

مدل سازی مسیریابی بهینه ی میکرو/نانو ذرات در فاز دوم منیپولیشن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی

زهره مرادی
کارشناسی ارشد

خسرو خاندانی
استادیار

معین طاهری*
دانشیار، گروه مهندسی ساخت و
تولید، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

مهدی مدبری فر
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه
اراک، اراک

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

چکیده: میکروسکوپ نیروی اتمی یکی از ابزارهای جدید کاربردی در حوزه ی نانو تکنولوژی است که در نانومنیپولیشن مورد استفاده قرار می گیرد. هدف اصلی از این پژوهش مدل سازی مسیریابی بهینه ی میکرو/نانو ذرات در فاز دوم منیپولیشن و حرکت ذرات با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی می باشد. بدین منظور در این پژوهش، ابتدا به انجام کار تجربی و تصویربرداری از بافت سلولی سرطانی سر و گردن، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است. پس از آن، این تصاویر مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سپس با استفاده از الگوریتم های مختلف مسیریابی، شامل الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده، مسیر بهینه جهت انجام فاز دوم نانومنیپولیشن، استخراج شده است. نتایج به دست آمده حاکی از بهینه شدن مسیر در فاز دوم نانومنیپولیشن جهت کاربرد در جابه جایی ذرات است.

واژه های راهنما: نانومنیپولیشن، مسیریابی بهینه، بافت سلولی سر و گردن، الگوریتم های مختلف مسیریابی، میکروسکوپ نیروی اتمی

Modeling of optimal path planning of micro-nano/particles in second phase of manipulation using image of atomic force microscopy

Zohre Moradi
M.Sc.

Khosro Khandani
Assistant Professor

Moein Taheri*
Associate Professor,
Manufacturing
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Mehdi
Modabberifar
Associate Professor,
Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Abstract: Atomic force microscope is one of the new practical tools in the field of nanotechnology, which is used in nanomanipulation. The main goal of this research is to model the optimal routing of micro/nanoparticles in the second phase of manipulation and movement of particles using atomic force microscope images. For this purpose, in this research, firstly, experimental work and imaging of head and neck cancerous cell tissue has been done using an atomic force microscope. After that, these images are examined and analyzed and then using different routing algorithms, including particle swarm optimization algorithm, genetic algorithm and simulated refrigeration algorithm, the optimal path to perform the second phase of nanomanipulation is extracted. The obtained results indicate the optimization of the path in the second phase of nanomanipulation for the use of in-situ replacement of particles.

Keywords: Nanomanipulation, Optimal routing, Head and neck cell tissue, Different routing algorithms

۱- مقدمه

تیرک به منظور بررسی ظرفیت حمل بار در فرآیند منیپولیشن برای نانوربات میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند.

کورایم و همکارانش [۷] به تحلیل حساسیت و بررسی اثر پارامترهای مختلف ابعادی تیرک از جمله طول، عرض و ضخامت تیرک و ارتفاع سوزن بر روی ظرفیت حمل بار، به منظور طراحی و انتخاب تیرک مناسب برای اهداف جابه‌جایی نانوذرات و مونتاژ دقیق و صحیح در فرآیند منیپولیشن برای نانوربات میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که پارامتر ارتفاع سوزن حساس‌ترین پارامتر است، در حالی که ضخامت تیرک دارای حساسیت کمی در منیپولیشن است. ژائو و همکارانش [۸] یک روش خودکار برای پیاده‌سازی الگو در میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند. این روش فشار را در یک جهت مستقیم حفظ می‌کند و آن قدر آن را تکرار می‌کند تا ذره در خط مستقیم به نقطه‌ی هدف برسد. کورایم و همکارانش [۹] به مقایسه‌ی روش‌های کنترلی PID و کنترل مود لغزشی روی سیستم غیرخطی تیرک و نمونه میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که هر دو این روش‌ها خطای موقعیتیابی را نسبت به روش کنترلی تطبیقی ۱۰ درصد کاهش داده‌اند.

لی و چانگ [۱۰] به حل تقریبی یک معادله بر اساس تئوری تعمیم‌یافته‌ی تنش کوپل با استفاده از روش ریلی-ریتلز برای بررسی حساسیت خمشی تیرک V-شکل میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که برای سختی تماس پایین، حساسیت تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از تئوری تعمیم‌یافته تنش کوپل کمتر از تیرک مدل شده با تئوری کلاسیک تیر است. کورایم و همکارانش [۱۱] به تجزیه و تحلیل دینامیکی میکروسکوپ نیروی اتمی در حالت ضربه زدن با در نظر گرفتن فعل و انفعالات نیروی مویرگی پرداخته‌اند. کورایم و همکارانش [۱۲] به بررسی حساسیت پارامترهای منیپولیشن نانوذرات با روش آنالیز حساسیت سوبل پرداخته‌اند. آن‌ها پارامترها را در دو گروه ابعادی و محیطی مورد بررسی قرار داده‌اند و مدل اصطکاکی لاگره را برای این تحلیل استفاده کرده‌اند. در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که ضخامت تیرک مهم‌ترین پارامتر ابعادی مؤثر در نیروی بحرانی منیپولیشن است و طول و عرض تیرک اهمیت کمتری نسبت به ضخامت تیرک دارند.

لی و همکارانش [۱۳] به تحلیل حساسیت ارتعاشات خمشی با استفاده از رابطه‌ی بین فرکانس رزونانس و سختی تیرک و نمونه، برای تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی ترک‌دار پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی سختی

منیپولیشن و جابه‌جایی میکرو/نانوذرات، امروزه جهت ساخت تجهیزات ریزمقیاس، بررسی خواص بافت‌های سلولی، تصویربرداری و شناسایی سطوح و غیره، کاربردهای فراوانی یافته است. یکی از تجهیزاتی که جهت انجام نانومنیپولیشن توسعه یافته است، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) است. استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در دو فاز بررسی می‌گردد. فاز نخست قبل از زمان شروع به حرکت میکرو/نانوذرات و به منظور استخراج نیرو و زمان بحرانی حرکت، جهت جلوگیری از آسیب به بافت‌های زیستی می‌باشد. فاز دوم نیز در حین حرکت و رسیدن میکرو/نانوذره به نقطه‌ی هدف و در راستای کنترل دقیق ذرات هدف است.

تز و یورکوویچ [۱] به بررسی یک روش تحلیل حساسیت جهت کنترل منیپولاتورها پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از استراتژی کنترلر مود لغزشی این نتیجه رسیده‌اند که یک کنترلر تطبیقی، زمانی مقاوم خواهد بود که پارامترهای آن به صورت آنی تعیین شوند، که در این صورت توانایی مقاومت در برابر همه متغیرهای مشخص تا بار ماکزیمم را دارا خواهند بود. سیتی [۲] با بررسی سیستم‌های نانومنیپولیشن به این نتیجه رسیده است که ساختارهای نانومنیپولیشن برای کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. وی بیان نموده است که جهت افزایش سرعت منیپولیشن، می‌توان از ساختارهای سه‌بعدی استفاده نمود، اما تحلیل و بررسی سیستم سه‌بعدی پیچیده‌تر خواهد شد. چانگ و همکارانش [۳] با بررسی تأثیر دمپینگ داخلی بین نوک سوزن و نمونه در حساسیت موده‌های ارتعاشی، خمشی و پیچشی برای تیرک مستطیلی میکروسکوپ نیروی اتمی به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی سختی عمودی تیرک پایین باشد، حساسیت دو مد ارتعاشی خمشی و پیچشی با احتساب تأثیر دمپینگ تقریباً از بین خواهد رفت.

وو و همکارانش [۴] به بررسی فرکانس رزونانس و حساسیت ارتعاش خمشی یک تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند و یک رابطه‌ی حلقه بسته برای حساسیت موده‌های ارتعاشی با استفاده از رابطه‌ی بین فرکانس رزونانس و سختی جانبی تیرک ارائه نموده‌اند. کورایم و ذاکری [۵] با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی فرآیند نانومنیپولیشن، تأثیر فاصله‌ی نوک سوزن روی سختی تیرک مستطیلی و تیرک V-شکل را بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین مطالعه‌ی بیشتری روی تغییرات سختی پیچشی تیرک V-شکل بر پایه‌ی معادله‌ی ND انجام داده‌اند. کورایم و امانتی [۶] نیز به تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف

آئروس را انتخاب کرده‌اند. کورایم و همکارانش [۲۳] با بررسی دو نوع متداول تیرک‌ها و محاسبه‌ی نیروی بحرانی منیپولیشن به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به کمتر بودن نیروی بحرانی لازم در تیرک خنجری، این تیرک برای جابجایی ذرات حساس زیستی مناسب‌تر است.

کورایم و همکارانش [۲۴] یک کنترل‌کننده برای کنترل میزان انحراف سوزن از موقعیت عمودی آن، معرفی کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که تغییرات در زمان لازم برای جابه‌جایی نانوذرات طلا در محیط‌های متفاوت نه تنها بر منیپولیشن نانوذرات تأثیر می‌گذارد، بلکه بر روند کنترل نیز به همان اندازه تأثیر می‌گذارد.

لی و همکارانش [۲۵] یک استراتژی جدید مبتنی بر سنجش فشار برای مسیریابی سریع نانومنیپولیشن و یک مدل جدید سینماتیک برای یافتن موقعیت نوک سوزن با ذره‌ی هدف در فرآیند نانومنیپولیشن ارائه کرده‌اند. هوشیار و همکارانش [۲۶] یک الگوریتم ژنتیک جدید برای مسیریابی نانوذرات ارائه کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از یک تابع هزینه که شامل پارامترهای نیرو و زمان بحرانی، زبری سطح و صافی مسیر است به تعیین مسیری که به کمترین تغییر موقعیت سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی برای حرکت ذره نیاز باشد، پرداخته‌اند. طاهری و میرزالی [۲۷] استخراج تجربی مدول یانگ بافت سلولی سرطانی سینه MCF-7 را با استفاده از مدل‌های تماسی کروی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار داده‌اند.

طاهری [۲۸] به بررسی کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در استخراج نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن دوبعدی برای بافت سرطانی معده با مدل‌های اصطکاکی مختلف پرداخته است. طاهری [۲۹] همچنین به بررسی تأثیر مدل‌های اصطکاکی مختلف بر استخراج تجربی نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن سه‌بعدی بافت سرطانی روده‌ی بزرگ پرداخته است. خلیلی و همکارانش [۳۰] به مطالعه‌ی منیپولیشن نانوذره DNA با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی برپایه‌ی روش المان محدود با استفاده از تئوری‌های مکانیک تماس پرداخته‌اند.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که آن‌چه که در فاز دوم فرآیند نانومنیپولیشن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مسیریابی بهینه‌ی میکرو/نانو ذرات در طول مسیر می‌باشد، لذا در این مقاله به عنوان مهم‌ترین نوآوری به مدل‌سازی/نانوذرات در فاز دوم منیپولیشن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است.

عمودی اتصال پایین باشد، حساسیت سه مد ارتعاشی از تیرک ترک‌دار بیشتر از مدل تیرک بدون ترک است و تأثیر ترک در مودهای بالاتر اهمیت بالایی دارد. کورایم و همکارانش [۱۴] به طراحی یک کنترل‌کننده مود لغزشی (SMC) به‌عنوان یک کنترل‌کننده قوی برای فشار دادن نانوذرات بر روی صفحه‌ی مبنا پرداخته‌اند. کورایم و امیدی [۱۵] یک مدل اصلاح شده برای جابه‌جایی نانو ذرات برای فرآیند نانومنیپولیشن میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند که برای محاسبه‌ی پارامترهای نانومنیپولیشن وقتی که صفحه‌ی مبنا در حال حرکت است، مناسب می‌باشد.

کورایم و قادری [۱۶] به بررسی رفتار ارتعاشی میکروتیرک‌های پیزوالکتریک در محیط مایع پرداخته‌اند. آن‌ها برای این بررسی از مدل تیر غیریکنواخت و از مدل جرم متمرکز استفاده کرده‌اند. دمیرچی و کورایم [۱۷] به مدل‌سازی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از تئوری تیر تیموشنکو و حساسیت فرکانس و دامنه چهار مود پیچشی اول برای تغییرات سختی صفحه پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که مود اول برای مواد نرم حساس‌ترین مود خواهد بود و با افزایش سختی نمونه‌ها مودهای بالاتر حساس خواهند بود. کورایم و همکارانش [۱۸] مدل دینامیکی جابه‌جایی نانوذرات را با استفاده از تیرک‌های مستطیلی و V-شکل روی صفحه‌ی مبنا بر پایه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی کرده‌اند.

کورایم و همکارانش [۱۹] الگوریتمی را که می‌تواند امکان انجام فرآیند نانومنیپولیشن با توجه به محدودیت‌های هندسی تیرک و مسیر مطرح‌شده بررسی کند، ارائه کرده‌اند. کورایم و همکارانش [۲۰] به شبیه‌سازی تأثیرپذیری ذرات نرم بر پایه‌ی تئوری الاستیک-پلاستیک پرداخته‌اند و برای دو مورد ضربه بین ذره DNA با سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی و ذره DNA با صفحه‌ی مبنا پرداخته‌اند. کورایم و همکارانش [۲۱] به مقایسه‌ی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط‌های گازی، آبی، الکلی و پلاسما پرداخته‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که با تغییر نانوذره در فرآیند نانومنیپولیشن، به دلیل این که میزان چسبندگی نانوذرات مورد بررسی با صفحه‌ی مبنا و سوزن باهم متفاوت هستند، زمان شروع به حرکتشان متفاوت خواهد بود.

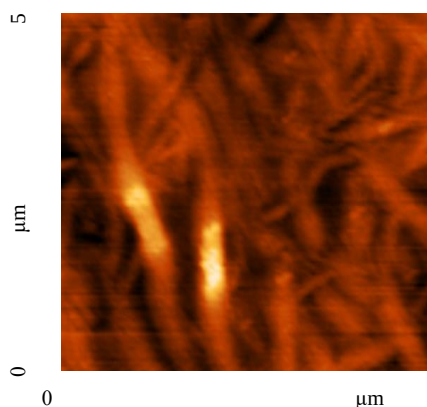
کورایم و همکارانش [۲۲] تئوری تماسی الاستیک-پلاستیک کامل چانگ را جهت شبیه‌سازی میکرو/نانو ذرات نرم توسعه و مورد استفاده قرار داده‌اند. آن‌ها پنج نوع باکتری مختلف از سه دسته گوناگون اپیدرمیس، سالی ویروس و

۳-۲- تصویربرداری از بافت سلولی

جهت تصویربرداری از بافت سلول، ارتفاع لام حاوی سلول با توجه به محدوده ارتفاع میکروسکوپ نیروی اتمی تنظیم می‌گردد. سپس تنظیمات نهایی بر روی لام و دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌شود. تصاویر ابتدایی با بزرگنمایی ۵ میکرومتر می‌گردد. با توجه به این‌که در این تصاویر محل دقیق سلول قابل مشاهده نمی‌باشد، نیاز به تصاویری با بزرگنمایی بیشتر می‌باشد. شکل (۱) نمایانگر تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی موجود در دانشگاه اراک می‌باشد. مدل میکروسکوپ نیروی اتمی مورد استفاده عبارت است از DME DualScope DS 95-50-E که دارای محدوده اسکن استاندارد ۵۰ میکرومتر در ۵۰ میکرومتر در ۵ میکرومتر است. شکل (۲-الف) تصاویر اولیه گرفته شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی از سلول به صورت دوبعدی و شکل (۲-ب) نمایانگر تصاویر اولیه گرفته شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی از سلول به صورت سه بعدی می‌باشند.



شکل ۱ میکروسکوپ نیروی اتمی



الف) تصاویر دوبعدی از بافت سلولی

برای این منظور، در این مقاله، ابتدا به انجام کار تجربی پرداخته شده و با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر یک بافت سلولی سرطانی سر و گردن استخراج شده است. سپس تصاویر بافت به دست آمده با استفاده از نرم افزار متلب، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در انتها با استفاده از الگوریتم‌های مختلف به مدل سازی/نانوذرات در فاز دوم منیپولیشن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است.

۲- شرح مسئله

در ابتدای مقاله به بررسی کارهای تجربی صورت گرفته در انجام این مقاله پرداخته شده است. سپس الگوریتم‌های مختلف شامل الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده، جهت مسیریابی بهینه، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- فرآیند تجربی

با شروع به رشد خارج از کنترل یک سلول در بدن، سلول دچار نقص شده و به آن سلول سرطانی گفته می‌شود. از عوامل ایجاد این بیماری می‌توان به عوامل وراثتی، شرایط زندگی، سن و سایر موارد اشاره نمود. رشد تومورها در ناحیه‌ی سرو گردن به معنای ابتلا به سرطان می‌باشد.

سرطان سرو گردن در محل‌هایی همچون سینوس‌ها، دهان، گلو، حنجره و غدد بزاقی رخ می‌دهد. از جمله علل بروز این بیماری مواردی همچون مصرف الکل و دخانیات، ویروس اچ‌آی‌وی، اشعه‌ی ماوراءبنفش و جنسیت می‌باشد. سلول موردتحقیق در این پژوهش سلول سرطانی سر و گردن HN می‌باشد.

۲-۲- آماده سازی بافت سلولی

به منظور مطالعه‌ی سلول موردنظر از سلول کشت شده در آزمایشگاه استفاده شده است. شستشوی این سلول‌ها پس از جداسازی انجام شده است. بعد از قرار گرفتن ماده‌ی تثبیت کننده به مدت یک دقیقه، سلول مورد نظر در طی سه مرحله با نمک شسته شده است. در نهایت سلول خشک شده و درون دستگاه قرار گرفته و جهت تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی آماده شده است.

این الگوریتم اولین بار توسط کندی و ابرهارت در سال ۱۹۹۵ ارائه شد. الگوریتم ازدحام ذرات از پرواز پرندگان الهام گرفته شده است و قصد اولیه آن شبیه سازی رفتار اجتماعی پرندگان، پرواز زیبا و غیرقابل پیش بینی دسته پرندگان بوده است. در PSO موجودات ذره نامیده می شوند؛ که در فضای چندبعدی جستجو حرکت می کنند. بهینه سازی ازدحام ذرات بیشتر برای مسائل بهینه سازی با پارامترهای پیوسته به کاررفته است.

۳-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم های ژنتیک، تکامل ژنی را مدل می کنند، به صورتی که در آن ها برای نشان دادن ویژگی های موجودات از ژنو تایپ ها استفاده می شود. عملگرهای اصلی در الگوریتم های ژنتیک عبارت اند از: انتخاب (برای مدل کردن قانون بقا اصلح) و تولیدمثل از طریق عملگرهای بازتربیک و جهش (برای مدل کردن تولیدمثل).

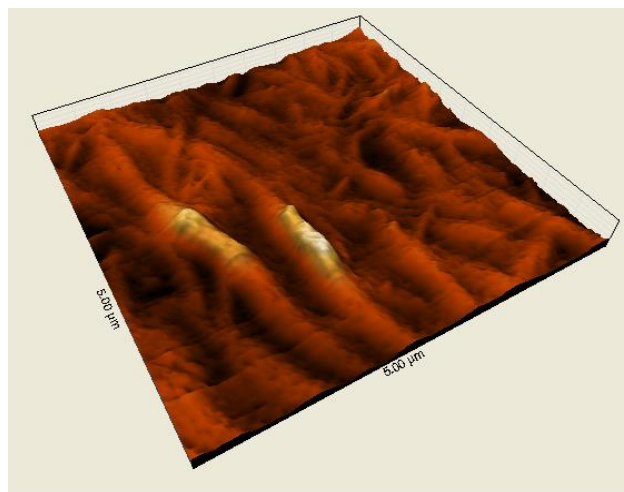
الگوریتم ژنتیک، برای حل گسترده وسیعی از مسائل دنیای واقعی به کاررفته است. مسائلی از قبیل جستجو، بهینه سازی پیوسته و ترکیباتی، یادگیری ماشین، مهندسی کنترل، طراحی، زمان بندی کارها، برنامه ریزی حرکت روبات، پردازش سیگنال و مسائل بازی های گوناگون در الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می گیرند.

۳-۳- الگوریتم تبرید شبیه سازی شده

الگوریتم تبرید شبیه سازی شده یک الگوریتم فرامکاشفه ای غیرزیستی است که مبنی بر روش تبرید تدریجی است که در آن به وسیله متالورژیست ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده جامد، به خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می شود. این روش شامل قرار دادن ماده در دمای بالا و سپس کم کردن تدریجی این دماست. هدف در این روش، انتقال سیستم از حالت اولیه دلخواه، به حالتی است که سیستم در آن کمترین انرژی را داشته باشد.

۴- فرآیند نانومنیپولیشن

در فاز نخست نانومنیپولیشن، ابتدا نوک سوزن با سطح بافت سلولی تماس پیدا کرده، هم زمان میزان جابه جایی تیرک از طریق تابش لیزر و بازتاب آن بر فتودیود اندازه گیری می شود.



(ب) تصاویر سه بعدی از بافت سلولی

شکل ۲ تصاویر اولیه از بافت سلول با بزرگنمایی ۵ میکرومتر

۲-۴- تفسیر تصاویر

برآیند نیروهای وارد بر بافت سلول و همچنین عمق نفوذ حاصل از نیروهای وارده در هر آن، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه گیری می گردد. نیرو و عمق نفوذ به دست آمده، در نقاط مختلف سلول با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی و ثبت می گردد. نمودارهای مورد نیاز هم بعد از استخراج و ثبت نمودارهای نیرو بر حسب عمق نفوذ در زمان های مختلف، در نرم افزار تحلیل عملیات میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار می گیرند. به منظور تحلیل دقیق نتایج به دست آمده، محدوده ای که سلول در آن می باشد، در نظر گرفته می شود. تعیین هندسه و ابعاد سلول جهت استفاده در مدل سازی و شبیه سازی و همچنین تعیین دقیق محل سلول، به منظور مسیریابی و انجام فاز دوم منیپولیشن نیز در این مرحله و با توجه به تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، صورت می پذیرد.

۳- الگوریتم های مورد استفاده

به منظور مدل سازی و شبیه سازی جهت مسیریابی بهینه، در این پژوهش از سه الگوریتم مختلف، شامل الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید، استفاده شده است، که در این بخش از پژوهش به بررسی این الگوریتم ها پرداخته شده است.

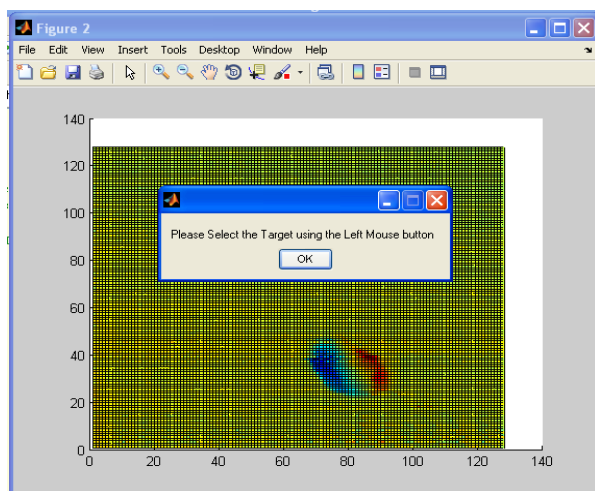
۳-۱- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

در این بخش به نتایج حاصل از روش‌های مختلف مسیریابی و مقایسه‌ی این نتایج پرداخته شده است.

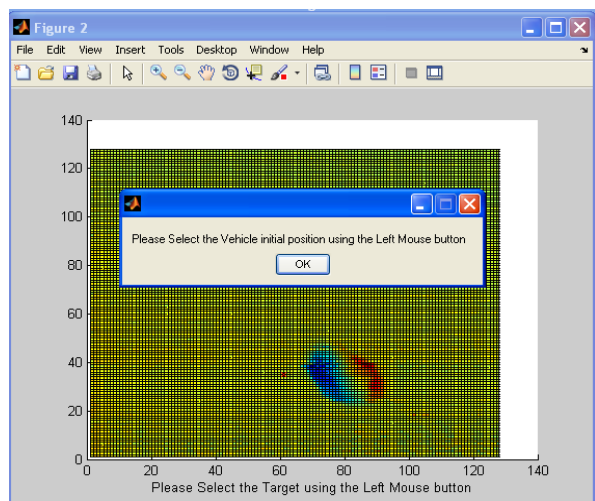
۵-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شکل (۳) اولین گام از نتایج اجرای برنامه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. در این گام کاربر بایستی نقطه‌ی مقصد نهایی را مشخص نماید.



شکل ۳ نتایج گام اول الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شکل (۴) گام بعدی از نتایج اجرای برنامه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. در این گام کاربر بایستی نقطه‌ی شروع به حرکت ذره‌ی هدف و مبدأ آن را مشخص نماید.



شکل ۴ نتایج گام دوم الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

نیروی اعمالی از طرف نوک سوزن بر بافت سلولی افزایش می‌یابد تا جایی که بر نیروهای چسبندگی و اصطکاکی غلبه یافته، که نیروی وارده را در این لحظه، نیروی بحرانی و زمان شروع حرکت را زمان بحرانی می‌نامند. آغاز حرکت ذره‌ی هدف، تا زمان رسیدن آن به نقطه‌ی موردنظر نهایی، فاز دوم منیپولیشن را دربر خواهد گرفت، که هدف اصلی این پروژه مسیریابی ذره‌ی هدف در این فاز از منیپولیشن است. در مدل‌سازی فاز دوم نانومنیپولیشن در معادلات (۱) و (۲) برآیندگیری در محورهای حرکت و گشتاور موردنظر انجام می‌شود.

$$\sum F_x = ma_x \rightarrow F \cos \theta - F^* = ma_x \quad (1)$$

$$\sum F_y = ma_y \rightarrow F \sin \theta + mg = N \quad (2)$$

$$\sum M_G = I\alpha \rightarrow F \cos \theta \times r + F^* \times r = I\alpha \quad (3)$$

با جایگذاری معادله‌ی (۱) در (۳) داریم:

$$\begin{aligned} F \cos \theta \times r - ma \times r + F \cos \theta \times r &= I\alpha \\ \rightarrow 2F \cos \theta \times r - ma \times r \\ &= I\alpha \xrightarrow{\alpha=r \times a} \alpha(I + m \times r^2) \quad (4) \\ &= 2F \cos \theta \times r \rightarrow \alpha \\ &= \frac{2F \cos \theta \times r}{I + m \times r^2} \end{aligned}$$

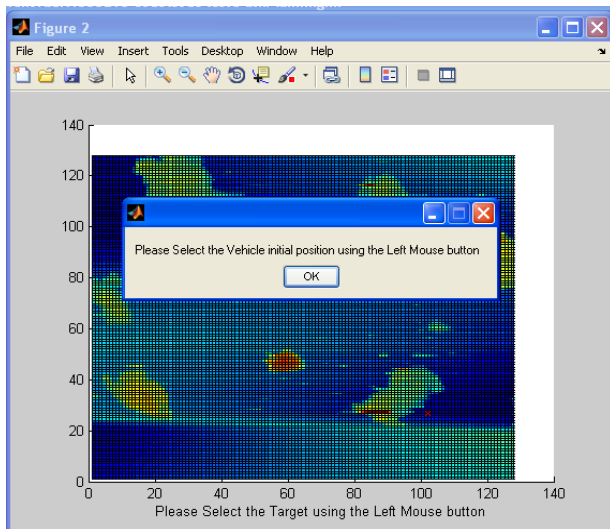
با توجه به فرض غلتش خالص داریم:

$$a = r \times \alpha \rightarrow a = \frac{2F \cos \theta \times r^2}{I + m \times r^2} \quad (5)$$

همچنین با فرض غلتش همراه با لغزش معادله‌ی شتاب در معادلات ذیل آورده شده است.

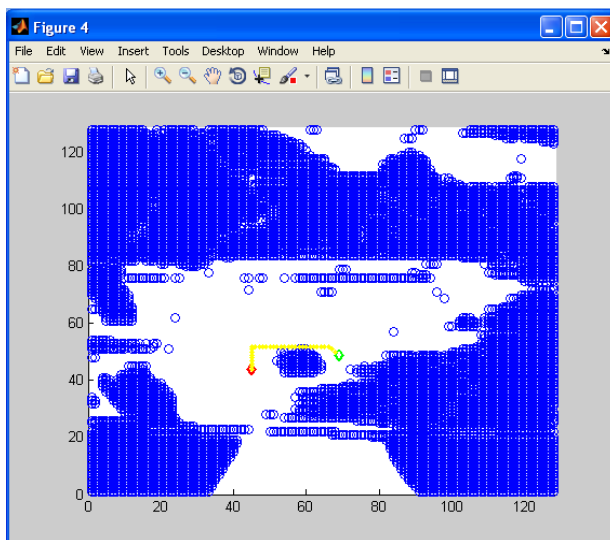
$$\begin{aligned} \sum F_x = ma_x &\rightarrow F \cos \theta - F^* \\ &= F \cos \theta - \mu_k \times N = ma_x \\ \rightarrow a &= \frac{F \cos \theta - \mu_k \times N}{m} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_G = I\alpha &\rightarrow F \cos \theta \times r + F^* \times r = I\alpha \\ \rightarrow \alpha &= \frac{r \times (F \cos \theta + F^*)}{I} \quad (7) \end{aligned}$$



شکل ۷ نتایج گام دوم الگوریتم ژنتیک

در شکل (۸) مسیر بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص شده و در شکل نشان داده شده است.



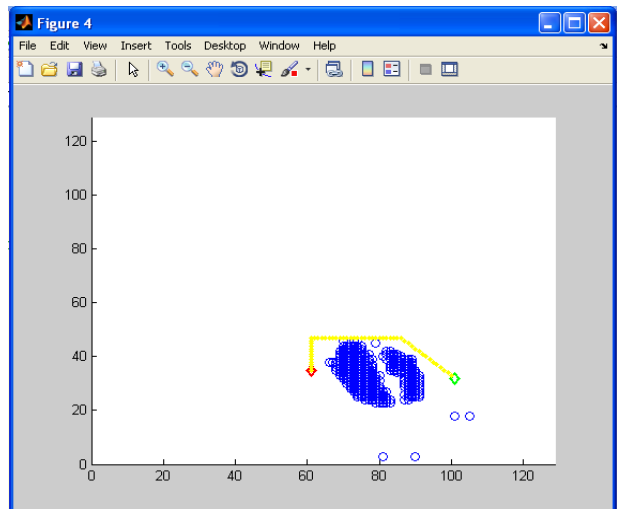
شکل ۸ نتایج نهایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۵-۳- الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نیز مانند دو الگوریتم قبل، در گام نخست کاربر بایستی ابتدا نقطه‌ی مقصد را جهت ذره‌ی هدف مشخص نماید، که این موضوع در شکل (۹) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱۰) پس از مشخص شدن مقصد، کاربر بایستی مبدأ و نقطه‌ی شروع به حرکت ذره‌ی هدف را نیز تعیین نماید؛ تا پس از آن با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، مسیر بهینه برای حرکت ذره مشخص گردد.

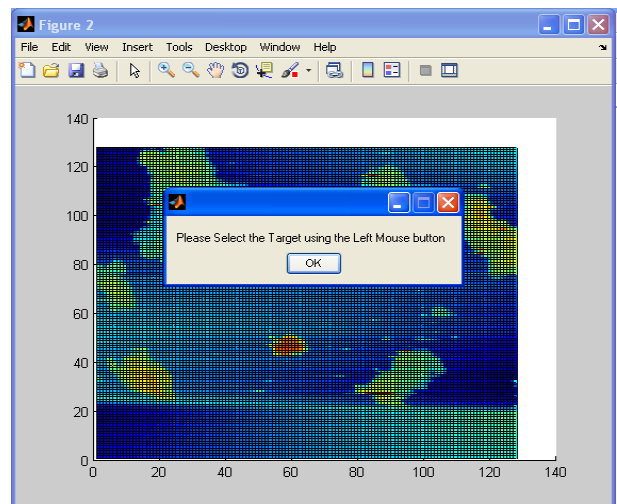
شکل (۵) نیز نتیجه‌ی نهایی و مسیر بهینه برای رسیدن ذره‌ی هدف از نقطه‌ی شروع به حرکت تا نقطه‌ی پایان حرکت را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نتایج نهایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۵-۲- الگوریتم ژنتیک

در شکل (۶) اولین گام از نتایج اجرای برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۶ نتایج گام اول الگوریتم ژنتیک

شکل (۷) گام دوم نتایج حاصل از اجرای برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در این گام کاربر بایستی نقطه‌ی شروع به حرکت ذره‌ی هدف و مبدأ آن را مشخص نماید؛ تا پس از آن با توجه به داشتن مختصات نقاط مبدأ و مقصد، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسیر بهینه جهت رسیدن از مبدأ به مقصد مشخص گردد.

۶- صحت‌سنجی نتایج

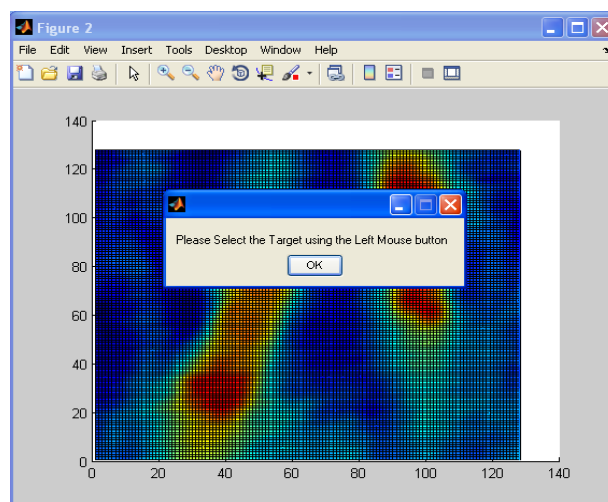
در این مقاله صحت سنجی در دو بخش کار با میکروسکوپ نیروی اتمی و همچنین تحلیل نتایج صورت پذیرفته است. در بخش کار با میکروسکوپ نیروی اتمی به منظور رسیدن به نتایج دقیق و صحیح، تصویربرداری چندین بار تکرار شده و آنچه که در مقاله قرار گرفته است، نتایج نهایی و بهینه بوده است. در بخش نتایج نیز جهت اعتبار سنجی کار از سه الگوریتم مختلف شامل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده استفاده شده و نتایج این سه الگوریتم در یافتن مسیر بهینه با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

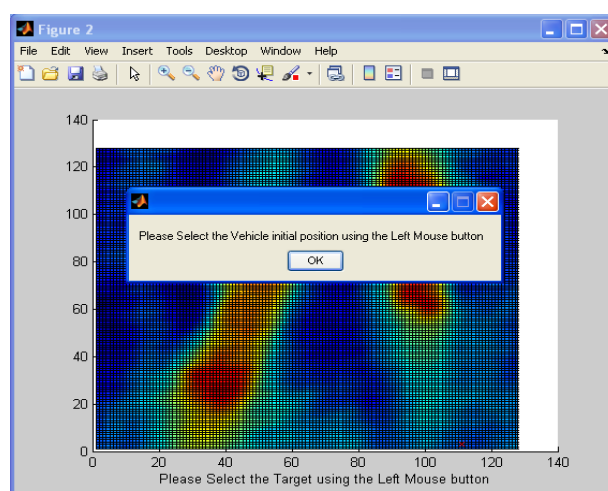
در این مقاله، به بررسی فاز دوم مینیپولیشن و مسیریابی بهینه‌ی ذرات هدف، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف پرداخته شده است. همچنین جهت استفاده کاربردی از این موضوع و به‌منظور کاربردهای آتی نتایج حاصل از این پژوهش، مسیریابی بهینه بر روی تصاویری که به‌صورت تجربی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به دست آمده است، صورت پذیرفته است. سلول موردتحقیق در این پژوهش سلول سرطانی سر و گردن HN می‌باشد. از نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان با توجه به داشتن مسیر بهینه، به‌منظور جابه‌جایی میکرو/نانو ذرات و یا انتقال ذرات هدف دارویی جهت رساندن به بافت‌های خاص ازجمله بافت‌های سرطانی به‌منظور درمان بیماری استفاده نمود. همچنین با توجه به تصاویر به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، می‌توان برای شناخت مکان دقیق بافت، هندسه، شکل و ابعاد بافت و یا سایر ذرات، جهت انجام فرآیند نانومینیپولیشن استفاده نمود.

در این مقاله، می‌توان پیشنهادهای زیر را به عنوان کارهای آتی مطرح نمود:

۱. استفاده از سایر الگوریتم‌های متداول جهت مسیریابی بهینه‌ی ذرات به‌منظور مینیپولیشن و جابه‌جایی آن‌ها از نقطه‌ی مبدأ به نقطه‌ی مقصد.
۲. بررسی پارامترهای ورودی اثرگذار بر مینیپولیشن و مسیریابی بهینه، به‌منظور شناخت پارامترهای مهم مؤثر.
۳. استفاده از تصاویر مختلف سایر بافت‌های سلولی به دست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی.
۴. استفاده از روش‌هایی همچون آنالیز حساسیت، جهت بررسی دقیق و کمی میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی بر خروجی.

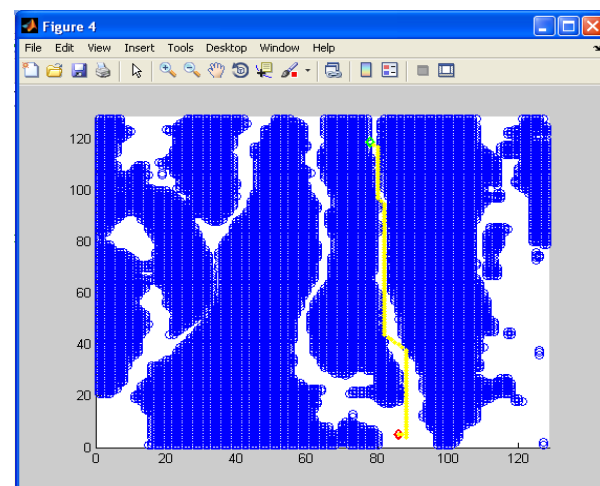


شکل ۹ نتایج گام اول الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده



شکل ۱۰ نتایج گام دوم الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

در انتها با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و مشخص نمودن مبدأ و مقصد ذره‌ی هدف، توسط کاربر، مطابق شکل (۱۱) مسیر بهینه مشخص می‌گردد.



شکل ۱۱ نتایج نهایی الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

۸- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اراک و در قالب طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۹۹/۸۳۱ مورخ ۱۳۹۹/۲/۳۰ صورت پذیرفته است.

۹- مراجع

- [9] Korayem, M. H., Zafari, S., Amanati, A., Damircheli, M., Ebrahimi, N., Analysis and control of micro-cantilever in dynamic mode AFM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 9, pp. 979-990, DOI: 10.1007/s00170-010-2588-4, (2010).
- [10] Lee, H. L., Chang, W. J., Sensitivity of V-shaped atomic force microscope cantilevers based on a modified couple stress theory, *Microelectronic Engineering*, Vol. 88, No. 11, pp. 3214-3218, DOI: 10.1007/s00170-010-2588-4, (2011).
- [11] Korayem, M. H., Kavousi, A., Ebrahimi, N., Dynamic analysis of tapping-mode AFM considering capillary force interactions, *Scientia Iranica*, Vol. 18, No. 1, pp. 121-129, DOI: 10.1016/j.scient.2011.03.014, (2011).
- [12] Korayem, M. H., Rastegar, Z., Taheri, M., Sensitivity analysis of nano-contact mechanics models in manipulation of biological cell, *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 2, No. 3, pp. 49-56, DOI: 10.5923/j.nn.20120203.02, (2012).
- [13] Lee, H. L., Chang, W. J., Sensitivity analysis of a cracked atomic force microscope cantilever, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 3, pp. 035202:1-4, DOI: 10.1143/JJAP.51.035202, (2012).
- [14] Korayem, M. H., Noroozi, M., Daeinabi, Kh., Control of an atomic force microscopy probe during nano-manipulation via the sliding mode method, *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 5, pp. 1346-1353, DOI: 10.1016/j.scient.2012.06.026, (2012).
- [15] Korayem, M. H., Omid, E., Robust controlled manipulation of nanoparticles using atomic force microscope, *Micro & Nano Letters*, Vol. 7, No. 9, pp. 927-931, DOI: 10.1049/mnl.2012.0293, (2012).
- [16] Korayem, M. H., Ghaderi, R., Vibration response of an atomic force microscopy piezoelectrically actuated microcantilever in liquid environment, *Micro & Nano Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 229-233, DOI: 10.1049/mnl.2012.0882, (2013).
- [17] Damircheli, M., Korayem, M. H., Sensitivity of higher mode of rectangular atomic force microscope to surface stiffness in air environment, *Micro & Nano Letters*, Vol. 8, No. 12, pp. 877-881, DOI: 10.1049/mnl.2012.0882, (2013).
- [18] Korayem, M. H., Taheri, M., Rastegar, Z., Sobol method application in sensitivity analysis of LuGre friction model during 2D manipulation, *Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 1461-1469, (2014).
- [19] Korayem, A. H., Hoshidar, A. K., Korayem, M. H. Algorithm for determining the cantilever load carrying capacity in the 3D manipulation of nanoparticles with
- [1] Tzes, A., Yurkovich, S., A sensitivity analysis approach to control of manipulators with unknown load, *In Proceedings, 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 496-502, DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1088054, (1987).
- [2] Sitti, M., Survey of nanomanipulation systems, *In Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on Nanotechnology, IEEE-NANO 2001 (Cat. No. 01EX516)*, pp. 75-80, DOI: 10.1109/NANO.2001.966397, (2001).
- [3] Chang, W. J., Te, H. F., Huann, M. Ch., Effect of interactive damping on sensitivity of vibration modes of rectangular AFM cantilevers, *Physics Letters A*, Vol. 312, No. 3-4, pp. 158-165, DOI: 10.1016/S0375-9601(03)00620-0, (2003).
- [4] Wu, T. S., Chang, W. J., Hsu, J. Ch., Effect of tip length and normal and lateral contact stiffness on the flexural vibration responses of atomic force microscope cantilevers, *Microelectronic Engineering*, Vol. 71, No. 1, pp. 15-20, DOI: 10.1016/j.mee.2003.08.009, (2004).
- [5] Korayem, M. H., Zakeri, M., The effect of off-end tip distance on the nanomanipulation based on rectangular and V-shape cantilevered AFMs, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 5, pp. 579-589, DOI: 10.1007/s00170-010-2539-0, (2010).
- [6] Korayem, M. H., Amanati, A., Sensitivity analysis of load carrying capacity in AFM-based manipulation, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 2, No. 6, pp. 7692-7693, DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.05.182, (2010).
- [7] Korayem, M. H., Taheri, M., Ghahnaviyeh, S. D., Sobol method application in dimensional sensitivity analyses of different AFM cantilevers for biological particles, *Modern Physics Letters B*, Vol. 29, No. 22, pp. 1550123:1-23, DOI: 10.1142/S0217984915501237, (2015).
- [8] Zhao, W., Xu, K., Qian, X., Wang, R., Tip based nanomanipulation through successive directional push, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 030909:1-9, DOI: 10.1115/1.4001676, (2010).

- [25] Li, G., Wang, W., Wang, Y., Yuan, Sh., Yang, W., Xi, N., Liu, L., Nano-manipulation based on real-time compressive tracking, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 14, No. 5, pp. 837-846, DOI: 10.1109/TNANO.2015.2449871, (2015).
- [26] Korayem, M. H., Taheri, M., Korayem, A. H., Rastegar, Z., Sensitivity analysis of coulomb and HK friction models in 2D AFM-Based Nano-Manipulation: Sobol method, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-31, (2015).
- [27] Taheri, M., Mirzalu, M., Experimental Extraction of Young's Modulus of MCF-7 Breast Cancer Cell Using Spherical Contact Models, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 12, pp. 5769-5784, DOI: 10.22060/mej.2021.19993.7149, (2022).
- [28] Taheri, M. Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models, *Nanoscale*, Vol. 9, No. 1, pp. 136-145, DOR: 20.1001.1.24235628.1401.9.1.14.0, (2022).
- [29] Taheri, M. Investigation of the effect of different friction models on experimental extraction of 3D nanomanipulation force and critical time of colon cancer tissue, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 4, pp. 791-804, DOI: 10.22060/mej.2021.20300.7210, (2022).
- [30] Khalili, M., Taheri, M., Bathaee, S. H., Shakeri, F. Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics, *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, Vol. 1, No. 2, pp. 155-174, DOI: 10.52547/masm.1.2.155, (2022).
- geometrical constraints based on FEM simulations, *Robotica*, Vol. 34, No. 9, pp. 2087-2104, DOI: 10.1017/S0263574714002756, (2016).
- [20] Korayem, M. H., Khaksar, H., Taheri, M., Simulating the impact between particles with applications in nanotechnology fields (identification of properties and manipulation), *International Nano Letters*, Vol. 4, No. 4, pp. 121-127, DOI: 10.1007/s40089-014-0127-2, (2014).
- [21] Korayem, A. H., Taheri, M., Korayem, M. H., Dynamic Modeling and simulation of nano particle motion in different environments using AFM nano-robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 294-300, DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.12.8, (2015).
- [22] Korayem, M. H., Khaksar, H., Hefzabad, R. N., Taheri, M., Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 227-234, DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.14.9, (2015).
- [23] Korayem, M. H., Ghahnaviye, S. D., Ghasemi, M., Taheri, M., Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation with applying EFAST sensitivity analyses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 310-316, DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.26.2, (2015).
- [24] Korayem, A. H., Korayem, M. H., Taheri, M., Robust controlled manipulation of nanoparticles using the AFM nanorobot probe, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 2685-2699, DOI: 10.1007/s13369-015-1730-x, (2015).

بررسی تجربی اثر زاویه برخورد طوفان فرو وزشی بر سازه مکعب شکل - قسمت دوم: مشاهدات طوفان فرو وزشی کوچک متحرک

چکیده: طوفان های فرو وزشی با ایجاد جریان های ناپایای ریزشی قوی، باعث تخریب های شدید می شوند. از طرفی با توجه به تفاوت ساختار آنها با طوفان های لایه مرزی اتمسفری، بررسی و شناخت این جریانات در شرایط مختلف اهمیت دارد. لذا در این تحقیق به بررسی تأثیرات برخورد طوفان فرو وزشی در زوایا و راستاهای متفاوت در حالت دینامیکی بر روی مدل مکعب شکل پرداخته شده است. این مدل، در چهار زاویه قرارگیری مختلف نسبت به راستای ریزش جریان (θ)، دو راستای برخورد جریان سطحی (α) و در محدوده شعاعی $X/D=\pm 1.5$ قرار گرفته است. همچنین نسبت سرعت انتقالی افقی این طوفان (V_R)، 0.06 و 0.12 در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش θ و V_R باعث شده تا ضریب فشار بیشینه، از نقطه مرکزی فرود جریان ($X/D=0$) به سمت پایین دست جریان متمایل شود. همچنین افزایش زاویه α باعث کاهش بازه تغییرات فشار و نیرو در حدود 25% بر مدل شده است. به علاوه مشخص شد که طوفان های فرو وزشی در حالت دینامیکی ضربات قوی تری بر سازه وارد نموده و عموماً قویترین ضربات، بلافاصله بعد از عبور طوفان از روی سازه رخ داده است.

واژه های راهنما: طوفان فرو وزشی، مدل مکعب شکل، ضرایب فشار و نیرو، زاویه برخورد، بررسی دینامیکی

محمد حججی

استادیار، دانشکده فنی مهندسی،
مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل
انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه
آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

امیر حسین رضوانی

دانشجوی کارشناسی ارشد

نیما عسگری

دانشجوی کارشناسی ارشد

امیر حسین صادقی

دانشجوی کارشناسی ارشد

سید جلیل حسینی*

استادیار، دانشکده عمران، واحد
نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی،
نجف آباد، ایران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

Mohammad Hojaji
Assistant Professor,
Department of Engineering,
Aerospace and Energy
Conversion Research
Center, Najafabad Branch,
Islamic Azad University,
Najafabad, Iran

Amir Hossein Rezvani
MSc. Student

Nima Asgari
MSc. Student

Amir Hossein Sadeghi
MSc. Student

Seyed Jalil Hosseini*
Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Najafabad
Branch, Islamic Azad
University, Najafabad, Iran

Experimental investigation of the downburst impact angle effect on a cubic structure Part B: Moving microburst observations

Abstract: Downburst storms cause severe destruction by creating intense and unstable downdrafts. On the other hand, due to the difference in their structure from atmospheric boundary layer storms, it is essential to study and understand these flows under different conditions. Therefore, this study the effects of the impact angle of the downburst and the structure installation angle relative to the surface flow on a cube-shaped model investigates dynamically. The model is placed in front of the downburst in four angles of the storm colliding with the surface(θ), in two directions of the surface flow relative to the structure(α), and in the radial range of $X/D=\pm 1.5$. Also, the ratio of horizontal displacement speed of this storm(V_R) is considered to be 0.06 and 0.12. The results show that the increase of θ and V_R caused the location of the maximum pressure coefficient to shift from the central point of the flow meeting the surface to the downstream. Also, increasing α has reduced the range of pressure and force changes by about 25% on the model. In addition, it was found that dynamic downburst caused stronger impacts on the structure and generally, these strong impacts occurred immediately after the downburst passed over the structure.

Keywords: Downburst Thunderstorm, Cube-shaped model, Pressure and Force coefficient, Impact angel, Dynamic investigation

۱- مقدمه

لایه مرزی متعارف، با افزایش ارتفاع، سرعت افزایش پیدا نمی‌کند چرا که با کاهش سرعت نسبت به ارتفاع، یک ناحیه با جریان شتاب گرفته در نزدیکی سطح به وجود خواهد آمد. ثانیاً، فرو وزش ها معمولاً مقدار بالایی از تکانه طوفان مادر خود را حفظ می‌کنند. همچنین سرعت طوفان مادر به یک سوم سرعت طوفان فرو وزشی نیز می‌رسد [۸]. ثالثاً، در داخل میدان جریان طوفان فرو وزشی تغییرات فشار قابل توجهی مشاهده می‌شود. این در حالی است که روش های کنونی ارزیابی بارگذار های باد بر روی سازه ها، فشار جوی را ثابت فرض می‌کنند.

سکون در ناحیه مرکزی زیر فرو وزش و با نزدیک شدن آن به سطح زمین رخ داده و اصطلاحاً یک گنبد فشار بالا را ایجاد می‌کند (شکل ۱). در اطراف این ناحیه، یک ناحیه حلقوی فشار پایین که ناشی از پخش شدن و شتاب گرفتن جریان فرو وزشی و رسیدن آن به سرعت افقی بیشینه است، شکل می‌گیرد که معمولاً بزرگی نسبی افت فشار این ناحیه، وابسته به سرعت انتقالی طوفان است [۹]. میدان فشار متغیر یک فرو وزش می‌تواند پیامدهای قابل توجهی را از نظر بارگذاری های طراحی بر روی سازه ها در پی داشته باشد. فوجیتا [۹] برآورد کرده است که این تغییرات سریع فشار می‌توانند به بزرگی ۲-۳ هکتوپاسکال باشند و در نتیجه منجر به افزایش قابل توجه در بار وارد شده به سازه های ایزوله شوند. در شکل (۲) نمای کلی مشخصات فیزیکی یک طوفان فرو وزشی کوچک قرار گرفته است و مقایسه آن با بادهای لایه مرزی، نشان داده شده است [۶].

فوجیتا [۹] نشان داد که اگر سطح تحت تاثیر طوفان فرو وزشی بیش از ۴ کیلومتر مربع باشد، به آن طوفان فرو وزشی بزرگ و در زمانی که این سطح تحت تاثیر کمتر از ۴ کیلومتر مربع باشد، به آن طوفان فرو وزشی کوچک گفته می‌شود. معمولاً سرعت نزول باد در آن ها بین ۶ تا ۲۲ متر بر ثانیه است [۱۰]. همچنین حداکثر سرعت در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد [۶]. این نوع طوفان به صورت ریزشی و عمودی به سمت زمین حرکت می‌کند و بعد از رسیدن به سطح با حرکتی موجی شکل و دوار و با سرعتی در حدود سرعت اولیه، گسترش یافته که می‌تواند باعث ایجاد نیروی بالابرنده و یا پسای شدید بر سازه ها شود [۱۱]. مشاهدات انجام شده در مقیاس کامل در طی آزمایش های نیمروند توسط فوجیتا [۱۲] و آزمایش های

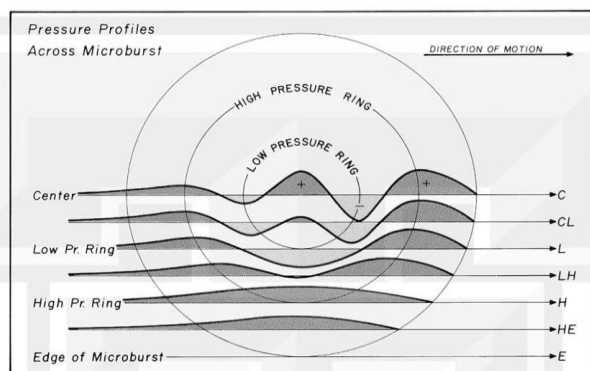
طوفان ها در سرتاسر دنیا، عامل تخریب های شدیدی بر سازه ها و عوارض طبیعی مختلف بوده‌اند. جریانات جوی به دلیل تنوع در نوع ساختار و رفتار آنها، تاثیرات متفاوتی را بر محیط خود می‌گذارند. لذا، لازم است که این جریانات و تاثیرات آنها بر محیط، بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. در حال حاضر مبنای محاسبات بارهای وارده از طرف بادهای سازه ها، اکثراً بادهای لایه مرزی جوی هستند [۱]. که در این زمینه تحقیقات زیادی نیز انجام شده است [۲]، [۳]، [۴]. این موضوع خلأ تحقیقاتی موجود را در خصوص سایر جریانات جوی نشان می‌دهد. طوفان فرو وزشی^۱ یکی از جریاناتی است که کمتر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. این طوفان، نوعی از طوفان های تندری شدید است که در بیشتر نقاط جهان قابل مشاهده است [۵]. این جریان بر خلاف جریانات لایه مرزی جوی، بر سازه های کوتاه نیز تاثیرگذار است. همچنین در این جریان، بدلیل رفتار خاص آن، محل قرارگیری سازه نسبت به محل ریزش جریان می‌تواند، آثار متفاوتی و پیش بینی نشده ای را بر محیط و سازه ها بگذارد [۶].

۲- مشخصات طوفان فرو وزشی و مطالعات قبلی در این زمینه

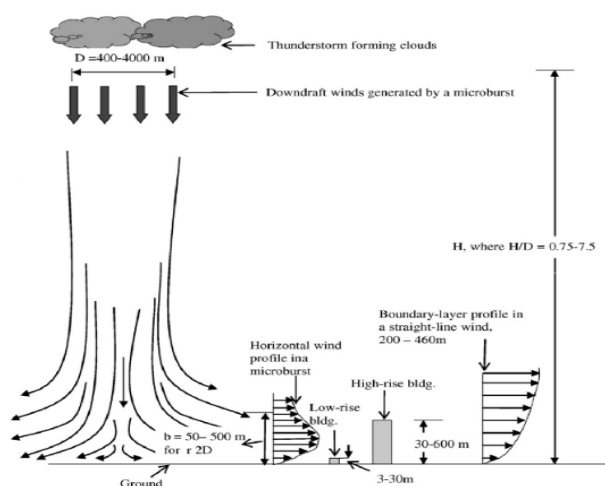
خلاصه آماری از مطالعات هواشناسی نشان می‌دهد که جت آزمایشگاهی توانایی ایجاد یک طوفان فرو وزشی کوچک^۲ در وضعیت تولید حداکثر باد را دارا می‌باشد [۷]. لچفورد [۸] نشان داد که بطور کلی، پدیده همرفت در اتمسفر، یک جریان عمودی به سمت بالا را ایجاد کرده که در آن رطوبت گرم که شناوری بیشتری دارد، به ارتفاع های بالاتر منتقل می‌شود. سپس رطوبت در این ارتفاع متراکم و خنک شده و در نهایت هوای خنک با چگالی بالا به شکل یک سقوط جریان به سمت پایین حرکت می‌کند. در نتیجه، فرو وزش ها زمانی رخ می‌دهند که یک جریان قوی در حال سقوط آزاد با سطح زمین برخورد کرده و به صورت امواج دوار، گسترش یابد. در پژوهش لچفورد [۸] توضیح داده شد که میدان جریان ایجاد شده توسط چنین رویدادی، به ویژه در نزدیکی نقطه برخورد، از چندین جنبه کلی متفاوت با میدان باد لایه مرزی جوی است. اولاً برخلاف پروفایل

^۴ Mesohigh^۵ Macrobust^۱ Downburst^۲ Microburst^۳ Momentum

تحقیق لوریدو سوزا و همکاران [۲۱] مشاهده کرد. علاوه بر این در سال ۲۰۲۲، حججی و همکاران [۲۲] به بررسی تاثیر زوایای برخورد طوفان فرو وزشی بر سازه مکعب شکل و به صورت استاتیکی پرداخته‌اند.

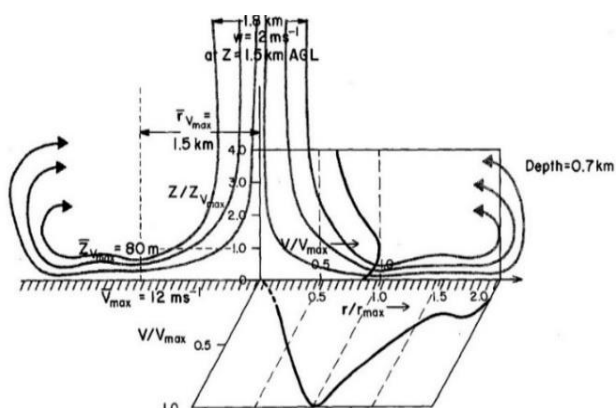


شکل ۱ میدان فشار یک طوفان فرو وزشی [۸]



شکل ۲ تفاوت جریان طوفان فرو وزشی با جریان لایه مرزی

جوی [۲۳]



شکل ۳ پروفیل سرعت یک طوفان فرو وزشی متعارف در طی

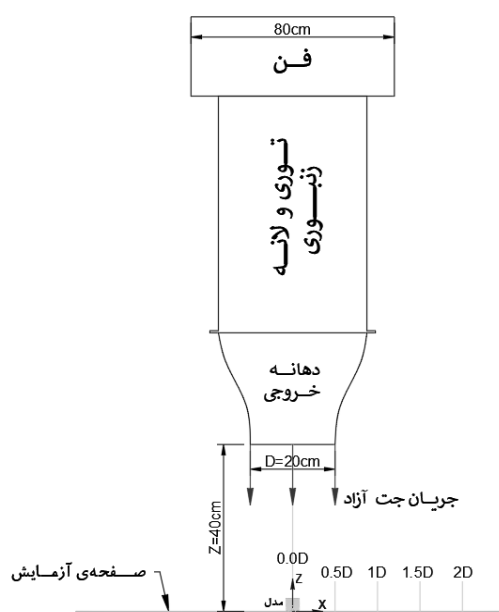
تحقیق جاوز [۷]

جاوز [۷] توسط هلمفلت، برای طوفان فرو وزشی کوچک، نتایج مشابهی را نشان داده‌است. شکل (۳) نشان‌دهنده خلاصه نتایج ارائه شده توسط هلمفلت از آزمایش‌های جاوز است. در نتایجی که از یک فرو وزش با قطر متوسط ۱/۸ کیلومتر استخراج شده است، مشخص شده که به طور متوسط، سرعت باد بیشینه در ارتفاع تقریباً ۸۰ متر و در فاصله تقریباً ۱/۵ کیلومتری از نقطه برخورد رخ می‌دهد. در نتیجه قویترین جریانات در محدوده‌ای به فاصله یک قطر جریان از محل برخورد جریان بوجود می‌آیند. یومی ایدا و همکاران [۱۳] با بررسی عددی طوفان فرو وزشی بر روی سازه‌ها، نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی همخوانی داشته و یکدیگر را تأیید می‌کنند. جورج رومانیک و حوریا هنگان [۱۴] نیز طوفان فرو وزشی را به صورتی که در باد‌های لایه مرزی غوطه‌ور باشد را بررسی کردند. آن‌ها نتایج وجود یا عدم وجود باد لایه مرزی در جریان خروجی را مقایسه کرده‌است. همچنین مصطفی ابوطایخ و همکاران [۱۵] با استفاده از یک سیستم تیغه‌ای در تونل باد لایه مرزی به شبیه‌سازی طوفان فرو وزشی پرداخته‌اند. آسانو و همکاران [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی جت پالسی به بررسی اثرات غیر ایستایی طوفان فرو وزشی بر روی بارهای باد وارد بر یک ساختمان کم ارتفاع پرداختند. ژونگه‌وی و ووا و همکاران [۱۷] با استفاده از جت دیواره پالسی به شبیه‌سازی طوفان فرو وزشی ثابت و متحرک پرداختند و اثرات این طوفان را بر روی خطوط انتقال برق را بررسی کردند. از دیگر تحقیقات مهمی که در راستای شناخت جریانات طوفان فرو وزشی انجام شده است می‌توان به مطالعه نیکولز و همکاران اشاره کرد که به بررسی ساختار جریان در اطراف یک مدل مکعب شکل تحت بار طوفان شبه فرو وزشی پرداختند [۱۸].

لچفورد و همکاران [۱۰] در قسمت اول پژوهش خود به بررسی جریانات ناشی از طوفان فرو وزشی بر مدلی مکعب شکل و بصورت استاتیکی پرداختند. این پژوهش در حالی صورت پذیرفت که نیاز به بررسی این جریانات به صورت شبیه‌سازی آزمایشگاهی در حالت دینامیکی نیز دیده می‌شد. لذا در ادامه پژوهش خود و در قسمت دوم آن، با ساخت یک سیستم شبیه‌ساز دینامیکی طوفان فرو وزشی، به بررسی جریانات این طوفان و تأثیر آن بر مدلی مکعب شکل پرداختند [۱۹]. همچنین لامباردو و همکاران [۲۰] در تحقیق خود، مطالعه‌ای بر روی بار وارده بر یک سازه کم ارتفاع در مقیاس کامل انجام دادند. نمونه‌ای از بررسی آثار طوفان فرو وزشی بر سازه‌ها و مطالعه بر روی مناطق تحت تأثیر این طوفان را می‌توان در

۳-۲- مدل و صفحه آزمایش

با استناد به پژوهش فوجیتا [۹]، سطح تحت تاثیر طوفان فروروزی حداقل برابر با ۴۰۰ متر می‌باشد. بنابراین در این پژوهش باتوجه به قطر خروجی دمنده، مقیاس مدل طراحی شده برای انجام آزمایشات، برابر با ۱:۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در این آزمایشات از یک صفحه آزمایش با ابعاد ۱/۵×۱ متر استفاده شده است. این صفحه قابلیت جابه‌جایی برای رسیدن به سرعت‌های مختلف به‌وسیله دست را دارد. جابه‌جایی صفحه در محدوده $\pm 1/5D$ در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله صفحه تا مرکز خروجی دمنده برابر ۰/۴ متر (۲D)؛ دو برابر قطر دهانه خروجی دمنده) معین شده است. نمای بالای این سیستم در شکل (۴) نشان داده شده است. برای این پژوهش یک مدل مکعب شکل به ابعاد ۱۵×۱۵ میلی‌متر به عنوان یک نمونه عمومی از سازه‌ها ساخته شد. تعداد ۳ عدد سوراخ فشاری روی مدل در هر ضلع نصب شده است. در شکل (۵) مدل مورد نظر نشان داده شده است. همچنین در شکل (۶) نمای کناری از چیدمان تجهیزات ارائه شده است. سرعت جابه‌جایی صفحه آزمایش در راستای X ، به‌صورت نسبت V_{trans}/V_{ref} اعلام می‌شود که به اختصار با V_R نشان داده شده است. این تخته در دو نسبت سرعت برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۶، $V_R=0/06, 0/12$ جابه‌جا می‌شود. این سرعت توسط میکروسویچی که بر روی صفحه آزمایش قرار گرفته است، محاسبه و اندازه‌گیری شده است (شکل ۷).



شکل ۴ نمای بالای سیستم شبیه ساز طوفان فرو و زشی آزمایشگاهی

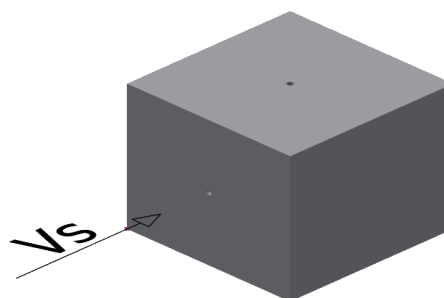
تا به امروز چندین تحقیق جهت ارزیابی تأثیر طوفان فرو و زشی بر روی مدل‌هایی مکعب شکل به‌عنوان شکلی عمومی از سازه‌ها صورت گرفته است که در آن‌ها بررسی دینامیکی نیروی اعمالی از سوی طوفان فرو و زشی بسیار کم یافت می‌شود. این تحقیقات عموماً در راستای بررسی و شناخت طوفان‌ها و جریان‌ات ریزشی به‌صورت تجربی و بعضاً عددی صورت پذیرفته است. در عین حال، این پژوهش‌ها کماکان دچار خلأهایی از لحاظ بررسی دینامیکی تأثیر این طوفان بر سازه‌هایی که در اراضی شیب‌دار، بنا شده‌اند وجود دارد؛ لذا هدف این پژوهش، ارائه یک شبیه‌سازی دینامیکی کارآمد از طوفان فرو و زشی و بررسی اثرات آن بر توزیع فشار و نهایتاً نیروهای وارده بر یک ساختمان استاندارد مکعبی شکل می‌باشد. همچنین باتوجه به خلأ علمی مورد اشاره، بررسی دینامیکی اثرات زاویه قرارگیری سازه نسبت به جریان و شیب سطح، از دیگر اهداف مهم در این تحقیق می‌باشد. مقایسه‌هایی نیز با توزیع‌های فشار به‌دست‌آمده از سایر شبیه‌سازی‌های طوفان فرو و زشی، جهت بررسی صحت نتایج این تحقیق انجام شده است. با کاوش در ویژگی‌های انحصاری و مشخصات بارهای وارده بر طوفان فرو و زشی، نویسندگان بر این باورند که نتایج این تحقیق بتواند باعث افزایش شناخت جریان‌ات این طوفان خاص در حالات مذکور بر سازه‌های کوتاه گردد.

۳-۲- مدل، تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

۳-۱- شبیه ساز طوفان فرو و زشی

برای ایجاد طوفان فرو و زشی در این تحقیق، از یک دمنده با خروجی یکنواخت ثابت استفاده شده است. جریان سیال متلاطم از طریق فن تعبیه شده، با میزان آشفتگی کمتر از ۰/۵٪ از دهانه خروجی آن خارج می‌شود. این فن با قطر ۸۰ سانتی‌متر و با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و با قابلیت تنظیم سرعت چرخش، جریان موردنظر را تولید می‌کند که این جریان توسط یک تغییردهنده ساین (آداپتور) که فن را به دمنده متصل کرده است وظیفه ایجاد طوفان فرو و زشی موردنظر را برعهده دارد. این جریان در محفظه آرامش دمنده که دارای ساختار لانه‌زنبوری و توری است، یکنواخت شده و از دهانه دمنده خارج می‌شود. همچنین یک نازل کاهنده با شعاع ۰/۲ متر که به‌وسیله چاپ سه‌بعدی ساخته شده است در دهانه خروجی دمنده استفاده گردیده که کمک به شبیه‌سازی فیزیک جریان می‌نماید.

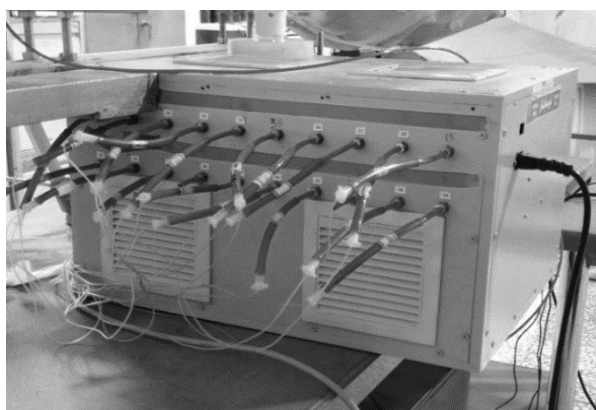
شده را نسبت به فشار اتمسفر اندازه گیری می‌کنند. این سنسورها قادر به اندازه گیری فشارهایی کمتر از فشار اتمسفر نیز هستند. قبل از انجام آزمایش‌ها، تمام سنسورهای مورد استفاده در شرایط استاندارد کالیبره شده‌اند. این جعبه سنسور داده‌های آنالوگ دریافتی را توسط پردازنده ۱۶ بیتی نصب شده در جعبه، به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌کند و در انتها نیز این داده‌ها به رایانه منتقل می‌شود. ظرفیت این سنسورها برابر با ± 1000 پاسکال و دقت اندازه گیری آن نیز 0.15% در مقیاس کل است. نرخ داده‌برداری در این آزمایشات برابر با ۴۰۰ هرتز بوده است (شکل ۸). همچنین برای اندازه گیری پروفیل سرعت طوفان فرو وزشی، در فاصله دهانه دمنده تا سطح صفحه، از یک سنسور سیم داغ^۱ استفاده شده است. دقت نهایی سرعت سنج سیم داغ کمتر از 0.1 متر بر ثانیه می‌باشد. کلیه سنسورهای فشار و سرعت قبل از استفاده در سرعت‌ها و فشارهای مختلف قرار گرفته و نهایتاً منحنی کالیبره هر کدام به صورت مجزا بدست آمده است. برای اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت در دهانه خروجی دمنده از مجموعه لوله‌های پیتو که با نام ریک^۲ استفاده شده است (شکل ۹).



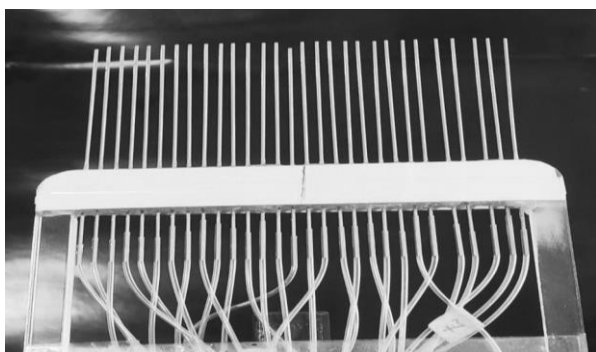
شکل ۵ مدل مکعب شکل



شکل ۶ نمای کناری از چیدمان دمنده، صفحه آزمایش و مدل



شکل ۸ جعبه سنسورها



شکل ۹ ریک



شکل ۷ سیستم اندازه‌گیری سرعت جابجایی صفحه

۳-۳ تجهیزات اندازه‌گیری

جهت اندازه‌گیری فشار و نیروهای مورد بحث در این تحقیق از سنسورهای فشاری استفاده شده است که اختلاف فشار وارد

² Rake

¹ Hot-wire

۴-۳- شرایط انجام آزمایش

جریان خروجی از دهانه دمنده در محدوده سرعت ۱۰ تا ۱۴ متر بر ثانیه تنظیم شده است. فشارهای ناشی از این جریان خروجی توسط سنسورهای فشاری تعبیه شده بر روی مدل مکعب شکل که به جعبه فشار متصل است اندازه گیری می شود. این مدل در دو راستای قرارگیری صفر و ۴۵ درجه (α) مشخص گردیده است. همچنین این مدل در چهار زاویه برخورد با طوفان (θ)، در معرض جریان قرار می گیرد. مدل مورد بحث از نقطه $1,5D$ با دو سرعت جابه جایی در راستای $X(0,12)$ ، $(V_R=0,6)$ ، تا نقطه $1,5D$ کشیده می شود. در جدول ۱ حالات مختلف داده برداری در این پژوهش، ارائه شده است.

۳-۵- آنالیز خطا و عدم قطعیت نتایج

در کلیه آزمایشات انجام شده در این تحقیق برای تخمین ضریب فشار و نیرو از داده های اندازه گیری شده توسط سنسورهای فشار استفاده شده است. همانطور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، از سنسورهای فشار تفاضلی با دقت $0,15\%$ در مقیاس کلی استفاده شده که قبل از داده برداری همگی کالیبره شده اند. البته لازم به ذکر است که منابع خطای موجود از تخمین ضرایب فشار و نیرو، تنها محدود به سنسورها نبوده و شامل خطای کالیبراسیون سنسورها، خطای کارت داده برداری و خطای منتشر شده در فرآیند محاسبات نیز می شود. نکته دیگری که بایستی بدان اشاره شود اینست که با توجه به محدود بودن تعداد نقاط روی دیواره ها و المان بندی سطح مکعب، فشار در هر یک از المانها ثابت و برابر با مقدار فشار اندازه گیری شده در وسط آن المان در نظر گرفته شده است. در فرآیند محاسبه عدم قطعیت ضریب فشار و نیرو، تمام موارد بالا به غیر از مورد آخر که امکان محاسبه آن وجود نداشته است، در نظر گرفته شده که پس از محاسبه به ترتیب برای ضرایب فشار و نیرو برابر با $0,35$ و $0,1$ می باشد.

۴- نتایج و بحث

در قسمت اول این بخش، ساختار جریان طوفان فروزشی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نیز به بررسی اثرات دینامیکی این طوفان بر یک سازه ی مکعب شکل استاندارد پرداخته شده است. در این راستا اثرات زاویه برخورد طوفان فروزشی (θ)، زاویه قرارگیری مدل یا سازه نسبت به طوفان (α) و سرعت حرکت طوفان (V_R) به صورت دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- بررسی ساختار طوفان فروزشی

در این قسمت، یکنواختی سرعت جریان خروجی از دهانه دمنده بررسی شد. سرعت متوسط جریان خروجی از دهانه برابر با 12 متر بر ثانیه می باشد. فاصله داده برداری از دهانه خروجی نیز $0,5D$ قرار داده شد. این فاصله نسبت به پارامتر D (قطر دهانه خروجی) بی بعد شده است. این محل به این دلیل انتخاب شد تا فاصله کافی از توری و لانه زنبوری در خروجی دمنده داشته و صفحه مقابل جریان نیز بر آن تأثیری نداشته باشد [۱۰]. مقایسه این داده ها نشان می دهد که پروفیل سرعت خروجی از دهانه دمنده از یکنواختی مناسبی برخوردار بوده و نوسانات بزرگ در قطر دهانه خروجی مشاهده نمی شود. در شکل (۱۰) داده های مذکور به همراه مقایسه ای با پروفیل سرعت دهانه خروجی دمنده مورد استفاده در مقاله لچفورد و چای [۱۰]، ارائه شده است. همچنین در این نقطه، شدت آشفتگی جریان برابر با $0,46\%$ اندازه گیری شده که بر اساس رابطه (۱) محاسبه شده است [۲۴]، [۲۵]، [۲۶].

$$Tu(\%) = \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum u_i'^2}{n}}}{\bar{U}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$u_i' = u_i - \bar{U}$$

در این رابطه، $\bar{U}$ میانگین سرعت ثبت شده، u_i' مولفه اغشاشی سرعت، u_i سرعت لحظه ای و n تعداد نمونه می باشد.

مکان قرارگیری مدل (X/D)	زاویه ی قرارگیری تخته (θ)	راستای قرارگیری مدل (α)
$X/D=0.0$	$\theta=90^\circ$	$\alpha=0^\circ$
$X/D=0.5$	$\theta=105^\circ$	$\alpha=45^\circ$
$X/D=1$	$\theta=120^\circ$	
$X/D=1.5$	$\theta=135^\circ$	
$X/D=2$		

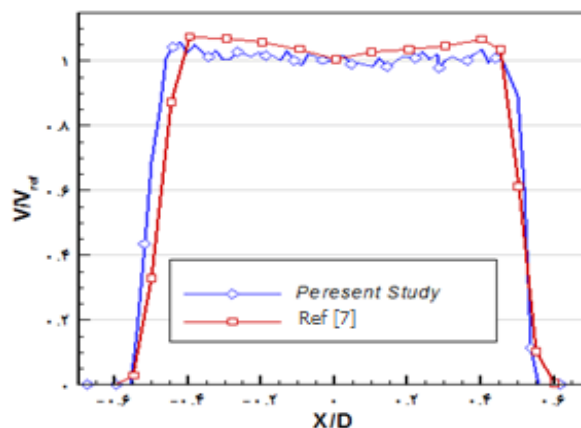
زمانی که صفحه آزمایش از روبروی جریان عبور می کند پیردازد. در شکل ۱۲ میدان فشار استاتیک در $V_R=0.12$ و $V_R=0.06$ در زاویه برخورد طوفان با سطح برابر با 90° اندازه گیری شده است. این داده ها به همراه داده میانگین و داده شبه استاتیک ارائه شده است. داده های شبه استاتیک، مربوط به توزیع فشار سطح در نسبت سرعت انتقالی (V_R) بسیار پایین می باشد. ضریب فشار در این نمودار با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده است [۲۷].

$$C_p = \frac{P_{static} - P_{atm}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (2)$$

که در آن C_p ضریب فشار، P_{static} فشار استاتیک سطح، P_{atm} فشار اتمسفر، ρ چگالی سیال و V_{ref} سرعت جریان خروجی از دمنده است. با توجه به شکل (۱۲) و مقایسه نمودارهای شبه استاتیک و $V_R=0.06$ و $V_R=0.12$ می توان دریافت که با افزایش سرعت جابه جایی، قله نمودار ضریب فشار از نقطه مرکزی فرود جریان ($X/D=0$) به سمت پایین دست جریان (X/D) های منفی) متمایل پیدا کرده؛ بطوری که در نمودار $V_R=0.12$ به حدود $X/D=-0.5$ می رسد. علاوه بر این افزایش سرعت جابجایی، باعث شده تا مقدار حداکثر ضریب فشار نیز کاهش یابد. به نظر می رسد علت اصلی جابجایی نقطه سکون، سرعت نسبی بین سطح و جریان فروزشی بوده و المان های سیال موجود در زیر جریان فروزشی سرعت صفر را احساس نمی کنند. البته در پایین دست، جایی که سرعت نسبی المان ها نسبت به سطح صفر شده، ضریب فشار نیز به بیشینه مقدار خود رسیده است.

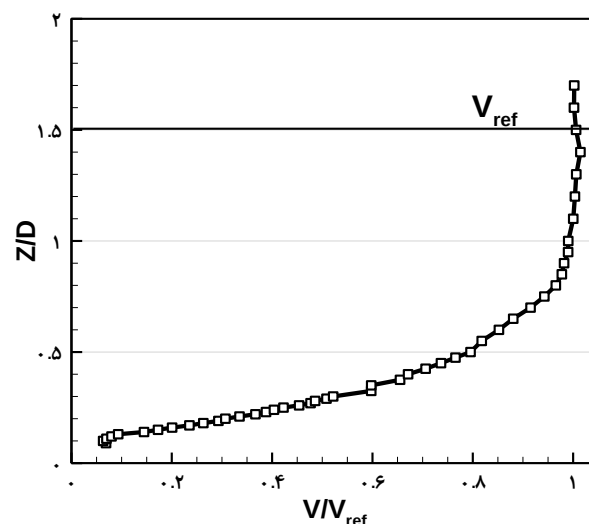
۴-۳- بررسی اثرات زاویه برخورد طوفان با سطح در حالت دینامیکی

برای بررسی بهتر اثرات دینامیکی زاویه برخورد طوفان، در ابتدا اثرات زاویه برخورد طوفان فروزشی با سطح (θ) در حالت شبه استاتیکی اندازه گیری شده و نتایج آن در شکل (۱۳) ارائه شده است. این نتایج که به صورت توزیع فشار بر روی سطح ارائه شده، نشان می دهد که با افزایش مقدار θ ، رأس نمودار ضریب فشار از نقطه $X/D=0$ به نقاط کناری محل فرود جریان (X/D) های منفی) متمایل شده است. در عین حال، با افزایش مقدار θ ، تغییر چشمگیری در مقدار حداکثر ضریب فشار ایجاد نشده است.



شکل ۱۰ سرعت خروجی در فاصله $0.5D$

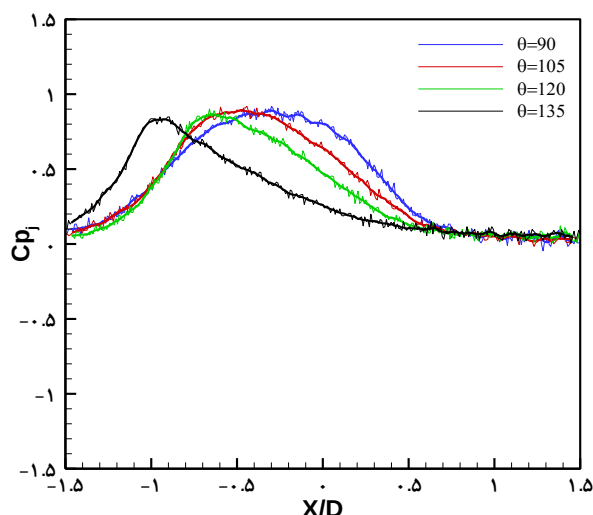
سرعت جریان در امتداد نقطه مرکزی دهانه خروجی دمنده تا صفحه آزمایش، با استفاده از سنسور سیم داغ اندازه گیری شد؛ که نتایج آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است این نتایج نشان می دهد که جریان خروجی در مقادیر بالاتر از $Z/D=1/2$ ، جریان به مقدار کمی افت سرعت داشته است. در حالی که در مقادیر کمتر از $Z/D=0.8$ ، به شکل خطی کاهش یافته و تا رسیدن به سطح صفحه به صفر میل می کند. لذا، در ادامه تحقیقات از سرعت جریان در فاصله $0.5D$ از دهانه خروجی به عنوان سرعت مرجع دمنده (V_{ref}) در اکثر محاسبات استفاده شده است.



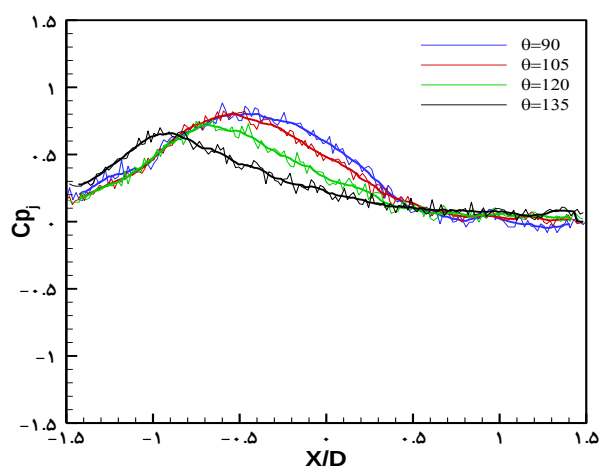
شکل ۱۱ افت سرعت بی بعد بین دمنده و صفحه آزمایش در امتداد نقطه مرکزی دهانه خروجی

۴-۲- بررسی اثرات حرکت انتقالی طوفان بر توزیع فشار سطح صفحه آزمایش

جهت بررسی میدان فشار استاتیکی در این تحقیق یک سنسور بر روی سطح صفحه آزمایش قرار داده شد تا به داده برداری در



شکل ۱۴ الف- میدان فشار استاتیک در θ های متفاوت با $V_R=0.06$



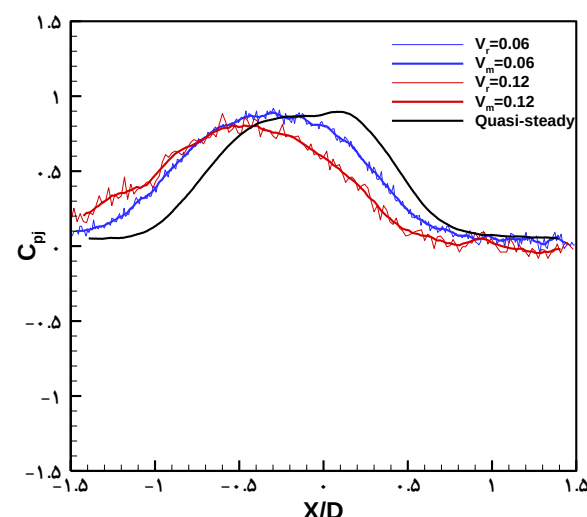
شکل ۱۴ ب- میدان فشار استاتیک در θ های متفاوت با $V_R=0.12$

۴-۴- بررسی اثرات سرعت انتقال طوفان فرو وزشی بر سازه استاندارد مکعبی شکل

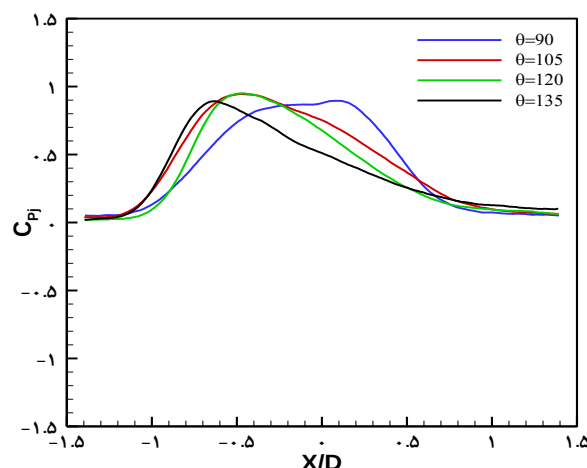
این آزمایشات در دو نسبت سرعت انتقال $V_R=0.06$ و $V_R=0.12$ انجام شده است. در شکل (۱۵) نمودار مقایسه ضرایب فشار در اضلاع مختلف مکعب و در حالتی که راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان آزاد صفر درجه ($\alpha=0^\circ$) بوده و زاویه برخورد با سطح، برابر 90° درجه ($\theta=90^\circ$) می باشد، ارائه شده است. علاوه بر نمودارهای ضریب فشار مذکور، داده های میانگین گیری شده از این ضرایب و داده شبه استاتیک هم در شکل نشان داده شده است.

در این شکل ها مشاهده می شود که رفتار نمودارهای ضریب فشار در دو نسبت سرعت V_R شبیه به یکدیگر می باشد، ولیکن مقدار حداکثر ضریب فشار در ضلع رو به جریان و در زمانی که

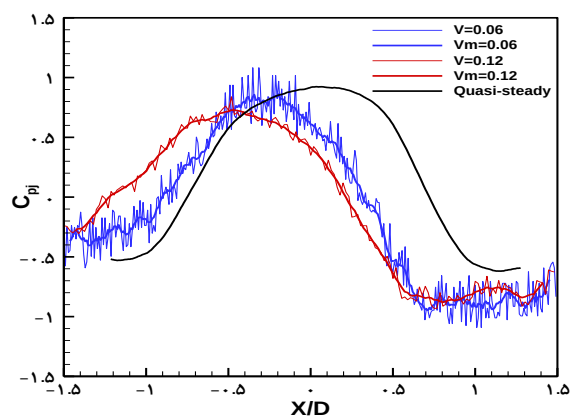
در ادامه، در شکل (۱۴) اثرات طوفان فرو وزشی در دو نسبت سرعت انتقالی مختلف و در θ های متفاوت، بر توزیع فشار روی سطح نشان داده شده است. افزایش این زاویه باعث شده تا قله نمودار ضریب فشار، از $X/D=0$ به سمت X/D های منفی تمایل پیدا کند. با مقایسه شکل (۱۲)، شکل (۱۳) و شکل (۱۴) ضمن ذکر این نکته که رفتار نمودارهای فشار ارائه شده شبیه به یکدیگر بوده؛ می توان به این نکته پی برد که اثرات افزایش زاویه θ و نسبت سرعت V_R ، باعث تشدید تغییر مکان قله نمودار فشار به سمت X/D های پایین تر و کاهش نسبی در مقدار حداکثر ضریب فشار در حالت دینامیکی شده است. این موضوع در $\theta=135^\circ$ بیشتر نمایان است. به نظر می رسد عامل اصلی کاهش ضریب فشار در حالت دینامیکی افزایش میزان افت فشار کل درون جریان است. البته با افزایش θ ، این تلفات افزایش یافته است.



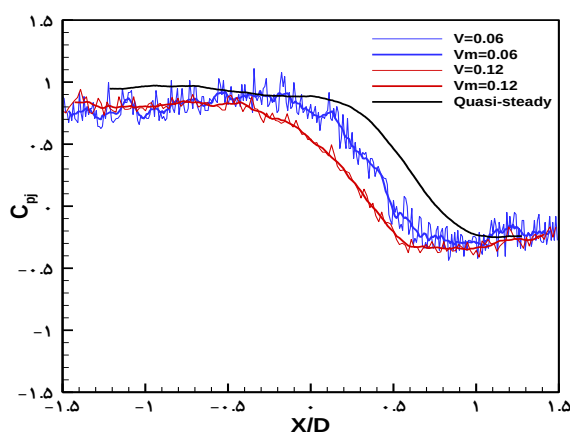
شکل ۱۵ میدان فشار جریان خروجی از دمیده بر سطح صفحه آزمایش در $\theta=90^\circ$



شکل ۱۶ میدان فشار شبه استاتیک در θ های مختلف



شکل ۱۵ ب- ضرایب فشار بر مکعب در $\alpha=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ ضلع سقف

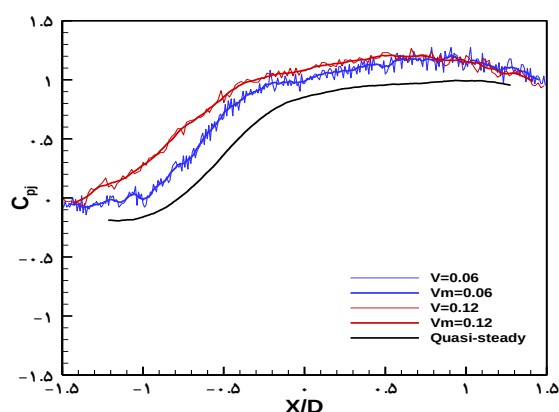


شکل ۱۵ ج- ضرایب فشار بر مکعب در $\alpha=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ ضلع پشت به جریان

۴-۵- بررسی اثرات دینامیکی زاویه برخورد طوفان فروزشی بر مدل مکعب شکل استاندارد

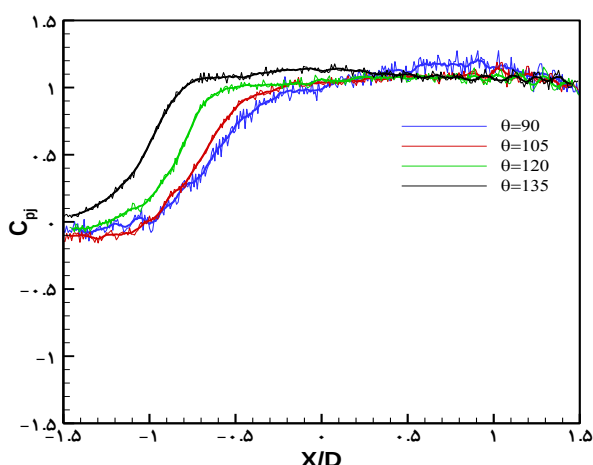
در شکل (۱۶) داده های ضریب فشار در $V_R=0.06$ و در θ های مختلف نشان داده شده است. در ضلع رو به جریان مشخص است که میزان حداکثر ضریب فشار در همان ابتدای مسیر بر روی ضلع وجود داشته و در θ های مختلف این حداکثر فشار تقریباً برابر با یکدیگر بوده است. ولیکن مشاهده شده است که میزان حداکثر ضریب فشار در θ های بزرگتر، ثابت بیشتری داشته و در طول مسیر بیشتری، این حداکثر حفظ می شود. در سقف مدل نیز مشاهده می شود که در $\theta=90^\circ$ ، بیشترین بازه تغییرات ضریب فشار بر مدل وارد شده است که شامل بزرگترین اعداد در طول مسیر حرکت می شود. با افزایش θ ، این بازه تغییرات کوچکتر شده و قله فشار مثبت نیز به سمت انتهای مسیر متمایل می شود. به نظر می رسد با افزایش زاویه θ ، رفتار طوفان فروزشی در محدوده ای که جریان های سطحی ایجاد می کند، به رفتار طوفان های اتمسفریک لایه مرزی نزدیک شده

نسبت سرعت انتقالی بیشتر است، مقدار بیشتری را نسبت به زمانی که مدل با نسبت سرعت انتقالی کمتر حرکت می کند، نشان می دهد. همچنین مشخص است که در ابتدای محدوده حرکت ($X/D=+1/5$)، فشار زیادی بر ضلع رو به جریان وارد می شود، اما حداکثر این مقدار در $X/D=1$ ایجاد شده است. در $X/D=-0.5$ و پس از آن، مشاهده می شود که فشار با شیب شدیدی کاهش می یابد و به سمت صفر میل می کند. این نتایج نشان می دهد در حالتی که صفحه رو به جریان در محدوده X/D های مثبت در مواجهه با جریان فروزشی سطحی است، ضریب فشار بیشترین مقدار را داشته و با عبور جریان فروزشی از روی آن ضریب فشار به شدت کاهش می یابد. البته در حالت دینامیکی به علت جابجا شدن نقطه سکون این روند به سمت پایین دست منتقل شده است. در سقف مدل، تا حدودی عکس این مورد پیش می آید. به صورتی که در حالتی که $V_R=0.12$ است، مقدار ضریب فشار، بازه تغییرات کوچکتری نسبت به سرعت $V_R=0.06$ پیدا می کند. در ابتدای حرکت و تا حدود $X/D=+0.5$ ، فشار منفی زیادی بر سقف مدل وارد شده است ولی در ادامه مسیر و با شیب شدیدی این فشار در $X/D=-0.5$ به حداکثر مثبت خود می رسد. به نظر می رسد علت کم بودن ضریب فشار در X/D های منفی و مثبت، وجود جریان های سطحی ناشی از جریان فروزشی است و با رسیدن سقف بر ناحیه سکون جریان فروزشی و کاهش سرعت، ضریب فشار افزایش یافته است. در ضلع پشت به جریان نیز که در ابتدای مسیر مقدار فشار منفی بوده، مشاهده می شود که در $X/D \geq +0.5$ ، به سمت فشارهای مثبت حرکت کرده است. روند تغییرات ضلع پشت به باد تقریباً با ضلع رو به جریان شبیه می باشد. البته با این تفاوت که در X/D ها منفی ضلع پشت به باد به حالت رو به باد تبدیل می شود.

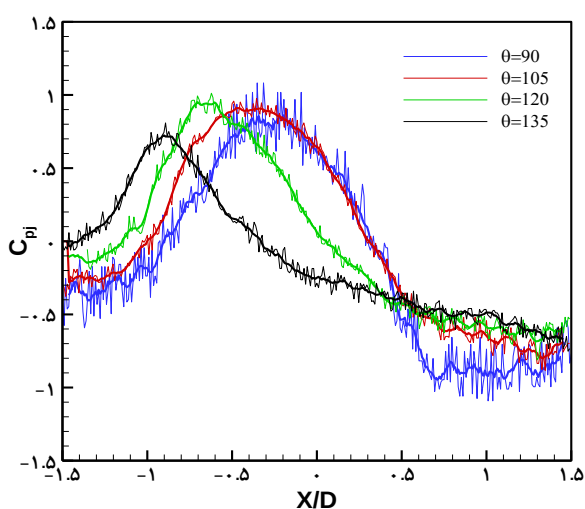


شکل ۱۵ الف- ضرایب فشار بر مکعب در $\alpha=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ ضلع رو به جریان

یافته و به تدریج تبدیل به نیروی مکشی می شود؛ به طوری که در حدود $X/D = -0.5$ تا $X/D = -1$ ، به بیشترین مقدار نیروی مکشی در زوایای θ ی مختلف ایجاد شده است. با توجه به مقادیر نیروی وارده در راستای X و Z ، می توان گفت که بیشترین مقدار نیرو کل بر سازه، در محدوده $X/D \geq +0.5$ بر مدل وارد خواهد شد. افزایش زاویه θ ، باعث شده است که بازه تغییرات نیرو کمتر شده و همچنین نیرو با شیب کندتری تغییر کند. این موضوع نشان می دهد که قرارگیری سازه ها در دامنه ها و زمین های شیب دار کمک به افزایش ایمنی آن ها در برابر این جریان خواهد داشت. با توجه به اینکه روند تغییرات ضرایب فشار در دو سرعت بررسی شده به یکدیگر شبیه بوده و رفتار یکسانی را ارائه می دهند، می توان شباهت نمودارهای نیرو را در این دو نسبت سرعت انتقالی نتیجه گرفت. شکل (۱۹) نیز داده های تکرارپذیری را در $\theta = 135^\circ$ و $\alpha = 45^\circ$ نشان می دهد.



شکل ۱۶ الف- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha = 0^\circ$ و $V_R = 0.06$ ضلع رو به جریان



شکل ۱۶ ب- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha = 0^\circ$ و $V_R = 0.06$ ضلع سقف

و لذا کاهش ضریب فشار مانند حالت $\theta = 0^\circ$ مشاهده نمی شود. این کاهش اثر بعد از عبور جریان فروروزشی، کمتر نیز می شود که به علت کاهش سرعت جریان سطحی در این ناحیه می باشد. در ضلع پشت به جریان، ضریب فشار در θ های کوچکتر، زودتر و با شیب بیشتری افزایش می یابد، علاوه بر این، مقدار فشار وارد بر این ضلع بیشتر می باشد. به علاوه این نتایج نیز همانطور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، نشان می دهد که اثرات ناشی از طوفان فروروزشی در حال کاهش و رفتار آن به رفتار طوفان لایه مرزی نزدیک می شود.

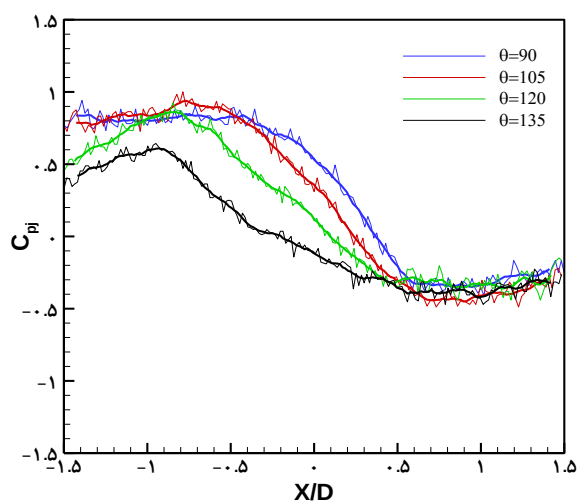
شکل (۱۷) داده های ضریب فشار در حالتی که نسبت سرعت انتقالی به دو برابر افزایش یافته ($V_R = 0.12$)، ارائه شده است. سایر شرایط آزمایش مشابه حالت قبل می باشد. نتایج نشان می دهد که رفتار نمودارهای ضریب فشار شبیه به زمانی است که $V_R = 0.06$ بوده است؛ در حالی که تغییرات بسیار ناچیزی نیز در بازه تغییرات ضریب نیرو در هر ضلع مشاهده می شود. عمده تفاوت در این دو سرعت جابجایی، مربوط به مکان و شیبی است که در آن ضریب فشار به حداکثر خود می رسد.

شکل (۱۸) ضرایب نیرو اندازه گیری شده در شرایط بالا را در دو راستای X و Z نشان می دهد. در رابطه (۴) نحوه محاسبه ضرایب نیرو ارائه شده است.

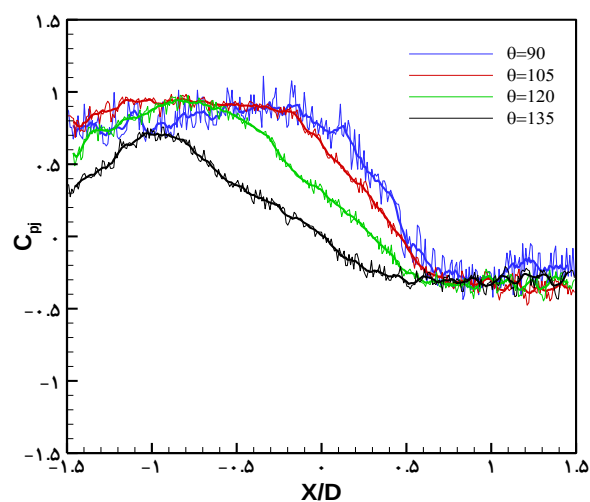
$$C_F = \left(\frac{\sum P \cdot A}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 S_{ref}} \right) \quad (1)$$

که در آن C_F ضریب نیرو، P فشار کل، A مساحت هر المان است که طول هر المان در واحد عمق آن المان در نظر گرفته شده است، ρ چگالی سیال، V_{ref} سرعت جریان خروجی از دمند و S_{ref} ارتفاع مدل در واحد عمق آن است.

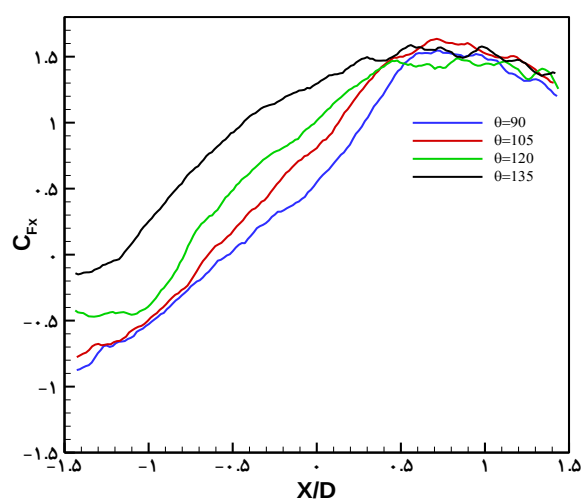
با بررسی این شکل ها می توان دریافت که در راستای X ، اختلاف نیرو بین دو ضلع سازه زیاد بوده و باعث افزایش یافتن مقدار نیرو در ابتدای مسیر حرکت شده است. در حدود $X/D \leq +0.5$ ، دیده شد که نیرویی که تا قبل از آن در راستای X ، مثبت بوده، به تدریج تغییر جهت داده و به سمت مقادیر منفی میل می کند. ضمناً مقدار نیروی وارده بر سازه در ابتدای مسیر بیشتر از مقدار آن در انتهای مسیر است. همچنین با افزایش θ ، شیب تغییرات نیرو در طول مسیر کاهش یافته و با شدت کمتری تغییر می کند. در راستای Z (نیروی وارده بر سقف) نیز می توان مشاهده کرد که در ابتدای شروع جابجایی، نیروی فشاری به سقف مدل وارد شده است. در $X/D = +0.5$ و در تمام زوایای θ ، به جز زاویه $\theta = 135^\circ$ ، نیروی فشاری کاهش



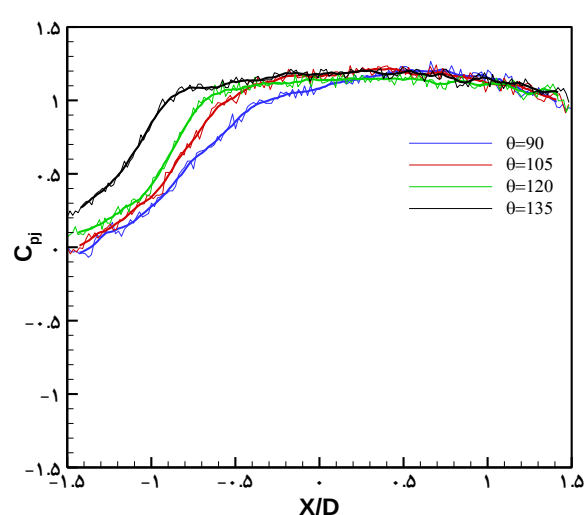
شکل ۱۶ ج- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.12$ ضلع پشت به جریان



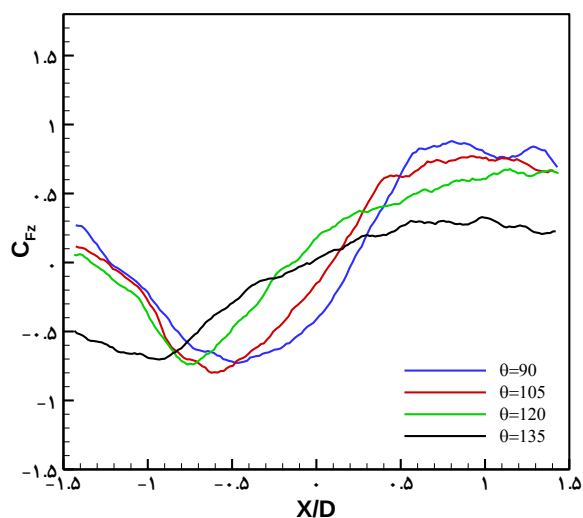
شکل ۱۷ ج- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.06$ ضلع پشت به جریان



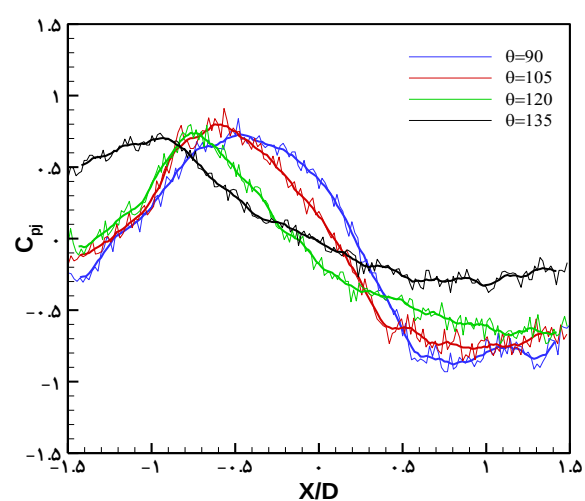
شکل ۱۸ الف- ضرایب نیرو در $\alpha=0^\circ$ و θ های متفاوت
 $C_{FX} - V_R=0.12$



شکل ۱۹ الف- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.12$ ضلع رو به جریان

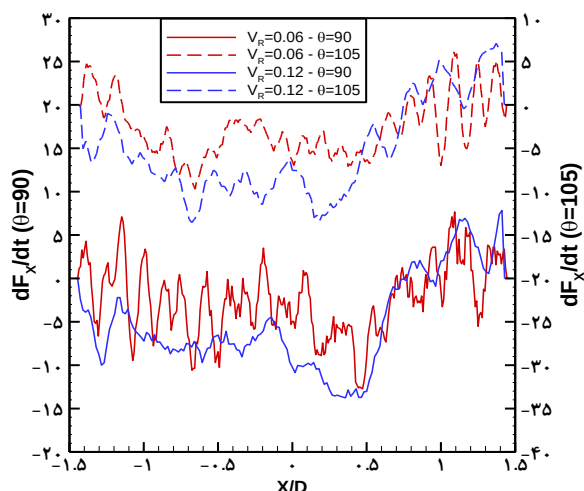


شکل ۲۰ ب- ضرایب نیرو در $\alpha=0^\circ$ و θ های متفاوت
 $C_{FZ} - V_R=0.12$

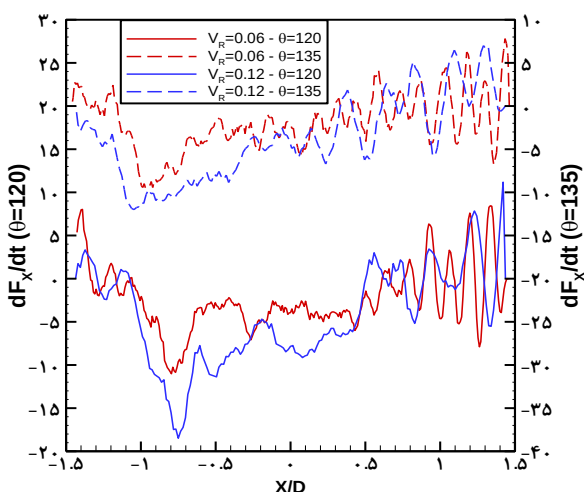


شکل ۲۱ ب- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.12$ ضلع سقف

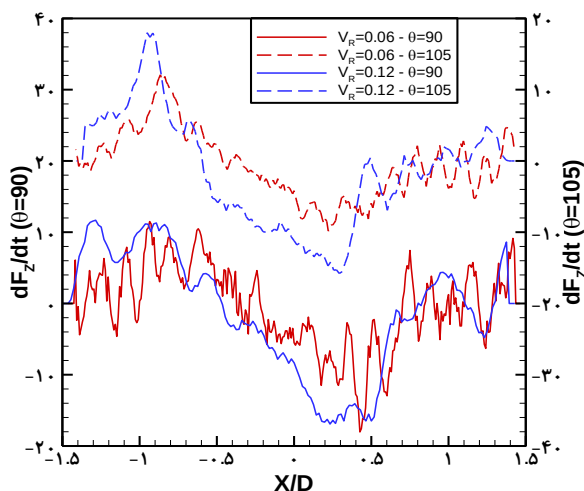
می افتد. علاوه بر این، افزایش نسبت سرعت انتقالی طوفان، باعث قوی تر شدن ضربات وارده بر سازه شده است.



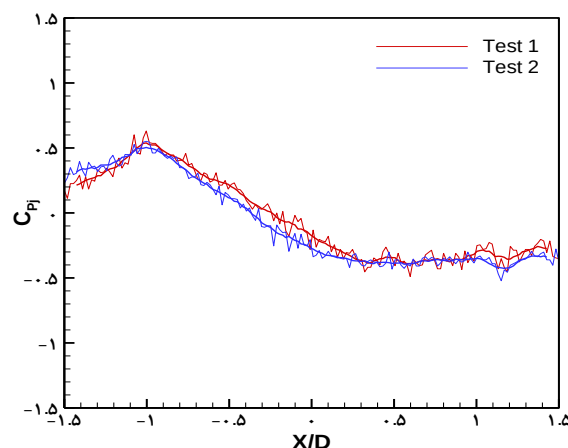
شکل ۲۰ الف- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$
 $dF_{XZ}/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۲۰ ب- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$
 $dF_{XZ}/dt - \theta=120^\circ$ و 135°



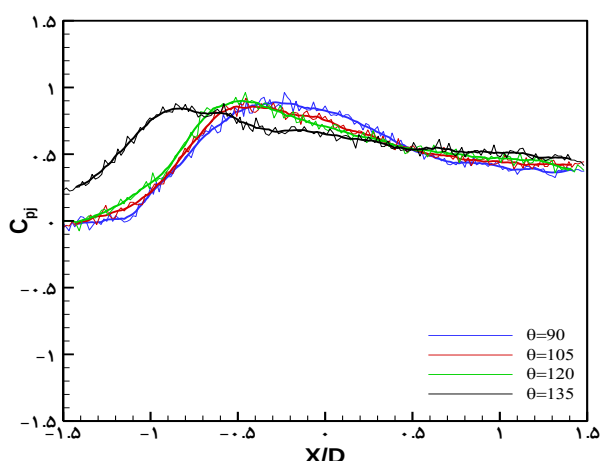
شکل ۲۰ ج- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$
 $dF_{FZ}/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



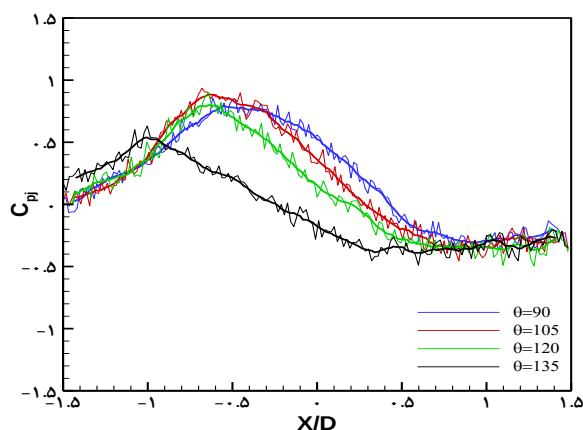
شکل ۱۹ پروفیل تکرارپذیری آزمایشات در $\theta=135^\circ$ و $\alpha=45^\circ$

در ادامه، به بررسی تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه)، در راستای $\alpha=0^\circ$ و دو جهت نیروی X و Z ، پرداخته می شود. این نمودارها نشان می دهند که در هر موقعیت مکانی، میزان نیرو با چه شیبی در حال تغییر بوده است. نهایتاً این منجر به شناختی از میزان تغییرات ناگهانی اندازه و راستای نیروی وارده بر سازه می شود. شکل (۲۰) تغییرات نیرو بر حسب زمان را در جهت X و Z نشان می دهد. این داده ها در θ های مختلف و راستای $\alpha=0^\circ$ ارائه شده اند. نتایج مشخص کرده است که به طور کلی، سازه در $\theta=90^\circ$ و در نسبت سرعت انتقال بالاتر ($V_R=0.12$)، ضربه بیشتری را دریافت کرده؛ ولیکن در $V_R=0.06$ ، مدل تحت نوسانات نیرویی شدیدتری بوده که متعاقباً منجر به لرزش شدیدتری می شود. با افزایش زاویه θ ، مشاهده می شود که این اختلاف بین دو سرعت موجود، به مقدار بسیاری کاسته شده است. همچنین می توان دریافت که افزایش زاویه θ ، نوسانات ضربه وارده بر سازه در محدوده $X/D \geq 0.5$ را افزایش می دهد. این موضوع در هر دو سرعت انتقالی مورد بررسی، قابل مشاهده است. داده های ارائه شده در جهت Z نشان می دهند که همچون حالت قبل، مدل در $\theta=90^\circ$ ، نوسانات ضربه متعددی را در نسبت سرعت انتقالی $V_R=0.06$ ، تحمل کرده است. در عین حال، در نسبت سرعت $V_R=0.12$ ، علی رغم کمتر بودن نوسانات ضربه، شیب تغییرات نیرو نسبت به سرعت انتقالی $V_R=0.06$ ، شدیدتر بوده و به سازه ضربات قوی تری وارد شده است. علاوه بر موارد فوق، می توان گفت که قوی ترین ضرباتی که به سازه در طول مسیر این طوفان وارد می شود، در راستای X ، در $X/D=-0.7$ و $\theta=120^\circ$ بوده و در جهت Z ، در $X/D=-0.9$ و در $\theta=105^\circ$ بوده است. هر دوی این ضربات در نسبت سرعت انتقالی $V_R=0.12$ به سازه وارد شده اند. بطور کلی این موضوع بیان می کند که قوی ترین ضربات، کمی بعد از رسیدن جریان و همچنین بعد از عبور کامل جریان اتفاق

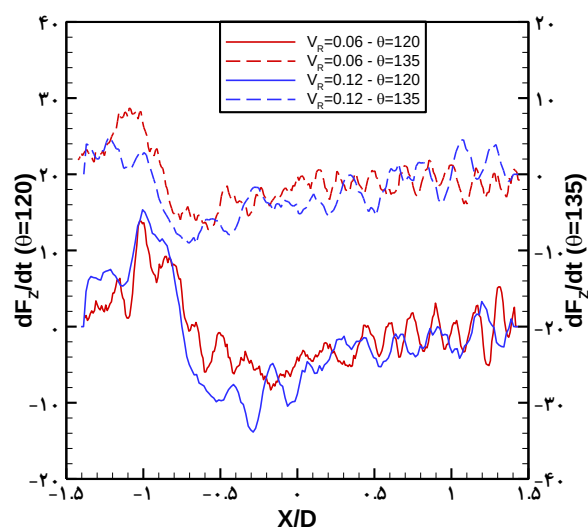
شکل (۲۲) نمایش دهنده میزان ضریب نیرو بر روی مدل در حالت $\alpha=45^\circ$ است که در دو راستای X و Z و همچنین θ های مختلف اندازه گیری شده است. در این داده ها مشخص است که نمودار نیرو در راستای X ، بازه تغییرات کمتری نسبت به همین داده ها در $\alpha=0^\circ$ داشته، در عین حال که تفاوت چندانی در رفتار این نمودار با نمودار ضریب نیرو در راستای X و در حالت $\alpha=0^\circ$ مشاهده نمی شود. بطور میانگین، حدود 50% بازه تغییرات نیرو در این راستا کاهش یافته است. در راستای Z ، این کاهش بازه در محدوده نقاطی که تحت نیروی فشاری قرار داشته اند، بیشتر بوده و در نقاط تحت نیروی مکشی کمتر مشاهده شده است. در این راستا، حدود 20% کاهش در بازه تغییرات مشاهده می شود. این نتایج، مشخص می کنند که نیرو کل وارد بر سازه نیز، در راستای $\alpha=45^\circ$ ، با کاهش بازه تغییرات مواجه خواهد شد که عاملی بر افزایش ایمنی این سازه در برابر جریانات طوفان فرو وزشی می باشد.



شکل ۲۱ الف- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در $\alpha=45^\circ$ و $V_R=0.12$ در ضلع رو به جریان



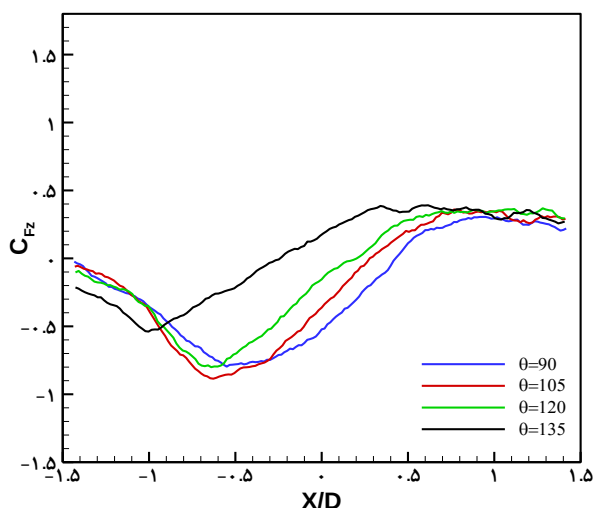
شکل ۲۱ ب- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در $\alpha=45^\circ$ و $V_R=0.12$ در ضلع سقف



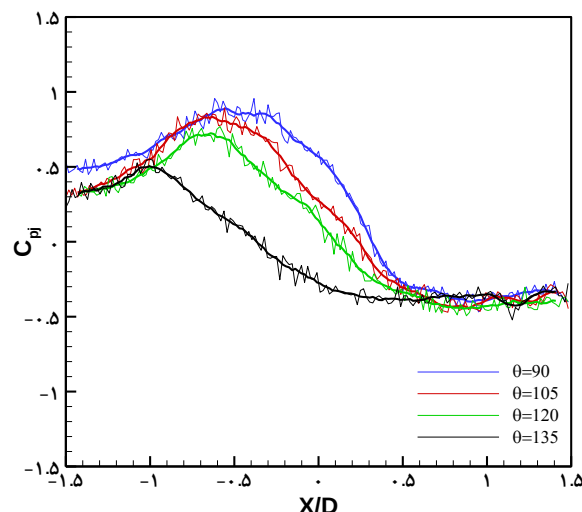
شکل ۲۰ د- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$
 $dF_z/dt - \theta=120^\circ$ و 135°

۴-۶- بررسی اثرات زوایه قرارگیری مدل مکعب شکل استاندارد نسبت به جریان سطحی

در ادامه اثرات زوایه قرارگیری مدل نسبت به جریان سطحی مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایشات نیز در دو سرعت جابه جایی $V_R=0.06$ و $V_R=0.12$ و در θ های متفاوت صورت پذیرفته است. شکل (۲۱) این داده ها را نمایش می دهد. با توجه به داده های ارائه شده و مقایسه آن ها با $\alpha=0^\circ$ ، می توان دریافت که مدل در ضلع رو به جریان در زوایای θ مختلف، تحت فشار کمتری قرار می گیرد. در ضمن، تفاوت هایی در رفتار نمودارهای ضریب فشار در ابتدای مسیر مشاهده می شود که نشان از کمتر بودن فشار در شروع حرکت نسبت به ضلع رو به جریان در $\alpha=0^\circ$ دارد. در سقف مدل، نوع تغییرات فشار، همچون حالت $\alpha=0^\circ$ بوده با این تفاوت که بازه تغییر فشار کوچکتر می باشد. در ضلع پشت به جریان تا $X/D=+0.5$ می توان به شباهت دو نمودار مربوطه به این ضلع در $\alpha=0^\circ$ و $\alpha=45^\circ$ پی برد، ولیکن این اختلاف ها در $X/D \leq +0.5$ ، بیشتر نمایان می شود به طوری که در هر زاویه θ ، بعد از رسیدن نمودار ضریب فشار به مقدار حداکثر خود، ضریب فشار کاهش یافته است. با مقایسه داده های دو نسبت سرعت انتقالی 0.06 و $V_R=0.12$ ، نتیجه حاصل شد که بین داده های این دو نسبت سرعت انتقالی، شباهت رفتاری گسترده ای وجود دارد، که نتایج مشابهی را ارائه می کنند. داده سقف $V_R=0.06$ به عنوان نمونه ارائه شده است.

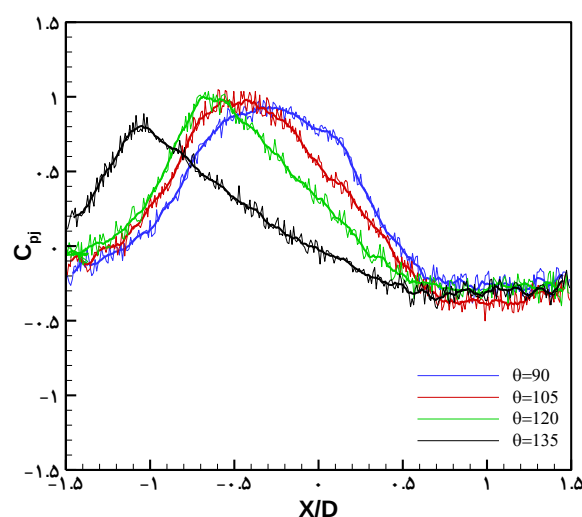


شکل ۲۲ ب- ضرایب نیرو در $\alpha=45^\circ$ و θ های متفاوت
 $C_{Fz} - V_R=0/12$

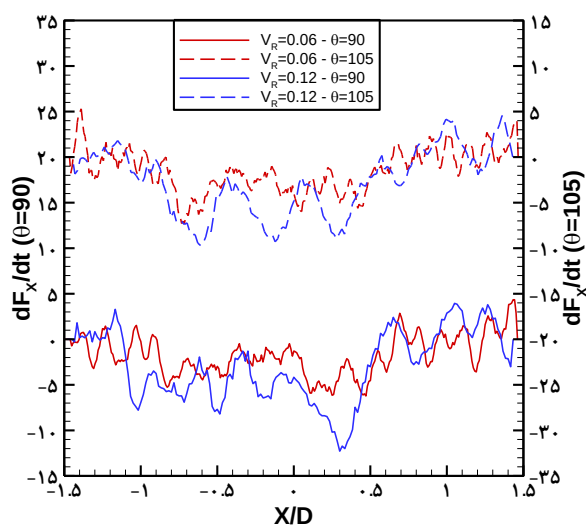


شکل ۲۱ ج- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت
 در $V_R=0/12$ و $\alpha=45^\circ$ ضلع پشت به جریان

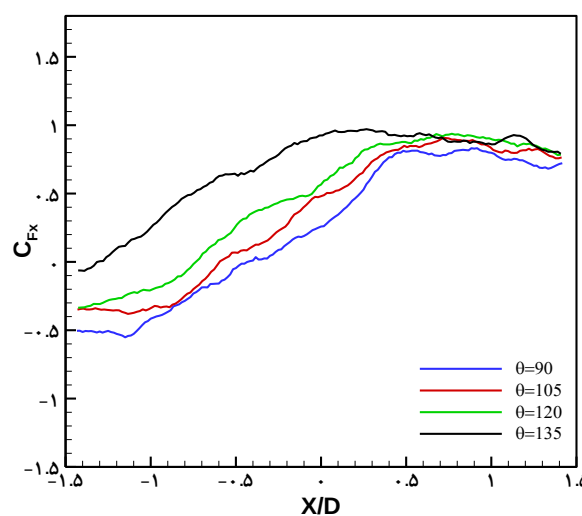
در شکل (۲۳)، با بررسی تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای $\alpha=45^\circ$ و راستای نیروی X ، می توان پی برد که قرارگرفتن سازه در این حالت، باعث می شود که نوسانات ضربه و قدرت ضربات، به مقدار بسیاری نسبت به حالت $\alpha=0^\circ$ ، کاهش یابد. این کاهش در شدت ضربات وارده بر سازه و تعداد آن، باعث می شود که سازه بار کمتر و یکنواخت تری را تحمل کند، که عاملی بر افزایش ایمنی سازه در برابر این جریان می باشد. در راستای Z این کاهش بار وارده بر سازه تکرار شده، که تأثیر راستای $\alpha=45^\circ$ را، حتی در این جهت نیز نشان می دهد. این کاهش شیب و نوسانات نیرو در حالی اتفاق می افتد که رفتار این داده ها در دو راستای 45° ، $\alpha=0^\circ$ ، به یکدیگر شبیه بوده است.



شکل ۲۱ د- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در
 $V_R=0/06$ و $\alpha=45^\circ$ در ضلع سقف

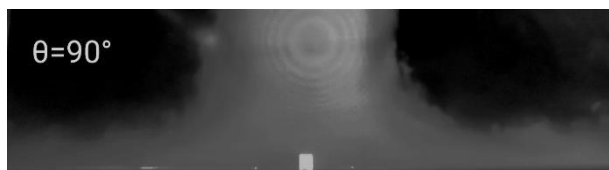


شکل ۲۳ الف- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$
 $dF_x/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۲۲ الف- ضرایب نیرو در $\alpha=45^\circ$ و θ های متفاوت
 $C_{Fx} - V_R=0/12$

شد. این تصویر به درک بهتر و مقایسه جریان طوفان فرو وزشی در سطوح شیب‌دار و غیر شیب‌دار کمک می‌کند. در این تصاویر مشخص است که مدل در $\theta=90^\circ$ ، به‌نوعی در مرکز ریزش جریان حبس شده است و باعث می‌شود در این نقطه، تمام اضلاع آن تحت فشار قرار گیرند. در عین حال در $\theta=135^\circ$ ، مشخص شده است که بیشترین فشار به ضلع رو به جریان وارد می‌شود، که این موضوع عامل ایجاد اختلاف فشار در ضلع رو به جریان با ضلع سقف و ضلع پشت به جریان است.



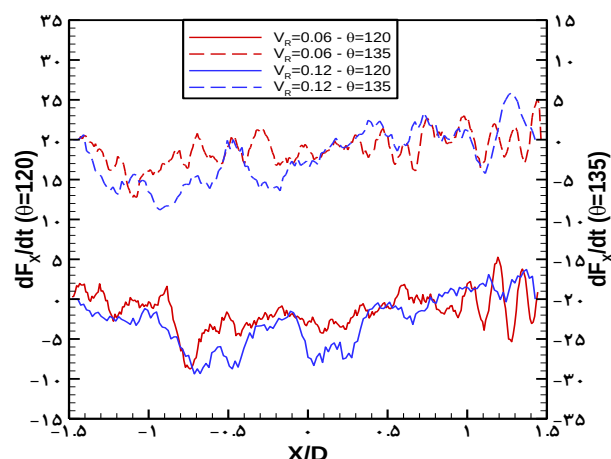
شکل ۲۴ الف- مشاهده جریان طوفان فرو وزشی در زاویه برخورد $\theta=90^\circ$



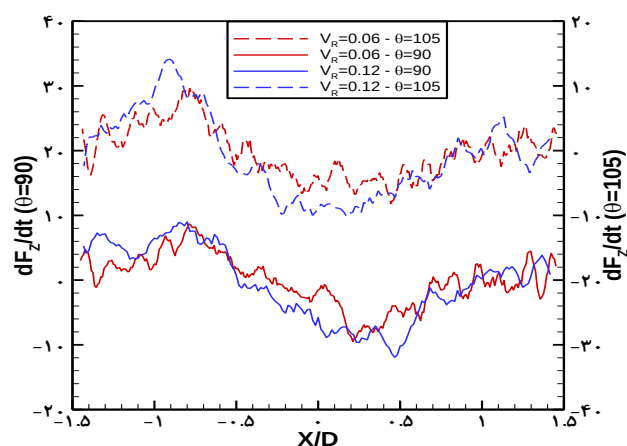
شکل ۲۴ ب- مشاهده جریان طوفان فرو وزشی در زاویه برخورد $\theta=135^\circ$

۵- نتیجه‌گیری

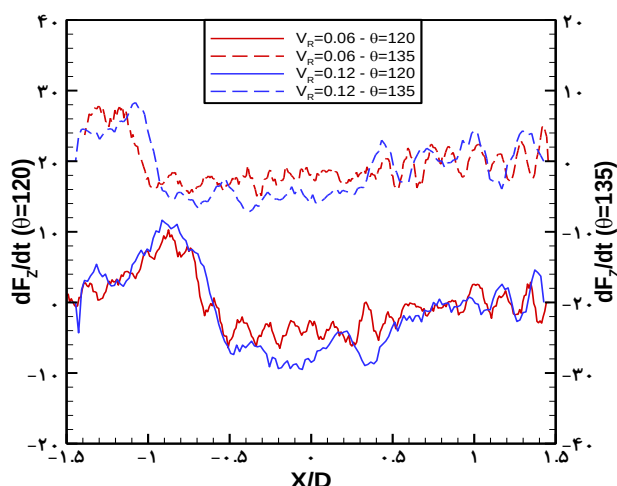
در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیرات برخورد طوفان فرو وزشی در زوایا و راستاهای متفاوت و به‌صورت دینامیکی، بر روی مدل مکعب شکل پرداخته شد. همچنین با استفاده از یک سیستم انتقالی، اثرات دینامیکی این طوفان در محدوده شعاعی $X/D=\pm 1/5$ و در دو نسبت سرعت انتقالی $V_R=0/06$ و $V_R=0/12$ بررسی شده است. نتایج نشان داد که افت سرعت طوفان فرو وزشی در فاصله بین محل ریزش جریان تا سطح صفحه، در $Z/D \geq 1/2$ ، بسیار کم بوده؛ در حالی که در مقادیر $Z/D \leq 0/8$ ، سرعت به شکل خطی کاهش یافته و تا رسیدن به سطح صفحه، به صفر میل کرده است. این نتایج نشان داد که قوی‌ترین ضربات بلافاصله بعد از عبور طوفان از روی سازه اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، افزایش نسبت سرعت انتقالی طوفان، باعث قوی‌تر شدن ضربات وارده بر سازه می‌شود. برخلاف جریان‌ات معمول لایه مرزی، با عبور طوفان‌های فرو وزشی از روی سازه، جهت نیروی اعمالی وارد بر سازه نیز برعکس می‌شود. در بررسی میدان فشار استاتیک این جریان می‌توان متوجه شد که افزایش نسبت سرعت انتقالی و زاویه برخورد



شکل ۲۳ ب- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$
 $dF_x/dt - \theta=120^\circ$ و 135°



شکل ۲۳ ج- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$
 $dF_z/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۲۳ د- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$
 $dF_z/dt - \theta=120^\circ$ و 135°

در شکل (۲۴) به مشاهده جریان ایجاد شده توسط دمنده مذکور در $X/D=0$ و در دو زاویه $\theta=90^\circ$ و $\theta=135^\circ$ پرداخته

[2] Sadeghi, A. H., Hojaji, M., and Hosseini, J., "Experimental investigation of density of surface roughness elements based on boundary layer wind flow classification in wind tunnel", *21st International Conference on Iranian Aerospace*, (2023). (in Persian فارسی)

[3] Esmailzadeh, M., Hojaji, M., and Hosseini, J., "Experimental investigation of the effects of the base point distance from the surface roughness elements on the scaling of the boundary layer in the wind tennel", *21st International Conference on Iranian Aerospace*, (2023). (in Persian فارسی)

[4] Raeisi, S., Hojaji, M., and Hosseini, J., "The effect of changing the distance of roughness elements from vortex generators in determining the scale of boundary layer wind simulation", *21st International Conference on Iranian Aerospace*, (2023). (in Persian فارسی)

[5] Romanic, D., Nicolini, E., Hangan, H., Burlando, M., and Solari, G., "A novel approach to scaling experimentally produced downburst-like impinging jet outflows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, DOI: 10.1016 /j.jweia. 2019.104025, Vol. 196, (2020).

[6] Zhang, Y., Hu, H., and Sarkar, P. P., "Comparison of microburst-wind loads on low-rise structures of various geometric shapes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 133, pp. 181-190, DOI: 10.1016/j.jweia. 2014.06.012, (2014).

[7] Hjelmfelt, M. R., "Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 27, No. 8, pp. 900-927, (1988).

[8] Letchford, C., Mans., and Chay, M., "Thunderstorms their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel) ", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 12, pp. 1415-1433, (2002).

[9] Fujita, T. T., "The Downburst: Microburst and Macrobust", *SMRP Report Paper 210*, The University of Chicago, Chicago, (1985).

[10] Chay, M., and Letchford, C., "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst—Part A: stationary downburst observations", *Journal of wind engineering and industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 7, pp. 711-732, (2002).

[11] Chen, B., Cheng, H., Kong, H., Chen, X., and Yang, Q., "Interference effects on wind loads of gable-roof buildings with different roof slopes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 189, pp. 198-217, (2019).

جریان فروزشی با سطح (θ) ، قله نمودار ضریب فشار را از نقطه مرکزی فرود جریان $(X/D=0)$ به سمت پایین دست جریان (X/D) های منفی) متمایل کرده است. همچنین افزایش یافتن زاویه θ موجب کاهش بازه تغییرات ضریب فشار شده است.

در بررسی ضرایب نیرو در شرایطی که زاویه جریان سطحی نسبت به سازه (α) برابر صفر می‌باشد، مشاهده شد که با افزایش زاویه θ ، بازه تغییرات نیرو را کاهش یافته و نیرو وارد شده بر سازه با شیب کندتری تغییر می‌کند. به بیان دیگر نصب سازه‌ها در زمین‌های شیب‌دار و دامنه‌ها بر کاهش نیرو ها و ضربات وارده بر سازه‌ها تأثیرگذار بوده و ایمنی سازه را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه α باعث کاهش بازه تغییرات فشار و نیرو (حدود ۲۵٪) بر روی سازه شده است. بعلاوه افزایش زاویه α باعث می‌شود که نوسانات ضربه و همچنین قدرت ضربات وارده بر سازه، در هر دو جهت مورد بررسی به صورت چشمگیری نسبت به حالت $\alpha=0^\circ$ ، کاهش یابد. نصب سازه‌ها در راستای $\alpha=45^\circ$ عامل بسیار مؤثریست تا نیروی وارده از سوی این جریان به سازه کاهش یابد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	مساحت هر المان (m^2)
C_F	ضریب نیرو
C_P	ضریب فشار
P	فشار کل (Pa)
P_{atm}	فشار اتمسفر (Pa)
S_{ref}	ارتفاع مدل در واحد عمق آن (m)
Tu	شدت آشفتگی
$\bar{U}$	میانگین سرعت ثبت شده (m/s)
u_i	سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده (m/s)
$\dot{u}_i$	مولفه اغتشاشی سرعت (m/s)
V_{ref}	سرعت جریان (m/s)

علائم یونانی

ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
α	راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان
θ	زاویه قرارگیری مدل نسبت به جریان

۶- مراجع

[1] ASCE., Minimum design loads for buildings and other structures, *American Society of Civil Engineers*, pp. 7-98, (1998).

- [21] Loredou-Souza, A. M., Lima, E. G., Vallis, M. B., Rocha, M. M., Wittwer, A. R., and Oliveira, M. G. K., "Downburst related damages in Brazilian buildings: Are they avoidable? ", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 185, pp. 33-40, DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.022, (2018).
- [22] Hojaji, M., Asgari, N., Hosseini, J., Rezvani, A., and Sharifzadeh, B., "Experimental study of the effect of impact angle of microburst on a cubic structure – Part A: Stationary microburst observation", *Journal of Mechanical Engineering Amirkabir*, DOI: 10.22060/mej.2022.20500.7250, (2022). (in Persian فارسی)
- [23] Chay, M. T., and Letchford, C. W., "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst—Part A: stationary downburst observations", *Journal of wind engineering and industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 7, pp. 711-732, (2002).
- [24] Wilcox, D. C., "Turbulence modeling for CFD", *DCW industries La Canada*, CA, Vol. 2, pp. 103-217, (1998).
- [25] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., "Numerical and Experimental Study of Characteristics of the Wake Produced Behind an Elliptic Cylinder with Trip Wires", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, DOI: 10.1007/s40997-020-00373-6, (2021).
- [26] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., and Boloki, M., "An Experimental Investigation of the Effects of Helical Strakes on the Characteristics of the Wake around the Circular Cylinder", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, DOI: 10.1007/s40997-022-00494-0, (2022).
- [27] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136, pp. 1-19, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01071-1, (2021).
- [12] Fujita, T. T., "Andrews AFB Microburst", *SMRP Report Paper 205*, The University of Chicago, Chicago, (1983).
- [13] Iida, Y., and Uematsu, Y., "Numerical study of wind loads on buildings induced by downbursts", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 191, pp. 103-116, D: 10.1016/j.jweia.2019.05.018, (2019).
- [14] Romanic, D., and Hangan, H., "Experimental investigation of the interaction between near-surface atmospheric boundary layer winds and downburst outflows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 205, (2020).
- [15] Aboutabikh, M., Ghazal, T., Chen, J., Elgamal, S., and Aboshosha, H., "Designing a blade-system to generate downburst outflows at boundary layer wind tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 186, pp. 169-191, (2019).
- [16] Asano, K., Iida, Y., and Uematsu, Y., "Laboratory study of wind loads on a low-rise building in a downburst using a moving pulsed jet simulator and their comparison with other types of simulators", *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 184, pp. 313-320, (2019).
- [17] Wu, Z., Iida, Y., and Uematsu, Y., "The flow fields generated by stationary and travelling downbursts and resultant wind load effects on transmission line structural system," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 210, (2021).
- [18] Nicholls, M., Pielke, R., and Meroney, R., "Large eddy simulation of microburst winds flowing around a building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 46-47, pp. 229-237, DOI: 10.1016/0167-6105(93)90288-Y, (1993).
- [19] Letchford, C., and Chay, M. T., "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. Part B: Moving downburst observations", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 733-753, 07/01 DOI: 10.1016/S0167-6105(02)00163-0, (2002).
- [20] Lombardo, F. T., Mason, M. S., and A de Alba, A. Z., "Investigation of a downburst loading event on a full-scale low-rise building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 182, pp. 272-285, DOI: 10.1016/j.jweia.2018.09.020, (2018).

تحلیل عددی میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیسی تحت تحریک اتفاقی

چکیده: سامانه های میکرو بازایاب انرژی، فناوری جدیدی هستند که جایگزین باتری ها و وسایل ذخیره انرژی که دارای محدودیت می باشند، می شوند. عدم نیاز به جایگزینی یا شارژ دوباره آن ها به صورت دوره ای، حجم و وزن خیلی کم و نیز دقت بالا از خصوصیات سامانه های میکرو بازایاب انرژی می باشد. در این مقاله، سامانه میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی از نوع نویز سفید بررسی می شود. مدل مکانیکی در نظر گرفته شده برای میکرو بازایاب انرژی به صورت تیر یک سر گیردار است. در این سامانه، شتاب پایه به عنوان ورودی میکرو بازایاب انرژی بوده و ولتاژ القا شده در سیم پیچ به عنوان خروجی سامانه می باشد. تحریک پایه یک فرآیند اتفاقی نویز سفید گوسی و ایستای ضعیف فرض می شود. با توجه به معادله حرکت مکانیکی سیستم می توان تابع پاسخ فرکانسی را بدست آورد. هدف این پژوهش، محاسبه متوسط توان تولید شده در میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی می باشد. تحلیل تنش با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار المان محدود و حل عددی انجام شده و صحت نتایج تأیید می شود. در نهایت تأثیر پارامترهای میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولید شده بررسی می شود.

واژه های راهنما: میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس، ارتعاشات اتفاقی، تابع پاسخ فرکانسی، نویز سفید، سیستم های میکرو الکترو مکانیکی، تراکم طیفی، متوسط توان

محمد مهدی نظری

دانشجوی دکتری، دانشکده
مهندسی مکانیک و انرژی،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

محسن بهرامی

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

عباس رهی*

استادیار، دانشکده مهندسی
مکانیک و انرژی،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

Numerical analysis of micro electromagnetic energy harvester under random excitation

Mohammad Mahdi Nazari
Ph.D. Student, Faculty
of Mechanical and
Energy Engineering,
Shahid Beheshti
University, Tehran

Mohsen Bahrami
Professor, Faculty of
Mechanical Engineering
Amirkabir University of
Technology, Tehran

Abbas Rahi*
Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
and Energy Engineering,
Shahid Beheshti
University, Tehran

Abstract: Micro energy harvester systems are a new technology that replaces batteries and energy storage devices that have limitations. Not needing to replace or recharge them periodically, very small volume and weight, as well as high accuracy are the characteristics of the micro energy scavenger system. This paper investigates the electromagnetic micro energy harvester system under random white noise excitation. The mechanical model considered for the micro energy harvester is in the form of a beam. In this system, the base acceleration is the input of the micro energy recovery and the induced voltage in the coil is the output of the system. The base excitation is assumed to be a weakly stationary Gaussian white noise random process. According to the mechanical motion equation of the system, the frequency response function can be obtained. The aim of this research is to calculate the mean power produced in the electromagnetic micro energy harvester under random excitation. Stress analysis is done using simulation in finite element software and numerical solution, and the results' correctness is confirmed. Finally, the effect of the electromagnetic micro energy scavenger on the average parameters power produced is investigated.

Keywords: Micro electromagnetic energy harvester, Random vibration, Frequency response function, White noise, Microelectromechanical systems, Spectral density, Mean power

۱- مقدمه

مکعب می‌باشد. این میکروبازیاب انرژی پیشنهادی جابگزین مناسبی برای منابع با طول عمر محدود است.

کائو و همکاران [۵] یک بازیاب انرژی الکترومغناطیسی با غلظت‌های دوتایی برای ذخیره انرژی حاصل از قدم زدن انسان در محیط روسازی راه‌آهن با سرعت بالا را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی و تجربی آنها نشان داد که می‌توان حداکثر توان خروجی $۴۶۶/۶$ میلی وات را تحت فرکانس ارتعاش ۵ هرتز و جابجایی ۱۰ میلی‌متر به دست آورد. همچنین نشان دادند که چرخ فلایویل اینرسی می‌تواند پایداری سیستم را افزایش دهد و در مقایسه با سیستم بدون فلایویل، به بهبود میانگین توان خروجی تا $۴۹/۴۵$ درصد دست یابند. بای و همکاران [۶] یک بازیاب انرژی هیبریدی الکترومغناطیس-تریبولکتريک با راندمان بالا را بر اساس تبدیل ارتعاش به چرخش پیشنهاد کردند. بازیاب انرژی پیشنهادی شامل یک ژنراتور الکترومغناطیسی چرخشی، مکانیزم انتقال حرکت و نانو ژنراتور تریبولکتريک ارتعاش متقابل است. نتایج تجربی آنها نشان داد که راندمان تبدیل انرژی این بازیاب می‌تواند تحت فرکانس‌های ارتعاشی چندگانه به بیش از ۷۰ درصد برسد. این بازیاب پیشنهادی، توان خروجی بالاتری در مقایسه با بازیاب‌های انرژی ارتعاشی متقابل سنتی دارد. وانگ و همکاران [۷] دینامیک غیرخطی و تحلیل دوشاخگی را برای یک بازیاب انرژی الکترومغناطیس با آهنربای غلظشی مورد مطالعه قرار دادند. بازیاب انرژی القایی الکترومغناطیس مورد بررسی دارای آهنربای غلظشی چند پایه برای جذب انرژی از یک محدوده فرکانس وسیع است. این پژوهش، روش جدیدی از تفکر برای طراحی بازیاب‌های انرژی غیرخطی را ارائه داد.

اردونز و همکاران [۸] یک بازیاب انرژی ارتعاشی الکترومغناطیسی با کارایی بالا بر اساس آهنرباهای حلقه‌ای را پیشنهاد و بررسی کردند. آنها بهینه‌سازی هندسی بازیاب پیشنهادی را به عنوان تابعی از شعاع داخلی، ارتفاع و قطر سیم سیم‌پیچ، برای افزایش توان تولیدی آن دادند. حداکثر توان خروجی شبیه سازی شده برای بازیاب انرژی بهینه شده $۳/۶۱$ میلی وات در فرکانس $۶۱/۷$ هرتز است که به طور قابل توجهی بالاتر از بازیاب‌های انرژی با کاربردهای مشابه است. حسنی و رحقی [۹] بهینه‌سازی یک بازیاب انرژی الکترومغناطیسی برای افزایش عملکرد تولید برق مورد مطالعه قرار دادند. بهینه‌سازی برای پارامترهای کنترلی، از جمله تعداد چرخش سیم‌پیچ‌ها، پیکربندی سیم‌پیچ و ابعاد آهن‌ربا انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که بهینه‌سازی انجام شده منجر به بهبود قابل توجهی در توان خروجی بازیاب انرژی بهینه شده نسبت به مطالعات قبلی دارد. وانگ و همکاران [۱۰] یک بازیاب انرژی ارتعاشی

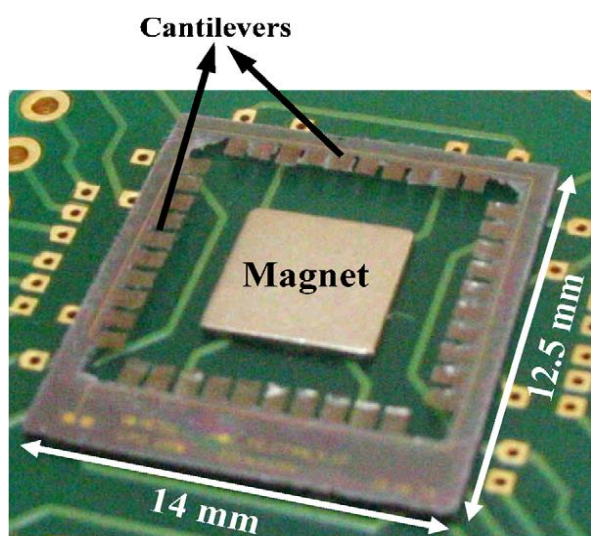
امروزه توجه بسیار بالایی روی فناوری‌های دریافت، جذب و ذخیره انرژی هم از نظر صنعتی و هم از نظر دانشگاهی شده است. به طور کلی بازیاب انرژی وسیله‌ای است که انرژی را که در حالت معمول به هدر می‌رود، جذب و ذخیره نموده و در جای مناسب از آن بهره‌برداری می‌کند. با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی استفاده از میکروبازیاب‌های انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سامانه میکروبازیاب‌های انرژی قادر به ذخیره انرژی حاصل از حرکات محیطی و ارتعاشات مکانیکی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی هستند که این امر از طریق سه مکانیزم اصلی الکترومغناطیس، الکترواستاتیک و پیژو الکتريک صورت می‌گیرد.

ساری و همکاران [۱] یک میکرو ژنراتور الکترومغناطیس برای تبدیل ارتعاشات محیطی پهن باند را به توان الکتریکی، مورد مطالعه قرار دادند. این میکروبازیاب انرژی قادر به تولید توان ثابت در محدوده فرکانس از پیش تعیین شده است. این میکروبازیاب انرژی، توان $۰/۴$ میکرو وات را با ولتاژ ۱۰ میلی ولت در محدوده فرکانس ارتعاش خارجی $۴/۲$ تا ۵ کیلوهرتز تولید می‌کند که باند ۸۰۰ هرتز را پوشش می‌دهد. ساری و همکاران [۲] طراحی و بهینه‌سازی یک میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس برای تبدیل ارتعاشات به جریان الکتریکی را مورد ارزیابی قرار دادند. طرح آنها شامل چیدمانی از تیرهای یک سر گیردار از جنس پارلین است که سیم‌پیچ‌هایی از جنس طلا روی آن پیچیده می‌شود و آهن‌ربای ثابتی هم مقابل تیرهای یک سر گیردار قرار دارد. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد دور سیم‌پیچ و افزایش فرکانس طبیعی تیر یک سر گیردار می‌توان توان تولیدی را زیاد کرد. هولم و همکاران [۳] یک بازیاب انرژی الکترومغناطیس متشکل از یک لوله با دو آهنربای ثابت و دو سیم پیچ شامل ساختار دمبلی شناور را در نظر گرفتند. حداکثر توان تولید شده توسط این بازیاب $۱/۰۴$ میلی وات است که در $۸/۵$ هرتز در جاروب فرکانس نزولی که حداکثر شتاب بازیاب $۰/۸۷$ شتاب گرانش زمین است، رخ می‌دهد. بهار و همکاران [۴] یک میکرو ژنراتور الکترومغناطیسی متشکل از یک فنر و یک سیم پیچ مسطح و همچنین یک آهنربا و هسته مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. یک ساختار نوآورانه برای هسته مغناطیسی برای به حداکثر رساندن توان خروجی پیشنهاد دادند. نتایج آنها نشان داد که توان خروجی این میکروبازیاب تا $۱/۰۳۴۴$ میکرووات افزایش یافته و چگالی توان آن $۲/۹۴$ میکرووات بر سانتی متر

اتفاقی از نوع نويز سفید مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تیر یک سر گیردار به عنوان مدل مکانیکی میکروبازایاب انرژی در نظر گرفته می‌شود. در این میکروبازایاب، شتاب پایه به عنوان ورودی و ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ به عنوان خروجی است. با محاسبه تابع پاسخ فرکانسی، متوسط توان تولید شده در میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی بدست می‌آید. تحلیل تنش میکروبازایاب با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس انجام شده و با حل عددی صحه‌گذاری نتایج تأیید می‌شود. در انتها تأثیر پارامترهای میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولید شده بررسی می‌شود.

۲- مدل سازی میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس

میکروبازایاب‌های انرژی الکترومغناطیس قادر هستند ارتعاشات مکانیکی و حرکات محیطی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند و به صورت توان الکتریکی ذخیره نمایند. در شکل (۱)، یک نمونه واقعی میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس مشاهده می‌شود.



شکل ۱ نمونه واقعی میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس [۱]

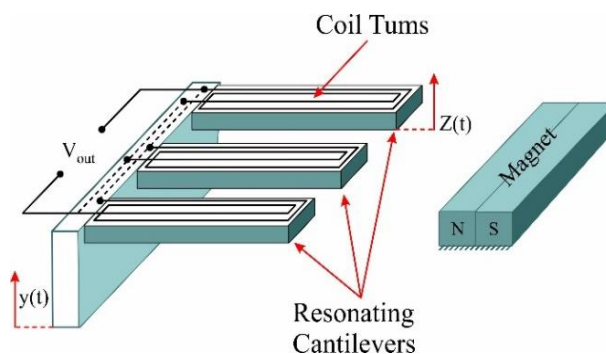
میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس شامل سیم‌پیچ‌هایی است که روی پایه‌ها پیچیده شده و قادر هستند نسبت به آهن‌ربای ثابت حرکت کنند. شکل (۲)، میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس را نشان می‌دهد.

شکل (۳)، مدل الکتریکی یک میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس را نشان می‌دهد که به صورت یک تیر یک سرگیردار می‌باشد که سیم‌پیچ روی آن پیچیده شده است و یک بار الکتریکی را هدایت می‌کند. فرض می‌شود که اندوکتانس سیم‌پیچ در مقایسه با مقاومت داخلی سیم‌پیچ کوچک است.

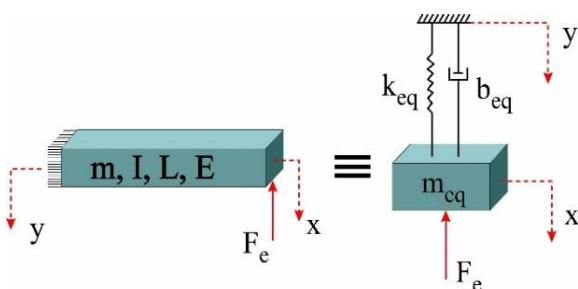
الکترومغناطیسی را با استفاده از یک مکانیزم مبتکرانه برای تبدیل ارتعاش به چرخش بر اساس یک آرایه آهنربا پیشنهاد کردند. یک آهنربا که در امتداد یک مسیر مستقیم ارتعاش می‌کند، گشتاوری را بر روی یک استوانه قابل چرخش که با آرایه‌ای از آهنربا ثابت شده است، القا می‌کند و استوانه را به چرخش سوق می‌دهد و در نتیجه با انتقال الکترومغناطیسی، برق تولید می‌شود. پژوهش آنها نشان داد که بازایاب انرژی ارتعاشی مبتنی بر آرایه مغناطیسی پیشنهادی در تأمین انرژی الکتریکی کم‌توان مؤثر است. آلوئیسوس و همکاران [۱۱] یک بازایاب انرژی جنبشی از فعالیت‌های حرکتی بدن انسان با استفاده از ژنراتور الکترومغناطیسی را بررسی کردند. آنها برای تولید انرژی حاصل از حرکات بدن انسان از ژنراتورهای میکرو الکترومغناطیسی و سروموتورها استفاده کردند. انرژی حاصل از حرکت بدن انسان با استفاده از سنسور میکروالکترومغناطیسی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. محل قرارگیری سنسور برای ذخیره انرژی را قسمت بالایی ساق پا و مچ دست در نظر گرفتند.

فونگ و همکاران [۱۲] یک بازایاب انرژی ارتعاشی الکترومغناطیسی جدید با چگالی توان بالا و فرکانس پایین را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با افزایش سرعت نسبی بین سیم پیچ و اجزای آهنربا، به توان خروجی بالاتری رسیدند. ژانگ و همکاران [۱۳] یک بازایاب انرژی الکترومغناطیسی با راندمان بالا بر اساس آهنربای غلتشی را طراحی کردند که از طریق راه رفتن، توان الکتریکی ذخیره می‌کند. نتایج تجربی آنها نشان داد که با سرعت پیاده‌روی ۴ کیلومتر در ساعت، می‌توان توان متوسط ۰/۵ میلی‌وات را تولید کرد. کومار و همکاران [۱۴] طراحی و تحلیل یک بازایاب انرژی الکترومغناطیسی با استفاده از فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی را پیشنهاد کردند. این بازایاب انرژی را برای ذخیره انرژی از ارتعاشات محیطی با فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰ هرتز در نظر گرفتند. خان و همکاران رفتار غیرخطی یک بازایاب انرژی الکترومغناطیسی از نوع غشایی را تحت ارتعاشات هارمونیک و تصادفی را بررسی کردند. آنها بازایاب انرژی الکترومغناطیسی غشایی از جنس پلی دی متیل سیلوکسان را ساختند و از تحریک سینوسی سطح پایین و باند باریک تصادفی برای تولید انرژی الکتریکی بازایاب استفاده کردند. با بررسی پژوهش‌های انجام گرفته پیشین، مشاهده می‌شود که تاکنون کار خاص و جامعی در خصوص تحلیل میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی ارائه نشده است. همچنین تأثیر پارامترهای میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولیدی نیز بررسی نشده است. در این مقاله، یک میکروبازایاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک ارتعاشات

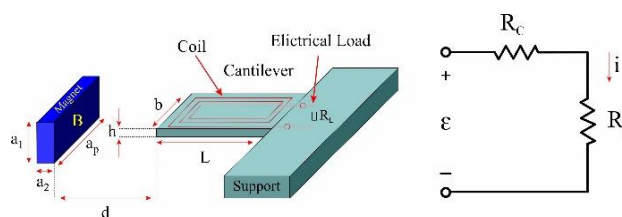
در این رابطه، B_r چگالی شار مغناطیسی باقیمانده است که $1/1$ تا $1/4$ تسلا برای آهن‌رباهای نوع NdFeB می‌باشد. a_p طول آهن‌ربا، a_1 ارتفاع آهن‌ربا، a_2 عرض آهن‌ربا و d فاصله از آهن‌ربا می‌باشد که در شکل (۳) مشاهده می‌شود. به منظور تعیین سرعت نسبی $\dot{z}$ ، باید یک مدل مکانیکی معادل برای بازیاب انرژی الکترومغناطیسی در نظر گرفته شود که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۲ میکرو بازیاب انرژی الکترومغناطیسی



شکل ۴ مدل مکانیکی معادل بازیاب انرژی الکترومغناطیسی



شکل ۳ مدل الکتریکی میکرو بازیاب انرژی الکترومغناطیسی

برای این بازیاب انرژی، با استفاده از قانون دوم نیوتن، معادله حرکت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$m_{eq}\ddot{z} + b_m\dot{z} + k_{eq}z + F_e = -m_{eq}\ddot{y} \quad (5)$$

که در آن b_m میرایی مکانیکی تولید شده از نیروی جریان هوا، نیروی فشاری هوا، تلفات تکیه‌گاهی و اصطکاک داخلی است که با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$b_m = \frac{\left(3\pi\mu b + \left(\frac{3}{4}\right)\pi b^2 \sqrt{2\rho_a \mu \omega}\right)m_{eq}}{\rho_a b^2 h} + \frac{\mu b^2 m_{eq}}{\rho_b g_0^3 h} + \frac{\eta}{\omega} k_{eq} + \frac{(0.23h^3)}{L^3} 2m_{eq}\omega_n \quad (6)$$

در رابطه بالا، μ ویسکوزیته هوا ($1/11 \times 10^{-5}$ Pa s)، ρ_a چگالی هوا ($1/3 \frac{kg}{m^3}$)، ρ_b چگالی تیر، h ضخامت تیر، g_0 فاصله بین تیر و دیوار صلب نزدیک، η ضریب میرایی سازه‌ای است که به وسیله خواص ماده تعیین می‌شود (5×10^{-6}) [۱۶]. ω فرکانس جابجایی نقطه نوک تیر و ω_n فرکانس طبیعی تیر یک سر گیردار می‌باشد. در رابطه (۶) دو ترم اول مرتبط با میرایی جریان هوا و فشار هوا هستند و از دو ترم دیگر بارزتر و برجسته‌تر هستند. همچنین m_{eq} و k_{eq} به ترتیب جرم معادل و سفتی

توان ایجاد شده به وسیله‌ی مقاومت بار R_L می‌تواند به صورت رابطه زیر بدست آید:

$$P = \frac{1}{2} i^2 R_L \quad (1)$$

در این رابطه، i جریان القا شده از طریق سیم‌پیچ و R_L مقاومت بار می‌باشد. جریان القایی i از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$i = \frac{\varepsilon}{R_L + R_C} \quad (2)$$

در رابطه بالا، R_C مقاومت سیم پیچ و ε نیروی محرکه القایی روی سیم‌پیچ است که برطبق قانون فارادی، ولتاژ القا شده روی سیم‌پیچ‌ها عبارت است از:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\left(\int \vec{B} \cdot d\vec{A}\right)}{dt} = -BL_p \dot{z} \quad (3)$$

در این رابطه، ϕ چگالی شار مغناطیسی، B شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا، L_p طول کاربردی سیم‌پیچ و $\dot{z}$ سرعت نسبی نقطه نوک پایه نسبت به آهن‌ربا می‌باشد. شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا عبارت است از [۱۵]:

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \left(\frac{a_1 a_2}{2d \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 4d^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{a_1 a_2}{2(d+a_p) \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 4(d+a_p)^2}} \right) \right) \quad (4)$$

روی متوسط توان تولید شده بررسی می‌شود. ورودی و خروجی میکروبازیاب انرژی عبارت است از:

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) &= e^{i\omega t} \\ z(t) &= H(\omega)e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (11)$$

با جایگزینی رابطه بالا در معادله حرکت میکروبازیاب انرژی، تابع پاسخ فرکانسی سیستم بدست می‌آید که نسبت ورودی به خروجی سیستم می‌باشد. تابع پاسخ فرکانسی سیستم که نشان‌دهنده رفتار دینامیکی سیستم می‌باشد، عبارت است از:

$$H(\omega) = \frac{-m_{eq}}{-m_{eq}\omega^2 + (b_m + b_e)i\omega + k_{eq}} \quad (12)$$

اگر تراکم طیفی ورودی یک اغتشاش سفید با مقدار ثابت s_0 باشد، در این صورت تراکم طیفی خروجی برابر است با:

$$S_{\ddot{y}}(\omega) = S_0 \quad -\infty < \omega < \infty \quad (13)$$

$$S_z(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{\ddot{y}}(\omega)$$

تراکم طیفی سرعت نسبی $\dot{z}$ نوک تیر یک سر گیردار نسبت به آهن‌ربا عبارت است از:

$$S_{\dot{z}}(\omega) = \omega^2 |H(\omega)|^2 S_{\ddot{y}}(\omega) \quad (14)$$

در نتیجه، متوسط مجذور سرعت نسبی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E[\dot{z}^2(t)] = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{-m_{eq}i\omega}{-m_{eq}\omega^2 + (b_m + b_e)i\omega + k_{eq}} \right|^2 d\omega \quad (15)$$

با استفاده از مرجع [۱۷] داریم:

$$\begin{aligned} I_n &= \int_{-\infty}^{\infty} |H_n(\omega)|^2 d\omega \\ H_n(\omega) &= \left\{ \frac{B_0 + (i\omega)B_1 + (i\omega)^2 B_2 + \dots + (i\omega)^{n-1} B_{n-1}}{A_0 + (i\omega)A_1 + (i\omega)^2 A_2 + \dots + (i\omega)^n A_n} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

با توجه به رابطه (۱۶) خواهیم داشت:

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_2(\omega)|^2 d\omega = \frac{\pi m_{eq}}{b_m + b_e} \quad (17)$$

بنابراین متوسط مجذور سرعت نسبی نوک تیر یک سر گیردار نسبت به آهن‌ربا عبارت است از:

$$E[\dot{z}^2(t)] = S_0 I_2 = \frac{\pi S_0 m_{eq}}{b_m + b_e} \quad (18)$$

معادل مدل مکانیکی در نظر گرفته شده برای بازیاب انرژی می‌باشند. فرکانس طبیعی مود اول خمشی عبارت است از:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = 3.57 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} \\ m_{eq} &= \frac{33}{140} m, \quad k_{eq} = \frac{3EI}{L^3} \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن m , L , E و I به ترتیب جرم، طول، مدول الاستیسیته و ممان اینرسی تیر یک سر گیردار می‌باشند. نیروی الکتریکی F_e در خلاف جهت حرکت تیر یک سر گیردار اثر می‌کند و می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\vec{F}_e = L_p \vec{i} \times \vec{B} = \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \dot{z} \quad (8)$$

در رابطه بالا، B میدان مغناطیسی آهن‌ربا، L_p طول سیم‌پیچ کاربردی، R_c مقاومت سیم‌پیچ و R_L مقاومت بار است. با جایگزینی رابطه (۸) در معادله حرکت تیر یک سر گیردار، معادله دیفرانسیل زیر بدست می‌آید:

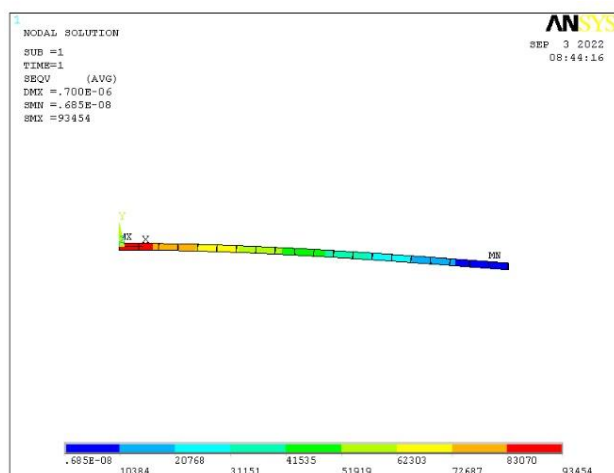
$$m_{eq}\ddot{z}(t) + (b_m + b_e)\dot{z}(t) + k_{eq}z(t) = -m_{eq}\ddot{y} \quad (9)$$

در این رابطه، میرایی الکتریکی b_e عبارت است از:

$$b_e = \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \quad (10)$$

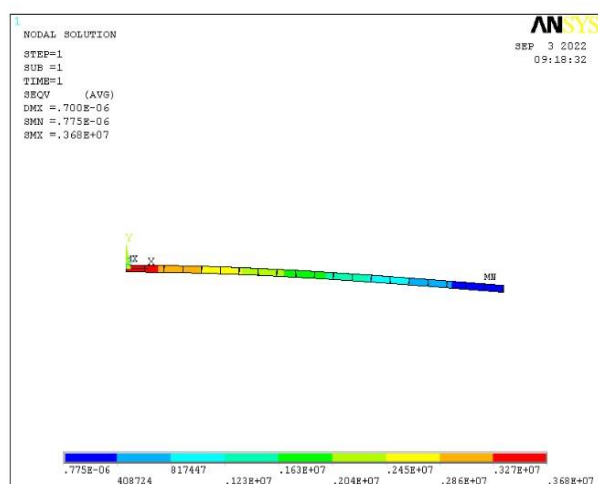
۳- تحلیل ارتعاشات اتفاقی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس

در این پژوهش، هدف تحلیل ارتعاشات اتفاقی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس تحت تأثیر تحریک اتفاقی از نوع نویز سفید می‌باشد. تحریک پایه، یک فرآیند اتفاقی نویز سفید گوسی و ایستای ضعیف فرض می‌شود. ورودی میکروبازیاب انرژی، شتاب پایه $\ddot{y}(t)$ و خروجی آن $z(t)$ ، جابجایی نسبی جرم معادل میکروبازیاب انرژی در نظر گرفته می‌شود. جابجایی نسبی جرم معادل باعث ایجاد جریان القایی $i(t)$ روی سیم‌پیچ شده و جریان القایی ایجاد شده، باعث تولید توان میکروبازیاب می‌شود. در نتیجه، متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی را محاسبه کرده و تأثیر پارامترهای میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر



شکل ۵ تحلیل تنش میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس از جنس پارلین

از تحلیل تنش شکل (۶) نتیجه می شود که بیشترین مقدار تنش برای ماده سیلیکون [۱ ۱ ۱] بیشتر از تنش تسلیم آن است. بنابراین با انجام آزمون مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس، تیر از جنس سیلیکون [۱ ۱ ۱] دچار شکست می شود. با توجه تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس در نرم افزار المان محدود، نتیجه می شود که ماده مورد استفاده تیر یک سر گیردار باید از جنس پارلین باشد.



شکل ۶ تحلیل تنش میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس از جنس سیلیکون [۱ ۱ ۱]

۵- ارائه نتایج و صحه گذاری

در جدول (۱)، مقادیر پارامترهای میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس مطابق با مرجع [۱] آمده است. ماده مورد استفاده در تیر یک سر گیردار از جنس پارلین می باشد.

متوسط مجذور نیروی محرکه القایی (ولتاژ القایی) روی سیم پیچ برابر است با:

$$E[\varepsilon^2(t)] = B^2 L_p^2 E[\dot{z}^2(t)] = \frac{\pi S_0 m_{eq} B^2 L_p^2}{b_m + b_e} \quad (19)$$

متوسط مجذور جریان القایی ایجاد شده از رابطه زیر بدست می آید:

$$E[i^2(t)] = \frac{E[\varepsilon^2(t)]}{(R_L + R_c)^2} = \frac{\pi S_0 m_{eq} B^2 L_p^2}{(b_m + b_e)(R_L + R_c)^2} \quad (20)$$

در نتیجه متوسط توان تولید شده میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس عبارت است از:

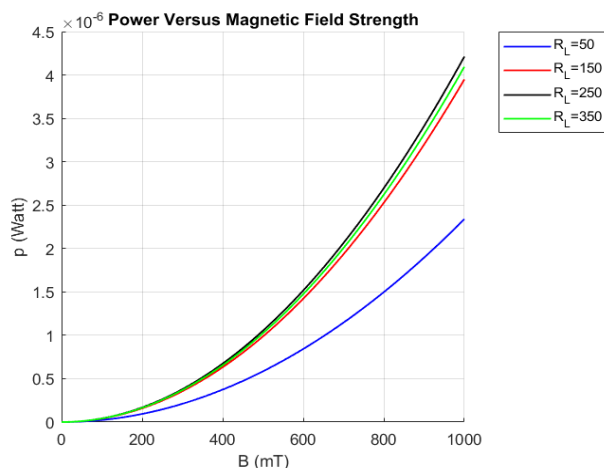
$$E[P] = \frac{1}{2} E[i^2(t)] R_L = \frac{\pi S_0 m_{eq} R_L B^2 L_p^2}{2(b_m + b_e)(R_L + R_c)^2} \quad (21)$$

۴- تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس

تحلیل تنش بر روی مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس برای حرکت تیر یک سر گیردار انجام می شود. مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس، یک تیر یک سر گیردار با ابعاد $15 \mu m \times 670 \mu m \times 890 \mu m$ است که انتهای آزاد تیر بر اثر میدان مغناطیسی دارای حرکت نسبی $0.7 \mu m$ می باشد. با استفاده از نرم افزار انسیس برای دو حالت که جنس تیر یک سر گیردار از پارلین و همچنین سیلیکون [۱ ۱ ۱] است، تحلیل تنش انجام می گیرد. شکل (۵) تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس از جنس پارلین را در نرم افزار المان محدود نشان می دهد.

با توجه به شکل (۵)، بیشترین مقدار تنش برابر 93454 Pa است که در سر گیردار تیر اتفاق می افتد. تنش تسلیم برای ماده پارلین با مدول الاستیسیته $3/5 \times 10^9 \text{ Pa}$ و ضریب پواسون 0.4 برابر 55 MPa می باشد که بیشتر از بیشترین مقدار تنش است و نتیجه گرفته می شود که در انجام آزمون مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس، تیر از جنس پارلین دچار شکست نمی شود. در شکل (۶)، تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو باز یاب انرژی الکترومغناطیس از جنس سیلیکون [۱ ۱ ۱] در نرم افزار انسیس مشاهده می شود.

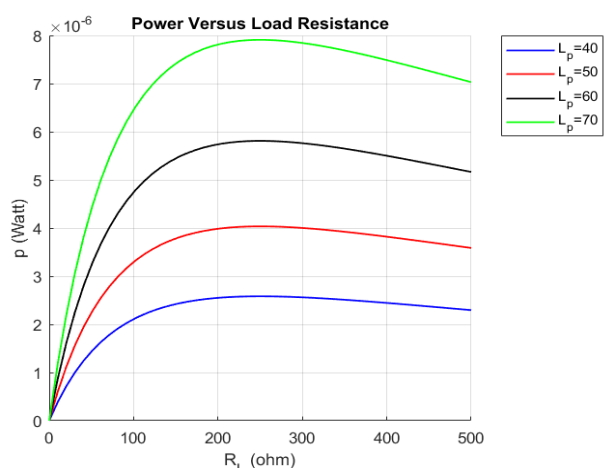
قرار می‌گیرد. شکل (۸)، تغییرات متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر حسب شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا در مقاومت بارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۸ تغییرات متوسط توان تولید شده بر حسب شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا در مقاومت بارهای مختلف

طبق شکل (۸)، افزایش میدان مغناطیسی آهن‌ربا باعث افزایش متوسط توان تولید شده می‌شود. همچنین در مقاومت بار ۲۵۰ اهم، بیشترین متوسط توان تولید شده را خواهیم داشت و با توجه به مرجع [۱] صحه‌گذاری نتایج انجام می‌شود.

شکل (۹)، تغییرات متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر حسب مقاومت بار در طول سیم‌پیچ‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



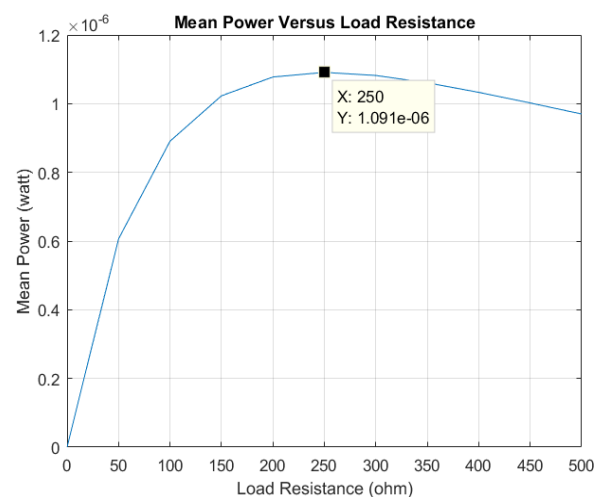
شکل ۹ نمودار تغییرات متوسط توان تولید شده بر حسب مقاومت بار در طول سیم‌پیچ‌های مختلف

طبق شکل (۹)، مشاهده می‌شود که بیشترین متوسط توان تولیدی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس زمانی است که

جدول ۱ پارامترهای میکروبازیاب انرژی [۱]

مقادیر	پارامترهای میکروبازیاب انرژی
$۸۹۰\mu m \times ۶۷۰\mu m \times ۱۵\mu m$	ابعاد تیر یک سر گیردار
$۰/۰۰۷۵\text{ kg}$	جرم معادل تیر یک سر گیردار
$۳/۵ - ۴/۵\text{ kHz}$	فرکانس طبیعی تیر
$۸\text{ mm} \times ۸\text{ mm} \times ۸\text{ mm}$	ابعاد آهن‌ربا
$۵۰\mu m$	فاصله بین تیر و آهن‌ربا
$۰/۵۰۹\text{ T}$	میدان مغناطیسی آهن‌ربا
$۳۷/۸۲۱\frac{N.s}{m}$	میرایی مکانیکی
$۲/۱۱ \times ۱۰^{-۷}\frac{N.s}{m}$	میرایی الکتریکی
$۵۸۰\ \Omega$	مقاومت سیم‌پیچ
۲۶ mm	طول سیم‌پیچ

با توجه به رابطه (۲۱)، با افزایش مقاومت بار، متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل (۷)، متوسط توان تولیدی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر حسب مقاومت بار را نشان می‌دهد.



شکل ۷ تغییرات متوسط توان تولید شده بر حسب مقاومت بار میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس

با توجه به شکل (۷) و مقادیر پارامترهای میکروبازیاب جدول (۱)، در مقاومت بار ۲۵۰ اهم، متوسط توان تولید شده بیشترین مقدار را خواهد داشت که با توجه به مرجع [۱]، مقدار بهینه مقاومت بار برای ماکزیمم شدن توان میکروبازیاب انرژی است. در نتیجه درستی نتایج با توجه به مرجع [۱] تأیید می‌شود.

در ادامه، تأثیر پارامترهای میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولید شده مورد مطالعه

- [5] Cao, H., Kong, L., Tang, M., Zhang, Z., Wu, X., Lu, L., and Li, D., An electromagnetic energy harvester for applications in a high-speed rail pavement system, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 243, pp. 108018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmeasci.2022.108018>, (2023).
- [6] Bai, S., Cui, J., Zheng, Y., Li, G., Liu, T., Liu, Y., Hao, C., and Xue, C., Electromagnetic-triboelectric energy harvester based on vibration-to-rotation conversion for human motion energy exploitation, *Applied Energy*, Vol. 329, pp. 120292, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120292>, (2023).
- [7] Wang, W., Li, B., Liu, S., and Wei, Z. H., Bifurcation analysis and nonlinear dynamics of a rolling magnet multistable electromagnetic energy harvester, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 118, pp. 107027, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.107027>, (2023).
- [8] Ordóñez, V., Arcos, R., and Romeu, J., A high-performance electromagnetic vibration energy harvester based on ring magnets with Halbach configuration, *Energy Conversion, and Management: X*, Vol. 16, pp. 100280, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100280>, (2022).
- [9] Hasani, M., and Rahaghi, M. I., The optimization of an electromagnetic vibration energy harvester based on developed electromagnetic damping models, *Energy Conversion and Management*, Vol. 254, pp. 115271, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115271>, (2022).
- [10] Wang, Y., Wang, P., Li, S., Gao, M., Ouyang, H., He, Q., and Wang, P., An electromagnetic vibration energy harvester using a magnet-array-based vibration-to-rotation conversion mechanism, *Energy Conversion and Management*, Vol. 253, pp. 115146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115146>, (2022).
- [11] Aloysius, A., Khan, M. A., Lim, W. H., Ramaswamy, M., Qayyum, A., Ang, C. K., and Aramugam, K., Investigation of kinetic energy harvesting from human body motion activities using free-impact electromagnetic generator, *In Sentimental Analysis and Deep Learning: Proceedings of ICSADL 2021*, Springer Singapore, pp. 209-221, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5157-1_18, (2022).
- [12] Foong, F. M., Thein, C. K., and Yurchenko, D., A novel high-power density, low-frequency electromagnetic vibration energy harvester based on anti-phase motion, *Energy Conversion and Management*, Vol. 238, pp. 114175, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114175>, (2021).
- مقاومت بار ۲۵۰ اهم باشد. همچنین افزایش طول سیم پیچ باعث افزایش متوسط توان تولید شده می شود.
- ### ۶- جمع بندی
- در مطالعه حاضر، یک میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی، جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف میکرو بازایاب بر متوسط توان تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پژوهش انجام شده، نتایج به شرح زیر خلاصه می شود:
- ۱- با در نظر گرفتن تحریک اتفاقی از نوع نویز سفید گوسی، متوسط توان تولید شده میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس محاسبه می شود.
 - ۲- با تحلیل تنش مدل مکانیکی نتیجه می شود که ماده مورد استفاده در تیر یک سر گیردار میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس باید از جنس پارلین باشد.
 - ۳- با افزایش مقاومت بار، متوسط توان تولید شده میکرو بازایاب انرژی الکترومغناطیس، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.
 - ۴- در مقاومت بار ۲۵۰ اهم، متوسط توان تولیدی میکرو بازایاب انرژی، بیشترین مقدار را خواهد داشت.
 - ۵- افزایش میدان مغناطیسی آهن ربا و طول سیم پیچ باعث افزایش متوسط توان تولید شده میکرو بازایاب انرژی می شود.
- ### ۷- مراجع
- [1] Sari, I., Balkan, T., and Kulah, H., An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 145, pp. 405-413, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.11.021>, (2008).
- [2] Sari, I., Balkan, T., and Kulah, H., An electromagnetic micro energy harvester based on an array of parylene cantilevers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, No. 10, pp. 105023, DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/10/105023>, (2009).
- [3] Holm, P., Imbaquingo, C., Mann, B. P., and Bjørk, R., High power electromagnetic vibration harvesting using a magnetic dumbbell structure, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 546, pp. 117446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117446>, (2023).
- [4] Bahar, M. R. B., Bahrami, M., and Sharifian, M. B. B., Novel structure for electromagnetic micro-power harvester, *Engineering Science & Technology*, pp. 1-13, DOI: <https://doi.org/10.37256/est.4120231636>, (2023).

- Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 209, DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/13/2/307>, (2003).
- [16] Hosaka, H., Itao, K., and Kuroda, S., Evaluation of energy dissipation mechanisms in vibrational microactuators, *In Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems an Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robotic Systems, IEEE*, pp. 193-198, DOI: doi.org/10.1109/MEMSYS.1994.555622, (1994).
- [17] Newland, D. E., An introduction to random vibrations and spectral analysis, *Longman Publishing Group*, (1984).
- [13] Zhang, L. B., Dai, H. L., Yang, Y. W., and Wang, L., Design of high-efficiency electromagnetic energy harvester based on a rolling magnet, *Energy conversion and management*, Vol. 185, pp. 202-210, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.089>, (2019).
- [14] Kumar, A., Balpande, S. S., and Anjankar, S. C., Electromagnetic energy harvester for low frequency vibrations using MEMS. *Procedia Computer Science*, Vol. 79, pp. 785-792, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.03.104>, (2016).
- [15] Mizuno, M., and Chetwynd, D. G., Investigation of a resonance microgenerator, *Journal of*

انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشعی در میله سوخت داغ قلب راکتور هسته ای

چکیده: در این مقاله به بررسی انتقال حرارت ترکیبی جابجایی همراه با تشعشع در میله سوخت داغ استوانه ای شکل قلب یک راکتور هسته ای تحت فشار مانند راکتور بوشهر پرداخته شده است. به طور کلی در آنالیز حرارتی یک میله سوخت، توجه ویژه ای به توزیع درجه حرارت در اجزاء تشکیل دهنده میله سوخت و همچنین تأثیر جریان سیال اطراف آن بر میزان برداشت حرارت معطوف می گردد. لذا در این مطالعه با استفاده از معادلات انتقال حرارت در سوخت و سیال مجاور آن، میزان شدت انتقال حرارت جابجایی و تابشی و تأثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل سازی از فرض محیط خاکستری برای مدل سازی تشعشع در فضای بین سوخت و غلاف و همچنین در نظر گرفتن دیواره های مات استفاده شده است و مدل تشعشع به کار گرفته شده مدل جهات مجزا (DOM) می باشد. برای این شبیه سازی از نرم افزار انسیس فلوئنت (تحلیل عددی) بهره گرفته شده است و نتایج حاصل از این شبیه سازی با نتایج مراجع موجود مقایسه و تأثیر انتقال حرارت تشعشعی در میله سوخت هسته ای بررسی شده است.

واژه های راهنما: راکتورهای قدرت هسته ای، میله سوخت داغ، ترموهیدرولیک، انتقال حرارت جابجایی، تشعشع، تک کانال، تحلیل عددی

فرزاد

چوبدار رحیم^۱

دانشجوی دکتری،
دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه صنعتی
ارومیه، ارومیه، ایران

محمدباقر

محمدصادقی

آزاد^{۲*}

دانشیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه شهید
مدنی آذربایجان، تبریز،
ایران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

Farzad Choobdar

Rahim

PhD Student, Department
of Mechanical
Engineering, Urmia
University of Technology,
Urmia

Mohammad Bagher

Mohammad

Sadeghi Azad*

Associate Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani
University,
Tabriz

Combined convection and radiation heat transfer in the hot fuel rod in the nuclear reactor core

Abstract: In this paper, the combined convection heat transfer with radiation in the hot fuel rod of a pressurized nuclear reactor like the Bushehr reactor has been investigated. Generally, in the thermal analysis of a fuel rod, special attention is paid to the temperature distribution in the constituent parts of the fuel rod, as well as the effect of the fluid flow around it on the amount of heat removal. Therefore, in this study, using heat transfer equations in the fuel and its adjacent fluid, the intensity of convection and radiation heat transfer and the effect of different parameters have been investigated. In this modeling, the assumption of gray environment is used to model the radiation in the space between the fuel and the clad, as well as considering the opaque walls, and the radiation model used is the Discrete Direction Model (DOM). Ansys Fluent (CFD) software has been used for this simulation.

Keywords: Nuclear power reactors, Hot fuel rod, Thermo-hydraulics, Convection heat transfer, Radiation, Single channel, CFD

۱- مقدمه

بررسی پدیده های ترکیبی انتقال حرارت، تجزیه و تحلیل شار حرارتی و میدان دما یکی از موضوعات مهم در مهندسی است که کاربردهای زیادی در تجهیزات مختلف مانند مشعل، رادیاتور، دیگ های بخار، کلکتورهای خورشیدی، موتورهای احتراق داخلی و راکتورهای هسته ای دارد [۱-۵]. در چنین کاربردهایی، زمانی که دمای سیستم بالا باشد، مکانیسم های انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشع مطرح می باشد و باید تعامل این مکانیسم ها مشخص گردد.

تشعشع تنها روش انتقال حرارت است که برخلاف انتقال حرارت هدایتی و جابجایی نیازی به محیط مادی ندارد و در محیط خلاء نیز امکان پذیر می باشد. انتقال حرارت تابشی همیشه اتفاق می افتد اما تأثیر آن در دماهای بالا قابل توجه است و در درجه حرارت های بالا پدیده غالب می باشد، به همین دلیل، تجزیه و تحلیل انتقال حرارت تابشی در دماهای بالا بسیار مهم می باشد.

با توجه به اهمیت موضوع، در بسیاری از پژوهش های انجام شده هر دو پدیده انتقال حرارت جابجایی و انتقال حرارت تابشی به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته اند. اولین مطالعات در این زمینه در دهه ۸۰ میلادی توسط منگوک و ویسکانتا [۶] و یانگ [۷] انجام شده است. شرما و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۸] به بررسی همزمان انتقال حرارت جابجایی و تشعشع در یک محفظه مربعی با نسبت های منطقی متفاوت پرداختند. در نهایت همبستگی بین عدد ناسلت متوسط برحسب عدد رایلی و نسبت های منطقی متوسط آنها ارائه شد که از آن می توان در مسائل طراحی استفاده کرد.

میکائیل مُدست و سَندپ در سال ۲۰۲۲ [۹] فرمول بندی های لازم برای کوپلینگ معادلات تابش در محیط های مشارکت کننده با انتقال حرارت هدایتی و جابجایی را توسعه دادند. در این پژوهش ابتدا کوپلینگ انتقال حرارت رسانایی-تابش، اثرات تغییرات فاز و سپس انتقال حرارت ترکیبی تابش و همرفت مورد بررسی قرار گرفته شد، که شامل بحث در مورد کوپلینگ تابشی با همرفت اجباری خارجی (لایه مرزی حرارتی)، همرفت اجباری داخلی (جریان پواری) و همرفت طبیعی خارجی و داخلی است، همچنین در این پژوهش روش های عددی برای کوپلینگ حالت های مختلف انتقال حرارت در یک چارچوب کلی ارائه شده است. در این گزارش کوپلینگ صریح و نیمه ضمنی بین معادله انتقال حرارت تابشی و معادله انرژی به صورت کلی مورد بحث قرار گرفته است.

آجی پیده و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۰] به بررسی اثرات ویسکوزیته دینامیکی و تابش حرارتی غیرخطی بر جریان همرفتی آزاد از طریق یک کانال متخلخل عمودی پرداختند. هدف این مطالعه یافتن اثرات احتمالی تغییر ویسکوزیته و تابش حرارتی غیرخطی بر ویژگی های جریان سیال بود. برای انجام این کار، از انتشار حرارت غیرخطی روزلند و ویسکوزیته دینامیکی سیال برای تجزیه و تحلیل تشکیل جریان استفاده کردند که در نتیجه معادلات جریان غیرخطی زیادی را به همراه دارد. به همین دلیل، یک روش حل نیمه تحلیلی که معمولاً به نام روش تجزیه آدومین (ADM) نامگذاری شده است، برای تقسیم معادلات به صورت سری استفاده می شود که پس از آن شبیه سازی کامپیوتری برای حل نهایی معادلات به کار گرفته می شود. نتایج تحت تأثیر پارامترهای مورد نظر بر روی سرعت، دما، عدد ناسلت و اصطکاک سطح محاسبه، ارائه و مورد بحث قرار می گیرند. که در نهایت، نتایج به دست آمده در این پژوهش با استفاده از مطالعه منتشر شده توسط سینگ و پل در سال ۲۰۰۶ [۱۱] مقایسه و تأیید شده اند.

روچیکا مهتا و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۲] به بررسی تأثیرات تابش و تولید گرما در جریان همرفتی مختلف MHD وابسته به زمان نانوسیالات در امتداد یک کانال عمودی منتهی به محیط نفوذپذیر پرداختند. در این پژوهش انواع چهارگانه نانوسیال در نظر گرفته شد (i) آب - مس (ii) آب - نقره (iii) آب - Al_2O_3 (iv) آب - TiO_2 ، آب به عنوان سیال اصلی همرفتی در نظر گرفته می شود و عناصر Ag ، Cu ، Al_2O_3 ، TiO_2 در این سیال پایه ترکیب می شوند. تأکید پژوهش انجام شده بر مطالعه ریاضی تطبیقی جریان همرفت مختلط MHD چهار نوع نانوسیال است. این مطالعه تطبیقی در حضور محیط متخلخل، تولید گرما و اثر تشعشع انجام شده است.

علی صفوی نژاد و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۳] به بررسی و تحلیل مسئله انتقال حرارت ترکیبی (اجباری و طبیعی) و تابش بین دو صفحه موازی (کانال) با دیواره های همدمما به صورت عددی پرداختند. برای این منظور باید معادلات تکانه، انرژی و انتقال تابش حل گردند. در این تحقیق از روش بولتزمن شبکه ای برای حل تمامی معادلات به طور همزمان استفاده شده است که برای افزایش پایداری حل معادله انرژی به روش شبکه بولتزمن، از رویکردی مدرن به نام مدل دو زمان آرامش (two relaxation time model) استفاده شده است. محیط داخل کانال به عنوان یک محیط مشارکت کننده برای حل معادله انتقال تشعشع در نظر گرفته شد. در نهایت پس از فرمول بندی معادلات حاکم و شرایط مرزی برای مسئله حاضر در روش شبکه

بولتزمن، اعتبارسنجی نتایج و حل همزمان معادلات، اثرات برخی پارامترها مانند ضخامت نوری، عدد پلانک و عدد ریچاردسون با تغییر زاویه کانال بر روی انتقال حرارت، جریان و توزیع دما مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای تابش تأثیر معنی داری بر مسئله دارند و می توانند سرعت و توزیع دمای کانال را تغییر دهند. در بین این پارامترها عدد پلانک بیشترین تأثیر را بر دما و سرعت جریان سیال دارد. افزایش زاویه کانال نسبت به افق باعث افزایش اثر نیروی شناوری، تغییرات سرعت سیال و مقادیر دمای سیال می شود.

بن نجما و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۴] به مدل سازی عددی انتقال حرارت و جرم همراه با تابش حرارتی و جابجایی اجباری در یک محیط نیمه شفاف در طی تبخیر یک لایه آب نازک مورد استفاده برای محافظت از دیوار در یک کانال پرداختند. در این پژوهش توجه ویژه ای به تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت و انتشار جرم شده است. معادلات حاکم به صورت عددی با استفاده از روش حجم محدود حل می شوند. علاوه بر این، تفکیک معادله انتقال تابشی با استفاده از روش «ردیابی پرتو» با توجه به یک طرح درجه دوم متقارن SN (S4) انجام شد، در حالی که خواص تابشی گاز غیر خاکستری با استفاده از مدل «SNB-Narrow Band Correlated-K» (SNB-CK) استنباط گردید. تأثیر چندین پارامتر بر تولید آنتروپی ناشی از هدایت، تابش حرارتی و انتشار جرم در این مقاله تحلیل شده اند. نتایج به وضوح تسلط عمده تولید آنتروپی تابشی دیواره را در تمام موارد مورد مطالعه نشان می دهد. نتایج همچنین ثابت می کنند که برای مقادیر بالای دمای دیوار خشک و گسیل پذیری، تولید آنتروپی ناشی از انتشار جرم افزایش می یابد.

اشکان جوادزادگان و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۵] به بررسی ترکیب همرفت اجباری و تابش در یک کانال با استفاده از روش شبکه بولتزمن (LBM) به صورت عددی پرداختند. اثرات خواص فیزیکی و ویژگی های تشعشعی مانند عدد پکلت، پارامتر تابش، ضریب انتشار و همچنین ضریب جذب بررسی شد. به منظور اعتبارسنجی روش عددی LBM، نتایج ابتدا با استفاده از روش حجم محدود (FVM) مقایسه گردید. مشاهده شد که در همه موارد، همزمانی مناسبی بین نتایج LBM و FVM وجود دارد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی، سهم زیادی در هندسه انتقال حرارت بررسی شده است و نرخ آن بسته به پارامترهای مختلف از جمله ε ، Pe ، Re و Pr تغییر می کند. افزایش پارامتر تابش

باعث افزایش دما و کاهش گرادیان دما می شود. با افزایش پارامتر تابش، رشد لایه مرزی حرارتی افزایش یافته و نفوذ آن به هسته مرکزی جریان به طور قابل توجهی افزایش می یابد. کاهش ضریب تابش دیواره ها باعث کاهش سرعت جذب تشعشع در کانال می شود. در اعداد Pe بالا، رشد و نفوذ لایه مرزی حرارتی به لایه های بالاتر از سطح گرم شده به طور قابل توجهی کاهش می یابد. دی پاک سن و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۶] یک مطالعه محاسباتی بر روی انتقال حرارت همرفتی مرکب با تابش سطحی در یک کانال مستطیلی با پخش کننده حرارت متصل به منبع حرارتی انجام دادند. سیال عامل هوا و جریان ثابت، تراکم ناپذیر و آرام در نظر گرفته شد. پارامترهایی مانند ضخامت بستر و پخش کننده حرارت، منبع گرما و عرض کانال و فاصله بین منابع گرما ثابت فرض شدند. معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار ANSYS 16.2 با الگوریتم SIMPLE حل شدند. تأثیر عدد رینولدز (500, 250, 100, Re)، گسیل منبع حرارت ($\varepsilon_c = 0.1$ to 0.9)، پخش کننده حرارت ($\varepsilon_{sp} = 0.1$ to 0.9) و ضخامت دیواره کانال ($\varepsilon_s = 0.1$ to 0.9) بر روی نرخ انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته شد. مشخص گردید که حداکثر دمای غیربعدي (θ_m) در مقادیر مرجع نسبت به حالت بدون پخش کننده به دلیل قرار دادن پخش کننده حرارتی، ۱۱٫۵۳٪ کاهش می یابد. همچنین مشاهده شد که گسیل منبع گرما در مقایسه با انتشار حرارت پخش کننده و دیواره کانال ناچیز است. ام. پراکاش و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۷] به بررسی تجربی و عددی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی آرام و تشعشع سطحی در محفظه پر از هوا، تحت یک شار حرارتی ثابت که به سمت دریچه حفره القاء می شود، پرداختند. نتایج تجربی برای ورودی گرما، $Q=3.19W-16.71W$ ، عدد رینولدز، $Re=4814-166385$ ، و عدد ریچاردسون، $Ri=0.1-25$ ارائه گردید. در این مطالعه، شبیه سازی عددی در حفره هواکش دوبعدی برای غنی سازی کار تجربی برای نسبت ابعاد، $A=1-5$ ، و گسیل سطح، $\varepsilon=0.05-0.85$ نیز انجام گردید. معادلات تکانه و انرژی تحت تقریب های بوزینسک با استفاده از روش شناخته شده حجم محدود حل شدند و کد عددی در نرم افزار فرترن برای بدست آوردن تمام نتایج عددی نوشته شد. براساس داده های تجربی موجود، همبستگی هایی برای عدد ناسلت و حداکثر دمای سطح گرم شده ایجاد گردید.

آکینشیلو در سال ۲۰۱۹ [۱۸] جریان سیال مغناطیسی هیدرودینامیکی جابجایی ترکیبی (MHD) از طریق کانال

ناپایدار با استفاده از تکنیک تفاضل محدود حل گردید، همچنین مدل ترکیبی توسعه یافته در مقایسه با داده های عددی تجربی و به روز تأیید شد. مدل سازی ریاضی برای فرمول های مسئله دو بعدی و سه بعدی تحت تغییر عدد رایلی، عدد رسانش-تابش و گسیل سطح انجام شد. مشخص شد که اختلاف بین نتایج دو بعدی و سه بعدی با افزایش نرخ انتقال حرارت تشعشع افزایش یافته است. عملکرد محاسباتی روش بولتزمن شبکه هیبریدی چندین برابر روش تحلیلی معمولی بود.

میخائیل شریتم و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۱] همرفت گرمایی و تابش سطحی در یک محفظه دوار با عنصر تولید حرارتی حجمی متغیر مورد مطالعه قرار دادند. محفظه بررسی شده دارای دو مرز افقی عایق حرارتی، دو دیواره عمودی همدمای با دمای پایین و عنصر تولید حرارت متغیر در مرز پایینی است. حفره با سرعت زاویه ای ثابت می چرخد. مدل ریاضی در تابع جریان بی بعدی و توابع گردابی فرموله شده است. معادلات مهم با تکنیک تفاضل محدود بر روی شبکه یکنواخت به دست آمده است. اثرات عدد تیلور، گسیل سطح، و فرکانس نوسان تولید گرمای حجمی منبع حرارت بر انتقال گرما و جرم مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شده است که گسیل سطح و فرکانس نوسان تولید گرما حجمی می تواند انتقال حرارت را در یک حفره چرخان بهبود بخشد. افزایش تابش سطحی، افزایش انتقال انرژی کل و کاهش دمای متوسط هیترا نشان می دهد، در حالی که افزایش فرکانس نوسان تولید گرما حجمی، کاهش میانگین دمای هیترا را مشخص می کند.

محمد فروزان نیا و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۲] به طور عددی برداشت حرارت تولید شده در برخی از دستگاه های الکترونیکی را برای جلوگیری از سرد شدن بیش از حد و حفظ یکنواختی دمای محیط با هدف افزایش طول عمر دستگاه بررسی کرده اند. برای این منظور، انتقال انرژی همرفتی-تابشی ترکیبی مزدوج به صورت مربع و محفظه کج حاوی یک بلوک جامد پوخته مربعی توخالی به عنوان حفره دوم با تولید گرمای یکنواخت که در ناحیه مرکزی محفظه قرار می گیرد، مورد مطالعه قرار می گیرد. برای حل معادلات حاکم از روش تفاضل محدود استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن اثر تابش گاز، محاسبات تشعشعی بر اساس حل عددی معادله انتقال تشعشع و با روش جهات مجزا (DO) حل شده است. اثرات عدد پلانک، زاویه شیب حفره، ضخامت نوری گاز و انتشار سطح مرزها بر جریان و ویژگی های حرارتی سیستم و کنترل دمای کاری نزدیک به نقطه تنظیم بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که با استفاده از گاز پرکننده تابشی با ضخامت نوری کم،

متخلخل عمودی با اثر تابش در نظر گرفته شده را بررسی کرد. سیال MHD جابجایی ترکیبی از طریق میکرو کانال عمودی با دیواره های رسانا و نارسانای الکتریکی توسط معادلات تکانه و انرژی فرموله می شوند. اثرات پارامترهای رئولوژیکی کلیدی مانند عدد پرانتل مغناطیسی، گرادیان فشار، عدد رینولدز و پارامتر تابش بر روی انتقال گرما و جرم بررسی می شوند. نتایج نشان می دهد که افزایش ترم فشار منجر به افزایش توزیع سرعت می گردد که تأثیر آن به سمت مرکز کانال جریان حداکثر است در حالی که افزایش پارامتر تابش کاهش توزیع دما را نشان می دهد اما تأثیر آن نسبت به دیوار رسانای الکتریکی قابل توجه است. مقایسه نتایج به دست آمده با حل عددی رانگ کوتا مرتبه چهارم مطابقت رضایت بخشی را نشان می دهد.

حسن حمدی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۹] انتقال حرارت تابشی-همرفتی یک منبع حرارتی گسسته (تراشه) در داخل یک محفظه خنک شده توسط چاه حرارتی مستطیلی پره ای را به صورت سه بعدی مورد مطالعه قرار دادند. انتقال حرارت از طریق دیواره های محفظه و تبادل تابش بین این دیواره ها و همچنین انتقال حرارت همرفتی روی سطوح بیرونی محفظه به محیط در نظر گرفته شده است. یک مدل ریاضی سه بعدی کامل از سیستم فیزیکی با استفاده از روش تفاضل محدود به صورت عددی ارائه و در نرم افزار متلب برنامه ریزی شده و با استفاده از یک کار تجربی اعتبار سنجی انجام شده است. نتایج نشان دهنده تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی در صورت در نظر گرفتن تابش است. تأثیر نسبت ابعاد محفظه و قدرت تراشه بر خنک سازی و انتقال حرارت و جریان سیال در داخل محفظه بررسی گردیده است. نتایج نشان می دهد که در یک دستگاه الکترونیکی محصور، تأثیر تابش در تحلیل حرارتی وابسته به زمان که خنک کنندگی دستگاه به صورت همرفت طبیعی می باشد، مهم است. زمانی که شار حرارتی تراشه ۵ کیلووات بر متر مربع باشد، نادیده گرفتن تأثیر تشعشع، دمای تراشه را حدود ۲۰٪ افزایش می دهد. افزایش شار حرارتی تراشه و نسبت ابعاد، گردابه های جریان هوا را در داخل محفظه کاهش می دهد. در شار حرارتی تراشه ۱/۲۵ و ۵ کیلووات بر متر مربع، عدد ناسلت تشعشعی به ترتیب حدود ۱۷/۸ و ۱۹/۷ درصد از عدد ناسلت کل را نشان می دهد.

الکساندر نیی در سال ۲۰۲۰ [۲۰] یک مدل ترکیبی برای جابجایی طبیعی سه بعدی همراه با تابش حرارتی سطحی در یک مکعب بسته با حرارت متفاوت توسعه داده است. در این مدل، روش عددی برای جریان سیال بر حسب روش بولتزمن شبکه تحت تقریب Bhatnagar-Gross-Krook با طرح D3Q19 در نظر گرفته شد. از طرفی معادله انرژی سه بعدی

تولید حرارت از طریق شکافت هسته‌ای در بخش قرص سوخت اورانیوم و انتقال انرژی از طریق لایه هلیوم و غلاف به سیال خنک کننده در قلب راکتور می‌باشند، همچنین به عنوان اولین سپر برای محافظت ماده رادیواکتیو تولید شده در اثر شکافت هسته‌ای از سوخت اورانیوم برای جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو به محیط عمل می‌کنند. بنابراین در نیروگاه‌های هسته‌ای هر حادثه‌ای رخ بدهد تا زمانی که میله‌های سوخت ذوب نشوند آن حادثه قابل کنترل می‌باشد. تری مایل آیلند، چرنوبیل و فوکوشیما حوادث معروفی هستند که در آنها سناریوهای حادثه ذوب قلب راکتور اتفاق افتاد [۳۲-۳۵]. در اینگونه حوادث، ذوب شدن میله‌های سوخت، باعث نشت ماده رادیواکتیو در سیال خنک کننده می‌شود. همچنین ممکن است در اثر واکنش زیرکونیوم و آب انفجار هیدروژنی رخ بدهد. دلیل ذوب میله سوخت این است که حرارت تولید شده توسط قرص‌های سوخت به اندازه کافی توسط سیستم‌های خنک کننده راکتور برداشت نمی‌شوند در نتیجه دمای میله سوخت افزایش می‌یابد و از نقطه ذوب آن فراتر می‌رود و حادثه ذوب اتفاق می‌افتد [۳۶-۳۹]. در کل بررسی انتقال حرارت در میله‌های سوخت هسته‌ای و همچنین بررسی جریان سیال خنک کننده از موضوعات مهم در طراحی نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد.

در این زمینه نیز پژوهش‌های مختلفی انجام شده است، از جمله صفایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۴۰] آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ قلب راکتور بوشهر را در حالت پایا با کد COBRA-EN بررسی کرده‌اند، و ماکزیم و متوسط دمای سوخت، دمای سطح داخلی و خارجی غلاف و تغییرات دما، فشار و چگالی در کانال داغ را محاسبه کردند. صادقی آزاد و چوبدار در سال ۲۰۲۱ [۴۱] آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ راکتور نیروگاه بوشهر را به صورت زیرکانال در حالت گذرا زمانی که یکی از پمپ‌های مدار اول از کار می‌افتد بررسی کرده‌اند و تغییرات دمای میله سوخت داغ برحسب زمان گزارش کرده‌اند.

رامیرو فریلی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۴۲] سیستم خنک کننده کوییتی راکتور (RCCS) را که یک سیستم ایمنی رایج در راکتورهای خنک کننده گازی با دمای بالا (HTGR) است مورد مطالعه قرار دادند این سیستم گرما را از مخزن تحت فشار راکتور (RPV) توسط انتقال حرارت تشعشع (۸۰٪) و همرفت طبیعی (۲۰٪) حذف می‌کند. برای شبیه‌سازی سناریوهای حادثه HTGR، باید از مدل‌های صحت‌سنجی

عدد پلانک بالا و اعمال تابش سطحی بالاتر، می‌توان نرخ خنک‌سازی بیشتری را در دوره گذرا به ترتیب تا ۳۸٪، ۸۵٪ و ۵۰٪ بدست آورد.

هان و بانگ در سال ۲۰۱۱ [۲۳] با استفاده از روش حجم محدود معادله تشعشع را گسسته‌سازی و حل کردند. امین دهگشایی و داوود گنجی در سال ۲۰۱۸ [۲۴] هم انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشع رو به صورت عددی در محفظه افقی بسته بررسی کرده‌اند. احمدرضا رحمتی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۲۵] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی به همراه تشعشع در محفظه مربعی مانع دار مورد بررسی قرار داده‌اند، در این شبیه‌سازی دیواره عمودی محفظه سرد با دمای ثابت ولی دیواره‌های افقی عایق بندی شده در نظر گرفته شده‌اند و اثر تغییر عدد رایلی و اندازه و مکان استوانه گرم و ضریب صدور آن مورد بحث قرار گرفته شده است. قارن درستی و مهدی معرفت در سال ۲۰۰۹ [۲۶] اثر انتقال حرارت تشعشعی و جابجایی آزاد بر انتقال حرارت و رفتار جریان در محفظه‌های عمودی باریک پره‌دار به کمک تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند، در این پژوهش انتقال حرارت تشعشعی بین سطوح و ضریب دیده‌ها به کمک تقریب اجزای مرزی و روش مونت کارلو محاسبه گردیدند و میدانهای جریان و انتقال حرارت به کمک الگوریتم سیمپل حل شده و سهم هر یک از حالت‌های انتقال حرارت مشخص شدند، نتایج نشان دادند که با توجه به مقدار عدد تشعشع، انتقال حرارت تشعشع ۸ تا ۸۴ درصد سهم انتقال حرارت کلی را به خود اختصاص می‌دهد. تا کنون روش‌های عددی بسیاری برای حل معادله تشعشع پیشنهاد شده است. چوی و ریت بی در سال ۲۰۱۱ [۲۷] و چای و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۸] روش حجم محدود را برای حل این مسائل پیشنهاد داده‌اند. در خصوص جابجایی طبیعی بین سیلندرهای هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز، کوئن و گلدشتاین در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۹ [۲۹ و ۳۰] مطالعات تئوری و تجربی گسترده‌ای را انجام دادند. چو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۳۱] نیز این موضوع را به روش عددی بررسی کردند.

همچنین یکی از زمینه‌هایی که بحث انتقال حرارت در آنها مطرح می‌باشد قلب راکتورهای هسته‌ای می‌باشد، از زمان ساخت و بهره برداری اولین نسل های راکتورهای هسته‌ای تا کنون موضوع نحوه انتقال حرارت و برداشت حرارت از میله‌های سوخت های موجود در قلب این راکتورها مورد توجه محققین بوده‌است. میله‌های سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای علاوه بر اینکه هم منبع

انتقال حرارت محلی محاسبه شده عددی، عدد ناسلت کلی، و افت فشار در سراسر میله آزمایش تطابق خوبی با نتایج تجربی مربوطه نشان می‌دهد. برای سطح ناهموار شبیه‌سازی شده، ضریب انتقال حرارت در مقایسه با سطح صاف به میزان ۸۶ درصد افزایش یافت.

با انجام عملیات پیشگیرانه و شبیه‌سازی و مدل‌سازی‌ها دقیق انتقال حرارت می‌توان این حوادث را بررسی و تحلیل کرد و شدت خسارات ناشی از آنها را کاهش داد. بنابراین، در این پژوهش، بررسی و شبیه‌سازی فرایند انتقال حرارت جابجایی توأم با تشعشع در میله سوخت هسته‌ای راکتور PWR مانند راکتور بوشهر بررسی می‌شود.

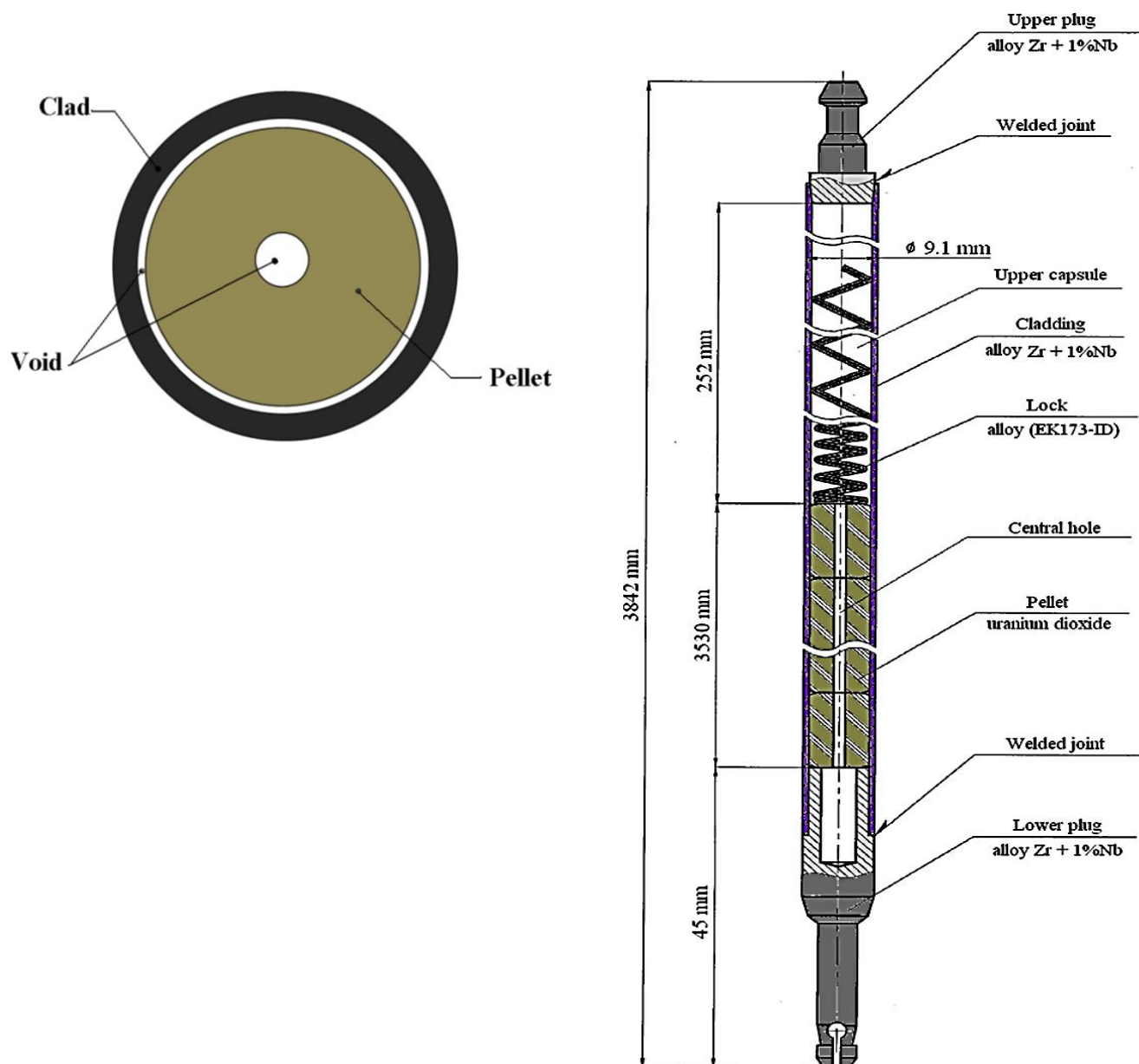
۲- ساختار میله سوخت راکتور هسته‌ای

میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای آب سبک تشکیل شده‌اند از غلافی استوانه‌ای از جنس زیرکالوی و یا آلیاژ زیرکونیوم-نیوبیوم که در داخل آن سوخت هسته‌ای دی اکسید اورانیوم به شکل قرص‌های سینتر شده جا داده شده است. سوخت دی اکسید اورانیوم ترکیبی از ایزوتوپ شکافت پذیر اورانیوم-۲۳۵ و ایزوتوپ بارور اورانیوم-۲۳۸ می‌باشد. در میله‌های سوخت، سوخت و غلاف در تماس با یکدیگر نمی‌باشند بلکه بین آنها فضایی منظور شده است که در ابتدا از هلیوم با فشار ۲۰ الی ۳۰ اتمسفر (در دمای محیط) پر شده است. علت استفاده از گاز هلیوم، بهتر بودن هدایت حرارتی آن در مقایسه با سایر گازهای بی اثر می‌باشد. وجود گاز با فشار زیاد در شکاف بین سوخت و غلاف باعث شده است که فضای مناسب برای انبساط سوخت فراهم شود و نیز در شروع کار راکتور از وارد شدن تنش مکانیکی زیاد به غلاف ممانعت شود زیرا با تحت فشار قرار گرفتن میله سوخت، اختلاف فشار داخل میله سوخت و خنک کننده که عامل بوجود آمدن کرنش الاستیک در غلاف می‌باشد، کاهش می‌یابد. در شکل ۱- (الف) و (ب) به ترتیب میله سوخت و مقطع میله سوخت راکتور هسته‌ای بوشهر نشان داده شده‌اند، که شامل قرص سوخت UO_2 و غلاف از جنس زیرکالوی (Zr+1%Nb) است. معمولاً چگالی قرص‌های سوخت در حدود ۱۰/۴ تا ۱۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. اطلاعات کامل مربوط به میله‌های سوخت این راکتور در جدول (۱) آمده است [۴۵].

متوسط و کدهای سیستم برای محدود کردن زمان اجرای مدل‌ها استفاده شود. در حالی که یک کمی‌سازی دقیق از انتقال حرارت تشعشعی در این مدل‌ها وجود دارد، ولی کمی‌سازی همرفت طبیعی باید براساس همبستگی‌هایی با دقت سوال‌برانگیز برای عدد ناسلت تکیه داشته باشند. همبستگی‌های رایج بر اساس آزمایش‌هایی هستند که در اعداد ریلی کم و/یا با استفاده از دیواره‌های هم‌دمای در هندسه‌های ساده‌شده انجام می‌شوند. این کار بر روی دقت همبستگی‌های انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای پشتیبانی از طرح‌های HTGR بهبود می‌بخشد. این همبستگی‌ها شامل اعداد ناسلت محلی و متوسط به عنوان تابعی از عدد ریلی کلی، عدد ریلی محلی، و مشخصات دما در دیواره داغ RCCS است.

پاتریک زدلر و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۴۳] شرایط ترموهیدرولیک در یک موکاپ مجتمع سوخت هسته‌ای را با در نظر گرفتن تأثیر جریان هوای افقی بالای مجتمع میله‌های سوخت مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها در مرکز آزمایشگاه ALADIN انجام شد، که یک مجتمع سوخت راکتور آب جوشان را در مقیاس ۱:۱ به صورت محوری و شعاعی مدل‌سازی کردند. در سناریوی مورد مطالعه، مکانیسم‌های اصلی انتقال حرارت رسانش، همرفت و تابش باهم کوپل شدند. بررسی مدل به صورت تجربی و شبیه‌سازی تحلیلی (CFD) برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت نتایج مطلوبی ارائه دادند. در این پژوهش، تمامی مکانیسم‌های انتقال حرارت در شبیه‌سازی با مدل‌های پیچیده در نظر گرفته شدند. نتایج عددی با توجه به تفاوت‌های اجتناب‌ناپذیر بین رویکردها، مطابقت خوبی با اندازه‌گیری‌ها انجام شده داشتند.

امی‌تاو تیکادار و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۴۴] مطالعات عددی بر روی انتقال حرارت و افت فشار در یک میله سوخت هسته‌ای شبیه‌سازی شده با زبری سطح سه‌بعدی انجام دادند. شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی با استفاده از مدل آشفته SST برای ارزیابی انتقال حرارت و افت فشار بر روی بخش صاف و ناهموار میله داغ انجام شد. نتایج عددی با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از یک المنت حرارتی که به عنوان یک میله سوخت اینکونل-نیکل را برای راکتور آب تحت فشار (PWR) شبیه‌سازی شده بود، مقایسه شد. طول میله ۲۱۵۲/۶ میلی‌متر و قطر بیرونی آن ۹/۵ میلی‌متر بود که سطح بیرونی یک بخش به طول ۳۰۴/۸ میلی‌متر از میله سوخت اینکونل با زبری سطح سه بعدی (بلوک‌های الماسی شکل) اصلاح شد. زاویه موج برای هر بلوک الماس ۴۵ درجه و طول هر طرف بلوک الماس ۱ میلی‌متر بود. ضریب



شکل ۱ (الف) میله سوخت هسته‌ای و (ب) مقطع میله سوخت راکتور هسته‌ای

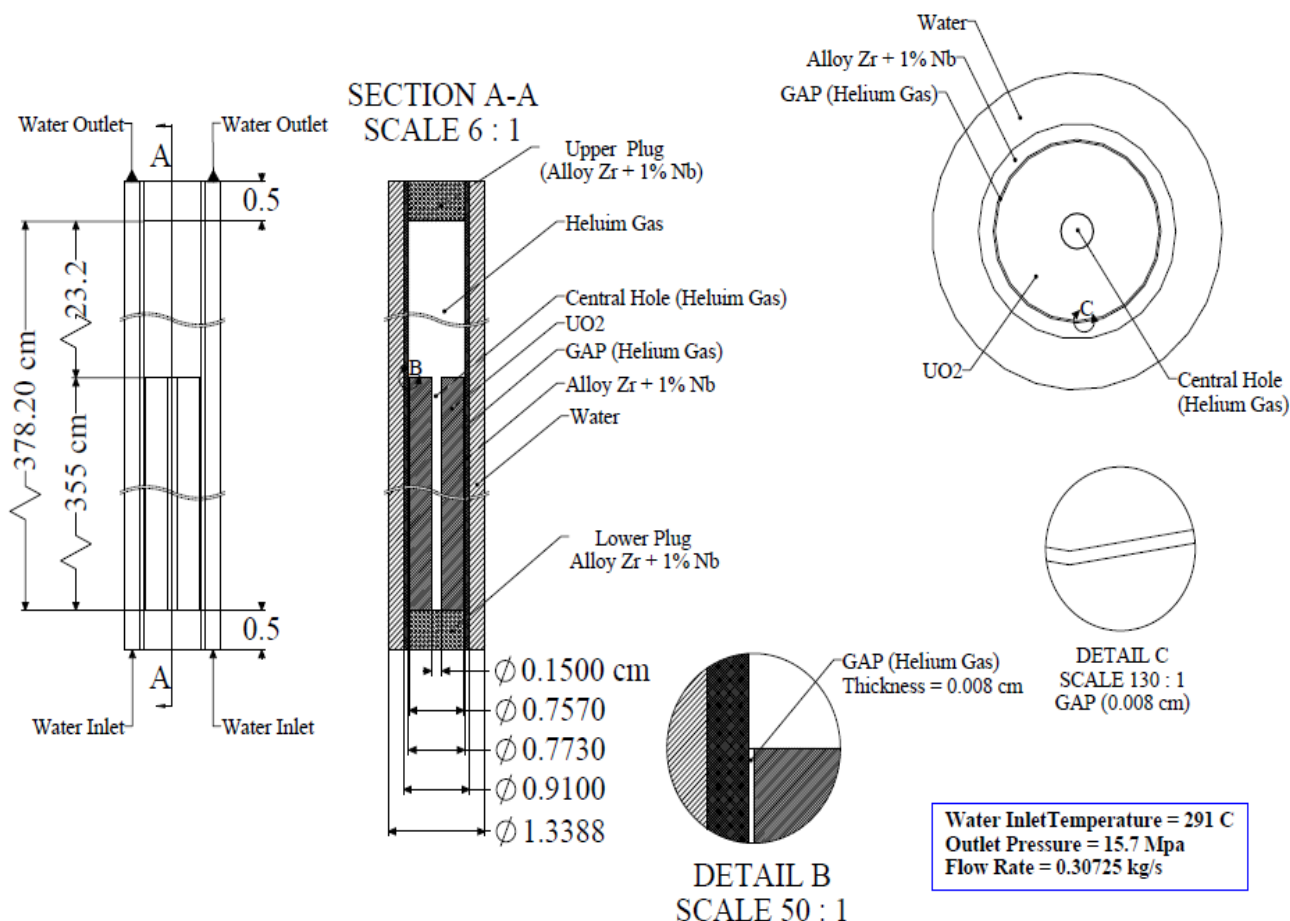
جدول ۱ مشخصات میله سوخت [۴۵]

میله سوخت	
۱/۵۷۵	جرم اکسید اورانیوم موجود در هر میله سوخت، kg
Alloy Zr + 1% Nb	جنس غلاف
۹/۱	قطر خارجی غلاف، mm
۷/۷۳	قطر داخلی غلاف، mm
UO ₂	جنس قرص سوخت
۷/۵۷	قطر خارجی قرص سوخت، mm
۱/۵	قطر حفره مرکزی قرص سوخت، mm
۱۱	ارتفاع قرص سوخت، mm
۱۰/۷ - ۱۰/۴	چگالی قرص سوخت، g/cm ³

۳- هندسه و مدل سازی میله سوخت راکتور

با توجه به این که فرایند شکافت هسته‌ای و تولید مقدار قابل توجهی از انرژی گرمایی و همچنین برداشت آن توسط سیال

خنک کننده در قلب راکتور صورت می‌گیرد، مدل سازی این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل (۲) هندسه میله سوخت به صورت تک کانال که شبیه سازی بر اساس آن انجام می‌گیرد، نشان داده شده است.



شکل ۲ هندسه میله سوختی شبیه سازی شده

۴- معادلات حاکم

برای مدلسازی جریان گاز هلیوم در فضای پلنوم بالای سوخت و همچنین در گپ بین سوخت و غلاف از مدل تقارن محوری استفاده شده است. با توجه به اینکه گاز هلیوم موجود در داخل میله سوخت با محیط پیرامون خود هیچگونه تبادل گرمی ندارد، بنابراین شرایط اولیه حاکم بر مساله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. به عبارت دیگر به عنوان مثال با تغییر فشار گاز هلیوم داخل محفظه که به عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی در کار حاضر می‌باشد، جرم گاز محصور در داخل گپ میله سوخت نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین برای حل مساله از

میله سوخت در داخل خنک کننده آب، با فشار و دمای مشخص، قرار دارد و فرض می‌شود که فشار خنک کننده و دمای سطح خارجی غلاف در شرایط بهره‌برداری پایا و عادی راکتور ثابت می‌باشند (مقادیر ثابت طراحی). یکی از معیارهای مهم در تحلیل حادثه LOCA، دمای نقطه داغ می‌باشد که به دلیل از دست رفتن سیال خنک کننده ممکن است از مقدار تعیین شده در بازه طراحی تجاوز کند. لذا در محاسبات توزیع توان برای نقطه داغ از میان حالت‌های مختلف توزیع توان در میله‌های سوخت، حالتی را برگزیدیم که مقدار ضریب توزیع توان در میله داغ نسبت به سایر حالت‌ها بزرگ‌تر باشد (۳۳/۶۷ kw/m) تا شرایط بدبینانه‌تری برای تحلیل حادثه در نظر گرفته شود.

¹ Lose of Coolant Accident

می‌باشد از اثرات جذب و پراکنش برای تابش عبوری از آن صرف‌نظر شده است؛ به عبارت دیگر محیط غیرمشارکتی در نظر گرفته شده است. همچنین معادله انرژی استفاده شده به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\rho c_p (u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z}) = K \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S_{\text{radiation}} \quad (4)$$

در مسائل انتقال حرارت جابجایی عدد گراشف کنترل‌کننده رژیم جریان می‌باشد، که نشان‌دهنده نسبت نیروی شناوری به نیروی برش ویسکوز بوده و به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_1 - T_2) L_c^3}{\nu^2} \quad (5)$$

در رابطه بالا g معرف شتاب گرانش، β نشان‌دهنده ضریب انبساط حجمی، L_c بیانگر طول مشخصه در هندسه مورد بررسی، ν ویسکوزیته دینامیکی، و T_1 و T_2 نیز به ترتیب بیانگر دمای صفحات گرم و سرد می‌باشند. همچنین برای ضریب انتقال حرارت جابجایی بین گاز موجود در محفظه و سطح داخلی غلاف می‌توان از رابطه Chu و $Churchill$ برای صفحه تخت عمودی در جریان آرام و مغشوش استفاده نمود [۲۹]. با در نظر گرفتن ارتفاع محفظه به عنوان طول مشخصه، عدد رایلی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.37 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6)$$

یکی دیگر از پارامترهای مهم در مسائل انتقال حرارت تابشی، ضریب گسیل تابش برای مواد مورد استفاده در هندسه می‌باشد که در کار حاضر این ضریب برای سوخت، غلاف و آب از داده‌های موجود در مرجع [۳۰] استخراج شده است. روابط استخراج شده برای این ضریب برای غلاف ۰/۱۸۴ و برای آب ۰/۹۶ است و برای سوخت دی اکسید اورانیوم از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\varepsilon_t = 0.78 + 1.53 \times 10^{-5} T \quad (7)$$

فرم ناپایای معادلات ناویر استوکس استفاده شده است، فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی برای سیال تراکم‌پذیر ناپایا رابطه (۱) آورده شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

فرم دیفرانسیلی معادلات مومنتوم برای سیال تراکم‌پذیر ناپایا نیز در رابطه (۲) آورده شده است:

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla (\rho \vec{V}) = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \lambda \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) \quad (2)$$

در روابط بالا $\vec{V}$ بردار سرعت در راستای (r, θ, z) ، p معرف فشار، ρ بیانگر چگالی، μ نشان‌دهنده ویسکوزیته دینامیکی و λ نشان‌دهنده ضریب ویسکوزیته ثانویه می‌باشد که در کار حاضر با فرض استوکس برابر با $-2\mu/3$ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر با توجه به گرادیان‌های دمایی بالایی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای همبستگی بین فشار، دما و چگالی هلیوم محصور بین سوخت و غلاف از فرض گاز ایده‌آل استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی انتقال حرارت تابشی از مدل محورهای مجزا (DO) استفاده شد. در این روش معادله انتقال تابش برای تعداد محدودی از زوایای فضایی که متناظر با بردار جهت $\vec{S}$ می‌باشد، حل می‌گردد. معادله انتقال تابش در این روش برای نقطه‌ای با موقعیت $\vec{r}$ در راستای $\vec{S}$ به صورت رابطه (۳) بیان می‌گردد:

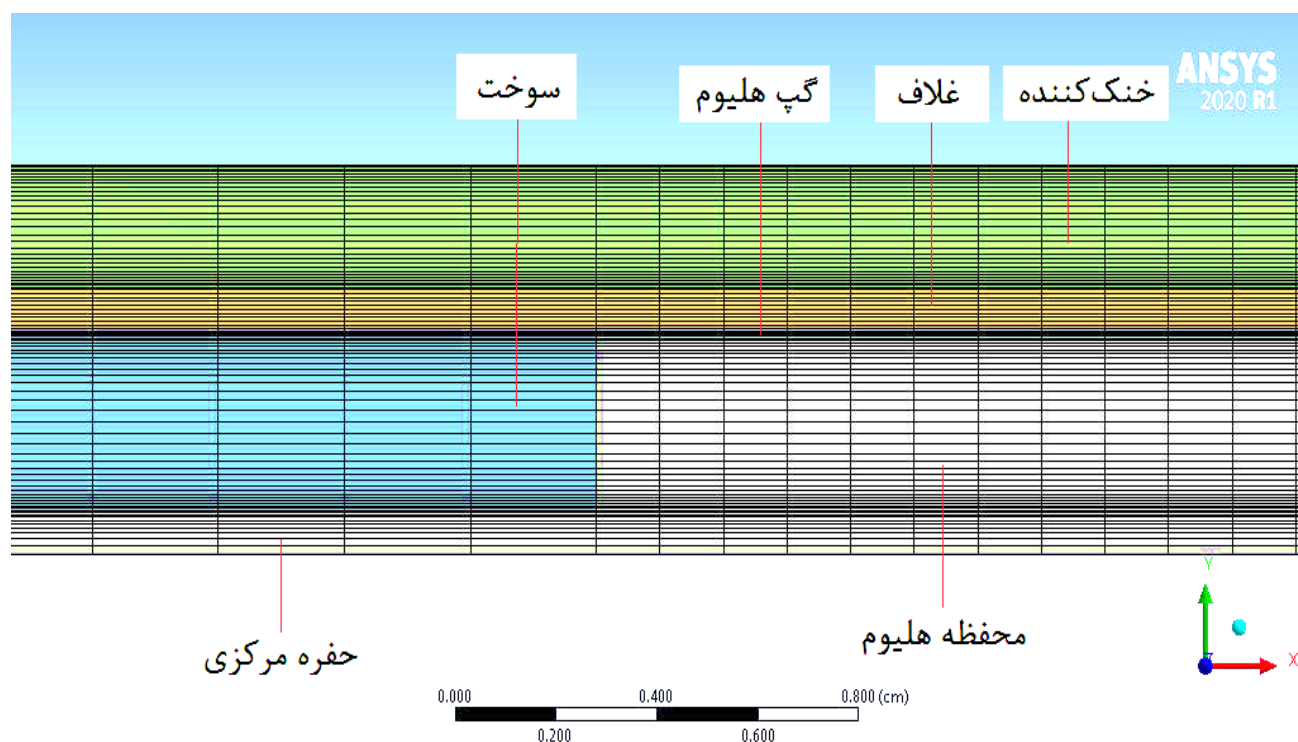
$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \frac{an^2 \sigma T^4}{4\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3)$$

که در رابطه (۳) I شدت تابش، $\vec{S}$ بردار جهت، $\vec{S}'$ بردار جهت برای پراکنش، a ضریب جذب، σ_s ضریب پراکنش، Φ تابع فاز پراکنش، Ω' زاویه فضایی بوده و n معرف اندیس انکسار در محیط مورد بررسی می‌باشد. به طور معمول سیالاتی مانند هوا و گازهای خنثی از جمله گاز هلیوم نقش مشارکتی در انتقال حرارت تابش ایفا نمی‌کنند. بنابراین در کار حاضر با توجه به اینکه سیال مورد استفاده مابین سوخت و غلاف هلیوم

۵- مدل سازی با نرم افزار ANSYS FLUENT

روش حل در این مدل همانند روش حل معادلات مومنتم و انرژی حاکم بر سیال است. این مدل بصورت مجزا و کوپل شده با معادلات حاکم بر جریان حل می شود. در این مدل سازی فرض بر این است که سطوح، خاکستری و منتشر کننده هستند. ضریب انتشار و جذب نیز مستقل از طول موج بوده و همچنین طبق قانون کیرشهف (Kirchoff's Law) با هم برابر می باشند. معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود و الگوریتم Coupled گسسته سازی شده اند و به صورت ضمنی حل می گردند. مدل تشعشع DO معادله انتقال تابشی (Radiative Transfer Equation (RTE را برای تعداد محدودی از

زوایای گسسته شده حل می کند. هریک از این زوایای گسسته شده با یک بردار جهت S مشخص شده در سیستم مختصات کارتزین، متناظر است. اندازه زوایای گسسته شده در این مدل سازی ۴ در نظر گرفته شده است. مدل DO تمام ضخامت های اپتیکی را پوشش می دهد. مدل DO استفاده شده در نرم افزار FLUENT تنها برای تابش خاکستری و تابش غیرخاکستری (با استفاده از مدل باند خاکستری) کاربرد دارد. در شکل (۳) میله سوخت شبیه سازی شده با نرم افزار انسیس فلوئنت با نشان دادن بخش های مختلف میله سوخت و شبکه بندی مورد نظر (بعد از بررسی استقلال از مش تعداد نودها ۱۳۸۰۳۰) نشان داده شده است.



شکل ۳ شبکه مش بندی میله سوختی شبیه سازی شده

عدد رینولدز محاسبه شده حاکی از وجود جریان آشفته در داخل کانال خنک کننده می باشد. در این مدل سازی برای جریان آشفته از مدل $SST K-\omega$ استفاده گردیده است. مدل آشفتگی $SST K-\omega$ یک مدل دو معادله ای لزجت گردابی است که بسیار متداول و معمول می باشد. کاربرد روابط کا-امگا در بخش درونی لایه مرزی سبب می شود که این مدل در تمام ناحیه زیر لایه لزج نزدیک دیواره عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد و بنابراین مدل $SST K-\omega$ می تواند به عنوان یک مدل آشفتگی بدون هیچ گونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار گیرد. مدل

برای بررسی نوع جریان سیال خنک کننده در داخل کانال باید عدد رینولدز محاسبه و بررسی گردد، برای محاسبه عدد رینولدز از رابطه زیر داریم:

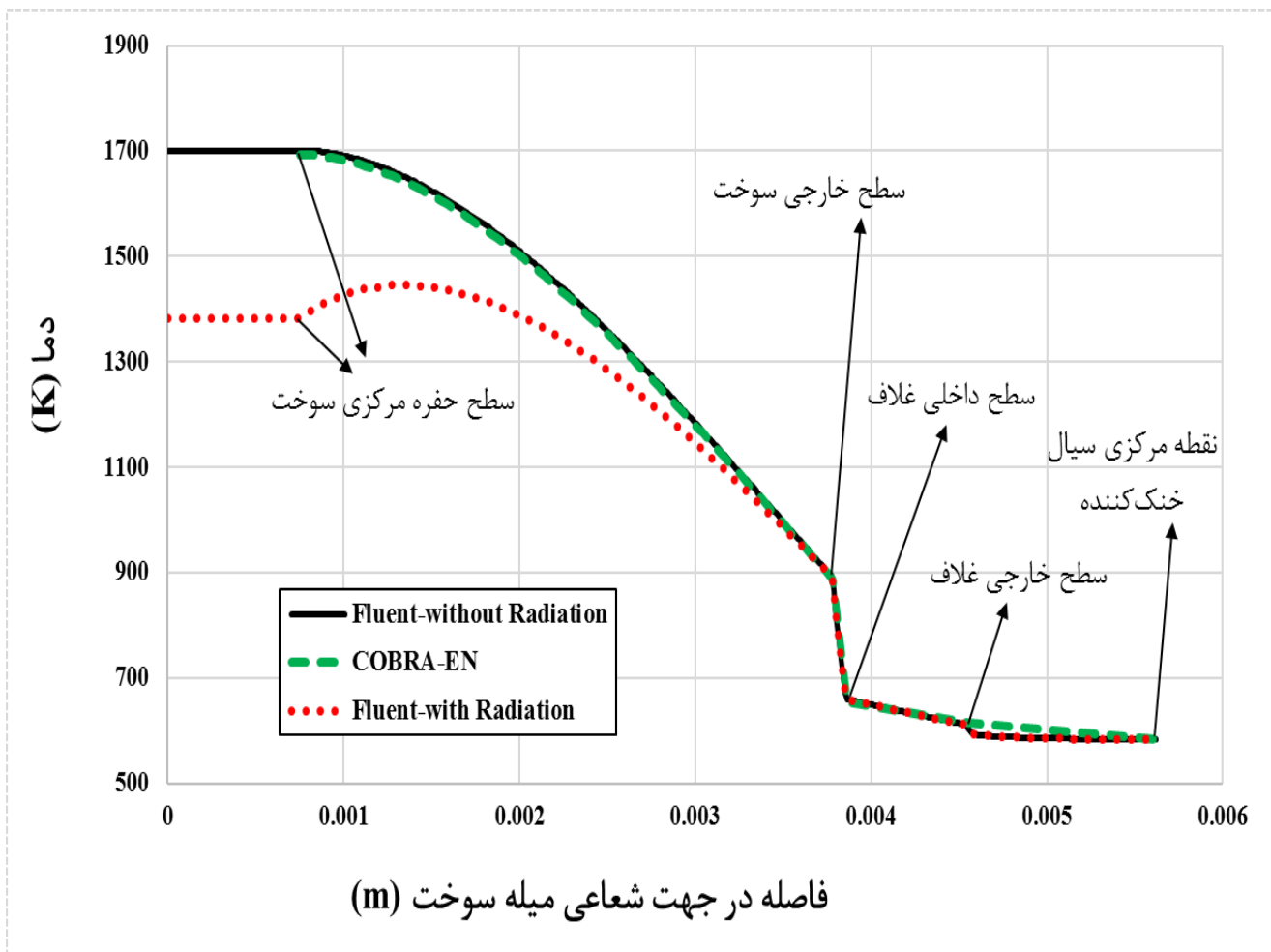
$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{\rho v (4A)}{\mu P} = \frac{4\dot{m}}{\mu P} = \frac{4 \times 0.30725}{92.095 \times 10^{-6} \times \pi \times 0.0091} = 466790 \quad (8)$$

(روش حجم محدود) را نشان می‌دهد. در شکل (۴) توزیع دمای محوری در بخش داغ میله سوخت در جهت شعاعی از حفره داخلی میله سوخت تا دمای سیال خنک‌کننده نشان داده شده است همانطور که از نمودار ملاحظه می‌گردد دما در نقطه داخلی ماکزیمم می‌باشد که در جهت شعاعی رفته رفته با توجه به ضریب هدایت پایین سوخت یک گرادیان دمایی نسبتاً شدیدی ایجاد می‌گردد همچنین با توجه به ضریب هدایت حرارتی پایین هلیوم که در بخش گپ سوخت تزریق شده است خود باعث تضعیف انتقال حرارت شده در نتیجه در بخش گپ کاهش دما دارای شیب تندى تا سطح داخلی غلاف می‌باشد و بعد از آن حرارت از سطح خارجی غلاف به سیال خنک‌کننده که در کانال جریان دارد انتقال می‌یابد.

$SST K-\omega$ یک سطح آشفتگی بزرگی را در نواحی با تنش نرمال زیاد مانند نواحی سکون و یا نواحی با شتاب زیاد، تولید می‌کنند. این توانایی $SST K-\omega$ یک مزیت و برتری را نسبت به مدل کا-اپسیلون بیان می‌کند.

۵- نتایج

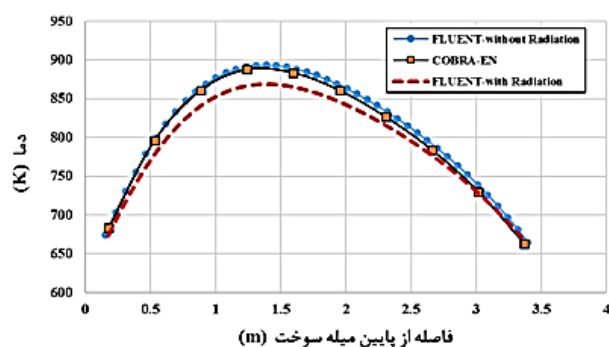
به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، قسمتی از نتایج مربوط به دماهای سوخت، غلاف و سیال خنک‌کننده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مرجع [۲۷] و [۳۱] مورد مقایسه قرار گرفته و در جدول (۲) به همراه درصد خطا ذکر گردیده است که نتایج حاصله حاکی از شبیه‌سازی دقیق مسئله توسط دو کد COBRA-EN (روش تفاضل محدود) و ANSYS-FLUENT



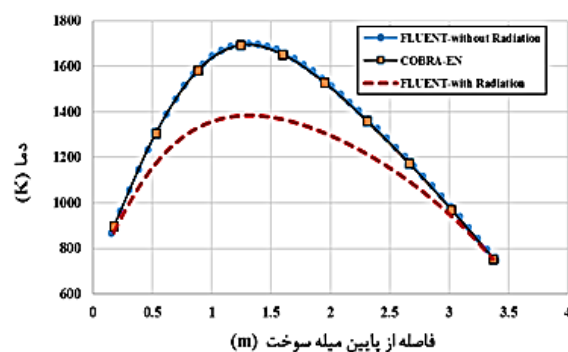
شکل ۴ توزیع دمای شعاعی در میله سوخت

می‌گردد دمای محوری سوخت رابطه مستقیمی با مقادیر ضرایب قدرت محوری دارد و در نقطه‌ای که مقدار ضریب قدرت محوری ماکزیمم باشد (نود ۱۴م) در نتیجه در آن المان دمای سوخت ماکزیمم مقدار می‌باشد.

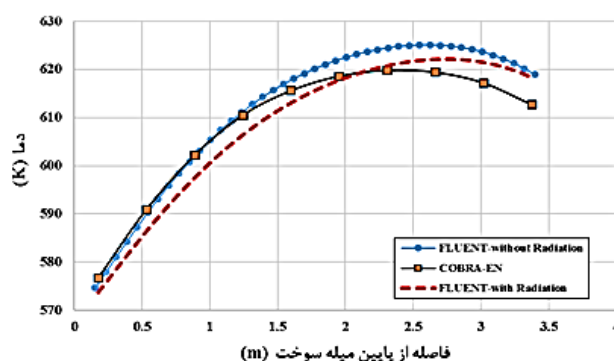
همچنین نمودار توزیع دمایی محوری در طول میله سوخت در شکل (۵) در ۴ بخش از میله سوخت، (الف) سطح داخلی سوخت، (ب) سطح خارجی سوخت، (ج) سطح داخلی غلاف و (د) سطح خارجی غلاف نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه



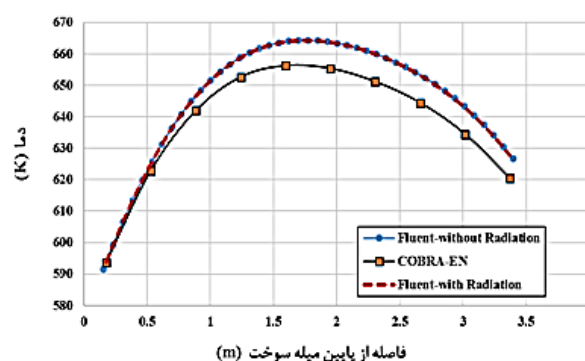
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

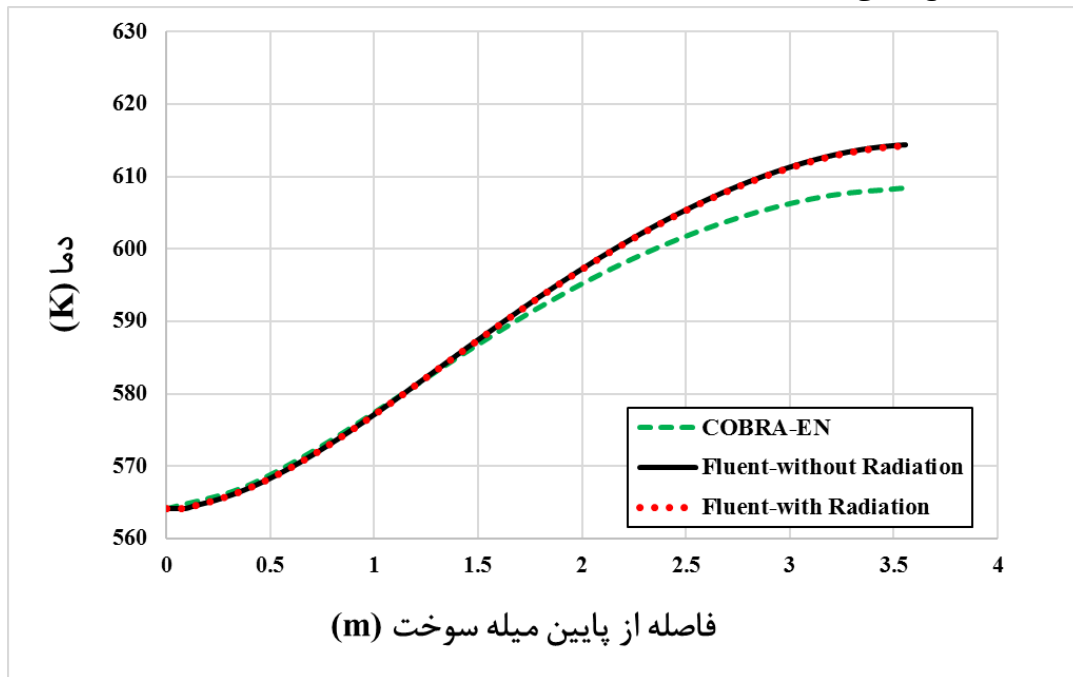
شکل ۵ توزیع دمای محوری در بخش‌های مختلف میله سوخت: (الف) سطح داخلی سوخت، (ب) سطح خارجی سوخت، (ج) سطح داخلی غلاف و (د) سطح خارجی غلاف

جدول ۲ محاسبات ترموهیدرولیکی برای مجتمع سوخت انتخابی و میله سوخت داغ برای قلب راکتور بوشهر

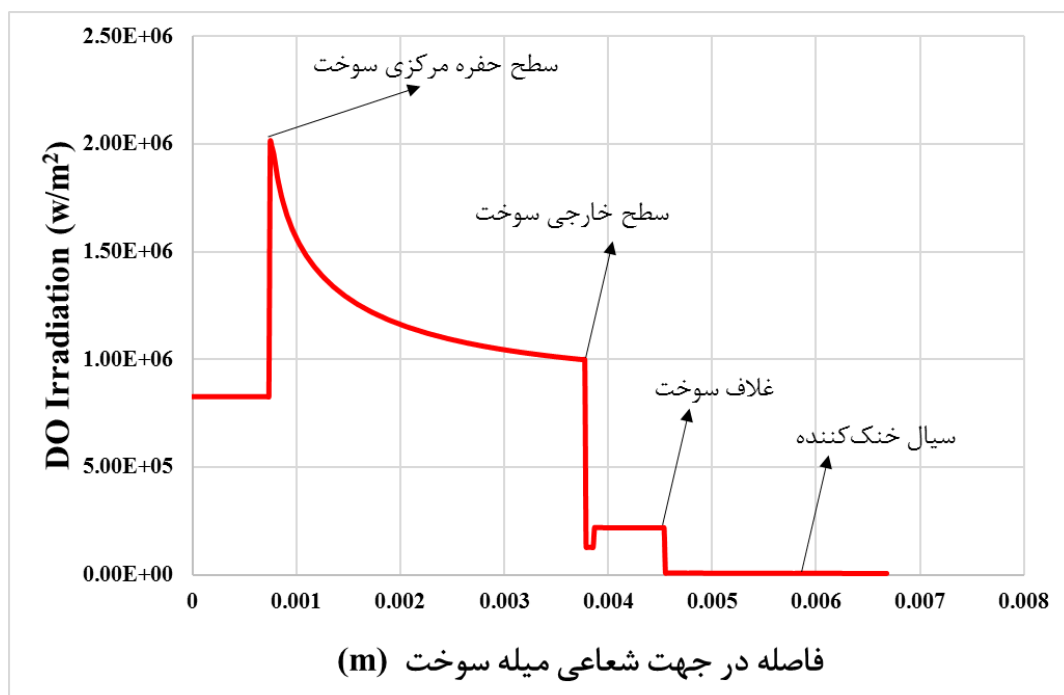
پارامترهای ترموهیدرولیکی	فلوئنت با تشعشع	فلوئنت بدون تشعشع [۴۶]	COBRA-EN [۴۰] با جریان عرضی	نتایج گزارش شده FSAR [۴۵]
	(۱)	(۲)	(۴)	
ماکزیمم دمای داخلی سوخت (K)	۱۴۴۵/۷	۱۷۰/۱	۱۶۹۳/۷	۲۱۵۶/۵ <
ماکزیمم دمای سطح خارجی سوخت (K)	۸۶۶/۸	۸۹۱/۴	۸۸۷/۸	---
ماکزیمم دمای سطح داخلی غلاف (K)	۶۶۰	۶۶۱/۳	۶۶۸/۱	---
ماکزیمم دمای سطح خارجی غلاف (K)	۶۱۲	۶۲۰	۶۲۰/۵	۶۲۵/۱۵ <
ماکزیمم دمای متوسط سوخت (K)	---	---	۱۲۸۷/۷	---
متوسط ماکزیمم آنتالپی شعاعی سوخت (MJ/kg)	---	---	۰/۲۹۳	۰/۹۶۳ <
متوسط دمای خنک کننده در کانال (K)	۵۹۱/۱	۵۹۲/۲	۵۸۷/۹۲	---
دمای خنک کننده در خروجی کانال (K)	۶۱۴/۲	۶۱۴/۳	۶۰۶/۲۸	---
میزان افزایش آنتالپی خنک کننده در طول کانال (MJ/kg)	---	---	۰/۲۵۱	---
ماکزیمم شار حرارتی (MW/m ²)	---	---	۱/۱۷۷	---
مدل شار حرارتی بحرانی	---	---	EPRI	---
مینیمم DNBR برای میله سوخت داغ	---	---	۱/۸۶	۱/۷۵ >
متوسط سرعت محوری سیال در طول کانال (m/s)	۵/۹۲	۵/۹۲	---	---

نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌گردد میزان انرژی حرارتی در سطح داخلی سوخت به دلیل دمای بالا ماکزیمم می‌باشد و با نزدیک شدن به سطح خارجی سوخت به دلیل کاهش دما روند نزولی پیدا می‌کند. در شکل (۸) هم کانتورهای دمایی و تشعشعی در بخش‌های حفره مرکزی، سوخت، گپ هلیوم، غلاف و سیال خنک‌کننده میله سوخت به صورت برش محوری نشان داده شده است.

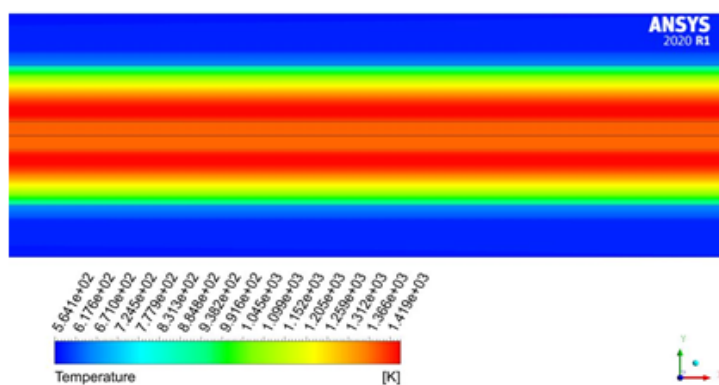
در شکل (۶) تغییرات دمای سیال خنک‌کننده در طول کانال نشان داده شده است، دمای سیال خنک‌کننده مطابق شکل در پایین میله سوخت و ورودی کانال ۵۶۴/۱۵ کلوین بوده و در طول میله سوخت با برداشت حرارت از سطح غلاف سوخت افزایش پیدا می‌کند. بیشینه دمای سیال خنک‌کننده در بالای میله سوخت ۶۰۶ کلوین توسط کد COBRA-EN و ۶۱۴ کلوین توسط نرم‌افزار فلوئنت محاسبه شده است. در شکل (۷) هم تغییرات شار حرارتی ناشی از مدل تشعشعی DO در بخش شعاعی میله سوخت از سطح داخلی سوخت تا سیال خنک‌کننده



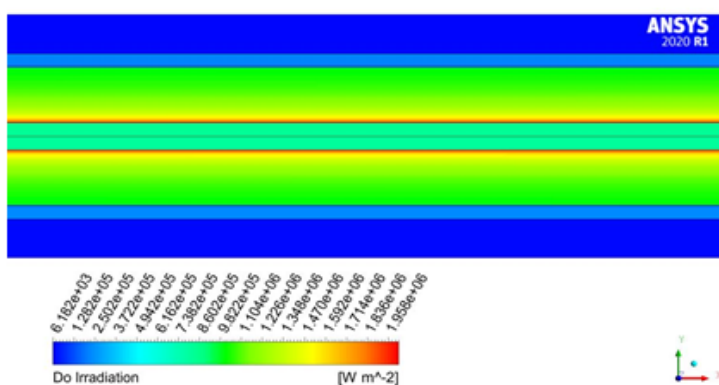
شکل ۶ تغییرات دمای سیال خنک‌کننده در طول کانال



شکل ۷ تغییرات شار حرارتی ناشی از تشعشع مدل DO در بخش شعاعی میله سوخت



(الف)



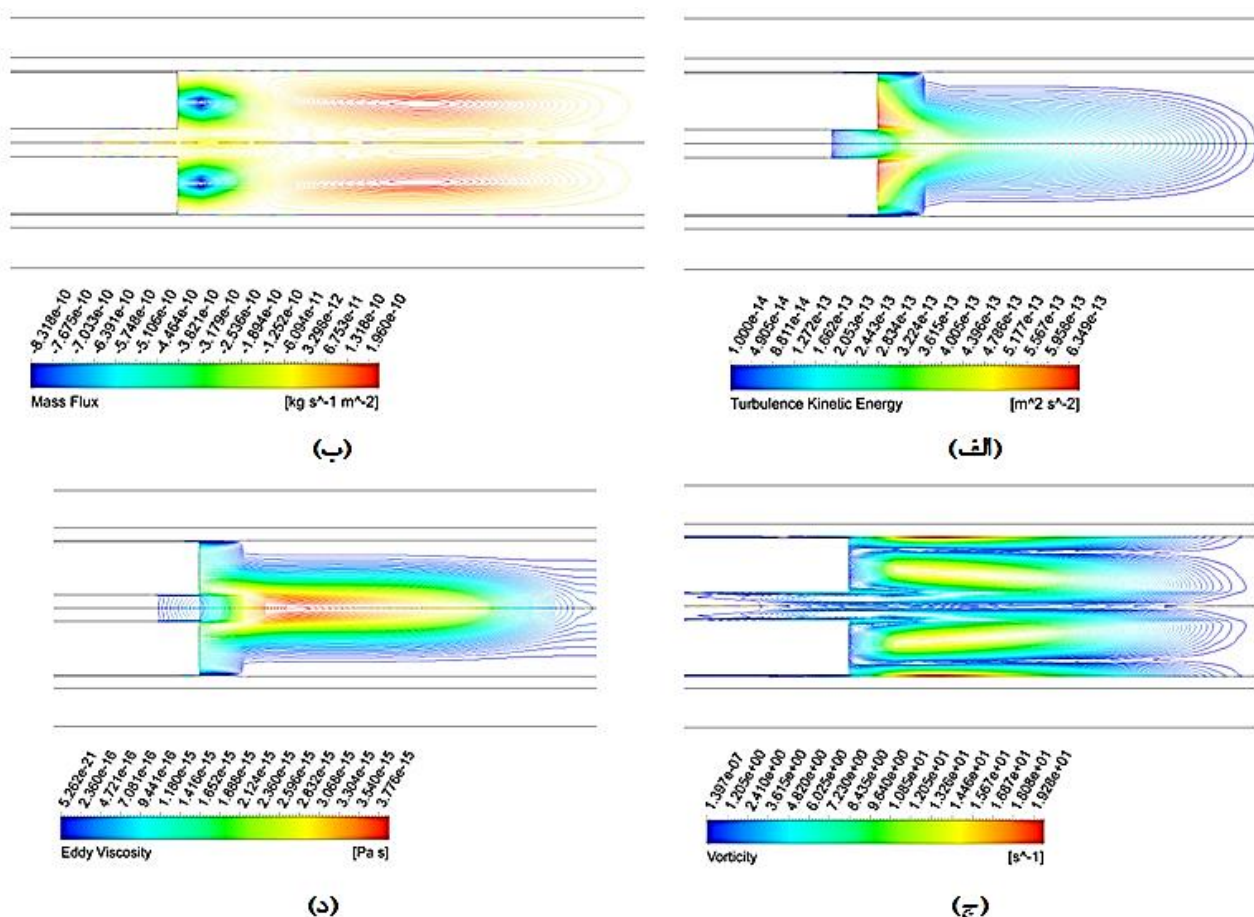
(ب)

شکل ۸ الف) کانتور تغییرات دمایی میله سوخت در بخش ماکزیمم دمایی سوخت، ب) کانتور تغییرات شار تشعشعی

در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیک به روش تک کانال برای میله سوخت داغ راکتور هسته‌ای بوشهر VVER-1000 در شرایط قدرت اسمی با در نظر گرفتن پدیده تشعشع مدلسازی شده است. در کارهای قبلی انجام شده اغلب از اثر پدیده انتقال حرارت تشعشعی صرف نظر شده است، ولی در این پژوهش تاثیر انتقال حرارت تابشی در کنار انتقال حرارت جابجایی باهم بررسی گردیده است. مدل تشعشع استفاده شده در لایه های مختلف میله سوخت از نوع جهات مجزا (DOM) می باشد همچنین توزیع توان خطی (بر واحد طول میله) را از مرجع [۴۰] استخراج کرده و در نرم افزار ANSYS FLUENT وارد شده است. و نتایج بدست آمده در حالت پایا با نتایج حالت بدون در نظر گرفتن تشعشع، نتایج کد COBRA-EN و گزارش آنالیز ایمنی راکتور بوشهر مقایسه شده است که مبین سازگاری خوب نتایج حاصله با نتایج مرجع می باشد. همانطور که از نتایج به دست آمده مشاهده می گردد با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی ماکزیمم دمایی سوخت ۲۵۰ درجه سلسیوس کاهش یافته است. همچنین در این مدل سازی پارامترهای مربوط به گاز هلیوم محبوس در حفره مرکزی سوخت و در فضای بین سوخت و غلاف از جمله تغییرات دما، آشفستگی و ویسکوزیته آن بررسی گردید.

در شکل ۹- از (الف) تا (د) به ترتیب نمودارهای مربوط به انرژی جنبشی آشفستگی توربولانس، تغییرات شار جرمی گاز هلیوم، گردابه وادی ویسکوزیته گاز هلیوم درون پلنوم را نشان می دهد. که انرژی جنبشی آشفستگی (TKE) میانگین انرژی جنبشی در واحد جرم مرتبط با گرداب ها در جریان آشفته گاز هلیوم را نشان می دهد و در محل اتصال حفره مرکزی و گپ به پلنوم بالایی به دلیل تغییر سطح مقطع تغییرات سرعت زیاد می باشد در نتیجه مقدار آن نیز افزایش می یابد. تغییرات شار جرمی ایجاد شده در محل اتصال سوخت به پلنوم بالایی در اثر تغییرات سرعت و دانسیته گاز هلیوم می باشد. همچنین گردابه ایجاد شده از حرکت چرخشی محلی گاز هلیوم در نزدیکی نقطه اتصال سوخت و پلنوم کاملاً مشهود می باشد. و این یک کمیت مهم در تئوری دینامیک سیالات است و چارچوب مناسبی برای درک انواع پدیده های پیچیده جریان، مانند تشکیل و حرکت حلقه های گردابی را فراهم می کند.

۶- نتیجه گیری



شکل ۹ (الف) نمودار تغییرات چگالی گاز هلیوم در راستای محوری (ب) کانتور تغییرات چگالی گاز هلیوم (ج) تغییرات فشار دینامیکی گاز هلیوم و (د) تغییرات سرعت گاز هلیوم در میله سوخت

علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
v	سرعت، m/s
ψ	ضریب عدد ناسلت
μ	ویسکوزیته، N.s/m
λ	ضریب ویسکوزیته ثانویه
زیرنویس ها	
in	ورودی
j	خروجی
g	بخار
f	آب
h	هیدرولیکی
i	ورودی

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
T	دما، $^{\circ}\text{C}$
P	فشار، Pa
X	کیفیت بخار در ورودی
h	آنتالپی تبخیر، J/kg
K	ضریب هدایت حرارتی سوخت، w/m.K
t	زمان، s
q	توان، W
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پرانتل
Gr	عدد گراشف
C	ظرفیت حرارتی ویژه سوخت، $\text{J/kg.}^{\circ}\text{C}$
G	شار جرمی سیال، $\text{kg/m}^2.\text{s}$
D	قطر، m
A	مساحت، m^2
$\dot{m}$	دبی جرمی، kg/s
α	ضریب خلاء

۷- مراجع

- [1] Marakis, J., Papapavlou, C., Kakaras, E., A parametric study of radiative heat transfer in pulverised coal furnaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43 (16), pp. 2961–

- porous channel, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 9, pp. 501-520, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100062>, (2021).
- [11] Singh, A.K., Paul, T., Transient natural convection between two vertical walls heated/cooled asymmetrically, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 11, pp. 143-154, (2006).
- [12] Mehta, R., Jangid, S., Kumar, M., Comparative mathematical study of MHD mixed convection flow of nano-fluids in the existence of porous media, heat generation and radiation through upstanding equidistant plates, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 2240-2248, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.577>, (2021).
- [13] Lakhi, M., Safavinejad, A., Numerical investigation of combined heat transfer (mixed convection-radiation) in 2D channel using the LBM, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 201-222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105368>, (2021).
- [14] Sakly, A., Ben Nejma, F., Heat and mass transfer of combined forced convection and thermal radiation within a channel: Entropy generation analysis, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 171, pp. 114-132, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114903>, (2020).
- [15] Javadzadegan, A., Motaharpour, S.H., Moshfegh, A., AliAkbari, O., Hassanzadeh Afrouzi H., Toghraie, D., Lattice-Boltzmann method for analysis of combined forced convection and radiation heat transfer in a channel with sinusoidal distribution on walls, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 526, pp. 119-135, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121066>, (2019).
- [16] Mandal, S.K., Arnab, D., Dipak, S., Mixed convective heat transfer with surface radiation in a rectangular channel with heat sources in presence of heat spreader, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 14, pp. 23-35, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100423>, (2019).
- [17] Prakash, O., Singh, S.N., Experimental and numerical study of mixed convection with surface radiation heat transfer in an air-filled ventilated cavity, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 171, pp. 59-72, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107169>, (2022).
- 2971, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00347-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00347-6), (2000).
- [2] Spinnler, M., Winter, E.R., Viskanta, R., Studies on high-temperature multilayer thermal insulations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47 (6-7), pp. 1305-1312, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.012>, (2004).
- [3] Mezrhab, A., Bouali, H., Amaoui, H., Bouzidi, M., Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center, *Appl. Energy*, Vol. 83, pp. 1004-1023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.09.006>, (2006).
- [4] Vivek, V., Sharma, A.K., Balaji, C., Interaction effects between laminar natural convection and surface radiation in tilted square and shallow enclosures, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 60, pp. 70-84, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.04.021>, (2012).
- [5] Martyushev, G., Sheremet, A., Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 340-353, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.009>, (2014).
- [6] Menguc, M.P., Viskanta, R., Radiation heat transfer in combustion systems, *Prog Energy Combust Sci.*, Vol. 13(2), pp. 97-160, DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(87\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0360-1285(87)90008-6) (1987).
- [7] Yang, K.T., Numerical modeling of natural convection-radiation interactions in enclosures, *Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2, pp. 131-140, (1986).
- [8] Anil Kumar Sharma, K., Velusamy, C., Balaji, S.P., Conjugate turbulent natural convection with surface radiation in air filled rectangular enclosures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 625-639, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.022>, (2007).
- [9] Modest, M.F., Mazumder, S., Chapter 21 - Radiation Combined with Conduction and Convection, Radiative Heat Transfer (Fourth Edition), *Academic Press*, pp. 775-817, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03206-5>, (2022).
- [10] Ajibade, O.A., Jha, B.K., Jibril, H.M., Bichi, Y.A., Effects of dynamic viscosity and nonlinear thermal radiation on free convective flow through a vertical

- [26] Dorosti. Gh., Marefat, M., Analysis of combined natural convection and radiation heat transfer in finned vertical chambers, *Iranian Mechanical Engineering Research Journal*, Tehran, (2009), (in persian).
- [27]. Chui, E. H., Raithby, G.D., Computation Of Radiant Heat Transfer On A Nonthogonal Mesh Using Finite-Volume Method, *Number. Heat Transfer. Part B*. Vol. 23. pp. 269-228, DOI: <https://doi.org/10.1080/10407799308914901>, (2011).
- [28]. Chai, J. C., Lee, H. S., Finite-Volume Method For Radiation Heat Transfer, *J. Thermophys.*, Vol. 8, pp. 419-425, DOI: <https://doi.org/10.2514/3.559>, (2014).
- [29]. Kuehn, T. H., Goldstein, R. J., An Experimental And Theoretical Study Of Natural Convection In The Annulus Between Horizontal Concentric Cylinders, *J. Fluid Mech.*, Vol. 100. Pp. 695-719, DOI:<https://doi.org/10.1017/S0022112076002012>, (2010).
- [30]. Kuehn, T. H., Goldstein, R. J., An Experimental And Theoretical Study Of Natural Convection Heat Transfer In Concentric And Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli, *J. Heat Transfer.*, Vol. 100, pp. 635-640, DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90071-X), (2009).
- [31]. Cho, C. H., Chang, K. S., Numerical Simulation Of Natural Convection In Concentric And Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli. *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 624-630, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3245177>, (2011).
- [32] Wang, Q., Chen, X., Yi-chong, X., Accident like the Fukushima unlikely in a country with effective nuclear regulation: literature review and proposed guidelines, *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 17, pp. 126-146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.012>, (2013).
- [33] Mochizuki, H., Analysis of the chernobyl accident from 1:19:00 to the first power excursion, *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 237, pp. 300-307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.07.002>, (2007).
- [34] U.S. Nrc, Backgrounder on the three mile island accident, *United State Nucl. Regul. Comm.*, pp. 1-7, (2108).
- [35] IAEA, Thermophysical properties database of materials for light water reactors and heavy water reactors, *Int. Atom. Energy Agency*, (2006). http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/118/37118326.pdf.
- [18] Akinshilo, A.T., Mixed convective heat transfer analysis of MHD fluid flowing through an electrically conducting and non-conducting walls of a vertical micro-channel considering radiation effect, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 156, pp. 506-513, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.100>, (2019).
- [19] Hamdy H., Shafey, N.Y., 3D study of convection-radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by heat sink, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 12, pp. 106-115, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106585>, (2021).
- [20] Nee, A., Hybrid lattice Boltzmann—Finite difference formulation for combined heat transfer problems by 3D natural convection and surface thermal radiation, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 173, pp. 202-209, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105447>, (2020).
- [21] Mikhailenko, S.A., Sheremet, M.A., Natural convection combined with surface radiation in a rotating cavity with an element of variable volumetric heat generation, *Energy*, Vol. 210, pp. 118-128, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118543>, (2020).
- [22] ForuzanNia, M., Ansari, A.B., Gandjalikhan S.A., Transient combined volumetric radiation and free convection in a chamber with a hollow heat-generating solid body, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 119, pp. 104-110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104937>, (2020).
- [23] Han, C.Y., Beak, S.W., Natural Convection Phenomena Affected By Radiation In Concentric And Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli, *J. Heat Transfer. Part A*, Vol. 36, pp. 473-488, (2011).
- [24] Dehgoshayi, A., Ganghi, D., Numerical investigation of combined heat transfer of convection and radiation inside a closed and horizontal chamber, *The third national conference of knowledge and technology of mechanical and electrical engineering of Iran*, (2017), (in persian).
- [25] Rahmati, A.R., Karimpoor, R., Numerical simulation of natural convection heat transfer with radiation in a blocked square enclosure, *The third national conference of knowledge and technology of mechanical and electrical engineering of Iran*, (2015), (in persian).

- [42] Freile, R., Tano, M., Balestra, P., Improved natural convection heat transfer correlations for reactor cavity cooling systems of high-temperature gas-cooled reactors: from computational fluid dynamics to Pronghorn, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 163, pp. 108-116, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108547>, (2021).
- [43] Hanisch, T., Zedler, P., Hurtado, A., Numerical and experimental analysis of flow and heat transfer in a fuel assembly mock-up with transverse flow above the rods, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 89, pp. 95-103, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108809>, (2021).
- [44] Tikadar, A., Najeeb, U., Paul, T. C., Oudah, S. K., Salman, A. S., Abir, A. M., Carrilho, L. A., Khan, J. A., Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in nuclear fuel rod with three-dimensional surface roughness, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 493-507, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.141>, (2018).
- [45] Russia Federal Agency on Nuclear Energy, *Bushehr NPP FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT*, Moscow, (2005).
- [46] Sadeghiazad, M.M., Choobdar, F., Investigation of heat transfer in the hot fuel rod of the nuclear power reactor, *The scientific journal of the Iranian Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31, pp. 61-74, DOI: 10.30506/mmep.2022.563608.2058, (2022), (in persian).
- [36] IAEA, Computational analysis of the behaviour of nuclear fuel under steady state, transient and accident conditions, *Int. Atom. Energy Agency*, (2007). <https://www.taodocs.com/p-50010983.html>.
- [37] Wilhelm, P., Jobst, M., Severe accident research activities at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), *Kerntechnik*, Vol. 81, pp. 134-137, DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110691>, (2016).
- [38] Aounallah, Y., Simulation of HALDEN IFA-650 loss-of-coolant accidents tests with TRACE, *Kerntechnik*, Vol. 77, pp. 316-323, DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110214>, (2012).
- [39] Horhoianu, G., Serbanel, M., Diaconu, C., Investigation of the Ru-43LV fuel behaviour under LOCA conditions in a CANDU reactor, *Kerntechnik*, Vol. 77, pp. 356-364, DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110210>, (2012).
- [40] Faghihi, F., Mirvakili, S.M., Safaei, S., and Bagheri, S., Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 87, No. 6, pp. 39-46, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.10.020>, (2016).
- [41] Sadeghiazad, M.M., Choobdar, F., Investigation of thermal-hydraulic transient analysis of hot fuel rod in the pump failure accident, *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, Vol. 14, pp. 264-279, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2020.115925>, (2021).

عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با مقطع بیضوی متخلخل

نگین رشیدی

دانشجوی کارشناسی ارشد

فرخ مبادرثانی*

استادیار،
مهندسی مکانیک، دانشگاه
صنعتی ارومیه، ارومیه

چکیده: در این مقاله به بررسی عملکرد حرارتی میکرو چاه گرمایی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با سطح مقطع بیضوی متخلخل پرداخته شده است. حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله بر اساس روش المان محدود می باشد و شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ۵/۶ انجام شده است. از معادله ی فورشهیمر-بریکمن-دارسی برای توصیف جریان عبوری از محیط متخلخل بهره برده شده است. در کار حاضر، تجزیه و تحلیل آرایش تخلخل (ε) و ضخامت ناحیه ی متخلخل بر ویژگی های حرارتی و هیدرولیکی تحت سرعت های ورودی مختلف صورت گرفته است. افزایش قطر کوچک بیضی، موجب کاهش قطر مقطع متخلخل شده و با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش می یابد به طوری که در $b=0.275$ میلیمتر و $u_{in}=2$ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به $b=0.175$ میلیمتر، ۶۲/۳۴ درصد کاهش یافته و مقاومت حرارتی ۳۵/۵۰ درصد افزایش یافته است. در سرعت های ورودی پایین ضریب عملکرد کمتر از ۱ بوده و دلیل آن کاهش مومنتوم المان های سیال به دلیل وجود دیواره متخلخل بوده و با افزایش سرعت، ضریب عملکرد بیشتر از ۱ می شود زیرا افزایش مومنتوم و همچنین افزایش سطح تماس مابین سیال و ماتریس جامد موجب بهبود عملکرد حرارتی شده و این امر نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می باشد.

واژه های راهنما: میکروچاه گرمایی، سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده، تخلخل، عدد ناسلت، ضریب عملکرد

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

Negin Rashidi
Msc. Student

Farrokh
Mobadersani*

Assistant Professor,
Mechanical
Engineering
Department, Urmia
University of
Technology, Urmia

Thermal performance of microchannel heat sink containing a suspension of phase change materials with a porous oval cross section

Abstract: In this article, the thermal performance of microchannel heat sink containing a suspension of phase change materials with a porous elliptical cross-section has been investigated. Solving the basic equations governing the problem is based on the finite element method and the simulation is done using Comsol multiphysics software 5.6. Forschheimer-Brickman-Darcy equations are used to describe the flow through the porous medium. In the present work, the analysis of the arrangement of porosity (ε) and the thickness of the porous area has been done on the thermal and hydraulic characteristics under different inlet velocities. The increase in the small diameter of the ellipse causes a decrease in the diameter of the porous section and the pressure drop decreases with the increase of the fluid inlet speed, so that at $b = 0.275$ mm and $u_{in} = 2$ m/s, the pressure drop compared to $b = 0.175$ mm is 62.34 % decreased and the thermal resistance increased by 35.50 % At low inlet velocities, the coefficient of performance is less than 1, and the reason for this is the decrease in the momentum of the fluid elements due to the presence of the porous wall, and with the increase in speed, the coefficient of performance is greater than 1, because the increase in momentum and also the increase in the contact surface between the fluid and the solid matrix cause The thermal performance has been improved and this indicates the superiority of the porous microchannel heat sink compared to the microchannel heat sink without porous medium.

Keywords: Micro channel heat sink, Suspension of phase change materials, Porous, Nusselt number, Coefficient performance

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت علم و دستگاه‌های صنعتی، بررسی افزایش نرخ انتقال حرارت امری ضروری و مهم است زیرا افزایش سرعت و راندمان این دستگاه‌ها در گرو بالابردن راندمان حرارتی جهت خنک کاری می‌باشد که تحقیقات و پژوهش‌های محققین در دهه‌های اخیر، گویای اهمیت این موضوع می‌باشد. از طرفی افزایش تقاضای انرژی، افزایش و کارایی و تقاضای رو به رشد برای کوچک سازی محصولات در تمامی بخش‌های صنعتی بگونه‌ای که با اطمینان بیشتر، سرعت بالاتر و مقرون بصره تر همراه باشد، موجب شده است چالش‌های جدیدی برای طراحی و بهره برداری سیستم‌های مدیریت حرارتی پیش روی محققان قرار بگیرد. از این رو استفاده از میکروکانال‌ها برای تبادل انتقال حرارت و انتقال جرم، تکنیکی مطلوب بنظر می‌رسد.

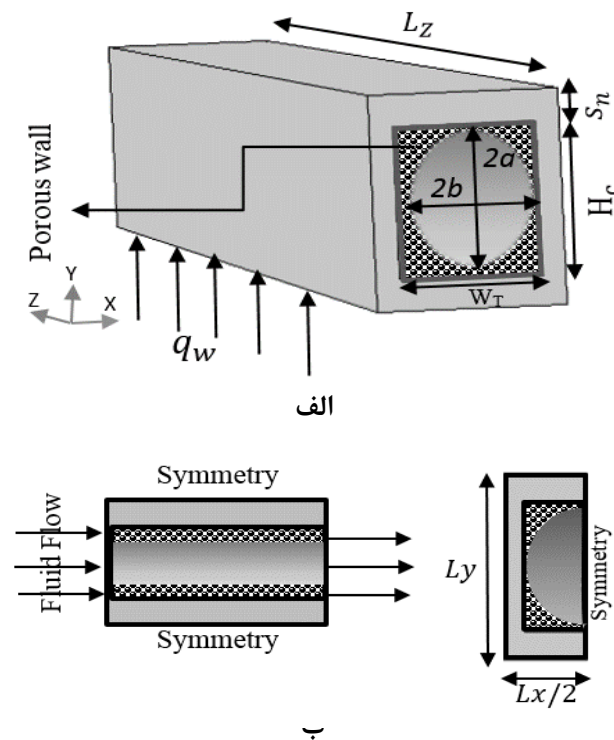
قطر هیدرولیکی رابطه‌ی مستقیمی با عدد رینولدز و عاملی بسیار تاثیر گذار بر روی عملکرد انتقال حرارت می‌باشد. کاهش قطر هیدرولیکی میکروکانال‌ها در بیشتر مبدل‌های حرارتی فشرده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت به واسطه‌ی سطح وسیع تر در واحد حجم می‌شود. از طرفی انتخاب سطح مقطع مناسب به منظور دستیابی به نرخ انتقال حرارت بالاتر از چالش‌های اصلی محققین می‌باشد. لی و همکاران [۱] تاثیر اشکال سطح مقطعی مختلف را برای میکرو چاه گرمایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت خنک کنندگی میکرو چاه گرمایی مربعی ۷۰ درصد بیشتر از میکرو چاه گرمایی دایروی می‌باشد. تحقیقات بریندا و همکاران [۲] نشان داد که در یک میکرو چاه گرمایی با آرایش نردبانی، با کاهش نسبت ابعاد، ضریب انتقال حرارت بطور موثر افزایش می‌یابد. جادها و همکاران [۳] با هدف بررسی شکل و ارتفاع پره‌ها، افت فشار و مشخصات حرارتی میکرو چاه گرمایی را با پره‌های بیضوی، مربعی، دایروی و شش ضلعی شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش شعاع پره‌ها عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین پره با هندسه‌ی دایروی عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به سه نوع پره دیگر دارد.

برای افزایش عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی، قله و سونی [۴] انتقال حرارت میکرو چاه گرمایی موجدار را با فرض مقاطع مختلف، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش دامنه‌ی موجی به دلیل اختلاط سیال افزایش یافته و مقطع دایروی با دامنه‌ی موج ۲۰ میکرومتر بیشترین ضریب انتقال حرارت را ارائه می‌دهد. سو و همکاران [۵] جریان سیال و انتقال حرارت را در یک میکرو چاه حرارتی سه بعدی با کانال‌های سینوسی شبیه سازی کردند. نتایج

این شبیه سازی حاکی از آن بود که موقعیت گردابه‌ها در طول مسیر ممکن است تغییر یابد و منجر به اختلاط زیاد سیال شده و کارایی و نرخ انتقال حرارت بالایی نسبت به میکروکانال مستقیم نشان دهد. با توجه به اینکه ذخیره‌ی انرژی حرارتی نهفته توسط گرمای همجوشی هسته‌ی مواد تغییر فاز دهنده صورت می‌گیرد و این مواد با گرفتن گرما در طی فرایند تغییر فاز، دمای خود و محیط را ثابت نگه می‌دارند و مقدار بسیار زیادی گرما را جذب و آزاد می‌کنند. آراسو و مجومدار [۶] به تحلیل عددی ذوب موم پارافین با آلومینیا در یک محفظه‌ی مربعی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که ذخیره‌ی انرژی در دیواره‌های عمودی نسبت به دیواره‌های افقی بیشتر است. آخیش و همکاران [۷] عملکرد چاه گرمایی را با مواد تغییر فاز و پره‌های متصل عمودی مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که تغییر ضخامت پره‌ها و فاصله آن‌ها بر عملکرد چاه گرمایی تأثیر بسزایی دارد. افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود. یکی از روش‌های افزایش نرخ ذخیره و آزادسازی، افزایش هدایت حرارتی ذرات تغییر فاز دهنده می‌باشد. افزودن نانوذرات به ذرات تغییر فاز دهنده موجب بهبود این خاصیت می‌شود. حسین زاده و خدادادی [۸] بهبود عملکرد مواد تغییر فاز دهنده را با افزودن نانو ذرات بررسی کردند. نتیجه‌ی حاصله افزایش نرخ انتقال حرارت با افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده بود. لیو و همکاران [۹] ویژگی جریان و عملکرد حرارتی میکرو چاه گرمایی را در یک لوله دایره‌ای افقی تحت شار حرارتی یکنواخت مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که ضریب انتقال حرارت با سرعت ورودی و ظرفیت گرمای نهان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده مرتبط است. با توجه به اینکه استفاده از محیط متخلخل می‌تواند موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد، اخیراً پژوهش‌های فراوانی بر روی اصول محیط‌های متخلخل صورت گرفته است. مبادرثانی و رضواند [۱۰] تاثیر میدان مغناطیسی اعمالی توسط یک آهنربای دائمی بر عملکرد حرارتی و همینطور توزیع نانوذرات داخل یک حفره را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج گزارش شده، وجود ناحیه‌ی متخلخل در حفره منجر به افزایش چشمگیری در انتقال حرارت می‌گردد. فرهانی و همکاران [۱۱] تاثیر محیط متخلخل و سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده را برای میکروچاه‌های گرمایی با هندسه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش عدد داری و غلظت مواد تغییر فاز دهنده عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد.

با توجه به مرور کارهای پیشین، تحلیل و مطالعه‌ی جریان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در میکروکانال‌هایی با سطح

تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله مستقل از نرخ کرنش می‌باشد، لذا میتوان مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده را سیال نیوتنی معرفی کرد. کسر جرمی نیز برای اطمینان از این امر ۱۰٪ $Gm =$ انتخاب شده است [۱۳]. خواص ترموفیزیکی سیال خنک کننده و بستر میکرو چاه گرمایی در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۱ الف - طرح‌های از هندسه مورد مطالعه و حوزه‌ی محاسباتی. ب - شرایط مرزی و هندسه مورد مطالعه از دید بالا و روبرو

جدول ۱ معرفی پارامترهای هندسی و ابعاد هندسه مورد مطالعه

پارامتر	نماد	مقیاس (mm)
طول میکروکانال	L_z	۱۰
عرض میکروکانال	L_x	۱۶
ارتفاع میکروکانال	L_y	۱
ضخامت طولی بستر جامد	S_n	۰/۱
عرض میکروکانال	W_T	۰/۶
ارتفاع میکروکانال	H_c	۰/۸
قطر کوچک بیضی	b	(۰/۱۷۵ - ۰/۲۲۵ - ۰/۲۷۵)
قطر بزرگ بیضی	a	۰/۳۲۵

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی سیال خنک کننده و بستر جامد

آب	سوپانسیون ۱۰٪	سیلیکون
$\rho (kgm^{-1})$	۹۹۸/۲	۲۳۲۹
$c_p (kJ kg^{-1} K^{-1})$	۴۱۸۹	۷۰۲
$k (Wm^{-1} K^{-1})$	۰/۴۶۳	۱۲۴
$\mu (kg m^{-1} s^{-1})$	۰/۰۰۰۵۹۸	-

مقطع بیضوی و با دیواره‌های متخلخل تحت آرایش‌های مختلف متخلخل انجام نگرفته است. باتوجه به اهمیت روزافزون استفاده از سوپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در امر خنک کاری ابزارآلات صنعتی، در مطالعه‌ی حاضر نسبت به ارائه تحلیل عددی این نوع جریان‌ها اقدام شده است.

۲- تعریف مسئله و مدل سازی ریاضی

در تحقیق حاضر میکرو چاه گرمایی سه بعدی با سطح مقطع بیضوی متخلخل شامل ۲۰ میکروکانال بوده که عرض و ارتفاع آن‌ها به ترتیب $L_x = 16$ و $L_y = 1$ میلی‌متر می‌باشد. به دلیل تقارن بین کانال‌ها، حوزه‌ی محاسباتی مطابق شکل (۱- الف) ساده شده و نتایج برای کل میکروکانال‌ها تعمیم داده می‌شود. شار گرمایی یکنواخت $q_w = 2000 \frac{KW}{m^2}$ از دیواره‌ی پایینی چاه گرمایی اعمال می‌شود. شرایط مرزی و شرط تقارن در شکل (۱- ب) که زاویه‌ی دید از بالا و روبروی برش خورده میکروکانال می‌باشد ارائه شده است. ضخامت بستر عرضی جامد به صورت $\frac{L_x - W_T}{2}$ تعیین شده است. معرفی پارامترهای هندسی و ابعاد دقیق آنها در جدول (۱) آورده شده است. جنس مواد بستر جامد و محیط متخلخل سیلیکون [۱۲] می‌باشد. سیال عامل در میکروچاه حرارتی، سوپانسیون تغییر فاز دهنده فرض شده است. جنس هسته و پوسته‌ی مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب ان -اکتا دکان و پلی متیل متاکریلات می‌باشد. سیال خنک کننده با دمای ۲۹۳ کلوین و سرعت ۱ متر برثانیه وارد میکروکانال می‌شود. جریان سیال تراکم ناپذیر و آرام فرض می‌شود. ذرات تغییر فاز دهنده بعد از تغییر فاز و سیال پایه، رفتار نیوتنی داشته و فرآیندهای حرارتی و جریانی، پایا در نظر گرفته می‌شوند. باتوجه به رابطه‌ی زیر:

$$Re = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} \quad (1)$$

در حداکثر سرعت یعنی ۲ متر برثانیه عدد رینولدز برابر ۱۲۶۸/۱ می‌باشد که این مقدار در حوزه جریان آرام بوده لذا جریان آرام فرض می‌شود.

۲-۱- معرفی سوپانسیون مواد تغییر فاز دهنده

در کار حاضر مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده در سیال پایه (آب خالص) پراکنده شده‌اند. هسته، ان -اکتا دکان با قطر ۵ میکرومتر و پوسته از کپسول پلی متیل متاکریلات تشکیل شده است. با توجه به اینکه ویسکوزیته‌ی برشی مواد

با توجه به فرضیات ذکر شده، معادلات حاکم برای انتقال حرارت و جریان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل به شرح زیر است [۱۶]:

معادله پیوستگی:

معادله پیوستگی برای سیال در ناحیه متخلخل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

معادله مومنتوم:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \\ &= -\nabla p + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V} \\ & - C \left(\frac{\mu_f}{K} \right. \\ & \left. + \frac{\rho_f C_F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \right) \vec{V} \quad \begin{cases} C = 0 & \text{if } \varepsilon = 1 \\ C = 1 & \text{if } \varepsilon \neq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

ضریب C در معادله مومنتوم به گونه‌ای تعریف می‌شود که اگر $\varepsilon = 1$ به معنی محیط شفاف یا بدون تخلخل می‌باشد و اگر $\varepsilon \neq 1$ باشد به مفهوم محیط متخلخل می‌باشد. μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال، K ضریب نفوذپذیری و C_F ضریب فورشه‌ایمر می‌باشند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۷]:

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad (6)$$

$$C_F = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}} \quad (7)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot (\varepsilon C_{v,i} \vec{V} (\rho_i C_{p,i} T + p)) = k_{eff} \nabla^2 T. \quad (8)$$

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_p$$

در معادله بالا k_{eff} نشان دهنده هدایت حرارتی موثر برای ناحیه متخلخل است و k_p هدایت حرارتی ماتریس جامد در فین‌های متخلخل می‌باشد. در ناحیه جامد، فقط هدایت گرمایی رخ می‌دهد:

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (9)$$

۲-۲-۱- شرایط مرزی مسئله

ویسکوزیته سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$\frac{\mu_{su}}{\mu_w} = (1 - c_v - B c_v^2)^{-2.5} \quad (2)$$

ضریب B مقدار ثابتی بوده و برابر $1/16$ می‌باشد [۱۴].

گرمای ویژه سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده را به عنوان تابعی از دما با استفاده از رابطه زیر می‌توان تعریف کرد [۱۵].

$$\begin{aligned} C_p(T) = & \begin{cases} C_{p,s} & \text{if } T < T_{solidus} \\ C_{p,s} + \frac{LH}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{if } T_{solidus} \leq T < T_{liquidus} \\ C_{p,l} & \text{if } T \geq T_{liquidus} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه فوق $T_{solidus}$ و $T_{liquidus}$ به ترتیب حد اعقل و حداکثر دمای ذرات تغییر فاز دهنده در حالت مایع و جامد می‌باشد. $C_{p,s}$ و $C_{p,l}$ نیز گرمای ویژه سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در حالت مایع و جامد می‌باشد.

۲-۲-۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

فرضیات در نظر گرفته برای تحلیل جریان و انتقال حرارت در میکروچاه حرارتی با سطح مقطع بیضوی متخلخل با گذر سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده به شرح زیر است:

- جریان سیال عامل تراکم ناپذیر فرض شده و تمامی خواص ترموفیزیکی ثابت و مستقل از دما در نظر گرفته شده است.
- میکرو کپسول‌های تغییر فاز دهنده در سیال پایه به صورت همگن پخش شده و ناحیه متخلخل اشباع از سوسپانسیون می‌باشد.
- سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر بوده و جریان سیال آرام در نظر گرفته شده است.
- در ناحیه متخلخل تعادل حرارتی مابین ماتریس جامد و سیال عامل فرض شده است.
- با توجه به مومنتوم بالای سیال عامل، به منظور مدل‌سازی ناحیه متخلخل از معادله فورشه‌ایمر داریسی بریکمن برای تصحیح معادلات مومنتوم در محیط متخلخل بهره برده شده است.
- تغییرات حجم ذرات تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده و لغزش سرعت مابین میکرو کپسول و سیال پایه ناچیز فرض شده است.

عملکرد هیدرولیکی میکرو چاه گرمایی را می‌توان با استفاده از افت فشار (ΔP) و ضریب اصطکاک (f) ارزیابی کرد. این دو پارامتر با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۹]

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (20)$$

در رابطه‌ی بالا P_{in} و P_{out} به ترتیب فشار ورودی و خروجی در یک میکروکانال واحد می‌باشد.

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{L_x \rho_f u_{in}^2} \quad (21)$$

برای ارزیابی جامع عملکرد هیدرولیکی چاه حرارتی از ضریب عملکرد (PEF) که به صورت زیر محاسبه می‌شود، استفاده می‌شود: [۲۰]

$$PEF = \frac{(Nu_j / Nu_0)}{(f_j / f_0)^{1/3}} \quad (22)$$

در رابطه‌ی فوق زیرنویس هایی که با j مشخص شده اند، میکروچاه حرارتی با دیواره متخلخل را نشان می‌دهند و زیرنویس های 0 نشانگر میکروچاه حرارتی بدون دیواره متخلخل می‌باشد.

۳- حل عددی و شبکه بندی و اعتبار سنجی

۳-۱- حل عددی

حل عددی معادلات فوق به روش گالرکین با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ۵/۶ انجام گرفته است. شبکه بندی نیز توسط همین نرم افزار صورت گرفته است. به منظور حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله از روش باقی مانده‌های وزنی گالرکین بر اساس المان محدود که یکی از رایج ترین روش عددی برای حل مسائل مهندسی و مدل‌های ریاضی است استفاده گردیده است. توابع وزنی به صورت زیر جهت حداقل نمودن باقی مانده‌ی متغیرهای میدانی بکار گرفته شده‌اند:

$$\int_C w f(x) Res. dx \quad (23)$$

که در آن w , f , Res , ϵ و C به ترتیب متغیر مکانی، باقی مانده، تابع وزنی و کل دامنه می‌باشد. تبدیل مشتقات جزئی به معادلات انتگرالی با استفاده از روش باقی مانده انجام گرفته و روش تکراری نیوتن-رفسون جهت حل این معادلات استفاده شده است. برای

شرایط مرزی برای دامنه‌ی محاسباتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

شرایط ورودی:

$$x = 0 \rightarrow \begin{cases} u = u_{in} \\ v = 0 \\ w = 0 \\ T_{in} = const \end{cases} \quad (10)$$

شرایط خروجی:

$$x = L_x \rightarrow p = 0 \quad (11)$$

شرایط بر روی دیواره به شرح زیر است:

$$\vec{V} = 0 \quad T_s = T_f \quad k_s \nabla T_s|_n = k_f \nabla T_f|_n \quad (12)$$

شرایط بر روی باله‌های متخلخل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} u_p &= u_f & v_p &= v_f & w_p &= w_f \\ k_{eff} \nabla T_p|_n & & & & & \\ &= k_f \nabla T_p|_n & T_p &= T_f \end{aligned} \quad (13)$$

بر روی دیواره‌ی پایینی چاه حرارتی شار حرارتی یکنواختی اعمال می‌شود:

$$q = const \quad (14)$$

شرط تقارن برای دیواره‌های خارجی اعمال می‌شود:

$$\nabla T_s|_n = 0 \quad (15)$$

Π بردار نرمال واحد برای سطوح می‌باشد.

عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی با باله‌های متخلخل را با مقاومت حرارتی موضعی (R_L) مقاومت حرارتی کل (R_T) و عدد ناسلت (Nu) مشخص می‌شود [۱۸]

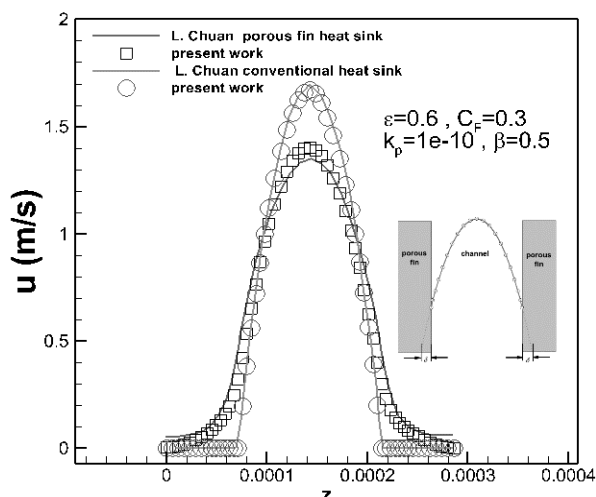
$$R_L = \frac{T_{avg.out} - T_{avg.in}}{qA} \quad (16)$$

$$R_T = \frac{T_{out.max} - T_{in}}{qA} \quad (17)$$

$$Nu = \frac{D_h}{k_f R_T} \quad (18)$$

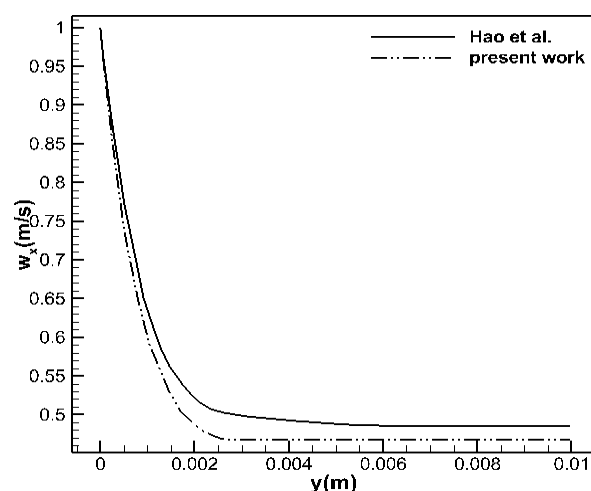
قطر هیدرولیکی میکروکانال با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$D_h = \frac{2H_c W_T}{H_c + W_T} \quad (19)$$



شکل ۲ مقایسه‌ی توزیع سرعت در کانال و پره‌های متخلخل را برای میکروچاه گرمایی ساده و میکروچاه گرمایی با پره‌های متخلخل برای کار حاضر و کار چوان و همکاران [۲۲]

شکل (۳) مقایسه‌ی توزیع سرعت در سطح مشترک بین محیط متخلخل و بستر جامد با سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه و $\varepsilon=0.8$ برای میکروچاه گرمایی با سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با کار هائودای و همکاران [۲۳] نشان داده شده است. حداکثر اختلاف عددی کد حاضر ۶ درصد بوده که نشان دهنده‌ی صحت کد عددی حاضر می‌باشد.



شکل ۳ مقایسه‌ی توزیع سرعت در سطح مشترک بین محیط متخلخل و بستر جامد با فرض $u_{in} = 1$ متر بر ثانیه و $\varepsilon=0.8$ الف) کار هائودای و همکاران [۲۳] ب) کار حاضر

۴- نتایج و بحث

در این بررسی تاثیر آرایش متخلخل بر مبنای افزایش تخلخل خطی در راستای طول کانال (ILPL)، کاهش تخلخل خطی در

تمامی شبیه سازی‌های انجام شده، خطای عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

$$\left| \frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^{n+1}} \right| < 10^{-5} \quad (24)$$

که در آن n نشان دهنده‌ی هر گام می‌باشد. گسسته سازی‌های متغیرهای سرعت و فشار با استفاده از المان محدود لاگرانژی به روش P_2-P_1 انجام گرفته است [۲۱].

۳-۲- شبکه بندی

استقلال عددی از شبکه در شرایط $u_{in} = 1$ متر بر ثانیه، $d_p = 0.1$ ، $\varepsilon = 0.8$ ، $b = 0.175$ میلی‌متر و $C_m = 10$ درصد بررسی شده است. مطابق جدول (۲) مقایسه‌ی ناسلت میانگین در تعداد شبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد المان‌ها اگرچه خطای عددی کاهش می‌یابد، ولی برای کم کردن هزینه‌های محاسباتی تعداد شبکه‌ی ۶۴۳۲۵۳ در تمامی شبیه سازی ارائه شده، استفاده شده است.

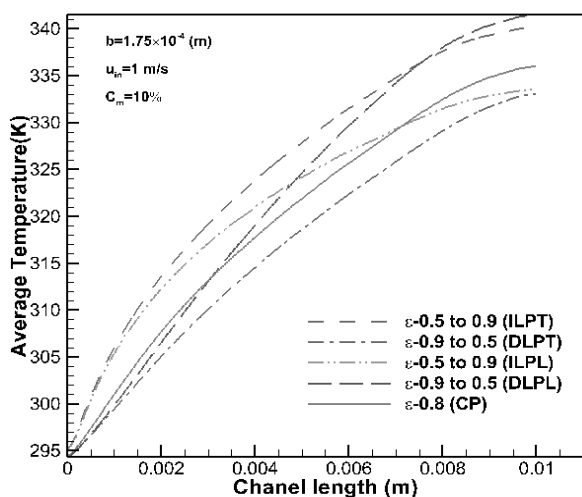
جدول ۲ بررسی استقلال از شبکه

تعداد شبکه	Nu	$\left \frac{Nu_n - Nu_{n-1}}{Nu_{n-1}} \right \%$
۳۵۲۶۹۱	۷۳/۳۱۵	-
۴۸۲۶۲۲	۷۳/۹۰۰	۰/۷۹
۵۲۸۳۶۵	۷۴/۲۱۲	۰/۴۲
۶۴۳۲۵۳	۷۴/۲۵۹	۰/۴۲
۷۷۳۲۵۶	۷۴/۲۵۳	۰/۰۱

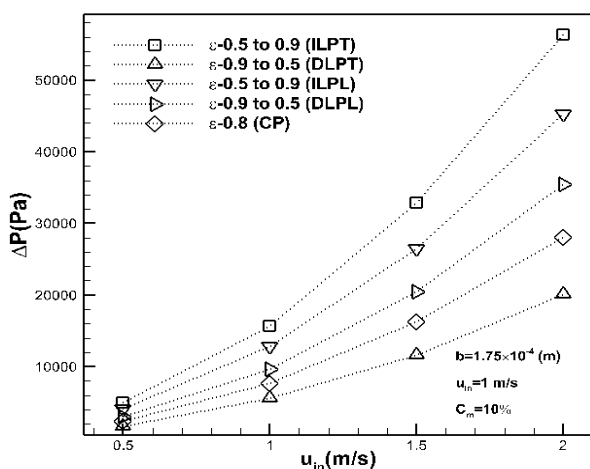
۳-۳- اعتبار سنجی

برای بررسی صحت کد شبیه سازی شده برای میکروچاه گرمایی مستقیم با بستر متخلخل مقایسه‌ای میان شبیه سازی ارائه شده توسط چوان و همکاران [۲۲] صورت گرفته است. شکل (۲) توزیع سرعت در کانال و پره‌های متخلخل را برای میکروچاه گرمایی ساده و میکروچاه گرمایی با پره‌های متخلخل برای کار حاضر و کار چوان و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف ۷/۱۴ درصد می‌باشد که درصد خطای قابل قبولی برای کد حاضر و کد چوان و همکاران می‌باشد.

شکل (۵) تغییرات افت فشار برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف را ارائه می‌دهد. به دلیل افزایش درگ اصطکاکی، با افزایش سرعت ورودی افت فشار افزایش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود DLPT کمترین افت فشار و ILPT بیشترین افت فشار را نشان می‌دهد. در سرعت‌های کم اختلاف افت فشار میان حالت‌های مختلف کمتر بوده و با افزایش سرعت این اختلاف افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند به طوری که در سرعت ۲ متر بر ثانیه افت فشار در آرایش ILPT نسبت به آرایش DLPT، ۶۴/۴۱ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این امر ذوب مواد تغییر فاز دهنده بوده که در ILPT در فاصله‌ی کمتری از DLPT در طول مسیر شروع به تغییر فاز کرده و افت فشار را افزایش می‌دهد.



شکل ۴ تغییرات دمای موضعی در طول مسیر جریان میکروکانال با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف



شکل ۵ تغییرات افت فشار برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف

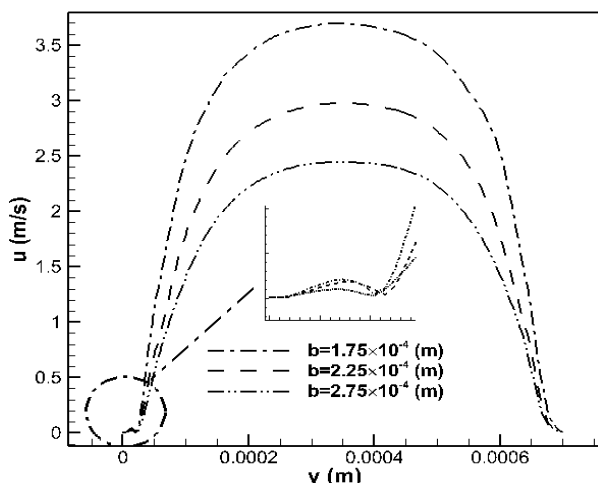
راستای طول کانال (DLPL)، افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (ILPT)، کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) و تخلخل ثابت (CP) بروی خنک سازی میکروچاه گرمایی با سطح مقطع بیضوی و دیواره‌ی متخلخل حاوی سوسپانسون مواد تغییر فاز دهنده پرداخته می‌شود. تغییرات قطر کوچک بیضی در راستای بررسی تاثیر محیط متخلخل بر روی افت فشار و نرخ انتقال حرارت صورت گرفته است. همچنین عملکرد حرارتی کلی میکرو چاه گرمایی با استفاده از ضریب عملکرد جامع (PEF) سنجیده شده است. در تمامی شبیه سازی‌های انجام شده، کمیت‌های $Q=2000$ ، kW/m^2 و $C_m=10\%$ و $T_{in}=293$ ثابت فرض شده‌اند.

شکل (۴) تغییرات دمای موضعی در طول مسیر جریان را با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف نشان می‌دهد. استفاده از محیط متخلخل می‌تواند موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد. افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (ILPT) از ۰/۵-۰/۹ با توجه به اینکه در ابتدا تخلخل بسیار کم بوده و موجب کاهش مومنوم سیال خنک کننده و افزایش افت فشار می‌گردد، موجب می‌شود سیال در دمای بالاتری از میکرو کانال خارج شود. اما در کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) از ۰/۵-۰/۹ مشاهده می‌شود سیال در دمای پایین تری نسبت به حالت‌های دیگر از میکروکانال خارج می‌شود. زیرا در ابتدا به دلیل تخلخل بالا المان‌های سیال مومنوم بالایی داشته و سیال خنک کننده در دمای پایین تری در طول مسیر جریان می‌یابد. از طرفی در ILPT ذرات تغییر فاز دهنده در فاصله‌ی کمتری نسبت به DLPT شروع به تغییر فاز می‌کنند. با توجه به رشد لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای مسیر جریان، و اینکه افزایش تخلخل خطی در راستای طول کانال (ILPL) در امتداد مسیر جریان می‌باشد موجب می‌شود در انتهای کانال به دلیل بالا بودن نفوذپذیری، سیال نسبت به حالت (DLPL) دمای کمتری داشته باشد از طرفی به دلیل رشد لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای کانال در تخلخل ثابت، در اواسط مسیر CP دمایی کمتر از آرایش‌های DLPL، ILPL و ILPT را نشان می‌دهد. با اینکه DLPL در ابتدای کانال دمای پایین تری دارد ولی به دلیل کاهش نفوذپذیری تبادل حرارتی میان سیال خنک کننده و بستر میکروکانال کم شده و دمای سیال خروجی افزایش می‌یابد.

³ Decreasing linear porosity in the transverse direction
⁴ constant porosity

¹ Decreasing linear porosity in the longitudinal direction
² Increasing linear porosity in the transverse direction

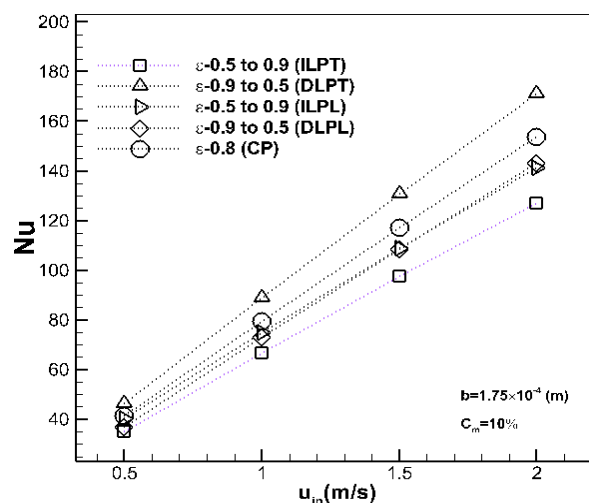
می‌باشد. این امر نیز به دلیل کاهش هرچه بیشتر تکانه‌های بزرگتر جریان در محیط متخلخل است که در مدلسازی غیرداریسی محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود (ترم منبع فورشه‌ایمر در معادله‌ی مومنتوم). این پدیده در دیواره‌ی بالایی میکروکانال نیز قابل مشاهده است، با این تفاوت که به دلیل کوچکتر بودن ضریب تخلخل در آن دیواره، میزان کاهش گرادیان سرعت در محیط متخلخل ضعیف‌تر است.



شکل ۷ پروفیل سرعت در راستای y با فرض اندازه‌های مختلف قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon = 0.5$ تا 0.9 ، $C_m = 10\%$

شکل (۸) توزیع دما در راستای عرضی کانال (راستای X) را در فواصل مختلف از ورودی کانال نشان می‌دهد. این نتایج در فاصله‌ی $y = L/2$ رسم گردیده‌است. به منظور بررسی تغییرات دمایی در این شکل، $b = 0.175$ میلی‌متر (دارای بیشترین ضخامت محیط متخلخل) فرض شده‌است. در مقطع نزدیک ورودی کانال ($Z = 0.003$) سیال به دمای حدود 312 کلوین در نزدیکی دیواره‌ی گرم می‌رسد و با دور شدن از دیواره‌ی گرم، دمای سیال کاهش داشته بگونه‌ای که در مرکز کانال دما تقریباً برابر دمای ورودی (293 کلوین) خواهد بود. با افزایش Z (در فواصل دور از ورودی کانال)، دمای سیال در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد که دلیل آن گرم شدن میدان سیال و افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی می‌باشد. این امر موجب کاهش گرادیان دمایی بر روی دیواره‌ی گرم و بنابراین کاهش عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره نیز می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه تا $X = 0.00125$ متر ناحیه‌ی متخلخل می‌باشد، به دلیل مقادیر بالای انتقال حرارت در این ناحیه، در هر مقطع با پیشروی به سمت مرکز میکروکانال و دور شدن از دیواره‌ها دما روندی نزولی را طی می‌کند. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که شیب توزیع دمای سیال در مجاورت

شکل (۶) تغییرات عدد ناسلت برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف را نشان می‌دهد. در آرایش DLPT با توجه به اینکه ناحیه‌ی متخلخل در طول مسیر جریان همواره $\varepsilon = 0.9$ بوده و در راستای عرضی به سمت دیواره‌ها روند کاهشی را طی می‌کند، نفوذپذیری بالا موجب می‌شود المان‌های سیال به راحتی از ناحیه‌ی متخلخل عبور کرده و سطح تماس بین ماتریس جامد و سیال خنک کننده افزایش یابد در نتیجه عدد ناسلت میانگین بالاتری نسبت به حالات دیگر را نشان بدهد. متقابلاً ILPT که منجر به کاهش خطی نفوذپذیری می‌شود، موجب افت مومنتوم المان‌های سیال شده و این امر باعث می‌شود دارای کمترین مقدار ناسلت میانگین باشد. تخلخل ثابت $\varepsilon = 0.8$ به دلیل نفوذپذیری بالا رتبه دوم ناسلت میانگین را دارد. از آنجایی که محاسبه‌ی ناسلت میانگین در طول کانال می‌باشد لذا ناسلت میانگین برای دو حالت ILPL و DLPL تقریباً یکسان می‌باشد.

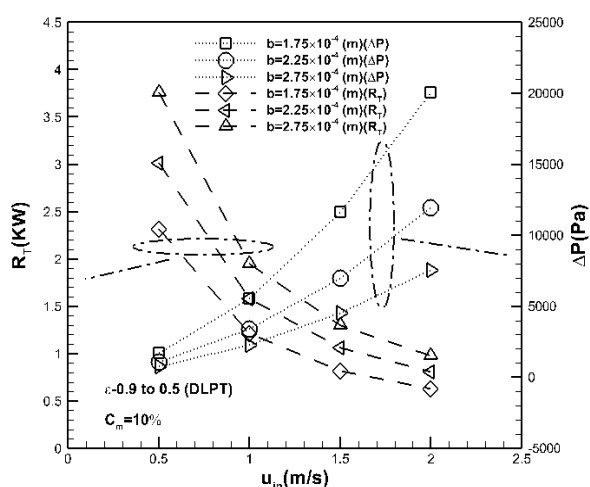


شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف

شکل (۷) پروفیل سرعت در راستای y با فرض اندازه‌های مختلف قطر کوچک بیضی را نشان می‌دهد. این نتایج با فرض توزیع خطی تخلخل از 0.5 تا 0.9 رسم گردیده‌است. طبق نتایج ارائه شده با کاهش قطر کوچک مقطع میکروکانال، سرعت متوسط جریان داخل کانال به دلیل کاهش سطح مقطع عبوری افزایش می‌یابد. با این وجود به دلیل وجود لایه‌ی متخلخل در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال، گرادیان سرعت به ازاء قطرهای مختلف در نزدیکی دیواره تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل بالابودن مومنتوم در قطرهای کوچکتر، شیب توزیع سرعت در این قطرها کمتر از میکروکانال‌ها با قطرهای بزرگتر

دیواره در فاصله‌ی نزدیک به ورودی میکروکانال، از سایر منحنی‌ها بزرگتر می‌باشد که ناشی از کاهش نرخ حرارت انتقالی به سیال عامل در فواصل دور از ورودی است. این امر به دلیل افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای طول میکروکانال و در نزدیکی سطوح گرم می‌باشد.

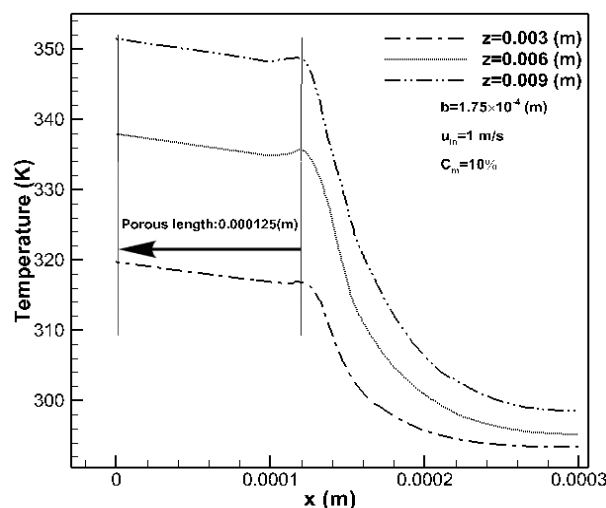
میکروکانال خارج شود. با افزایش قطر کوچک و متقابلاً کاهش ناحیه‌ی متخلخل، ضخامت لایه‌ی مرزی در طول کانال افزایش یافته و منجر به افزایش دمای سیال خروجی می‌شود. شکل (۱۰) مقایسه مقاومت حرارتی کل و افت فشار برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ و $C_m=10\%$ درصد را نمایش می‌دهد. اختلاف مقاومت حرارتی با افزایش قطر کوچک بیضی به دلیل کاهش ناحیه‌ی متخلخل افزایش می‌یابد و دامنه تغییرات مقاومت حرارتی با افزایش سرعت ورودی کاهش می‌یابد. حضور ناحیه‌ی متخلخل موجب افزایش افت فشار و کاهش مومنوم المان سیال می‌شود. از طرفی ذوب شدن ذرات تغییر فاز دهنده و افزایش غلظت سیال پایه موجب افت فشار و کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. با افزایش قطر کوچک بیضی، به دلیل کاهش محیط متخلخل با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش می‌یابد به صورتی که در $b=0.175$ میلی‌متر و $u_{in}=2$ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به $b=0.175$ میلی‌متر، $62/34$ درصد کاهش یافته و مقاومت حرارتی $35/50$ درصد افزایش یافته است.



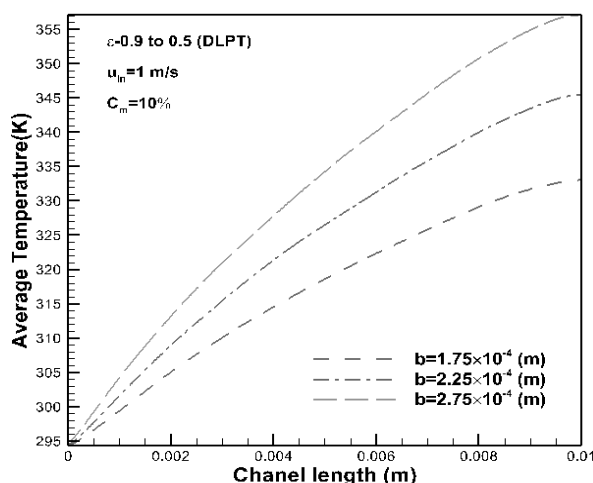
شکل ۱۰ مقایسه مقاومت حرارتی کل و افت فشار برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ و $C_m=10\%$ درصد

در ارتباط با شکل (۱۰)، می‌توان دریافت که انتقال حرارت بهتر و عملکرد جریان نسبتاً ضعیف در $b=0.175$ میلی‌متر رخ می‌دهد. به منظور در نظر گرفتن هر دو عملکرد حرارتی و هیدرولیکی، ضریب ارزیابی عملکرد که در معادله ۲۳ تعریف شده است، برای ارزیابی عملکرد کلی میکروچاه گرمایی بهره برده شده است. شکل (۱۱) ضریب عملکرد میکروچاه گرمایی برحسب سرعت‌های ورودی مختلف برای طول‌های مختلف قطر کوچک

دیواره در فاصله‌ی نزدیک به ورودی میکروکانال، از سایر منحنی‌ها بزرگتر می‌باشد که ناشی از کاهش نرخ حرارت انتقالی به سیال عامل در فواصل دور از ورودی است. این امر به دلیل افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای طول میکروکانال و در نزدیکی سطوح گرم می‌باشد.



شکل ۸ توزیع دما در راستای عرضی کانال با فرض مقطعی از طول کانال در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ ، $C_m=10\%$ ، $Ly/2$



شکل ۹ دمای موضعی در طول جریان کانال با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ ، $C_m=10\%$ درصد و $u_{in}=1$ متر بر ثانیه

شکل (۹) دمای موضعی در طول جریان کانال با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی را برای آرایش متخلخل DLPT در $\varepsilon=0.9-0.5$ دامنه‌ی را نشان می‌دهد. در $b=0.175$ میلی‌متر به دلیل بالابودن قطر مقطع متخلخل نسبت به قطر مقطع‌های متخلخل دیگر، لایه‌ی مرزی حرارتی ضخامت کمتری داشته و سیال خنک کننده در دمای پایین تری از

ذکر شده بر دمای موضوعی، افت فشار و ناسلت میانگین مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای هندسی میکرو چاه گرمایی بر روی خصوصیات حرارتی و هیدرولیکی تحت سرعت‌های ورودی مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج پیش بینی شده، نتایج زیر حاصل می‌شود:

(۱) افزایش و کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال به ترتیب دارای بیشترین و کمترین افت فشار می‌باشند. به طوری که در سرعت ۲ متر بر ثانیه افت فشار در آرایش افزایش تخلخل خطی نسبت به آرایش کاهش تخلخل خطی در عرض کانال، ۶۴/۴۱ درصد افزایش می‌یابد.

(۲) افزایش قطر کوچک بیضی، موجب کاهش قطر مقطع متخلخل شده و با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش می‌یابد به طوری که در $b=0/275$ میلیمتر و $u_{in}=2$ افت فشار نسبت به $b=0/175$ میلیمتر، ۶۲/۳۴ درصد کاهش یافته و مقاومت حرارتی ۳۵/۵۰ درصد افزایش یافته است.

(۳) کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال و تخلخل ثابت نسبت به آرایش‌های دیگر به ترتیب بیشترین عدد ناسلت میانگین را نسبت به آرایش‌های دیگر دارا می‌باشند.

(۴) در سرعت‌های ورودی پایین ضریب عملکرد کمتر از ۱ بوده و در $u_{in} \geq 1$ متر بر ثانیه ضریب عملکرد مقداری بیشتر از ۱ داشته که نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می‌باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

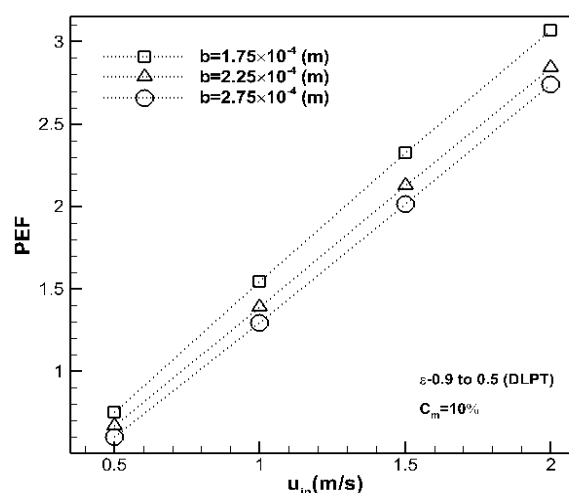
علائم انگلیسی

C_m	کسر جرمی، %
C_v	کسر حجمی، %
C_F	ضریب فورشهایمر
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه $(\frac{J}{kg \cdot K})$
ΔP	افت فشار (Pa)
Nu	عدد ناسلت
R_L	مقاومت محلی موضعی (k/w)
b	قطر کوچک بیضی (mm)
a	قطر بزرگ بیضی (mm)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
-------	------------------------------------

بیضی برای آرایش DLPT در دامنه‌ی $\varepsilon=0/9-0/5$ نشان داده شده است، به دلیل مساحت سطح بزرگتر ماتریس سیلیکونی با هدایت حرارتی بالا با افزایش سرعت ورودی از $u_{in}=0/5$ متر بر ثانیه تا $u_{in}=2$ متر بر ثانیه، PEF افزایش می‌یابد زیرا مساحت انتقال حرارت بزرگتر از میکروچاه گرمایی غیر متخلخل می‌باشد. با اینکه سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده، فرایند تغییر فاز را با سرعت جریان کمتر تکمیل می‌کند، ولی تاثیر تغییر فاز بر انتقال حرارت در سرعت‌های کمتر از ۱ متر بر ثانیه برای تمامی حالت‌ها مقدار قابل توجهی نیست. با افزایش سرعت ورودی از $u_{in}=1$ به $u_{in}=2$ ، در تمامی حالت‌ها PEF مقداری بیشتر از ۱ داشته که نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می‌باشد. همانگونه که پیش تر ذکر شد در $b=0/175$ میلیمتر به دلیل افزایش سطح تماس سیال خنک کننده با بستر جامد توسط محیط متخلخل بیشترین ضریب عملکرد مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱ ضریب عملکرد میکروچاه گرمایی بر حسب سرعت‌های ورودی مختلف برای طول‌های مختلف قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0/9-0/5$ و $C_m=10$ درصد

۵- نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر، میکرو چاه گرمایی سه بعدی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با سطح مقطع بیضی متخلخل با آرایش تخلخل افزایش تخلخل خطی در راستای طول کانال، کاهش تخلخل خطی در راستای طول کانال، افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال، کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال و تخلخل ثابت تحت شار حرارتی یکنواخت، بصورت عددی شبیه سازی شده است و تاثیر آرایش‌های تخلخل

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.01.032>, (2005).

ρ چگالی (kgm^{-3})
 ε تخلخل

زیر نویس ها

eff تاثیر

f سیال

in ورودی

out خروجی

۷- مراجع

- [8] Khodadadi, J. M., and Hosseinizadeh, S. F., Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34(5), pp. 534-543, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.02.005>, (2007).
- [9] Liu, L., Zhu, C., and Fang, G., Numerical evaluation on the flow and heat transfer characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a circular tube, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 144, pp. 845-853, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.102>, (2018).
- [10] Mobadersani, F., and Rezavand Hesari, A., Investigation of FHD effects on heat transfer in a differentially heated cavity partially filled with porous medium utilizing Buongiorno's model, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136(7), pp. 707, DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01679-3>, (2021).
- [11] Farahani, S. D., Farahani, A. D., and Hajian, E., Effect of PCM and porous media/nanofluid on the thermal efficiency of microchannel heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 105546, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105546>, (2021).
- [12] Lu, G., Zhao, J., Lin, L., Wang, X. D., and Yan, W. M., A new scheme for reducing pressure drop and thermal resistance simultaneously in microchannel heat sinks with wavy porous fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, pp. 1071-107, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.086>, (2017).
- [13] Liu, L., Alva, G., Jia, Y., Huang, X., and Fang, G., Dynamic thermal characteristics analysis of microencapsulated phase change suspensions flowing through rectangular mini-channels for thermal energy storage, *Energy and Buildings*, Vol. 134, pp. 37-51., DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.021>, (2017).
- [14] Hasan, M. I., Numerical investigation of counter flow microchannel heat exchanger with MEPCM suspension, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31(6-7), pp. 1068-1075, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.032>, (2011).
- [15] Hu, X., and Zhang, Y., Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement
- [1] Lee, J., and Kim, S. J., Effect of channel geometry on the operating limit of micro pulsating heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 204-212, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.036>, (2017).
- [2] Brinda, R., Daniel, R. J., and Sumangalaa, K., Effect of aspect ratio on the hydraulic and thermal performance of ladder shape micro channels employed micro cooling systems, *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 2022-2032, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.244>, (2012).
- [3] Jadhav, S. V., Pawar, P. M., and Ronge, B. P., Effect of pin-fin geometry on microchannel performance, *Chemical Product and Process Modeling*, 14(1), DOI: <https://doi.org/10.1515/cppm-2018-0016>, (2019).
- [4] Ghule, K., and Soni, M. S., Numerical heat transfer analysis of wavy micro channels with different cross sections, *Energy Procedia*, Vol. 109, pp. 471-478, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.071>, (2017).
- [5] Sui, Y., Teo, C. J., Lee, P. S., Chew, Y. T., and Shu, C., Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53(13-14), pp. 2760-2772, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.022>, (2010).
- [6] Arasu, A. V., and Mujumdar, A. S., Numerical study on melting of paraffin wax with Al_2O_3 in a square enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39(1), pp. 8-16, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.09.013>, (2012).
- [7] Akhilesh, R., Narasimhan, A., and Balaji, C., Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48(13), pp. 2759-2770, DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.059>, (2012).
- [20] Wang, B., Hong, Y., Hou, X., Xu, Z., Wang, P., Fang, X., and Ruan, X., Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials, *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 206-215, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.064>, (2015).
- [21] Elman, H. C., Silvester, D. J., and Wathen, A. J., Finite elements and fast iterative solvers: with applications in incompressible fluid dynamics, 2nd Edition, *Oxford University Press*, DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199678792.01.0001> (2014).
- [22] Chuan, L., Wang, X. D., Wang, T. H., and Yan, W. M., Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sink based on porous fin design concept, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 52-57, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.04.005> (2015).
- [23] Dai, H., Chen, W., Dong, X., Liu, Y., and Cheng, Q., Thermohydraulic performance analysis of graded porous media microchannel with microencapsulated phase change material suspension, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 176, pp. 121459, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121459> (2021).
- with microencapsulated phase change material slurries, laminar flow in a circular tube with constant heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45(15), pp. 3163-3172, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00034-0), (2002).
- [16] Ghahremannezhad, A., and Vafai, K., Thermal and hydraulic performance enhancement of microchannel heat sinks utilizing porous substrates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 1313-1326, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.024>, (2018).
- [17] Alazmi, B., and Vafai, K., Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44(9), pp. 1735-1749, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00217-9), (2001).
- [18] Dai, H., and Chen, W., Numerical investigation of heat transfer in the double-layered minichannel with microencapsulated phase change suspension, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119, pp. 104918, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104918>, (2020).
- [19] Hung, T. C., Yan, W. M., Wang, X. D., and Huang, Y. X., Optimal design of geometric parameters of double-layered microchannel heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55(11-12), pp. 3262-3272, DOI:



مروری بر روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چندفازی در حضور سورفکتانت ها

چکیده: در مقاله حاضر روش های شبیه سازی جریان چندفازی در حضور سورفکتانت ها در ۳ دسته مبتنی بر ناویر-استوکس، تابع توزیع و مبتنی بر نیروهای بین مولکولی طبقه بندی و هر یک جداگانه تشریح شده است. روش های مبتنی بر ناویر-استوکس در دو دسته روش های ردیابی سطح مشترک و روش های صید سطح مشترک قرار می گیرند. روش های مبتنی بر نیروهای بین مولکولی به عنوان روش های ذره مینا و با دیدگاه لاگرانژی در برخورد با میدان جریان عمل می کنند. مدل های پرکاربرد در روش های مبتنی بر تابع توزیع نیز در انتها معرفی شده اند. گستره وسیعی از روش های عددی انتخاب های زیادی را پیش روی پژوهشگران قرار داده است. شناخت و درک قابلیت ها و جزئیات این روش ها کمک خواهد کرد تا با توجه به امکانات سخت افزاری، مناسب ترین روش عددی انتخاب و نتایج قابل اعتماد و مقرون به صرفه ای حاصل شود.

واژه های راهنما: سورفکتانت ها، جریان سیالات چندفازی، ناویر-استوکس، روش دینامیکی مولکولی، روش شبکه بولتزمن

یاسر جعفری

دانشجوی دکتری

محمد طیبی رهنی

استاد،

دانشکده مهندسی هوافضا،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران

محمد رضا سلیمی*

استادیار، پژوهشگاه هوافضا،

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

رینهارد میلر

استاد، گروه بیوفیزیک ماده نرم،

دانشگاه صنعتی دامشتارت،

آلمان

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۳/۳۰

Yaser Jafari

Ph.D. Student

Mohammad

Taeibi Rahni

Professor, Faculty of

Aerospace

Engineering,

Sharif University of

Technology, Tehran

Mohammad Reza

Salimi*

Assistant Professor,

Space Science Group,

Astronautic Department,

Aerospace Research

Institute of Iran, Tehran

Reinhard Miller

Professor, TU

Darmstadt, Department

of Soft Matter

Biophysics, Germany

An overview of the numerical simulation methods of multiphase flow in the presence of surfactants

Abstract: In this article, the simulation methods of multiphase flow in the presence of surfactants are classified into 3 categories based on Navier-Stokes, distribution function, and based on intermolecular forces, and each one is described separately. Navier-Stokes-based methods fall into two categories: interface tracking methods and interface capture methods. Methods based on intermolecular forces act as particle-based methods with a Lagrangian perspective in dealing with the flow field. The widely used models in the methods based on the distribution function are also introduced at the end. A wide range of numerical methods has put many choices in front of researchers. Knowing and understanding the capabilities and details of these methods will help to select the most appropriate numerical method and obtain reliable and cost-effective results according to the hardware facilities.

Keywords: Surfactants, Multiphase flow, Navier-Stokes, Molecular Dynamics Method, Lattice Boltzmann Method

۱- مقدمه

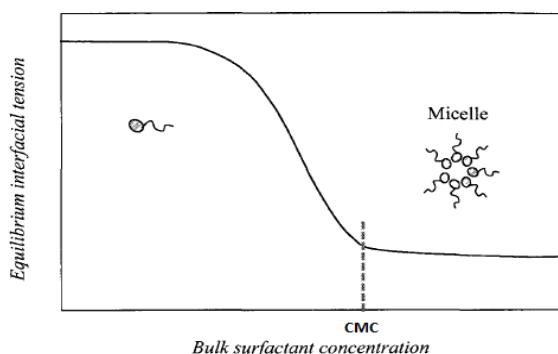
در انواع مختلفی از فرایندها و محصولات استفاده می شوند و بخشی ضروری از زندگی روزمره هستند [۱۰]. مطالعات قبلی به تأثیر سورفکتانت ها در طیف وسیعی از هندسه های جریان مختلف، از جمله تغییر شکل قطره ای، پل ها و رشته های مایع^۵، باریکه های سیال^۶، تشکیل رشته های مکرر^۷، جریان های لایه نازک^۸ و دینامیک قطع شدن جت های پیوسته^۹، ضخامت لایه در جریان های پوششی^{۱۰}، پراکندگی امواج سطحی^{۱۱}، دینامیک و ضخامت لایه نازک سیال پخش شده^{۱۲}، طول عمر حباب ها، رفتار امواج سطح مشترک، اتمیزه کردن، ادغام و پدیده های فروپاشی قطره، پایداری فوم ها و امولسیون ها پرداخته اند [۲ و ۱۱-۱۲]. از مهم ترین کاربردهای سورفکتانت ها در موارد زیست پزشکی [۱۳] مانند پوست، دارورسانی، درمان ضد سرطان، درمان سورفکتانت، فرمولاسیون واکسن، محصولات مراقبت بهداشت شخصی و سورفکتانت های طبیعی تولید شده در سیستم تنفسی [۱۰] است. حتی در همه گیری ویروس کووید-۱۹ (کورونا) از سورفکتانت های خاصی که هم پاسخ های ایمنی با واسطه سلولی و هم آنتی بادی را افزایش می دهد، در تولید واکسن و از برخی دیگر سورفکتانت ها در داروهای بهبود و کاهش عوارض این بیماری استفاده شده است. سایر کاربردهای مهم عبارتند از: همجوشی قطره ای [۱۴-۱۶]، حرکت قطره ای خودپیشران [۱۰]، تثبیت کننده امولسیون ها [۱۷ و ۱۸-۲۰]، فوم های آتش نشانی [۲۱]، پاکسازی آلودگی لکه های نفتی ناشی در دریا [۲۲-۲۳]، استخراج مواد معدنی [۲۴]، بازیابی بهبودیافته نفت [۲۵-۲۷]، ریزراکتورها ستون حبابی [۸]، تراشه های تشخیصی [۲۸]، چاپ جوهر افشان [۲۹] و قطرات فوق پخش شونده [۳۰]. مطالعاتی نشان می دهد که حتی سورفکتانت ها در پیش بینی وضع آب و هوا و شرایط جوی می تواند نقش اساسی داشته باشد [۳۱]. بررسی چنین سیستم پیچیده ای مستلزم مدلسازی رفتار تکاملی دو سیال در مجاورت هم و سطح مشترک ایجاد شده، انتقال جرم سورفکتانت در سیالات، و برهمکنش های بین سطح مشترک دو سیال و سورفکتانت است [۴]. اهمیت عملی سورفکتانت ها مبتنی بر توانایی این مولکول ها برای رسیدن سریع به حالت تعادل در سطح

عوامل فعال سطحی (سورفکتانت ها)^۱، مولکول های آمفیفیل^۲ هستند که در جریان سیالات چندفازی تمایل به مهاجرت به سطح مشترک سیال دارند و در نتیجه کشش سطحی را تغییر می دهند و باعث تغییرات قابل توجهی در خواص سطحی مخلوط سیال می شوند [۱-۵]. آمفیفیل یک ترکیب شیمیایی است که دارای هر دو خاصیت آب دوست (هیدروفیل)^۳ و آب گریز (لیپوفیل)^۴ است. سورفکتانت ها آنها ساختار مولکولی با زنجیره بلند دارند که به دو بخش قطبی و غیر قطبی تقسیم می شود [۳]. بخش قطبی میل یا تنش قوی نسبت به حلال های قطبی نشان می دهد که به آن بخش سر آبدوست و به قسمت غیرقطبی دم آبگریز گفته می شود [۱ و ۶]. دم آبگریز به طور معمول یک زنجیره هیدروکربنی طولانی است که در سیال غیرقطبی قرار می گیرد [۱ و ۶]. سورفکتانت ها براساس بار گروه سر قطبی (سر آبدوست) به عنوان آنیونی، کاتیونی، غیر یونی و زوئتریونی (آمفوتریک) طبقه بندی می شوند [۳ و ۷]. وجود سورفکتانت ها در سیستم های چند فازی، چه به صورت ناخالصی های اجتناب ناپذیر یا به عنوان مواد افزودنی، تأثیر زیادی بر شکل و دینامیک سطح مشترک دارد [۸].

سورفکتانت ها به ترتیب توسط حرکت سیال و مکانیسم های مولکولی در امتداد سطح مشترک منتقل و منتشر می شوند [۹]. کشش سطحی به توزیع سورفکتانت از طریق معادله حالت مرتبط می شود. مناطق با غلظت سورفکتانت بالاتر کشش سطحی کمتری دارند. غلظت غیریکنواخت سورفکتانت در امتداد یک سطح مشترک، نیروهای غیریکنواخت کپیلاری (عمودی) و مارانگونی (مماسی) را در سیال ایجاد می کند. این به نوبه خود بر سرعت سیال تأثیر می گذارد که بطور متقابل روی توزیع سورفکتانت تأثیر می گذارد. به عنوان مثال، جابجایی سورفکتانت به سمت نقاط سکون در نوک یک قطره تمایل به کاهش کشش سطحی در آنجا و افزایش تغییر شکل قطره دارد. از سوی دیگر، نیروهای مارانگونی در برابر همرفت سورفکتانت به سمت نوک قطره مقاومت می کنند و در نتیجه تغییر شکل قطره را مهار می کنند. فشرده/کشش کردن سطح مشترک منجر به افزایش/کاهش متناظر در غلظت سورفکتانت می شود. عوامل سطحی فعال یا معمولاً به عنوان سورفکتانت شناخته می شوند،

⁵ Liquid Bridges and Threads⁶ Filaments⁷ Repeated Thread Formation⁸ Thin Film Flows⁹ Pinch-off Dynamics of Continuous Jets¹ Coating Flows¹ Dispersion of Surface Waves¹ Dynamics and Thicknesses of Spreading Films¹ Surface Active Agents (Surfactants)² Amphiphiles³ Hydrophilic (Hydrophile)⁴ Hydrophobe (Lipophile)

حجمی سورفکتانت ها، تنش سطحی تعادل کاهش می یابد تا زمانی که به یک مقدار ثابت در یک غلظت بحرانی خاص که به عنوان غلظت بحرانی میسل^۱ شناخته می شود، کاهش می یابد. فراتر از CMC، سورفکتانت ها شروع به تجمع می کنند و میسل هایی را در داخل حجم محلول تشکیل می دهند که منجر به تنش سطحی تقریباً ثابت می شود [۱]. تشکیل میسل یک پدیده مهم است، زیرا مولکول های سورفکتانت بسته به اینکه در میسل ها وجود داشته باشند یا به صورت مونومر آزاد (تکی) رفتار بسیار متفاوتی دارند. میسل ها بر حلالیت هیدروکربن های آلی و روغن ها در محلول آبی تأثیر می گذارند و همچنین بر خاصیت مهمی به نام ویسکوزیته محلول تأثیر می گذارند [۳۳]. اندازه میسل با عدد تجمعی که تعداد مولکو های سورفکتانت مرتبط با یک میسل است اندازه گیری می شود. فقط مونومرهای سورفکتانت به کاهش تنش سطحی کمک می کنند. تغییر خواص چندفازی مانند ترشوندگی و تشکیل کف توسط غلظت مونومرهای آزاد در محلول کنترل می شود.



شکل ۱ روند کاهش تنش سطحی برحسب غلظت سورفکتانت [۱]

کاهش تنش سطحی درحضور سورفکتانت ها یک پدیده وابسته به زمان است که در آن تغییر در تنش سطحی توسط تحرک مولکول های سورفکتانت پخش شده در سطح مشترک دوفاز ایجاد شده، سرعت جذب، غلظت حجمی و دینامیک میسل کنترل می شود [۳]. بسیاری از این ویژگی ها به نوع سورفکتانت بکار برده شده بستگی دارد [۲]. مدل های فیزیکی اولیه تنش سطحی دینامیکی بر این فرض استوار بود که وابستگی زمانی تنش سطحی ناشی از انتقال مولکول ها در محلول حجمی به سطح مشترک یعنی توسط جذب است [۳۴]. از آن زمان، تحلیل های نظری زیادی از تنش سطحی دینامیکی در محلول های سورفکتانت منحصرأ بر اساس ایده

مشترک دو فاز سیال ایجاد شده است، در نتیجه کشش سطحی را از مقدار مشخص در حالت بدون سورفکتانت به مقدار تعادل در سطح کاهش می دهد [۱۱]. این کاهش کشش سطحی، کشش سطحی دینامیکی^۱ نامیده می شود. به طور کلی، کشش سطحی تعادل محلول های سورفکتانت عادی معمولاً در چند ثانیه اول پس از تشکیل یک سطح تازه به دست می آید. بنابراین، روش های تجربی سریع برای اندازه گیری کشش سطحی دینامیکی مورد نیاز است. روش های مختلفی از جمله جت نوسانی، حداکثر فشار حباب، قطره آویزان و روش های سریع تشکیل قطره پیشنهاد و استفاده شده است. با این حال، این روش ها به تجهیزات و تکنیک های پیچیده ای نیاز دارند و بنابراین همیشه با اهداف مهندسی برای به دست آوردن کشش سطحی دینامیکی به روشی ساده مطابقت ندارند. از طرفی، سورفکتانت ها بر جریان تأثیر می گذارند و تنش های کپیلاری و مماسی غیر یکنواخت را ایجاد می کنند [۷]. همزمان با این اتفاق میدان جریان سورفکتانت را تحت تأثیر قرار می دهد و بر توزیع آن تأثیر می گذارد و در نتیجه مسئله را پیچیده تر می کند. از این رو، بهره گیری از روش های شبیه سازی عددی برای مطالعه چندفازی در حضور سورفکتانت ها ضروری به نظر می رسد. بنابراین در این مقاله روش های عددی بکار گرفته شده برای شبیه سازی این نوع جریان مطالعه، دسته بندی و گزارش شده است.

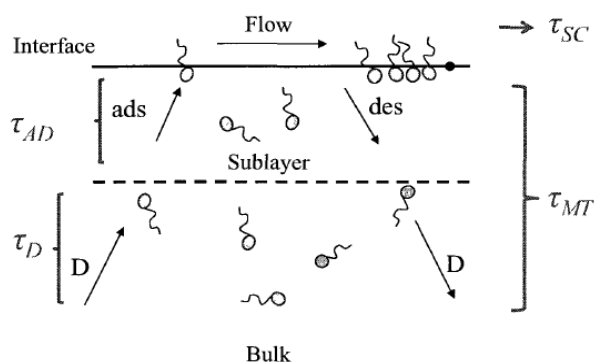
۲- مقدمات لازم برای شبیه سازی عددی مورد نیاز برای جریان های چندفازی حاوی سورفکتانت ها

همانطورکه در بخش مقدمه توضیح داده شد، حضور سورفکتانت ها باعث کاهش کشش سطحی از مقدار مشخص در حالت بدون سورفکتانت به مقدار تعادل در سطح می شود. اگر سورفکتانت ها زمان کافی برای جذب روی سطح مشترک داشته باشند و به تعادل برسند، تنش سطحی به مقدار تعادل خود یعنی σ_{eq} کاهش می یابد که کمتر از σ_0 است [۱ و ۳۲]. تنش سطحی تعادل σ_{eq} به غلظت حجمی سورفکتانت ها بستگی دارد. اگر آزمایش هایی برای تعیین تنش سطحی تعادل برای غلظت های مختلف سورفکتانت حجمی انجام شود، نموداری مشابه شکل (۱) به دست می آید. برای غلظت های حجمی کوچک سورفکتانت، تنش سطحی تعادل تقریباً مشابه تنش سطحی اولیه (تمیز) باقی می ماند. با افزایش غلظت

^۲ Critical Micelle Concentration (CMC)

^۱ Dynamic Surface Tension (DST)

به طور مثال، اگر انتقال سورفکتانت به اندازه کافی سریع باشد، سطح هیچ رفتار ارتجاعی از خود نشان نمی دهد و یا اگر پدیده چندقازی به قدری سریع اتفاق بیافتد که سورفکتانت ها زمان کافی برای جذب در سطح مشترک را نداشته باشند، حضور سورفکتانت تاثیری در دینامیک مسئله ندارد.



شکل ۲ شماتیک مقیاس های زمانی و مکانی سورفکتانت ها در حجم سیال و سطح مشترک [۱]

جدول ۱ رفتار محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها بر حسب مقایسه مقیاس های زمانی

$\tau_{MT} \ll \tau_{SC}$	$\tau_{MT} \gg \tau_{SC}$	$\tau_{SC} \sim \tau_{MT}$	
		$\tau_{AD} \gg \tau_D$	$\tau_{AD} \ll \tau_D$
محلول	نامحلول	نامحلول	محلول

طبق تعریف محلول یا نامحلول بودن، سورفکتانت در امتداد سطح مشترک منتقل و منتشر می شود و ممکن است جذب/دفع سورفکتانت از/به حجم به/از سطح مشترک وجود داشته باشد که در شبیه سازی عددی برای آن راهکار مناسبی را انتخاب کرد [۳۲]. از این رو، در روش های شبیه سازی عددی با دیدگاه اوپلری (در بخش بعدی دسته بندی این روش ها از دیدگاه متفاوت بیان خواهد شد) برای حل میدان جریان، با توجه به قید محلول یا نامحلول بودن دو حالت برای در نظر گرفتن اثرات سورفکتانت ها وجود دارد. در حالت اول، با فرض محلول بودن سورفکتانت ها یک معادله بقا برای انتقال سورفکتانت ها از حجم سیال به سطح مشترک دو فاز و یک معادله همرفت-پخش در سطح مشترک دو فاز برای بدست آوردن توزیع سورفکتانت ها حل می شود [۳۷]. در واقع، در این حالت جذب و دفع سورفکتانت ها در سطح مشترک دوفاز از حجم سیال در نظر گرفته خواهد شد. در حالت دوم، با فرض نامحلول بودن نیازی به حل معادله بقا برای انتقال سورفکتانت ها از حجم سیال به سطح مشترک دو

جذب، با موفقیت قابل توجهی انجام شده است. با این حال، نظریه جذب با زمان تکامل یافته و نیاز به رابطه دیگری بین غلظت سطحی مولکول های جاذب و غلظت توده ای مولکول ها در نزدیکی و سطح داشت. علاوه بر این، تنش سطحی دینامیکی به دست آمده توسط تئوری جذب شامل پارامترهای متعددی است که باید از قبل تعیین شوند و استفاده از آن برای اهداف مهندسی ساده نبود.

یکی دیگر از ویژگی های مهم سورفکتانت ها حلالیت آنهاست [۷]. سورفکتانت های محلول می توانند هم در سطح مشترک و هم در قسمت حجم وجود داشته باشند. بنابراین، هنگامی که رفتار سورفکتانت مورد مطالعه قرار می گیرد، تبادل ثابت بین حجم سیال و سطح مشترک باید در نظر گرفته شود. در مورد سورفکتانت های نامحلول، سورفکتانت ها فقط در سطح مشترک وجود دارند. این رفتار را می توان با توسط ماهیت سورفکتانت مشاهده کرد، یا زمانی که مقیاس های زمانی پخش و تبادل در مقایسه با تولید سطح مشترک بسیار کوچک است. در مورد دوم، سورفکتانت ها به طور موثر نامحلول عمل می کنند. در حالت نامحلول هیچ تبادل انبوه سورفکتانت ها بین سطح مشترک فازها و حجم سیال وجود ندارد.

توزیع غیر یکنواخت سورفکتانت ها در سطح مشترک به مقیاس های زمانی نسبی پخش، همرفت و جذب-دفع در مسئله بستگی دارد [۱ و ۷ و ۳۵-۳۶]. علاوه بر اینکه سورفکتانت ها در امتداد سطح مشترک انتقال همرفتی و پخش دارند، توسط جذب-دفع و پخش بین سطح مشترک و حجم سیال منتقل می شوند [۱]. شکل (۲) شماتیکی از مقیاس های زمانی مختلف برای رفتار غیرتعادلی سورفکتانت ها در سطح مشترک با جریان سطحی را نشان می دهد. همرفت در فصل مشترک منجر به تجمع موضعی سورفکتانت ها در نقاط سکون می شود. مقیاس زمانی برای همرفت سطحی τ_{SC} به سرعت مماسی در مرز مشترک بستگی دارد. مقیاس زمانی انتقال جرم سورفکتانت ها بین مرز مشترک و حجم محلول τ_{MT} ، به مقیاس زمانی جذب و دفع سورفکتانت ها بین زیرلایه و مرز مشترک τ_{AD} و مقیاس زمانی پخش حجمی سورفکتانت ها بین حجم و زیرلایه (عمق تخلیه) τ_D بستگی دارد. در جدول (۱) خلاصه رفتار محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها بطور خلاصه بر حسب مقایسه مقیاس های زمانی تعریف شده عنوان شده است. بسته به غلظت سورفکتانت و شرایط جریان، سیستم دو فازی همراه با سورفکتانت مشابه ممکن است رفتار متفاوتی داشته باشد [۲۸].

¹ Debye Layer (Depletion Depth)

بندی و از لحاظ دیدگاه می توانند اویلری یا لاگرانژی باشند. جدول (۲) روش های شبیه سازی برای جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها با توجه به پژوهش های پیشین براساس نوع معادله و مقیاس مشخص شده اند. علاوه براین، شکل های (۳) و (۴) به ترتیب نشان دهنده دیدگاه های اویلری و لاگرانژی این روش ها برای حل میدان جریان است. دسته اویلری برای روش های شبیه سازی چند فازی را می توان به دو طبقه با عنوان روش های اویلری-اویلری یا اویلری-لاگرانژی بیان کرد [۳۸]. در روش اویلری-اویلری، سیالات و ذرات همگی به صورت پیوسته در نظر گرفته می شوند و با کسر حجمی مربوطه خود در هر سلول شبکه شبیه سازی نشان داده می شوند. این شبیه سازی ها سطح مشترک فاز را حل نمی کنند. در نقطه مقابل روش های اویلری-لاگرانژی، با یک شبکه یا نقاط نشانگر سطح مشترک دو فاز را مشخص و ردیابی می کنند.

جدول ۲ طبقه بندی روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها با توجه به نوع معادلات و مقیاس

مقیاس	روش عددی	معادله حل شده
ماکروسکوپیک	حجم سیال (VOF)	مبتنی بر ناویر-استوکس
	تنظیم سطح (LS)	
	میدان فاز (PF)	
	ردیابی جبهه (FT)	
	انتگرال مرزی (BIM)	
	مرز غوطه ور (IBM)	
	لاگرانژی-اویلری دلخواه (ALE)	
مزوسکوپیک	هیدرودینامیک هموار ذرات (SPH)	مبتنی بر تابع توزیع (معادله تقریب زده شده بولتزمن)
	شبکه بولتزمن (LBM)	
	دینامیک ذرات پراکنده (DPD)	مبتنی بر نیروهای بین مولکولی
	مارتینی (MARTINI)	
	مونت کارلو (MC)	
	تئوری سیالات مرتبط آماری (SAFT- γ)	
میکروسکوپیک	مدل های تمام اتمی (AA)	

فاز نیست و تنها یک معادله همرفت-پخش در سطح مشترک دو فاز برای بدست آوردن توزیع سورفکتانت ها بدون جذب و دفع در سطح مشترک دوفاز از حجم سیال حل می شود [۳۴].

۳- روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها

همانطور که در انتهای بخش مقدمه بیان شد، روش های تجربی از کارایی کافی برای شناخت و درک کامل فرآیند های رخ داده در جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها برخوردار نیستند [۷]. از این رو، پژوهشگران به شبیه سازی عددی این مسائل مختلف شامل این جریان با استفاده از روش های گوناگون پرداخته اند. روش های شبیه سازی عددی به دلیل تنوع در رویکرد برخورد با مسائل این چینی ابزار بسیار مفیدی به حساب می آیند. زیرا که جنبه ها و ابعاد مختلفی در مسائل شامل جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها وجود دارد که با توجه به گستردگی روش های شبیه سازی عددی می توان از هر لحاظ به شناخت آنها پرداخت. بنابراین، مطابق آنچه در مقدمه توضیح داده شد و با توجه به کاربرد وسیع سورفکتانت ها در صنعت و استفاده های حیاتی و روزمره می توان با تکیه بر دانش حاصل شده از روش های شبیه سازی عددی، استفاده از سورفکتانت ها را بهینه کرد.

شبیه سازی عددی مستقیم^۱ برای جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها نیاز به حل طیف وسیعی از مقیاس های طولی و زمانی دارد [۲۴]. هزینه های محاسباتی بالای چنین شبیه سازی هایی، آنها را برای کاربردهای واقعی غیرممکن می سازد. از این رو، روش های شبیه سازی مختلفی توسعه داده شده اند. روش های شبیه سازی مفید و استفاده شده برای جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها را می توان از جنبه های مختلف طبقه بندی کرد که از آن جمله می توان به نوع معادلات، مقیاس و دیدگاه حل شده اشاره کرد. این روش ها در مورد نوع معادلات در ۳ دسته مبتنی بر ناویر-استوکس، مبتنی بر تابع توزیع (معادله تقریب زده شده بولتزمن) و مبتنی بر نیروهای بین مولکولی قرار می گیرند. همچنین، از لحاظ مقیاس در ۳ حالت ماکروسکوپیک، مزوسکوپیک و میکروسکوپیک دسته

¹ Direct Numerical Simulation (DNS)

سطح مشترک استفاده می کنند. از این رو، اگرچه میدان جریان سیال بصورت اویلری حل می شود، ولی سطح مشترک دوفاز بصورت لاگرانژی تکامل می یابد. محبوب ترین روش ها از این خانواده عبارتند از: ردیابی جبهه^۴ [۳۲]، انتگرال مرزی^۵ [۳۷] و [۳۹]، مرز غوطه ور^۶ [۱۱ و ۴۰] و لاگرانژی-اویلری دلخواه^۷ [۴۱]. این روش ها که در ابتدا برای سورفکتانت های نامحلول توسعه یافتند، سپس به سورفکتانت های محلول گسترش یافتند. در حالی که این رویکرد ها دقت خوبی را ارائه می دهند، مدیریت تغییرات توپولوژیکی سطح مشترک به الگوریتم های پیچیده نیاز دارد، به ویژه زمانی که در فیزیک مسئله با ادغام یا شکست سطح مشترک در حالت سه بعدی سروکار داریم. روش های صید سطح مشترک مبتنی بر استفاده از یک تابع نشانگر برای نمایش ضمنی سطح مشترک در یک شبکه اویلری است. این امر گسسته سازی و مدیریت تغییرات توپولوژیکی را بسیار ساده می کند. در میان روش های صید سطح مشترک، می توان به حجم سیال^۸ [۳]، تنظیم سطح^۹ [۴۲-۴۴] و روش به نسبت جدیدتر میدان فاز^{۱۰} [۴-۵] و [۴۵] اشاره کرد. در چارچوب این روش ها، رویکرد هایی که در ابتدا برای سورفکتانت های نامحلول توسعه یافتند سپس به سورفکتانت های محلول و جریان های سه بعدی گسترش یافتند. روش میدان فاز یک مدل طبیعی برای سطح مشترک پخش^{۱۱} است [۱۰]. مطالعه تحولات توپولوژیکی پیچیده و جفت شدن آن با جریان کامل هیدرودینامیکی بدون ردیابی صریح سطح مشترک بسیار ساده است. روش های میدان فاز معمولاً مبتنی بر انرژی آزاد سطحی سیستم هستند. مزایای مدل های میدان فاز نسبت به سایرین عبارتند از: توسعه نسبتاً آسان با استفاده از آرگومان های تقارن ساده و قوانین بقا، در دسترس بودن مقیاس های زمان و طول مزوسکوپی تا ماکروسکوپی، شکل گیری طبیعی سطح مشترک دو فاز و شرایط غیر تعادلی، سهولت نسبی اجرای عددی و امکان کار تحلیلی از طریق تکنیک های طرح ریزی [۱۰]. علاوه براین، جهت افزایش کارایی سایر روش های این گروه یعنی حجم سیال و تنظیم سطح، رویکرد های جایگزین با ترکیبی از روش های صید/ردیابی سطح مشترک یا استفاده از چارچوب های مختلف مانند ترکیب تنظیم سطح-مرز غوطه ور [۹]، حجم



شکل ۳ روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها با دیدگاه اویلری برای حل میدان جریان



شکل ۴ روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها با دیدگاه لاگرانژی برای حل میدان جریان

۳-۱- روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها مبتنی بر ناویر-استوکس

این قبیل روش ها (به جز روش هیدرودینامیک هموار ذرات) را می توان به دو دسته تقسیم کرد که عبارتند از: روش های ردیابی سطح مشترک^۱ و روش های صید سطح مشترک^۲ [۵]. روش های ردیابی سطح مشترک از یک شبکه یا مش جداگانه برای ردیابی

^۴ Front-Tracking (FT)

^۵ Boundary Integral Method (BIM)

^۶ Immersed Boundary Method (IBM)

^۷ Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

^۸ Volume-Of-Fluid (VOF)

^۹ Level-Set (LS)

^۱ Phase Field Method (PFM) ^۰

^۱ Diffusive Interface ^۱

^۱ Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

^۲ Interface Tracking

^۳ Interface Capturing

حال، محدودیت های محاسباتی شدیدی برای شبیه سازی دینامیک مولکولی وجود دارد [۱۷]. اول، تعداد مولکول های سورفکتانت در یک سیستم معمولی حتی در غلظت های رقیق بسیار زیاد است. از این رو، نمی توان حرکت مولکول های سورفکتانت را به طور صریح همراه با حرکت سطح مشترک دو فاز شبیه سازی کرد. دوم، مرحله زمانی شبیه سازی باید بسیار کوچک باشد تا بتوان به طور مناسب از پتانسیل تعامل بین سطوح مشترک دو فاز نمونه برداری کرد. سوم، در فیزیک های مانند قطرات با اندازه کوچک حرکت براونی را به دلیل برهمکنش حرارتی خود با حلال نشان می دهند. این باید در معادله حرکت آنها در نظر گرفته شود. چهارم، شبیه سازی رفتار قطره ها در فیزیک های مانند امولسیون با استفاده از پتانسیل ثابت همانطور که در دینامیک مولکولی انجام می شود، ممکن نیست. پتانسیل برهمکنش با گذشت زمان در نتیجه جذب سورفکتانت و کاهش تدریجی مساحت سطحی امولسیون به دلیل ادغام قطره ها تغییر می کند. این مستلزم محاسبه مکرر خواص سطحی است که نیروهای بین ذرات را تعیین می کند.

روش های دینامیک مولکولی می توانند مولکول ها را در هر زمانی تحت شرایط کنترل شده در طول شبیه سازی ردیابی کنند. امروزه، وجود میدان های نیرو قابل اعتماد برای سیستم های سورفکتانت محلول مبتنی بر مدل های تمام اتمی^۲ و درشت دانه^۳ شبیه سازی واقعی چنین سیستم هایی را ممکن می سازد [۴۹]. شبیه سازی های درشت دانه پلی بین دنیای اتمی و ماکروسکوپی ایجاد می کنند. رویکرد شبیه سازی، خوشه هایی از اتم ها یا مولکول ها را به عنوان ذرات منفرد به نام دانه ها، در نظر می گیرد. در مقایسه با تمام اتمی، مدل های درشت دانه تعداد درجات آزادی و در نتیجه زمان محاسباتی مربوطه را با جمع کردن نیروهای شیمیایی دقیق به شکل پارامترهای برهمکنش کاهش می دهند [۳۶]. مدل های درشت دانه را می توان به عنوان مدل های پیوسته یا شبکه طبقه بندی کرد [۵۱-۵۲]. مدل های پیوسته واقعی تر هستند، اما مدل های شبکه از نظر محاسباتی کارآمدتر هستند [۵۱-۵۲]. مدل های شبکه دینامیک مولکولی که مهمترین آنها مونت کارلو است، برخلاف طبقه بندی جدول (۲) از معادله بولتزمن استفاده می کنند، اما شامل دو قسمت اصلی حرکت و برخورد ذرات است که جدا از هم بررسی می شوند.

سیال-ردیابی جبهه [۱ و ۴۶]، رهیافت لاگرانژی المان محدود^۱ [۲ و ۷] توسعه یافته اند. جدول (۳) پیشینه روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چندفازی در حضور سورفکتانت ها مبتنی بر ناویر-استوکس را نشان می دهد.

علاوه بر روش های بیان شده، یک روش به نسبت جدید وجود دارد که از ذرات برای حل میدان جریان استفاده می کند اما برخلاف حل های دینامیک مولکولی مبتنی بر ناویر-استوکس است. روش هیدرودینامیک هموار ذرات، یک روش لاگرانژی بدون شبکه است که برای مسائل چند فازی نیازی به صید یا ردیابی سطح مشترک خاصی ندارد و می تواند هندسه های پیچیده و همچنین تغییرات توپولوژی را مدیریت کند [۴۷-۴۸]. در این روش هر ذره نشان دهنده یک عنصر لاگرانژی از سیال است که تمام خواص فاز محلی را دارد. دینامیک سورفکتانت را به شکل بقایی معرفی و از شارهای جرمی برای در نظر گرفتن تبادل سورفکتانت بین سطح مشترک و فاز توده استفاده می شود. در لایه نازک سطح مشترک، معادله پخش برای سورفکتانت حل و به دلیل ماهیت روش لاگرانژی، ادوکشن به طور طبیعی گنجانده شده است.

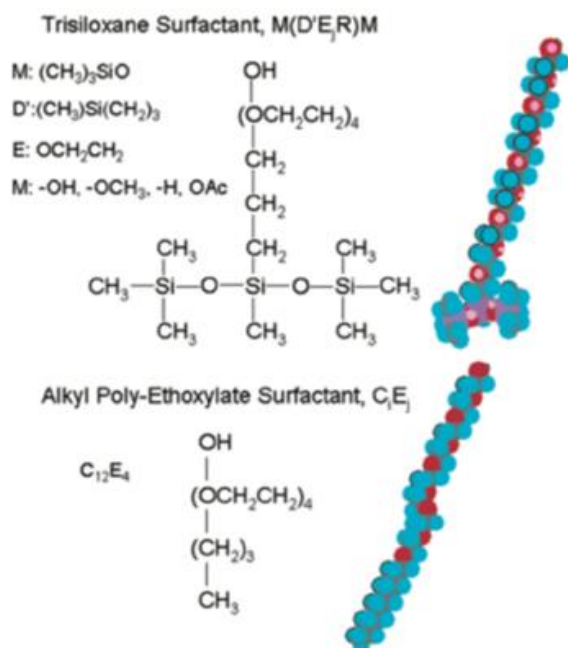
۳-۲- روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها مبتنی بر نیروهای بین مولکولی

در مطالعه برخی مسائل جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها مانند تغییر خواص ترشوندگی سیال در مجاورت سطح جامد رفتار میکروسکوپی و ساختار مولکول های سورفکتانت ها حائز اهمیت است [۵۰]. درک جامع از نقش میکروسکوپی مولکول های سورفکتانت در گسترش پدیده ها همچنان چالش برانگیز است. در حالی که مطالعات تجربی و نظری مکانیسم های احتمالی انتشار برای قطرات مملو از سورفکتانت را مورد بحث قرار داده اند، شبیه سازی های در مقیاس مولکولی برای ثبت رفتار میکروکوپی سورفکتانت های مرتبط با آن مکانیسم ها ضروری هستند [۳۰]. در حالی که شبیه سازی و تئوری عددی رایج در دینامیک سیالات محاسباتی سنتی قادر به توصیف رفتار میکروسکوپی سیستم ها نیستند. از این رو، به تحقیقات به سمت گسترش روش های دینامیک مولکولی به عنوان روش های ذره مینا، لاگرانژی و مبتنی بر نیروهای بین مولکولی سوق پیدا کرده است. با این

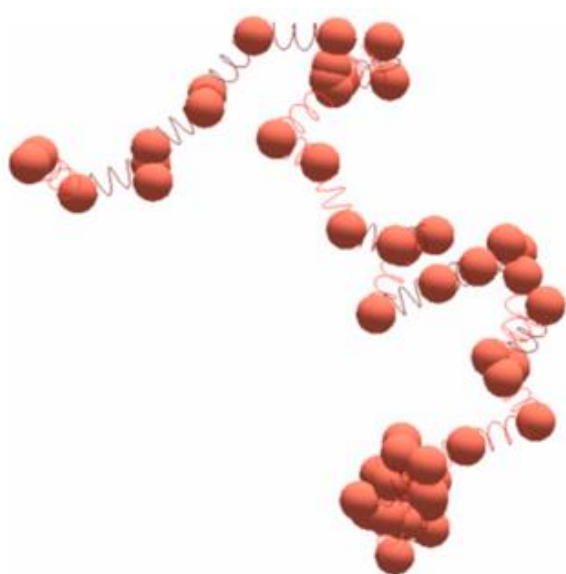
² All Atom³ Coarse Grained (CG)¹ Lagrangian Finite Element Scheme

۲ پیشینه روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چندفازی در حضور سورفکتانت ها مبتنی بر ناپیر-استوکس

نوع	مرجع	سال	روش عددی	نوع سورفکتانت	معادله حالت	نحوه برخورد با سورفکتانت	فیزیک
مید مرز مشترک	Teigen et al. [۴۴]	(2010)	Level-Set Method	نامحلول	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت	قطره در حال سقوط تحت میدان الکتریکی
	Piedfert et al. [۴۳]	(2018)			خطی		ارتعاش قطره صعودکننده
	Atasia et al. [۴۲]	(2020)			لگاریتمی		رسیدن حباب به سطح
	Sanjeev et al. [۳]	(2008)	Volume-Of-Fluid	نامحلول	نیازی نبوده	از طریق نمودار زمانی کاهش کشش سطحی و سورس ترم	برخورد قطره با سطح
	Tariq [۱۰]	(2012)	Phase Field Method	مشخص نکرده (هم محلول و هم نامحلول)	بدون معادله حالت	معادله بقا برای سورفکتانت نوشته با استفاده از انرژی آزاد	انعقاد قطره در حضور جریان برشی
	Teng et al. [۴]	(2012)		محلول	لگاریتمی		فیزیک مشخصی را حل نکرده
	Soligo et al. [۵]	(2018)		محلول	لگاریتمی		انعقاد قطره در حضور جریان برشی
	Soligo et al. [۴۵]	(2019)		محلول	لگاریتمی		تغییر شکل قطره در جریان برشی
ردیابی مرز مشترک	Yulianti et al. [۳۲]	(2013)	Front-Tracking Method	نامحلول	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت	افتادن یک قطره روی سطح
	Lai et al. [۴۰]	(2010)	Immersed boundary method	نامحلول	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت	حرکت خط تماس ۳ فاز
	Wang et al. [۳۹]	(2014)		محلول	خطی	معادله بقا برای غلظت سورفکتانت ها و در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	تغییر شکل قطره و حباب
	Bazhlekova and Vasileva [۱۱]	(2015)				شبیه سازی اثر یک سورفکتانت محلول در آخرین مرحله ادغام قطره (تشکیل لایه، زهکشی و گسیختگی)	
	Palsson et al. [۳۷]	(2019)	Boundary Integral Method	نامحلول	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	قطره در جریان استوکس
تجزیه	Xu et al. [۹]	(2006)	Level Set Method, Immersed Interface Method	نامحلول	لگاریتمی و خطی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	تأثیر جریان برشی روی یک دو یا چند قطره
	Drumright-Clarke [۴۹]	(2004)	A Hybrid Volume-of-Fluid Method with a Continuous-Surface-Stress (Vof-Css)	نامحلول	خطی	اثر سورفکتانت رو بصورت سورس ترم وارد معادله ناپیر استوکس کرده است	شکست قطره در جریان برشی
	Cui [۱]	(2011)	A Hybrid Volume-of-Fluid Method with a Front-Tracking	محلول-نامحلول	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	تشکیل قطره در یک لوله تو در تو با سیال بیرونی دارای جریان
	Martin and Blanchette [۴۶]	(2015)		نامشخص (از روی حل نامحلول)	خطی		ادغام حباب صابون که با یک فیلم صابون معلق
	Ganesan [۴۹]	(2015)	An Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) approach	محلول	خطی	معادله بقا برای غلظت سورفکتانت ها نوشته شده و در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	تأثیر سورفکتانت ها بر حرکت خط تماس سه فاز
	Steinhausen [۲۴]	(2018)	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) Interface-Tracking method	محلول	لگاریتمی	معادله بقا برای غلظت سورفکتانت ها نوشته شده و در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	مسیر صعود یک حباب
	Young et al. [۲۹]	(2009)		نامحلول	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	جدایش قطره
	Antonopoulou et al. [۲]	(2021)	Lagrangian finite element scheme	نامشخص (از روی حل نامحلول)	لگاریتمی	در سطح مشترک دو فاز معادله پخش-همرفت حل شده	چکیدن و جدایش قطره
	Antonopoulou [۷]	(2020)					



شکل ۵ دو نوع مدل تمام اتمی سورفکتانت [۴۹]



شکل ۶ مدل مهره-فنر [۵۴]

مدل مارتینی: مزیت قابل توجه میدان نیروی مدل مارتینی^۲ در مقایسه با سایر مدل های درشت دانه، توانایی در نظر گرفتن هویت شیمیایی گروه های اتمی را دارد [۵۰]. رویکرد «لگو» اتخاذ شده در مدل مارتینی امکان شبیه سازی طیف گسترده ای از مولکول های متنوع را بدون نیاز به اصلاح پارامترهای میدان نیرو فراهم می کند. از این رو، بطور عملی دقت مدل تمام اتم را ارائه می دهد، در حالی که از نظر محاسباتی به اندازه یک مدل درشت دانه ارزان است. این به دلیل تعداد کمتر مکان های اندرکنش (محاسبات نیروی کمتر مورد

در واقع این نوع حل نقطه مشترک بین دو دسته از حل های مبتنی بر نیروهای بین مولکولی و معادله تقریب زده شده بولتزمن است و می توان جزئی هر دو دسته تقسیم بندی کرد. این روش جریان های رقیق دو و سه بعدی را می تواند مدل کند. از این رو، در شبیه سازی جریان های چندفازی همراه با سورفکتانت ها کاربرد گسترده ای جز در موارد خاص مانند حرکت و تشکیل مسیل ها ندارد [۵۱-۵۲]. در ادامه انواع حل های دینامیک مولکولی به طور مختصر توضیح داده خواهد شد.

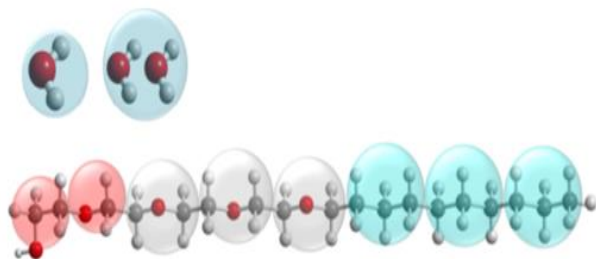
مدل های تمام اتمی: تعدادی مدل تمام اتمی وجود دارد (شکل ۵) که می تواند در مورد سیستم های سورفکتانت محلول اعمال شود [۵۰]. با این حال، این مدل ها به آزمایش نیاز دارند تا تأیید شود که ویژگی های کلیدی سیستم به خوبی بازتولید شده اند. چنین خواصی ممکن است شامل رفتار فازی سیستم سورفکتانت آب، کشش سطحی و خواص دینامیکی مانند انتشار، ضرایب جذب و غیره باشد. تعداد مطالعات تمام اتمی نسبت به حالت درشت دانه کم است. زیرا این شبیه سازی ها از نظر محاسباتی نیازمند محدودیت های شدید در اندازه سیستم هستند و تفسیر نتایج شبیه سازی ممکن است در گستره محدودی باشد. با این حال، میدان های نیروی تمام اتمی عموماً عملکرد خوبی دارند، زیرا از داده های با وضوح بالا، برای مثال محاسبات مکانیک کوانتومی به دست می آیند.

مدل های مهره-فنر: یک مدل مهره-فنر^۱ ساده می تواند ویژگی های سیستم های پیچیده، از جمله سیستم های سورفکتانت محلول را به تصویر بکشد [۵۰]. این مدل یک مدل درشت دانه برای مطالعه انتقال سورفکتانت های محلول و نامحلول در یک سطح مشترک دو فاز گاز-مایع با شبیه سازی دینامیک مولکولی است. این مدل تلاشی برای ارائه یک مدل مولکولی واقعی برای مولکول های سورفکتانت زنجیره ای تری سیلوکسان و خطی ندارد، بلکه هدف آن تقلید از یک سیستم مشابه براساس پتانسیل کوتاه برد است. علاوه بر این، هزینه ها نادیده گرفته می شوند. با این حال، استفاده از این نوع مدل های درشت دانه مهره -فنر امکان کاوش سیستم های بزرگ تر را در زمان های شبیه سازی طولانی تر نسبت به هر مدل تمام اتمی وجود دارد. در شکل (۶) یک مدل مهره فنر نمایش داده شده است.

^۲ MARTINI

^۱ Bead-Spring Models

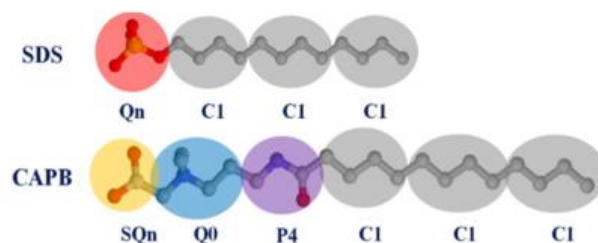
مانند مدل مارتینی نشان می دهند. در مورد میدان نیرو γ -SAFT، پارامترهای میدان نیرو یک گروه عملکردی خاص از اتم ها باید توسط تئوری مشتق شده و برای هر مورد داده های تجربی را بازتولید کنند. همچنین، این رویکرد می تواند سیالات زنجیره ای ناهمگن را که توسط گروه های عملکردی مختلف تشکیل شده اند، توصیف کند. شکل (۸) یک نوع سورفکتانت در مدل SAFT در حضور مولکول های آب را نشان می دهد.



شکل ۸ یک نوع سورفکتانت در مدل SAFT در حضور مولکول های آب [۵۰]

مدل دینامیک ذرات اتلافی: دینامیک ذرات اتلافی^۳ یک روش مناسب برای مدل سازی یک سیستم درشت دانه است. این مدل یک تکنیک مدل سازی مزوسکوپی است که برای شبیه سازی سیالات پیچیده توسعه یافته است [۶ و ۲۷]. این مدل از سه نوع متمایز نیروی فعال بین ذرات تشکیل شده است که نشان دهنده نیروهای بقایی، نیروهای بیانگر خواص ترمودینامیکی سیستم، نیروهای اتلاف کننده کوپل شده و نیروهای تصادفی برای حفظ دمای ثابت است. معادله حرکت نیوتن که تمام نیروهای موجود در سیستم را در نظر می گیرد. یک جنبه حیاتی از تکنیک DPD زمانی است که نیروهای هیدرودینامیکی حالت های غالب در سیستم دارد. در مقایسه با شبیه سازی های دینامیکی رایج مانند شبیه سازی های دینامیکی مولکولی، استفاده از اندرکنش های نرم^۴ در DPD به عنوان یک مزیت عمده نسبت به شبیه سازی های دیگر در نظر گرفته می شود. در این مدل خوشه ای از ذرات بصورت مهره ها نشان داده می شود و پتانسیل نرم موجود اجازه استفاده از مقیاس های زمان و طول نسبتاً بزرگتر از مقیاس هایی معمول در سایر تکنیک های شبیه سازی دینامیک مولکولی را می دهد. ساختار ذرات در یک سیستم آب-نفت حاوی سورفکتانت در مدل دینامیک ذرات اتلافی در شکل (۹) نمایش داده شده است.

نیاز در کد دینامیک مولکولی که از عملکردی ساده شکل گرفته از برهمکنش پتانسیل ها با نقطه قطع کوچک و افزایش سرعت اضافی که عموماً از چشم انداز هموارتر انرژی در مورد مدل های درشت دانه ناشی می شود. در موارد اخیر با حالت های کندتر از مهره های سنگین تر درشت دانه باعث یک گام زمانی بزرگ تر و در نتیجه زمان های شبیه سازی واقعی تر طولانی تر می شود. رویکرد نوآورانه «لگو» که زیربنای میدان نیروی مارتینی است، گروه های عاملی اتمی را بسته به بار و قطبیت آن ها به چهار دسته اصلی تقسیم می کند: قطبی، غیرقطبی، آپولار (بدون دوقطبی) و باردار. سپس هر دسته به زیرمجموعه هایی تقسیم می شود تا اندرکنش ها را اصلاح کنند، که منجر به ده سطح اساسی در اندرکنش های مدل اصلی مارتینی می شود. همه گروه های شیمیایی مشابه، صرف نظر از اینکه بخشی از یک لیپید، پروتئین، زنجیره اسید نوکلئیک یا هر مولکول دیگری باشند، توسط دانه هایی بیان می شوند که از طریق این دانه ها تعداد اندرکنش ها محدود می شود. این سطوح اندرکنش دائماً اصلاح می شوند و انواع جدیدی از مهره ها نیز اضافه می شوند تا بتوان طیف وسیع تری از مولکول های مختلف را شبیه سازی کرد. شکل (۷) دو نوع سورفکتانت در مدل مارتینی را نشان می دهد.



شکل ۷ دو نوع سورفکتانت در مدل مارتینی [۵۵]

مدل تئوری سیالات مرتبط آماری: مدل درشت دانه تئوری سیالات مرتبط آماری^۱ از معادله حالت مبتنی بر مولکولی γ -SAFT مشتق شده است که می تواند داده های تجربی-تحلیلی را توصیف کند [۳۰]. در عمل، معادله حالت تناسب دقیقی را برای پارامترهای میدان نیرو ارائه می کند که در آن اندرکنش های کلیدی غیر پیوندی با استفاده از پتانسیل می^۲ بیان می شوند. خواص ترموفیزیکی مشاهده شده ماکروسکوپی که از فعل و انفعالات سیال-سیال و سیال-جامد ناشی می شود، به خوبی توسط مدل بازتولید می شود، که نتیجه مستقیم تطابق نزدیک بین نظریه و همیلتونین زیربنایی سیستم است. رویکرد SAFT پتانسیل های قوی و قابل انتقال دانه های مؤثر را استخراج می کند که گروه هایی از اتم ها را

³ Dissipative Particle Dynamics (DPD)

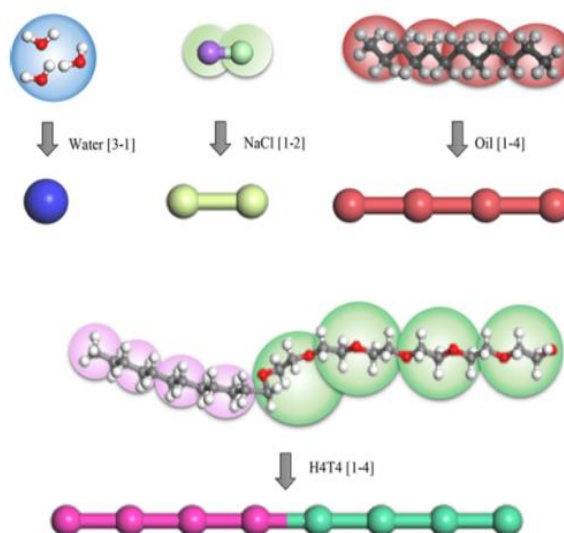
⁴ Soft Interactions

¹ Statistical Associating Fluid Theory Model

² Mie

(خوشه های محاسباتی) ایده آل می باشد. از طرفی، کار در سطح مزوسکوپی به ویژه روش بولتزمن برای تجزیه و تحلیل سیستم های شبکه سیالی پیچیده شامل دینامیک سطحی و انتقال فاز مناسب است. از این رو، روش شبکه بولتزمن یک روش شبیه سازی مناسب برای جریان های چندفازی به حساب می آید. مزیت اصلی روش شبکه بولتزمن در شبیه سازی جریان های چندفازی این است که ردیابی و جابجایی سطح مشترک صریح دو فاز ضروری نیست و توپولوژی های سطحی پیچیده در جریان های بسیار پویا را قابل ترمیم می کند [۳۳]. مدل های معروف و پرکاربرد چند فازی پیشنهاد شده اند که می توان آنها را به چهار دسته اصلی طبقه بندی کرد که عبارتند از: مدل گرادیان رنگ؛ مدل مبتنی بر مدل پتانسیل بین ذره ای (شبه پتانسیل)، انرژی آزاد و مدل تئوری جنبشی [۵۶].

مدل گرادیان رنگ برای در نظر گرفتن سیالات با چگالی و ویسکوزیته متفاوت از رنگ های مختلف (آبی و قرمز) برای ذرات سیال استفاده می شود. دو تابع توزیع و برای نمایش دو سیال مختلف استفاده شد. تابع توزیع کل به عنوان جمع دو تابع توزیع تعریف می شود. اپراتورهای برخورد و جریان برای هر دو سیال در نظر گرفته می شوند. در مدل پتانسیل بین ذره ای جداسازی فاز را می توان با در نظر گرفتن رفتار سیال غیر ایده آل تک جزء شیمیایی (تک جزئی چند فازی) یا دفع متقابل اجزای شیمیایی مختلف (چند فازی چند جزئی) تحقق بخشید. این مدل افزودن برهمکنش های مولکولی بین توزیع های ذرات در مقیاس مزو می تواند جداسازی فاز خود به خود را شبیه سازی کند. این مدل به عنوان «مدل شبه پتانسیل» نامیده می شود. نیروی برهمکنش بین مولکول ها عمدتاً به چگالی سیال بستگی دارد. مدل انرژی آزاد ابتدا با استفاده از تابع انرژی برای ترکیب اثرات کشش سطحی به روشی سازگار ترمودینامیکی پیشنهاد شد. بعداً، دو مدل انرژی آزاد جدید برای شبیه سازی چند فازی با نسبت چگالی بالاتر (تا ۱۰۰۰) پیشنهاد شد. در رویکرد انرژی آزاد، چگالی کل و اختلاف چگالی مانند روش های گرادیان رنگ و مدل پتانسیل بین ذره ای (شبه پتانسیل) به عنوان پارامترهای شبیه سازی به جای چگالی هر فاز در نظر گرفته می شوند. از لحاظ تاریخی، نظریه جنبشی برای اولین بار برای مطالعه انتقال گاز ایده آل توسعه یافت. برای گسترش کاربرد آن در انتقال فاز و جریان های



شکل ۹ ساختار ذرات در یک سیستم آب-نفت حاوی سورفکتانت در مدل دینامیک ذرات اتلافی [۵۰]

۳-۳- روش های شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فازی در حضور سورفکتانت ها مبتنی بر تابع توزیع (معادله تقریب زده شده بولتزمن)

روش شبکه بولتزمن شکاف بین مقیاس ماکرو و میکرو را از بین برده است. در واقع این روش در مقیاس مزوسکوپی می باشد که از طرفی، تمام مزایای شبیه سازی در هر دو مقیاس ماکرو و میکرو را حفظ کرده و از طرف دیگر، بر بسیاری از محدودیت های آنها از جمله پیچیدگی و غیر خطی بودن معادلات و هزینه محاسبات بالا غلبه کرده است [۳۵]. ایده اساسی روش شبکه بولتزمن براساس ایجاد مدل های جنبشی ساده ای می باشد که فیزیک مورد نیاز در فرایندهای میکروسکوپی و خواص ماکروسکوپی متوسط که از معادلات ماکروسکوپی مورد نظر پیروی می کند، را با هم ترکیب کند. دلیل اینکه چرا مدل های جنبشی ساده می تواند مورد استفاده قرار گیرد این است که دینامیک ماکروسکوپی یک سیال نتیجه رفتار جمعی بسیاری از ذرات میکروسکوپی در سیستم می باشد. در این روش خاصیت مجموعه ای از ذرات توسط توابع توزیع گوناگون نشان داده می شود. دلیل اینکه چرا روش شبکه بولتزمن روز به روز در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی محبوب تر می شود، این واقعیت است که این روش مسئله را به صورت محلی حل می کند. عدم حضور ترم های غیرخطی در معادلات بکار گرفته شده روش شبکه بولتزمن و شبه خطی بودن این معادلات سبب شده است که این روش دارای درجه بالایی از توازی باشد، از این رو، این روش برای دستگاه های محاسباتی دارای قابلیت پردازش موازی

¹ Color Gradient

² Free Energy

³ Inter-particle Potential (Pseudo-Potential)

⁴ Kinetic Theory

ج) توسعه مدل برای سیستم های پیچیده تر، مانند محلول های سورفکتانت یونی آسان نیست.

د) پایداری عددی برای جریان های با تغییرات توپولوژیکی بزرگ مانند شکستن قطرات و ادغام به یک چالش تبدیل می شود.

بر خلاف مدل های دارای سطح مشترک نازک، روش میدان فاز که می تواند ساختار سطح مشترک را از طریق عملکرد انرژی آزاد مناسب شبیه سازی کند، پتانسیل زیادی برای شبیه سازی مشکلات جریان چند فاز نشان داده است [۶۷-۷۳]. این مدل علاوه بر اینکه در حالت مبتنی بر معادله ناویر استوکس وجود دارد، بلکه از مدل های چندفازی توسعه یافته برای روش شبکه بولتزمن نیز هست. اساس این مدل به روش های انرژی آزاد نشات می گیرد و در خانواده مدل های انرژی آزاد دسته بندی می شود. در یک مدل میدان فاز، انرژی آزاد نه تنها خواص تعادل را تعیین می کند، بلکه به شدت بر دینامیک سیستم چند فاز تأثیر می گذارد. انتقال مقادیر فیزیکی را می توان با یک نظریه هیدرودینامیکی تعمیم یافته به انرژی آزاد مرتبط کرد. از این رو، مدل های میدان فاز یک مبنای فیزیکی محکم برای جریان های چند فاز دارند، که در تضاد با روش های دینامیک سیالات محاسباتی سنتی است [۶۸]. کل انرژی آزاد سیستم میدان فاز برحسب پارامترهای مشخص کننده فازهای مختلف سیال و غلظت سورفکتانت از سه بخش تشکیل شده که عبارتند از [۷۲]: انرژی آزاد کان-هیلیارد (مربوط به پارامتر مربوط به فازهای مختلف سیال و مشخص کردن مرز مشترک پخش دو فاز)، آنتروپی برای اختلاط ایده آل سورفکتانت و کوپلینگ انرژی سورفکتانت-سطح مشترک. در مدل میدان فاز، راه حل تعادلی هنگامی که سیستم در تعادل است، پتانسیل های شیمیایی که به عنوان مشتقات عملکردی انرژی آزاد با توجه به پارامترهای مشخص کننده فازهای مختلف سیال و غلظت سورفکتانت تعریف شده، به برخی از ثابت ها تبدیل می شوند. در این مدل نیز مانند مدل شبه پتانسیل شان و چن، ۳ تابع توزیع در نظر گرفته می شود که به مربوط به میدان جریان، متغیر میدان فاز و سورفکتانت می شود. از این رو، نیازی به نوشتن معادله بقا در حجم سیال و معادله همرفت-پخش در سطح مشترک برای سورفکتانت نیست و این مدل به راحتی از پس شبیه سازی سورفکتانت های محلول و نامحلول بر می آید. در شکل (۱۰) مدل های چندفازی پرکاربرد روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی جریان سیالات چند فاز در حضور سورفکتانت ها دسته بندی شده است.

چندفازی، باید برهمکنش های مولکولی را که با افزایش چگالی در بیشتر سیالات اهمیت فزاینده ای پیدا می کنند، ترکیب کرد. با بررسی پیشینه شبیه سازی عددی جریان سیالات چند فاز در حضور سورفکتانت ها، استفاده از روش شبکه بولتزمن مدل تئوری جنبشی در این زمینه مرسوم نیست [۵۷]. مدل گرادیان رنگ اغلب برای حل جریان چند فاز در حضور سورفکتانت نامحلول استفاده می شود [۵۸-۶۴]. از این رو، در چنین شبیه سازی هایی تنها از یک معادله همرفت-پخش^۱ سورفکتانت در سطح مشترک استفاده که با روش تفاضل محدود حل می شود. در واقع این مدل به تعداد توابع توزیع اضافه نمی کند و توزیع سورفکتانت های بدست آمده از حل معادله سطحی همرفت-پخش تنها با تأثیر بصورت سورس ترم مربوط به اثرات تنش سطحی و مارانگونی در توابع توزیع جریان، در حل استفاده می شود. در مدل پتانسیل بین ذره ای (شبه پتانسیل) معرفی شده توسط شان و چن، افزودن برهمکنش های مولکولی بین توزیع های ذرات در مقیاس مزو می تواند جداسازی فاز خود به خود را شبیه سازی کند [۳۸ و ۶۷-۶۸]. از این رو، در چنین حل هایی ۳ تابع توزیع در نظر گرفته که دو تابع توزیع مانند روش گرادیان مشخص کننده هر یک از فازها و سومی برای سورفکتانت است. تنها تفاوت معادله تقریب زده شده بولتزمن برای این توابع توزیع در سورس ترم اعمال شده است که از برهمکنش های مولکولی بین توزیع های ذرات در فاز مختلف باهم و با سورفکتانت ها ناشی می شود. به دلیل اینکه این نوع شبیه سازی تطابق خوبی با فیزیک مسئله دارد، به راحتی می توان از آن برای حالت محلول و نامحلول استفاده کرد. این دو مدل مانند بسیاری از مدل های حالت اولیه شبیه سازی جریان چندفازی مبتنی بر معادله ناویر استوکس سطح مشترک دو فاز را بصورت نازک^۲ در نظر می گیرند. این فرض در مواجهه با جریان چندفازی همراه با سورفکتانت ها ممکن است با معایبی روبرو شود که عبارتند از [۶۸]:

الف) کشش سطحی دینامیکی متکی بر یک معادله حالت تعادلی است که فرض می شود در فراتر از حالت تعادل نیز معتبر است.

ب) برای جریان های سطحی با سورفکتانت های محلول، انتقال جرم بین سطح مشترک و حجم سیالات نیاز به یک شرایط مرزی خارجی دارد که نمی تواند به طور منحصر به فرد از خود مدل ناشی شود.

¹ Convection-Diffusion

² Sharp

17, No. 4, pp. 1289-1307, DOI: 10.3934/dcddb.2012.17.1289, (2012).

[5] Soligo, G., Roccon, A., and Soldatia, A., Coalescence of surfactant-laden drops by Phase Field Method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 376, pp. 1292-1311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.021>, (2019).

[6] Goodarzi, F. and Zendejboudi, S., Effects of salt and surfactant on interfacial characteristics of water/Oil systems: Molecular dynamic simulations and Dissipative Particle Dynamics, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 58, pp. 8817-8834, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00504>, (2019).

[7] Antonopoulou, E., The role of surfactants in jet break-up for inkjet printing, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, *University of Leeds*, Leeds, United Kingdom, (2020).

[8] Haghnegahdar, M., Boden, S., and Hampel, S., Investigation of surfactant effect on the bubble shape and mass transfer in a milli-channel using high-resolution microfocus X-ray imaging, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 87, pp. 184-196, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.010>, (2016).

[9] Xu, J.-J., Li, Z., Lowengrub, J., and Zhao, H., A level-set method for interfacial flows with surfactant, *Journal of Computational Physics*, Vol. 212, pp 590-616, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2005.07.016>, (2006).

[10] Tariq, A., Phase-Field simulation of surfactant adsorption onto flat and droplet interfaces, Master of Science in Mechanical Engineering, *Shanghai Jiao Tong University*, Shanghai, China, (2012).

[11] Bazhlekova, I., Numerical simulation of drop coalescence in the presence of film soluble surfactant, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1487, pp. 351-359, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4758978>, (2012).

[12] Hayashi, K., Motoki, Y., van der Linden, M. J. A., Deen, N. G., Hosokawa, S., and Tomiyama, A., Single contaminated drops falling through stagnant liquid at low Reynolds Numbers, *Fluids*, Vol. 7, No. 2, pp. 55-78, DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids7020055>, (2021).

[13] Das, B., Kumar, B., Begum, W., Bhattarai, A., Mondal, M. H., and Saha, B., Comprehensive review on applications of surfactants in vaccine formulation, therapeutic and cosmetic pharmacy and prevention of pulmonary failure due to covid-19, *Chemistry Africa*, Vol. 5, pp. 459-480, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00345-0>, (2022).

[14] Hao, Y., Jin, N., Wang, Q., Zhou, Y., Zhao, Y., Zhang, X., and Lü, H., Dynamics and controllability of droplet fusion under gas-liquid-liquid three-phase flow in a



شکل ۱۰ مدل‌های چندفازی پرکاربرد روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی جریان سیالات چندفازی در حضور سورفکتانت‌ها

۴- نتیجه گیری

در این مقاله روش‌های شبیه‌سازی عددی جریان سیالات چندفازی در حضور مواد فعال سطحی (سورفکتانت‌ها) مطالعه شد. با توجه به گستردگی کاربرد این نوع جریان، شبیه‌سازی عددی یکی از ابزارهای مفید برای شناسایی فیزیکی و بهبود کاربرد سورفکتانت‌ها است. از طرفی، گستره وسیعی از روش‌های عددی انتخاب‌های زیادی را پیش روی پژوهشگران قرار داده است. شناخت و درک قابلیت‌ها و جزئیات این روش‌ها کمک خواهد کرد تا با توجه به امکانات سخت افزاری، مناسب‌ترین روش عددی انتخاب و نتایج قابل اعتماد و مقرون به صرفه‌ای حاصل شود.

۵- مراجع

- [1] Cui, Y., A computational fluid dynamics study of two-phase flows in the presence of surfactants, Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, *University of New Hampshire*, Durham, England, (2011).
- [2] Antonopoulou, E., Harlen, O. G., Rump, M., Segers, T., and Walkley, M. A., Effect of surfactants on jet break-up in drop-on-demand inkjet printing, *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 7, pp. 072112, DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0056803>, (2021).
- [3] Sanjeev, A., Jog, M. A., and Manglik, R. M., Computational simulation of surfactant-induced interfacial modification of droplet impact and heat transfer, in *ILASS Americas, 21st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Orlando, FL, May 18-21, USA, (2008).
- [4] Teng, C.-H., Chern, I.-L., and Lai, M.-C., Simulating binary fluid-surfactant dynamics by a phase field model, *Discrete and Continuous Dynamical Systems-B*, Vol.

- Open-Water Surfaces, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, 7–9 Feb. (2011).
- [24] Steinhausen, M., Numerical simulation of single rising bubbles influenced by soluble surfactant in the spherical and ellipsoidal regime, Master of Science in Mathematics Mathematical Modelling and Analysis, *Technical University Darmstadt*, Darmstadt, Germany, (2018).
- [25] Druetta, P. and Picchioni, F., Simulation of surfactant oil recovery processes and the role of phase behaviour parameters, *Energies*, Vol. 12, pp. 983-1013, DOI: <https://doi.org/10.3390/en12060983>, (2019).
- [26] Adila, A. S., Al-Shalabi, E. W., and Alameri, W., Geochemical investigation of hybrid Surfactant and low salinity/engineered water injections in carbonates: A numerical study, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 208, pp. 109367, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109367>, (2022).
- [27] Sabirgalieva, N., Skartlien, R., and Rojas-Solorzano, L., DPD simulation of surface wettability alteration by added water-soluble surfactant in the presence of indigenous oil-soluble surfactant, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 57, pp. 1489-1494, DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1757249>, (2022).
- [28] Jin, F., Gupta, N. R., and Stebe, K. J., The detachment of a viscous drop in a viscous solution in the presence of a soluble surfactant, *Physics of Fluids*, Vol. 18, pp. 022103, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2172003>, (2006).
- [29] Young, Y.-N., Booty, M. R., Siegel, M., and Li, J., Influence of surfactant solubility on the deformation and breakup of a bubble or capillary jet in a viscous fluid, *Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 072105, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3176462>, (2009).
- [30] Theodorakis, P. E., Müller, E. A., Craster, R. V., and Matar, O. K., Modelling the superspreading of surfactant-laden droplets with computer simulation, *Soft Matter*, Vol. 11, pp. 9254-9261, DOI: <https://doi.org/10.1039/C5SM02090E>, (2015).
- [31] Prisle, N. L., Asmi, A., Topping, D., Partanen, A.-I., Romakkaniemi, S., Dal Maso, M., Kulmala, M., Laaksonen, A., Lehtinen, K. E. J., McFiggans, G., and Kokkola, H., Surfactant effects in global simulations of cloud droplet activation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, pp. L05802, DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL050467>, (2012).
- [32] Yulianti, K., Gunawan, A. Y., Soewono, E., and Mucharam, L., Effects of an insoluble surfactant on the deformation of a falling drop towards a solid surface, *Journal of Computer Science & Computational Mathematics*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-12, DOI: <https://doi.org/10.20967/jcscm.2013.01.002>, (2013).
- microfluidic reactor, *RSC Adv.*, Vol. 10, pp. 14322-14330, DOI: <https://doi.org/10.1039/D0RA00913J>, (2020).
- [15] Gao, G., Chen, F.-J., Zhou, L., Su, L., Xu, D., Xu, L., and Li, P., Control of lipid droplet fusion and growth by CIDE family proteins, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids*, Vol. 1862, No. 10, pp. 1197-1204, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2017.06.009>, (2017).
- [16] Whitby, C. P. and Bahuon, F., Droplet fusion in oil-in-water pickering emulsions, *Front. Chem.*, Vol. 6, pp. 213-227, DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00213/full>, (2018).
- [17] Urbina-Villalba, G., an algorithm for emulsion stability simulations: Account of flocculation, coalescence, surfactant adsorption and the process of ostwald ripening, *Int. J. Mol. Sci.*, Vol. 10, pp. 761–804, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms10030761>, (2009).
- [18] Posocco, P., Perazzo, A., Preziosi, V., Laurini, E., Priola, S., and Guido, S., Interfacial tension of oil/water emulsions with mixed non-ionic surfactants: comparison between experiments and molecular simulations, *RSC Adv.*, Vol. 6, pp. 4723-4729, DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA24262B>, (2016).
- [19] Zhang, X., Wu, J. -y., and Niu, J., PCM-in-water emulsion for solar thermal applications: The effects of emulsifiers and emulsification conditions on thermal performance, stability and rheology characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 147, pp. 211-224, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.12.022>, (2016).
- [20] Laurén, S., Evaluation of emulsion stability by interfacial rheology measurements, *biolinscientific.com*, Nov. 10, (2020): <https://www.biolinscientific.com/blog/evaluation-of-emulsion-stability-by-interfacial-rheology-measurements>.
- [21] Yu, X., Jiang, N., Miao, X., Zong, R., Sheng, Y., Li, C., and Lu, S., Formation of stable aqueous foams on the ethanol layer: Synergistic stabilization of fluorosurfactant and polymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 591, pp. 124545, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124545>, (2020).
- [22] Gupta, D. Sarker, B., Thadikaran, K., John, V., Maldarelli, C., and John, G., Sacrificial amphiphiles: Eco-friendly chemical herders as oil spill mitigation chemicals, *Science Advances*, Vol. 1, No. 5, pp. e1400265., DOI: 10.1126/sciadv.1400265, (2015).
- [23] Kjeilen-Eilertsen, G., Jersak, J. M., and Westerlund, S., Developing Treatment Products for Increased Microbial Degradation of Petroleum Oil Spills across

- [43] Piedfert, A.R., Lalanne, B., Masbernat, O., and Risso, F., Numerical simulations of a rising drop with shape oscillations in the presence of surfactants, *Physical Review Fluids*, Vol. 3, No. 10, pp. 103605, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.103605>, (2018).
- [44] Teigen, K.E., Lervåg, K.Y., and Munkejord, S.T., Sharp interface simulations of surfactant-covered drops in electric fields, V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD (2010), Lisbon, Portugal, 14-17 June (2010).
- [45] Soligo, G., Roccon, A., and Soldati, A., Deformation of clean and surfactant-laden droplets in shear flow, *Meccanica*, Vol. 55, pp. 371–386, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-019-00990-9>, (2020).
- [46] Martin, D.W., and Blanchette, F., Simulations of surfactant effects on the dynamics of coalescing drops and bubbles, *Physics of Fluids*, Vol. 27, pp. 012103, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4905917>, (2015).
- [47] Adami, S., Hu, X.Y., and Adams, N.A., 3D Drop deformation and breakup in simple shearflow considering the effect of insoluble surfactant, *5th international SPHERIC workshop*, Manchester, UK, 23-25 June, (2010).
- [48] Adami, S., Hu, X.Y., and Adams, N.A., A conservative SPH method for surfactant dynamics, *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, pp. 1909–1926, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.11.015>, (2010).
- [49] Drumright-Clarke, M.A. and Renardy, Y., The effect of insoluble surfactant at dilute concentration on drop breakup under shear with inertia, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 1, pp. 14-23, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1628232>, (2004).
- [50] Theodorakis, P. E., Smith, E. R., Craster, R.V., Müller, E. A., and Matar, O. K., Molecular dynamics simulation of the superspreading of surfactant-laden droplets. A review, *Fluids*, Vol. 4, No. 176, pp. 1-23, DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids4040176>, (2019).
- [51] Khodadadi, Z., Mousavi-Khoshdeld, S.M., Gharibi, H., Hashemianzadeh, S.M., and Javadian, S., Monte Carlo simulation of binary surfactant/contaminant/water systems, *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, Vol. 36, pp. 20-29, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2012.03.003>, (2012).
- [52] Khodadadi, Z., Mousavi-Khoshdeld, S.M., and Gharibi, H., Monte Carlo simulation and theoretical approach to mixed surfactant system consisting gemini and conventional surfactants in aqueous solutions, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 406, No. 25, pp. 175-180, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.07.051>, (2015).
- [33] Dave, N. and Joshi, T., A concise review on surfactants and its significance, *International Journal of Applied Chemistry*, Vol. 13, No. 3, pp. 663-672, DOI: <https://doi.org/10.37622/IJAC/13.3.2017.663-672>, (2017).
- [34] Hasegawa, T., Karasawa, M., and Narumi, T., Modeling and measurement of the dynamic surface tension of surfactant solutions, *J. Fluids Eng.*, Vol. 130, No. 8, pp. 081505, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2956597>, (2008).
- [35] Mukherjee, S., Berghout, P., and Van den Akker, H. E. A., A lattice boltzmann approach to surfactant-laden emulsions, *American Institute of Chemical Engineers Journals*, Vol. 65, No. 2, pp. 811-828, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16451>, (2019).
- [36] Venkataramani, V., Jin, F. and Stebe, K.J., Injected Drops with Surfactants: A Priori Scaling for Predicting Impeded Drop Necking. In The 2008, *AIChE Annual Meeting*, 16-21 November 2008, Philadelphia, Pennsylvania, USA, (2008).
- [37] Palssona, S., Siegel, M., and Tornberg, A.-K., Simulation and validation of surfactant-laden drops in two-dimensional Stokes flow, *Journal of Computational Physics*, Vol. 386, pp. 218-247, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.12.044>, (2019).
- [38] Mukherjee, S., Zarghami, A., Haringa, C., Van As, K., Kenjeres, S., and Van den Akker, H. E. A., Simulating liquid droplets: A quantitative assessment of lattice Boltzmann and Volume of Fluid methods, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 70, pp. 59-78, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.12.00>, (2019).
- [39] Wang, Q., Siegel, M., and Booty, M.R., Numerical simulation of drop and bubble dynamics with soluble surfactant, *Physics of Fluids*, Vol. 26, pp. 052102, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4872174>, (2014).
- [40] Lai, M.-C., Tseng, Y.-H., and Huang, H., Numerical simulation of moving contact lines with surfactant by immersed boundary method, *Commun. Comput. Phys.*, Vol. 8, No. 4, pp. 735-757, DOI: <https://doi.org/10.4208/cicp.281009.120210a>, (2010).
- [41] Ganesan, S., Simulations of impinging droplets with surfactant-dependent dynamic contact angle, *Journal of Computational Physics*, Vol. 301, pp. 178–200, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.08.026>, (2015).
- [42] Atasia, O., Legendre, D., Haut, B., Zenit, R., and Scheida, B., Lifetime of surface bubbles in surfactant solutions, *Langmuir*, Vol. 36, pp. 7749-7764, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03597>, (2020).

- 11, No. 6, pp. 1246-1252, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1131445>, (2017).
- [63] Farhat, H., Celiker, F., Singh, T., and Lee, J.S., A hybrid lattice Boltzmann model for surfactant-covered droplets, *Soft Matter*, Vol. 7, No. 6, pp. 1968-1986, DOI: <https://doi.org/10.1039/C0SM00569J>, (2011).
- [64] Hasan, W., Surfactants, thermal and surface energy effects on emulsions' transport properties: A study using lattice boltzmann method, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, *Wayne State University*, Detroit, USA, (2018).
- [65] Furtado, K. and Skartlien, R., Derivation and thermodynamics of a lattice Boltzmann model with soluble amphiphilic surfactant, *Physical Review E*, Vol. 81, pp. 066704, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.81.066704>, (2010).
- [66] Choi, J.S., A multiphase lattice boltzmann model for colloidal particles and surfactant in an evaporating droplet with a pinned contact line, Master of Science in Mechanical Engineering, *Graduate School of UNIST*, Ulsan, Republic of Korea, (2018).
- [67] Skartlien, R., Furtado, K., Sollum, E., Meakina, P., and Kralov, I., Lattice-Boltzmann simulations of dynamic interfacial tension due to soluble amphiphilic surfactant, *Physica A*, Vol. 390, pp. 2291-2302, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.02.022>, (2011).
- [68] Liu, H. and Zhang, Y., Phase-field modeling droplet dynamics with soluble surfactants, *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, pp. 9166-9187, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.08.031>, (2010).
- [69] van der Sman R.G.M. and Meinders, M.B.J., Analysis of improved Lattice Boltzmann phase field method for soluble surfactants, *Computer Physics Communications*, Vol. 199, pp. 12-21, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.10.002>, (2016).
- [70] Zong, Y., Zhang, C., Liang, H., Wang, L., and Xu, J., Modeling surfactant-laden droplet dynamics by lattice Boltzmann method, *Phys. Fluids*, Vol. 32, pp. 122105, DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0028554>, (2020).
- [71] Kian Far, E., Gorakifard, M., and Fattahi, E., Multiphase phase-field lattice boltzmann method for simulation of soluble surfactants, *Symmetry*, Vol. 13, No. 6 pp. 10-19, DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13061019>, (2021).
- [72] Shi, Y., Tang, G.H., Cheng, L.H., and Shuang, H.Q., An improve d phase-field-base d lattice Boltzmann model for droplet dynamics with soluble surfactant, *Computers and Fluids*, Vol. 179, pp. 508-520, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.11.018>, (2019).
- [53] Zapata, C.P., Casanova, H., and Restrepo, J., Monte Carlo simulation of the self-assembly process of nonionic surfactants (type HXTY) considering second-neighbor interaction between surfactant molecules, *Progr. Colloid Polym. Sci.*, Vol. 128, pp. 146-150, DOI: <https://doi.org/10.1007/b97118>, (2004).
- [54] Masubuchi, Y., Molecular Modeling for Polymer Rheology, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02178-0>, Elsevier Inc., (2016).
- [55] Zhou, J., and Ranjith, P.G., Self-assembly and viscosity changes of binary surfactant solutions: A molecular dynamics study, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 585, pp. 250-257, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.11.022>, (2021).
- [56] Sudhakar, T., and Das, A.K., Evolution of Multiphase Lattice Boltzmann Method: A Review, *J. Inst. Eng. India Ser. C*, Vol. 101, pp. 711-719, DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00600-8>, (2020).
- [57] Wei, B., Houa, J., Sukop, M.C., and Liu, H., Pore scale study of amphiphilic fluids flow using the Lattice Boltzmann model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 139, pp. 725-735, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.056>, (2019).
- [58] Hasan, W. and Farhat, H., Hybrid thermal lattice Boltzmann model to study the transportation of surfactants contaminated emulsions in parabolic flows, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 166, pp. 85-93, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.005>, (2018).
- [59] Zhang, J., Liu, H., and Ba, Y., Numerical study of droplet dynamics on a solid surface with insoluble surfactants, *Langmuir*, Vol. 166, pp. 85-93, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00495>, (2018).
- [60] Liu, H., Ba, Y., Wu, L., Li, Z., Xi, G., and Zhang, Y., A hybrid lattice Boltzmann and finite difference method for droplet dynamics with insoluble surfactants, *J. Fluid Mech.*, Vol. 837, pp. 381-412, DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.859>, (2018).
- [61] Choi, S.B., Kondaraju, S., and Lee, J.S., Study for optical manipulation of a surfactant-covered droplet using lattice Boltzmann method, *Biomeicrofluidics*, Vol. 8, pp. 024104, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868368>, (2014).
- [62] Hasan, W., and Farhat, H., Alhilo, A., and Tamimi, L., Hybrid quasi-steady thermal lattice boltzmann model for studying the behavior of oil in water emulsions used in machining tool cooling and lubrication, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol.