ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(10):667-675.

# Design and Fabrication of a Bistable Microfluidic Paper-Based Transistor

**ARTICLE INFO**

***Article Type***
Original Research

***Authors***
Pourreza Khader F.[1],
Abedini-Nassab R.[1*]

**How to cite this article**
Pourreza Khader F., Abedini-Nassab R., Design and Fabrication of a Bistable Microfluidic Paper-Based Transistor. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(10):667-675.*

**ABSTRACT**

In recent years, paper-based microfluidic devices have attracted significant attention. However, the inability to precisely control multiple fluids simultaneously has remained a major challenge for paper-based microfluidic chips. Here, inspired by electrical circuits, a transistor component has been designed and fabricated for operation in paper-based microfluidic chips. This component, upon receiving an electrical command, regulates the flow of fluid within a paper-based microfluidic channel. The primary advantage of this transistor lies in its bi-stable operation (capability to open and close the channel) despite its simple structure. Its operation is based on the controlled movement of wax, driven by the heat generated from the electrical current applied to the transistor's gate, within the cross-section of the paper. To characterize this transistor, the parameters affecting its operation were analyzed. Experimental results indicated that in a channel with length of 25 mm, with widths of 2 mm and 3 mm, and hydrophobic section lengths of 2 mm and 3 mm, a fluid volume of 30 to 40 microliters could be controlled by applying a gate electrical current of about 1300 milliamperes for less than 35 seconds. Additionally, as a practical demonstration of this transistor's functionality, a sensor circuit was designed and fabricated to detect acidic and basic environments. The proposed transistor, by enhancing fluid controllability in microfluidic chips, plays a key role in advancing this technology. Paper-based microfluidic chips equipped with the transistor presented in this study hold promising potential for applications in medical diagnostics, performing complex multi-step tests, biosensors and chemical sensors.

**Keywords** Paper-Based Microfluidic Chip, Transistor, Fluid Flow Control

**CITATION LINKS**

1- Microfluidic integration of regeneratable electrochemical affinity-based biosensors for continual monitoring of organ-on-a-chip devices. 2 - A microfluidic biosensor for the diagnosis of chronic wasting disease. 3 - Highly parallel and efficient single cell mRNA sequencing with paired picoliter chambers. 4 - Microfluidics: a concise review of the history, principles, design, applications, and future outlook. 5 - Low-cost microfluidics: Towards affordable environmental monitoring and assessment. 6 - Fabrication of a Low-Cost Microfluidic Device for High-Throughput Drug Testing on Static and Dynamic Cancer Spheroid Culture Models. 7 -Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays. 8 - Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma Treatment. 9 - A fast, reconfigurable flow switch for paper microfluidics based on selective wetting of folded paper actuator strips. 10 - A paper-based microfluidic switch activated by surface acoustic waves, 2011 Symposium on Piezoelectricity. 11- Characterization of wax valving and μPIV analysis of microscale flow in paper-fluidic devices for improved modeling and design.

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

***Correspondence***
Address: Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

abedini@modares.ac.ir

***Article History***
Received: January 25, 2025
Accepted: November 29, 2024
ePublished: January 5, 2025

*Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.*

# طراحی و ساخت ترانزیستور دوحالته میکروفلویدیک مبتنی بر کاغذ

**فاطمه پوررضا خادر[۱] ، روزبه عابدینی نسب[۱]***
[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

## چکیده
در سال‌های اخیر، دستگاه‌های میکروفلویدیک مبتنی بر کاغذ به‌طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، ناتوانی در کنترل دقیق و هم‌زمان سیالات مختلف، یکی از چالش‌های اصلی تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی به‌شمار می‌رود. در اینجا، با الهام از مدارهای الکتریکی، قطعه‌ای به نام ترانزیستور برای استفاده در تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی طراحی و ساخته شده است. این قطعه، با دریافت فرمان الکتریکی، حرکت سیال را در یک کانال میکروفلویدیک کاغذی کنترل می‌کند. مزیت اصلی این ترانزیستور، عملکرد دوحالته آن (توانایی باز و بسته کردن کانال) با وجود ساختار ساده‌اش است. عملکرد این قطعه مبتنی بر حرکت کنترل‌شده موم در سطح مقطع کاغذ است که با حرارت تولیدشده توسط جریان الکتریکی اعمالی به پایه تحریک ترانزیستور انجام می‌شود. به‌منظور مشخصه‌یابی این ترانزیستور، کمیت‌های مؤثر در عملکرد آن بررسی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در کانالی به‌طول تقریبی ۲۵ میلی‌متر، با عرض‌های ۲ و ۳ میلی‌متر و طول بخش آب‌گریز ۲ و ۳ میلی‌متر، می‌توان با اعمال جریان الکتریکی حدود ۱۳۰۰ میلی‌آمپر به پایه تحریک ترانزیستور، در زمانی کمتر از ۳۵ ثانیه، سیالی با حجم ۳۰ تا ۴۰ میکرولیتر را کنترل نمود. علاوه بر این، به‌عنوان نمونه‌ای کاربردی از این ترانزیستور، مدار حسگری برای تشخیص محیط‌های بازی و اسیدی طراحی و ساخته شد. ترانزیستور معرفی شده با افزایش قابلیت کنترل سیالات در تراشه‌های میکروفلویدیک، نقشی کلیدی در توسعه این فناوری ایفا می‌کند. تراشه‌های میکروفلویدیک مبتنی بر کاغذ مجهز به این ترانزیستور می‌توانند کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های تشخیص پزشکی، آزمایش‌های چندمرحله‌ای پیچیده، و حسگرهای زیستی و شیمیایی داشته باشند.

**کلیدواژه‌ها**: تراشه میکروفلویدیک کاغذی، ترانزیستور، کنترل جریان سیال

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶
*نویسنده مسئول: abedini@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه
در تراشه‌های میکروفلویدیک، مایعات و ذرات با دقت بالا و در ابعادی در مقیاس ده‌ها تا صدها میکرومتر کنترل و دستکاری می‌شوند. این تراشه‌ها، به دلیل کاربرد گسترده در حوزه‌هایی مانند پزشکی و زیست‌شناسی، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده‌اند [1-3]. به‌طور رایج، بستر این تراشه‌ها از موادی نظیر شیشه، سیلیکون یا پلیمرها ساخته می‌شود [4]. ایجاد کانال‌ها در این بسترها معمولاً با استفاده از فناوری‌های ساخت پیچیده صنعت الکترونیک صورت می‌گیرد، که پرهزینه بوده و اغلب به تجهیزات تخصصی نیاز دارد. این محدودیت‌ها، پژوهشگران را بر آن داشت تا به دنبال بسترهای جایگزین با ساختاری ساده‌تر، هزینه کمتر فرآیند ساخت آسان‌تر باشند [5-6]. در این راستا، استفاده از کاغذ برای ساخت تراشه‌های میکروفلویدیک به عنوان یک گزینه محبوب مطرح شده است.

در سال ۲۰۰۷، گروه وایتساید با معرفی تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی، رویکردی کاملاً متفاوت را در این حوزه ارائه دادند. در این تراشه‌ها، کاغذ به‌عنوان بستر اصلی استفاده شده و به دلیل ساختار متخلخل آن، حجم‌های کوچک سیالات (در حد میکرولیتر یا کمتر) در اثر خاصیت مویینگی منتقل می‌شوند [7]. در نتیجه، دستگاه‌های تزریق فشاری (پمپ‌ها) که معمولاً جزء ضروری در دستگاه‌های میکروفلویدیک محسوب می‌شوند، در تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی استفاده نمی‌شوند. بدین ترتیب، این تراشه‌ها قابل‌حمل بوده و امکان استفاده از آن‌ها در محیط‌های متنوع فراهم است. همچنین، عدم نیاز به دستگاه‌های تزریق سیال، در کنار قیمت پایین کاغذ نسبت به بسترهای رایج در سایر تراشه‌های میکروفلویدیک، باعث کاهش چشم‌گیر هزینه استفاده از دستگاه‌های ریزسیالی کاغذی می‌شود [2]. ساخت کانال‌ها در تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی به دو روش انجام می‌شود. روش نخست شامل برش کاغذ برای ایجاد مسیرهای سیال است و روش دوم با ایجاد دیواره‌های آبگریز بر روی کاغذ انجام می‌شود که این دیواره‌ها حرکت سیال را در مسیرهای دلخواه هدایت می‌کنند. هر دو روش، راه‌هایی ساده و ارزان‌قیمت، در مقایسه با روش‌های ساخت سایر تراشه‌های میکروفلویدیک رایج (شامل لیتوگرافی نوری)، محسوب می‌شوند. با توجه به این‌که تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی معمولاً یک‌بارمصرف می‌باشند، هزینه پایین بستر تراشه و ساخت تراشه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با وجود جذابیت تراشه‌های میکروفلویدیک مبتنی بر کاغذ، کنترل سیال در کانال‌های آن اغلب امکان‌پذیر نیست یا دشوار است. این چالش، به ویژه هنگامی که هدایت کنترل‌شده و هم‌زمان چند سیال مختلف بر روی تراشه مورد نیاز باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به‌منظور رفع این مشکل، تراشه‌های ریزسیال به کلیدهایی مجهز شده‌اند که وظیفه کنترل انتقال سیال را بر عهده دارند. بسیاری از این کلیدها دارای ساختاری متشکل از دو یا چند کاغذ لایه می‌باشند. در یکی از روش‌های اولیه، با قرار دادن دو لایه کاغذ بر روی هم و ایجاد امکان اتصال یا جدا کردن آن‌ها، کنترل جریان سیال فراهم می‌شود. بدین ترتیب، با اعمال فشار انگشت بر روی کاغذ مربوطه و تا نمودن آن، امکان باز یا بسته شدن مسیر جریان مویرگی فراهم می‌شود [8]. همچنین، برخی پژوهشگران استفاده از تکنیک کاغذ تا شده (origami) را پیشنهاد داده‌اند. در یک پژوهش، سه لایه کاغذ شامل دو کاغذ صاف (کاغذ حامل سیال و کاغذ هدف) و یک کاغذ سوم تا شده (کاغذ تحریک) بدون اتصال در زیر یکدیگر قرار می‌گیرد. در نتیجه، سیال از کاغذ حامل به کاغذ هدف منتقل نمی‌شود، مگر اینکه با اعمال مقدار معینی سیال به کاغذ تحریک، این کاغذ تغییر شکل داده و کاغذ حامل را به کاغذ هدف متصل کند. بدین ترتیب، انتقال سیال صورت می‌پذیرد [9]. اما، ساخت

چنین تراشه‌هایی به دلیل استفاده از چندین لایه کاغذ پیچیده است. علاوه بر آن، سیگنال تحریک مبتنی بر اعمال سیال بوده و این موضوع امکان خودکارسازی کامل (مانند اتصال به کنترلگرهای الکتریکی) را محدود می‌کند. علاوه بر این، وجود بخش‌های متحرک احتمال آسیب‌دیدگی دستگاه در هنگام حمل‌ونقل را افزایش می‌دهد. در پژوهشی دیگر، از ترکیب کاغذ و Polydimethylsiloxane (PDMS) و اعمال سیگنال تحریک صوتی (Acoustic) استفاده شده است [10]. با اینکه نوع تحریک در این روش مناسب‌تر است، اما استفاده از PDMS در ساختار تراشه باعث افزایش پیچیدگی و هزینه تولید می‌شود.

استفاده از موم و تغییر شکل آن به‌وسیله حرارت، به‌عنوان روشی برای کنترل جریان در تراشه‌های میکروفلویدیک مبتنی بر کاغذ معرفی شده است [11]. کلید معرفی شده در آن کار پژوهشی، در حالت اولیه باز بوده (کانال بسته به وسیله موم) و امکان عبور جریان وجود ندارد. با اعمال سیگنال تحریک (حرارت)، موم ذوب شده و از مسیر سیال کنار می‌رود، که در نتیجه عبور سیال ممکن می‌شود. این کلید تک‌حالته است و پس از ذوب شدن موم، امکان بستن مجدد کانال وجود ندارد.

در این پژوهش، با الهام از عملکرد ترانزیستورهای الکتریکی، روشی نوین برای کنترل جریان سیال در تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی ارائه شده است که امکان باز و بسته کردن کانال‌های این تراشه را فراهم می‌سازد. برای این منظور، قطعه‌ای دارای کانالی کاغذی طراحی شد که منبع سیال (سورس ترانزیستور) را به محل موردنظر برای انتقال سیال (درین ترانزیستور) متصل می‌کند. بخش زیرین این کانال به موم آغشته شده است، به‌گونه‌ای که آب از بخش بالایی کانال (در سطح مقطع کاغذ) قابل انتقال است. سپس با اعمال سیگنال تحریک الکتریکی به سیمی که نقش پایه تحریک ترانزیستور را ایفا می‌کند، و تبدیل آن به حرارت، مکان موم را در سطح مقطع کانال، و در نتیجه امکان عبور سیال از کانال را، کنترل می‌کند. بدین ترتیب، این ترانزیستور قابلیت روشن و خاموش شدن داشته و باز و بسته کردن کانال را ممکن می‌سازد. این قابلیت دوحالته برای نخستین‌بار در تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی مبتنی بر موم معرفی شده است. علاوه بر این، به‌عنوان یک کاربرد عملی از این ترانزیستور، حسگری مبتنی بر تراشه میکروفلویدیک کاغذی ارائه شده که در آن از ترانزیستور طراحی شده برای کنترل جریان سیالات مختلف استفاده شده است. با قرار دادن یک ترانزیستور در هر کانال، امکان کنترل هم‌زمان جریان چندین سیال مختلف بر روی یک تراشه فراهم می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- طراحی ترانزیستور میکروفلویدیک کاغذی

در این پژوهش، هدف طراحی و ساخت ترانزیستوری بود که بتواند جریان سیال را در کانال‌های کاغذی کنترل کند. بر اساس بررسی فعالیت‌های پژوهشی پیشین و آزمایش‌های مقدماتی، کانال کاغذی آغشته به موم به‌عنوان ساختار اصلی انتخاب شد. طرح نهایی ترانزیستور موردنظر در شکل ۱-الف نمایش داده شده است که از یک کانال کاغذی آغشته به موم در بخش زیرین آن و دو سیم‌پیچ در بالا و پایین این بخش، تشکیل شده است. عملکرد این ترانزیستور بر مبنای ذوب موم و جابه‌جایی آن در اثر حرارت است. اما دستیابی به این طرح نهایی، پس از مطالعه عملکرد سه نوع کانال متفاوت (کانال کاغذی ساده، کانال آغشته به موم و کانال آغشته به موم با اعمال حرارت به آن)، و مقایسه آن‌ها ممکن شد. به‌منظور مقایسه دقیق رفتار جریان سیال در این سه کانال، طرحی با چهار کانال، شامل یک کانال ورودی و سه کانال خروجی متفاوت، در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود، کانال سمت چپ، کانال مجهز به ترانزیستور کامل (شامل موم و سیم‌پیچ) است. کانال میانی به‌عنوان کانال مرجع، بدون هیچ‌گونه دستکاری و در نهایت، کانال سمت راست به‌عنوان کانال آغشته به موم (بدون سیم‌پیچ) در نظر گرفته شدند.

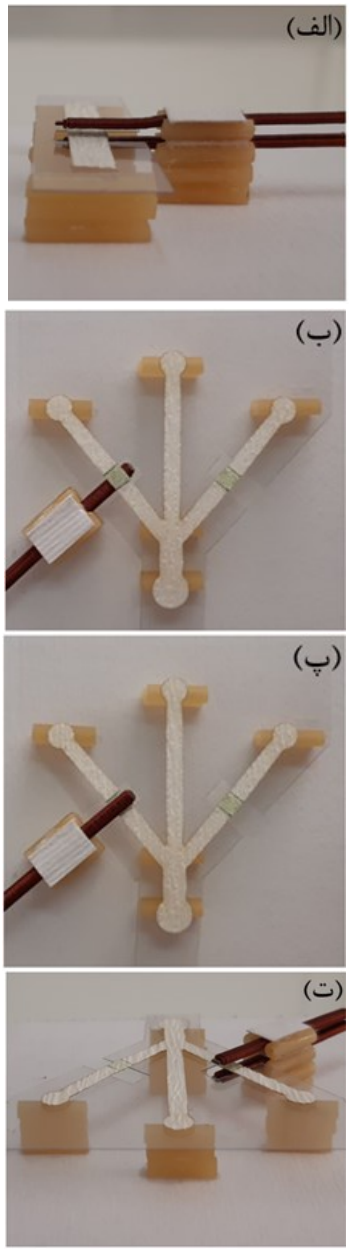
کانال سمت چپ که طرح اصلی ترانزیستور است، شامل دو سیم‌پیچ (زیر و روی بخش آغشته به موم) است. اما به‌منظور امکان نمایش آن دو، در شکل ۱-ب تنها سیم‌پیچ پایینی نمایش داده شده است. در شکل ۱-پ هر دو سیم‌پیچ نمایش داده شده است (ترانزیستور کامل). در شکل ۱-ت در زاویه‌ای متفاوت، هر دو سیم‌پیچ نشان داده شده‌اند.

در کانالی که طرح اصلی ترانزیستور است (سمت چپ)، در ابتدا، موم در لایه زیرین کاغذ قرار دارد. برای ایجاد و حذف سدهای مومی از دو سیم‌پیچ حرارتی مجزا استفاده شد. سیم‌پیچ اول که زیر موم قرار دارد، به‌عنوان "سیم‌پیچ خاموش‌کننده" شناخته می‌شود. با اعمال حرارت توسط این سیم‌پیچ، موم ذوب شده و با غالب شدن نیروی مویینگی، موم مذاب به سمت بالا در منافذ کاغذ حرکت می‌کند. در نتیجه موم به کل سطح مقطع کانال منتقل می‌شود و به بسته‌شدن موقت مسیر جریان سیال در کاغذ منجر می‌شود.

سپس، با استفاده از سیم‌پیچ دوم که بالای موم قرار دارد (که "سیم‌پیچ روشن‌کننده" نامیده می‌شود)، حرارت مجدد اعمال شده و موم موجود در قسمت‌های بالایی کاغذ ذوب می‌گردد. با کاهش دمای بخش پایینی کاغذ، ویسکوزیته موم افزایش یافته و حرکت آن به سمت بالا محدود می‌شود. در این شرایط، نیروی وزن بر نیروی مویینگی غلبه کرده و موم به سمت پایین حرکت می‌کند. این جابه‌جایی باعث باز شدن مسیر سیال و حذف سد موقتی ایجادشده می‌شود.

تفاوت اصلی در اینجا به نحوه توزیع گرما و واکنش موم به آن بستگی دارد. هنگام اعمال حرارت از پایین، ازآنجایی‌که کل موم در لایه زیرین کاغذ است، ذوب شده و به طور یکنواخت پخش می‌شود. این یکنواختی حضور موم در کل سطح مقطع کاغذ از عبور آب جلوگیری می‌کند. اما، در مرحله اعمال حرارت از بالا، تمام موم

در لایه بالایی کاغذ نیست و در نتیجه حرارت به یک اندازه به آن نمی‌رسد. به دلیل حرارت بیشتر در سطح کاغذ، ممکن است موم در سطح کاغذ نازک‌تر شود یا منافذی در آن ایجاد شود که اجازه عبور آب را می‌دهد. این به دلیل نحوه تغییرات دما و میزان ذوب‌شدن موم در هر نقطه است. بنابراین، نوع انتقال حرارت و نحوه ذوب تدریجی موم تعیین‌کننده این رفتار است.



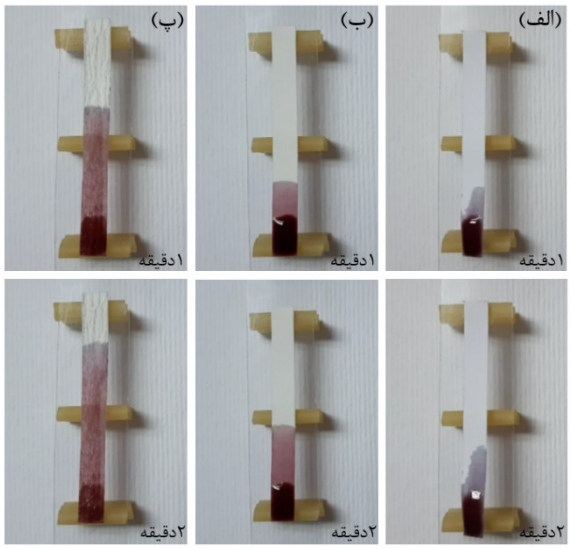

**شکل ۱)** (الف) شمای جانبی ترانزیستور. (ب) شمای تراشه شامل ترانزیستور (کانال سمت چپ)، کانال کاغذی (کانال میانی) و کانال کاغذی آغشته به موم (کانال سمت راست). در این شکل سیم‌پیچ بالایی به منظور نمایش سیم‌پیچ پایینی حذف شده است. (پ) شمای تراشه شامل ترانزیستور (کانال سمت چپ)، کانال کاغذی (کانال میانی) و کانال کاغذی آغشته به موم (کانال سمت راست). در این شکل ترانزیستور کامل نمایش داده شده است. (ت) نمای جانبی تراشه نمایش داده شده است.

**۲-۲- انتخاب مواد**

برای دستیابی به ترانزیستوری که قابلیت عملکرد مناسب، به نحو تشریح شده، را داشته باشد، نیاز به انتخاب مواد مناسب است.

**۲-۲-۱- کاغذ**

سه نوع کاغذ شامل کاغذ A4 (کپی مکس)، کاغذ فیلتر صاف و کاغذ فیلتر چروکیده برای ساخت تراشه میکروفلویدیک کاغذی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کاغذ فیلتر چروکیده به دلیل جذب بالای سیال، خاصیت مویینگی قوی و سطح تماس بیشتر با سیال، بهترین عملکرد را در ساخت کانال‌های میکروفلویدیک ارائه می‌دهد (شکل ۲).




**شکل ۲)** حرکت سیال در کاغذهای مختلف. (الف) کاغذ A4، (ب) کاغذ فیلتر صاف و (پ) کاغذ فیلتر چروکیده.

به‌منظور ساخت تراشه موردنظر، ابتدا طرح آن در نرم‌افزار اتوکد طراحی شد (شکل ۳-الف) و سپس با استفاده از دستگاه برش لیزر، کاغذ انتخاب شده مطابق با طرح برش داده شد (شکل ۳-ب). به‌منظور مطالعه تاثیر عرض کانال بر عملکرد ترانزیستور، دو تراشه با عرض کانال‌های ۲ و ۳ میلی‌متر طراحی و ساخته شدند.

**۲-۲-۲- سیم‌پیچ حرارتی**

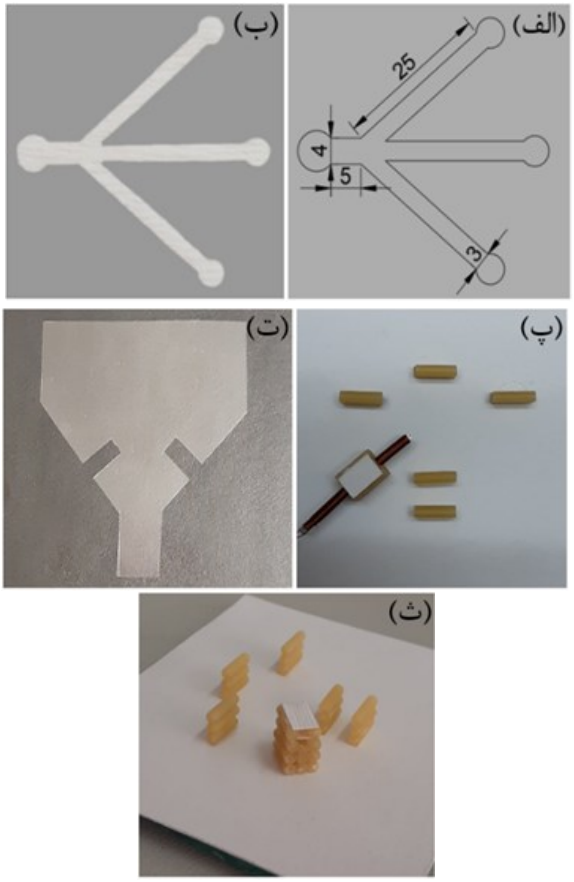
برای ساخت سیم‌پیچ‌هایی کوچک و با مقاومت الکتریکی مناسب سیمی با قطر ۰/۲ میلی‌متر انتخاب شد. در مدل‌های مختلف، تعداد دورهای سیم‌پیچ ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور در نظر گرفته شد. طول هر دور و مقاومت هر سیم‌پیچ به صورت تئوری محاسبه ($R = \rho L/A$) و با نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. تطابق خوبی بین نتایج آزمایش‌های تجربی و محاسبات تئوری مشاهده شد (محاسبات در اینجا ارائه نشده‌اند).

برای تأمین انرژی مدار، از یک منبع تغذیه ۳ ولتی و یک مقاومت سری جهت محدود کردن جریان الکتریکی استفاده شد. جریان عبوری از مدار برای هر سیم‌پیچ محاسبه و اندازه‌گیری گردید. در نهایت، سیم‌پیچ با ۲۵۰ دور به دلیل جریان الکتریکی مناسب و

تولید حرارت مطلوب برای انجام آزمایش انتخاب شد (شکل ۳-پ).

**۲-۲-۳- سازه نگاه‌دارنده**

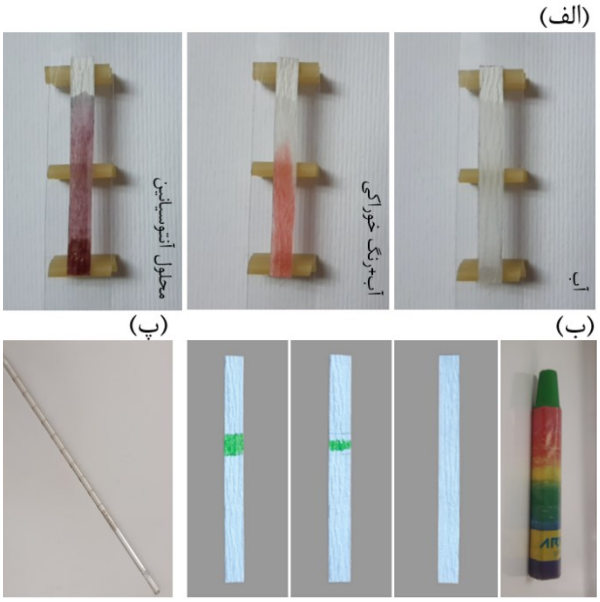
برای جلوگیری از تغییر شکل کاغذ در اثر تماس با سیال، از ورق پلکسی‌گلاس در زیر آن استفاده شد (شکل ۳-ت). برای نگهداری تراشه‌های کاغذی، یک سازه نگهدارنده از ماکارونی ساخته شد (شکل ۳-ث). علاوه بر این، یک پایه نگهدارنده سیم‌پیچ ساخته شد تا قرارگیری دقیق آن زیر محل موم زده شده تراشه تضمین شود. در کاربردهای نهایی، می‌توان از روش‌های پیشرفته‌تری مانند پرینت سه‌بعدی برای ساخت سازه استفاده کرد.




**شکل ۳)** ساخت ترانزیستور. (الف) طراحی تراشه در نرم‌افزار اتوکد. (ب) کاغذ برش داده شده با لیزر. (پ) سیم‌پیچ. (ت) ورق پلکسی‌گلاس. (ث) پایه نگهدارنده.

**۲-۲-۴- انتخاب سیال و موم**

در این پژوهش، سیال‌های مورد استفاده آب و محلول آنتوسیانین (استخراج‌شده از کلم بنفش به‌عنوان نشانگر بصری مناسب) بوده‌اند (شکل ۴-الف). در ساختار ترانزیستور، از موم به‌عنوان عنصر اصلی برای ایجاد سدهای موقت در مسیر جریان سیال استفاده شد. دلیل اصلی این انتخاب، مزیت‌های مناسب حرارتی موم به همراه امکان تهیه آسان و قیمت مناسب آن است. موم‌ها معمولاً در دمای اتاق جامد بوده و با اعمال حرارتی کم ذوب می‌شوند. همچنین، ایجاد الگوهای مختلف با استفاده از آن‌ها آسان است. به همین دلیل، موم ماده مناسبی برای ساخت این ترانزیستورها می‌باشد. مدادشمعی، پارافین، موم زنبورعسل، مواد حساس به حرارت و دیگر مواد مشابه می‌توانند به عنوان موم استفاده شوند. از میان انواع مختلف موم‌ها، مدادشمعی به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند خاصیت آبگریزی مناسب، نقطه ذوب پایین (حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد)، قیمت مناسب و دردسترس بودن، به‌عنوان ماده اصلی انتخاب شد. برای ساخت ترانزیستور، ابتدا یک لایه نازک از موم مدادشمعی پشت تراشه کاغذی اعمال می‌شود (شکل ۴-ب). سپس برای تزریق سیال از پیپت حجمی با ظرفیت ۰/۲ میلی‌لیتر استفاده گردید (شکل ۴-پ).



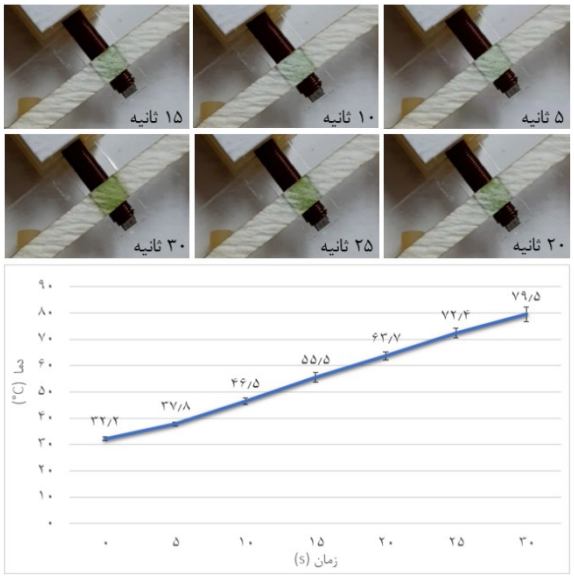

**شکل ۴)** (الف) استفاده از سیالات مختلف بر روی کاغذ. (ب) استفاده از مدادشمعی به عنوان ماده آبگریز. (پ) پیپت به منظور انتقال حجم مناسب سیال بر روی تراشه.

## ۳- نتایج

در این پژوهش، باهدف بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد ترانزیستورهای میکروفلویدیکی، چهار پارامتر کلیدی شامل عرض کانال، طول ناحیه آبگریز، مدت‌زمان گرمایش سیم‌پیچ و حجم سیال تزریقی مورد مطالعه قرار گرفت.

**۳-۱- بررسی تأثیر مدت‌زمان گرمایش سیم‌پیچ بر عملکرد ترانزیستور**

تأثیر زمان گرمایش سیم‌پیچ در بازه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه با گام‌های ۵ ثانیه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که با اعمال حرارت از زیر، حداقل ۲۰ ثانیه زمان لازم است تا موم به‌طور کامل کانال را مسدود نماید (شکل ۵). دمای سیم‌پیچ در بازه زمانی صفر تا ۳۰ ثانیه با استفاده از یک ترموکوپل نوع K متصل به دیتالاگر اندازه‌گیری شد. بر اساس این اندازه‌گیری‌ها، دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، برای ذوب نمودن موم و ایجاد سد، مناسب تشخیص داده شد.



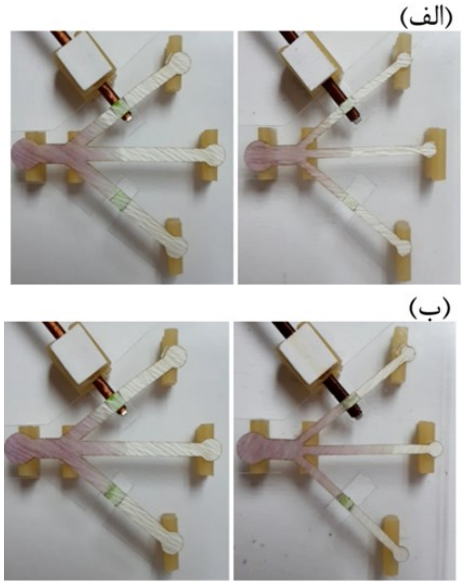

**شکل ۵)** تاثیر اعمال حرارت توسط سیم‌پیچ بر رفتار موم. ماده سبزرنگ موم است که با اعمال حرارت از زیر کاغذ به داخل آن نفوذ کرده و به سطح تراشه می‌رسد تا کانال را مسدود کند.

### ۳-۲- بررسی تأثیر حجم سیال و طول و عرض کانال بر عملکرد ترانزیستور

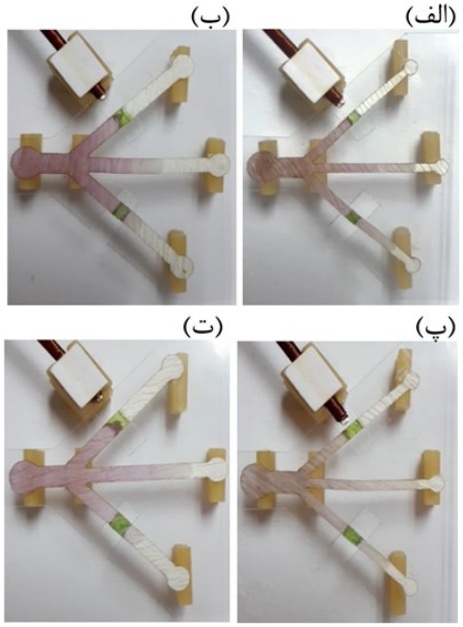
به‌منظور اطمینان از عملکرد مناسب ترانزیستور، حجم کافی سیال مورد نیاز است. این مقدار با طول و عرض کانال رابطه مستقیم دارد. اگر ارتفاع سیال به‌صورت میانگین و تقریبی ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شود، برای تراشه ای به‌ترتیب با طول و عرض ۲۵ و ۲ میلی‌متر، حجم سیال مورد نیاز در حدود ۳۰ میکرولیتر خواهد بود. برای بررسی تجربی این موضوع، کارکرد ترانزیستور با حجم سیال تزریقی در بازه ۱۰ تا ۴۰ میکرولیتر، با گام‌های ۵ میکرولیتری بررسی شد. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، حجم‌های کم سیال (۱۰ و ۱۵ میکرولیتر)، برای رسیدن به بخش آبگریز کانال تراشه و فعال‌سازی ترانزیستور کافی نیست (شکل ۶).

در حجم ۲۰ میکرولیتر، سیال به بخش آبگریز می‌رسد؛ اما این مقدار برای عبور از تمام طول بخش آبگریز و تکمیل عملکرد ترانزیستور کافی نیست. کانال‌های بالایی در شکل ۷ این وضعیت را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سیال از دو کانال دیگر که فاقد ترانزیستور هستند، عبور می‌کند.

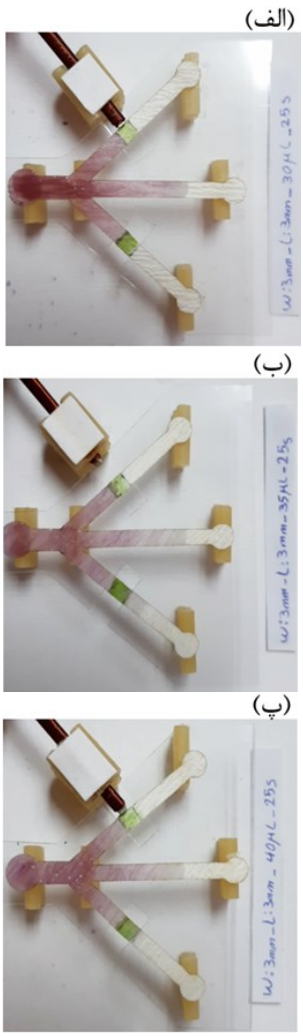
در حجم‌های زیاد (۳۰ تا ۴۰ میکرولیتر) ترانزیستور عملکرد مطلوبی را نشان می‌دهد. در این حالات، ترانزیستور خاموش از حرکت سیال جلوگیری می‌نماید. این پدیده در کانال‌های بالایی شکل ۸ نمایش داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود، سیال از این کانال عبور ننموده است (ترانزیستور خاموش است). اما سیال از کانال کاغذی ساده و یا حتی کانال آغشته به موم در زیر آن عبور می‌کند. با این حال، پس از روشن نمودن ترانزیستور، حرکت مجدد سیال از کانال مجهز به ترانزیستور نیز به خوبی مشاهده می‌شود (شکل ۹). با این وجود، در حجم ۲۵ میکرولیتر و با افزایش طول بخش آبگریز، حرکت مجدد سیال به‌صورت ناچیز رخ می‌دهد.



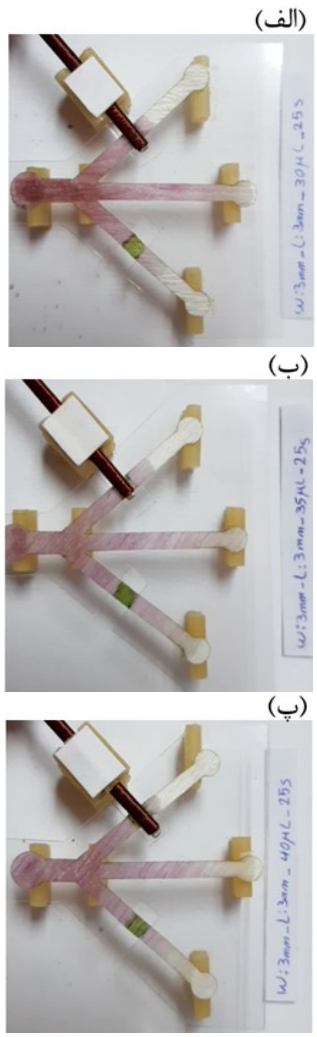

**شکل ۶)** ترانزیستور در حالت خاموش (الف) حجم ۱۰ میکرولیتر برای تراشه‌ای با عرض ۲ و ۳ میلی‌متر، (ب) حجم ۱۵ میکرولیتر برای تراشه‌ای با عرض ۲ و ۳ میلی‌متر. در این شکل، کانال بالایی دارای ترانزیستور است. کانال میانی بدون ترانزیستور است. کانال پایینی، کانال آغشته به موم از زیر (بدون سیم‌پیچ) است.




**شکل ۷)** حجم ۲۰ میکرولیتر برای عبور از محدوده آبگریز (۲ و ۳ میلی‌متر) در کانال‌هایی با عرض‌های متفاوت (۲ و ۳ میلی‌متر) کافی نیست (ترانزیستور خاموش). (الف) طول محدوده آبگریز ۲ میلی‌متر و عرض کانال ۲ میلی‌متر. (ب) طول محدوده آبگریز ۲ میلی‌متر و عرض کانال ۳ میلی‌متر. (پ) طول محدوده آبگریز ۳ میلی‌متر و عرض کانال ۲ میلی‌متر. (ت) طول محدوده آبگریز ۳ میلی‌متر و عرض کانال ۳ میلی‌متر. کانال بالایی در این شکل دارای ترانزیستور است. در این شکل، کانال بالایی دارای ترانزیستور است. کانال میانی بدون ترانزیستور است. کانال پایینی، کانال آغشته به موم از زیر (بدون سیم‌پیچ) است.




**شکل ۸)** ترانزیستور در اثر حرارت اعمالی خاموش است. (الف) حجم ۳۰ میکرولیتر. (ب) حجم ۳۵ میکرولیتر، (پ) حجم ۴۰ میکرولیتر. در این شکل، کانال بالایی دارای ترانزیستور است. کانال میانی بدون ترانزیستور است. کانال پایینی، کانال آغشته به موم از زیر (بدون سیم‌پیچ) است.




**شکل ۹)** عملکرد صحیح ترانزیستور در حجم‌های ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میکرولیتر نمایش داده شده است (ترانزیستور روشن). (الف) حجم ۳۰ میکرولیتر، (ب) حجم ۳۵ میکرولیتر، (پ) حجم ۴۰ میکرولیتر. در این شکل، کانال بالایی دارای ترانزیستور است. کانال میانی بدون ترانزیستور است. کانال پایینی، کانال آغشته به موم از زیر (بدون سیم‌پیچ) است.

نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱ جمع بندی شده اند. همانطور که مشاهده می‌شود، ترانزیستور معرفی شده با کانالی به طول حدود ۲۵ میلی‌متر، قادر به کنترل جریال سیالی در بازه ۳۰ تا ۴۰ میکرولیتر است.

**جدول ۱) عملکرد ترانزیستور بر اساس حجم سیال اعمالی و عرض کانال**

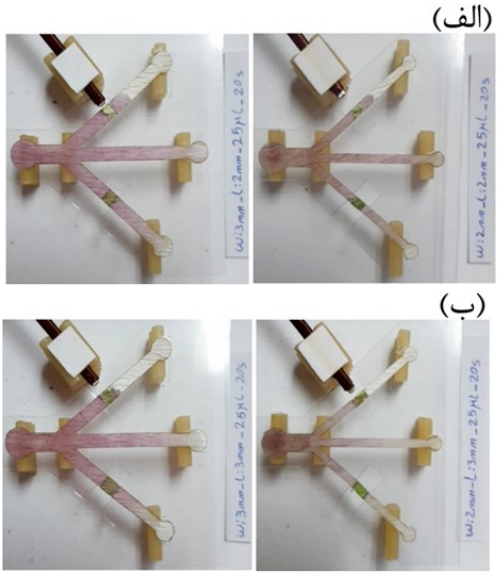
| عرض کانال (میلی‌متر) / حجم سیال (میکرولیتر) | ۲ | ۳ |
|---|---|---|
| ۱۰ | خطا | خطا |
| ۱۵ | خطا | خطا |
| ۲۰ | خطا | خطا |
| **۲۵** | خطا | خطا |
| **۳۰** | عملکرد مناسب | عملکرد مناسب |
| **۳۵** | عملکرد مناسب | عملکرد مناسب |
| **۴۰** | عملکرد مناسب | عملکرد مناسب |

### ۳-۳- تأثیر طول بخش آبگریز

در این پژوهش، تأثیر طول بخش آبگریز (۲ و ۳ میلی‌متر) بر عملکرد ترانزیستور میکروفلویدیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد حجم سیال بیشتر از ۲۵ میکرولیتر برای عملکرد قابل‌قبول ترانزیستور با طول بخش آبگریز ۲ و ۳ میلی‌متر مناسب است. در آزمایشاتی که طول بخش آبگریز ۳ میلی‌متر بود، در هر دو عرض کانال ۲ و ۳ حجم ۲۵ میکرولیتر سیال از بخش آبگریز عبور کرد، اما حرکت آن ناچیز بود (شکل ۱۰). در نتیجه طول بخش آبگریز در حدود ۲ میلی‌متر برای عملکرد مناسب ترانزیستور پیشنهاد می‌شود.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که در حجم‌های سیال کمتر از ۲۵ میکرولیتر و زمان‌های گرمایش کمتر از ۲۰ ثانیه، به دلیل عدم رسیدن کافی سیال به بخش آبگریز، عدم ایجاد سد حرارتی مناسب و انتقال حرارت ناکافی عملکرد ترانزیستور با اختلال مواجه شده

است. در مقابل، با افزایش حجم سیال به ۲۵ میکرولیتر و بیشتر و افزایش زمان گرمایش به ۲۰ ثانیه و بیشتر، عملکرد ترانزیستور به طور قابل‌توجهی بهبودیافته است. این نشان می‌دهد که رسیدن مقدار کافی سیال به بخش آبگریز و ایجاد سد حرارتی مناسب، دو عامل کلیدی در بهبود عملکرد ترانزیستور هستند.

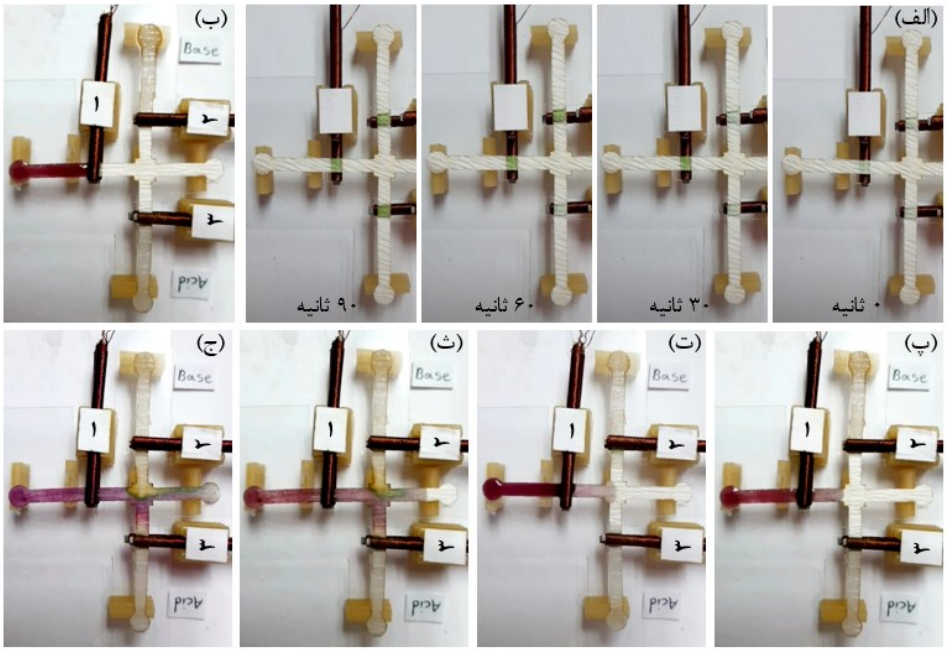



**شکل ۱۰)** (الف) در تراشه‌هایی با طول بخش آبگریز ۲ میلی‌متر، حجم سیال ۲۵ میکرولیتری به طور کامل عبور می‌کند. (ب) در تراشه‌هایی با طول بخش آبگریز ۳ میلی‌متر حجم ۲۵ میکرولیتر حرکت ناچیزی بعد از محدوده آبگریز دارد. در این شکل، کانال بالایی دارای ترانزیستور است. کانال میانی بدون ترانزیستور است. کانال پایینی، کانال آغشته به موم از زیر (بدون سیم‌پیچ) است.

### ۳-۴- حسگر تشخیص محیط‌های اسیدی و بازی

به‌منظور نشان‌دادن یکی از کاربردهای ترانزیستور طراحی شده آزمایشی طراحی شد که محلول‌های اسیدی و بازی با کمک یک آشکارساز تشخیص داده شوند. برای انجام این آزمایش، یک سیستم میکروفلویدیک مبتنی بر کاغذ مجهز به ترانزیستور معرفی شده در این پژوهش طراحی شد. برای ساخت تراشه کاغذی، از کاغذ فیلتر واتمن چروکیده استفاده شد. چنانکه در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، در این طراحی، تراشه شامل چهار کانال است. سه کانال که هر یک مجهز به یک ترانزیستور می‌باشند، به‌عنوان کانال ورودی استفاده شده و کانال چهارمی خروجی تراشه است. در این آزمایش، از سه محلول آنتوسیانین استخراج شده از کلم بنفش به‌عنوان یک آشکارساز طبیعی، از آبلیمو به‌عنوان محلول اسیدی و از سدیم هیدروکسید (NaOH) به‌عنوان محلول بازی استفاده شد.

در مرحله اول، با اعمال ولتاژ ۳ ولتی به سیم‌پیچ‌های زیرین هر ترانزیستور به مدت ۳۰ ثانیه و با تولید حرارت، موم درون کانال‌ها نفوذ کرده و منافذ کاغذ را مسدود می‌نماید (شکل ۱۱-الف). در مرحله بعد، ۵۰ میکرولیتر محلول آبی کلم بنفش به‌عنوان آشکارساز به کانال ورودی اول تزریق می‌شود. پس از آن، به‌ترتیب ۵۰ میکرولیتر آبلیمو و ۵۰ میکرولیتر سدیم هیدروکسید به کانال‌های ورودی‌های دوم و سوم به‌عنوان معرف تزریق می‌شود. توجه شود که افزایش حجم سیال به دلیل افزایش طول کانال‌ها است.




**شکل ۱۱)** حسگر تشخیص سیال‌های اسیدی و بازی. ترانزیستور ۱ حرکت سیال آشکارساز را کنترل می‌کند و ترانزیستورهای ۲ و ۳ به‌ترتیب حرکت نمونه‌های بازی و اسیدی را کنترل می‌کنند. رنگ سبز نمایانگر محیط بازی و رنگ صورتی نمایانگر محیط اسیدی است.

همانطور که قابل مشاهده است، معرف‌ها بی‌رنگ هستند. محلول‌ها به سد رسیده و به دلیل خاموش بودن ترانزیستورها، پشت سد باقی می‌مانند (شکل ۱۱-ب). با اعمال ولتاژ به سیم‌پیچ روشن‌کننده ترانزیستور اول، کانال مربوطه باز شده و محلول آشکارساز شروع به حرکت می‌کند (شکل ۱۱-پ). پس از حرکت مجدد محلول آشکارساز، با قطع ولتاژ سیم‌پیچ ترانزیستور اول و اعمال هم‌زمان ولتاژ به سیم‌پیچ‌های روشن‌کننده ترانزیستورهای ۲ و ۳، مسیر حرکت معرف‌ها فعال شده و این محلول‌ها به سمت محلول آشکارساز حرکت می‌کنند (شکل ۱۱-ت).

با برخورد محلول آشکارساز با معرف‌های اسیدی و بازی، واکنش شیمیایی رخ داده (شکل ۱۱-ث) و محلول آشکارساز به ترتیب به صورتی و سبز تغییر رنگ می‌دهد (شکل ۱۱-ج).

## ۴- نتایج

تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی، با بهره‌گیری از خاصیت مویینگی ذاتی کاغذ و حذف تجهیزات تزریق فشاری سیال رایج در سایر دستگاه‌های میکروفلویدیک، به دلایلی مانند هزینه پایین، قابلیت حمل آسان و سادگی کاربری، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای روش‌های آزمایشگاهی سنتی در مناطق محروم و کشورهای درحال‌توسعه پیشنهاد شده‌اند. استفاده از تراشه‌های میکروفلویدیک کاغذی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است، اما کنترل حرکت سیالات در این تراشه‌ها چالش‌برانگیز است. در این راستا، در این پژوهش، ترانزیستور میکروفلویدیکی معرفی کردیم که امکان مسدود و یا باز نمودن یک کانال را فراهم می‌کند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، برای کانالی به طول حدودی ۲۵ میلی‌متر، و عرض‌های ۲ و ۳ میلی‌متر، سیالی به حجم ۳۰ میکرولیتر به‌منظور عملکرد مناسب تراشه مناسب است. عرض کانال و طول بخش آبگریز مناسب در حدود ۲ میلی‌متر است. اگرچه این پارامترها برای انجام آزمایش‌های متداول مناسب هستند، درصورتی‌که نیاز به استفاده از کانال‌هایی با اندازه‌های متفاوت باشد، با تنظیم حجم سیال به همان نسبت، می‌توان به عملکرد مناسب ترانزیستور دست یافت. جریان الکتریکی مورداستفاده به‌منظور روشن یا خاموش نمودن ترانزیستور معرفی شده در این پژوهش در حدود ۱۳۰۰ میلی‌آمپر است. با طراحی مقاومت حرارتی با راندمان بالاتر، می‌توان ترانزیستور را با جریان‌های الکتریکی پایین‌تری تحریک کرد. در نهایت، با نمایش مدار حسگر میکروفلویدیک کاغذی مبتنی بر ترانزیستور معرفی شده در این پژوهش، قابلیت آن در استفاده در کاربردهای مهم نمایش داده شد. با توجه به قابلیت دوحالته ترانزیستور (خاموش و روشن)، کاربردهای ویژه‌ای برای این ترانزیستور در حوزه‌های حسگرهای زیستی، پزشکی، و صنایع مختلف قابل‌تعریف است.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** مطالب این پژوهش هیچ تضاد یا تعارض منافعی با فرد یا نهادی ندارد.

## منابع

1- Aleman J, Kilic T, Mille LS, Shin SR, Zhang YS. Microfluidic integration of regeneratable electrochemical affinity-based biosensors for continual monitoring of organ-on-a-chip devices. Nature Protocols. 2021;16(5):2564–93.

2- Muhsin, S.A., Abdullah, A., kobashigawa, E. et al. A microfluidic biosensor for the diagnosis of chronic wasting disease. Microsyst Nanoeng. 2023.

3- Zhang M, Zou Y, Xu X, Zhang X, Gao M, Song J, et al. Highly parallel and efficient single cell mRNA sequencing with paired picoliter chambers. Nature Communications. 2020;11(1).

4- Mohammad Irfan Hajam, Mohammad Mohsin Khan. Microfluidics: a concise review of the history, principles, design, applications, and future outlook. Biomaterials Science. 2024.

5- Mesquita P, Gong L, Lin Y. Low-cost microfluidics: Towards affordable environmental monitoring and assessment. Frontiers in Lab on a Chip Technologies. 2022;1.

6- Do TD, Pham UT, Nguyen LP, Nguyen TM, Bui CN, Oliver S, Pham P, Tran TQ, Hoang BT, Pham MTH, et al. Fabrication of a Low-Cost Microfluidic Device for High-Throughput Drug Testing on Static and Dynamic Cancer Spheroid Culture Models. *Diagnostics*. 2023; 13(8):1394.

7- Martinez Andres W, Phillips Scott T, Butte Manish J, Whitesides George M. Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays. Angewandte Chemie International Edition. 2007;46(8):1318–20.

8- Xu Li, Junfei Tian, Thanh Nguyen, and Wei Shen. Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma Treatment. Analytical Chemistry 2008 80 (23), 9131-9134

9- Kong T, Flanigan S, Weinstein M, Kalwa U, Legner C, Pandey S. A fast, reconfigurable flow switch for paper microfluidics based on selective wetting of folded paper actuator strips. Lab Chip. 2017;17(21):3621–33.

10- Y. Zha and A. -l. Zhang, A paper-based microfluidic switch activated by surface acoustic waves, 2011 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2011.

11- E. I. Newsham, E. A. Phillips, H. Ma, M. M. Chang, S. T. Wereley, and J. C. Linnes, Characterization of wax valving and μPIV analysis of microscale flow in paper-fluidic devices for improved modeling and design, Lab Chip, 2022.