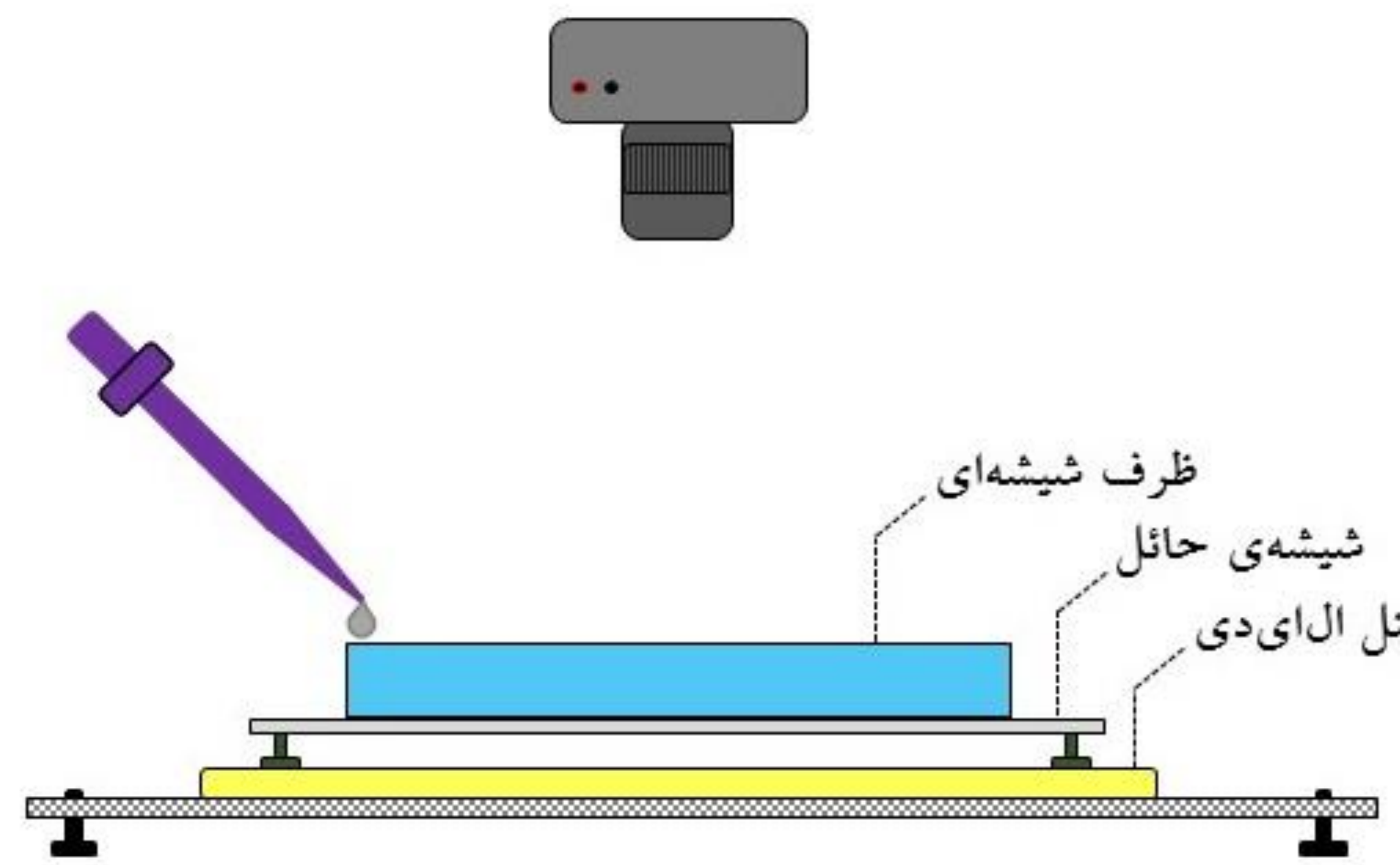


مقدمه

اگر قطره الکل یا محلول ماده فعال سطحی را به نقطه‌ای روی سطح آب تماس دهیم، جریانی از مایع از نقطه تماس قطره به سمت نقاط دیگر ایجاد می‌شود. این پدیده که به اثر مارانگونی موسوم است هنگامی رخ می‌دهد که گرادیان کشش سطحی روی سطح مایع وجود داشته باشد. اثر مارانگونی به دلیل نقشی که در پدیده‌هایی مانند ترشوندگی و تر نشوندگی سطوح، پایداری لایه‌های نازک مایعات، خودرانی ذرات، حرکت حشرات روی سطح آب و ... دارد توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است و در مقالات فراوانی به بررسی این پدیده در شرایط فیزیکی و هندسی مختلف پرداخته شده است [۱-۶]. بسیاری از پژوهش‌های تجربی مرتبط با اثر مارانگونی در هندسه‌های دارای تقارن مرکزی انجام می‌شوند و در اغلب آنها رفتاری توانی برای گسترش مارانگونی گزارش می‌شود. در این پژوهش ما به مطالعه آزمایشگاهی گسترش مارانگونی یک ماده فعال سطحی غیریونی روی سطح آب در هندسه شبه یک بعدی می‌پردازیم. جهت برازش نتایج حاصل از آزمایش از تابع نمایی استفاده می‌کنیم و نشان می‌دهیم که تابع نمایی برازشی با دقتی بالا روی نتایج تجربی دارد. در ادامه نیز به صورت نظری مشاهده رفتار نمایی را در گسترش مارانگونی توضیح می‌دهیم.

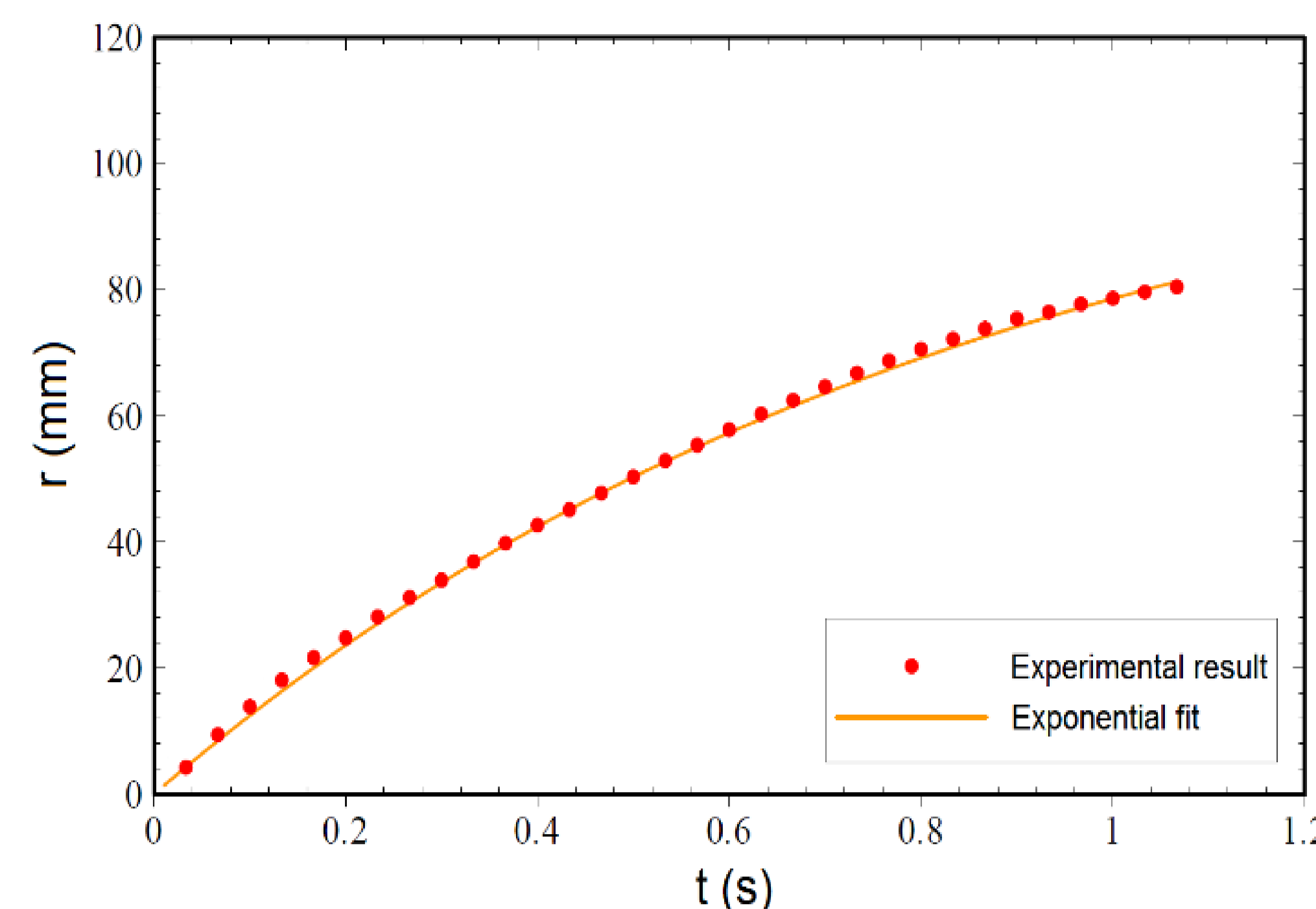
شرح آزمایش و نتایج آن

آزمایش در ظرفی شیشه‌ای به طول $L = 16 \text{ cm}$ ارتفاع $h = 15 \text{ mm}$ و عرض $w = 4 \text{ mm}$ که به صورت کامل از آب پر شده انجام می‌شود. در دمای آزمایش که 25°C است، کشش سطحی آب تقریباً 0.072 N/m است. از 2-Butoxyethanol (که نام دیگر آن بوتیل گلیکول است) با فرمول شیمیایی $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_2$ به عنوان ماده‌ی فعال سطحی غیریونی استفاده می‌شود که چگالی و کشش سطحی آن در دمای آزمایش، به ترتیب حدوداً 0.90 gr/cm^3 و 0.027 N/m است. حجم قطره‌ی ماده‌ی فعال سطحی که $2 \mu\text{l}$ است با استفاده از میکروپیت کنترل می‌شود. ظرف آزمایش بر روی قطعه‌ای شیشه که با اندکی فاصله از یک پنل ال‌ای‌دی قرار گرفته، گذاشته شده است و فرایند گسترش مارانگونی بر سطح آب که با استفاده از ذرات تالک (به عنوان تریسر) قابل مشاهده می‌شود، توسط یک دوربین دیجیتال (با سرعت فیلم‌برداری 30 فریم بر ثانیه) از بالای ظرف آزمایش ثبت می‌شود. شکل ۱ طرحی شماتیک از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. با تماس آرام قطره‌ی بوتیل گلیکول به سطح آب جریان مارانگونی در طول ظرف به سمت سایر نقاط ایجاد می‌شود.



شکل ۱: طرحی شماتیک از چیدمان آزمایش.

شود. وقتی ذرات تالک را در یک انتهای ظرف روی سطح پراکنده کنیم و مطابق شکل ۱ قطره را نیز در همان انتها به سطح آب تماس دهیم، ذرات تالک بر اثر جریان مارانگونی به سمت دیگر ظرف حرکت می‌کنند و حرکت آنها تقریباً می‌تواند نحوه‌ی گسترش قطره‌ی بوتیل گلیکول را روی سطح آب نشان دهد. در شکل ۲ نتایج مربوط به مکان ذرات تالک و برازش نمایی به شکل $r = A \exp(-Bt)$ برای یک آزمایش نوعی قابل مشاهده است. جهت افزایش دقت، آزمایش پنج بار تکرار شده است.



شکل ۲: نتایج مربوط به گسترش مارانگونی در هندسه شبه‌یک‌بعدی برای یک آزمایش نوعی همراه با برازش توانی انجام شده بر روی آن.

مقادیر پارامترهای برازش نمایی برای نتایج آزمایش به صورت $B = 1.03 \pm 0.12$ و $A = 170.97 \pm 45$ است که عدم قطعیت آنها انحراف از معیار نتایج مربوط به تکرارهای مختلف آزمایش را نشان می‌دهد.

بررسی نظری رفتار نمایی

برای بررسی نظری گسترش مارانگونی، توازن بین تنش مارانگونی و تنش ویسکوز را $(\sigma_M \approx \sigma_\eta)$ در نظر می‌گیریم. با تقریب زدن تنش مارانگونی به صورت $\sigma_M \approx \frac{\Delta\gamma}{Ll^*}(L-r)$ و تنش ویسکوز به صورت $\sigma_\eta \approx \eta u_r \left(\frac{4h+w}{hw}\right)$ و برابر قرار دادن آنها، برای مکان جبهه گسترش بر حسب زمان به رابطه

$$r = L - L \exp\left(-\frac{\Delta\gamma h^*}{Ll^* \eta} t\right)$$

میرسیم که پس از جایگذاری به شکل $r = 160 - 160 \exp(-1.065t)$ در می‌آید. نزدیکی بین مقادیر رابطه فوق و مقادیر به دست آمده از برازش بر نتایج آزمایشگاهی قابل مشاهده است.

بحث و جمع بندی

در این پژوهش از رابطه نمایی برای برازش نتایج آزمایشگاهی گسترش مارانگونی استفاده کردیم و به صورت نظری رابطه‌ی برازش شده را نیز به دست آوردیم. گسترش مارانگونی مولکولهای سرفکتان از یک انتهای ظرف مشابه آزاد شدن فیزی فشرده است که در محیطی ویسکوز قرار گرفته است و این امر که مکان جرم متصل به چنین فیزی نیز مشابه آنچه ما به دست آوردیم رابطه‌ی نمایی است، جالب به نظر می‌رسد.

مراجع

- [۱] H.-H. Wei, "Marangoni-enhanced capillary wetting in surfactant-driven superspreading," *Journal of Fluid Mechanics* **855**, 181–209 (2018).
- [۲] S. Kim, J. Kim, and H.-Y. Kim, "Dewetting of liquid film via vapour-mediated Marangoni effect," *Journal of Fluid Mechanics* **872**, 100–114 (2019).
- [۳] J. W. Bush and D. L. Hu, "Walking on water: biolocomotion at the interface," *Annu. Rev. Fluid Mech.* **38**, 339–369 (2006).
- [۴] J. W. Bush, D. L. Hu, and M. Prakash, "The integument of water-walking arthropods: form and function," *Advances in insect physiology* **34**, 117–192 (2007).
- [۵] K. Dietrich, N. Jaensson, I. Buttinoni, G. Volpe, and L. Isa, "Microscale marangoni surfers," *Physical Review Letters* **125**, 098001 (2020).
- [۶] M. Mellema and J. Benjamins, "Importance of the marangoni effect in the foaming of hot oil with phospholipids," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **237**, 113–118 (2004).