دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی
مهندسی برق الکترونیک

تنظیم یکپارچه دمای تراشه میکروفلوئیدیک برای مطالعات زیستی

نگارش

هلیا شاکری

استاد راهنما

دکتر فردمنش

تیر ۱۴۰۳

چکیده

کنترل دقیق دما در سامانه‌های میکروفلویدیک نقشی کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد فرآیندها و واکنش‌های شیمیایی دارد، زیرا نوسانات دمایی می‌توانند منجر به کاهش دقت و بازدهی این سامانه‌ها در کاربردهایی نظیر زیست‌پزشکی و سنتز مواد شوند. هدف این پژوهش، طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم کنترل دما با دقت و پایداری بالا برای استفاده در سامانه‌های میکروفلویدیک است. در این راستا، از حسگر دمایی دقیق به همراه الگوریتم کنترلی بازخوردی استفاده شد تا دمای سیستم به‌صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری و تنظیم شود. برای ارزیابی عملکرد این سیستم، آزمایش‌هایی انجام گرفت که در آن گرمایش یک تراشه با المنت فلزی و تنظیم آن در دمای حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد مد نظر بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیستم پیشنهادی قادر است در مرکز تراشه دمای نسبتاً پایداری ایجاد کند، اما بررسی‌های بیشتر توزیع دما حاکی از وجود گرادیان حرارتی در سطح تراشه بود. این یافته به درک دقیق‌تر رفتار حرارتی در سامانه‌های میکروفلویدیک کمک کرده و می‌تواند در طراحی‌های آینده جهت بهبود یکنواختی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: میکروفلویدیک، حسگرها، میکروهیتر، دما، الگوریتم بازخوردی، میکروکنترلر

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۱

۱-۱ تعریف مسئله ۱

۱-۲ اهمیت موضوع و چالش‌ها ۱

۱-۳ رویکرد استفاده شده در پژوهش ۲

۱-۴ نوآوری پژوهش ۲

۱-۵ ساختار پایان‌نامه ۲

۲ مفاهیم اولیه ۴

۲-۱ نحوه‌ی تشخیص دما ۴

۲-۱-۱ اثر سیبک و ترموکوپل‌ها ۴

۲-۱-۲ سنسورهای دمایی مبتنی بر مقاومت ۵

۲-۲ نحوه‌ی کنترل دما ۶

۲-۲-۱ گرمایش ژول ۶

۲-۲-۲ اثر پلتیر ۶

۲-۲-۳ گرمایش مایکروویو ۷

۲-۲-۴ گرمایش شیمیایی ۸

۲-۳ حلقه کنترلی PID ۹

۲-۳-۱ کنترل‌کننده PID ۹

۲-۳-۲ سیگنال PWM ۱۰

۳ کارهای پیشین **۱۱**

۳-۱ روش‌های پایش دما ۱۱

۳-۱-۱ ترموکوپل‌ها ۱۱

۳-۱-۲ ترمیستورها ۱۲

۳-۱-۳ سنسورهای دمای سفارشی ۱۳

۳-۲ اجزای کنترل دما ۱۳

۳-۲-۱ عناصر خارجی ۱۴

۳-۲-۲ عناصر درونی ۱۶

۴ طراحی و پیاده‌سازی سیستم **۱۹**

۴-۱ حسگر دما و مدار اتصال ۱۹

۴-۲ میکروهیتر و مدار اتصال ۲۱

۴-۳ الگوریتم کنترلی ۲۳

۵ نتایج جدید **۲۴**

۵-۱ پاسخ زمانی سیستم ۲۴

۵-۲ نقشه توزیع دما ۲۶

۶ نتیجه‌گیری **۲۷**

مراجع **۲۹**

فهرست تصاویر

۲-۱ اثر سیبک[۱] ۵

۲-۲ گرمایش ژول[۱] ۶

۲-۳ اثر پلتیر: ایجاد منطقه خنک در تقاطع نیمه‌هادی‌های نوع n و p [۱] ۷

۲-۴ گرمایش مایکروویوی با چرخش مولکول‌های آب تحت امواج الکترومغناطیسی[۱] . . ۸

۲-۵ نمای گرافیکی انرژی آزاد شده/جذب شده در واکنش‌های گرماده و گرماگیر[۱] . . . ۸

۲-۶ نمای گرافیکی یک حلقه کنترلی PID در نرم‌افزار Simulink ۹

۳-۱ طرح شماتیک سامانه میکروفلوئیدیک با کنترل دما توسط ترموکوپل نوع k [۱] ۱۲

۳-۲ نمای (A) تصویر دوبعدی از سنسور RTD (نمای بالا) را همراه با بزرگ‌نمایی از بخش هندسه مارپیچی سنسور نشان می‌دهد. نمای (B) تصویر سه‌بعدی یکی از دستگاه‌های مورد استفاده را نمایش می‌دهد که در آن میکروکانال PDMS به مدار سنسور RTD متصل شده است [۲]. ۱۴

۳-۳ کنترل دمای کانال نمونه با واکنش‌های گرماگیر و گرماده [۱] ۱۶

۳-۴ توزیع حرارت در دستگاه میکروفلوئیدیک با کنترل دمای لوله‌های تیگون [۱] ۱۷

۳-۵ اجزای اصلی سیستم گرم‌کن مایکروویوی [۱] ۱۷

۳-۶ پیکربندی میکروهیتر سولنوئیدی در میکروکانال [۱] ۱۸

۴-۱ نمای گرافیکی مدار تقسیم ولتاژ مقاومتی استفاده شده ۲۰

۴-۲ طرح میکروهیتر ۲۱

۴-۳ نمای گرافیکی مدار اتصال میکروهیتر به خروجی آردوینو ۲۲

۵-۱ یک نمونه پاسخ زمانی سیستم با دو نمونه اختلال خارجی ۲۵
۵-۲ نقشه توزیع حرارتی بر میکروهیتر ۲۶

فصل ۱

مقدمه

در این فصل، اهمیت کنترل دما در سامانه‌های میکروفلویدیک بررسی شده و چالش‌ها، روش‌های پیشنهادی، نوآوری‌ها و ساختار پایان‌نامه به‌طور جامع ارائه می‌شود.

۱-۱ تعریف مسئله

کنترل و پایش دما یکی از مسائل حیاتی در سامانه‌های میکروفلویدیک است که تأثیر مستقیمی بر عملکرد فرآیندهای زیستی، واکنش‌های شیمیایی و تشخیص‌های پزشکی دارد. تغییرات دمایی می‌توانند دو نوع اثر مهم داشته باشند: اول، ایجاد نویز و اختلالات عمومی در عملکرد سیستم که منجر به کاهش دقت و افزایش عدم قطعیت در نتایج می‌شود [۱]؛ دوم، در کاربردهای زیست‌پزشکی، استفاده از سلول‌های زیستی که نیازمند حفظ دما در بازه خاصی (معمولاً بین ۳۶ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد) هستند، حساسیت ویژه‌ای ایجاد می‌کند. عدم حفظ این بازه می‌تواند باعث آسیب به سلول‌ها و اختلال در روند آزمایش‌ها شود، بنابراین کنترل دقیق دما برای اطمینان از پایداری شرایط زیستی امری ضروری است.

۱-۲ اهمیت موضوع و چالش‌ها

با این حال، کنترل دما در مقیاس میکرو با چالش‌های متعددی مواجه است. سامانه‌ها باید پاسخ سریع به تغییرات ناگهانی دمایی داشته باشند تا از اثرات نامطلوب جلوگیری شود، در حالی که بسیاری از تجهیزات کنترلی موجود بزرگ و گران‌قیمت هستند و قابلیت حمل و استفاده در شرایط میدانی را ندارند. همچنین، نوسانات دمایی و ناپایداری‌های حرارتی در طول زمان می‌تواند موجب ایجاد نوسان در شرایط آزمایش و

کاهش دقت شود. علاوه بر این، اندازه‌گیری دقیق دما در مقیاس میکرو و توزیع یکنواخت دما در سطح تراشه از دیگر مشکلات اساسی است که پیاده‌سازی کنترل موثر دما را پیچیده می‌سازد.

۱-۳ رویکرد استفاده شده در پژوهش

در این پژوهش، روش‌های بهینه‌ای برای پایش و کنترل دما در سامانه‌های میکروفلویدیک شناسایی و پیاده‌سازی شد که ویژگی‌هایی از جمله دقت بالا، صحت اندازه‌گیری، هزینه پایین و قابلیت حمل را دارا بودند. برای این منظور، از حسگرهای دمایی دقیق و مقرون‌به‌صرفه استفاده شده و این حسگرها به یک الگوریتم ساده میکروکنترلری متصل شدند که با بهره‌گیری از مکانیزم بازخوردی، دما را در سطحی پایدار نگه می‌دارد. این الگوریتم به گونه‌ای طراحی شده است که نوسانات دمایی را به حداقل رسانده و سیستم را در برابر اختلالات محیطی مقاوم می‌کند، به طوری که دمای سامانه به سرعت به شرایط مطلوب بازمی‌گردد و از ایجاد ناپایداری جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، استفاده از میکروکنترلر ساده و روش‌های مقرون‌به‌صرفه، قابلیت پیاده‌سازی آسان و سازگاری با انواع پیکربندی‌های میکروفلویدیک را فراهم می‌کند.

۱-۴ نوآوری پژوهش

مهم‌ترین دستاورد این تحقیق، کنترل نوسانات دمایی در محدوده‌ای بسیار کم و کمتر از 0.2 درجه سانتی‌گراد است که این میزان نوسان نسبت به روش‌های پیشین به طرز قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین، زمان پاسخ سیستم به اختلالات کوچک دمایی کمتر از ۱۰ ثانیه است که این پاسخ سریع باعث حفظ شرایط پایدار در سامانه‌های حساس می‌شود. علاوه بر دقت و سرعت پاسخ، این سیستم به دلیل اندازه کوچک، هزینه پایین، قابلیت حمل آسان و سهولت استفاده، امکان به‌کارگیری در طیف وسیعی از سامانه‌های میکروفلویدیکی را فراهم می‌آورد و به راحتی می‌تواند در محیط‌های مختلف عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه به‌گونه‌ای تنظیم شده است که در فصل اول، مفاهیم پایه و مبانی نظری مرتبط با کنترل دما در سامانه‌های میکروفلویدیک معرفی می‌شود. در فصل دوم، مروری بر پژوهش‌های پیشین و چالش‌های موجود ارائه خواهد شد. فصل سوم به تشریح روش‌ها و طراحی سیستم اختصاص یافته است. در فصل چهارم، نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های مربوط به عملکرد سیستم ارائه می‌گردد و در نهایت، در فصل پنجم،

جمع‌بندی کلی و پیشنهادهای آینده مطرح می‌شود.

فصل ۲

مفاهیم اولیه

در این فصل، مفاهیم پایه‌ای و ضروری برای درک بهتر فرآیند پایش و کنترل دما در سامانه‌های میکروفلویدیکی ارائه می‌شوند. این مفاهیم شامل اصول اندازه‌گیری دما، روش‌های کنترل دما، و ساختار حلقه کنترلی هستند که در طراحی و پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی این پژوهش نقش کلیدی دارند. مطالب این فصل عمدتاً بر اساس مروری جامع در مقاله [۱] تنظیم شده است تا پایه‌ای مستحکم برای مطالعه‌های بعدی فراهم آورد.

۲-۱ نحوه‌ی تشخیص دما

۲-۱-۱ اثر سیبک و ترموکوپل‌ها

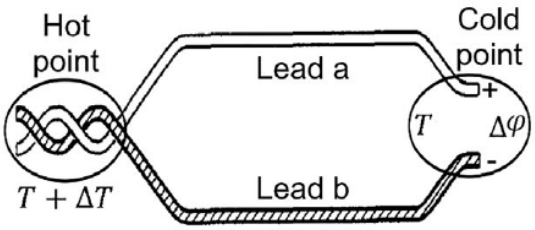
اثر سیبک[۱] بر پایه ایجاد ولتاژ مدار باز بین دو نقطه با دماهای مختلف در یک رسانای الکتریکی یا بین دو رسانای مختلف استوار است. زمانی که دو فلز متفاوت در دو نقطه به یکدیگر متصل شده و در معرض دماهای متفاوت قرار گیرند، به دلیل تفاوت در خواص ترموالکتریک مواد، ولتاژی بین دو سر آزاد آن‌ها ایجاد می‌شود. این ولتاژ، که به ولتاژ سیبک معروف است، متناسب با اختلاف دما بین دو نقطه است و معمولاً در مقیاس میلی‌ولت اندازه‌گیری می‌شود و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta\phi = S \cdot \Delta T \tag{۲-۱}$$

که در آن $\Delta\phi$ ولتاژ، S ضریب سیبک و ΔT اختلاف دما است.

[۱] Seebeck Effect

ترموکوپل‌ها از این اصل بهره می‌برند و معمولاً از اتصال دو فلز ناهمجنس مانند نیکل_ کروم و نیکل_ آلومینیوم تشکیل می‌شوند. یک سر این اتصال (جوش داغ) در محل مورد نظر برای اندازه‌گیری دما قرار می‌گیرد و سر دیگر (جوش سرد یا مرجع) در دمایی معلوم نگه داشته می‌شود. با اندازه‌گیری ولتاژ تولیدشده بین دو سر، و استفاده از ضرایب کالیبراسیون استاندارد، می‌توان دمای نقطه مورد نظر را تعیین کرد. ترموکوپل‌ها به‌دلیل بازه دمایی گسترده، مقاومت بالا در برابر شرایط محیطی، و ساختار ساده، در بسیاری از کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۱: اثر سیبک[۱]

۲-۱-۲ سنسورهای دمایی مبتنی بر مقاومت

سنسورهای دمایی مبتنی بر مقاومت با استفاده از تغییر مقاومت الکتریکی مواد در اثر تغییر دما عمل می‌کنند. مواد به‌کاررفته در این سنسورها دارای ضریب دمایی مشخصی هستند که باعث می‌شود مقاومت آن‌ها با افزایش یا کاهش دما به‌طور قابل پیش‌بینی تغییر کند. ترمیستورها و RTDها از رایج‌ترین انواع این سنسورها هستند که به‌ترتیب از مواد سرامیکی و فلزی ساخته می‌شوند. با اندازه‌گیری مقدار مقاومت و استفاده از رابطه تجربی بین دما و مقاومت، می‌توان دمای محیط را با دقت قابل قبولی محاسبه کرد. سادگی، هزینه پایین، و دقت مناسب این سنسورها را برای بسیاری از کاربردها، از جمله سامانه‌های میکروفلویدیکی، به گزینه‌ای مناسب تبدیل کرده است.

مقاومت در سنسورهای RTD معمولاً با رابطه‌ای تقریباً خطی مدل می‌شود:

$$R(T) = R_{۰}(۱ + \alpha T) \tag{۲-۲}$$

که در آن $R_{۰}$ مقاومت در دمای مرجع و α ضریب دمایی ماده است. در مقابل، ترمیستورهای NTC رفتاری غیرخطی دارند که به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$R(T) = R_{۰} \exp\left(\beta\left(\frac{۱}{T} - \frac{۱}{T_{۰}}\right)\right) \tag{۲-۳}$$

در این رابطه، T دمای مطلق بر حسب کلوین، R_0 مقاومت در دمای مرجع T_0، و β یک ثابت وابسته به ماده است. ترمیستورها به دلیل دقت بالا در بازه‌های دمایی محدود، ابعاد کوچک، هزینه کم و سادگی در واسطسازی الکترونیکی، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای قابل حمل و سیستم‌های میکروفلویدیک محسوب می‌شوند.

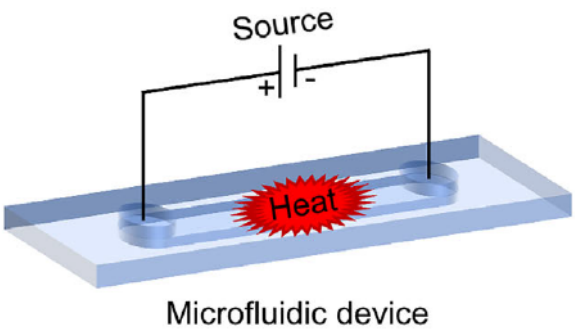
۲-۲ نحوه‌ی کنترل دما

۲-۲-۱ گرمایش ژول

گرمایش ژول زمانی رخ می‌دهد که جریان الکتریکی از یک ماده رسانا عبور کند و گرما تولید شود. میزان گرمای تولید شده با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \tag{۲-۴}$$

که در آن Q مقدار گرما، I جریان الکتریکی، R مقاومت الکتریکی و t زمان است. این روش به دلیل سادگی و کارایی، در بسیاری از دستگاه‌های میکروفلویدیک برای گرم‌کردن موضعی استفاده می‌شود.



شکل ۲-۲: گرمایش ژول[۱]

۲-۲-۲ اثر پلتیر

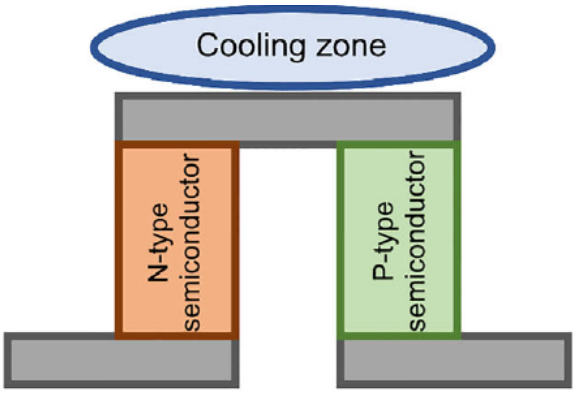
ماژول‌های پلتیر برای کنترل دما از طریق گرمایش یا خنک‌سازی موضعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ماژول‌ها بر پایه اثر پلتیر[۲] عمل می‌کنند، پدیده‌ای که در آن عبور جریان الکتریکی از اتصال دو ماده

[۲] Peltier Effect

نیمه‌رسانای متفاوت منجر به انتقال گرما از یک سمت به سمت دیگر می‌شود. نرخ این انتقال حرارت با جریان اعمال‌شده رابطه‌ای خطی دارد و به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q = \Pi \cdot I \tag{۵-۲}$$

که در آن Q نرخ انتقال گرما، Π ضریب پلتیر و I جریان الکتریکی است. ماژول‌های پلتیر به دلیل عدم نیاز به قطعات متحرک، عملکرد دقیق، و امکان استفاده در فضاهای فشرده، در کاربردهای آزمایشگاهی و صنعتی رایج هستند. با این حال، نیاز به دفع مؤثر حرارت و مصرف توان نسبتاً بالا از محدودیت‌های آن‌ها محسوب می‌شود.



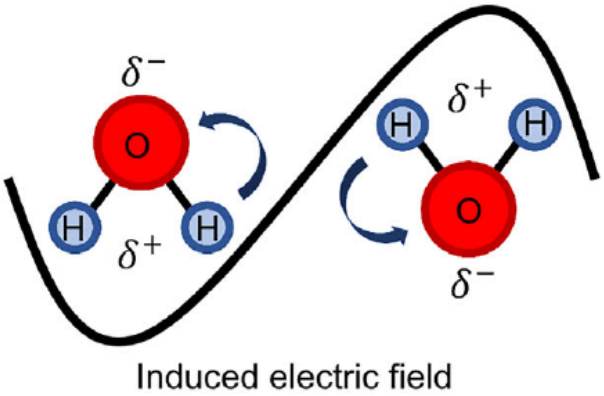
شکل ۲-۳: اثر پلتیر: ایجاد منطقه خنک در تقاطع نیمه‌هادی‌های نوع n و p [۱]

۲-۲-۳ گرمایش مایکروویو

در گرمایش مایکروویو، از میدان الکترومغناطیسی متناوب برای تولید گرما در موادی استفاده می‌شود که توانایی جذب امواج مایکروویو را دارند. این پدیده عمدتاً ناشی از برهم‌کنش بین میدان الکتریکی و دوقطبی‌های مولکولی ماده است. توان گرمایی ایجادشده به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = \omega \cdot \epsilon'' \cdot |E|^{۲} \tag{۶-۲}$$

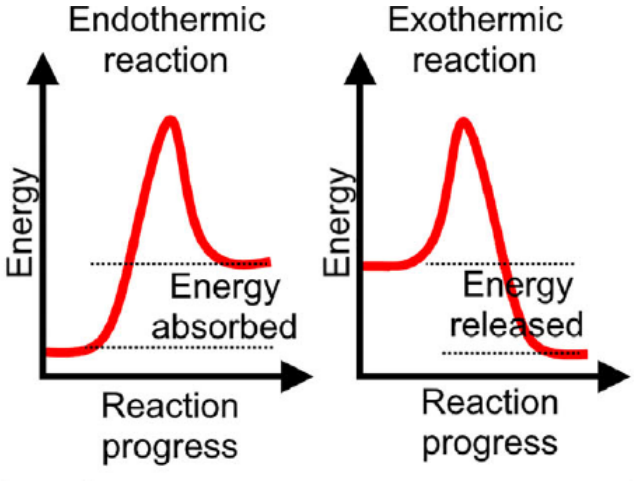
که در آن P توان گرمایش، ω فرکانس زاویه‌ای میدان، ϵ'' مؤلفه تلفات دی‌الکتریک، و $|E|$ دامنه میدان الکتریکی است. این روش امکان گرمایش سریع، حجمی و نسبتاً یکنواخت را فراهم می‌کند، اما پیاده‌سازی آن معمولاً به تجهیزات پرهزینه و طراحی دقیق نیاز دارد.



شکل ۲-۴: گرمایش مایکروویوی با چرخش مولکول‌های آب تحت امواج الکترومغناطیسی[۱]

۲-۲-۴ گرمایش شیمیایی

برخی واکنش‌های شیمیایی، بسته به نوع فرآیند، به‌صورت گرمازا یا گرماگیر انجام می‌شوند. در سامانه‌های میکروفلویدیکی، از واکنش‌های گرمازا می‌توان به عنوان منبع داخلی تولید حرارت استفاده کرد. برای مثال، واکنش‌هایی مانند خوردگی گالوانیکی در حضور محلول‌های مناسب می‌توانند بدون نیاز به منابع خارجی، گرمای مورد نیاز را تأمین کنند. این نوع گرمایش شیمیایی، با حذف نیاز به تجهیزات حرارتی خارجی، موجب ساده‌سازی طراحی، افزایش خودکفایی و کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های قابل‌حمل می‌شود. با این حال، کنترل دقیق شدت واکنش و نرخ تولید گرما از چالش‌های این روش به شمار می‌رود.



شکل ۲-۵: نمای گرافیکی انرژی آزاد شده/جذب شده در واکنش‌های گرماده و گرماگیر[۱]

۲-۳ حلقه کنترلی PID

۲-۳-۱ کنترل‌کننده PID

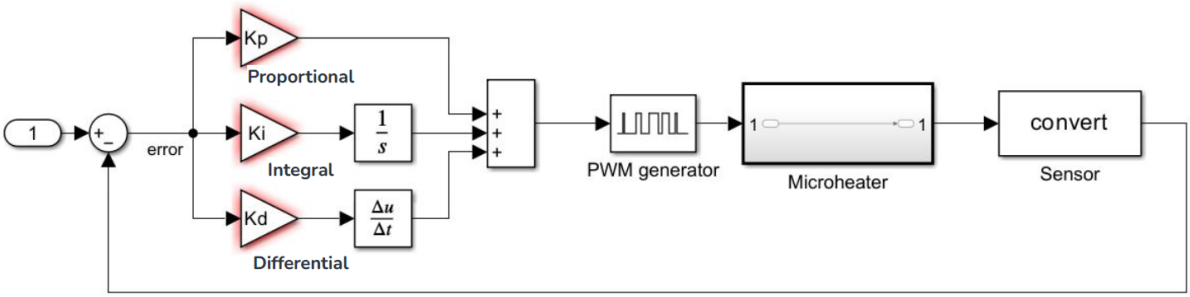
یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای کنترل دقیق دما در سامانه‌های مهندسی، استفاده از کنترل‌کننده‌های PID است. این کنترل‌کننده از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: جزء تناسبی (Proportional)، جزء انتگرالی (Integral) و جزء مشتقی (Derivative). هر یک از این اجزا نقش خاصی در بهبود پاسخ سیستم به تغییرات دما ایفا می‌کنند.

جزء تناسبی خطای لحظه‌ای بین مقدار مطلوب و مقدار اندازه‌گیری‌شده را تقویت کرده و تلاش می‌کند تا سیستم را به مقدار هدف نزدیک کند. جزء انتگرالی مجموع خطاهای گذشته را محاسبه کرده و از باقی‌ماندن خطای دائمی (خطای حالت ماندگار) جلوگیری می‌کند. جزء مشتقی نیز نرخ تغییر خطا را در نظر می‌گیرد و به سیستم کمک می‌کند تا از نوسانات بیش از حد و پاسخ‌های ناگهانی جلوگیری شود.

خروجی نهایی کنترل‌کننده PID ترکیبی از این سه مؤلفه است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_{0}^{t} e(\tau)\, d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \qquad (۲-۷)$$

در این رابطه، $e(t)$ خطای سیستم در زمان t، و ضرایب K_p، K_i و K_d به‌ترتیب ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی هستند که تنظیم دقیق آن‌ها نقش مهمی در پایداری و دقت سیستم ایفا می‌کند.



شکل ۲-۶: نمای گرافیکی یک حلقه کنترلی PID در نرم‌افزار Simulink

در سیستم‌های کنترلی دمایی، کنترل‌کننده PID معمولاً بر روی میکروکنترلر پیاده‌سازی می‌شود و به‌صورت لحظه‌ای با دریافت مقدار دما از سنسور، خروجی لازم برای اعمال به عنصر گرمایشی یا سرمایشی را محاسبه می‌کند. مزیت اصلی این روش، سادگی در پیاده‌سازی و کارایی بالا در حفظ دمای پایدار با نوسانات حداقلی است.

۲-۳-۲ سیگنال PWM

پالس پهنای مدولاسیون (PWM) یکی از روش‌های رایج و موثر در کنترل توان الکتریکی در مدارهای دیجیتال به شمار می‌آید. در این روش، سیگنال به شکل موج مربعی با فرکانس ثابت تولید می‌شود که نسبت مدت زمان روشن بودن سیگنال به کل دوره تناوب آن، تحت عنوان ضریب وظیفه[۳] شناخته می‌شود. ضریب وظیفه معمولاً به صورت درصد بیان می‌گردد و نشان‌دهنده سهم زمانی است که سیگنال در وضعیت "روشن" یا "یک" قرار دارد.

اگر دوره تناوب سیگنال را با T و مدت زمان روشن بودن را با t_{on} نشان دهیم، ضریب وظیفه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times ۱۰۰٪ \tag{۲-۸}$$

مقدار متوسط ولتاژ خروجی سیگنال PWM که به بار اعمال می‌گردد، برابر است با حاصل‌ضرب ولتاژ منبع تغذیه V_{in} در ضریب وظیفه:

$$V_{avg} = \frac{D}{۱۰۰} \times V_{in} \tag{۲-۹}$$

این مقدار متوسط ولتاژ امکان تنظیم توان تحویلی به بار را فراهم می‌سازد، در حالی که فرکانس سیگنال بدون تغییر باقی می‌ماند. بهره‌گیری از روش PWM به سبب سادگی پیاده‌سازی، کارایی بالا و کاهش تلفات توان، در کاربردهایی نظیر کنترل سرعت موتور، تنظیم شدت نور و کنترل دما در میکروهیترها بسیار متداول است.

---

[۳] Duty Cycle

فصل ۳

کارهای پیشین

در فصل سوم پایان‌نامه، کارهای پیشین انجام‌شده در زمینه روش‌های پایش و کنترل دما در سامانه‌های میکروفلویدیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به حساسیت بالای فرآیندهای زیستی و شیمیایی نسبت به تغییرات دما، پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر به توسعه ابزارها و روش‌هایی برای اندازه‌گیری و تنظیم دقیق دما اختصاص یافته‌اند. این فصل بر اساس مروری جامع ارائه‌شده در [۱] تنظیم شده است و در عین حال، هر روش و فناوری با استناد به منابع اصلی مرتبط معرفی و تحلیل می‌شود. ابتدا روش‌های رایج پایش دما از جمله ترموکوپل‌ها، ترمیستورها و حسگرهای سفارشی معرفی می‌شوند و سپس اجزای مختلف مورد استفاده برای کنترل دما، از جمله گرم‌کننده‌ها، عناصر پلتیر، و راهکارهای ساختاری و شیمیایی بررسی خواهند شد.

۳-۱ روش‌های پایش دما

۳-۱-۱ ترموکوپل‌ها

ترموکوپل‌ها از جمله سنسورهای رایج دما هستند که بر پایه اثر سیبک عمل می‌کنند. این سنسورها از اتصال دو فلز ناهمجنس در یک نقطه تشکیل شده‌اند و زمانی که بین دو سر آن‌ها اختلاف دمایی ایجاد شود، ولتاژی متناسب با این اختلاف دما تولید می‌شود. این ولتاژ، پس از کالیبراسیون، برای محاسبه دمای محل اتصال به‌کار می‌رود. سادگی ساختار، قیمت پایین، و امکان استفاده در گستره وسیع دمایی از جمله مزایای اصلی ترموکوپل‌ها به‌شمار می‌آیند. از این‌رو، این سنسورها در کاربردهایی نظیر واکنش زنجیره‌ای پلیمراز (PCR)، سنتز نانوذرات، و تحلیل ذرات جو به‌کار گرفته شده‌اند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند دقت

پایین‌تر نسبت به سایر روش‌ها و نیاز به کالیبراسیون مداوم در صورت استفاده طولانی‌مدت از معایب این سنسورها محسوب می‌شوند.

در مطالعه‌ای توسط Zhu و همکاران، از یک سامانه میکروفلویدیکی چندلایه به‌همراه لوله‌های پلیمری و یک ترموکوپل نوع K برای پایش دما استفاده شده است. در این سیستم، آب گرم یا سرد در یک فلاسک عایق‌شده ذخیره و سپس با استفاده از پمپ سرنگی به دستگاه تزریق می‌شد. ترموکوپل نوع K به فلاسک متصل بود تا دمای دقیق سیال تزریقی را پایش کند. مطابق گزارش، محدوده دمایی عملکرد سیستم بین ۲۴ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد بوده و دقت اندازه‌گیری آن کمتر از ۵/۰± درجه سانتی‌گراد اعلام شده است. این طراحی ساده و کم‌هزینه در کنار پاسخ‌گویی مناسب، نشان‌دهنده کاربرد عملی ترموکوپل‌ها در سامانه‌های میکروفلویدیکی است [۳].

شکل ۳-۱: طرح شماتیک سامانه میکروفلوئیدیک با کنترل دما توسط ترموکوپل نوع k [۱]

۳-۱-۲ ترمیستورها

ترمیستورها از جمله سنسورهای مقاومتی هستند که با تغییر دما، مقاومت الکتریکی آن‌ها نیز به‌صورت غیرخطی تغییر می‌کند. ترمیستورهای نوع NTC (ضریب دمایی منفی) در بسیاری از کاربردهای دقیق، به‌ویژه در مقیاس میکرو، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سنسورها به دلیل اندازه کوچک، دقت بالا، پاسخ سریع و هزینه پایین، گزینه‌ای مناسب برای یکپارچه‌سازی با سامانه‌های میکروفلویدیکی محسوب می‌شوند. با این حال، حساسیت آن‌ها به نوسانات ولتاژ و نیاز به مدارهای واسط دقیق، از جمله چالش‌های طراحی با این نوع حسگرها است.

در مطالعه‌ای توسط Nightingale و همکاران، یک سامانه مبتنی بر میکروفلویدیک قطره‌ای طراحی شد که از گرم‌کننده مقاومتی در کنار ترمیستور داخلی برای تسریع واکنش‌های نیترات و نیتریت استفاده می‌کرد. در این سامانه، دمای داخل گرم‌کننده با دقت کمتر از ۱/۰ درجه سانتی‌گراد توسط ترمیستور اندازه‌گیری می‌شد و بازه عملکرد آن از دمای اتاق تا حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که ترمیستورها می‌توانند در بازه وسیعی از دما عملکرد دقیقی داشته باشند و برای کنترل دما در واکنش‌های شیمیایی سریع در سیستم‌های میکروفلویدیکی بسیار مناسب هستند [۴].

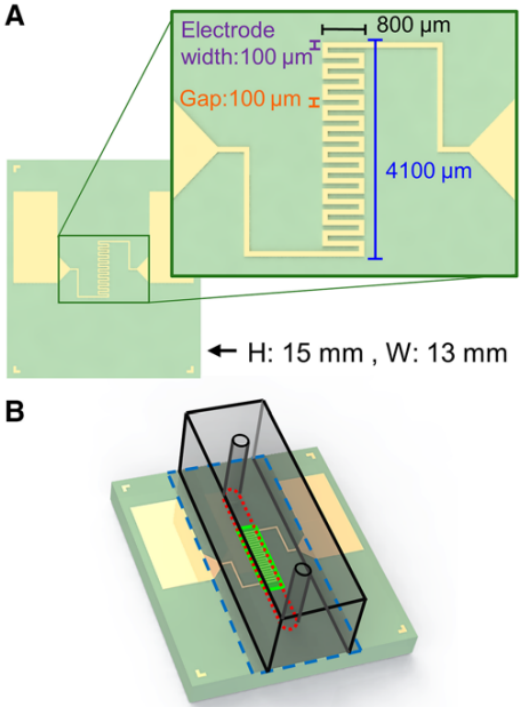
۳-۱-۳ سنسورهای دمای سفارشی

سنسورهای دمایی سفارشی مبتنی بر RTD (مقاومت دما_وابسته) از جمله روش‌های دقیق برای پایش دما در مقیاس میکرو هستند که قابلیت طراحی مطابق نیازهای خاص سیستم‌های میکروفلویدیکی را دارند. در این سنسورها، از فلزاتی نظیر پلاتین یا مس که مقاومت الکتریکی آن‌ها به‌طور خطی با دما تغییر می‌کند، استفاده می‌شود. با اعمال جریان ثابت و اندازه‌گیری ولتاژ، می‌توان تغییرات مقاومت و در نتیجه دما را با دقت بالا محاسبه کرد. از جمله مزایای این سنسورها می‌توان به پاسخ خطی، پایداری بلندمدت، و قابلیت مینیاتورسازی برای ادغام با ساختار تراشه اشاره کرد.

در مطالعه‌ای توسط Gallo-Villanueva و همکاران، یک سنسور RTD سفارشی از جنس مس طراحی شد که در زیر کانال میکروفلویدیکی قرار گرفت. در این سیستم، با اعمال ولتاژ مستقیم بین ورودی و خروجی کانال، گرمایش ناشی از اثر ژول رخ می‌داد و دما به‌صورت غیرمستقیم از طریق انتقال حرارت به سنسور مسی پایش می‌شد. از آنجا که رسانایی الکتریکی مس تابعی از دماست، تغییر دما موجب تغییر مقاومت و به دنبال آن تغییر جریان عبوری از سنسور می‌شد. یکی از مزایای مهم این روش، جلوگیری از تماس مستقیم نمونه با سنسور و در نتیجه حذف خطر آلودگی نمونه به‌علت خوردگی یا الکترولیز است [۲].

۳-۲ اجزای کنترل دما

علاوه بر پایش، کنترل فعال دما برای انجام دقیق واکنش‌های زیستی و شیمیایی در دستگاه‌های میکروفلویدیکی ضروری است. روش‌های کنترل دما به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: روش‌های خارجی مانند هیترها و عناصر پلتیر، و روش‌های یکپارچه مانند گرمایش شیمیایی یا طراحی‌های ساختاری خاص.



شکل ۳-۲: نمای (A) تصویر دوبعدی از سنسور RTD (نمای بالا) را همراه با بزرگ‌نمایی از بخش هندسه مارپیچی سنسور نشان می‌دهد. نمای (B) تصویر سه‌بعدی یکی از دستگاه‌های مورد استفاده را نمایش می‌دهد که در آن میکروکانال PDMS به مدار سنسور RTD متصل شده است [۲].

۳-۲-۱ عناصر خارجی

در روش‌های گرمایش خارجی، انتقال حرارت به دو صورت انجام می‌شود: یا از طریق تماس مستقیم المنت گرمایی با دستگاه (انتقال حرارت تماسی) و یا از طریق تابش انرژی یا تابش صوتی (انتقال حرارت غیرتماسی) به ناحیه مورد نظر در دستگاه میکروفلوئیدیک. روش‌های سرمایش خارجی نیز مشابه این موارد هستند. در این بخش، روش‌های مختلف کنترل دمای خارجی به همراه کاربردهای آن‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است که هرچند پارامترهایی مانند بازه دمایی، نرخ تغییر دما و زمان عملکرد در ارزیابی کیفیت دستگاه اهمیت دارند، اما عملکرد نهایی دستگاه به نیازهای خاص کاربرد وابسته است و نمی‌توان صرفاً از روی این داده‌ها نتیجه‌گیری قطعی داشت.

میکروهیترها

هیترهای خارجی در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک به دلیل توانایی آن‌ها در ارائه کنترل دقیق دما در بازه وسیعی از دماها، معمولاً تا حدود ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، و سهولت ادغام به علت ضخامت کمشان (از ۱۰۰ نانومتر تا ۱۰۰ میکرومتر) کاربرد فراوانی دارند. مواد رایج برای ساخت این هیترهای مقاومتی شامل

فلزات بسیار رسانا مانند پلاتین [۱]، طلا [۲] و نقره [۳] هستند که ظرفیت گرمایی ویژه پایینی داشته و گرمایش موثری را فراهم می‌کنند. سایر مواد شامل رنگ‌های رسانا برای چاپ صفحه‌ای و چسب‌های انعطاف‌پذیر مانند پلی‌آمید برای هیترهای قابل خم شدن هستند که بر اساس نیازهای کاربردی انتخاب می‌شوند.

به عنوان نمونه، Peng و همکاران یک هیتر ساخته شده از سیم طلای زیر دستگاه میکروفلوئیدیک توسعه دادند که از گرمایش جول برای حفظ دما در محدوده ۲ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد با توزیع یکنواخت در ناحیه مورد نظر استفاده می‌کرد. جایگزین‌هایی مانند مس [۴] رسانایی حرارتی و الکتریکی بالاتری ارائه می‌دهند، اما مات بودن آن‌ها می‌تواند دسترسی نوری را که در بسیاری از آزمایش‌های میکروفلوئیدیک حیاتی است محدود کند. مواد شفاف مانند اکسید ایندیوم قلع [۵] امکان عبور نور را فراهم کرده و در عین حال گرمایش مؤثر از طریق اثر جول را ارائه می‌دهند؛ طراحی‌های مارپیچی برای کاهش اتلاف حرارت و کنترل پایدار دما در کاربردهای حساس میکروفلوئیدیک مناسب هستند [۵].

عناصر پلتیر

ماژول‌های پلتیر با استفاده از اثر پلتیر قابلیت ایجاد سرمایش یا گرمایش دارند و برای ایجاد گرادیان دمایی یا تثبیت دما در محدوده معین مناسب هستند. نرخ‌های بالای گرمایش و سرمایش، امکان کنترل دقیق دما، و طراحی بدون قطعات متحرک از مزایای مهم این عناصر محسوب می‌شوند. با این حال، نیاز به دفع حرارت مؤثر در سمت مخالف، مصرف توان نسبتاً بالا، و بازده حرارتی پایین از جمله محدودیت‌های اصلی آن‌ها هستند.

به عنوان نمونه، در یک مطالعه، عنصر پلتیر بدون صفحه توزیع حرارتی رایج، چرخه‌های حرارتی بین ۹۴ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد را با نرخ‌های گرمایش و سرمایش حدود ۸ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه در کمتر از ۱۰ ثانیه انجام داد که نشان‌دهنده کارایی بالای آن است. حذف صفحه توزیع حرارتی باعث افزایش نرخ‌های گرمایش و سرمایش شد، اما یکنواختی دما ممکن است کاهش یابد که باید در طراحی‌های حساس مدنظر قرار گیرد [۶].

---

[۱] Pt
[۲] Au
[۳] Ag
[۴] Cu
[۵] ITO

روش‌های غیرمتعارف برای کنترل دما

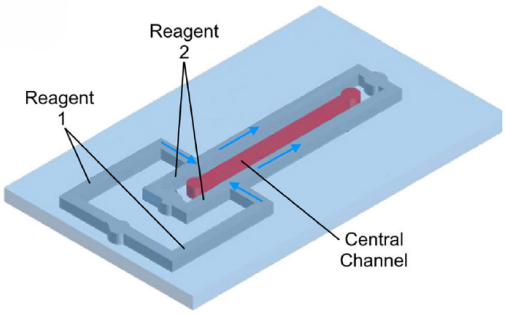
روش‌هایی مانند استفاده از ترانزیستور BJT، مواد تغییر فاز (PCM)، و ترکیب گرمایش و سرمایش به کمک لیزر یا مقاومت‌های سیمانی در برخی مطالعات با موفقیت به‌کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها گرچه نوآورانه هستند، اما پیچیدگی و هزینه بالای پیاده‌سازی از محدودیت‌های آن‌هاست.

۳-۲-۲ عناصر درونی

یکی از جایگزین‌های روش‌های کنترل دما از بیرون، استفاده از روش‌های گرمایش یا سرمایش درونی است. در این رویکرد، منبع گرما یا سرما به‌طور فعال و مستقیم با نمونه در تعامل بوده و دمای سیستم میکروفلوئیدیک را تغییر می‌دهد. این روش‌ها معمولاً بر اساس منبع گرمایش یا سرمایش به سه دستهٔ واکنشی، ساختاری و میکروهیتر داخلی تقسیم می‌شوند که در ادامه به بررسی آن‌ها و ویژگی‌هایشان پرداخته خواهد شد.

واکنش‌های شیمیایی

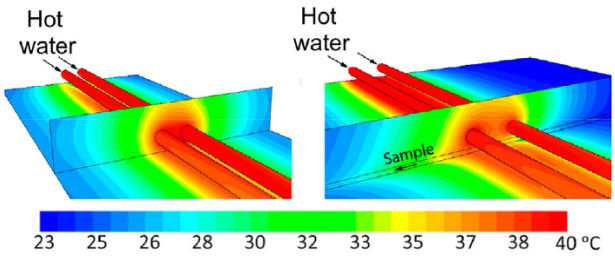
اولین روش برای کنترل دمای درونی در سیستم‌های میکروفلوئیدیک مبتنی بر استفاده از واکنش‌های شیمیایی و خواص آن‌ها است. پیشگام این روش Guijt و همکاران بودند که از واکنش‌های اندوترمیک و اگزوترمیک به‌طور همزمان بهره بردند. در این رویکرد، جریان استون (واکنشگر ۱) و جریان هوا (واکنشگر ۲) با هم ترکیب شده و تبخیر استون باعث ایجاد سرمایش می‌شود، در حالی که مخلوط کردن محلول ۹۷ درصد وزنی اسید سولفوریک (واکنشگر ۱) با آب (واکنشگر ۲) واکنش اگزوترمیک تولید می‌کند. این واکنش‌ها توانستند دماهایی در بازه منفی ۳ تا ۷۶ درجه سانتی‌گراد ایجاد کنند که از طریق تنظیم میزان تزریق واکنشگرها به کانال‌های مربوطه قابل کنترل بود [۷].



شکل ۳-۳: کنترل دمای کانال نمونه با واکنش‌های گرماگیر و گرماده [۱]

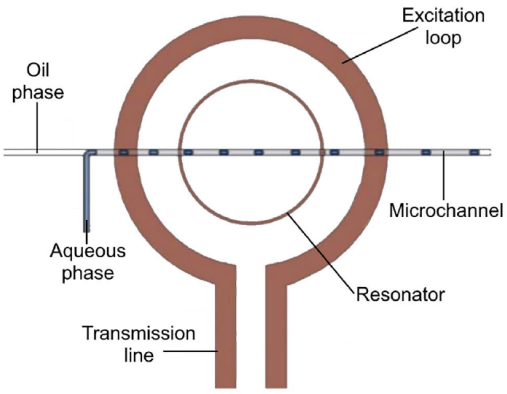
طراحی‌های ساختاری

در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک، ترکیبات ساختاری داخلی روشی موثر برای کنترل دما و کاهش نیاز به المان‌های گرمایشی خارجی است. این روش‌ها با طراحی دقیق کانال‌ها و اجزای داخلی، انتقال هدفمند حرارت را ممکن می‌سازند. برای نمونه، لوله‌های تایگون تعبیه‌شده در کنار کانال‌ها با عبور سیال گرم یا سرد، دمای نمونه را تنظیم می‌کنند و در برخی طراحی‌ها به صورت مارپیچ پیچیده شده‌اند تا بازه دمایی ۲۴ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد را پوشش دهند. همچنین، در مواد عایق، نقاط داغ ناشی از میدان الکتریکی بالا به کمک گرمایش ژول، گرمایش موضعی ایجاد می‌کنند که دما به تدریج از آن نقاط کاهش می‌یابد [۸].



شکل ۳-۴: توزیع حرارت در دستگاه میکروفلوئیدیک با کنترل دمای لوله‌های تیگون [۱]

گرمایش مایکروویو به عنوان نوعی از ترتیبات ساختاری داخلی، با بهره‌گیری از خواص دی‌الکتریک متفاوت اجزای نمونه، انرژی را به صورت انتخابی منتقل می‌کند. این روش شامل مولد سیگنال مایکروویو و خط انتقال روی رزوناتور مایکروویو است که با تداخل سازنده امواج، گرمایش موضعی ایجاد می‌کند. این فناوری برای کاربردهای بیولوژیکی و اختلاط مناسب بوده و محدوده دمایی ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد را پوشش می‌دهد.



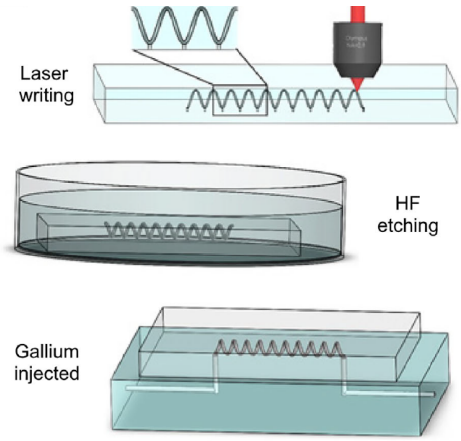
شکل ۳-۵: اجزای اصلی سیستم گرم‌کن مایکروویوی [۱]

این روش‌ها مزایایی مانند کاهش هزینه، کاهش نیاز به تجهیزات خارجی و کنترل دقیق دما با حداقل اتلاف حرارتی دارند، اما پیچیدگی ساخت، تضمین یکنواختی دما و محدودیت‌های مواد سازگار

از چالش‌های آن هستند.

میکروهیترهای یکپارچه

میکروگرمکن‌های یکپارچه داخلی، المان‌های گرمایشی تعبیه‌شده در ساختار دستگاه‌های میکروفلوئیدیک هستند که برخلاف میکروگرمکن‌های خارجی، گرمایش سریع‌تر و دقیق‌تری را فراهم می‌کنند. این میکروگرمکن‌ها بسته به طراحی و جنس مواد، محدوده دمایی متنوعی ارائه می‌دهند[۹]؛ برای مثال، مدل‌های مارپیچ دمای ۲۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد را با دقت بالا کنترل می‌کنند و مدل‌های حلزونی می‌توانند تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد را با نرخ گرمایش و سرمایش سریع ایجاد کنند [۱۰]. همچنین، میکروگرمکن‌های فیلم نازک در سیستم‌های Lab-on-a-Chip کاربرد داشته و دمای ۲۱ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد تولید می‌کنند [۱۱]. این میکروگرمکن‌ها هزینه‌ها را کاهش داده و دقت کنترل دما را افزایش می‌دهند، اما چالش‌هایی مانند پیچیدگی ساخت، نیاز به تجهیزات تخصصی و تضمین یکنواختی دما نیز وجود دارد. با این حال، آن‌ها به‌ویژه در تشخیص پزشکی نقطه مراقبت [۶] مناسب بوده و امکان توسعه دستگاه‌های خودکفا را فراهم می‌کنند.



شکل ۳-۶: پیکربندی میکروهیتر سولنوئیدی در میکروکانال [۱]

[۶] Point-of-Care

فصل ۴

طراحی و پیاده‌سازی سیستم

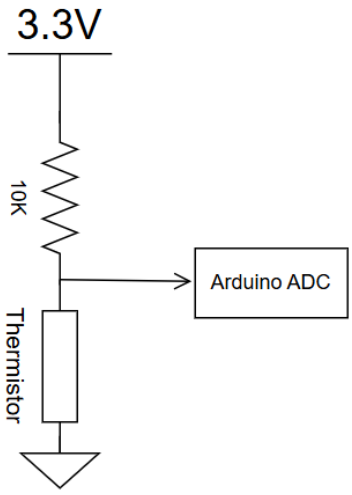
در این فصل، مراحل طراحی و پیاده‌سازی سامانه پایش و کنترل دمایی پیشنهادی این پژوهش برای کاربردهای میکروفلویدیکی ارائه می‌شود. در این سیستم، از ترمیستور NTC به‌عنوان سنسور دما، از یک میکروهیتر برای تولید حرارت، و از میکروکنترلر Arduino برای پردازش داده‌ها و اجرای الگوریتم کنترلی استفاده شده است. ساختار کلی سیستم شامل سه بخش اصلی است: طراحی مدار خوانش دمایی، طراحی و کنترل منبع گرمایی، و پیاده‌سازی حلقه بازخورد بر بستر سخت‌افزار ساده و قابل‌حمل. هر بخش به‌صورت مجزا معرفی شده و نحوه عملکرد، انتخاب قطعات و تعامل آن‌ها برای حفظ دمای پایدار بررسی خواهد شد.

۴-۱ حسگر دما و مدار اتصال

برای اندازه‌گیری دما در سامانه طراحی‌شده، از ترمیستور نوع NTC[۱] (ضریب دمایی منفی) با بسته‌بندی SMD 0603[۲] (نصب سطحی) و مقاومت اسمی $10k\Omega$ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. دلیل انتخاب این نوع سنسور، ابعاد بسیار کوچک، قیمت پایین، و سهولت در اتصال به مدارهای الکترونیکی ساده مانند تقسیم مقاومتی است. علاوه بر این، رفتار غیرخطی نمایی ترمیستور نسبت به دما باعث شده تا در بازه‌های دمایی محدود، حساسیت بالایی نسبت به تغییرات دما داشته باشد. این ویژگی، ترمیستور را به گزینه‌ای مناسب برای پایش دقیق دما در مقیاس‌های کوچک، مانند سامانه‌های میکروفلویدیکی، تبدیل کرده است.

[۱] Negative Temperature Coefficient
[۲] Surface-Mount Device

برای خواندن مقدار مقاومت ترمیستور، از یک مدار تقسیم ولتاژ استفاده شده است. در این مدار، ترمیستور به‌صورت سری با یک مقاومت ثابت $10k\Omega$ متصل شده و دو سر این مجموعه بین خروجی 3.3V و زمین [۳] آردوینو قرار گرفته‌اند. نقطه میانی بین دو مقاومت به یکی از پایه‌های ورودی آنالوگ آردوینو متصل شده است. ولتاژ خروجی این نقطه، که تابعی از مقاومت ترمیستور و دمای محیط است، توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال [۴] آردوینو اندازه‌گیری می‌شود. مقدار 3.3V به‌عنوان منبع تغذیه انتخاب شده است چرا که نوسانات کمتری نسبت به 5V دارد و در نتیجه، پایداری اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد [۱۲]. با دانستن مقدار مقاومت ثابت و ولتاژ خوانده‌شده، مقاومت لحظه‌ای ترمیستور محاسبه شده و سپس دما با استفاده از رابطه نمایی استخراج می‌شود.



شکل ۴-۱: نمای گرافیکی مدار تقسیم ولتاژ مقاومتی استفاده شده

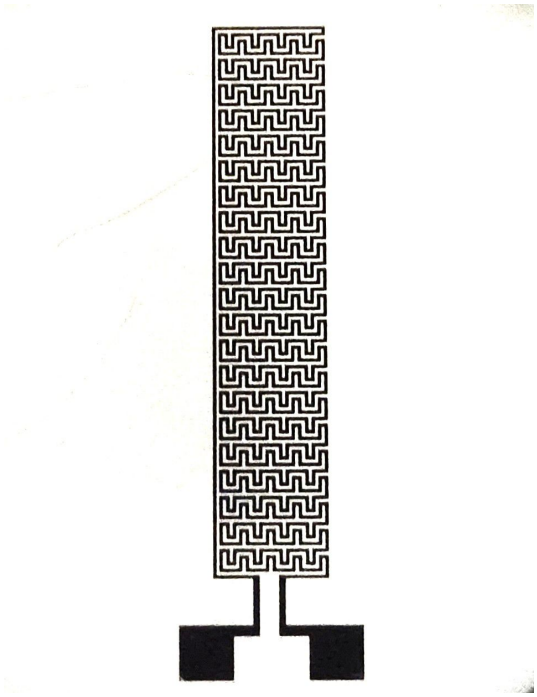
برای کالیبراسیون ترمیستور، فرآیندی طراحی شد که در آن دمای محیط به‌صورت مرحله‌ای از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به بالا افزایش داده شد. در هر مرحله، دما با دقت ۱ درجه افزایش یافته و در هر نقطه، مقاومت ترمیستور و دمای واقعی ثبت می‌شد. به‌منظور تعیین دقیق دما، از یک سنسور دیجیتال مستقل با دقت ۱/۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد که به‌طور هم‌زمان با ترمیستور در مجاورت تراشه قرار داشت. در هر مرحله، دمای مرجع از طریق سنسور دیجیتال ثبت شده و مقاومت ترمیستور از طریق خوانش ولتاژ در مدار تقسیم مقاومتی توسط آردوینو محاسبه می‌شد. داده‌های به‌دست‌آمده برای تعیین تابع رابطه بین مقاومت و دما مورد استفاده قرار گرفتند و با استفاده از ابزار Curve Fitter در نرم‌افزار MATLAB، مقادیر دقیق پارامترهای R_{25} و برای ترمیستور استخراج شدند. این مقادیر در مدل نمایی جای‌گذاری شده و منحنی تطبیقی نهایی برای محاسبه دمای لحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفت [۱۳]. این کالیبراسیون امکان تبدیل دقیق مقاومت به دما را در بازه دمایی موردنظر فراهم کرد.

---

[۳] GND
[۴] ADC

۴-۲ میکروهیتر و مدار اتصال

در این پروژه، برای اعمال گرمایش یکنواخت در سطح تراشه از یک میکروهیتر با هندسه مارپیچ مربعی استفاده شد. این ساختار به‌گونه‌ای طراحی شده است که با افزایش طول مسیر جریان در مساحت محدود، مقاومت الکتریکی افزایش یافته و در نتیجه توان گرمایی تولیدشده بیشتر و توزیع آن یکنواخت‌تر باشد. گرم‌کننده از جنس مس با ضخامت تقریبی 100 nm انتخاب شد که به دلیل رسانایی بالا، قیمت مناسب، و سازگاری با فرآیندهای لایه‌نشانی، گزینه‌ای مناسب برای ساخت در ابعاد میکرو محسوب می‌شود. طراحی مارپیچی همچنین باعث توزیع یکنواخت‌تر حرارت در ناحیه موردنظر شده و از ایجاد نقاط داغ موضعی جلوگیری می‌کند.



شکل ۴-۲: طرح میکروهیتر

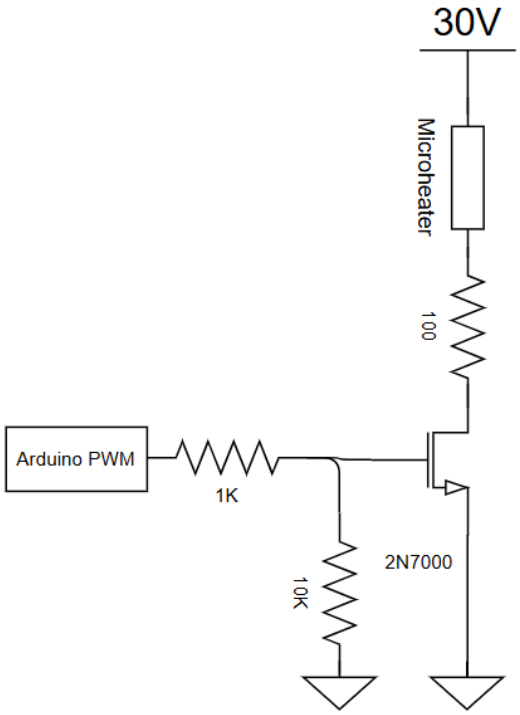
فرآیند ساخت گرم‌کننده با استفاده از روش لایه‌نشانی فیزیکی بخار[۵] به‌صورت اسپاترینگ انجام شد. ابتدا لایه نازکی از مس به ضخامت حدود 100 nm بر روی زیرلایه شیشه‌ای پوشش داده شد. سپس به‌منظور الگوگذاری هندسه مارپیچ، از روش فوتولیتوگرافی[۶] استفاده گردید. در این مرحله، یک لایه مقاوم نوری[۷] بر روی سطح رسوب‌گذاری‌شده اعمال شده و با استفاده از ماسک نوری حاوی طرح گرم‌کننده، در معرض نور فرابنفش قرار گرفت. پس از آشکارسازی[۸]، الگوی مورد نظر روی لایه مقاوم ظاهر شد و بخش‌های اضافی

[۵] Physical Vapor Deposition
[۶] Photolithography
[۷] Photoresist
[۸] Development

مس با استفاده از اچ شیمیایی[۹] حذف گردیدند. در نهایت، لایه مقاوم نوری برداشته شده و ساختار نهایی گرم‌کننده با هندسه دقیق به دست آمد.

برای کنترل جریان عبوری از میکروهیتر، از سیگنال پالس پهنای مدولاسیون (PWM) به عنوان ولتاژ ورودی گیت ماسفت استفاده می‌شود. سیگنال PWM با تغییر ضریب وظیفه، مقدار متوسط ولتاژ اعمال‌شده به گیت را تنظیم کرده و به این ترتیب امکان کنترل دقیق جریان و توان گرمایشی میکروهیتر فراهم می‌گردد. استفاده از PWM مزایایی مانند کاهش تلفات حرارتی نسبت به روش‌های خطی، افزایش کارایی سیستم، و امکان پاسخ‌دهی سریع به تغییرات فراهم می‌آورد. همچنین، فرکانس بالای سیگنال PWM موجب کاهش نویز و بهبود عملکرد کنترل می‌شود.

در مدار مورد استفاده، پایه گیت ماسفت از طریق مقاومت ۱ کیلو اهم به خروجی PWM آردوینو متصل است. مقاومت پایین‌کشنده[۱۰] ۱۰ کیلو اهم نیز بین گیت و زمین قرار دارد تا از شناور بودن ولتاژ گیت هنگام عدم ارسال سیگنال جلوگیری کند. همچنین، یک مقاومت بین میکروهیتر و درین ماسفت اضافه شده است که امکان اندازه‌گیری جریان عبوری از میکروهیتر را فراهم می‌سازد.



شکل ۴-۳: نمای گرافیکی مدار اتصال میکروهیتر به خروجی آردوینو

---

[۹] Etching
[۱۰] Pull-down

۴-۳ الگوریتم کنترلی

در این بخش، الگوریتم کنترلی دما بر پایه کنترل‌کننده PID که پیش‌تر در فصل پیش‌نیازها توضیح داده شد، پیاده‌سازی شده است. این الگوریتم به‌صورت نرم‌افزاری بر روی پلتفرم Arduino اجرا می‌شود و با دریافت دمای اندازه‌گیری‌شده از سنسور ترمیستور، خروجی مناسب را برای اعمال به گرم‌کننده محاسبه می‌کند. در ادامه، فرآیند خواندن دما، محاسبه مقاومت، استخراج دمای لحظه‌ای، و کنترل توان خروجی با استفاده از PWM به‌صورت گام‌به‌گام نمایش داده شده است.

الگوریتم ۱ خواندن دما و اعمال کنترل PID

ورودی: ولتاژ ADC

خروجی: سیگنال PWM برای کنترل گرم‌کننده

۱: چندین بار مقدار آنالوگ از سنسور ترمیستور را بخوان و میانگین بگیر

۲: ولتاژ خروجی تقسیم مقاومتی را محاسبه کن

۳: مقاومت ترمیستور را بر اساس ولتاژ محاسبه کن

۴: دمای لحظه‌ای را از روی مقاومت و اطلاعات کالیبراسیون استخراج کن

۵: دمای به‌دست‌آمده را به عنوان ورودی کنترل‌کننده PID استفاده کن

۶: خروجی PID را محاسبه کن و به صورت PWM به گرم‌کننده اعمال کن

برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID، ابتدا از کتابخانه autotuner استفاده شد که قابلیت تخمین خودکار پارامترها را دارد [۱۴]. با این حال، استفاده از این کتابخانه باعث ایجاد نوسانات زیاد و پاسخ‌دهی کند سیستم گردید که در کاربردهای دقیق دمایی مطلوب نبود. بنابراین، ضرایب PID به صورت دستی تنظیم شدند تا نوسانات کمتر از 0.2 درجه سانتی‌گراد و پاسخ سریع به اختلالات محیطی حاصل شود. این روش دستی تنظیم، کنترل پایدارتری را فراهم کرده و عملکرد سیستم را بهبود بخشید.

فصل ۵

نتایج جدید

در این فصل، نتایج عملکردی سامانه طراحی‌شده برای پایش و کنترل دما ارائه می‌شود. پیش از انجام آزمایش‌ها، مشخص شد که نوسانات جزئی دمای محیط و جریان هوای اطراف، بر پایداری دمایی سیستم تأثیر منفی می‌گذارند. به همین دلیل، از لایه‌ای از فوم عایق حرارتی در اطراف و زیر تراشه استفاده شد تا سیستم از تأثیرات محیطی مانند باد و تغییرات لحظه‌ای دما محافظت شود. این اقدام باعث کاهش نویز و اغتشاشات ناخواسته و بهبود چشم‌گیر در نوسانات حالت ماندگار شد.

ساختار این فصل شامل دو بخش اصلی است: در بخش اول، پاسخ زمانی سیستم به تغییرات دما و رفتار آن در رسیدن به دمای هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش دوم، توزیع دما و گرادیان حرارتی در سطح زیرلایه تحلیل شده و یکنواختی گرمایش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

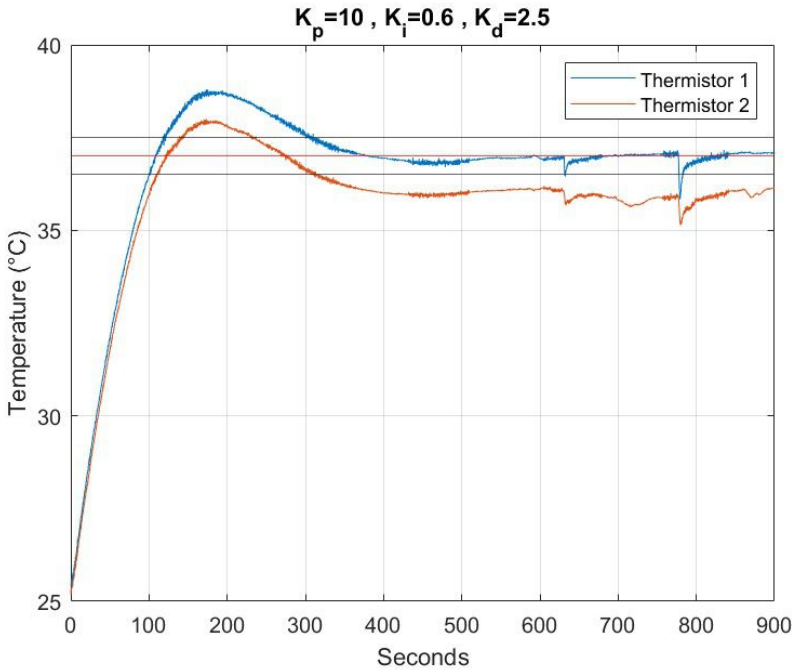
۵-۱ پاسخ زمانی سیستم

پاسخ زمانی یک سیستم کنترلی دما شامل پارامترهایی نظیر زمان افزایش، زمان نشست، زمان پاسخ به اغتشاش، و نوسانات حالت ماندگار است که به‌طور مستقیم بر عملکرد نهایی تأثیر می‌گذارند. زمان افزایش [۱] معمولاً فاصله زمانی بین رسیدن دما از ۱۰٪ تا ۹۰٪ مقدار نهایی هدف تعریف می‌شود و نشان‌دهنده سرعت اولیه گرم شدن است. زمان نشست [۲] نیز مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا دما با درصد مشخصی خطا (معمولاً ۲٪) به مقدار هدف برسد و در آن باقی بماند. از سوی دیگر، توانایی سیستم در مقابله با اغتشاشات محیطی، نظیر وزش ناگهانی باد، با زمان پاسخ به اغتشاش شناخته می‌شود. نوسانات حالت

[۱] Rise Time
[۲] Settling Time

ماندگار نیز میزان تغییرات دما در حالت پایدار پس از رسیدن به دمای هدف را مشخص می‌کند و معیار خوبی برای ارزیابی دقت نهایی سیستم به‌شمار می‌رود.

این مقادیر در شرایط محیطی مختلف ممکن است کمی متفاوت باشند و به دمای اولیه و عوامل خارجی مانند جریان هوا وابسته هستند. با این حال، به‌طور تقریبی، زمان افزایش سیستم برای رسیدن از دمای محیط (حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد) به دمای هدف ۳۷ درجه سانتی‌گراد، برابر با ۹۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. زمان نشست سیستم نیز حدود ۳۰۰ ثانیه است تا دما با خطای کمتر از ۲٪ پایدار شود. در شرایطی که اغتشاشی مانند وزش باد ناگهانی باعث تغییر دما شود، اگر تغییر دما حدود $0.5°C$ درجه سانتی‌گراد باشد، سیستم در کمتر از ۵ ثانیه به حالت پایدار بازمی‌گردد، و اگر میزان تغییر به حدود ۱ درجه برسد، زمان برگشت به حالت پایدار کمتر از ۱۰ ثانیه خواهد بود. دامنه نوسانات در حالت ماندگار نیز کمتر از $\pm 0.2°C$ گزارش شده است که دقت بالای حلقه کنترلی را تأیید می‌کند.

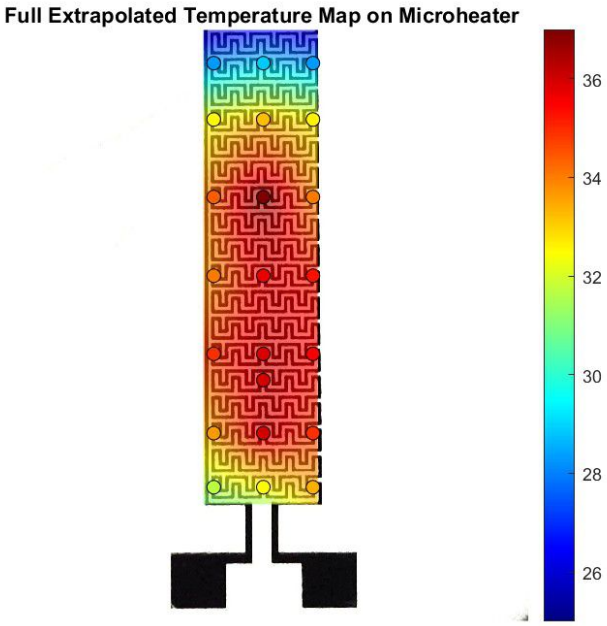


شکل ۵-۱: یک نمونه پاسخ زمانی سیستم با دو نمونه اختلال خارجی

در شکل ۵-۱، پاسخ دمایی دو ترمیستور نمایش داده شده است. ترمیستور ۱ به‌عنوان مرجع در الگوریتم کنترلی استفاده می‌شود و دمای آن برای تنظیم توان گرم‌کننده به کار می‌رود. ترمیستور ۲ در فاصله مشخصی از ترمیستور ۱ قرار گرفته و برای بررسی گرادیان دمایی در سطح گرم‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل اختلاف دمای میان این دو نقطه در بخش بعدی ارائه خواهد شد.

۵-۲ نقشه توزیع دما

برای بررسی توزیع دما در سطح گرم‌کننده، از ترمیستور دوم که همراه با ترمیستور اول کالیبره شده بود، استفاده شد. این ترمیستور به‌صورت دستی در بیش از ۲۰ نقطه مختلف در امتداد مسیر گرم‌کننده قرار گرفت و در هر موقعیت، پس از رسیدن سیستم به حالت پایدار، دمای موضعی اندازه‌گیری شد. داده‌های به‌دست‌آمده برای ترسیم نقشه دمایی به نرم‌افزار MATLAB وارد شد و با استفاده از تابع scatteredInterpolant، مقادیر دما بین نقاط اندازه‌گیری‌شده به‌صورت پیوسته در سراسر سطح گرم‌کننده درون‌یابی شد [۱۵]. نتیجه این تحلیل در قالب نقشه رنگی در شکل ۵-۲ نمایش داده شده است که توزیع دما و گرادیان حرارتی در نقاط مختلف ساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲: نقشه توزیع حرارتی بر میکروهیتر

همان‌طور که در نقشه دمایی مشاهده می‌شود، اختلاف دما در طول مسیر گرم‌کننده قابل‌توجه است؛ به‌طوری‌که ناحیه مرکزی ساختار داغ‌تر بوده و دما به‌تدریج در نواحی انتهایی کاهش می‌یابد. با این حال، با توجه به اینکه کانال‌های میکروفلویدیکی مورد استفاده دارای طول کم و ابعاد بسیار کوچکی هستند، این گرادیان حرارتی در مقیاس کانال تأثیر مخربی بر عملکرد سامانه نخواهد داشت. به‌عبارت دیگر، پایداری دما در ناحیه فعال دستگاه به‌حد کافی حفظ شده است. با این وجود، ایده‌هایی برای بهبود یکنواختی توزیع دما در فصل نتیجه‌گیری مطرح شده‌اند که می‌توانند در نسخه‌های آینده سیستم لحاظ شوند.

فصل ۶

نتیجه‌گیری

در این پروژه، یک سامانه دقیق و کم‌هزینه برای پایش و کنترل دما در دستگاه‌های میکروفلویدیکی طراحی و پیاده‌سازی شد. در این سامانه، از ترمیستور نوع NTC به‌عنوان سنسور دما، گرم‌کننده‌ی میکروهیتر با هندسه مارپیچ مربعی از جنس مس، و میکروکنترلر Arduino برای اجرای الگوریتم کنترلی استفاده گردید. فرآیند طراحی شامل انتخاب قطعات، کالیبراسیون دقیق سنسور، طراحی مدارهای لازم، و پیاده‌سازی حلقه کنترل دمایی با استفاده از الگوریتم PID بوده است. همچنین، پاسخ زمانی سامانه و توزیع دمایی سطح گرم‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفت تا عملکرد نهایی دستگاه در شرایط واقعی بررسی شود.

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان دادند که سامانه طراحی‌شده قادر است دمای هدف ۳۷ درجه سانتی‌گراد را از دمای محیط در زمانی حدود ۹۰ ثانیه با دقت بالا برسد. دامنه نوسانات در حالت ماندگار کمتر از $\pm 0.2°C$ اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده پایداری و دقت مناسب کنترل‌کننده است. همچنین، سیستم توانست در برابر اغتشاشاتی مانند وزش باد با تغییر دمای تا ۱ درجه سانتی‌گراد، در کمتر از ۱۰ ثانیه به تعادل بازگردد. توزیع دما در سطح گرم‌کننده با استفاده از اندازه‌گیری‌های چندنقطه‌ای و درونیابی نرم‌افزاری تحلیل شد و امکان ترسیم نقشه رنگی از گرادیان حرارتی فراهم گردید.

با وجود عملکرد قابل‌قبول سامانه، برخی محدودیت‌ها نیز در طول پروژه مشاهده شد. توزیع دما در سطح گرم‌کننده کاملاً یکنواخت نبوده و ناحیه مرکزی گرمای بیشتری نسبت به لبه‌ها داشت. این مسئله می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به یکنواختی حرارتی کامل دارند، محدودیت ایجاد کند. زمان نشست سیستم نسبتاً بالا و در حدود ۳۰۰ ثانیه بود که در برخی کاربردهای سریع‌تر ممکن است مطلوب نباشد. همچنین، وابستگی عملکرد سامانه به شرایط محیطی مانند دمای اولیه یا جریان هوای اطراف، باعث شد که مقادیر زمانی به‌دست‌آمده در شرایط مختلف، نوسان داشته باشند. کنترل این عوامل نیازمند بهینه‌سازی‌های بیشتر در عایق‌بندی و طراحی مکانیکی سیستم است.

برای بهبود عملکرد سیستم در نسخه‌های آینده، مسیرهای مختلفی قابل بررسی هستند. تغییر شکل گرم‌کننده می‌تواند منجر به توزیع یکنواخت‌تر حرارت در سطح زیرلایه شود و هندسه‌هایی مانند مارپیچ شعاعی یا طراحی‌های چندشاخه قابل آزمایش هستند. همچنین، استفاده از فلزاتی نظیر طلا به جای مس به‌دلیل خواص شیمیایی خنثی و پایداری الکتریکی بالاتر می‌تواند امکان قرارگیری مستقیم کانال میکروفلویدیکی بر روی گرم‌کننده را فراهم کند و طراحی سیستم را ساده‌تر سازد. تغییر جنس زیرلایه به موادی مانند کوارتز نیز می‌تواند به بهبود پایداری حرارتی و کاهش گرادیان دما کمک کند. راهکار دیگر، افزودن یک لایه مسی حرارتی با جداکننده دی‌الکتریک بر روی گرم‌کننده است که به توزیع متعادل‌تر حرارت در سطح سیستم کمک می‌کند و می‌تواند به‌ویژه در نسخه‌های پیشرفته‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که با استفاده از طراحی مناسب، انتخاب مؤلفه‌های ساده و الگوریتم کنترلی دقیق، می‌توان سامانه‌ای قابل‌اطمینان، کم‌هزینه و قابل‌حمل برای کنترل دما در مقیاس میکروفلویدیکی توسعه داد. اگرچه چالش‌هایی همچون توزیع غیریکنواخت دما و حساسیت به شرایط محیطی وجود داشت، نتایج به‌دست‌آمده بیانگر قابلیت عملیاتی بالای سیستم طراحی‌شده در کاربردهای زیستی و تحلیلی است. این پروژه می‌تواند پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های پیشرفته‌تر با دقت و انعطاف‌پذیری بیشتر باشد و گامی مؤثر در جهت ساده‌سازی و بومی‌سازی تجهیزات میکروپزشکی و آزمایشگاهی تلقی شود.

Bibliography

[1] A. A. Dos-Reis-Delgado, A. Carmona-Dominguez, G. Sosa-Avalos, I. H. Jimenez-Saaib, K. E. Villegas-Cantu, R. C. Gallo-Villanueva, and V. H. Perez-Gonzalez. Recent advances and challenges in temperature monitoring and control in microfluidic devices. *ELECTROPHORESIS*, 2022.

[2] R. C. Gallo-Villanueva, V. H. Perez-Gonzalez, B. Cardenas-Benitez, B. Jind, S. O. Martinez-Chapa, and B. H. Lapizco-Encinas. Joule heating effects in optimized insulator-based dielectrophoretic devices: An interplay between post geometry and temperature rise. *ELECTROPHORESIS*, 40(10):1408–1416, 2019.

[3] M. Kong and Others. A wearable microfluidic device for rapid detection of hiv-1 dna using recombinase polymerase amplification. *Talanta*, 205:120155, 2019.

[4] A. M. Nightingale and Others. A droplet microfluidic-based sensor for simultaneous in situ monitoring of nitrate and nitrite in natural waters. *Environmental Science & Technology*, 53(16):9677–9685, 2019.

[5] J. Peng and Others. Development of a microfluidic device with precise on-chip temperature control by integrated cooling and heating components for single cell-based analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130:660–667, 2019.

[6] G. Nasser, A. Abdel-Mawgood, A. Abouelsoud, H. Mohamed, S. Umezu, and A. El-Bab. New cost effective design of pcr heating cycler system using peltier plate without the conventional heating block. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35:3259–3268, 2021.

[7] R. Guijt, A. Dodge, G. van Dedem, N. de Rooij, and E. Verpoorte. Chemical and physical processes for integrated temperature control in microfluidic devices. *Lab on a Chip*, 3:1–4, 2003.

[8] J. Zhu, N. Nguyen, S. Baratchi, P. Thurgood, K. Ghorbani, and K. Khoshmanesh. Temperature-controlled microfluidic system incorporating polymer tubes. *Analytical Chemistry*, 91:2498–2505, 2018.

[9] D. Lee, C. Fang, A. Ravan, G. Fuller, and A. Shen. Temperature controlled tensiometry using droplet microfluidics. *Lab on a Chip*, 17(4):717–726, 2017.

[10] H. Bian, C. Shan, F. Chen, Q. Yang, Y. Li, and Q. Li. Miniaturized 3-d solenoid-type micro-heaters in coordination with 3-d microfluidics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(3):588–592, 2017.

[11] W. Liu, Y. Ren, F. Chen, J. Song, Y. Tao, K. Du, et al. A microscopic physical description of electrothermal-induced flow for control of ion current transport in microfluidics interfacing nanofluidics. *Electrophoresis*, 40:2683–2698, 2019.

[12] L. Ada. Thermistor. https://learn.adafruit.com/thermistor/using-a-thermistor?utm_source=chatgpt.com#connecting-to-a-thermistor-2917722, July 2012. Adafruit Learning System, accessed July 4, 2025.

[13] The MathWorks, Inc. *Curve Fitting Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 2023. Version R2023a. Available at https://www.mathworks.com/help/curvefit/.

[14] br3ttb. GitHub - br3ttb/Arduino-PID-AutoTune-Library. https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-AutoTune-Library, 2025. Accessed: 2025-07-04.

[15] The MathWorks, Inc. *scatterInterpolant*. The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 2023. MATLAB function. Documentation available at https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/scatterinterpolant.html.

Abstract

Precise temperature control in microfluidic systems plays a key role in optimizing the performance of processes and chemical reactions, as temperature fluctuations can reduce the accuracy and efficiency of these systems in applications such as biomedicine and material synthesis. The aim of this research is to design and implement a temperature control system with high accuracy and stability for use in microfluidic platforms. To this end, a precise temperature sensor was utilized alongside a feedback control algorithm to measure and regulate the system temperature in real time. To evaluate the system's performance, experiments were conducted focusing on heating a chip with a metal heater and maintaining it around 37°C. The results demonstrated that the proposed system can establish relatively stable temperature at the chip center; however, further investigation of the temperature distribution revealed the presence of a thermal gradient across the chip surface. This finding contributes to a more precise understanding of thermal behavior in microfluidic systems and can be applied in future designs to improve thermal uniformity.

Keywords: Microfluidics, Sensors, Microheater, Temperature, Feedback Algorithm, Microcontroller

Sharif University of Technology

Department of Electrical Engineering

B.Sc. Thesis

Design of An Integrated Microfluidic Chip Temperature Control for Biological Studies

By:

Helia Shakeri

Supervisor:

Dr. Fardmanesh

June 2025