

توسعه یک سامانه پویای نوین سایه‌انداز گلخانه حاوی سیال به روش دینامیک سیالات محاسباتی: اعتبارسنجی و مطالعات هیدرولیکی

عبدالرضا مهین غفاری نیا^۱، محمد حسین عباسپور فرد^{۲*} و عادل رضوانی وند فناپی^۳

چکیده

یکی از روش‌های بهبود عملکرد حرارتی/سرمایشی گلخانه‌ها استفاده از عایق‌های حرارتی/سایه‌انداز است. در این پژوهش رفتار یک سامانه سایه‌انداز پویای نوین ساخته‌شده از صفحات پلی کربنات دولایه حاوی سیال، به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این سامانه با توجه به نیاز سرمایشی و یا گرمایشی و به‌منظور کنترل تشعشع ورودی و یا خروجی از گلخانه، سیال مناسبی به‌وسیله یک پمپ هیدرولیک به مجاری بین صفحات پلی کربنات پمپاژ می‌شود. مطالعه پارامترهای هیدرولیکی شامل فشار و سرعت سیال داخل مجاری بین صفحات می‌تواند برای طراحی مناسب سایه‌انداز به‌منظور کمینه کردن انرژی مورد نیاز برای اجرای این سامانه، بسیار سودمند باشد. از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و مدل آشفته k-ε استاندارد برای شبیه‌سازی جریان آشفته در داخل مجرای سایه‌انداز استفاده شد. با اعتبارسنجی بین داده‌های تجربی و عددی، به‌طور متوسط اختلافی کمتر از ۵ درصد بین افت فشار داده‌های تجربی و عددی به دست آمد. در ادامه مقدار سرعت بیشینه ۰/۹۶ متر بر ثانیه برای داخل مجرا به‌دست آمد. تحلیل رفتار سامانه در حالت‌های مختلف سری (ورودی و خرجی منفرد) و موازی (ورودی و خروجی چندتایی) نشان داد که مقدار افت فشار برای حالت سری ۳۷۹۳ پاسکال و برای حالت موازی با سه ورودی و خروجی ۳۴۳۹ پاسکال است که نشان‌دهنده کاهش ۹/۳ درصدی افت فشار برای طرح نوآورانه و پیشنهادی بود. بنابراین در توسعه سامانه در مقیاس تجاری باید پیکربندی موازی آن مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: افت فشار، دینامیک سیالات محاسباتی، سایه‌انداز، گلخانه.

ارجاع: مهین غفاری نیا ع.، عباسپور فرد م. ح. و رضوانی وند فناپی ع. ۱۴۰۱. توسعه یک سامانه پویای نوین سایه‌انداز گلخانه حاوی سیال به روش دینامیک سیالات محاسباتی: اعتبارسنجی و مطالعات هیدرولیکی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۲: ۸۳-۹۴. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10069.548>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

* نویسنده مسئول: abaspour@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

مقدمه

گلخانه، ساختمانی با پوشش قابل نفوذ نسبت به نور است که در آن شرایط محیطی مختلف به خصوص گرما، رطوبت، نور و میزان گاز کربنیک قابل کنترل است. در چنین محیط محصور گیاهان را می‌توان در تمامی سال، به‌ویژه در خارج از فصل پرورش داده، برخی از محصولات را پیش‌رس کرد و یا قادر نمود برای تمام یا قسمتی از سال، گیاهان را از آب و هوای نامناسب محافظت کرد. پارامترهایی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی، دمای خاک، میزان رطوبت خاک، میزان تابش، نوع پوشش گلخانه روی رشد گیاه تأثیر می‌گذارد.

در گلخانه، پوششی مناسب است که بتواند ضمن اینکه طول موج‌های مورد نیاز و مفید طیف الکترومغناطیس نور خورشید را برای فعالیت‌های فتوسنتزی عبور دهد، حتی‌المقدور از ورود تشعشع‌های مضر برای گیاه ممانعت به عمل آورد. اگرچه وجود پوشش در گلخانه در مجموع باعث حفاظت از گیاهان گلخانه‌ای می‌شود، ولی در مواقعی به دلیل جذب و یا دفع ناخواسته تشعشعات سبب افزایش بار گرمایشی و یا سرمایشی می‌گردد. با مطالعه نقش اقلیم در طراحی گلخانه‌ها، پارامتر دما و کنترل آن از پارامترهای مهم در طراحی گلخانه عنوان شده‌اند که می‌توانند نقش اساسی در اقتصادی بودن تولید داشته باشند. بر اساس تحقیقات صورت گرفته در گرمایش سنتی ۱۵ تا ۲۵ درصد از هزینه تولید محصولات مربوط به تأمین گرمایش گلخانه است (Fabrizio, 2012). در مصرف انرژی گلخانه‌ها عوامل بسیاری از جمله شکل هندسی سازه و ساختمان، نوع پوشش و نوع تهویه دخیل هستند. یکی از عوامل مهم، نوع پوشش در گلخانه‌ها است. انواع پوشش مرسوم در گلخانه‌ها شیشه، پلاستیک و پلی‌کربنات است. از جمله مزیت‌های پوشش پلی‌کربنات به‌جای شیشه هزینه کمتر و نیز وزن سبک‌تر آن است. هم‌چنین مقاومت بالای آن نسبت به پلاستیک باعث تقاضای روزافزون آن به‌عنوان پوشش در صنعت گلخانه گردیده است. (Fadakar-Deyloghmani & Ebrahimpour, 2017).

مهم‌ترین عواملی که باید در طول فصل گرم مورد توجه قرار گیرند، سطح بالای تابش خورشید، کمبود بخار و فشار بخار آب است؛ چرا که تأثیر آن‌ها بر افزایش استرس گیاه و کاهش بهره‌وری محصول و کیفیت میوه قابل توجه است. یکی از روش‌هایی که برای کنترل این شرایط استفاده

می‌شود، کاربرد انواع سایه‌اندازها در گلخانه است (López-Marín *et al.*, 2009).

سایه‌اندازی یکی از رایج‌ترین شیوه‌های استفاده‌شده توسط تولیدکنندگان برای کاهش دمای گلخانه از طریق کاهش شدت تابش و در نتیجه کاهش سطح انرژی در طول فصل تابستان است که می‌تواند به‌عنوان عایق نیز در طول فصل زمستان استفاده شود (Chen *et al.*, 2011). سایه‌اندازی معمولاً با استفاده از مواد متخلخل مانند پوشش و تورهای پلاستیکی، پاشیدن آب آهک (دوغاب) بر روی سطح خارجی گلخانه و یا پر کردن توپ‌های پلی‌اتیلنی در کانال‌های اکریلیک گلخانه‌های شیشه‌ای شکل می‌گیرد (Ahemd *et al.*, 2016). با این وجود کدر بودن سلول‌های خورشیدی موجود و در نتیجه سد شدن بخش عمده‌ای از نور ورودی به داخل گلخانه، محققان را واداشته است تا به دنبال توسعه سلول‌های خورشیدی شفاف و نیمه شفاف در گلخانه باشند (Sung *et al.*, 2016). در سال‌های گذشته، استفاده از تورهای پلاستیکی به‌عنوان مواد سایه‌انداز به دلیل مزایای زیست‌محیطی و مزایای اقتصادی این نوع مواد، گسترش یافته است (Chen *et al.*, 2011).

سایه‌اندازی با تورهای پلاستیکی یکی از راه‌های مؤثر برای کاهش تنش‌های حرارتی ناشی از افزایش نرخ تابش است که در نتیجه، تأثیرات منفی آن را بر رشد گیاهان گلخانه‌ای کاهش می‌دهد. استفاده از این تورها به بهبود محیط گلخانه، بهبود عملکرد دستگاه‌های خنک‌کننده و افزایش کارایی آن‌ها کمک می‌کند. (Abdel-Ghany *et al.*, 2015).

آنچه همواره مدنظر طراحان و مهندسين گلخانه بوده است، ارائه طرح‌هایی است که بتوانند حتی‌المقدور شرایط محیطی یکنواختی در فضای داخل گلخانه ایجاد نمایند. یکی از ابزارهای مهم برای نیل به این هدف، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. این سامانه نرم‌افزاری به مهندسين و دانشمندان کمک می‌کند تا با استفاده از رایانه‌ها، تخمین قابل قبولی از حل معادلات حاکم بر سیالات را به دست آورند. اساس کار در دینامیک سیالات محاسباتی، تبدیل معادلات حاکم بر سیالات به روابط جبری است (Piscia *et al.*, 2013). روش CFD می‌تواند در حل معادلات مربوط به میدان‌های فشار، دما و سرعت

ارائه شده است، رفتار آن به کمک روش CFD، شامل مؤلفه‌های فشار، سرعت و پارامترهای آشفتگی مورد بررسی قرار گرفت. در این سامانه با استفاده از اتصالات لوله‌کشی و تغییرات لازم بر روی صفحات پلی‌کربنات، سیال‌های مختلفی مانند آب و یا متناسب با نیاز نوری گیاه، مخلوطی از آب و دیگر مواد در مقیاس نانو، از داخل مجاری بین صفحات و به کمک یک پمپ تزریق می‌شود. با تغییر نوع سیال و همچنین با اضافه نمودن نانو ذرات مختلف به سیال می‌توان خصوصیات فیزیکی، نوری و حرارتی آن را تغییر داد و در نتیجه میزان تشعشع جذبی، عبوری و انعکاسی برخورد با پوشش گلخانه را کنترل نمود. با این کار می‌توان از این سامانه برای اهداف مختلف و به عنوان سایه‌انداز و یا پوشش‌های حرارتی^۱ استفاده نمود. مطالعات صورت گرفته در این تحقیق شامل بررسی تجربی به منظور اعتبارسنجی سامانه عددی و در ادامه با استفاده از سامانه عددی این سایه‌انداز، رفتار یک واحد توسعه یافته آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان برای طراحی و ساخت سایه‌انداز در مقیاس‌های بزرگ‌تر و تجاری بهره جست.

در سامانه سایه‌انداز دینامیکی فوق‌الذکر از یک پوشش دوجداره حاوی سیال‌های مختلف استفاده شده و مایع موردنظر توسط یک پمپ، درون مجاری بین صفحات پلی‌کربنات پمپاژ و برگشت داده می‌شود. پس از پر شدن کلیه مجاری می‌توان پمپاژ را متوقف و از آن به‌عنوان سایه‌انداز و یا پوشش حرارتی استفاده نمود. علاوه بر این می‌توان با پمپاژ مداوم مایع، حرارت جذب‌شده توسط پوشش گلخانه را دفع و نوعی سایه‌انداز فعال (در مقابل سایه‌اندازهای انفعالی که صرفاً ایجاد سایه می‌کنند) را ایجاد نمود. با توجه به این که پژوهش فوق‌الذکر بر روی یک نمونه کوچک آزمایشگاهی در دست بررسی است، قبل از توسعه و گسترش آن به یک گلخانه تجاری در اندازه‌های چند هزار مترمربع و تحمل هزینه‌های زیاد و انجام آزمون و خطا، نیازمند بررسی‌های علمی و فنی است. به‌منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه در این مقاله یک مدل عددی مبتنی بر CFD ارائه و مورد اعتبارسنجی قرار گرفت تا بتوان از آن برای مطالعات توسعه‌ای سامانه سایه‌انداز استفاده نمود.

در زمینه‌های مهندسی بیوسیستم و کشاورزی، مکانیک و شیمی مورد استفاده قرار بگیرد. این روش برای مدل‌سازی جریان سیال و حرارت، انتقال جرم و مومنتوم و طراحی بهینه، در بخش‌های مختلف از جمله صنایع وابسته به کشاورزی استفاده می‌گردد (Norton *et al.*, 2007).

کاربرد روش CFD در صنعت و کشاورزی روزبه‌روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. قابلیت‌های CFD شامل تطبیق‌پذیری، دقت و همچنین کاربرد آسان، توجه محققان علوم مهندسی و کشاورزی را به خود جلب کرده است. به همین خاطر امروزه روش CFD برای حل مسائل مربوط به عوامل محیطی گلخانه‌ها، مرغداری‌ها و صنایع فرآوری محصولات کشاورزی مورد استفاده گسترده‌ای قرار می‌گیرد (Lee *et al.*, 2013; Rezvanivandefanayi & Nikbakht, 2015; Rezvanivandefanayi *et al.*, 2019).

در یک مدل‌سازی CFD، پروفایل‌های جریان داخل یک جریان دو فازی در داخل لوله مورد بررسی قرار گرفت. از مدل اولیری و نرم افزار Fluent برای محاسبه جریان گاز-مایع استفاده شد. محققین از مدل آشفتگی k-ε استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی داخل جریان استفاده نمودند. در انتها توافق خوبی بین داده‌های تجربی و داده‌های عددی حاصل از شبیه‌سازی به دست آمد (Ghorai & Nigam, 2006). همچنین در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل جریان بعد از یک تغییر ناگهانی داخل لوله با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام شده است. از نرم‌افزار GAMBIT برای ایجاد شبکه و از مدل k-ε استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی‌ها بهره برده شده است. کانتورهای سرعت و فشار به عنوان دو پارامتر مهم، بعد از این تغییر ناگهانی مورد تحلیل قرار گرفتند. به عنوان یک نتیجه کلی، توانایی بالای روش CFD برای شبیه‌سازی‌های داخل جریان اثبات شد.

با توجه به اینکه ایران در اقلیم سرزمینی گرم و خشک قرار دارد، استفاده از سایه‌اندازهای مناسب و جدید در گلخانه‌های کشور که بتواند ضمن بهبود راندمان سایه‌اندازی، محدودیت‌های ناشی از نصب آن‌ها که سبب اختلال در ورود و خروج تشعشع خورشیدی (مفید و یا مضر به حال گیاه) می‌شوند را رفع نمایند، دارای ضرورت است. در مطالعه‌ای به‌منظور توسعه و تکامل یک سامانه سایه‌انداز دینامیکی و پویای نوین که برای اولین بار توسط Mohammadi-Mogharreb & Abbaspour-Fard, (2019) به صورت یک واحد آزمایشگاهی با ابعاد محدود

1- Thermal blanket

مواد و روش‌ها

سامانه آزمایشگاهی مورد مطالعه در این پژوهش شامل یک گلخانه کوچک مقیاس به طول ۴ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۲/۳ متر است که با صفحات پلی‌کربنات به ضخامت ۵/۲ میلی‌متر پوشانده شده است. سقف این گلخانه که به شکل ۷ و با زاویه ۳۶/۵ درجه ساخته شده از ۴ صفحه ۲ × ۱/۸۵ متر و جدا از هم تشکیل شده است (Error! Reference source not found. ۱). ابتدا و انتهای صفحات پلی‌کربنات سقف از طریق یک لوله پلاستیکی شکاف‌دار به هم متصل گردیده به طوری که هم‌زمان سیال از طریق مجرای ورودی و مجاری بین صفحات پلی‌کربنات وارد و در انتهای دیگر آن‌ها خارج می‌شود و از طریق مسیر خروجی به مخزن برمی‌گردد. از یک پمپ هیدرولیکی با توان ۰/۳۷ کیلووات و دبی ۳۵ لیتر بر دقیقه برای به جریان انداختن سیال در مدار استفاده می‌شود. همچنین برای کنترل دبی جریان از یک شیر در مسیر رفت و یک شیر در مسیر برگشت به مخزن استفاده شده است. برای اندازه‌گیری فشار در ورودی و خروجی صفحه‌های پلی‌کربنات حاوی سیال و برای تعیین افت فشار در صفحات از دو مانومتر لوله‌ای ساده (شلنگ) که خروجی آن‌ها در کنار هم قرار گرفتند بهره برده شده است.

جدول ۱- مشخصات و ابعاد صفحات حاوی سیال در سامانه

سایه‌انداز	
بخش	اندازه (میلی‌متر)
ابعاد سطح مقطع مجراها	۵۲
طول سامانه سایه‌انداز (در امتداد مجراها)	۱۸۵۲
عرض قطعات سایه‌انداز* (یک صفحه پلی‌کربنات)	۲۰۰۰

* به عبارتی هر قطعه از سامانه سایه‌انداز متشکل از یک صفحه پلی‌کربنات به طول ۲۰۰۰ و عرض ۱۸۲۵ میلی‌متر است.

به منظور اعتبار سنجی مدل CFD استفاده شده، نیاز بود تا داده‌هایی (مانند افت فشار، سرعت سیال) از سامانه آزمایشگاهی گرفته شود. با توجه به ابعاد کوچک مجاری بین صفحات پلی‌کربنات، اندازه‌گیری سرعت سیال در داخل آن‌ها امکان‌پذیر نبود. بنابراین از داده‌های مربوط به افت فشار در ورودی و خروجی سامانه استفاده شد. با این وجود اندازه‌گیری افت فشار در داخل آن‌ها نیز نیازمند ابزاری با دقت بالا است. فشارسنج‌های موجود در بازار از نقطه نظر دقت و محدوده اندازه‌گیری فشار، مناسب اندازه‌گیری افت فشار در سامانه نبودند و از این رو در این طرح برای اندازه‌گیری دقیق افت فشار در داخل سامانه از یک روش ابداعی به صورت مانومتری تفاضلی استفاده گردید. بدین صورت که ابتدا یک مانومتر U شکل حاوی روغن مد نظر قرار گرفت (از جیوه به علت سمی بودن استفاده نشد) که به دلیل اختلاط روغن با آب و دیگر مشکلات موفقیت‌آمیز نبود. در اقدام بعدی، از دو مانومتر لوله‌ای مجزا که نمای آن‌ها در شکل ۲ آورده شده است، استفاده شد. هر یک از مانومترها متشکل از ده متر شلنگ شفاف (موسوم به شلنگ تراز) با قطر ۶ میلی‌متر و بر روی یک دیوار عمودی، در کنار هم نصب شده بودند. یکی از مانومترها در ورودی و دیگری در خروجی سامانه وصل شد و با عبور سیال با دبی‌های مختلف اطلاعات مورد نیاز برای اعتبارسنجی مدل فراهم گردید. اندازه‌گیری افت فشار در هر دبی تنظیمی موقعی انجام می‌گرفت که سیال (آب) وارد مدار شده و جریان به صورت ثابت و پایدار در می‌آمد (شکل ۲). طول شلنگ‌ها بر این اساس انتخاب شد تا در شرایط مختلف آزمایش و با دبی‌های مختلف بتوانند بار هیدرولیکی را بدون سرریز کردن از انتهای مانومترها، نشان دهند. میزان ستون آب در هر شلنگ نشان‌دهنده



شکل ۱- سازه گلخانه تحقیقاتی که در آن سامانه سایه‌انداز دینامیکی تعبیه شده است. مجاری ورودی و خروجی سیال در بین صفحات پلی‌کربنات سقف در شکل نشان داده شده است.

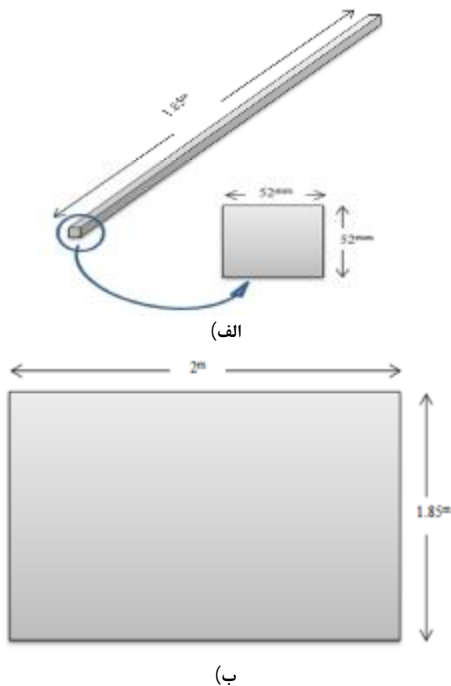
اندازه‌گیری دبی در سامانه آزمایشگاهی

برای داده برداری تجربی، دبی جریان عبوری از داخل مجاری بین صفحه پلی‌کربنات به روش حجم‌سنجی و با استفاده از یک استوانه مدرج و کروномتر اندازه‌گیری شد.

مش‌بندی

مش‌بندی برای هندسه صفحات سایه‌انداز در حالت‌های سری (منفرد) و موازی (چندتایی) در شکل ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. برای دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر سعی شده است که در نزدیکی مرزها و دیواره‌ها و همچنین در مناطق با گرادیان‌های بالا از مش‌های با اندازه ریزتر استفاده گردد. با توجه به گرادیان بالا در نزدیکی دیواره، از مش لایه مرزی در این مکان‌ها استفاده شد. همچنین مقدار Y^+ برابر با ۷۰ به دست آمد.

برای سیستم موازی نیز مش‌بندی انجام شده است. تمامی موارد مطرح شده برای سایه‌انداز منفرد برای مش‌بندی حالت موازی (سه تایی) نیز لحاظ گردیده است.



شکل ۳- مشخصات مجاری؛ الف) بین صفحات پلی‌کربنات و ب) ابعاد صفحات پلی‌کربنات که مجاری بین آن‌ها قرار گرفته‌اند و برای ایجاد سامانه سایه‌انداز مورد استفاده قرار گرفت. سیال از انتهای پایینی مجاری وارد و از انتهای دیگر خارج می‌شود.

میزان فشار در آن نقطه و اختلاف ارتفاع آب در شلنگ‌ها نشان دهنده افت فشار بین ورودی و خروجی بود.

روش اندازه‌گیری مانومتری متشکل از دو لوله پلاستیکی (شلنگ شفاف) بلند است که بر روی یک دیوار عمودی نصب شده‌اند. یکی از شلنگ‌ها به ورودی و دیگری در مسیر خروجی سامانه متصل گردیده است، در حالی که انتهای بالای آن‌ها آزاد است. به این ترتیب ارتفاع آب در هر لوله بیان‌گر فشار سامانه در آن نقطه خواهد بود. اختلاف ارتفاع آب در دو شلنگ نشان‌دهنده افت فشار است (شکل ۲).

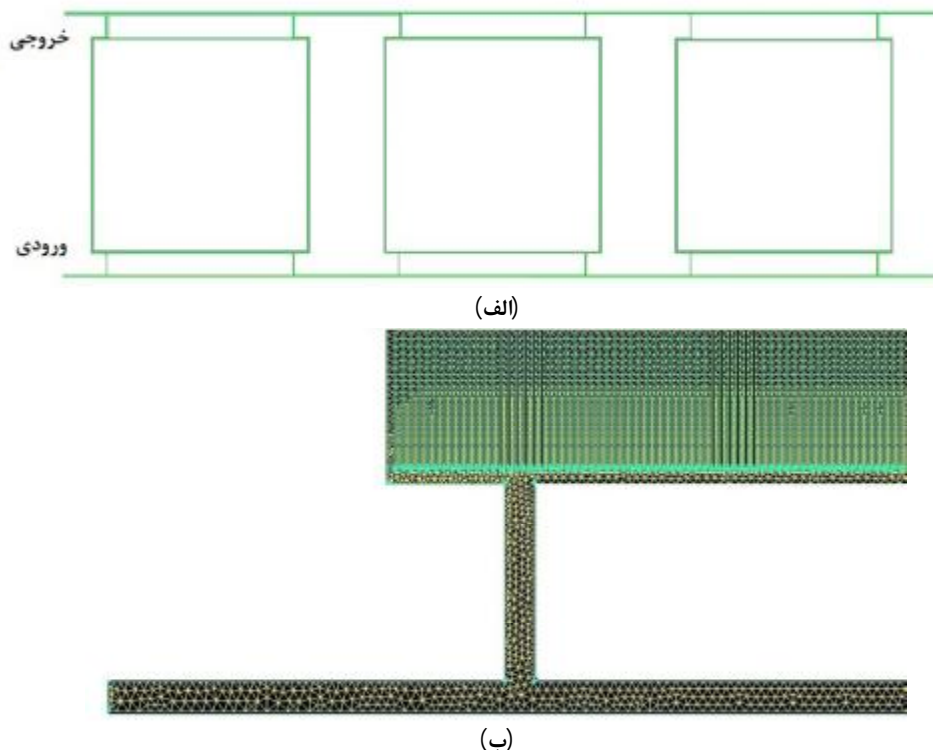


شکل ۲- روش اندازه‌گیری مانومتری

با توجه به شکل ۳ و وجود تقارن در نصب صفحات پلی‌کربنات حاوی سیال (آب) برای به‌دست آوردن داده‌های موردنظر این پژوهش، سامانه عددی به نحوی طراحی شد که سیال فقط در یکی از صفحات جریان یابد. دبی جریان ورودی و خروجی از صفحه با استفاده از یک استوانه مدرج و کروномتر اندازه‌گیری شد. برای شبیه‌سازی این سامانه از نرم‌افزارهای ANSYS و GAMBIT 2.4.6 استفاده شد. نرم‌افزار ANSYS Fluent 15 استفاده شد. نرم‌افزار ANSYS Fluent یک برنامه تجاری است که از رویکرد حجم محدود CFD برای انجام محاسبات کوپل^۱ یا جداگانه^۲ (به کمک معادلات بقای جرم^۳، بقای مومنتوم^۴ و بقای انرژی^۵) استفاده می‌کند (Ansys Fluent theory guide, 2013).

نرم‌افزار GAMBIT 2.4.6 برای تولید هندسه، مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۴ مش‌بندی سایه‌انداز را نشان می‌دهد.

- 1- Coupled
- 2- Segregated
- 3- Conservation of mass
- 4- Conservation of momentum
- 5- Conservation of energy



شکل ۴ - (الف): مش‌بندی صفحه پلی‌کربنات حالت موازی؛ (ب): بزرگنمایی از مش‌بندی بخش ورودی

حالت کلی به صورت زیر مطرح می‌شوند (Fluent theory guide, 2013):

$$\frac{\partial(\mathbf{r}\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{r}\mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\mathbf{r}\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{r}\mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{t}}) + \mathbf{r}\mathbf{g} \quad (2)$$

که در آن p فشار استاتیکی (پاسکال)، $\mathbf{r}\mathbf{g}$ نیروی حجمی جاذبه (نیوتن) و $\bar{\mathbf{t}}$ تانسور تنش (پاسکال) است که توسط رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\bar{\mathbf{t}} = m_{effective} \left[(\nabla \mathbf{v}) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

$$m_{effective} = m + m_t \quad (4)$$

که در آن $m_{effective}$ و m_t به ترتیب ویسکوزیته‌های مؤثر (پاسکال ثانیه) و آشفته (پاسکال ثانیه) هستند.

در حل عددی به روش CFD در نرم‌افزار ANSYS Fluent، دامنه، به صورت حجم محدود در یک مجموعه، گسسته‌سازی می‌شود. منطقه پس از گسسته‌سازی مش نامیده می‌شود. قانون‌های بقای جرم و مومنتوم در معادلات جبری وارد می‌شوند و در انتها، تمامی معادلات برای حوزه جریان حل می‌گردند.



شکل ۵ - مش‌بندی صفحه پلی‌کربنات در حالت موازی. در شکل فقط بخشی از دو صفحه پلی‌کربنات نشان داده شده است.

توصیف مدل عددی معادلات حاکم

در دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات حاکم بر جریان‌های مختلف، شامل قوانین بقای جرم، مومنتوم و انرژی است. به صورت کلی، سه قانون ذکر شده، یک دستگاه معادلات جفت شده غیرخطی PDE¹ است که حل تحلیلی ندارد. این قوانین برای جریان داخلی حل می‌گردد. با توجه به شرایط مسئله، قوانین بقای جرم و مومنتوم در

1- Partial Differential Equation

تنظیمات حل‌گر

حل‌گر مورد استفاده برای تحلیل در نرم‌افزار ANSYS Fluent توسط مقدار عدد ماخ محاسبه شده، تعیین می‌شود. عدد ماخ به نسبت سرعت یک جسم در یک سیال به سرعت صوت در همان سیال تعریف می‌گردد که تراکم پذیر بودن یا تراکم‌ناپذیر بودن یک جریان را مشخص می‌کند. در صورتی که عدد ماخ کمتر از ۰/۳ باشد به معنی تراکم‌ناپذیر بودن جریان و در غیر این صورت به معنی تراکم‌پذیر بودن جریان است. در شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS Fluent برای محیط‌های تراکم‌ناپذیر از حل‌گر بر مبنای فشار و برای محیط‌های تراکم‌پذیر از حل‌گر بر مبنای چگالی استفاده می‌شود. برای سامانه سایه‌انداز دینامیکی که حاوی جریان سیال (آب) در داخل مجراهای بین صفحات پلی‌کربنات است، بر اساس محاسبات صورت گرفته طبق معادله (۵)، عدد ماخ (Ma) برابر با ۰/۰۰۵۵ است. به دست آمد، بنابراین از حل‌گر بر مبنای فشار استفاده گردید.

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (5)$$

که در آن v سرعت سیال در محیط ($m.s^{-1}$) و c سرعت صوت در همان محیط ($m.s^{-1}$) است.

شناسایی نوع جریان و تنظیمات ابتدایی

در ادامه، به منظور شناسایی نوع آرام یا آشفته بودن جریان، عدد رینولدز آن محاسبه گردید که با توجه به اینکه مقدار آن بالای ۴۰۰۰ بود، مشخص گردید که جریان در رژیم آشفته قرار دارد. از تابع دیواره استاندارد برای شبیه‌سازی رفتار دیواره بهره برده شد و همچنین شرایط عدم لغزش انتخاب گردید. همچنین مقدار y^+ برای اولین سلول در نزدیکی دیواره محاسبه گردید و بر اساس آن شبکه ایجاد شد. از نوع حل با دقت مضاعف (Double precision)، حل دو بعدی، در نظر گرفتن شتاب گرانش (g)، حل در حالت گذرا و حل آشفته استفاده گردید.

شرایط مرزی

تعیین و مقداردهی صحیح شرط مرزی از اهمیت بالایی برای حل صحیح مسئله و استخراج میدان‌های حل برخوردار است. در مطالعه حاضر، از شرط مرزی سرعت ورودی در بخش ورودی جریان و شرط مرزی فشار خروجی در خروج سیال استفاده شده است. به صورت

پیش‌فرض سایر سطوح سامانه به صورت دیواره تعریف شدند. نوع و مقدار شرایط مرزی مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین شدت آشفتگی ۱۰٪ برای ورودی سرعت در نظر گرفته شد.

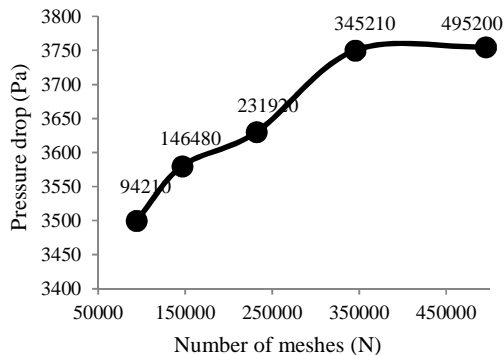
جدول ۲- شرایط مرزی مدل عددی سامانه سایه‌انداز

نوع شرط مرزی	مقدار یا حالت
سرعت ورودی	$0.76 m.s^{-1}$
فشار خروجی	فشار اتمسفر
دیواره	شرایط بدون لغزش

نتایج و بحث

آزمون بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه در شبیه‌سازی سامانه سایه‌انداز، پنج سطح اندازه مش استفاده گردید. تعداد سلول‌های مش در پنج سطح شامل ۹۴۲۱۰، ۱۴۶۴۸۰، ۲۳۱۹۲۰، ۳۴۵۲۱۰ و ۴۹۵۲۰۰ عدد مش بودند که به ترتیب سطوح ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ نامیده شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افت فشار بین ورودی و خروجی سایه‌انداز بعد از سطح ۴ مش‌بندی تقریباً ثابت می‌ماند، به طوری که اختلاف افت فشار در دو سطح مش ۴ و ۵ کمتر از ۱٪ بود. بنابراین، به خاطر ملاحظات زمانی در حل، سطح ۴ مش‌بندی با ۳۴۵۲۱۰ عدد مش به عنوان مش پایه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵).



شکل ۶- آزمون بررسی استقلال از شبکه

در این بخش ابتدا به اعتبارسنجی نتایج تجربی اندازه‌گیری سرعت پرداخته می‌شود. سپس در ادامه پارامترهای مربوط به ویژگی‌های جریان داخل سایه‌انداز، افت فشار و سرعت مورد بحث قرار می‌گیرند. علاوه بر این، انرژی جنبشی و شدت آشفتگی نیز به عنوان پارامترهای حائز اهمیت در

فشار برای سه دبی، ۰/۰۶، ۰/۱ و ۰/۱۴ لیتر بر ثانیه در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان ماکزیمم مقدار فشار با افزایش دبی ورودی آب افزایش یافته است و از ۲۶۶۰ پاسکال برای دبی ۰/۰۶ لیتر بر ثانیه به ۵۵۴۳ پاسکال برای دبی ۰/۱۴ لیتر بر ثانیه رسیده است.

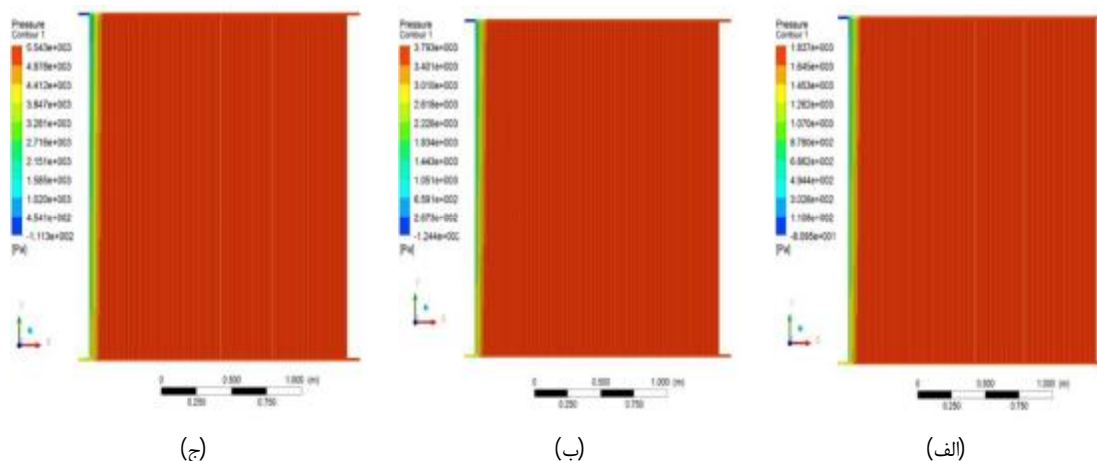
جدول ۳- اعتبارسنجی مدل عددی

سرعت (m.s ⁻¹)	افت فشار (Pa)		خطا (%)
	تجربی	شبیه‌سازی	
۰/۶۴	۲۶۹۶	۲۵۹۱	۳/۸۹
۰/۶۹	۳۱۳۸	۳۰۰۸	۴/۱۴
۰/۷۶	۳۷۸۰	۳۶۴۰	۳/۷۰
۰/۸۲	۳۹۲۲	۳۷۷۴	۳/۷۷
۰/۸۷	۴۵۱۰	۴۳۱۶	۴/۳۰

سایه‌انداز بررسی می‌شوند. در نهایت انرژی و توان پمپاژ به عنوان مهم‌ترین معیار محاسبه می‌گردد.

اعتبارسنجی مدل عددی

هر شبیه‌سازی عددی از جمله CFD که انجام می‌گردد، برای قابل اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شود. برای این منظور از داده‌های مربوط به افت فشار در سامانه ساخته شده که به صورت تجربی اندازه گرفته شد، استفاده گردید. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مقادیر افت فشار عددی از تطابق خوبی با نتایج تجربی برخوردار بودند. همانطور که در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید نتایج برای دبی‌های ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۰۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۴ لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی شد. برای نمونه نتایج به صورت کانتور



شکل ۷- کانتور فشار برای الف) دبی ۰/۰۶ لیتر بر ثانیه، ب) دبی ۰/۱ لیتر بر ثانیه، ج) برای دبی ۰/۱۴ لیتر بر ثانیه

مقدار ثابتی به خود می‌گیرد که بیشینه مقدار فشار در داخل هندسه سایه‌انداز است. علاوه بر این بخش عمده‌ای از سامانه که با رنگ قرمز نشان داده شده است، ناحیه راکد^۱ را نشان می‌دهد که در آن با توجه به هندسه سری سامانه، در آن آب جریان نداشته و در نتیجه مشکلات رسوب تدریجی را باعث خواهد شد.

کانتور فشار

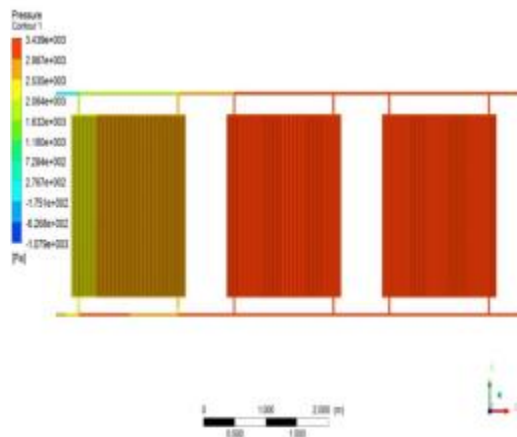
نواحی خروجی سامانه برای حالت دبی آب ورودی ۰/۱ لیتر بر ثانیه در شکل ۸- ب نشان داده شده است. با توجه به نزدیک شدن به بخش خروجی و همچنین نزدیک شدن

بررسی فشار

برای بررسی دقیق‌تر کانتور فشار با دبی ۰/۱ لیتر بر ثانیه، در نواحی ورودی و خروجی سامانه به صورت سری، کانتور مربوطه بزرگنمایی شده که در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طوری که قابل مشاهده است، روند تدریجی افزایش فشار از مجرای ورودی آغاز شده است و سپس در نزدیکی محل انشعاب به سمت مجاری، با توجه به شرایط هندسی، مقدار آن تا حدودی کاهش یافته و سپس بعد از گذر از این ناحیه روند افزایشی به خود می‌گیرد. در مجاری ابتدایی با توجه به روند ورود آب و هندسه سایه‌انداز (حالت سری) فشار کمتری مشاهده می‌گردد. با گذشت زمان و افزایش طول مسیر جهت انتقال به بخش خروجی مقدار فشار افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به حالت پایا

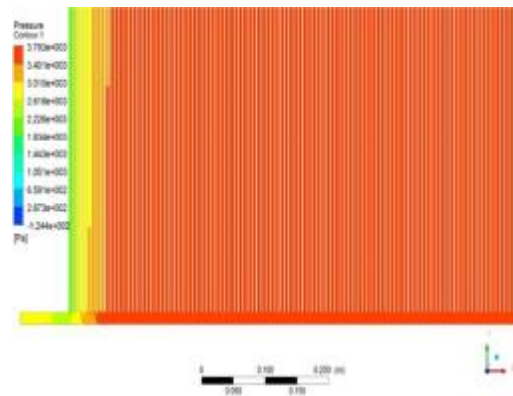
1- Stagnant

داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این پیکربندی سیال (آب) با عبور از قسمت اول با بیشترین مقدار افت فشار در ورودی و خروجی خود بخش عمده‌ای از جریان ورودی به کل سامانه را به خود اختصاص داده و در نتیجه عمده جریان آب در این ناحیه خواهد بود. همچنین به‌خوبی می‌توان مشاهده نمود که در نواحی و یا قطعات بعدی افت فشار در ورودی و خروجی هر ناحیه کمتر و کمتر می‌شود، به‌طوری که در قطعات و یا نواحی انتهایی رکود جریان در آن‌ها مشهودتر می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که اگرچه از نقطه نظر یکنواختی جریان در سایه‌انداز با پیکربندی موازی نسبت به حالت سری وضعیت عبور جریان آب در مجاری نواحی مختلف بهبود یافته است ولی هنوز تفاوت فاحشی بین مقدار عبور جریان آب در نواحی مختلف وجود دارد. به طوری که با فاصله گرفتن از مجرای ورودی سامانه شدت رکود در نواحی و یا بخش‌های آن افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که برای ایجاد جریان مساوی در بخش‌های مختلف سامانه باید اندازه مجاری عبوری را تغییر داد، به طوری که مجاری ورودی در ابتدا کم‌ترین و با حرکت به انتهای سامانه اندازه مجاری افزایش یابد. از آنجایی که از دیدگاه اجرایی چنین امکانی وجود ندارد می‌توان با استفاده و نصب شیرهای کنترل جریان در ابتدای ورود هر بخش به این هدف نائل آمد. نکته دیگری که می‌توان اضافه نمود این است که برای کاهش نواحی راكد در هر قسمت پیشنهاد می‌گردد تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های هر بخش افزایش یابد و یا به عبارتی از مقسم‌های ثانویه با انشعابات متعدد برای هر بخش استفاده شود.

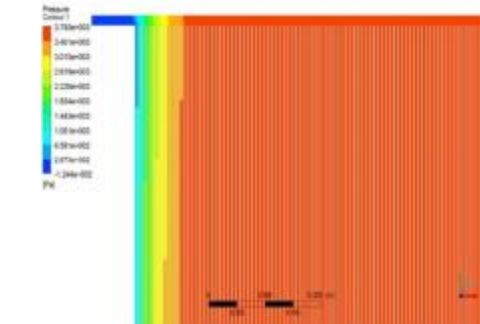


شکل ۹- کانتور فشار در بخش‌های مختلف سامانه با پیکربندی موازی

به فشار نسبی صفر (فشار اتمسفر)، مقدار عددی فشار کاهش پیدا کرده است. همچنین این شکل نیز نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از سطح سامانه فاقد جریان آب بوده و آب در آن‌ها به‌صورت راكد و از ایرادات عمده این نوع هندسه سامانه است.



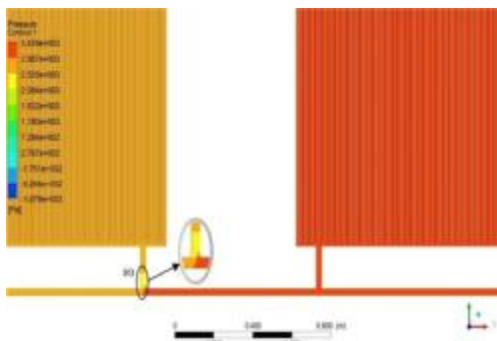
شکل ۸ الف - کانتور فشار در نواحی مختلف سامانه با هندسه سری (ورودی و خروجی منفرد)



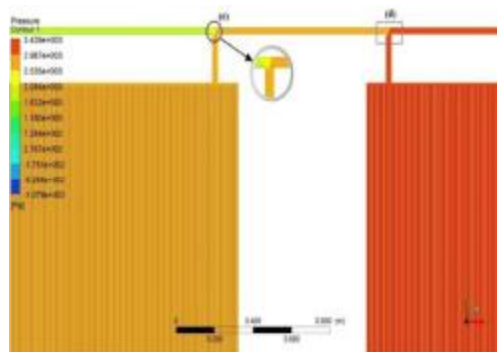
شکل ۸ ب - کانتور فشار در نواحی خروجی سامانه سایه‌انداز

بررسی تغییرات فشار

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد که با پیکربندی سری و وجود تنها یک مجرای ورودی و خروجی، نواحی عمده‌ای از سامانه فاقد جریان بوده و آب در این نواحی به‌صورت راكد است. عدم وجود جریان آب در این نواحی می‌تواند به تدریج باعث ایجاد رسوب و کدر شدن صفحات پلی کربنات گردیده و در نتیجه خواص نوری پوشش گلخانه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین در این مطالعه پیکربندی موازی با چند ورودی و خروجی پیشنهاد گردید و مورد مطالعه قرار گرفت. در این حالت کل سامانه به نواحی یکسان و هم‌اندازه تقسیم شده و هر ناحیه و یا قسمت به‌صورت مجزا (موازی) به مجاری ورودی و خروجی سامانه متصل شدند که در شکل ۹ نشان

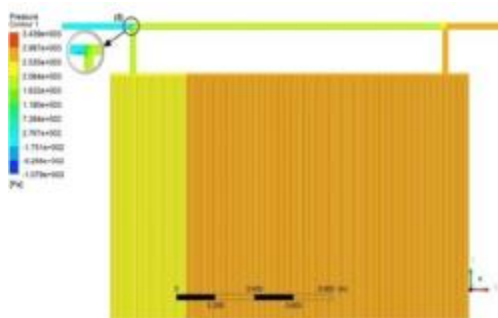


شکل ۱۱- کانتور فشار بزرگنمایی شده در پیکربندی موازی در مجرای ورودی بین دو بخش از سامانه



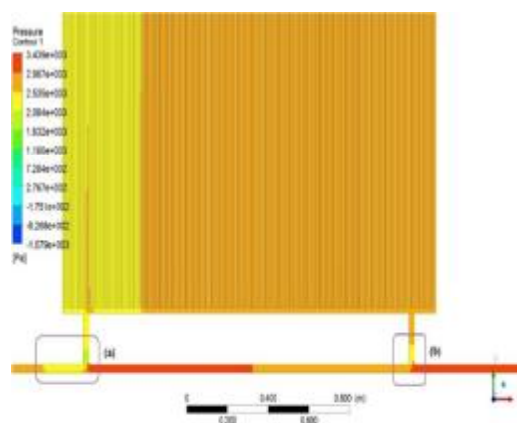
شکل ۱۲- کانتور فشار بزرگنمایی شده در مسیر برگشت پیکربندی موازی

با نزدیک شدن به خروجی سایه‌انداز، در بخش خروجی سیال از انتهای مجراها نیز دوباره کاهش فشار سیال مشاهده می‌شود که دلیل این مورد هندسه سایه‌انداز و تقسیمات ایجادشده بر روی مسیر است. همان‌طوری که در شکل ۱۳ و در ناحیه مشخص‌شده با (f) نشان داده شده است، این کاهش متأثر از کاهش مقطع و تجمع حاصل شده از دو سیال در نقطه ذکر شده است.



شکل ۱۳- کانتور فشار بزرگنمایی شده مسیر برگشت و اتصالات سایه‌انداز اول

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است، در محل انشعاب (مثلاً نقاط a، b و c) به علت رسیدن به دو راهی قبل مجراها یک کاهش مقطعی فشار مشاهده می‌گردد. با بررسی دقیق شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که در قسمت مربوط به ورودی سیال به سایه‌انداز یک افزایش جزئی مشاهده می‌شود که ناشی از ادامه خط جریان ورودی به مجراها است. سپس با حرکت به سمت راست بر مقدار فشار به‌صورت یکنواخت افزوده می‌شود. دلیل این امر تغییرات هندسی و انشعاب ایجاد شده بر مسیر جریان است که با توجه به امکانات و مزیت‌های موجود در شبیه‌سازی می‌توان متناسب با مقدار و هدف مطلوب این تغییرات را مدیریت نمود.



شکل ۱۰- کانتور فشار مسیر ورودی سایه‌انداز و در اتصالات بخش‌های مختلف سامانه

در ادامه حرکت سیال و ورود به قطعات بعدی سامانه فشار به تدریج افزایش پیدا می‌کند. نکته حائز اهمیت کاهش لحظه‌ای مقدار فشار در نقطه (c) بر روی شکل است که به سبب تغییر جهت جریان و دو بخشی شدن آن حادث شده است (شکل ۱۱). البته این تغییر (کاهش) دائمی نبوده و در فاصله نزدیک از محل انشعاب، مقدار آن دوباره افزایش می‌یابد.

در قسمت‌های خروجی سامانه و در مسیر بازگشت سیال، تغییرات فشار مشاهده می‌گردد؛ منتهی این بار تغییرات به صورت کاهشی است و یک بار کاهش فشار بعد از ناحیه (d) و سپس در ناحیه (f) اتفاق می‌افتد (شکل ۱۲). این کاهش فشار در نهایت، در انتهای خروجی سامانه به فشار اتمسفر می‌رسد.

فصل، مطالعات مرتبط با بالا بردن بهره‌وری استفاده از ساختارهای گلخانه حائز اهمیت بسیاری است. لذا با در نظر گرفتن این مورد، مطالعه یک سایه‌انداز نوین مشتمل بر عبور جریان سیال (آب) از داخل مجاری آن که همان مجاری بین صفحات پلی‌کربنات سقف است، انجام شد. هدف از این مطالعه ارائه یک مدل عددی به‌منظور مطالعه و تجزیه و تحلیل بیشتر برای توسعه و گسترش این سامانه سایه‌انداز در مقیاس تجاری و در قالب یک پروژه جامع در دست اقدام است. نتایج کلی این مطالعه به شرح زیر است:

(۱): با توجه به اینکه این مطالعه در دو بخش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای یک گلخانه تحقیقاتی موردنظر صورت گرفته است، با تطابق داده‌های تجربی و عددی در مورد افت فشار نتیجه شد که نرم‌افزار ANSYS Fluent توانایی شبیه‌سازی رفتار این قبیل سامانه را دارد. زیرا اختلاف مشاهده شده در افت فشار ایجاد شده در سامانه در حالت تجربی و مدل عددی کمتر از یک درصد بود.

(۲): با توجه به وجود مدل‌های آشفتگی مختلف در نرم‌افزار، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، توانست توزیع آشفتگی در جریان در نقاط مختلف مجاری سایه‌انداز را شبیه‌سازی نماید.

(۳): به‌منظور تحلیل افت فشار، برای پیکربندی‌های مختلف سری و موازی، کانتورهای فشار در هر مورد استخراج گردید و با توجه به آن رفتار سامانه مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت.

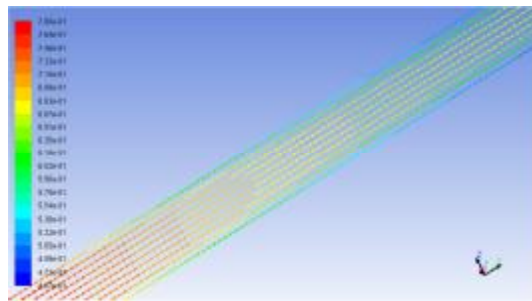
(۴): در مقایسه افت فشار برای حالت‌های سری و موازی، مقدار افت فشار برای حالت سری و دبی $0/1$ لیتر بر ثانیه 3793 پاسکال و برای حالت موازی و دبی $0/1$ لیتر بر ثانیه 3439 پاسکال به دست آمد که نشان‌دهنده کاهش افت فشار با طرح نوآورانه و پیشنهادی است.

(۵): با عنایت به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی ارائه شده می‌تواند به‌خوبی رفتار سامانه سایه‌انداز دینامیکی ارائه شده را شبیه‌سازی نماید. بنابراین می‌توان از این مدل برای مطالعات توسعه‌ای این سامانه در مقیاس‌های کاربردی و تجاری گلخانه بهره گرفت. با عنایت به تجزیه و تحلیل به دست آمده از شبیه‌سازی عددی می‌توان نتیجه گرفت که از نقطه‌نظر افت فشار و یکنواختی جریان در مجاری، پیکربندی موازی ارجح است که در توسعه این سامانه در مقیاس‌های تجاری باید مدنظر قرار گیرد.

همچنین با دقت در ناحیه موردنظر می‌توان دریافت که یک ناحیه فشار منفی دقیقاً بعد از بخش اختلاط دو جریان حادث شده که از نظر محدوده بسیار کوچک و آشفتگی اندکی را در این نقطه ایجاد نموده است.

سرعت عبور سیال از میان مجاری

علاوه بر فشار، سرعت عبور سیال عامل مهم دیگری است که در مطالعه رفتار سامانه سایه‌انداز مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور مشاهده سرعت و نحوه توزیع بردارهای سرعت در سطح مقطع عبور سیال در داخل مجرا، یک صفحه به موازات صفحه xy و به فاصله $z/6$ میلی‌متر از محور z ها (وسط مجرا) ایجاد گردید. پس از ایجاد صفحه، به خاطر اینکه سرعت یک پارامتر، بُرداری است، از بردارهای سرعت برای مشاهده مقدار و جهت سرعت در داخل سامانه بهره گرفته شد. از شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد که با فاصله گرفتن از دیواره مجرا (سرعت صفر) رفته رفته سرعت افزایش می‌یابد (بردارهای زرد رنگ)، به طوری که همانطور که انتظار می‌رود در مرکز مجرا بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است (بردارهای قرمز رنگ). بیشترین مقدار سرعت در داخل مجرای سایه‌انداز تکی و برای دبی $0/1$ لیتر بر ثانیه، مربوط به وسط مجرا و با مقدار $0/96$ متر بر ثانیه و کمترین مقدار آن برای جریان‌های بسیار نزدیک به دیواره با سرعت نزدیک به صفر است. علاوه بر این مشخص است که هیچ گونه جریان چرخشی و یا تلاطمی در داخل مجرا ایجاد نشده است.



شکل ۱۴- بردار سرعت برای یکی از مجراهای سایه‌انداز در حالت بزرگنمایی شده

نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش روزافزون استفاده از گلخانه‌ها و تبدیل آن به یک صنعت برای تولید محصول خاص در خارج از

- and greenhouse interior conditions. *Energy for Sustainable Development*, 52: 26-32
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource technology*, 98: 2386-2414.
- Piscia, D., Montero, J. I., Bailey, B., Muñoz, P., & Oliva, A. (2013). A new optimisation methodology used to study the effect of cover properties on night-time greenhouse climate. *Biosystems Engineering*, 116(2): 130-143.
- Rezvanivandefanayi, A. and Nikbakht, A. M. (2015). A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. *International Journal of Food Engineering*, 11: 71-77.
- Rezvanivandefanayi, A., Hasanpour, A. & Nikbakht, A. M. (2019). Study of the vapor thermos-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Agricultural Machinery*, 10 (2).
- Sung, H., Ahn, N., Jang, M. S., Lee, J. K., Yoon, H., Park, N. G., & Choi, M. (2016). Transparent conductive oxide-free graphene-based perovskite solar cells with over 17% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 6(3): 1501873.

سیاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۴۷۳۹۱ است که در دانشگاه فردوسی مشهد و با حمایت‌های مالی و فنی معاونت محترم پژوهشی این دانشگاه انجام شده است که بدینوسیله قدردانی می‌شود.

منابع

- Abdel-Ghany, A. M., Al-Helal, I. M., Shady, M. R., & Ibrahim, A. A. (2015). Convective heat transfer coefficients between horizontal plastic shading nets and air. *Energy and Buildings*, 93: 119-125.
- Ahemd, H. A., Al-Faraj, A. A., & Abdel-Ghany, A. M. (2016). Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review. *Scientia Horticulturae*, 201: 36-45.
- Chen, C., Shen, T., & Weng, Y. (2011). Simple model to study the effect of temperature on the greenhouse with shading nets. *African Journal of Biotechnology*, 10(25): 5001-5014.
- Fabrizio, E. (2012). Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection. *Energy and Buildings*, 53: 57-63.
- Fadakar-Deyloghmani, A. & Ebrahimpour, A. (2017). Comparison of greenhouse vegetation cover in terms of energy consumption in Tabriz city. *3rd international conference on knowledge-based engineering and innovation, Payam Noor University, Tehran, Iran*.
- Fluent, I. A. (2013). ANSYS FLUENT theory guide: Cannonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc.
- Ghorai, S., & Nigam, K. D. P. (2006). CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes. *Chemical Engineering and Processing*, 45: 55-65.
- Lee, I.-B., Bitog, J. P. P., Hong, S.-W., Seo, I.-H., Kwon, K.-S., Bartzanas, T., & Kacira, M. (2013). The past, present and future of CFD for agro-environmental applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93: 168-183.
- López-Marín, J., González, A., & Gálvez, A. (2009). Effect of shade on quality of greenhouse peppers. In *International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys*, 893 p. (pp. 895-900).
- Mohammadi-Mogharreb, M., & Abbaspour-Fard, M. H. (2019). Experimental study on the effect of a novel water injected polycarbonate shading on light transmittance