



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.

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

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

مطالعه رفتار میکروشیبر هیدروژلی مدرج حساس به دما با درنظرگرفتن برهمکنش 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 درنظرگرفتن 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 درنظرگرفتن 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 را دارند. بنابراین با درنظرگرفتن 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 تورمی گذاری 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 درنظرگرفتن 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، ریابی و همکاران نیز رفتار میکروشیبرهای هیدروژلی حساس به pH و برهمکنش سیال و سازه در آن را شبیه‌سازی کردند و با درنظرگرفتن چندین میکروشیبر با ابعاد یکسان، تأثیر چنینش‌های مختلف آنها را بر کنترل جریان بررسی کردند [16]. همچنین مظاهری و همکاران، به بررسی رفتار میکروشیبر یک‌طرفه با درنظرگرفتن برهمکنش سیال و سازه پرداختند. میکروشیبر مذکور هندسه پیکان‌شکل دارد که متمایز از میکروشیبر مورد مطالعه توسط ریابی 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 کوشی‌گرین، 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 /فرز و همکاران ارایه 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 به‌دست می‌آیند [13]. مدل ارایه‌شده معادل مدل رفتاری هایپرلاستیک تراکم‌پذیر است که برای استفاده از مدل مذکور، باید آن را به‌صورت زیربرنامه یوهاپیر 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 میکروشیبر با خاصیت مدرج

جهت مطالعه رفتار میکروشیبر هیدروژلی، ابتدا حل تحلیلی میکروشیبر 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 به‌وجود آمدن تنش‌های شعاعی و مماسی نامی در داخل سازه می‌گردد که به‌ترتیب 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 به‌دست 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 به‌صورت شماتیک در شکل ۱- الف مشاهده می‌شود. در واقع لایه هیدروژل در راستای شعاعی مدرج بوده که چگالی اتصالات عرضی آن تحت تابع زیر به‌صورت 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 ، به‌ترتیب شعاع داخلی و خارجی لایه هیدروژل در حالت مرجع هستند. همچنین N_0 و N_1 ، به‌ترتیب چگالی اتصالات عرضی هیدروژل در شعاع داخلی و خارجی پوخته می‌باشند. همچنین با در نظر داشتن تقارن، معادله تعادل و مولفه‌های کرنش مربوطه به‌صورت 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]. شجاعی‌فرد و همکاران، به حل نیمه‌تحلیلی خمش محدود هیدروژل مدرج حساس به pH پرداختند [19]. همچنین، مظاهری و قاسم‌خانی به مطالعه عددی و تحلیلی پوخته هیدروژلی مدرج حساس به دما پرداختند [20]. در ادامه، شجاعی‌فرد و همکاران، راه ترکیبی تحلیلی- عددی برای خمش محدود چندجهته هیدروژل مدرج حساس به دما را ارایه کردند [21].

در این مقاله، رفتار یک میکروشیبر 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 به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر این اساس، ابتدا مدل رفتاری هیدروژل حساس به دما به‌صورت خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد، سپس حل تحلیلی برای پوخته هیدروژلی حساس به دما با خواص مدرج در راستای شعاعی ارایه 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 ارایه خواهد شد که در آن مدل عددی جریان سیال و تغییر شکل هیدروژل به‌ترتیب در آباکوس و فلوئنت تعریف شده است. نرم‌افزارهای ذکرشده 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 نگرفتن تاثیر برهم‌کنش سیال و سازه در بخش بحث و نتیجه‌گیری آمده است. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفته است و تاثیر مدرج کردن خواص میکروشیبر ارزیابی شد و ضرورت در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه در شبیه‌سازی این میکروشیبرها مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی هیدروژل حساس به دما

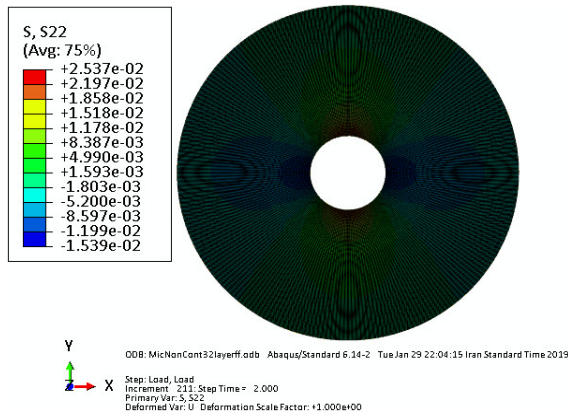
به‌منظور توصیف رفتار قسمت هیدروژلی میکروشیبر از مدل رفتاری ارایه‌شده توسط مظاهری و همکاران استفاده شده است. اگر مختصات یک ذره هیدروژلی در حالت مرجع و جاری را به‌صورت X و $x(X)$ نشان دهیم، آنگاه تانسور گرادیان تغییر شکل و همچنین تانسور راست کوشی‌گرین به‌ترتیب به‌صورت $F = \frac{\partial x}{\partial X}$ 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 به‌صورت زیر بیان می‌گردد [22]:

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

که $W_{elastic}$ و W_{mixing} به‌ترتیب چگالی انرژی آزاد ناشی از تغییر شکل‌های مکانیکی و اختلاط زنجیره‌های هیدروژل و مولکول‌های آب هستند که با استفاده از مدل نئوهوکی و فلوری‌ره‌نر به‌ترتیب 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 میکروشر 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 میکروشر مورد مطالعه استفاده نمود.

۴- روش حل عددی مکانیک سیالات محاسباتی و اجزاء محدود

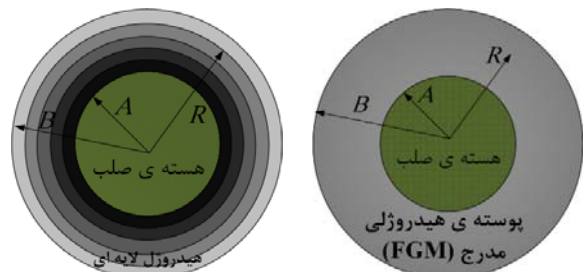
با توجه به اینکه میکروشرهای هیدروژلی، مواد پلیمری هوشمند حساس به دما هستند که در تماس با سیال آب و تغییرات دما متورم می‌شوند و با توجه به طبیعت بسیار نرم این مواد، توزیع فشار ناشی از جریان سیال موجب تغییر شکل بخش هیدروژلی می‌شود (که به نوبه خود موجب تغییر میدان جریان و در نتیجه دبی عبوری از میکروشر می‌گردد)، 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

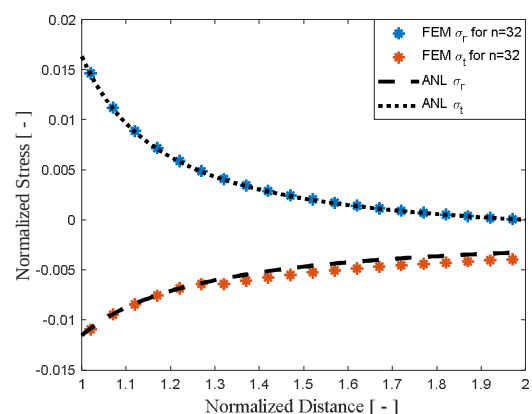
که R و $r(R)$ به ترتیب مختصات ذره در حالت مرجع و حالت جاری می‌باشند. مولفه‌های نرمال تنش با مشتق‌گیری از انرژی آزاد نسبت به مولفه‌های اصلی تانسور گرادیان تغییر شکل، یعنی کشش‌های شعاعی λ_r و مماسی λ_θ به‌دست می‌آیند. با جایگذاری مولفه‌های تنش شعاعی و مماسی برحسب λ_r و λ_θ در معادلات تعادل و در نظر گرفتن تعریف کرنش، یک معادله دیفرانسیل مرتبه دو برحسب r نسبت به R حاصل می‌شود که این معادله همراه شرایط مرزی، معادلات حاکم بر تورم میکروشر 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 میکروشر 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 میکروشر 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 میکروشر 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 ارایه‌شده میکروشر 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 شبیه‌سازی، بدون در نظر گرفتن اثر برهم‌کنش سیال و سازه، میکروشر در نرم‌افزار آباکوس تحلیل می‌شود و رفتار آن بدون در نظر گرفتن تاثیر میدان جریان سیال شبیه‌سازی می‌شود. با اعمال شرایط مرزی مناسب در آباکوس، تغییر شکل میکروشر استخراج می‌گردد. سپس هندسه جدید هیدروژل به دست آمده به عنوان دیواره صلب وارد نرم‌افزار فلوئنت می‌شود و میدان جریان سیال بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه، بررسی و پارامترهایی از قبیل دبی عبوری از کانال محاسبه می‌گردد [17].

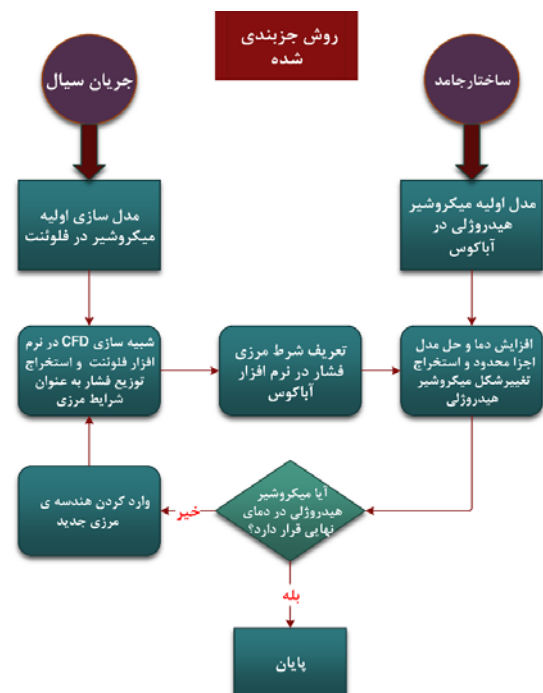
۵- نتایج و بحث

در این پژوهش، یک میکروشر هیدروژلی مدرج در دو حالت شبیه‌سازی شده است که یکی از این حالت‌ها شامل برهم‌کنش سیال و سازه و دیگری بدون آن می‌باشد تا با مقایسه دو نوع شبیه‌سازی مذکور اهمیت برهم‌کنش سیال و سازه در این ساختار بررسی گردد. ابعاد میکروشر مورد مطالعه در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در آن نسبت $B/A=2$ تعریف شده است و قطر خارجی و قطر داخلی به ترتیب ۱۰۰ و $200\mu m$ می‌باشد. میکروشر مورد مطالعه شامل یک قسمت فعال هیدروژلی هوشمند است که قابلیت پاسخ‌دهی به تحریک محیطی را دارد. این میکروشر در تماس با سیال عبوری از کانال، و جذب آب متورم می‌شود. پوسته هیدروژلی به راحتی می‌تواند در جهات X و Y متورم شود، اما تغییر شکل آن در جهت Z مقید شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده، جریان به‌طور مستقیم به دیواره میکروشر هیدروژلی برخورد می‌کند. به دلیل برخورد مستقیم جریان سیال به میکروشر هیدروژلی و همچنین به دلیل طبیعت نرم هیدروژل، در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه در شبیه‌سازی این میکروشرها 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 صفحه‌ای در نظر گرفته شده است که در این حالت تغییرات در راستای عمق قابل صرف نظر می‌باشد. هنگام شبیه‌سازی میکروشر در آباکوس، دمای اولیه $310K$ و دمای نهایی $302K$ در نظر گرفته شده است و به دلیل تغییر شکل 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 صفحه‌ای، میکروشر هیدروژلی با المان چهاروجهی CPE4H مدل‌سازی شد و پس از مطالعه مش، مش بهینه با تعداد ۳۸۷۸ المان انتخاب شد. در شبیه‌سازی بخش سیال در نرم‌افزار فلوئنت نیز با توجه به ابعاد کوچک میکروشر 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 میکروشر و دیواره هیدروژل به ترتیب ۴ و $1\mu m$ تعیین شده است. چگالی، ویسکوزیته و حجم هر مولکول آب به عنوان سیال عبوری

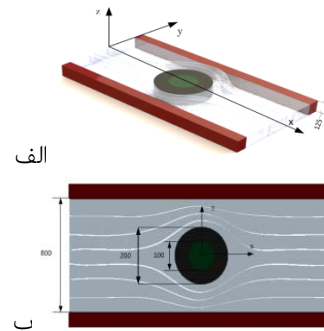
در دو قالب جداگانه مورد مطالعه قرار می‌گیرند که هر کدام به صورت جداگانه حل می‌شوند که در نهایت پس از حل، شرایط مرزی روی سطح مشترک در هر گام بین دو قالب منتقل می‌گردد. در این مقاله، از روش جزءبندی شده استفاده شده است. بخش سازه‌ای شامل هیدروژل هوشمند حساس به دما در نرم‌افزار آباکوس و بخش سیالاتی شامل میدان جریان سیال توسط نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده است که برای استفاده از این روش از نرم‌افزار MpCCI استفاده شده است. در واقع در این روش، ارتباط بین فشار وارد شده از جانب سیال عبوری از کانال و تغییر شکل میکروشر به دلیل کاهش دما برقرار می‌شود [17].

فرآیند حل به این صورت می‌باشد که ابتدا تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی را برای جریان سیال عبوری از کانال در نرم‌افزار فلوئنت انجام می‌دهیم که در نتیجه آن میدان فشار ایجاد شده به واسطه عبور سیال در کانال و تماس آن با دیواره میکروشر هیدروژلی به دست آورده می‌شود. سپس فشار به دست آمده از طریق نرم‌افزار MpCCI به عنوان شرط مرزی در شبیه‌سازی اجزاء محدود میکروشر در نرم‌افزار آباکوس اعمال می‌شود. در قدم بعدی از شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه، با در نظر گرفتن توزیع فشار روی میکروشر هیدروژلی، هندسه جدید هیدروژل استخراج شده و سپس از طریق نرم‌افزار MpCCI به نرم‌افزار فلوئنت منتقل می‌شود و این فرآیند تا رسیدن به دمای نهایی در گام‌های مختلف تکرار می‌شود. روند مراحل ذکر شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که زمان حل برای هر حالت شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه روی سیستم با مشخصات Core i5-3210M CPU حدوداً ۳ ساعت زمان نیاز داشت.



شکل (۳) فلوچارت شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه میکروشر هیدروژلی مدرج تحت بررسی

از کانال به ترتیب $998/2 \text{ kg/m}^3$ ، 0.0003 kg و 10^{-8} m^3 در نظر گرفته شده‌اند. فشار گیج ورودی در شبیه‌سازی‌ها برابر با ۴، ۸، ۱۲ و 16 kPa بوده، در حالی که فشار خروجی برابر با فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴) هندسه میکروشیپر مورد مطالعه در دمای 310 K : تمامی ابعاد برحسب میکرومتر می‌باشند.

همان‌طور که در روند حل تحلیلی اشاره شد، خواص میکروشیپر هیدروژلی در حالت مدرج در جهت شعاعی به‌صورت گرادیانی فرض شده است. در این میکروشیپر، خاصیت مدرج، چگالی اتصالات عرضی می‌باشد که بازه تغییرات آن در این پژوهش از 0.005 تا 0.035 در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است چه در حالتی که اثرات برهم‌کنش سازه و سیال مد نظر قرار گرفته و چه در حالتی که از تاثیرات آن صرف‌نظر شده، هر دو حالت همگن و مدرج مورد مطالعه قرار گرفته است تا تفاوت رفتار مدرج شیر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

برای میکروشیپر مدرج مورد مطالعه، به‌منظور بررسی بیشتر دو حالت همگن دیگر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. این دو حالت عبارت است از وقتی که هیدروژل به‌صورت همگن فرض شود: حالت اول چگالی اتصالات عرضی برابر با مقدار آن در لایه داخلی میکروشیپر مدرج، $N_0 v = 0.005$ ، و حالت دوم وقتی که چگالی اتصالات عرضی برابر با مقدار آن در لایه خارجی میکروشیپر مدرج، $N_1 v = 0.035$ ، باشد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی برای حالت همگن با $N_0 v = 0.005$ پوسته هیدروژلی در دمای $304/04 \text{ K}$ با دیواره کانال تماس برقرار می‌کند که این دما به‌عنوان دمای بسته‌شدن در نظر گرفته می‌شود. سپس، شبیه‌سازی با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه در فشار 12 kPa انجام شد که در این حالت دمای بسته‌شدن $304/24 \text{ K}$ به‌دست آمد. همین روند برای حالت همگن با $N_1 v = 0.035$ انجام شد که دمای بسته‌شدن با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه و بدون در نظر گرفتن آن به ترتیب $305/44$ و $305/60$ به‌دست آمدند. اختلاف نتایج به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه در این ساختار است.

در حالت مدرج $N v$ در بازه 0.005 و 0.035 به‌صورت خطی از شعاع داخلی تا شعاع بیرونی تغییر می‌کند. پس از شبیه‌سازی،

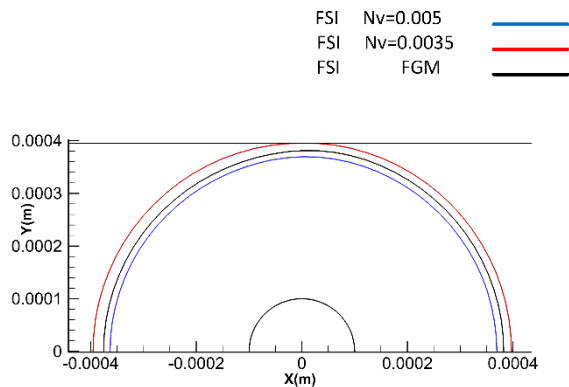
دمای بسته‌شدن با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه و بدون در نظر گرفتن آن به ترتیب، $304/83$ و $304/96$ به‌دست آمد. همان‌طور که در تمامی حالت‌ها مشخص است، در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سیال و سازه بر دمای بسته‌شدن میکروشیپر تاثیرگذار است. از طرفی مقادیر دمای بسته‌شدن میکروشیپر برای حالت مدرج در هر دو حالت شبیه‌سازی 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 می‌رسد.

نتایج شبیه‌سازی حالت مدرج با در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش 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 بخش‌های نمودار ۲ مشخص شده است. در نمودار ۲- الف، میکروشیپر در دما 309 K کمی متورم شده و تقریباً در حالت باز قرار دارد.

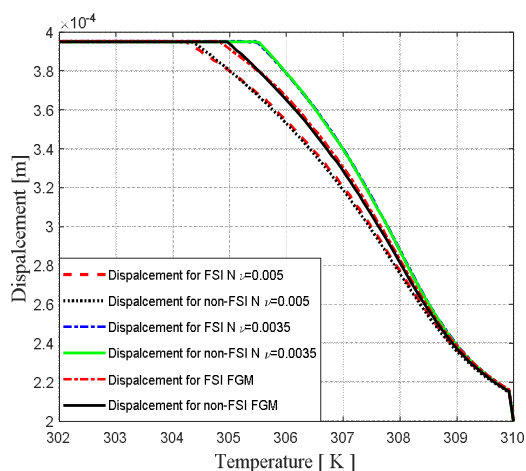
همان‌طور که در قسمت‌های ب تا د نمودار ۲ مشاهده می‌شود، هنگامی که دما کاهش پیدا می‌کند، میکروشیپر هیدروژلی شروع به متورم شدن می‌کند و به تبع آن مقدار دبی کاهش می‌یابد. وقتی که قسمت خارجی دیواره میکروشیپر هیدروژلی به دیواره کانال نزدیک می‌شود، توزیع تنش در هیدروژل و میدان سرعت در سیال به‌خصوص زمانی که نزدیک دمای بسته‌شدن میکروشیپر قرار می‌گیرند تاثیر بسزایی روی یکدیگر دارند. کاهش دما تا 302 K باعث بسته‌شدن کامل میکروشیپر شده و جریان سیال متوقف می‌گردد.

برای بررسی دمای بسته‌شدن میکروشیپر هیدروژلی با در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سیال و سازه، کانتور تغییر شکل پوسته هیدروژلی در اثر کاهش دما برای پوسته همگن و مدرج در فشار ورودی 12 kPa محاسبه و نتیجه در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، هنگامی که میکروشیپر با خاصیت $N v = 0.0035$ به دمای بسته‌شدن خود می‌رسد، میکروشیپر با خاصیت $N v = 0.005$ ، به دلیل تراکم بیشتر پیوندهای عرضی به دیواره کانال برخورد نمی‌کند. همچنین در حالت مدرج نیز تماسی با دیواره کانال برقرار نمی‌شود که بیانگر تاثیر خواص هیدروژل بر دمای بسته‌شدن میکروشیپر می‌باشد. 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 در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال و سازه و بدون در نظر گرفتن آن در نمودار ۴ نمایش داده شده است که در آن فشار ورودی برابر با 12 kPa انتخاب شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای بسته‌شدن که دمایی است که مقدار شعاع خارجی به مقدار ثابت یعنی نصف عرض کانال می‌رسد، در حالت مدرج بین جواب حاصل از دو جواب همگن قرار دارد که این موضوع نتایج نمودار ۳ را تایید می‌کند.

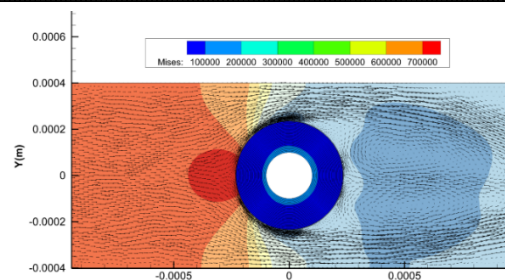


نمودار ۳) تغییر شکل میکروشیبر برای خواص همگن $Nu=0.0035$ و $Nu=0.005$ و حالت مدرج در حالت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه در فشار 12 kPa

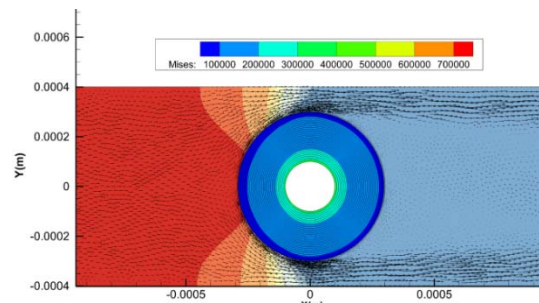


نمودار ۴) جابجایی انتهای میکروشیبر هیدروژلی برحسب تغییرات دما برای شبیه سازی های برهم کنش سیال و سازه و بدون آن در $Nu=0.0035$ و $Nu=0.005$ و حالت مدرج در فشار 12 kPa

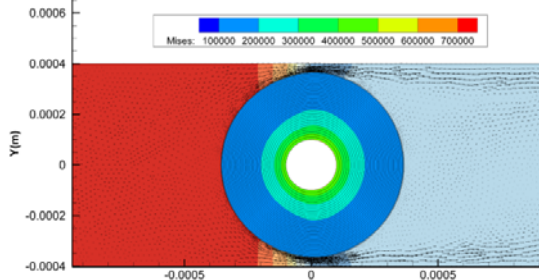
با توجه به اهمیت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه در طراحی میکروشیبرهای هیدروژلی، یکی از پارامترهای عملکردی مهم آنها دبی سیال و تغییرات آن نسبت به تغییرات دما می باشد. برای این منظور، دبی جریان برای هر دو حالت شبیه سازی برهم کنش سیال و سازه و بدون آن، با انتگرال گیری از پروفیل سرعت در قسمت ورودی کانال محاسبه شده است. در نمودار ۵، نتایج به دست آمده برای دبی سیال عبوری از میکروشیبر به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی و در بازه تغییرات دما از 310 K تا 302 K نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز دمای بسته شدن میکروشیبر 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 $(\Delta T = 310 - 302 = 8\text{ K})$ نیز ارائه شده است. بر اساس نتایج مذکور، بیشترین مقدار درصد اختلاف در فشار 16 kPa به وجود می آید که با توجه به تغییر شکل بیشتر پوسته هیدروژلی مورد تایید است.



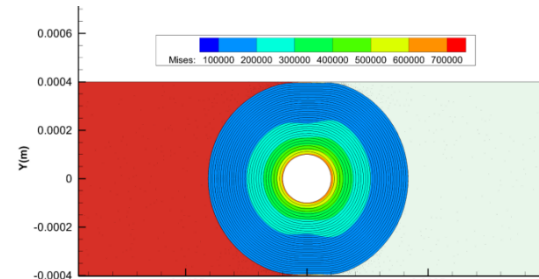
الف)



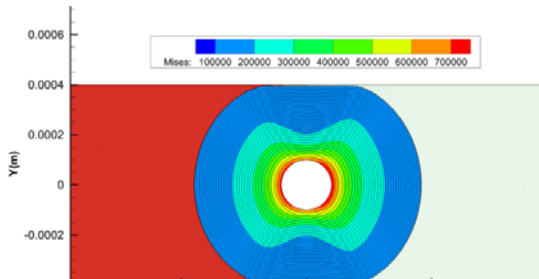
ب)



ج)

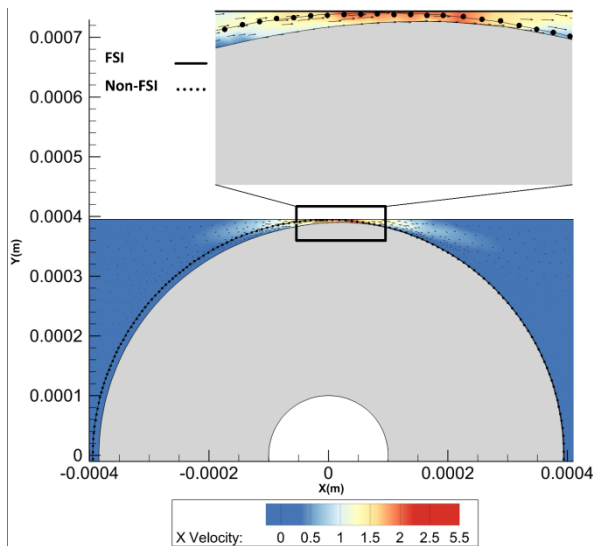


د)

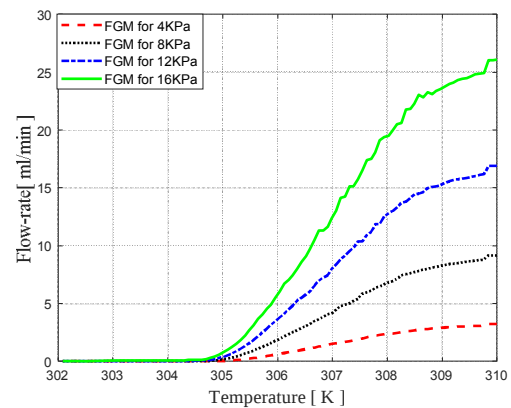


ه)

نمودار ۵) کانتور تنش برای میکروشیبر هیدروژلی و کانتور توزیع فشار و سرعت جریان سیال در دماهای ۳۰۹ (الف)، ۳۰۷/۶ (ب)، ۳۰۷ (پ)، ۳۰۴ (ج) و ۳۰۲ (د) 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



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

جدول ۲) دمای بسته‌شدن میکروشیور 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

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، رفتار یک میکروشیور 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 میکروشیور هیدروژلی با خواص مدرج در راستای شعاعی ارایه شد که با استفاده از آن مدل عددی اجزاء محدود ساخته‌شده در آباکوس صحت‌سنجی گردید. در قدم بعدی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه، میدان جریان سیال میکروشیور در نرم‌افزار فلوئنت و تغییر شکل هیدروژل در اثر تغییرات دما در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و نتایج حاصل از دو نرم‌افزار به‌وسیله نرم‌افزار MpCCI به همدیگر جفت شدند. همچنین مدل‌سازی رفتار میکروشیور 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 میکروشیور مدرج، مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج به‌دست‌آمده بیانگر تاثیر زیاد فشار ورودی بر دمای بسته‌شدن میکروشیور بودند. در تمامی حالت‌های بررسی‌شده، 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.

مطابق انتظار، با افزایش فشار ورودی دبی سیال هم بیشتر می‌شود. علاوه بر این، دمای بسته‌شدن میکروشیور 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 میکروشیور هیدروژلی با افزایش فشار ورودی در دمای پایین‌تر بسته می‌شود. دمای بسته‌شدن میکروشیور، 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 میکروشیور 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 میکروشیور و تاثیر آن بر دمای بسته‌شدن، تماسی بین دیواره کانال و میکروشیور 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 میکروشیور 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 انرژی آزاد برای هیدروژل‌های حساس به دما	W
چگالی انرژی آزاد برای هیدروژل‌های حساس به دما ناشی از تغییر شکل مکانیکی	$W_{elastic}$
چگالی انرژی 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

- 1- Morimoto T, Ashida F. Temperature-responsive bending of a bilayer gel. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;56:20-28.
- 2- 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.
- 3- 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.
- 4- 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.
- 5- 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.
- 6- 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.
- 7- 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.
- 8- 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.
- 9- Kim D, Beebe DJ. A bi-polymer micro one-way valve. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007;136(1):426-433.
- 10- Chester SA, Anand L. A thermo-mechanically coupled theory for fluid permeation in elastomeric materials: