحقیقات کنونی بر مدل‌سازی و جریان تک‌فاز متمرکز هستند، و مطالعه تجربی بخصوص در

---

<sup>5</sup> Integrated Circuit

<sup>6</sup> Moore's Law

<sup>7</sup> Forced air convection

<sup>8</sup> two-phase microchannel heat sink

حوزه جریان دوفاز و انتقال حرارت به شدت ناکافی است. از این رو کتاب حاضر با تأکید بر طراحی تجربی سیستم، اندازه‌گیری انتقال حرارت و مدل‌سازی آن، و تأثیر ابعاد کوچک بر رژیم‌های جوشش و مکانیسم‌های جوانه‌زنی حباب، بر پدیده‌ی تغییر فاز و انتقال گرما در میکروکانال‌هایی با قطر زیر 1 میکرومتر متمرکز خواهد بود.

بحث جزئی درباره طراحی سیستم آزمایش و ارائه نتایج تجربی، مطالعه این کتاب را برای مهندسان و دانشمندان حوزه حرارت که دارای علایق تحقیقاتی در زمینه انتقال حرارت در مقیاس میکرو هستند، مفید ساخته است. تکنولوژی MEMS (سیستم‌های میکروالکترومکانیکی)<sup>9</sup> می‌تواند پژوهش در حوزه انتقال گرما را با فراهم ساخت پلتفرم‌های مجهز به قابلیت‌های کنترل و سنجش حرارت شتاب بخشد. دانشمندان، مهندسان و دانشجویان حوزه‌های حرارت و MEMS بحث ارائه شده در کتاب حاضر را برای تحقیقات خود روی جریان‌های میکروکانال و انتقال حرارت در مقیاس میکرو الهام‌بخش خواهند یافت. این اثر به عنوان مکمل کتب و منابع موجود درباره انتقال گرما حاوی حجم زیادی از داده‌های تجربی است.

همکاری با گروهی از دانشجویان و محققان مستعد دانشگاه استنفورد افتخار بزرگی بود. بخصوص از دکتر جائه مو کو<sup>10</sup> و دکتر لینان جیانگ<sup>11</sup> برای همکاری‌شان در مدل‌سازی انتقال گرما، اولین وانگ<sup>12</sup> و شیلاجیت بنرجی<sup>13</sup> برای کمک به انجام آزمایش‌های میکروکانال؛ پروفیسور خوان سانتیاگو<sup>14</sup>، دکتر جیمز میکلسن<sup>15</sup> و دکتر شولی زنگ<sup>16</sup> به خاطر بحث‌شان روی پمپ‌های الکترواسمزی سپاسگزاریم. جیمز ماویتی<sup>17</sup> و ادواردو سانچز<sup>18</sup> در شرکت اینتل توصیه‌های

<sup>9</sup> Micro-ElectroMechanical Systems

<sup>10</sup> Jae-Mo Koo

<sup>11</sup> Linan Jiang

<sup>12</sup> Evelyn Wang

<sup>13</sup> Shilajeet Benerjee

<sup>14</sup> Juan Santiago

<sup>15</sup> James Mikkelsen

<sup>16</sup> Shulin Zeng

<sup>17</sup> James Maveety

ارزشمندی درباره مدیریت حرارتی تراشه‌های توان بالا در اختیار ما گذاشتند. قدردان جیمز مک‌ویتتی<sup>19</sup>، پیتر گریفین<sup>20</sup>، رابین کینگ<sup>21</sup>، نانسی لاتا<sup>22</sup> و مهناز منصورپور به خاطر پیشنهادات سازنده و کمک به فرآیندهای ساخت دستگاه نیز هستیم. در نهایت، از برنامه DARPA HERETIC، شرکت اینتل و بورس تحصیلات تکمیلی استنفورد نیز بابت تأمین مالی و پشتیبانی از پروژه تشکر می‌کنیم. ساخت دستگاه در تأسیسات نانو ساخت استنفورد<sup>23</sup> با بودجه بنیاد ملی علوم<sup>24</sup> انجام شد.

گروه مهندسی مکانیک

دانشگاه استنفورد

سپتامبر 2003

لیان ژانگ

کنت ی. گودسون

توماس دبلیو. کنی

---

<sup>18</sup> Eduardo Sanchez

<sup>19</sup> James McVittie

<sup>20</sup> Peter Griffin

<sup>21</sup> Robin King

<sup>22</sup> Nancy Latta

<sup>23</sup> Stanford Nanofabrication Facilities

<sup>24</sup> National Science Foundation

## فهرست مطالب

13.....	1 مقدمه
13.....	1-1 مرور کلی: قانون مور و خنک کاری IC
23.....	2-1 میکروخنک کننده های الکترواسمزی
25.....	1-2-1 پمپ های الکترواسمزی
27.....	2-2-1 چاه های حرارتی میکروکانال دوفاز
28.....	3-1 دامنه کتاب
31.....	2 چاه های حرارتی میکروکانال دوفاز: مشکلات و چالش ها
31.....	1-2 پیشینه: جریان داخلی همرفت اجباری
31.....	1-1-2 جریان داخلی در کانال های میکرومقیاس
34.....	2-1-2 جریان دوفاز در میکروکانال ها
36.....	2-2 یک چاه گرمایی میکروکانال مجهز به ابزار سنجش
37.....	1-2-2 طراحی چاه گرمایی مجهز به ابزار سنجش
40.....	2-2-2 ساخت دستگاه
42.....	3-2 نتایج تجربی
43.....	1-3-2 سیستم آزمایش
45.....	2-3-2 کالیبراسیون دماسنج
48.....	3-3-2 خنک کاری همرفت اجباری تک فاز
49.....	4-3-2 خنک کاری همرفت اجباری دوفاز
57.....	4-2 مشکلات و چالش ها
62.....	3 یک سیستم آزمایشی حرارتی با میکروکانال های خودایستا
62.....	1-3 عایق بندی حرارتی میکروکانال ها - کانسپ طراحی
66.....	2-3 توزیع گرما - مدل مقاومت حرارتی



- 71..... 3-3-3 دماسنجی – اندازه گیری دمای دیواره
- 72..... 1-3-3 مقاومت سیلیکونی آلاینده در دو نقش گرم کن و دماسنج
- 75..... 2-3-3 گرم کن های آلومینیومی و دماسنج های سیلیکونی آلاینده
- 77..... 3-3-3 گرم کن ها و دماسنج های پلی سیلیکونی آلاینده
- 79..... 4-3-3 سایر روش های دماسنجی
- 82..... 4-3-3 سیستم های آزمایشی و اکتساب داده
- 82..... 1-4-3 پیکربندی سیستم آزمایشی
- 86..... 2-4-3 پیکربندی سیستم اکتساب داده
- 92..... 5-3 ساخت دستگاه های تک کاناله مجهز به ابزار سنجش
- 97..... 4 اندازه گیری و مدل سازی جریان دوفاز در میکروکانال ها
- 97..... 1-4 مرور مطالعات پیشین
- 99..... 2-4 پارامترهای طراحی دستگاه های آزمایش
- 103..... 3-4 اندازه گیری جریان دوفاز
- 103..... 1-3-4 تحلیل خطای اندازه گیری
- 104..... 2-3-4 اندازه گیری دستگاه چندکاناله
- 108..... 3-3-4 اندازه گیری دستگاه تک کاناله
- 111..... 4-3-4 الگوهای جریان
- 112..... 4-4 مدل سازی جریان داخلی دوفاز
- 113..... 1-4-4 برآورد اتلاف گرما
- 116..... 2-4-4 مدل یک بُعدی المان های حجمی محدود برای جریان داخلی دوفاز
- 120..... 5-4 بحث
- 124..... 5 رژیم های جوشش و سیگنال های گذرای مرتبط با تغییر فاز
- 124..... 1-5 پیشینه: رژیم های جوشش در کانال های بزرگ و کوچک

- 124.....1-1-5 جوشش جوانه‌ای در لوله‌های افقی بزرگ
- 125.....2-1-5 جوشش در میکروکانال‌ها - مطالعات پیشین
- 127.....2-5 پارامترهای طراحی دستگاه‌های آزمایش
- 130.....3-5 تصویربرداری جوشش جوانه‌زنی در میکروکانال‌ها
- 140.....1-3-5 جوانه‌زنی حباب در میکروکانال‌ها
- 134.....2-3-5 الگوهای جریان دوفاز در میکروکانال‌ها
- 140.....4-5 خصوصیات گذرای جریان دوفاز
- 140.....1-4-5 نوسانات گذاری فشار در طول تغییر فاز
- 149.....2-4-5 افت فشار در طول تغییر فاز
- 151.....3-4-5 فراگرمایش گذرای دیواره در طول تغییر فاز
- 152.....5-5 بحث
- 154.....6 جوشش جوانه‌زنی پیشرفته در میکروکانال‌ها
- 154.....1-6 پیشینه: جوشش جوانه‌زنی در میکروکانال‌ها
- 154.....1-1-6 فرضیه "تبخیر فضا"
- 156.....2-1-6 جوانه‌زنی ناهمگن روی سطح جامد
- 156.....2-6 دستگاه‌های آزمایش میکروکانال با دیواره اصلاح‌شده
- 159.....1-2-6 نقاط جوانه‌زنی در کانال‌های دیواره‌تخت
- 160.....2-2-6 پارامترهای طراحی دستگاه آزمایش
- 164.....3-6 تغییر فاز در کانال‌های سیلیکونی با دیواره‌های تخت
- 164.....1-3-6 زبری سطحی ناشی از اچینگ پلاسما
- 165.....2-3-6 کانال‌های سیلیکونی اچینگ پلاسما و آب دیونیزه
- 171.....3-3-6 کانال‌های سیلیکونی اچینگ شده با پلاسما و سورفکتانت
- 173.....4-3-6 نمودار رژیم جوشش برای کانال‌های دیواره‌تخت

- 4-6 تغییر فاز در کانال های سیلیکونی با دیواره های اصلاح شده ..... 177
- 1-4-6 جوانه زنی روی سطح اصلاح شده ..... 178
- 2-4-6 اندازه گیری دمای دیواره در طول تغییر فاز ..... 179
- 3-4-6 نمودار رژیم جوشش برای کانال های دارای دیواره اصلاح شده ..... 184
- 5-6 بحث ..... 186
- 7 نتیجه گیری ها ..... 190
- 1-7 تغییر فاز در میکروکانال هایی با قطر زیر 150 میکرومتر ..... 190
- 1-1-7 مکانیسم های جوانه زنی حباب ..... 191
- 2-1-7 رژیم های جریان دوفاز در میکروکانال ها ..... 192
- 3-1-7 خصوصیات گذرا ..... 194
- 4-1-7 مدل انتقال گرمای دوفاز برای کانال های زیر 100 میکرومتر قطر ..... 194
- 5-1-7 قواعد کلی طراحی برای چاه های حرارتی میکروکانال دوفاز ..... 194
- 2-7 یک طراحی نمونه از چاه های حرارتی میکروکانال دوفاز ..... 196
- 3-7 مطالعات آتی ..... 198
- پیوست الف. نمودار جریان فرآیند برای دستگاه های تک کاناله با گرم کن و دماسنج  
ترکیبی ..... 200
- پیوست ب. نمودار جریان فرآیند برای دستگاه های تک کاناله با گرم کن و دماسنج  
جداگانه ..... 203
- فهرست منابع ..... 206

# فصل 1

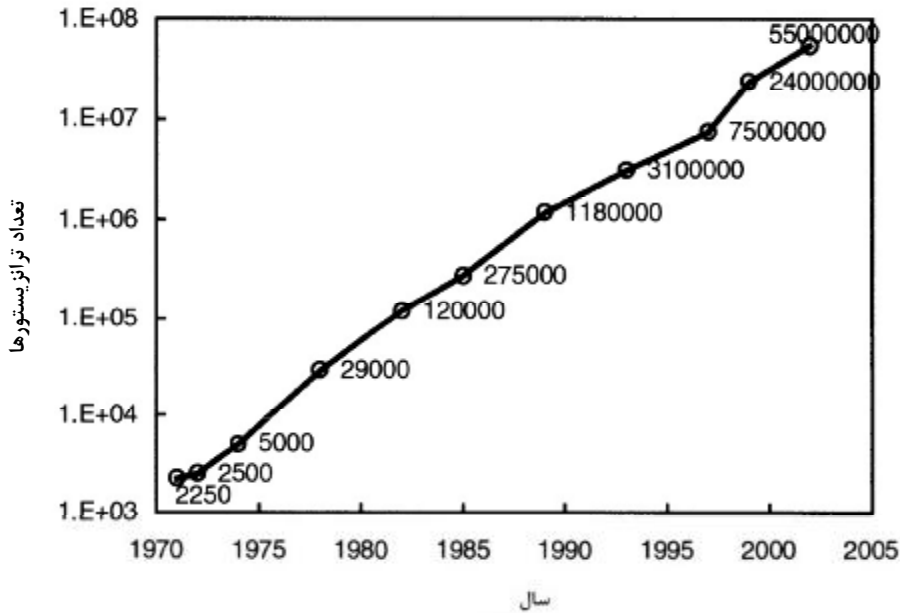
## مقدمه

### 1-1 مرور کلی: قانون مور و خنک کاری IC

در سال 1965، دکتر مور از شرکت اینتل پیش‌بینی کرد که تعداد ترانزیستورهای یک مدار یکپارچه (IC) هر 18 ماه دو برابر خواهد شد؛ این پیش‌بینی به قانون مور معروف است [1-1] و از آن زمان تا به امروز با وجود پیشرفت‌های مداوم در تکنولوژی‌های ساخت همچنان به قوت خود باقی است. به عنوان مثال در شکل 1-1، تعداد ترانزیستورهای یک تراشه CPU واحد پردازنده مرکزی) اینتل از 2250 در سال 1971 (4004) به  $3/1 \times 10^4$  در سال 1993 (پنتیوم) رسید؛ و در حال حاضر  $55 \times 10^6$  ترانزیستور روی آخرین پردازنده پنتیوم 4 (با فرکانس هسته 3/06 گیگاهرتز) قرار دارد که در نوامبر 2002 معرفی شد [2-1].

شکل 1-1. تعداد ترانزیستورهای یکپارچه روی یک تراشه CPU اینتل قانون مور را بازتاب می-

دهد [1-1]



افزایش سریع تعداد ترانزیستورهایی که روی تراشه‌ها قرار می‌گیرند، تکنولوژی بسته‌بندی، به خصوص مدیریت حرارت را به واسطه اجازه ورود توان بیشتر به داخل تراشه به چالش کشیده است. به همین دلیل خنک‌کاری تراشه IC (مدار یکپارچه) در طول دهه گذشته توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. همرفت اجباری هوا از طریق چاه‌های حرارتی و فن‌ها در اوایل دهه 90 برای خنک‌کاری CPU معرفی شد. شکل 1-2(الف) تصویر یک پردازنده پنتیوم 4 با چاه حرارتی متصل و ماژول فن خنک‌کننده را نشان می‌دهد. در شکل 1-2(ب)، تراشه به یک حامل تراشه واگرد<sup>25</sup> متصل است و اپوکسی حرارتی بر ضلع پشتی اعمال شده است تا همچون پایه‌ی چاه حرارتی به درپوش مواد متصل شود. برای تحویل جریان هوای اجباری به چاه حرارتی از یک فن CPU استفاده شده است. پاتل<sup>26</sup> مرور گسترده‌ای روی تاریخچه همرفت اجباری هوا در

<sup>25</sup> flip-chip

<sup>26</sup> Patel

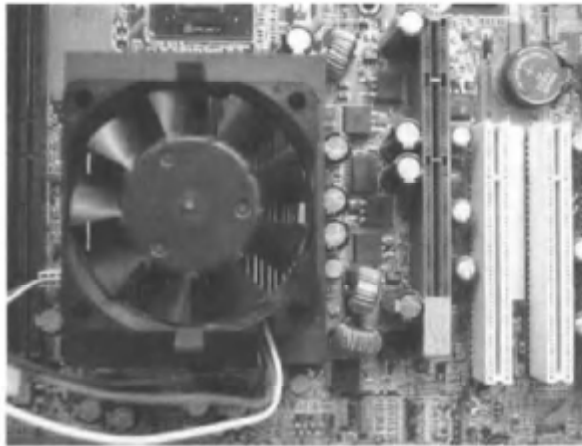
تراشه‌های CPU، شامل مؤلفه‌ها و بحث مقاومت‌های حرارتی که در شکل 1-2 (پ) به تصویر کشیده شده‌اند انجام داده است [1-3].

در مدار حرارتی،  $R_{\text{interface}}$  و  $R_{\text{heatsink}}$  به ترتیب همرفت در سطح تماس بسته‌بندی میان تراشه و چاه گرمایی و همرفت از طریق چاه گرمایی را نشان می‌دهند. سازنده، حداکثر دمای مجاز تراشه و حداکثر دمای هوای محیطی را به ترتیب  $85^\circ\text{C}$  و  $40^\circ\text{C}$  مشخص کرده است. به منظور پاسخ به الزامات دمایی، کل مقاومت گرمای مجاز به  $R_{\text{interface}} + R_{\text{heatsink}} \leq (T_{\text{chip}} - T_{\text{ambient}}) / \text{power}$  محدود است، یعنی  $R_{\text{interface}} + R_{\text{heatsink}} \leq 45^\circ\text{C} / \text{power (W)}$ .

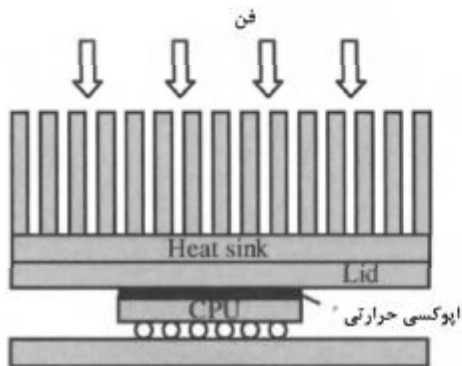
در اوایل دهه 90، به دلیل اتلاف پایین توان تراشه (کمتر از 15 وات)، بسته‌بندی آرایه پایه – شبکه‌ای بسته‌ای<sup>27</sup> با  $R_{\text{interface}} \approx 1.5^\circ\text{C/W}$  تنها به  $R_{\text{heatsink}}$  با مقدار  $1/5 - 1^\circ\text{C/W}$  نیاز دارد. از میانه دهه 90 به بعد، بسته‌بندی تراشه واگرد سطح مقاومت تماس را به میزان قابل توجهی کاهش داد چرا که در حال حاضر ضلع پشتی تراشه CPU به بخشی از مسیر انتقال گرما تبدیل شده است. با درپوش معمولاً  $4 \times 40 \times 40$  میلی‌متری (همرفتی گرمایی  $210 \text{ W/m-K}$ )، اپوکسی حرارتی با ضخامت  $0/05$  میلی‌متری، و اندازه تراشه  $18 \times 18 \times 0/5$ ، مقاومت سطح تماس  $R_{\text{interface}}$  تنها حدود  $0/25^\circ\text{C/W}$  خواهد بود. اما توان تراشه در گذر سالیان به سرعت افزایش یافته است. تراشه‌های CPU کنونی نرخ اتلاف گرمای 50 تا 80 وات دارند که مقاومت حرارتی مجاز را به  $0/56^\circ\text{C/W}$  رسانده است؛ منظور آن است که  $R_{\text{heatsink}}$  باید کوچک‌تر از  $0/3^\circ\text{C/W}$  باشد.

<sup>27</sup> pingrid-array packaging

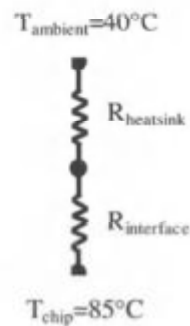
شکل 1-2. خنک کاری همرفت اجباری هوا در یک تراشه CPU و مدار حرارتی



(الف). فن و چاه گرمایی متصل به پردازنده پنتیوم 4



حامل تراشه واگرد  
(ب) شماتیک مازول چاه گرمایی

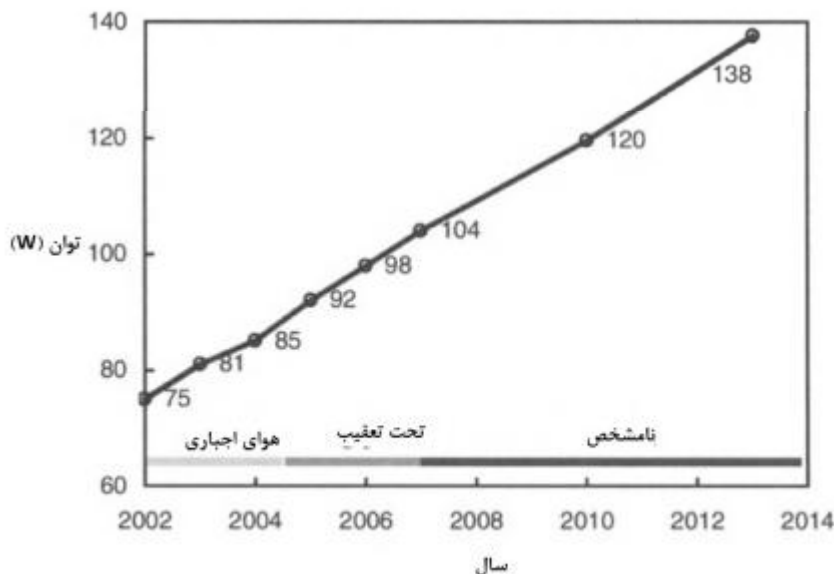


(پ) مدار حرارتی

در حال حاضر، سازندگان، استفاده از چاه حرارتی بالدار را در پردازنده پیشرفته پنتیوم 4 در بسته 478-پین با فرکانس هسته 3/06 توصیه کرده‌اند که ابعاد آن  $70 \times 70 \times 30$  میلی‌متر است. ابعاد فن CPU حدود  $70 \times 70 \times 30$  میلی‌متر است و جریان هوای معادل با  $10^6$  ml/min را با سرعت چرخش 3500-6000 rpm فراهم می‌کند. از آنجایی که نویز 35 تا 45 دسی بلی فن برای شنوایی انسان زیاد است، فن‌ها در حالت سرعت متغیر کار می‌کنند و بالاترین سرعت تنها مربوط به دمای مشخصی است که توسط سازنده تعریف می‌شود.

شکل 1-3. پیش‌بینی‌های ITRS برای الزامات بسته‌بندی و مونتاژ برای تراشه‌های IC تک-

عملکرد، به‌روزرسانی 2002 [4-4]



با این حال، همسو با کاهش اندازه هسته CPU و یکپارچه‌سازی گش روی تراشه، خود تراشه به یک منبع حرارت غیریکنواخت تبدیل شده است که می‌تواند باعث افزایش  $R_{interface}$  و رسیدن آن به  $0/35 \text{ } ^\circ\text{C/W}$  شود. با رسیدن اتلاف توان هسته به  $100 \text{ W/cm}^2$  در چند سال آینده، به مقاومت چاه حرارتی کمتر از  $0/1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$  نیاز خواهد بود. به بیان دیگر، انتظار می‌رود به زودی یک چاه حرارتی بزرگ به ابعاد  $150 \times 150 \times 30$  عرضه شود. با این حال - بنا به گزارش ITRS (نقشه راه بین‌المللی تکنولوژی برای نیمه‌رساناها<sup>28</sup>) این پایان داستان نیست [1-4]. میزان اتلاف توان از یک تراشه در یک تناسب خطی با زمان در حال افزایش است و انتظار می‌رود که از آغاز سال 2007، روش‌های بسته‌بندی کنونی دیگر جوابگو نباشند.

همانطور که در شکل 1-3 مشاهده می‌شود، نرخ فعلی اتلاف گرما به مقدار 82 وات (پردازنده پنتیوم 4 اینتل با فرکانس هسته  $3/06$  هرتز) در حال نزدیک شدن به حد همرفت اجباری هوا است. به دلیل انتقال ضعیف گرما توسط هوا، نسبت حرارت بالاتر به نرخ جریان هوای بیشتر و به

<sup>28</sup> International Technology Roadmap for Semiconductors



تبع آن به فن‌های بزرگ‌تر نیاز دارد، اما نویز و لرزش ایجادشده توسط فن‌ها در نهایت از آستانه مجاز برای شنوایی انسان‌ها فراتر خواهد رفت. برخی بهسازی‌ها در تکنولوژی‌های فعلی مدار در دست انجام هستند، برای مثال طراحی‌های بهینه چاه‌های حرارتی فلزی بال‌دار و ملاحظات گرمایی در طراحی جانمایی ICها. با این حال، بر اساس پیش‌بینی‌ها، همرفت اجباری هوا به سختی می‌تواند به بیش از  $100 \text{ W/cm}^2$  کاهش حرارت دست پیدا کند. بنابراین، در چند سال آینده، اتلاف توان در تراشه‌ها به سطحی خواهد رسید که نیازمند توسعه تکنولوژی‌های جدید مدیریت حرارت خواهد بود.

از جمله روش‌های عملی می‌توان به خنک‌کاری ترموالکترونیک<sup>29</sup>، جوشاندن مستقیم در استخر غوطه‌وری<sup>30</sup>، لوله‌های گرما<sup>31</sup>، ضربه جت مایع یا خنک‌کاری پاششی<sup>32</sup> و جوشش همرفتی اجباری در میکروکانال‌ها اشاره کرد. مورگان<sup>33</sup> و همکاران [5-1]، ژو<sup>34</sup> و همکاران [6-1] و موداوار<sup>35</sup> [8-1، 4-1] تکنیک‌های مختلف خنک‌کاری را در مقالات مروری خود مقایسه کردند. همه این تکنیک‌ها بالقوه می‌توانند به مقاومت حرارتی زیر  $0/1 \text{ }^\circ\text{C/W}$  دست پیدا کنند.

بر اساس اثر پلتیر<sup>36</sup>، خنک‌کننده‌های ترموالکتریک، همانطور که در شکل 4-1 تصویر شده است، اتصالات PN و یک منبع تغذیه DC را تشکیل می‌دهند. وقتی الکترون‌ها از یک نوع نیمه‌رسانا به نوع دیگر پمپاژ می‌شود، انرژی از اتصال سرد جذب شده و در اتصال گرما منتشر می‌شود. بنابراین می‌توان از اتصالات در کاربردهای خنک‌کاری یا گرمایش استفاده کرد. خنک‌کننده‌های تجاری در دسترس قرار دارند. از جمله مزایای این دستگاه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بسیار فشرده، جمع‌وجور و معمولاً کمتر از  $5 \times 60 \times 60$  میلی‌متر هستند؛ هیچ قطعه متحرکی

<sup>29</sup> thermoelectric cooling

<sup>30</sup> direct immersion pool boiling

<sup>31</sup> Heat pipes

<sup>32</sup> spray cooling

<sup>33</sup> Morgan

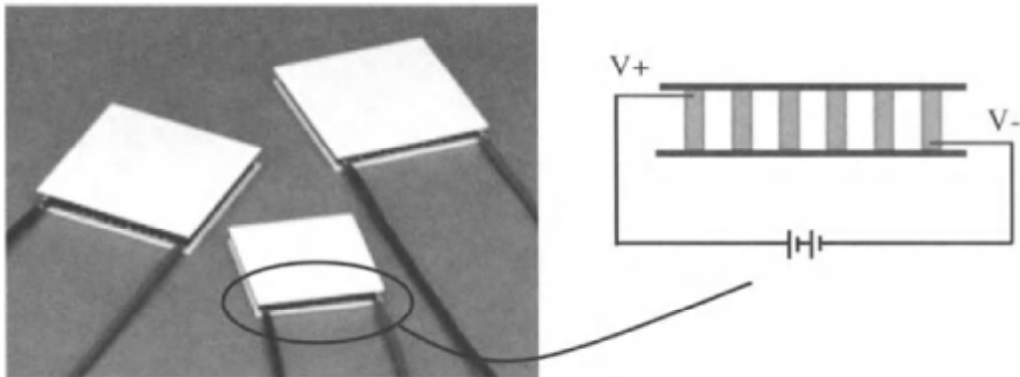
<sup>34</sup> Zhou

<sup>35</sup> Mudawar

<sup>36</sup> Peltier effect

ندارند؛ و در اتصال سرد می‌توانند در دماهای زیر دمای محیط کار کنند که به بهبود طور عمر دستگاه‌ها در کاربردهایی همچون مخابرات نوری کمک می‌کند. با این حال، مصرف توان این نوع خنک‌کننده‌ها بالا است - یک خنک‌کننده ترموالکتریک از برند Melcor™ UT8-12-40-FI که 78 وات گرما از بین می‌برد به 128/8 وات (8 آمپر، 16/1 ولت) انرژی الکتریکی نیاز دارد. در حقیقت گرمایی که این خنک‌کننده‌ها از تراشه IC جذب می‌کنند کمتر از انرژی مصرفی آن-هاست؛ بنابراین، باید بیش از دو برابر توان حرارتی از سمت رد گرما<sup>37</sup> حذف شود. به واسطه همین محدودیت، انتظار نمی‌رود خنک‌کننده‌های ترموالکتریک بتوانند در تراشه‌های بالاتر از 100 وات قدرت عملکرد مؤثری از خود به نمایش بگذارند.

شکل 1-4. تصویر و شماتیک خنک‌کننده‌های ترموالکتریک



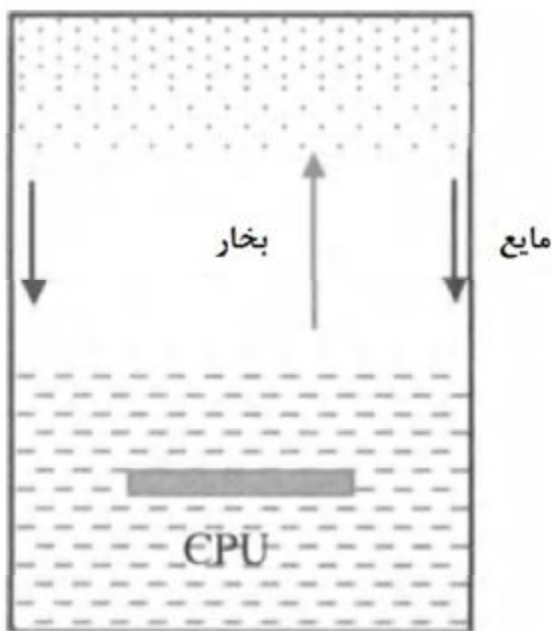
جوشش استخری<sup>38</sup> متکی به چرخش پسیو یک سردکننده دی‌الکتریک در داخل مخزن آب-بندی شده‌ای است که برای خنک‌کاری ماژول الکترونیکی چندتراشه‌ای پیشنهاد شده است [1-9 - 1-11]. همانطور که در شماتیک شکل 1-5 مشاهده می‌شود، تراشه IC کاملاً در استخر مایع غوطه می‌شود. نیروی شناوری بخار را به بالا حرکت می‌دهد؛ و پس از چگالش آن، مایع تحت نیروی جاذبه به استخر باز می‌گردد. جوشش استخری می‌تواند از طریق تغییر فاز مایع - بخار به

<sup>37</sup> heat rejection

<sup>38</sup> Pool boiling

نرخ انتقال حرارت بالا دست یابد و دمای تراشه را حول و حوض یک دمای تقریباً ثابت نگاه دارد. با سردکننده دیالکتریک، خنک کاری با شار حرارتی  $20 \text{ W/cm}^2$  به دست می آید؛ و با فرورسرمایش<sup>39</sup> با مایع رسیدن به  $60 \text{ W/cm}^2$  قابل انتظار است (دمای استخر مایع زیر نقطه جوش مایع حفظ می شود) [9-1]. با این حال غوطه وری تراشه های IC در مایع دیالکتریک و مکانیسم های تغییر فاز سردکننده های دیالکتریک که درک چندانی از طرز کارشان وجود ندارد پیاده سازی چنین سیستمی را دشوار می سازند.

شکل 1-5. شماتیک سیستم جوشش استخری



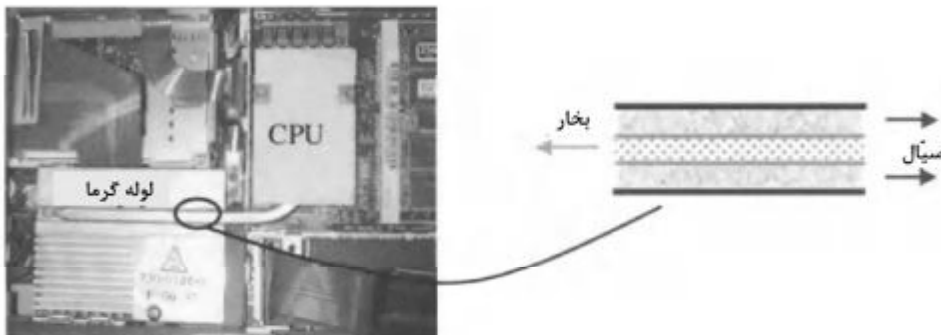
مخزن آب بندی شده

لوله های گرما از نظر تجاری در کاربردهای مدیریت گرمای نوت بوک ها استفاده می شوند [1-12 – 16-1]. شکل 1-6 سیستم لوله گرمایی را نشان می دهد که در پاوربوک مکینتاش با پردازنده 400 G3 مگاهرتز گنجانده شده است. همانطور که در این تصویر مشاهده می شود، لوله گرما

<sup>39</sup> sub-cooling

متشکل از یک کانال بخار است که توسط یک ساختار فتیله‌ای احاطه شده است. نیروی موینگی سیال متحرک را بین منطقه تبخیر و منطقه چگالش می‌چرخاند و گرما از طریق تغییر فاز مایع - بخار جذب می‌شود. لوله‌های گرمای مورد استفاده در لپ‌تاپ‌ها گرمایی معادل با حدود  $10 \text{ W/cm}^2$  را از بین می‌برند. انتظار می‌رود سیستم  $\text{CPL}^{40}$  بهینه که بسط تکنولوژی لوله گرما است حتی بتواند شارهای حرارتی بالاتری را از بین ببرد [17-1 - 18-1]. با این حال، حجم مایع متحرکی که می‌تواند در ساختار فتیله‌ای قرار بگیرد بسیار محدود است و مانع استفاده از لوله‌های گرما در کاربردهای توان بالا می‌شود.

شکل 1-6. سیستم لوله گرما در کامپیوتر پاوربوک مکینتاش با پردازنده 400 G3 مگاهرتز



طی چندین دهه در صنعت برای خنک‌کاری‌های بزرگ مقیاس از همرفت اجباری در کانال‌ها و ضربه جت مایع استفاده می‌شده است. بیست سال پیش، تاکرمن<sup>41</sup> و پیس<sup>42</sup> برای اولین بار ایده چاه‌های حرارتی میکروکانال سیلیکونی را پیشنهاد و پیش‌بینی کردند که باید امکان خنک‌کاری همرفتی اجباری تک‌فاز در میکروکانال‌ها برای چگالی‌های توان بالاتر از  $5000 \text{ W/cm}^2$  در مدار فراهم شود [19-1]. سه سال بعد، کیپر<sup>43</sup> دفع گرمای بالاتر از  $500 \text{ W/cm}^2$  با استفاده از تکنیک ضربه جت مایع مستقیم در مقیاس میکرو از یک صفحه منفذدار به تراشه‌های IC را

<sup>40</sup> capillary pumped loop

<sup>41</sup> Tuckerman

<sup>42</sup> Pease

<sup>43</sup> Kiper

پیش‌بینی کرد. ما<sup>44</sup> و برگلس<sup>45</sup> با ترکیب این تکنیک با جوشش، دفع گرمای  $70 \text{ W/cm}^2$  را با FC-72 به نمایش گذاشتند [21-1]. افزون بر این، ثابت شده است که خنک‌سازی پاششی می‌تواند با دفع گرمای  $100 \text{ W/cm}^2$  [24-1] در رژیم دوفاز، حتی به قابلیت‌های بالاتر در از بین بردن گرما دست پیدا کند [24-1 – 22-1].

با تکنولوژی MEMS (سیستم‌های میکروالکترومکانیکی) فعلی، ساخت چاه‌های حرارتی میکرو نظیر جت‌های میکرو و میکروکانال‌های شکل 7-1 امکان‌پذیر شده است. به دلیل تطبیق‌پذیری مواد و فرآیند، این چاه‌های حرارتی میکرو می‌توانند سیال را به صورت موضعی به تراشه IC تحویل داده و گرمای تراشه را از بین ببرند؛ حتی یکپارچه کردن چاه حرارتی با تراشه IC نیز امکان‌پذیر است. ضربه جت مایع در مقیاس میکرو برای ماژول‌های چندتراشه طراحی شده است [25-1]. جت‌های هوای کوچک با اندازه 150 تا 500 میکرو نیز توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف ساخته شده‌اند [28-1 – 26-1]. جدیدترین آزمایش‌ها حاکی از آن است که ضربه جت مایع دوفاز گرمای بیش از  $100 \text{ W/cm}^2$  را با نسبت جریان آب زیر  $15 \text{ ml/min}$  از بین می‌برد [30-1 – 29-1]. در آزمایش‌های تاکرمین و پیس، یک چاه هوایی میکروکانال موفق به از بین بردن گرمای  $790 \text{ W/cm}^2$  با افزایش دمای  $71^\circ \text{C}$  در نسبت جریان سیال  $600 \text{ ml/min}$  شد [19-1]. موداوار و مادوکس<sup>46</sup> نیز از بین بردن گرمای برابر با  $361 \text{ W/cm}^2$  را با اعمال روش خنک‌کاری همرفتی اجباری دوفاز بر سطح اصلاح‌شده و با استفاده از سردکننده دی‌الکتریک FC-72 گزارش دادند [31-1].

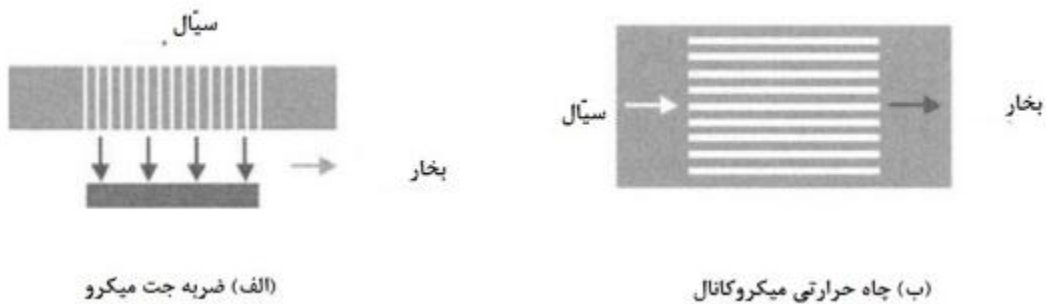
---

<sup>44</sup> Ma

<sup>45</sup> Bergles

<sup>46</sup> Maddox

### شکل 1-7. جت میکروی سیلیکونی و چاههای حرارتی میکروکانال



بر اساس مطالعه پاتل [1-3]، استفاده از خنک کاری سیال برای تراشه‌های دارای توان بالاتر به دلیل خصوصیات انتقال گرمای بهتر در سیالات، ضروری است. بخصوص در رژیم دوفاز، می‌توان از گرمای نهان برای دستیابی به نرخ بالاتر دفع گرما با افزایش نسبتاً پایین دمای تراشه استفاده کرد. با در نظر گرفتن تمام راه‌حل‌های موجود برای خنک‌کاری، جت‌های میکرو و کانال‌های میکرو از نظر تطبیق‌پذیری مواد و فرآیند با صنعت IC، فشردگی دستگاه و توان پایین مورد نیاز برای پمپاژ، امیدبخش‌ترین روش‌ها به شمار می‌روند.

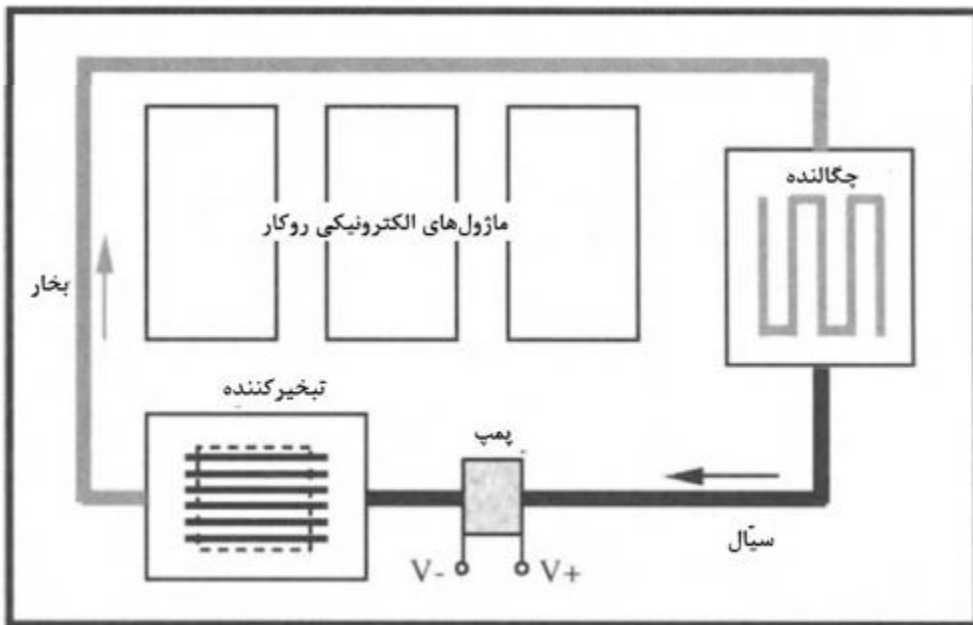
### 1-2 میکروخنک‌کننده‌های الکترواسمزی

لوله‌های گرمای تجاری‌سازی شده امکان استفاده از تغییر فاز مایع - بخار در مدیریت گرمای تراشه‌های IC را با موفقیت اثبات کرده‌اند. همانطور که پیش‌تر بحث شد، از آنجایی که حجم سیال درون سیستم لوله گرما بسیار محدود است، انتظار نمی‌رود این روش در کاربردهایی که به توان حرارتی بالاتری نیاز دارند مؤثر باشد. با این حال، اگر بتوان از یک پمپ خارجی برای فراهم ساختن انرژی پمپاژ کافی استفاده کرد، به گونه‌ای که دیگر نیازی به نیروی موئینگی نباشد، آنگاه نسبت جریان سیال را می‌توان به میزان قابل توجهی افزایش داد که نتیجه آن افزایش چشمگیر جذب گرما است. توسعه پمپ‌های الکترواسمزی پُرفشار [1-32 - 1-34] برای اولین بار در نظر گرفتن خنک‌کننده‌های سیالی یکپارچه را امکان‌پذیر ساخته است. خصوصیات جریان

پایین و پرفشار پمپ‌های الکترواسمزی در عین حال طراحی خنک‌کننده‌های میکروکانال تا قطر زیر 150 میکرومتر را تشویق می‌نماید.

شکل 1-8 شماتیک یک سیستم میکروخنک‌کننده دو فاز حلقه بسته را نشان می‌دهد که توسط محققان دانشگاه استنفورد ابداع شده است. این سیستم فشرده و روکار از یک پمپ الکترواسمزی که با ولتاژ کنترل می‌شود، یک تبخیرکننده و یک چگالنده تشکیل شده است. پمپ سیال متحرک را که در فاز مایع قرار دارد به چگالنده می‌فرستد که مستقیماً به تراشه IC متصل است. تغییر فاز در تبخیرکننده گرمای تولیدشده توسط IC را جذب کرده و فاز بخار به واسط اختلاف پتانسیل به سمت چگالنده حرکت می‌کند. در ادامه بخار، گرما را در چگالنده رها می‌کند و مجدداً به مایع تغییر فاز می‌دهد. مطالعات اخیر نرخ دفع گرمای 38 وات با مصرف 2 وات توان را نشان داده‌اند [1-35]. انتظار می‌رود سیستم نهایی بتواند با مصرف کمتر از 5 وات انرژی الکتریکی 200 وات گرما را از یک تراشه IC از بین ببرد.

شکل 8-1. شماتیک یک خنک کننده الکترواسمزی دوفاز حلقه بسته



از بحث درباره تکنیک های خنک کاری نتیجه می گیریم که خنک کاری دوفاز با میکروجت محفوظ یا با پیکربندی چاه حرارتی میکروکانال، بهترین گزینه برای تبخیرکننده است. در مقایسه با راهکار میکروجت، چاه حرارتی میکروکانال دوفاز پیاده سازی راحت تری دارد. کتاب حاضر در درجه اول به بحث درباره جریان دوفاز در چاه های حرارتی میکروکانال خواهد پرداخت. جزئیات مربوط به میکروجت های سیال را می توان در مطالعات گروه های تحقیقاتی دانشگاه استنفورد پیدا کرد.

### 1-2-1 پمپ های الکترواسمزی

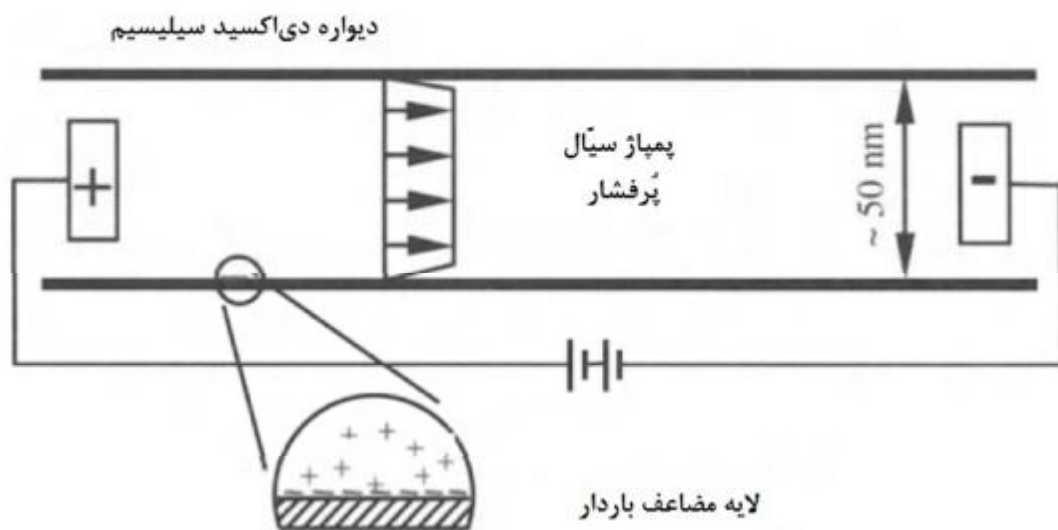
پمپ های الکترواسمزی زیر لایه مضاعف باردار<sup>47</sup> کار می کنند که در سطح تماس میان فاز مایع و سطح جامد نمایان می شود [32-1 – 34-1]. همانطور که در شکل 9-1 مشاهده می شود، وقتی مایع در تماس با سطح جامد قرار دارد، بارهای منفی روی دیواره جامد ظاهر شده، یون-

<sup>47</sup> charge double layer



های دارای مثبتی که در مایع حضور دارند را به جذب و یک لایه مثبت را در فاصله بسیار نزدیک به سطح تماس مایع - جامد تشکیل می‌دهند. وقتی میدان الکتریکی در مایع وجود دارد، یون‌های دارای بار مثبت به سمت کاتد حرکت کرده و مولکول‌های مایع را وادار به حرکت در همان جهت می‌کنند. اگر کانال جریان به اندازه کافی کوچک باشد، آنگاه نیروی کشش می‌تواند قابلیت بارگذاری با فشار بسیار بالا را تولید کند.

شکل 1-9. اصل عملیاتی پمپ‌های الکترواسمزی. با تشکر از خوان جی. سانتیاگو



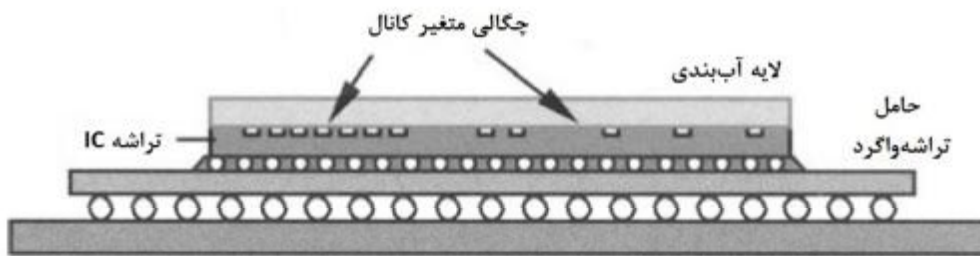
عملکرد پمپ‌های الکترواسمزی تابع مساحت سطحی در یک سلول پمپاژ است که در حال حاضر از ذرات بسته‌بندی شده با اندازه چندمیکرومتر ساخته می‌شود. آب دیونیزه (DI) بافری به عنوان سیال متحرک به کار می‌رود چرا که می‌تواند یون‌های فراوانی را برای تشکیل لایه‌های باردار فراهم نماید؛ اما در عین حال به اندازه کافی عایق‌بندی هست که بتوان یک میدان الکتریکی بزرگ روی سلول پمپاژ ایجاد کرد. با بهره‌گیری از مزیت ریزماشین‌کاری<sup>48</sup> حتی می‌توان پمپ‌های الکترواسمزی سیلیکونی ساخت و آن را با چاه حرارتی یکپارچه کرد. پمپ‌های الکترواسمزی ریزماشین‌کاری شده در حال حاضر در دست توسعه قرار دارند [1-34].

<sup>48</sup> micromachining

## 1-2-2 چاه‌های حرارتی میکروکانال دوفاز

چاه‌های حرارتی میکروکانال به دلیل ضریب انتقال گرمای جذاب خود که می‌تواند با همرفت اجباری دوفاز در مقایسه با همرفت اجباری هوا از 100 تا 1000 برابر افزایش یابد توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند [1-36 – 1-41]. این چاه‌های حرارتی در خنک‌کاری آرایه‌های دیود لیزری پُر توان استفاده می‌شوند و توانسته‌اند گرمایی معادل با  $500 \text{ W/cm}^2$  را از بین ببرند [1-42 – 1-44] افزون بر این، همرفت جوششی<sup>49</sup> بسیار امیدوارکننده تر ظاهر شده است چرا که برای رسیدن به مقاومت حرارتی چاه حرارتی به توان پمپاژ کمتری نسبت به همرفتی سیال تک‌فاز نیاز دارد.

شکل 10-1. شماتیک چاه حرارتی میکروکانال دوفاز



شکل 10-1 یک طرح پیشنهادی برای چاه حرارتی میکروکانال دوفازی است که مستقیماً به ضلع پشتی تراشه IC متصل به حامل تراشه‌واگرد وصل شده است. با حذف اپوکسی حرارتی و درپوش ضروری برای بسته‌بندی سنتی چاه حرارتی، یکپارچه‌سازی چاه حرارتی با تراشه IC می‌تواند مقاومت سطح تماس میان تراشه و چاه حرارتی را به میزان قابل توجهی کاهش داده، بازده دفع گرما را افزایش دهد. افزون بر ای، میکروکانال‌ها را می‌توان به صورت گروهی با تعداد و هندسه متفاوت تعریف کرد؛ برای مثال کانال‌های دارای طراحی خاصی که بالای نقاط حساس

<sup>49</sup> boiling convection

تراشه‌ای همچون هسته CPU تشکیل شده و بدین ترتیب یکنواختی دمایی بهتری را در کل تراشه IC فراهم می‌سازند [1-45].

### 3-1 دامنه کتاب

چاه حرارتی میکروکانال دوفاز حلقه‌بسته پتانسیل استفاده در کاربردهای مدیریت گرمای توان بالا نظیر خنک‌کاری تراشه IC را داراست. درک رفتار جریان دوفاز در میکروکانال‌ها کلید پیاده‌سازی موفق چنین دستگاهی است. کتاب حاضر ضمن تأکید بر سیستم آزمایشی انتقال گرما، مدل‌سازی جریان‌های مکانیکی دوفاز، و تأثیر ابعاد کوچک بر شروع جوشش و رژیم‌های جریان، بر پدیده جوشش در میکروکانال‌های سیلیکونی با قطر زیر 150 میکرومتر تمرکز خواهد کرد.

بحث در فصل 2 با یک چاه حرارتی میکروکانال مجهز به ابزار سنجش آغاز می‌شود. این فصل با شرح آزمایش‌های خنک‌کاری تک‌فاز و دوفاز در میکروکانال‌ها با گرم‌کن‌های توکار و حسگرهای دما، به واکاوی در بحث و جدل‌های فعلی در این حوزه می‌پردازد، برای مثال آیا جوشش در میکروکانال‌ها سرکوب می‌شود یا خیر، و آیا انحراف ظاهری رفتار جریان در این ابعاد وجود دارد یا خیر. با بهره‌گیری از این آزمایش‌های مقدماتی، مشکلات کلیدی در این حوزه نظیر طراحی یک سیستم آزمایشی کنترل‌شده، مدل‌سازی جریان میکروکانال دوفاز و انتقال گرما با داده‌های آزمایشی مستدل، تصویرپردازی جریان دوفاز، و اندازه‌گیری‌های گذرا تعیین و تشریح خواهند شد. این مباحث به صورت مجزا در فصول بعدی مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

فصل 3 به سیستم گرمایی تجربی خواهد پرداخت که در تمام آزمایش‌های بحث‌شده در کتاب استفاده شده است. دستگاه MEMS به واسطه فراهم ساختن امکان کنترل درجای<sup>50</sup> گرما و سنجش دما برای انجام آزمایش‌های گرمایی در مقیاس میکرو ایده‌آل است. در این فصل، مباحث عام مرتبط با آزمایش‌های انتقال گرما در میکروکانال، شامل عایق‌بندی حرارتی، توزیع گرما در یک سیستم آزمایشی، اندازه‌گیری دما تحت گرمایش، و سیستم‌های اکتساب داده به

<sup>50</sup> in-situ

تفصیل بررسی خواهند شد. این فصل همچنین مرجعی برای دانشمندان و مهندسان حوزه گرما برای مطالعه آزمایش‌های انتقال گرما در مقیاس میکرو با کمک دستگاه‌های MEMS است.

فصل 4 بر مدل‌سازی جریان دوفاز و انتقال گرما در میکروکانال‌های سیلیکونی تمرکز دارد. این فصل با آزمایش‌های انتقال گرما در میکروکانال خودایستا (آزاد) که شرایط مرزی شار گرمای تقریباً ثابت را فراهم می‌سازند آغاز شده و داده‌های تجربی را با نتایج شبیه‌سازی چند مدل‌های جریان و انتقال گرما مقایسه خواهد کرد. مدل جریان و انتقال گرما رژیم جریان را در نظر گرفته و فشار موضعی و دمای دیواره را با اعمال معادلات انرژی بر حجم کنترل از پیش تعیین شده در کانال جریان پیش‌بینی می‌کند. اندازه‌گیری و مدل‌سازی جریان دوفاز در کانال‌های 28 تا 60 میکرومتری هر دو بر صدق نظریات کلاسیک بر رفتار جریان گواهی می‌دهند.

فصل 5 فرآیند تشکیل حباب در میکروکانال‌های 28 تا 171 میکرومتری و پدیده‌های گذرای مرتبط با فرآیند جوانه‌زنی را تصویرسازی می‌کند. این فصل حاوی مجموعه‌ای از تصاویر است که با عکاسی پرسرعت در میکروکانال‌ها به دست آمده‌اند و فرآیند جوشش و همچنین شرایط جریان دوفاز را آشکار می‌سازند. اندازه‌گیری گذرا، چند پدیده‌ی منحصربه‌فرد نظیر پالس گذرای فشار و فراگرمایش دیواره در طول فرآیند جوانه‌زنی جوششی را به نمایش می‌گذارد.

پس از کنکاش در مکانیسم‌های جوشش و اطلاعات پایه‌ای به دست آمده درباره جریان‌های دوفاز در کانال‌های زیر 150 میکرومتر، فصل 6 به واکاوی در دلایل جوشش فورانی<sup>51</sup> منحصربه‌فرد در کانال‌های بسیار کوچک می‌پردازد. بحث با فرضیه‌ها و نظریه‌های کلاسیک جوانه‌زنی شروع شده و با ارائه شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌هایی ادامه می‌یابد که مشخصاً برای بررسی آن فرضیات و نظریات کلاسیک طراحی شده‌اند. نتیجه آن است که مکانیسم جوانه‌زنی حباب از نظریات کلاسیک منحرف نمی‌شود، و با استفاده از تکنیک‌های بهبود جوشش می‌توان از وقوع جوشش فورانی جلوگیری کرد.

---

<sup>51</sup> eruption boiling

فصل 7 شرحی کوتاه از پدیده تغییر فاز در میکروکانال‌های زیر 150 میکرومتر ارائه کرده و قواعد عمومی طراحی چاه‌های حرارتی میکروکانال را توضیح می‌دهد. یک طراحی نمونه که توان دفع 200 وات گرما از یک تراشه IC با افزایش دمای  $80^{\circ}\text{C}$  را دارد نیز به عنوان پایه‌ی مدل-سازی مطالعه حاضر معرفی خواهد شد. در انتهای فصل، به چند مسئله جذاب برای مطالعات آینده اشاره خواهد گردید.

# فصل 2

چاه‌های حرارتی میکروکانال دوفاز: مشکلات و چالش‌ها

## 2-1 پیشینه: جریان داخلی همرفت اجباری

جریان داخلی همرفت اجباری کاربرد گسترده‌ای در مبدل‌های حرارتی برای گرم کردن فضا، تولید برق، و فرآوری شیمیایی دارد. نظریات انتقال گرما برای هر دو جریان داخلی تک‌فاز و دوفاز به خوبی اثبات شده‌اند. با این حال، وقتی مقیاس اندازه در میکروکانال‌ها به چند ده میکرومتر می‌رسد، به دلیل تغییر بالقوه‌ی نیروهای غال، رفتار جریان بسیار متفاوت خواهد بود. پرسش‌هایی همچون برقراری یا عدم برقراری نظریات کلاسیک نیازمند پاسخ هستند.

## 2-1-1 جریان داخلی در کانال‌های میکرومقیاس

برای جریان داخلی گرانشی در یک کانال افقی میکرومقیاس، اصطکاک سیال باعث گرادیان فشار در جهت جریان می‌شود. در جریان آرامی که در حالت تک‌فاز توسعه کامل یافته است، این افت فشار،  $\Delta P$ ، را می‌توان با معادله زیر محاسبه کرد:

$$\Delta P = r \cdot \frac{C}{Re} \cdot \frac{L \cdot v}{D_H} \quad (1-2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال است،  $Re$  عدد رینولدز است،  $L$  طول کانال را نشان می‌دهد،  $v$  سرعت جریان است و  $D_H$  برابر با قطر هیدرولیکی کانال است [1-2]. ثابت  $C$  که برای لوله مدور برابر با 64 است ضریبی است که شکل کانال را پوشش می‌دهد.

وقتی سیال سرد با اختلاف دمای مایع - جامد وارد کانال گرم می‌شود، انتقال گرما میان مایع و جامد اتفاق می‌افتد. از منظر حفظ انرژی، نسبت گرمای جذب شده،  $q$ ، توسط مایع باعث افزایش دمای مایع به اندازه  $\Delta T_1$  می‌شود:

$$q = m C_p \Delta T_1 \quad (2-2)$$

که در آن  $m$  برابر با نسبت جریان جرمی است و  $c_p$  گرمای ویژه مایع را نشان می‌دهد. وقتی  $\Delta T_1$  با اختلاف دمای نقطه جوش مایع و مایع ورودی جایگزین می‌شود، معادله (2-2) گرمای محسوسه<sup>52</sup> را تعریف می‌کند - حداکثر گرمایی که مایع می‌توان پیش از وقوع تغییر فاز جذب نماید. نقطه مقابل گرمای محسوسه "گرمای پنهان" است - گرمایی که فرآیند تغییر فاز مایع - باز بدون تغییر دمای محسوسه جذب می‌کند.

وقتی دمای مایع در حرکت به سمت خروج بالاتر می‌رود، دمای دیواره نیز در طول کانال افزایش می‌یابد. نسبت گرمای کل با میانگین دمای دیواره و دمای مایع ارتباط دارد:

$$q = hA(T_{w,avg} - T_{l,avg}) \quad (3-2)$$

در اینجا منظور از  $h$  ضریب همرفت بر اساس میانگین طول است،  $A$  کل مساحت مرطوب را نشان می‌دهد و  $T_{w,avg}$  و  $T_{l,avg}$  به ترتیب بربر با میانگین دمای دیواره و دمای مایع هستند. انتقال گرما از دیواره به مایه منجر به توسعه یک لایه مرزی گرما علاوه بر لایه مرزی سرعت جریان می‌شود. پیش از آن که شرایط توسعه کامل محقق شود، دمای سیال، دمای دیواره و ضریب انتقال گرمای موضعی همگی به شکل تابعی پیچیده از مکان (موقعیت) تغییر می‌کنند؛ تنها پس از توسعه کامل جریان است که ضریب همرفت موضعی در سرتاسر کانال ثابت می‌شود. دو شرایط مرزی وجود دارد که منجر جریان‌های داخلی کاملاً توسعه‌یافته می‌شوند - شار گرمای ثابت، و شرایط دمای سطحی ثابت [2-2]. تا زمانی که یکی از شرایط مرزی برقرار است، جریان کاملاً توسعه‌یافته در فرم تک‌فاز ظاهر خواهد شد، و انتظار می‌رود رابطه ضریب همرفت ثابت،  $h$ ، که مستقل از سرعت جریان است به صورت زیر باشد:

<sup>52</sup> sensible heat

$$h = Nu \cdot \frac{k_f}{D_H} \quad (4-2)$$

که در آن  $Nu$  عدد ناسلت<sup>53</sup> و  $k_f$  رسانش گرمایی مایع است. در جریان آرام (لایه‌ای) کاملاً توسعه‌یافته که عدد رینولدز زیر 2300 است، عدد ناسلت برای دمای ثابت دیواره برابر با ثابت 3/66 و در شرایط مرزی شارژ یکنواخت گرما برابر با 4/36 است.

ضرایب همبستگی انتقال فشار و گرما برای جریان‌های دوفاز تجربی‌تر هستند و وابستگی قدرتمندی به رژیم‌های جریان دوفاز دارند. نیروی اینرسی، نیروی گرانشی، نیروهای کشش سطحی، نیروی شناوری، و تبادل تکانه میان فازهای مایع و بخار از جمله نیروهای اصلی هستند که رژیم جریان دوفاز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در نظریه جوشش کلاسیک، فرآیند تغییر فاز با رشد حباب آغاز می‌شود که به رژیم جوشش جوانه‌ای نیز موسوم است، سپس با افزایش شار گرما به جوشش انتقالی<sup>54</sup> و جوشش فیلمی<sup>55</sup> تغییر می‌کند. دمای دیواره همیشه بالاتر از دمای مایع در حال جوش است، به گونه‌ای که شار گرما از دیواره جامد به مایع حرکت می‌کند. این که فراگرمایش دیواره (اختلاف دما میان دیواره و مایع در طول تغییر فاز) برای جوشش جوانه‌ای °C 30 - 5، برای جوشش انتقالی °C 30 - 120، و برای جوشش فیلمی بیش از °C 120 است امری پذیرفته شده محسوب می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که اندازه نقاط جوانه‌زنی معمولاً زیر 100 میکرومتر است.

## 2-1-2 جریان دوفاز در میکروکانال

استفاده از تغییر فاز می‌تواند انتقال گرما را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. پس از آن که تاکنون و سپس ایده‌های چاه‌های حرارتی میکروکانال سیلیکونی تک‌فاز [19-1] را مطرح کردند،

<sup>53</sup> Nusselt number

<sup>54</sup> transition boiling

<sup>55</sup> film boiling



باورز<sup>56</sup> و موداوار در ابتدا نشان دادند که چاه‌های حرارتی میکروکانال دوفاز می‌توانند شار گرمای بیش از  $250 \text{ W/cm}^2$  را با نرخ جریان  $64 \text{ ml/min R-113}$  و خنک‌کاری فرعی سیال درونی با دمای  $20^\circ\text{C}$  دفع می‌نمایند [2-3]. تحقیقات آن‌ها همچنین ثابت کرد که کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $510$  میکرومتر در مقایسه با کانال‌های  $2/54$  میلی‌متر، مقاومت گرمایی کمتری دارند که احتمالاً ناشی از لایه‌های مرزی گرمایی نازک‌تر است.

به‌رغم این نتایج هیجان‌انگیز، تجاری‌سازی چاه‌های حرارتی میکروکانال دوفاز به تحقیقات بیشتر نیاز دارد. مشکل اصلی به مقیاس‌بندی از نظر اندازه بازمی‌گردد. از آنجایی که مکانیک سیالات و نظریات کلاسیک انتقال گرما متکی به مطالعات صورت گرفته در حوزه کانال‌های ماکرومقیاس هستند، وقتی مقیاس کانال به ابعادی می‌رسد که به زحمت با چشم غیرمسلح قابل رؤیت است، فروریختن برخی از فرضیات پایه‌ای می‌تواند اعتبار نظریات محکم قبلی را خدشه‌دار نماید. به عنوان مثال، در بحث پیشین درباره جریان‌های تک‌فاز، جریان آرام گرانرو یک فرض مهم در افت فشار و همبستگی ضرایب همرفت محسوب می‌شود. با این حال، برخی تحقیقات نشان از رفتارهای غیرعادی جریان در میکروکانال‌ها دارند. آریانک و همکاران<sup>57</sup> نشان دادند که وابستگی دمایی اعداد پیوازی<sup>58</sup> در کانال‌های  $5 - 25$  میکرومتر انطباق چندانی با پیش‌بینی‌های معادله ناویر - استوکس<sup>59</sup> نداشت [2-4]. ضیغمی و همکاران [2-5] و تسو<sup>60</sup> و همکاران [2-6] مستقل از یکدیگر، انتقال‌های بالقوه جریان آرام در کانال‌های  $100$  میکرومتر را با اعداد رینولدز زیر  $1600$  به جای عدد تئوری  $2300$  گزارش دادند. جاکوبی<sup>61</sup> نیز نحوه تأثیرپذیری احتمالی انتقال گرما در صورت از کار افتادن مدل کلاسیک سیال را پیش‌بینی کرد [2-7].

<sup>56</sup> Bowers

<sup>57</sup> Urbanek

<sup>58</sup> Poiseuille numbers

<sup>59</sup> Navier-Stokes

<sup>60</sup> Tso

<sup>61</sup> Jacobi

واقعیت جالب بعدی آن است که سایت‌های جوانه‌زنی روی یک سطح ماکرومقیاس معمولاً زیر 100 میکرومتر هستند که از بزرگی هم‌اندازه با قطر هیدرولیکی میکروکانال‌ها هستند. همچنین در این بُعد، نیروی کشش سطحی در هر دو فرآیند جوشش و جریان دو فاز غالب می‌شوند. بنابراین بسیار محتمل است که رفتار جریان و همچنین انتقال گرما در میکروکانال‌ها متفاوت از همتایان ماکرومقیاس خود باشد. آزمایش‌های متعددی روی تغییر فاز و رفتار جریان در کانال‌های کوچک‌تر از 500 میکرومتر انجام شده است. رحمان و همکاران میکروکانال‌هایی را با اچینگ تر<sup>62</sup> KOH در زیرلایه‌های سیلیکونی با دماسنج‌های سیلیکونی آلایده ساختند تا دمای دیواره را در چند نقطه از تراشه موردآزمایش اندازه‌گیری کنند [2-8]. پنگ<sup>63</sup> و همکاران گذار جریان و انتقال گرما در میکروکانال‌های مستطیلی ساخته شده در صفحات فولادی ضدزنگ با قطر هیدرولیکی بین 200 تا 600 میکرومتر را بررسی کردند [2-9]. جیانگ و همکاران کانال‌های سیلیکونی مجهز به گرم‌کن در مدخل ورودی و دماسنج در دیواره کانال طراحی کردند تا تغییر فاز در میکروکانال‌های الماس‌شکل با قطر زیر 100 میکرومتر را مطالعه نمایند [2-10]. بسیاری از این محققان شار گرمای بالا و غیرعادی را در فرآیند تغییر فاز در میکروکانال‌ها گزارش داده و فرضیات جدیدی را برای توضیح نحوه وقوع تغییر فاز در میکروکانال‌ها پیشنهاد کردند.

تحقیقات پیشین منابع بسیار خوبی برای مطالعه‌ی چاه‌های حرارتی میکروکانال دوفاز فراهم ساخته‌اند. با این حال، فقدان اطلاعات دقیق درباره نرخ انتقال گرما به سیال و شرایط جریان دوفاز در داخل میکروکانال‌ها به تفسیر داده‌ها در آزمایش‌ها لطمه وارد کرده است. مسیرهای گرما در سیستم‌های آزمایشی موجود بررسی نشده و شرایط مرزی به ندرت واکاوی شده‌اند، بنابراین به سختی می‌توان روابط دقیق انتقال گرما را از نتایج تجربی فعلی استخراج کرد و به عنوان پشتیبانی در مدل‌سازی دقیق انتقال دوفاز گرما در میکروکانال‌ها به کار برد. افزون بر این،

<sup>62</sup> wet etch

<sup>63</sup> Peng

معضل نتایج ناسازگار و اختلاف بر سر فرآیند جوانه زنی در میکروکانال ها نیز وجود دارد. این پرسش که آیا جوشش جوانه ای نوعی در کانال های زیر 150 میکرومتر رخ می دهد یا خیر هنوز پاسخ روشنی دریافت نکرده است. برخی محققان سرکوب کامل جوانه زنی حباب را گزارش داده اند، در حالی که برخی دیگر تغییر فاز، گاه تحت شارهای گرمای بزرگ و غیرعادی را مشاهده کرده اند، بدون آن که از نحوه دقیق شروع آن اطلاع داشته باشند. اگر تغییر فاز در میکروکانال سرکوب شود، انتقال گرما تنها در تک فاز انجام خواهد شد، که در آن صورت ضریب انتقال گرما بسیار کمتر از نتایج حاصل از تغییر فاز خواهد بود. اگر چنین چیزی واقعیت داشته باشد، آنگاه هیچ دلیلی برای ساخت چاه های حرارتی دوفاز وجود نخواهد داشت!

## 2-2 چاه حرارتی میکروکانال مجهز به ابزار سنجش

یک چاه حرارتی مجهز به ابزار سنجش برای بررسی رفتار جریان دوفاز در کانال های زیر 150 میکرومتر با تأکید بر کاربرد آن در سیستم خنک کاری حلقه بسته واقعی طراحی شده است. از یک تراشه سیلیکونی با گرم کن های مقاومتی یکپارچه و دماسنج برای شبیه سازی تراشه کامپیوتری استفاده شده است و میکروکانال ها نقش عناصر خنک کننده را بازی می کنند. گرم کن ها برای کنترل دقیق شارژ گرما به تراشه استفاده شده و انتشار گرما از تراشه کامپیوتری فعال را تقلید می کنند. می توان مایع را به میکروکانال ها اضافه کرد تا گرما با خود حمل کند، بدین ترتیب دمای تراشه نهایی با دماسنج ها اندازه گیری خواهد شد. زیرلایه سیلیکونی از آنجهت انتخاب گردید که کانال های خنک کاری آینده مستقیماً در تراشه های IC تشکیل خواهند شد؛ و این ماده اجازه یکپارچه سازی مقاومت های سیلیکونی آلاینده روی تراشه را می دهند. میکروکانال ها با ورق های شیشه ای آب بندی می شوند که دسترسی نوری به شرایط جریان داخلی را فراهم می سازند.

## 2-2-1 طراحی چاه حرارتی مجهز به ابزار سنجش

پیش از این مطالعاتی روی چاه‌های حرارتی میکروکانال تک‌فاز و دوفاز انجام شده است [2-11 – 2-16] که به بررسی ملاحظات طراحی و مدل‌سازی پرداخته‌اند. برای سادگی بیشتر، طراحی چاه‌های حرارتی مجهز به ابزار سنجش با مدل‌های جریان تک‌فاز میکرومقیاس آغاز خواهد شد که در بخش 2-1-1 معرفی شدند. افت فشار در طول کانال و ابعاد کانال نیز پارامترهای طراحی هستند.

در سیستم خنک‌سازی دوفاز حلقه‌بسته پیشنهادی، انتظار می‌رود پمپ الکترواسمزی بتواند نسبت جریان آب 5-10 ml/min را فراهم نماید. با این نسبت جریان ثابت، می‌توان از معادله (2-1) برای تعیین افت فشار هدف و ابعاد کانال استفاده کرد. معادله (2-2) گرمای محسوسه را برای زمانی تعریف می‌کند که  $\Delta T_1$  با  $78^\circ\text{C}$  - اختلاف نقطه جوش آ در فشار جو ( $100^\circ\text{C}$ ) و دمای اتاق ( $22^\circ\text{C}$ ) - جایگزین شده است. با ترکیب معادله (2-2) با معادله (2-3)، میانگین ضریب همرفتی  $h$  را می‌توان به صورت تجربی از نسبت گرمای اندازه‌گیری شده، میانگین دمای دیواره و افزایش دمای آب از ورودی به خروجی تعیین کرد.

گرم‌کن‌ها و دماسنج‌های روی تراشه چاه حرارتی هر دو از مقاومت‌های سیلیکونی آلاینده ساخته می‌شوند. با گرم‌کن‌های مقاومتی، می‌توان نسبت گرمای ورودی،  $q$ ، را با ضرب ولتاژ ورودی  $U$  و جریان ورودی  $I$  محاسبه کرد. مقاومت دماسنج‌های سیلیکونی آلاینده تابع دما است، بنابراین تغییر دمای دیواره را می‌توان با توجه به تغییرات مقاومت اندازه‌گیری کرد.

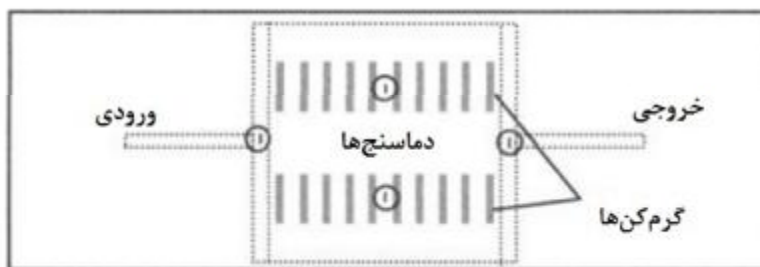
بر اساس محاسبات آزمایشی، سه نوع طراحی برای آزمایش‌های اولیه انتخاب شدند. پارامترهای آزمایش در جدول 2-1 آورده شده‌اند. سطح مؤثر خنک‌کاری در هر تراشه  $1 \times 2$  یا  $2 \times 2$  سانتی‌متر است. تعداد کانال‌ها بین 20 تا 50 و قطر هر کانال بین 50 تا 70 میکرومتر است. چاه‌های حرارتی نوع 1 و نوع 3 برای نسبت جریان 10 ml/min و کانال‌های قطور و حداکثر افت فشار حدود 20 psi و نوع 2 برای نسبت جریان 5 ml/min با حداکثر افت فشار 54 psi طراحی شده‌اند.

**جدول 2-1.** پارامترهای طراحی سه نوع چاه حرارتی میکروکانال

نوع 3	نوع 2	نوع 1	
100	50	75	پهنای کانال ( $\mu\text{m}$ )
50	50	50	عمق کانال ( $\mu\text{m}$ )
2	2	2	طول کانال (cm)
30	20	50	تعداد کانالها
4	2	4	سطح مؤثر خنک کاری ( $\text{cm}^2$ )
10	5	10	حداکثر نسبت جریان (ml/min)
67	50	60	قطر هیدرولیکی ( $\mu\text{m}$ )
79	88	56	عدد رینولدز*
20/1	53/7	19/9	افت فشار* (psi)

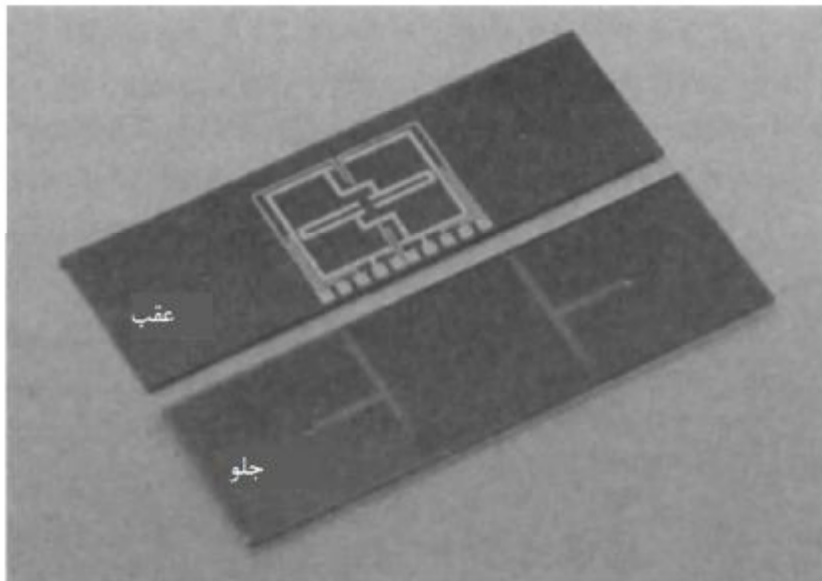
\* عدد رینولدز و افت فشار تحت حداکثر نرخ جریان آب طراحی مربوطه محاسبه شده‌اند. خواص آب در شرایط اتاق ( $22^\circ\text{C}$ , 1 atm) تعیین شده است.

شکل 2-1. شماتیک تراشه چاه گرمایی میکروکانال. خط چین‌ها میکروکانال (مربع وسطی) را نشان می‌دهند و ورودی/خروجی روی ضلع جلویی جایی است که کانال‌ها تشکیل می‌شود. در ضلع پشتی، بیست نوار گرم‌کن موازی به صورت متقارن روی سطح خنک کاری قرار گرفته‌اند تا شار گرمای یکنواخت را فراهم شود؛ و چهار دماسنج جداگانه در نقاط ورودی، خروجی و دو نقطه میانه نصب شده است تا دمای موضعی دیواره را اندازه‌گیری نمایند.



شکل 2-1 شماتیک تراشه چاه گرمایی با جانمایی دقیق گرم‌کن‌ها و دماسنج‌ها را نشان می‌دهد. ابعاد کلی تراشه آزمایش  $2 \times 6/5 \times 0/05$  سانتی‌متر است و اسلاید کاور شیشه‌ای نیز به همان اندازه است. گرم‌کن متشکل از 20 مقاومت با اتصال موازی و مقاومت کلی  $100 \Omega$  است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی جریان کاملاً توسعه‌یافته، مقاومت‌ها به گونه‌ای چیده شده‌اند که شار گرمای یکنواخت در کانال‌های جریان فراهم شود. هر یک از چهار دماسنج 2 کیلوآهم مقاومت دارد. همانطور که در شکل 2-2 مشاهده می‌شود، میکروکانال‌ها در ضلع جلویی زیرلایه سیلیکونی با اسلاید کاور شیشه‌ای قرار دارد و گرم‌کن‌ها و دماسنج‌ها در ضلع پشتی نصب شده‌اند.

شکل 2-2. تراشه چاه حرارتی مجهز به ابزار سنجش. تصویر هر دو ضلع جلویی و پشتی تراشه چاه حرارتی را نشان می‌دهد. در ضلع جلویی، پهنای ورودی و خروجی در دو کانال T شکل 1 میلی‌متر است؛ مربع وسطی سطح مؤثره خنک‌سازی است که در این دستگاه  $2 \times 2$  سانتی‌متر است. دماسنج‌ها و گرم‌کن‌ها سیلیکونی آلیایده در ضلع پشتی یکپارچه شده‌اند.



این تراشه‌های میکروکانال مجهز به ابزار سنجش امکان کنترل دقیق نسبت گرمای ورودی، اندازه‌گیری دمای موضعی دیواره، و مشاهدات نوری همزمان را فراهم می‌سازد. مبدل‌های فشار خارجی و ترموکوپل‌ها نیز برای اندازه‌گیری افت فشار و دمای سیال استفاده می‌شوند.

## 2-2-2 ساخت دستگاه

عمق طراحی شده برای کلیه میکروکانال‌ها 50 میکروکانال است. این عمق را می‌توان با استفاده از ویفرهای SOI (سیلیکون بر عایق<sup>64</sup> یا عایق رو سیلیسیمی) به دست کنترل کرد که از یک لایه سیلیکون با ضخامت 50 میکرومتر و یک ویفر ساپورت عادی تشکیل شده است و توسط دی اکسید سیلیسیومی جدا شده‌اند. به دلیل انتخاب‌پذیری بالای سیلیکون تا دی اکسید سیلیسیوم در DRIE (چینگ یونی واکنشی عمیق<sup>65</sup>)، نرخ چینگ روی دی اکسید سیلیسیوم بسیار کند است که عملاً کل فرآیند در لایه اکسید را "متوقف" می‌کند؛ بنابراین عمق کانال با توجه به ضخامت SOI تعریف شده است.

همانطور که در شکل 2-3 مشاهده می‌شود، فرآیند ساخت با اتصال ذوبی<sup>66</sup> ویفرهای SOI آغاز می‌شود. زیرلایه یک ویفر <100> نوع N به ضخامت 500 میکرومتر است. دی اکسید سیلیسیوم با ضخامت 5000 Å روی یک جفت ویفر پولیش شده یک‌رویه و یک ویفر پولیش شده دورویه رشد می‌کند. ویفر یک‌رویه روی ویفر دورویه قرار دارد به گونه‌ای که سطح پولیش شده رو به پایین باشد. سپس نیروی وان در والسی موقتاً دو ویفر را به هم متصل می‌سازد. گداخت 1 ساعته اضافی در دمای  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  اتصال ذوبی نهایی را تشکیل می‌دهد. سپس ضخامت ویفر سیلیکونی بالایی با استفاده از SMP (مسطح‌سازی مکانیکی شیمیایی<sup>67</sup>) 50 میکرومتر می‌رسد. در مرحله دوم، گرم‌کن‌ها و دماسنج‌ها در ضلع ساپورت (پشتی) ویفر کاشته می‌شوند. دُز کاشت  $1\text{E}15$  بور با انرژی 40 keV است. سپس دوپانت‌ها از طریق گداخت 1 ساعته در دمای  $^{\circ}\text{C}$

<sup>64</sup> Silicon-On-Insulator

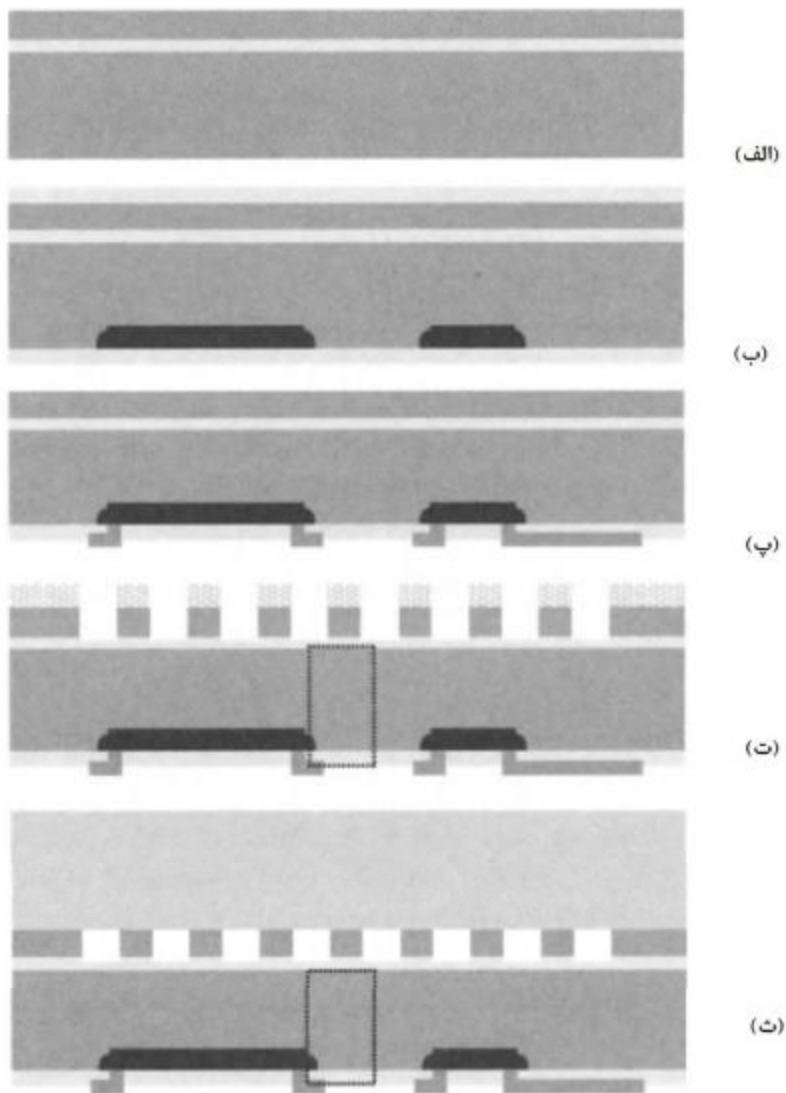
<sup>65</sup> Deep Reactive Ion Etching

<sup>66</sup> fusion bonding

<sup>67</sup> Chemical Mechanical Polishing

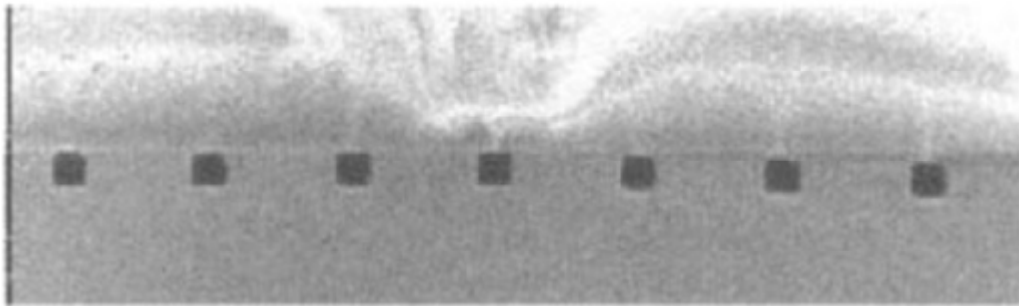
1150 فعال می‌شوند و یک لایه اثرناپذیرسازی اکسیدی به ضخامت  $2000 \text{ \AA}$  نیز به عنوان حفاظ مقاومت‌ها تشکیل می‌گردد. مقاومت ویژه ورق سطحی هدف پس از گداخت 200 اهم است.

شکل 2-3. شماتیک فرآیند ساخت تراشه چاه حرارتی. (الف) اتصال ذوبی و مسطح‌سازی ویفر SOI، (ب) کاشت یون و گداخت، (پ) جایگذاری آلومینیوم و اچینگ، (ت) DRIE در هر دو ضلع، (ث) اتصال شیشه - سیلیکون





شکل 2-4. تصویر SEM از سطح تماس اتصال شیشه - سیلیکون



در مرحله چهارم، از DRIE برای اچینگ کانال‌ها از سمت SOI و سپس اچینگ دو سوراخ ورودی/خروجی از ضلع پشتی استفاده می‌شود که به ترتیب در شکل 2-3(ت) و شکل 2-3(ث) به صورت مستطیل‌های خط‌چین‌دار نمایش داده شده‌اند. هر دو فرآیند اچینگ در لایه اکسید متوقف می‌شوند.

در انتها، یک پیرکس شیشه‌ای 7740 با ضخامت 500 میکرومتر از آند به ضلع جلویی متصل می‌شود تا میکروکانال‌ها آب‌بندی شوند. شکل 2-4 یک تصویر SEM از سطح تماس اتصال شیشه - سیلیکون را با نمای نیم‌رخ از میکروکانال‌های مستطیلی به تصویر کشیده است.

### 2-3 نتایج تجربی

شش تراشه چاه حرارتی از سه نوعی که در جدول 2-1 فهرست شده بودند با اعمال نرخ گرما و با استفاده از آب دیونیزه به عنوان سردکننده ساخته و آزمایش شدند. ابعاد واقعی اندازه‌گیری شده برای دستگاه‌های آزمایش در جدول 2-2 آورده شده‌اند.

جدول 2-2. ابعاد اندازه گیری شده برای چاه های حرارتی آزمایش

7	6	5	4	3	1	شماره دستگاه
2	2	3	1	3	1	نوع
55	55	100	80	100	75	پهنای کانال (μm)
45	42	42	42	50	50	عمق کانال (μm)
2	2	2	2	2	2	طول کانال (cm)
20	20	30	50	30	50	تعداد کانال ها
49	48	59	55	67	60	قطر هیدرولیکی (μm)

### 2-3-1 سیستم آزمایشی

سیستم آزمایشی که در شکل 2-5 تصویر شده است، اجازه پمپاژ آب دیونیزه به کانال ها با نسبت جریان ثابت را می دهد و یک توان ثابت بر گرم کن های روی چیپ اعمال می شود تا یک تراشه کامپیوتری فعال با اتلاف گرما شبیه سازی شود. بست آلومینیومی سوار شده و تراشه چاه حرارتی را ساپورت می کند. جهت دهنده های داخلی جریان و رینگ های O شکل این بست وظیفه آب بندی ایمن سوراخ های ورودی و خروجی در تراشه میکروکانال را برعهده دارند. یک پمپ سرنگی آب دیونیزه را به سیستم تزریق می کند. یک مبدل فشار و یک ترموکوپل به ترتیب فشار درونی و دمای سیال خروجی را اندازه گیری کرده و دمای سیال خروجی همزمان ثبت می گردد. با توجه به ابعاد تراشه و ماهیت آزمایش، تراشه ها را نمی توان در بسته های سرامیکی سنتی با پدهای اتصال بسته بندی کرد. در اینجا از یک Surfoard™ (رسانه نمونه تابلویی برای سوار کردن قطعات ساخته شرکت کپییتال ادونسد تکنولوژیز<sup>68</sup>) برای ایجاد اتصالات الکتریکی روی تراشه استفاده می شود. همانطور که در شکل 2-6 مشاهده می شود، Surfboard به سمت

<sup>68</sup> Capital Advanced Technologies

مقاومت تراشه متصل است و پدهای آلومینیومی از طریق سیم به Surfboard پیوند زده شده‌اند که 10 پین تک‌ردیفه استاندارد دارد. پس از سوار شدن تراشه میکروکانال روی بست آلومینیومی، یک سوکت ZDF (سوکت با نیروی جازدن صفر<sup>69</sup>) با سیم‌های نواری به Surfboard محکم می‌شود تا امکان سیم‌کشی و ایجاد اتصالات بیشتر فراهم شود.

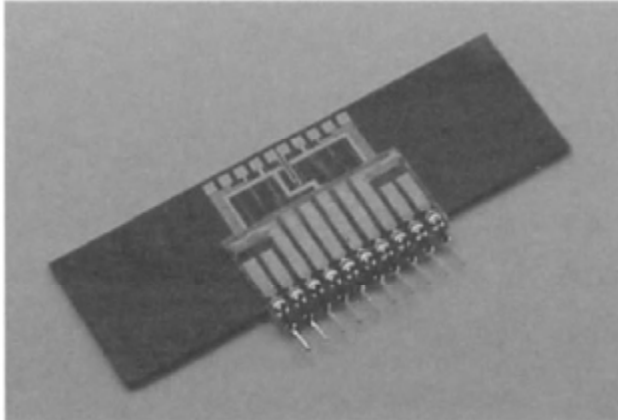
**شکل 2-5.** سیستم آزمایشی. تراشه چاه حرارتی توسط بست آلومینیومی مجهز به جهت-دهنده‌های داخلی جریان ساپورت و آب‌بندی می‌شود. سوکت ZIF گرم‌کن‌ها و دماسنج‌ها را به نمونه تابلویی<sup>70</sup> متصل می‌سازد که توان ورودی در آن تزریق شده و مقاومت دماسنج اندازه-گیری می‌شود. مبدل فشار در ورودی سوار شده است. دمای سیال خروجی نیز با ترموکوپل اندازه گرفته می‌شود.



<sup>69</sup> Zero-Insertion-Force

<sup>70</sup> breadboard

شکل 2-6. Surfoard با پیوندزنی سیمی<sup>71</sup> و تراشه میکروکانال. Surfoard با اپوکسی به تراشه متصل است، و پدهای آلومینیومی روی تراشه با سیم به Surfoard پیوند شده‌اند

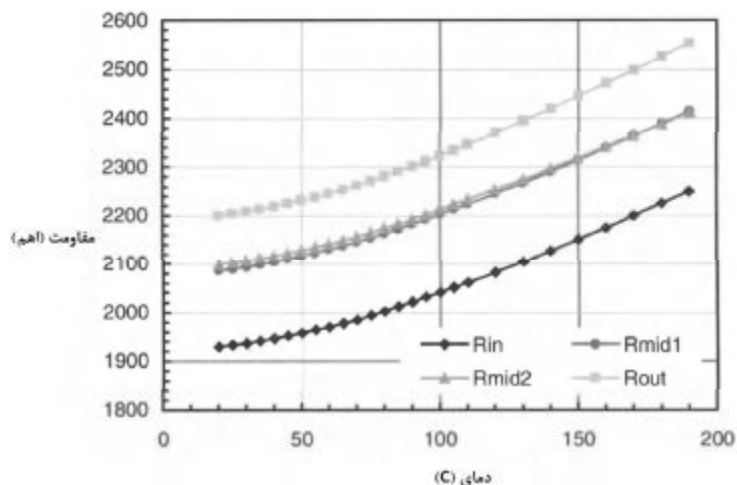


### 2-3-2 کالیبراسیون دماسنج

دماسنج‌های سیلیکونی آلاینده که روی یک چیپ نصب شده‌اند معمولاً مقاومت‌ها و ضرایب‌های گرمایی مشابه اما غیریکسانی دارند. برای دستیابی به بالاترین دقت ممکن، تک تک دماسنج‌های روی کلیه دستگاه‌ها پیش از اندازه‌گیری انتقال گرما جداگانه کالیبره شدند. در طول کالیبراسیون، تراشه دستگاه در کوره همرفت با میدان گرمای یکنواخت قرار گرفت. دمای مرجع از یک ترموکوپل کالیبره‌شده و مقاومت‌های دماسنج‌ها با افزایش  $5^{\circ}\text{C}$  تا  $10^{\circ}\text{C}$  درجه‌ای دمای اتاق تا  $180^{\circ}\text{C}$  ثبت شدند. شکل 2-7 منحنی کالیبراسیون چهار دماسنج در یک تراشه چاه حرارتی را به تصویر کشیده است.

<sup>71</sup> wire-bonded

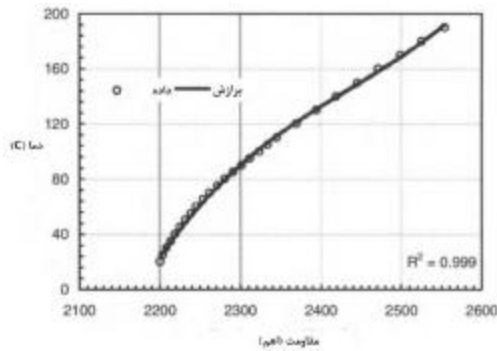
شکل 2-7. کالیبراسیون دماسنج. مقاومت هر دماسنج در دماهای مختلف ثبت می شود. از کوره همرفت با میدان دمای یکنواخت برای کالیبراسیون استفاده می شود و یک ترموکوپل امکان ثبت دمای مرجع را فراهم می سازد.



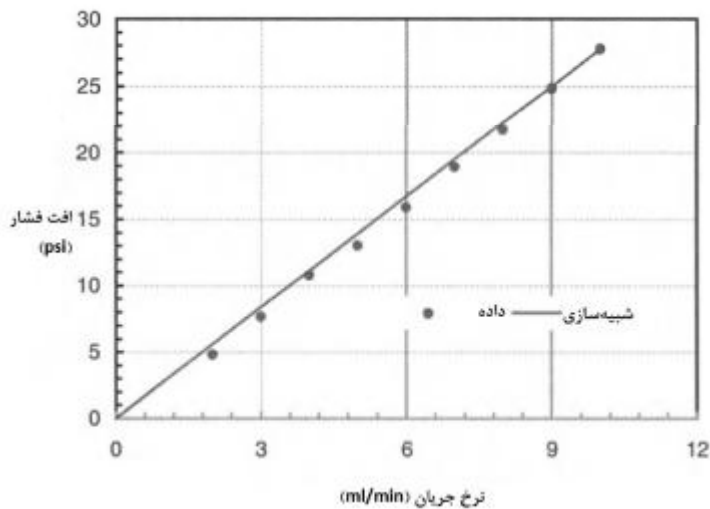
پس از ثبت پاسخ دمایی مقاومت‌ها، هر یک از منحنی‌های کالیبراسیون ترسیم شده و معادله برازش چندجمله‌ای به صورتی که در شکل 2-8 نمایش داده شده است محاسبه می‌گردد. در آزمایش‌های آخر، تغییرات مقاومت دماسنج‌ها با استفاده از معادلات دما - مقاومت به داده‌های دمایی تبدیل می‌شوند. از آنجایی که منشأ اصلی خطا کالیبراسیون دما و برازش داده‌ها است، دقت اندازه‌گیری با اعمال روش میانگین مربع انحراف‌ها<sup>72</sup> در برازش داده‌ها تخمین زده می‌شود که برای این دماسنج‌ها  $\pm 2^\circ\text{C}$  است.

<sup>72</sup> mean square deviation

شکل 2-8. منحنی برازش یک دماسنج نوعی. از منحنی برازش چندجمله‌ای به عنوان دما - مقاومت این دماسنج استفاده شده است. تکرار کالیبراسیون روی مقاومت‌ها نشان از تغییرپذیری کمتر از 0/2% داشت.



شکل 2-9. افت فشار در طول میکروکانال‌های دستگاه شماره 4 از نوع 1 (قطر هیدرولیکی هر کانال 55 میکرومتر است). این شکل نشان‌دهنده افت فشار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول میکروکانال‌ها به عنوان تابعی از نرخ جریان آب در دمای اتاق است. مدل ساده جریان آرام که در معادله (2-1) توصیف شده است با ضریب اصطکاک ثابت خود این داده‌ها را به دقت توصیف می‌کنند.



### 2-3-3-3 خنک کاری همرفتی اجباری تک فاز

اولین فاز آزمایش ها اندازه گیری تک فاز بود. شکل 2-9 افت فشار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در میکروکانال ها را نسبت به نسبت جریان به تصویر کشیده است. نوپز در اندازه گیری حسگر فشار کمتر از 0/05 درصد از مقیاس کامل یا 0/05 psi بود؛ و دقت مطلق حسگر بر اساس گزارش داده های سازنده برابر با  $\pm 0/1$  psi است. بدین ترتیب عدم قطعیت اندازه گیری فشار کل کمتر از 0/15 psi خواهد بود. مدل شبیه سازی متکی به جریان آرام کاملاً توسعه یافته با ضریب اصطکاک ثابت است که در رابطه (2-1) توصیف شد. ضریب شکل، C، برای کانال های مستطیلی با نسبت بُعد 2:1 برابر 62 است. در شبیه سازی از ابعاد اندازه گیری شده در جدول 2-2 استفاده شد. از آنجایی که اعداد رینولدز همگی زیر 100 هستند، انتظار می رود جریان داخلی آرام (لاپه ای) باشد. همسویی خوب میان داده های اندازه گیری و شبیه سازی ها نشان از معتبر بودن مدل سنتی جریان آرام برای کانال های 100 میکرومتری با اعداد رینولدز بسیار پایین دارد. آزمایش های انجام شده توسط لی<sup>73</sup> و همکاران [2-17] و جودی<sup>74</sup> و همکاران [2-18] نیز گواهی بر این ادعا هستند.

شکل 2-10. میانگین دمای تراشه به عنوان تابعی از نرخ گرما برای شش دستگاه از سه نوع. همانطور که در جدول 2-1 نشان داده شد، سطح مؤثر خنک کاری در نوع 1 و نوع 3 برابر با 4 سانتی متر مربع است، اندازه و تعداد میکروکانال ها متفاوت اند و سطح همرفتی کل مشابه است؛ سطح مؤثر خنک کاری در نوع 2 برابر با 2 سانتی متر مربع است. دستگاه های نوع 1 و نوع 3 در نرخ جریان 10 ml/min و دستگاه های نوع 2 در نرخ جریان 5 ml/min آزمایش شدند. از آنجایی که نوع 2 نرخ جریان و سطح مؤثر خنک کاری کوچک تری دارد، افزایش دمای تراشه در آن بالاتر از نوع 1 و نوع 3 با همان نسبت گرما است. کلیه خطوط روند برای ورودی گرمای صفر به دمای اتاق  $22^{\circ}\text{C}$  برون یابی شدند.

<sup>73</sup> Lee

<sup>74</sup> Judy