



Study of Functionally Graded Temperature-Sensitive Hydrogel Micro-Valve Considering Fluid-Structure Interactions

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ghasemkhani A.¹ BSc,
Mazaheri H.*¹ PhD

How to cite this article

Ghasemkhani A, Mazaheri H. Study of Functionally Graded Temperature-Sensitive Hydrogel Micro-Valve Considering Fluid-Structure Interactions. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):943-951.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Chahar Bagh Shahid Ahmadi Roushan, Hamedan, Iran. Postal Code: 6517838695
Phone: +98 (81)38381601
Fax: -
h.mazaheri@basu.ac.ir

Article History

Received: June 19, 2019
Accepted: September 14, 2019
ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

Hydrogels are the smart polymeric materials, which undergo large deformation when they are subjected to different physical and chemical stimuli in contact with fluids. These materials can be applied as sensors and actuators for instance in microfluidics in which the fluid-solid interactions have an important effect on its performance. On the other hand, the use of graded materials is also important considering their advantages. In this study, the behavior of a functionally graded temperature sensitive hydrogel micro-valve is investigated through considering the fluid-solid interactions. In this regard, the appropriate numerical tool for finite element modeling of a functionally graded hydrogel micro-valve has been developed that it has been implemented in both non fluid-solid interactions and fluid-solid interactions simulation. The homogeneous cases of the micro-valve have also been considered to distinguish the functionally graded temperature sensitive hydrogel micro-valve effect. The results indicate that the effect of fluid-solid interactions was important and have considerable impact on micro-valve operating parameters particularly its closing temperature and fluid flow rate. Thus, a comprehensive study on hydrogel-based micro-valve has been presented considering operating parameters such as inlet pressure and cross linking density of hydrogel.

Keywords Smart Functionally Graded Hydrogel; Micro-Valve; Fluid Solid Interaction

CITATION LINKS

[1] Temperature-responsive bending of a bilayer gel [2] Finite bending of a temperature-sensitive hydrogel tri-layer: An analytical and finite element analysis [3] A theory of constrained swelling of a pH-sensitive hydrogel [4] A coupled theory of fluid permeation and large deformations for elastomeric materials [5] Mechanics of inhomogeneous large deformation of photo-thermal sensitive hydrogels [6] Developing an analytical solution for photo-sensitive hydrogel bilayers [7] Kinetics of smart hydrogels responding to electric field: A transient deformation analysis [8] Functional hydrogel structures for autonomous flow control inside microfluidic channels [9] A bi-polymer micro one-way valve [10] A thermo-mechanically coupled theory for fluid permeation in elastomeric materials: application to thermally responsive gels [11] Modeling deformation and contacts of pH sensitive hydrogels for microfluidic flow control [12] Mechanics and chemical thermodynamics of phase transition in temperature-sensitive hydrogels [13] Inhomogeneous swelling behavior of temperature sensitive PNIPAM hydrogels in micro-valves: Analytical and numerical study [14] A low-energy-consumption electroactive valveless hydrogel micropump for long-term biomedical applications [15] pH-sensitive hydrogel for micro-fluidic valve [16] Study on pH-sensitive hydrogel micro-valves: A fluid-structure interaction approach [17] Behavior of a smart one-way micro-valve considering fluid-structure interaction [18] Swell-induced surface instability of hydrogel layers with material properties varying in thickness direction [19] Swelling-induced finite bending of functionally graded pH-responsive hydrogels: A semi-analytical method [20] Analytical and numerical study of the swelling behavior in functionally graded temperature-sensitive hydrogel shell [21] A combined analytical-numerical analysis on multidirectional finite bending of functionally graded temperature-sensitive hydrogels [22] A theory of coupled diffusion and large deformation in polymeric gels [23] Coupling behavior of the pH/temperature sensitive hydrogels for the inhomogeneous and homogeneous swelling [24] Phase transitions in the system poly(N-isopropylacrylamide)/water and swelling behaviour of the corresponding networks [25] Inhomogeneous swelling of a gel in equilibrium with a solvent and mechanical load

مطالعه رفتار میکروشیبر هیدروژلی مدرج حساس به دما با در نظر گرفتن برهم کنش سیال و سازه

امیر قاسمخانی BSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

هاشم مظاهری PhD*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

هیدروژل‌ها مواد پلیمری هوشمند هستند که در تماس با سیال تحت تحریک‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی تغییر شکل‌های بزرگ می‌دهند. همچنین این مواد به‌عنوان سنسور و عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرند از جمله کاربردهای این مواد می‌توان به مسائل مربوط به میکروسیال‌ها اشاره کرد که در آن برهم‌کنش بین سازه و سیال از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی استفاده از مواد مدرج نیز با توجه به مزایای آنها اهمیت بسزایی دارد. در این پژوهش رفتار یک میکروشیبر مدرج هیدروژلی حساس به دما با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این راستا ابتدا ابزار عددی مناسب برای تحلیل اجزاء محدود یک میکروشیبر مدرج هیدروژلی توسعه داده شده است که پس از صحت‌سنجی برای استفاده در روند شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه مورد استفاده قرار گرفته است. برای بررسی اهمیت مدرج نمودن این میکروشیبرها حالت‌های حدی همگن نیز بررسی شده‌اند. همچنین رفتار میکروشیبرها بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و جامد نیز شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که اثرات برهم‌کنش سازه و سیال حایز اهمیت بوده و تأثیرات قابل توجهی بر پارامترهای میکروشیبر به‌خصوص دمای بسته‌شدن و دبی سیال عبوری از آن دارند. بنابراین با در نظر گرفتن پارامترهای کاری از جمله فشار داخلی سیال و چگالی اتصالات عرضی هیدروژل مورد استفاده در دماهای متفاوت مطالعه‌ای دقیق روی میکروشیبر انجام گرفته است.

کلیدواژه‌ها: هیدروژل هوشمند مدرج، میکروشیبر، برهم‌کنش سیال و سازه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳

*نویسنده مسئول: h.mazaheri@basu.ac.ir

۱- مقدمه

هیدروژل‌ها، مواد پلیمری هوشمندی هستند که می‌توانند در تماس با آب (بدون انحلال)، آن را جذب کنند و متورم گردند. مقدار تورم این مواد تابعی از محرک‌های محیطی مانند دما، pH، بار مکانیکی، نور و میدان الکتریکی است [1-7]. با توجه به خاصیت ذکرشده، این مواد می‌توانند به‌عنوان حسگر و عملگر در میکروجریان‌ها و میکروپمپ‌ها استفاده شوند که این موضوع مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

از جمله مهم‌ترین کاربردهای این مواد می‌توان به مسائل مربوط به میکروسیال‌ها به‌خصوص میکروشیبرها اشاره کرد. مطالعات بسیاری روی این حسگر و عملگرها در ارتباط با طراحی، انجام شده است که اکثر کارهای انجام‌شده از پژوهش بیب و همکاران تأثیر گرفته‌اند که از جنبه‌های متفاوت توسط چندین محقق مورد مطالعه قرار گرفته است [8]. آنها به بررسی یک پوسته هیدروژلی

استوانه‌ای به‌عنوان میکروشیبر که روی هسته‌ای صلب قرار می‌گیرد و جریان گذرنده از کانال را تنظیم می‌کند، پرداختند [8]. پس از این کیم و بیب، یک میکروشیبر هیدروژلی یک‌طرفه با قابلیت استفاده در میکروسیال‌ها ارائه کردند [9]. چستر و *اناند*، نیز رفتار توری می‌گذاری میکروشیبر هیدروژلی حساس به دما، نفوذ سیال و انتقال حرارت در آن را بررسی کردند [10]. همچنین، هی و همکاران، به مطالعه میکروشیبر هیدروژلی حساس به pH پرداختند [11].

انجام شبیه‌سازی‌های عددی به‌منظور طراحی دقیق ابزارهای هیدروژلی هوشمند ضروری به‌نظر می‌رسد؛ بنابراین ابتدا باید معادلات اساسی هیدروژل‌ها به‌دست آید. مدل‌سازی این مواد در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است؛ به‌خصوص هیدروژل‌های حساس به دما که توجه بسیار زیادی را به خود معطوف داشته‌اند. *کای* و *سو*، مدلی اساسی برای هیدروژل‌های PNIPAM ارائه کردند که تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت [12]. علاوه بر این، *مظاهری* و همکاران، به مطالعه رفتار هیدروژل‌های PNIPAM پرداخته و مدلی پایدار و پیوسته برای به کارگیری در روش‌های عددی مانند روش المان محدود معرفی کردند [13]. در این پژوهش برای شبیه‌سازی رفتار هیدروژل‌های حساس به دما در تحلیل المان محدود از مدل ارائه‌شده توسط *مظاهری* و همکاران استفاده شده است.

تغییر شکل‌های بزرگ هیدروژل‌ها به‌عنوان پاسخ به تحریک‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله ویژگی‌های رفتاری بارز این مواد هوشمند نرم می‌باشد. از طرفی، استفاده از این مواد در برخی ادوات مانند میکروشیبرها، مستلزم برهم‌کنش با سیال پیرامونی آن می‌باشد؛ بنابراین استفاده از آنها به‌عنوان میکروشیبر و بررسی اثر برهم‌کنش سیال و جامد بر عملکرد آنها به‌عنوان ماده هوشمند نرم، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با توجه به این موضوع، *نون* و همکاران با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه یک میکروپمپ هیدروژلی با حداقل جریان بازگشتی را بهینه کردند [14]. *ژانگ* و همکاران، برهم‌کنش سازه و سیال را در میکروشیبرهای هیدروژلی حساس به pH مورد مطالعه قرار داده و اهمیت برهم‌کنش میان پوسته هیدروژلی و جریان سیال را نشان دادند [15]. به‌علاوه، *اریابی* و همکاران نیز رفتار میکروشیبرهای هیدروژلی حساس به pH و برهم‌کنش سیال و سازه در آن را شبیه‌سازی کردند و با در نظر گرفتن چندین میکروشیبر با ابعاد یکسان، تأثیر چینی‌های مختلف آنها را بر کنترل جریان بررسی کردند [16]. همچنین *مظاهری* و همکاران، به بررسی رفتار میکروشیبر یک‌طرفه با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه پرداختند. میکروشیبر مذکور هندسه پیکان‌شکل دارد که متمایز از میکروشیبر مورد مطالعه توسط *اریابی* و همکاران [16] است. آنها تأثیر پارامترهای گوناگون بر میکروشیبر و عملکرد آن را مطالعه نمودند [17]. از طرفی استفاده از ادوات هیدروژلی مدرج نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است؛ از جمله وو و همکاران، به مطالعه ناپایداری سطحی ناشی از تورم لایه‌های هیدروژلی با خواص متغییر در راستای ضخامت

که N چگالی پیوندهای شبکه هیدروژل، K ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، I_1 ناوردای اول تانسور راست کوشی گرین، V حجم مولکول آب، $J = \det(F)$ دترمینان گرادیان تغییر شکل است. همچنین A_0, B_0, A_1 و B_1 ثوابت مادی مربوط به پارامتر اختلاط هیدروژل و سیال هستند که توسط افروز و همکاران ارائه شده و در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) خواص هیدروژل PNIPAM [24]

$B_1 (K^{-1})$	A_1	$B_0 (K^{-1})$	A_0
-۰/۰۵۶۹	۱۷/۹۲	۰/۰۴۴۹۶	-۱۲/۹۴۷

با استفاده از حساب تغییرات و مشتق‌گیری از چگالی انرژی آزاد نسبت به F ، مولفه‌های تنش نامی به دست می‌آیند [13]. مدل ارائه شده معادل مدل رفتاری هایپرالاستیک تراکم‌پذیر است که برای استفاده از مدل مذکور، باید آن را به صورت زیر برنامه یوهایپر در نرم‌افزار آباکوس وارد نمود [22]. همچنین جهت استفاده در حل اجزاء محدود و نرم‌افزار آباکوس، عبارت مربوط به انرژی آزاد باید نسبت به یک دمای مرجع اولیه با کشش اولیه λ_0 بازنویسی شود. در این راستا، عبارت انرژی در $\frac{1}{\lambda_0^3}$ ضرب و J با \bar{A}_0^3 و I_1 با \bar{I}_1^2 جایگزین می‌گردند. دمای مرجع در این کار $310K$ است [25].

۳- حل تحلیلی و عددی میکروشیر با خاصیت مدرج

جهت مطالعه رفتار میکروشیر هیدروژلی، ابتدا حل تحلیلی میکروشیر با خواص مدرج بررسی می‌شود که با استفاده از آن، درستی حل عددی اجزاء محدود برای استفاده در شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه تایید می‌گردد. با توجه به خاصیت هیدروژل حساس به دما، با کاهش تدریجی دما، هیدروژل شروع به متورم شدن می‌کند. تورم تدریجی هیدروژل باعث به وجود آمدن تنش‌های شعاعی و مماسی نامی در داخل سازه می‌گردد که به ترتیب با نماد P_r و P_θ نمایش داده می‌شوند [13]. عبارت تنش P_r و P_θ با استفاده از مشتق‌گیری از تابع انرژی آزاد به دست می‌آید. لازم به ذکر است که برای ایجاد خاصیت مدرج هیدروژل، خواص آن در راستای شعاعی گرادیانی در نظر گرفته شده است که این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۱- الف مشاهده می‌شود. در واقع لایه هیدروژل در راستای شعاعی مدرج بوده که چگالی اتصالات عرضی آن تحت تابع زیر به صورت خطی نسبت به شعاع در حالت مرجع، تغییر می‌کند [20]:

$$N = N_0 + \left(\frac{R - A}{B - A}\right)(N_1 - N_0) \quad (3)$$

که A و B ، به ترتیب شعاع داخلی و خارجی لایه هیدروژل در حالت مرجع هستند. همچنین N_0 و N_1 ، به ترتیب چگالی اتصالات عرضی هیدروژل در شعاع داخلی و خارجی پوسته می‌باشند.

همچنین با در نظر داشتن تقارن، معادله تعادل و مولفه‌های کرنش مربوطه به صورت زیر محاسبه می‌گردند [13]:

$$\frac{dP_r}{dR} - \frac{(P_r - P_\theta)}{R} = 0 \quad \lambda_r = \frac{r}{R}, \quad \lambda_\theta = \frac{d}{dR} r(R) \quad (4)$$

پرداختند [18]. شعاعی فرد و همکاران، به حل نیمه‌تحلیلی خمش محدود هیدروژل مدرج حساس به pH پرداختند [19]. همچنین، مظاهری و قاسم‌خانی به مطالعه عددی و تحلیلی پوسته هیدروژلی مدرج حساس به دما پرداختند [20]. در ادامه، شعاعی فرد و همکاران، راه ترکیبی تحلیلی- عددی برای خمش محدود چندجهته هیدروژل مدرج حساس به دما را ارائه کردند [21].

در این مقاله، رفتار یک میکروشیر هیدروژلی مدرج با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد و تاثیر در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه بر رفتار این ادوات به صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر این اساس، ابتدا مدل رفتاری هیدروژل حساس به دما به صورت خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد، سپس حل تحلیلی برای پوسته هیدروژلی حساس به دما با خواص مدرج در راستای شعاعی ارائه می‌شود که در قدم بعدی شبیه‌سازی اجزاء محدود آن نیز انجام و با یکدیگر مقایسه می‌گردند. شبیه‌سازی‌های مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی همراه شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه در بخش چهارم ارائه خواهد شد که در آن مدل عددی جریان سیال و تغییر شکل هیدروژل به ترتیب در آباکوس و فلوئنت تعریف شده است. نرم‌افزارهای ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار MpCCI به یکدیگر متصل می‌شوند. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌ها در هر دو حالت برهم‌کنش سیال و سازه و در نظر گرفتن تاثیر برهم‌کنش سیال و سازه در بخش بحث و نتیجه‌گیری آمده است. در نهایت نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است و تاثیر مدرج کردن خواص میکروشیر ارزیابی شد و ضرورت در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه در شبیه‌سازی این میکروشیرها مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی هیدروژل حساس به دما

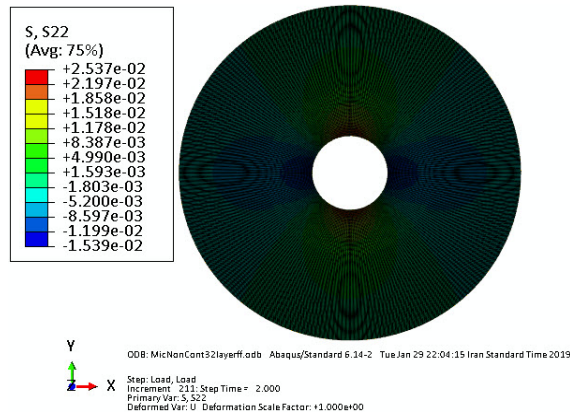
به منظور توصیف رفتار قسمت هیدروژلی میکروشیر از مدل رفتاری ارائه شده توسط مظاهری و همکاران استفاده شده است. اگر مختصات یک ذره هیدروژلی در حالت مرجع و جاری را به صورت X و $x(X)$ نشان دهیم، آنگاه تانسور گرادیان تغییر شکل و همچنین تانسور راست کوشی گرین به ترتیب به صورت $F = \frac{\partial x}{\partial X}$ و $C = F^T F$ می‌باشد. با توجه به تراکم‌ناپذیری زنجیره‌های هیدروژلی و مولکول‌های آب و استفاده از فرض تجزیه جمعی انرژی آزاد، چگالی انرژی آزاد برای هیدروژل‌های حساس به دما به صورت زیر بیان می‌گردد [22]:

$$W = W_{elastic} + W_{mixing} \quad (1)$$

که $W_{elastic}$ و W_{mixing} به ترتیب چگالی انرژی آزاد ناشی از تغییر شکل‌های مکانیکی و اختلاط زنجیره‌های هیدروژل و مولکول‌های آب هستند که با استفاده از مدل نئوهوکی و فلوری رهبر به ترتیب به شکل زیر بیان می‌گردند [23]:

$$W = \frac{1}{2} NKT (I_1 - 3 - 2 \log(J)) + \frac{KT}{J} (J - 1) \times \left(-\frac{1}{J} - \frac{1}{2J^2} - \frac{1}{3J^3} + \frac{A_0 + B_0 T}{J} + \frac{A_1 + B_1 T}{J^2}\right) \quad (2)$$

شکل شماتیک پوسته استوانه‌ای هیدروژلی چندلایه در شکل ۱- ب نشان داده شده که خواص آن غیرپیوسته و خطی نسبت به شعاع در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی عددی این ساختار، مدل رفتاری انتخاب شده با نوشتن زیربرنامه یوهاپیر در نرم‌افزار آباکوس وارد شده است. ابعاد مش در هر مرحله تا همگرا شدن پاسخ‌ها و رسیدن به مش بهینه، تغییر داده شده‌اند. شبیه‌سازی عددی میکروشریر هیدروژلی مدرج برای حالت ۳۲ لایه انجام شده است که یک نمونه از نتایج آن برای نسبت قطر خارجی به قطر داخلی ۲ در دما ۳۰۲K در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲) نتایج تنش شعاعی حاصل از مدل اجزاء محدود برای پوسته ۳۲ لایه و توزیع خطی خواص نسبت به شعاع در دمای ۳۰۲K

تطابق بسیار خوب بین نتایج عددی و تحلیلی که در نمودار ۱ آورده شده است، نشان‌دهنده درستی نتایج حاصل از حل اجزاء محدود است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده در تطابق کامل با مرجع [20] می‌باشد. بنابراین از مدل اجزاء محدود ساخته‌شده، می‌توان در شبیه‌سازی برهم‌کنش بین سیال و جامد در میکروشریر مورد مطالعه استفاده نمود.

۴- روش حل عددی مکانیک سیالات محاسباتی و اجزاء محدود

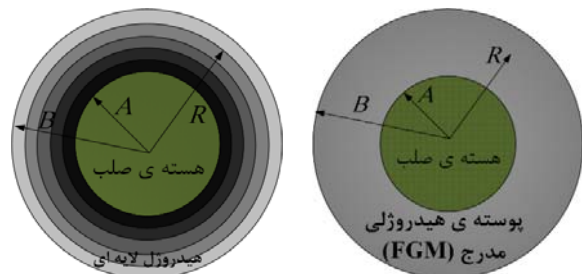
با توجه به اینکه میکروشریرهای هیدروژلی، مواد پلیمری هوشمند حساس به دما هستند که در تماس با سیال آب و تغییرات دما متورم می‌شوند و با توجه به طبیعت بسیار نرم این مواد، توزیع فشار ناشی از جریان سیال موجب تغییر شکل بخش هیدروژلی می‌شود (که به نوبه خود موجب تغییر میدان جریان و در نتیجه دبی عبوری از میکروشریر می‌گردد)، بنابراین در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه بین میدان جریان سیال عبوری از کانال و تغییر شکل هیدروژل اهمیت ویژه‌ای دارد که در این قسمت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

به‌طور کلی، روند حل مسائل برهم‌کنش ساختار و سیال به دو گروه عمده حل یکپارچه و حل جزءبندی‌شده تقسیم می‌شود. در روش یکپارچه، هم جریان سیال و هم ساختار جامد در یک قالب تحلیل می‌شود که منجر به یک دستگاه معادلات کوپل‌شده می‌گردد. اما در روش جزءبندی‌شده، ساختار جامد و جریان سیال

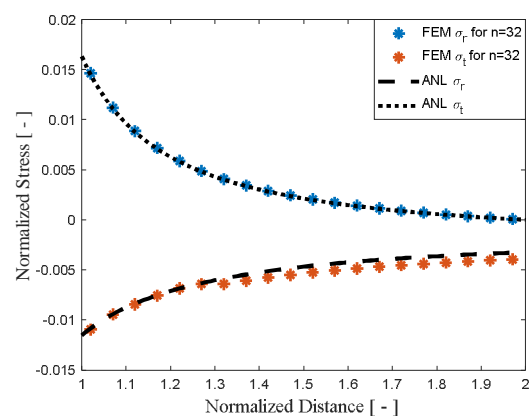
که R و $r(R)$ به ترتیب مختصات ذره در حالت مرجع و حالت جاری می‌باشند. مولفه‌های نرمال تنش با مشتق‌گیری از انرژی آزاد نسبت به مولفه‌های اصلی تانسور گرادیان تغییر شکل، یعنی کشش‌های شعاعی λ_r و مماسی λ_θ به‌دست می‌آیند. با جایگذاری مولفه‌های تنش شعاعی و مماسی برحسب λ_r و λ_θ در معادلات تعادل و در نظر گرفتن تعریف کرنش، یک معادله دیفرانسیل مرتبه دو برحسب r نسبت به R حاصل می‌شود که این معادله همراه شرایط مرزی، معادلات حاکم بر تورم میکروشریر هیدروژلی مدرج تحت مطالعه است. جابه‌جایی صفر در شعاع داخلی و تنش صفر در شعاع خارجی شرایط مرزی این مساله را تشکیل می‌دهند که در زیر بیان شده است:

$$r = A \text{ at } R = A, \quad P_r = 0 \text{ at } R = B \quad (5)$$

مساله شرایط مرزی مذکور با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌گردد. در این مقاله یک میکروشریر مدرج با نسبت $\frac{B}{A} = 2$ در نظر گرفته شده است که بعد از حل معادله دیفرانسیل مرتبه ۲، نتایج آن برای تنش‌های شعاعی و مماسی برای میکروشریر مورد بررسی در شکل ۲ رسم شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد، از حل تحلیلی برای بررسی درستی عملکرد حل اجزاء محدود استفاده می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن میکروشریر مدرج به‌صورت یک پوسته استوانه‌ای لایه‌لایه (۳۲ لایه)، و حل اجزاء محدود آن و مقایسه با نتایج تحلیلی درستی آن برای استفاده در شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه مورد تایید قرار می‌گیرد.



شکل ۱) شماتیک مدل ارائه‌شده میکروشریر در حالت مرجع برای حالت‌های پوسته مدرج (الف) و پوسته لایه‌ای (ب)



نمودار ۱) تنش نرمال مماسی و شعاعی نسبت به دستگاه مختصات مرجع برای نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی. نتایج شبیه‌سازی برای حالت ۳۲ لایه پوسته مدرج

در شبیه سازی، بدون در نظر گرفتن اثر برهم کنش سیال و سازه، میکروشیر در نرم افزار آباکوس تحلیل می شود و رفتار آن بدون در نظر گرفتن تاثیر میدان جریان سیال شبیه سازی می شود. با اعمال شرایط مرزی مناسب در آباکوس، تغییر شکل میکروشیر استخراج می گردد. سپس هندسه جدید هیدروژل به دست آمده به عنوان دیواره صلب وارد نرم افزار فلونت می شود و میدان جریان سیال بدون در نظر گرفتن برهم کنش سیال و سازه، بررسی و پارامترهایی از قبیل دبی عبوری از کانال محاسبه می گردد [17].

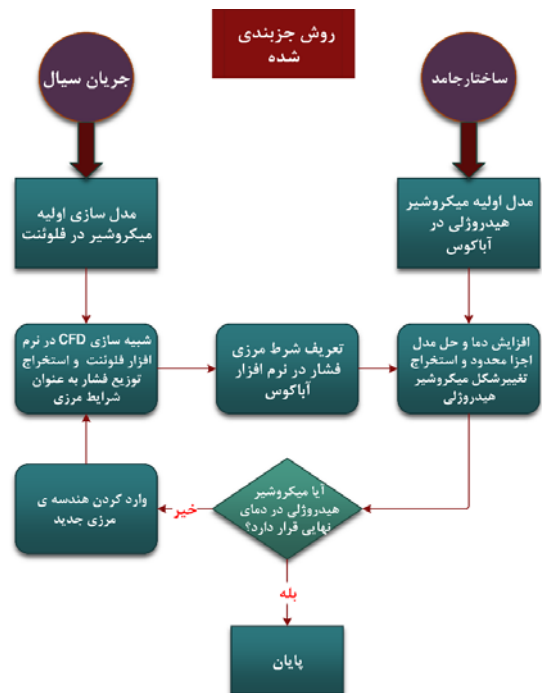
۵- نتایج و بحث

در این پژوهش، یک میکروشیر هیدروژلی مدرج در دو حالت شبیه سازی شده است که یکی از این حالت ها شامل برهم کنش سیال و سازه و دیگری بدون آن می باشد تا با مقایسه دو نوع شبیه سازی مذکور اهمیت برهم کنش سیال و سازه در این ساختار بررسی گردد. ابعاد میکروشیر مورد مطالعه در شکل ۴ مشاهده می شود که در آن نسبت $B/A=2$ تعریف شده است و قطر خارجی و قطر داخلی به ترتیب ۱۰۰ و $200\mu m$ می باشد. میکروشیر مورد مطالعه شامل یک قسمت فعال هیدروژلی هوشمند است که قابلیت پاسخ دهی به تحریک محیطی را دارد. این میکروشیر در تماس با سیال عبوری از کانال، و جذب آب متورم می شود. پوسته هیدروژلی به راحتی می تواند در جهات X و Y متورم شود، اما تغییر شکل آن در جهت Z مقید شده است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، جریان به طور مستقیم به دیواره میکروشیر هیدروژلی برخورد می کند. به دلیل برخورد مستقیم جریان سیال به میکروشیر هیدروژلی و همچنین به دلیل طبیعت نرم هیدروژل، در نظر گرفتن برهم کنش سیال و سازه در شبیه سازی این میکروشیرها امری مهم در طراحی دقیق آنها است. با توجه به اینکه تغییر شکل هیدروژل در جهت Z مقید شده است، تغییر شکل هیدروژل به صورت کرنش صفحه ای در نظر گرفته شده است که در این حالت تغییرات در راستای عمق قابل صرف نظر می باشد. هنگام شبیه سازی میکروشیر در آباکوس، دمای اولیه $310K$ و بزرگ آن در قسمت تعیین مراحل زمانی انجام پروژه، گزینه هندسه غیرخطی نیز فعال و همچنین بازه زمان حل اثنایه و افزایش نمو زمانی ۰/۱ تعیین شده است.

با توجه به فرض کرنش صفحه ای، میکروشیر هیدروژلی با المان چهاروجهی CPE4H مدل سازی شد و پس از مطالعه مش، مش بهینه با تعداد ۳۸۷۸ المان انتخاب شد. در شبیه سازی بخش سیال در نرم افزار فلونت نیز با توجه به ابعاد کوچک میکروشیر و فشار و دبی کم سیال، رژیم جریان به صورت آرام و توسعه یافته در نظر گرفته شده است. به دلیل تغییرات مرز بین هیدروژل و سیال، گزینه مش دینامیکی فعال و اندازه مش مثلثی شکل برای کانال میکروشیر و دیواره هیدروژل به ترتیب ۴ و $1\mu m$ تعیین شده است. چگالی، ویسکوزیته و حجم هر مولکول آب به عنوان سیال عبوری

در دو قالب جداگانه مورد مطالعه قرار می گیرند که هر کدام به صورت جداگانه حل می شوند که در نهایت پس از حل، شرایط مرزی روی سطح مشترک در هر گام بین دو قالب منتقل می گردد. در این مقاله، از روش جزئی بندی شده استفاده شده است. بخش سازه ای شامل هیدروژل هوشمند حساس به دما در نرم افزار آباکوس و بخش سیالاتی شامل میدان جریان سیال توسط نرم افزار فلونت شبیه سازی شده است که برای استفاده از این روش از نرم افزار MpCCI استفاده شده است. در واقع در این روش، ارتباط بین فشار وارد شده از جانب سیال عبوری از کانال و تغییر شکل میکروشیر به دلیل کاهش دما برقرار می شود [17].

فرآیند حل به این صورت می باشد که ابتدا تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی را برای جریان سیال عبوری از کانال در نرم افزار فلونت انجام می دهیم که در نتیجه آن میدان فشار ایجاد شده به واسطه عبور سیال در کانال و تماس آن با دیواره میکروشیر هیدروژلی به دست آورده می شود. سپس فشار به دست آمده از طریق نرم افزار MpCCI به عنوان شرط مرزی در شبیه سازی اجزاء محدود میکروشیر در نرم افزار آباکوس اعمال می شود. در قدم بعدی از شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه، با در نظر گرفتن توزیع فشار روی میکروشیر هیدروژلی، هندسه جدید هیدروژل استخراج شده و سپس از طریق نرم افزار MpCCI به نرم افزار فلونت منتقل می شود و این فرآیند تا رسیدن به دمای نهایی در گام های مختلف تکرار می شود. روند مراحل ذکر شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که زمان حل برای هر حالت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه روی سیستم با مشخصات Core i5-3210M CPU حدوداً ۳ ساعت زمان نیاز داشت.



شکل ۳) فلوجارت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه میکروشیر هیدروژلی مدرج تحت بررسی

دمای بسته شدن با درنظرگرفتن برهم کنش سیال و سازه و بدون درنظرگرفتن آن به ترتیب، $304/83$ و $304/96$ به دست آمد. همان طور که در تمامی حالت ها مشخص است، درنظرگرفتن اثرات برهم کنش سیال و سازه بر دمای بسته شدن میکروشیر تاثیرگذار است. از طرفی مقادیر دمای بسته شدن میکروشیر برای حالت مدرج در هر دو حالت شبیه سازی سیال و سازه و بدون آن بین مقادیر متناظر آن برای دو حالت همگنی است که مورد مطالعه قرار گرفته است که منطقی به نظر می رسد.

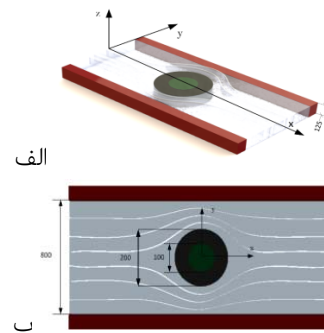
نتایج شبیه سازی حالت مدرج با درنظرگرفتن اثرات برهم کنش سیال و سازه برای ۵ دمای مختلف در نمودار ۲، ارایه شده است. توزیع تنش مایز قسمت هیدروژلی (برحسب پاسکال)، کانتور توزیع فشار (برحسب پاسکال) و میدان سرعت در هر یک از بخش های نمودار ۲ مشخص شده است. در نمودار ۲- الف، میکروشیر در دما $309K$ کمی متورم شده و تقریباً در حالت باز قرار دارد.

همان طور که در قسمت های ب تا د نمودار ۲ مشاهده می شود، هنگامی که دما کاهش پیدا می کند، میکروشیر هیدروژلی شروع به متورم شدن می کند و به تبع آن مقدار دبی کاهش می یابد. وقتی که قسمت خارجی دیواره میکروشیر هیدروژلی به دیواره کانال نزدیک می شود، توزیع تنش در هیدروژل و میدان سرعت در سیال به خصوص زمانی که نزدیک دمای بسته شدن میکروشیر قرار می گیرند تاثیر بسزایی روی یکدیگر دارند. کاهش دما تا $302K$ باعث بسته شدن کامل میکروشیر شده و جریان سیال متوقف می گردد.

برای بررسی دمای بسته شدن میکروشیر هیدروژلی با درنظرگرفتن اثرات برهم کنش سیال و سازه، کانتور تغییر شکل پوسته هیدروژلی در اثر کاهش دما برای پوسته همگن و مدرج در فشار ورودی $12kPa$ محاسبه و نتیجه در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان طور که در نمودار مشاهده می شود، هنگامی که میکروشیر با خاصیت $Nu = 0/0035$ به دمای بسته شدن خود می رسد، میکروشیر با خاصیت $Nu = 0/005$ ، به دلیل تراکم بیشتر پیوندهای عرضی به دیواره کانال برخورد نمی کند. همچنین در حالت مدرج نیز تماسی با دیواره کانال برقرار نمی شود که بیانگر تاثیر خواص هیدروژل بر دمای بسته شدن میکروشیر می باشد. از طرفی برای هر دو حالت نتایج حالت مدرج بین دو حالت همگن قرار دارد که مورد انتظار است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، جابجایی پوسته هیدروژلی در شعاع خارجی آن بر حسب تغییرات دما در حالت درنظرگرفتن برهم کنش سیال و سازه و بدون درنظرگرفتن آن در نمودار ۴ نمایش داده شده است که در آن فشار ورودی برابر با $12kPa$ انتخاب شده است. همان طور که مشاهده می شود دمای بسته شدن که دمایی است که مقدار شعاع خارجی به مقدار ثابت یعنی نصف عرض کانال می رسد، در حالت مدرج بین جواب حاصل از دو جواب همگن قرار دارد که این موضوع نتایج نمودار ۳ را تایید می کند.

از کانال به ترتیب $998/2kg/m^3$ ، $0/01003kg$ و $10^{-4}m^3$ در نظر گرفته شده اند. فشار گنج ورودی در شبیه سازی ها برابر با ۴، ۸، ۱۲ و $16kPa$ بوده، در حالی که فشار خروجی برابر با فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.

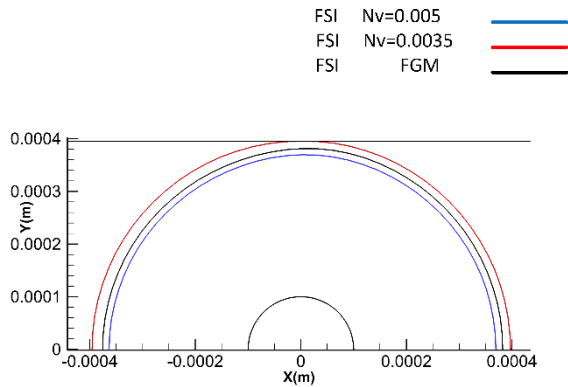


شکل ۴) هندسه میکروشیر مورد مطالعه در دمای $310K$: تمامی ابعاد برحسب میکرومتر می باشند.

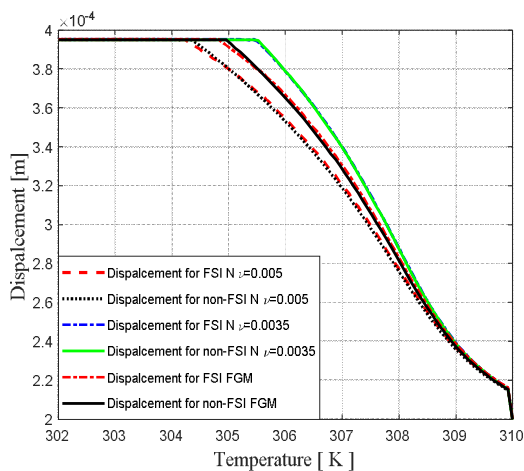
همان طور که در روند حل تحلیلی اشاره شد، خواص میکروشیر هیدروژلی در حالت مدرج در جهت شعاعی به صورت گرادینانی فرض شده است. در این میکروشیر، خاصیت مدرج، چگالی اتصالات عرضی می باشد که بازه تغییرات آن در این پژوهش از $0/005$ تا $0/0035$ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است چه در حالتی که اثرات برهم کنش سازه و سیال مد نظر قرار گرفته و چه در حالتی که از تاثیرات آن صرف نظر شده، هر دو حالت همگن و مدرج مورد مطالعه قرار گرفته است تا تفاوت رفتار مدرج شیر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

برای میکروشیر مدرج مورد مطالعه، به منظور بررسی بیشتر دو حالت همگن دیگر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. این دو حالت عبارت است از وقتی که هیدروژل به صورت همگن فرض شود: حالت اول چگالی اتصالات عرضی برابر با مقدار آن در لایه داخلی میکروشیر مدرج، $Nu = 0/005$ ، و حالت دوم وقتی که چگالی اتصالات عرضی برابر با مقدار آن در لایه خارجی میکروشیر مدرج، $Nu = 0/0035$ ، باشد. بر اساس نتایج شبیه سازی برای حالت همگن با $Nu = 0/005$ پوسته هیدروژلی در دمای $304/04K$ با دیواره کانال تماس برقرار می کند که این دما به عنوان دمای بسته شدن در نظر گرفته می شود. سپس، شبیه سازی با درنظرگرفتن برهم کنش سیال و سازه در فشار $12kPa$ انجام شد که در این حالت دمای بسته شدن $304/24K$ به دست آمد. همین روند برای حالت همگن با $Nu = 0/0035$ انجام شد که دمای بسته شدن با درنظرگرفتن برهم کنش سیال و سازه و بدون درنظرگرفتن آن به ترتیب $305/44$ و $305/60$ به دست آمدند. اختلاف نتایج به دست آمده، نشان دهنده اهمیت درنظرگرفتن برهم کنش سیال و سازه در این ساختار است.

در حالت مدرج Nu در بازه $0/005$ و $0/0035$ به صورت خطی از شعاع داخلی تا شعاع بیرونی تغییر می کند. پس از شبیه سازی،

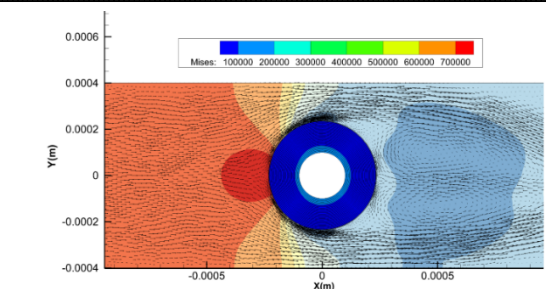


نمودار ۳ تغییر شکل میکروشیر برای خواص همگن $Nu = 0.0035$ و $Nu = 0.005$ و حالت مدرج در حالت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه در فشار ۱۲kPa

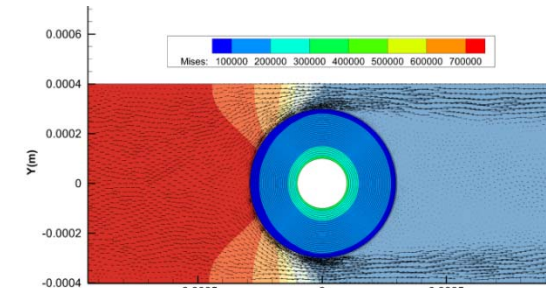


نمودار ۴ جابجایی انتهای میکروشیر هیدروژلی بر حسب تغییرات دما برای شبیه سازی های برهم کنش سیال و سازه و بدون آن در $Nu = 0.0035$ و $Nu = 0.005$ و حالت مدرج در فشار ۱۲kPa

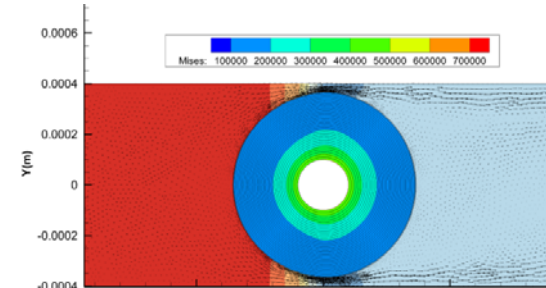
با توجه به اهمیت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه در طراحی میکروشیرهای هیدروژلی، یکی از پارامترهای عملکردی مهم آنها دبی سیال و تغییرات آن نسبت به تغییرات دما می باشد. برای این منظور، دبی جریان برای هر دو حالت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه و بدون آن، با انتگرال گیری از پروفیل سرعت در قسمت ورودی کانال محاسبه شده است. در نمودار ۵، نتایج به دست آمده برای دبی سیال عبوری از میکروشیر به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی و در بازه تغییرات دما از ۳۱۰ تا ۳۰۲K نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز دمای بسته شدن میکروشیر در فشارهای ذکر شده برای حالت مدرج با در نظر گرفتن برهم کنش سیال و سازه و بدون آن ارائه شده است. همچنین در جدول ۲ کمیت درصد اختلاف که به صورت درصد اختلاف بین دمای بسته شدن بین دو روش شبیه سازی که با بازه تغییرات دمایی شبیه سازی نرمال شده $(\Delta T = 310 - 302 = 8K)$ نیز ارائه شده است. بر اساس نتایج مذکور، بیشترین مقدار درصد اختلاف در فشار ۱۶kPa به وجود می آید که با توجه به تغییر شکل بیشتر پوسته هیدروژلی مورد تایید است.



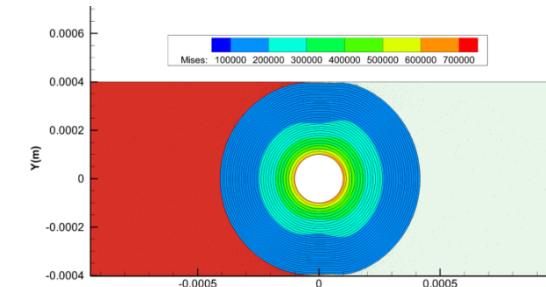
الف



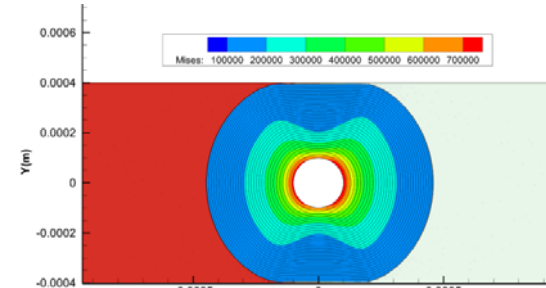
ب



ج

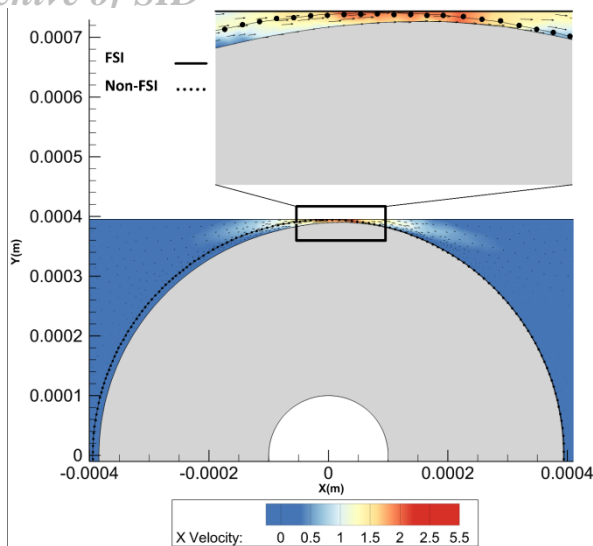


د



ه

نمودار ۵ کانتور تنش مایز برای میکروشیر هیدروژلی و کانتور توزیع فشار و سرعت جریان سیال در دماهای (الف) ۳۰۹، (ب) ۳۰۷/۶، (ج) ۳۰۷K، (د) ۳۰۴، (ه) ۳۰۲ و ۳۰۲ درجه کلوین



نمودار ۶) مقایسه بین شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه و بدون در نظر گرفتن آن در میزان نشتی سیال در حالت مدرج در فشار ۱۶kPa

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، رفتار یک میکرو شیر هیدروژلی مدرج با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا، پس از معرفی مدل رفتاری مورد استفاده و وارد نمودن آن در نرم‌افزار آباکوس، ابتدا حل تحلیلی میکرو شیر هیدروژلی با خواص مدرج در راستای شعاعی ارایه شد که با استفاده از آن مدل عددی اجزاء محدود ساخته شده در آباکوس صحت‌سنجی گردید. در قدم بعدی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه، میدان جریان سیال میکرو شیر در نرم‌افزار فلونت و تغییر شکل هیدروژل در اثر تغییرات دما در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و نتایج حاصل از دو نرم‌افزار به وسیله نرم‌افزار MpCCI به همدیگر جفت شدند. همچنین مدل‌سازی رفتار میکرو شیر بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه نیز بررسی گردید. نتایج حاصل از هر دو روش برای پوسته همگن و مدرج هیدروژلی ارایه گردید که نتایج، نشان‌دهنده اهمیت برهم‌کنش سیال و سازه در این ادوات می‌باشد. پس از آن تاثیر فشار ورودی نیز در میکرو شیر مدرج، مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج به دست آمده بیانگر تاثیر زیاد فشار ورودی بر دمای بسته‌شدن میکرو شیر بودند. در تمامی حالت‌های بررسی شده، اختلاف بین شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه و بدون در نظر گرفتن آن، بیانگر ضرورت در نظر گرفتن شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه در بررسی رفتار این ساختارها است که معمولاً بازه عملکردی کوچکی دارند و اختلاف نتایج می‌تواند طراحی و عملکرد آنها را دستخوش تغییرات زیادی کند.

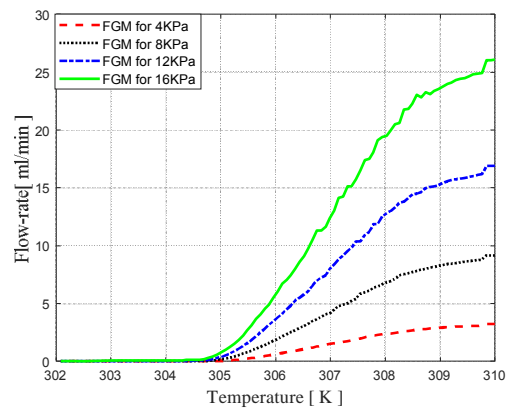
تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.



نمودار ۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و جامد برای دبی سیال عبوری از میکرو شیر بر حسب دما برای پوسته مدرج در فشارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶kPa

جدول ۲) دمای بسته‌شدن میکرو شیر مدرج در فشارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶kPa

فشار ورودی (kPa)	۴	۸	۱۲	۱۶
دمای بسته‌شدن شبیه‌سازی برهم‌کنش سازه و سیال (K)	۳۰۴/۹۶	۳۰۴/۸۸	۳۰۴/۸۳	۳۰۴/۷۰
دمای بسته‌شدن شبیه‌سازی ساده (K)	۳۰۵/۰۴	۳۰۵/۰۴	۳۰۵/۰۴	۳۰۵/۰۴
درصد اختلاف	۱	۲	۲/۶۲۵	۴/۲۵

مطابق انتظار، با افزایش فشار ورودی دبی سیال هم بیشتر می‌شود. علاوه بر این، دمای بسته‌شدن میکرو شیر وابسته به فشار ورودی بوده و مقدار آن تابعی از میزان فشار ورودی می‌باشد. در فشارهای ورودی بالاتر، تغییر شکل پوسته هیدروژلی بیشتر است و بنابراین اختلاف دو روش با هم بیشتر می‌باشد. بنابراین میکرو شیر هیدروژلی با افزایش فشار ورودی در دمای پایین‌تر بسته می‌شود. دمای بسته‌شدن میکرو شیر، پارامتر بسیار مهمی در عملکرد آنها می‌باشد؛ بنابراین در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سیال و سازه برای پیش‌بینی رفتار آنها امری مهم می‌باشد.

برای درک بهتر اختلاف نتایج بین دو حالت شبیه‌سازی با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه و بدون آن، نتایج حاصل از دو روش در فشار ورودی ۱۶kPa برای حالت مدرج در نمودار ۶ در دمای ۳۰۵/۴K که دمای بسته‌شدن شیر در حالت بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه است، آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، در شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه مشاهده می‌شود که قسمت خارجی میکرو شیر به دیواره کانال برخورد کرده و کانال بسته می‌شود؛ اما در شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه به دلیل در نظر گرفتن توزیع فشار سیال روی میکرو شیر و تاثیر آن بر دمای بسته‌شدن، تماسی بین دیواره کانال و میکرو شیر برقرار نمی‌شود و یک مقدار دبی در کانال وجود دارد که همان‌طور که در نمودار مشخص است، بدون در نظر گرفتن شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه این مقدار دبی سیال در میکرو شیر نادیده گرفته می‌شود.

application to thermally responsive gels. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011;59(10):1978-2006.

11- He T, Li M, Zhou J. Modeling deformation and contacts of pH sensitive hydrogels for microfluidic flow control. *Soft Matter*. 2012;8(11):3083-3089.

12- Cai S, Suo Z. Mechanics and chemical thermodynamics of phase transition in temperature-sensitive hydrogels. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011;59(11):2259-2278.

13- Mazaheri H, Baghani M, Naghdabadi R, Sohrabpour S. Inhomogeneous swelling behavior of temperature sensitive PNIPAM hydrogels in micro-valves: Analytical and numerical study. *Smart Materials and Structures*. 2015;24(4):045004.

14- Kwon GH, Jeong GS, Park JY, Moon JH, Lee SH. A low-energy-consumption electroactive valveless hydrogel micropump for long-term biomedical applications. *Lab on a Chip*. 2011;11(17):2910-2915.

15- Zhang Y, Liu Z, Swaddiwudhipong S, Miao H, Ding Z, Yang Z. pH-sensitive hydrogel for micro-fluidic valve. *Journal of Functional Biomaterials*. 2012;3(3):464-479.

16- Arbabi N, Baghani M, Abdolahi J, Mazaheri H, Mosavi-Mashhadi M. Study on pH-sensitive hydrogel micro-valves: A fluid-structure interaction approach. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2017;28(12):1589-1602.

17- Mazaheri H, Namdar A, Amiri A. Behavior of a smart one-way micro-valve considering fluid-structure interaction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018;29(20):3960-3971.

18- Wu Z, Bouklas N, Huang R. Swell-induced surface instability of hydrogel layers with material properties varying in thickness direction. *International Journal of Solids and Structures*. 2013;50(3-4):578-587.

19- Shojaeifard M, Bayat MR, Baghani M. Swelling-induced finite bending of functionally graded pH-responsive hydrogels: A semi-analytical method. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2019;40:679-694.

20- Mazaheri H, Ghasemkhani A. Analytical and numerical study of the swelling behavior in functionally graded temperature-sensitive hydrogel shell. *Journal of Stress Analysis*. 2019;3(2):29-35.

21- Shojaeifard M, Rouhani F, Baghani M. A combined analytical-numerical analysis on multidirectional finite bending of functionally graded temperature-sensitive hydrogels. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2019;30(13):1882-1895.

22- Hong W, Zhao X, Zhou J, Suo Z. A theory of coupled diffusion and large deformation in polymeric gels. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2008;56(5):1779-1793.

23- Mazaheri H, Baghani M, Naghdabadi R, Sohrabpour S. Coupling behavior of the pH/temperature sensitive hydrogels for the inhomogeneous and homogeneous swelling. *Smart Materials and Structures*. 2016;25(8).

24- Afroze F, Nies E, Berghmans H. Phase transitions in the system poly(N-isopropylacrylamide)/water and swelling behaviour of the corresponding networks. *Journal of Molecular Structure*. 2000;554(1):55-68.

25- Hong W, Liu Z, Suo Z. Inhomogeneous swelling of a gel in equilibrium with a solvent and mechanical load. *International Journal of Solids and Structures*. 2009;46(17):3282-3289.

فهرست علائم

چگالی انرژزی آزاد برای هیدروژل‌های حساس به دما	W
چگالی انرژزی آزاد برای هیدروژل‌های حساس به دما ناشی از تغییر شکل مکانیکی	$W_{elastic}$
چگالی انرژزی آزاد برای هیدروژل‌های حساس به دما ناشی از اختلاط زنجیره‌های هیدروژل و مولکول‌های آب	W_{mixing}
گرادیان تغییر شکل	F
تانسور راست کوشی‌گرین	C
دما ($^{\circ}C$)	T
شعاع داخلی لایه هیدروژل (mm)	A
شعاع خارجی لایه هیدروژل (mm)	B
تنش شعاعی	P_r
تنش مماسی	P_{θ}
مختصات ذره در حالت مرجع	R
مختصات ذره در حالت جاری	$r(R)$
چگالی پیوندهای عرضی هیدروژل در شعاع داخلی	N_0
چگالی پیوندهای عرضی هیدروژل در خارجی پوسته	N_1
حجم در واحد	v
کشش شعاعی	λ_r
کشش مماسی	λ_{θ}

منابع

- Morimoto T, Ashida F. Temperature-responsive bending of a bilayer gel. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;56:20-28.
- Abdolahi J, Baghani M, Arbabi N, Mazaheri H. Finite bending of a temperature-sensitive hydrogel tri-layer: An analytical and finite element analysis. *Composite Structures*. 2017;164:219-228.
- Marcombe R, Cai S, Hong W, Zhao X, Lapusta Y, Suo Z. A theory of constrained swelling of a pH-sensitive hydrogel. *Soft Matter*. 2010;6:784-793.
- Chester SA, Anand L. A coupled theory of fluid permeation and large deformations for elastomeric materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2010;58(11):1879-1906.
- Toh W, Ng TY, Hu J, Liu Z. Mechanics of inhomogeneous large deformation of photo-thermal sensitive hydrogels. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51(25-26):4440-4451.
- Kargar-Estahbanaty A, Baghani M, Arbabi N. Developing an analytical solution for photo-sensitive hydrogel bilayers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018;29(9):1953-1963.
- Li H. Kinetics of smart hydrogels responding to electric field: A transient deformation analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2009;46(6):1326-1333.
- Beebe DJ, Moore JS, Bauer JM, Yu Q, Liu RH, Devadoss C, et al. Functional hydrogel structures for autonomous flow control inside microfluidic channels. *Nature*. 2000;404:588-590.
- Kim D, Beebe DJ. A bi-polymer micro one-way valve. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007;136(1):426-433.
- Chester SA, Anand L. A thermo-mechanically coupled theory for fluid permeation in elastomeric materials: