



مقالات پژوهشی:

- » ارائه یک الگوی تحریک حرکت - زمان از رفتار چشم نگاه انسان در تمدنی موقعيت اجتماعی مختلف محمد حسین مشافی، علی صا طاهری و سید بهزادی پور
- » بررسی انعکاس‌پذیری و پهنه‌سازی هندسی طرح جدید استنت پلیمری با روش المان محدود محمد خانی، علی دینوی، ابراهیم‌حسین ابراری و محمد فخری
- » الگوریتم طراحی و پرسی عددی سیستم خنک‌کاری چداره ای یک دیفیوزر شبیه‌ساز ارتفاع بالا نعمت‌الله ولادی، محمد فارابی و میاد مهدیان سوت‌آبادی
- » ارزیابی چیدمان سطوحی خودروهای مولکولی به کمک شبیه‌سازی درست‌داده دینامیک مولکولی همن واعظی، حسین نجات پیشکاری و محمد رضا امین‌هادی
- » بررسی دید ناپردازی‌های اشتفتی و عدست‌سکن بر رفتار ناپرداز در جریان آشته پشت یک بهروش اولبری - لکز ازی عطیه فرج و سیاراهم مهدی
- » پهنه‌سازی طراحی چنگ‌مغوفی یک ماهواره بر بازگشت‌پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم‌قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان مظفره مجتبی و معین قنحی چگرکنی
- » بررسی کشش و تابیداری و ایسته به ایعاد انسانی از نیوهای تکه‌گاهی و میدان الکترواستاتیک در میکرو ورق‌های توحالی مخلخله مهدی مجاهدی، مجیدرضا اشناهی و محمد مجاهدی
- » مطالعه تحریک اثر ناپسالات پایه رونق بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکالالهای موجی فاطمه مولایی، مریم خیاط و محمد حسن پویانی
- » توسعه یک الگوی کوپل تغییب سطحی فاصل برای حل عددی میدان جریان‌های دوگانه در انداد رینولدز پایین در سیتر foam-extend بهنام جزایی و شدید و گوکی پور
- » ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آرودینامیکی توربین بادی H - سکل و V - سکل در شهر زاهدان سام سهام و سید کریمیان علی ایادی

پاداشرت فنی:

- تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه شارپی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شدت و پنج با ضخامت مختلف جمال الدین سفر سید جعیت هاشمی و علی اکبر جعیت جزندی

ARTICLES:

- » Proposing an Empirical Motion-Time Pattern for Human Gaze Behavior in Different Social Situations M.H. Mashaghi, A.R. Taheri and S. Behzadipour
- » Flexibility and Geometric Optimization of a New Structure for a Polymer Stent With the Finite Element Method M. Khatami, A. Doniavi, A.M. Abazari and M. Fotouhi
- » A Design Algorithm and Numerical Investigation of a Water-Jacket Cooling System for a High-Altitude Simulator Diffuser N. Fouladi, M. Farahani and M. Mahdian Dowlatabadi
- » Nanocars Assembly on a Surface: Coarse-Grained Molecular Dynamics Study M. Vaezi, H. Nejat Pishkenari and M.R. Ejtehadi
- » Nanoparticles in the Turbulent Flow Behind the Backward Step by Eulerian-Lagrangian Method A. Farrokh and M. Mahdi
- » Reliability-Based Multidisciplinary Design Optimization under Uncertainty for Reusable Flexible Space Launcher Utilizing NSGA-II M. Mojtabi and M. Fathi Jegarkandi
- » Investigating Size-Dependent Buckling and Instability Caused by Support Forces and Electrostatic Field in Porous Annular Microplates MA. Mojahedi, M.R. Ayatollahi and MO. Mojahedi
- » Experimental Study of the Effect of Oil-Based Nanofluid on Heat Transfer Characteristics in Different Arrangements of Wavy Microchannels F. Moradi, M. Khayat and M.H. Nobakhti
- » Developing an Interface Tracking Coupled Solver for Solving Two Phase Flow Fields at Low Reynolds Numbers in Foam-Extend Platform B. Cheraghi and Sh. Vakilipour
- » A Comparative Study of the Aerodynamic Performance and Economic Viability of H-Shape and V-Shape Wind Turbines in the Climate of Zahedan City S. Saham and S. Karimian Alibadi

RESEARCH NOTES:

- » Experimental Determination of Correction Factors from Charpy Impact Testing of API X65 Steel with Varying Specimen Thickness J. Sad, S.H. Hashemi and A.A. Majid

دوره‌ی ۴۰

شماره‌ی ۱

بهار

۱۴۰۳

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سردیب: دکتر مهرداد تقی زاده منظری

سردیب‌هیات تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

ویرایش: گروه ویراستاری ویرافر

حروف چینی: ساناز نادری، راضیه قربانی

صفحه‌آرایی و امور گرافیکی: غزل احمدی میرقاد

امور اجرایی: شیما آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

مجله‌ی مهندسی مکانیک شریف در پایگاه‌های DOAJ, ISC و SID نمایه می‌شود.

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۵۵

دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۰۹۱۶۴۰۶۶۰۰۵۴

نیاب: ۰۱۲۹۸۳

نشانی سایت: <http://journal.sharif.ir>لیانامه: pajouhesh@sharif.edu

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

- دکتر محمد رضا اسلامی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- دکتر محمد تقی احمدیان
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر محسن اصغری
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر محمد رضا اعلم
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه برکلی، آمریکا
- دکتر محمد اقتصاد
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیارز
- دکتر آریا استی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر عبدالرضا اوحدی همدانی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- دکتر احمد برازی
دانشکده مهندسی مکانیک، استیتو آنتاریو
- دکتر مهرداد تقی زاده منظری
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر حسن سالاریه
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر محمد حسن سعیدی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر سعید سهراب پور
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر امیر رضا شاهانی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- دکتر محمد شرعیات
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- دکتر محمود مهرداد شکریه
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
- دکتر مجید صفار اویل
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- دکتر حسن ظهور
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیریتیش کامپیو، کانادا
- دکتر علی مقداری
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر سید محمد باقر ملائک
دانشکده مهندسی هوانپا، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر حسین نجات پیشکناری
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر محمود یعقوبی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیارز
- دکتر داود یونسیان
دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

هیأت مشاوران

دکتر مهرداد نقی زاده منظری

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احسان جباری

دانشکده‌ی فنی و مهندسی - دانشگاه قم

دکتر محمدرضا جهان‌نما

پژوهشگاه فضایی ایران

دکتر سیامک حسین‌پور

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

دکتر حمید رضا حیدری

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه ملایر

دکتر حامد دیلمی عضدی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اراک

دکتر مجید سلطانی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر سبیما ضیائی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه یاسوج

دکتر جواد علیزاده کاکلر

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه ارومیه

دکتر نعمت‌اله فولادی

پژوهشگاه فضایی ایران

دکتر فمیدا فلاح رجب‌زاده

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کریم‌زاده

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه فسا

دکتر مهدی گنجیانی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه تهران

دکتر علیرضا فتوحی فیروزآباد

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه یزد

دکتر آرش میرعبدالله لواسانی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

دکتر میراعلم مهدی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر محمود مانی

دانشکده‌ی مهندسی هواشناسی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر حمید معین فرد

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر محمد مشایخی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علی مقداری

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محسن نظری

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شاهroud

دکتر علیرضا نوین‌زاده

دانشکده‌ی مهندسی هواشناسی - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر سیدحسن نوربخش شورابی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه شهرکرد

دکتر محمد وجودی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه محقق اردبیلی

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

- ۳ ارائه‌ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف محمدحسین مشاتی، علیرضا طاهری و سعید بهزادی پور
- ۱۵ بررسی انعطاف‌پذیری و پهینه‌سازی هندسی طرح جدید استنمت پایه‌مری با روش المان محدود محمد خاتمی، علی دنیوی، اصیروموسی ابازری و محمد فتوحی
- ۲۵ الگوریتم طراحی و بررسی عددی سیستم خنک‌کاری جداره آبی یک دیفیوزر شبیه‌ساز ارتفاع بالا نعمت‌اله فولادی، محمد فراهانی و میلاد مهدیان دولت‌آبادی
- ۳۹ ارزیابی چیدمان سطحی خودروهای مولکولی به کمک شبیه‌سازی درشت‌دانه دینامیک مولکولی مهران واعظی، حسین نجات پیشکاری و محمد رضا اجتها
- ۴۷ بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفتگی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به روش اویلری - لگرانزی عطیه فخر و میراعلم مهدی
- ۶۱ پهینه‌سازی طراحی چند موضوعی یک ماهواره بر بازگشتم پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان مطهره مجیبی و محسن فتحی جگرکنندی
- ۷۵ بررسی کمانش و نایپایداری وابسته به ابعاد ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی و میدان الکترواستاتیک در میکرو ورق‌های توالی متخلخل مهدی مجاهدی، مجیدرضا آیت‌الله و محمد مجاهدی
- ۸۵ مطالعه تجربی اثر نانوپیالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی فاطمه مرادی، مرتضی خیاط و محمد حسن نوبختی
- ۹۷ توسعه یک حلگر کوپل تعقیب سطح فاصل برای حل عددی میدان جریان‌های دوفازی در اعداد رینولدز پایین در بستر foam - extend بهنام چراغی و شیدوش وکیلی پور
- ۱۱۱ ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان سام سهام و سعید کریمیان علی آبادی

یادداشت فنی:

- ۱۱۹ تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه شارپی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شصت و پنج با ضخامت متفاوت جلال الدین صدر، سید‌حجت هاشمی و علی‌اکبر مجیدی جیرنده‌ی

ضمائی:

- ۱۳۶ چکیده مقالات به انگلیسی

ارائه‌ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف

محمدحسین مشاقی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا طاهری* (استادیار)

سعید بهزادی‌پور (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

ربات‌های اجتماعی که برای تعامل با انسان ساخته شده‌اند، نیازمند این هستند که رفتار تعاملی (نظیر جهت نگاه اجتماعی) مشابه انسان داشته باشند. هدف از این پژوهش، ارائه یک الگوی تجربی حرکت - زمان از جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف است؛ این موقعیت‌ها شامل صحته‌هایی با حضور ۲ تا ۴ نفر در یک فیلم است که افراد حاضر در صحنه، رفتارهای اجتماعی «صحبت کردن»، «دست تکان دادن»، «اشاره کردن»، «ورود به صحنه» و «خروج از صحنه» را به نحوی سازماندهی شده انجام می‌دهند. ۱۵ فرد بزرگسال به مشاهده این فیلم پرداخته و موقعیت نگاه آن‌ها توسط ریدیاب چشم ثبت گشته است. در ادامه، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ضریب اهمیت هرکدام از رفتارهای اجتماعی ذکر شده استخراج گردید. نتایج بازسازی نگاه شرکت‌کنندگان بر روی داده‌های تست، به عملکرد واقعی افزاد بسیار شیبیه بود. در انتها قابلیت پیاده‌سازی این الگو، با اجرای آن بر روی ربات ناول با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت و عملکرد مشیت آن با استفاده از تحلیل داده‌های پرسش‌نامه ارائه شده به ۱۰ شرکت‌کننده تایید گردید. در سه مورد از سوالات مطرح شده، تفاوت معنادار آماری الگوها در دو وضعیت مطالعه شده، مشاهده گردید.

mh.mashaghi@student.sharif.edu
artaheri@sharif.edu
behzadipour@sharif.edu

واژگان کلیدی: ربات اجتماعی، جهت نگاه اجتماعی، ریدیاب چشم، الگوی تجربی حرکت - زمان، الگوریتم ژنتیک.

۱. مقدمه

۱.۱. اهمیت و کاربرد موضوع

با روند رشد فناوری‌های رباتیک، ربات‌های اجتماعی^۱ نیز در سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. ربات‌های اجتماعی، ربات‌هایی هستند که برای تعامل با انسان‌ها به شیوه‌ای طبیعی و بین فردی و اغلب برای دستیابی به اهدافی در زمینه‌های آموزش، سلامت، سرگرمی و ...، طراحی و به کار گرفته می‌شوند.^[۱] تعامل با ربات‌ها همواره برای انسان‌ها و مخصوصاً کودکان جذابیت خاصی دارد. بنا بر این، می‌توان از این جلب توجه و جذابیت برای هدف‌هایی که به آنها اشاره گردید، به خوبی استفاده نمود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۳۰/۱/۱۰، اصلاحیه ۶/۲۴۰، پذیرش ۲۵/۲/۱۴۰.

استناد به این مقاله:

مشاقی، محمدحسین، طاهری، علیرضا، و بهزادی‌پور، سعید، ۱۴۰۳. ارائه‌ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف.

مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۳۳-۱۴۰. DOI:10.24200/J40.2023.61604.1664.

۲.۱. هدف پژوهش

برجسته‌ی تصاویر ایستا را استخراج کنند. در پژوهشی دیگر Lathuiliere و همکاران^[۴] با استفاده از یادگیری تقویتی، روشی برای کنترل جهت نگاه ربات ارائه کردند. در این روش، شبکه‌ی عصبی براساس داده‌های ورودی تصویر و صدای محیط اطراف، یاد می‌گیرد تا توجه ربات را در جهتی قرار بدهد که تعداد افزاد در میدان دیدش بیشینه شود. شبکه‌ی طراحی شده این‌ها با استفاده از ویدیوهای از پیش تهیه شده آموزش داده می‌شود و سپس برای صحبت‌سنگی در محیط واقعی قرار می‌گیرد. همچنین در یک پژوهش بسیار جامع، Yoo و همکارش^[۵] یک روش بر مبنای انتگرال فازی برای کنترل جهت نگاه طراحی شده این‌ها با استفاده از معرفی کرده‌اند. در دسته دیگر پژوهش‌ها، از الگوی جهت نگاه انسان جهت اصلاح عملکرد سیستم کنترل جهت نگاه ربات استفاده شده است. در پژوهش Zaraki و همکاران^[۶] یک سیستم کنترل جهت نگاه برای ربات انسان‌نمای FACE ارائه شده است. در این سیستم با در نظر گرفتن عواملی مانند: میزان نزدیک بودن فرد به ربات، نشانه‌های کلامی و غیرکلامی، میدان دید مؤثر و اثر خوگیری^[۷]، به هرکدام از محرک‌های محیط یک امتیاز منظور می‌گردد. امتیاز بالاتریک محرک، بینگار اولویت ربات برای محاسبه‌ی کردن جهت نگاهش به آن محرک می‌باشد. رابطه‌ای که مقاله مذکور برای محاسبه‌ی امتیاز هر محرک در نظر گرفته است، به صورت جمع تعدادی از عوامل است. نخستین عامل آن، جمع وزن دار ویژگی‌های نرمال شده محرک است؛ یعنی ویژگی‌های محرک در میزان اهمیت آن ویژگی ضرب و مجموع حاصل ضرب‌ها برای تمام ویژگی‌های آن محرک محاسبه می‌گردد. دومین عامل بینگر میزان نزدیکی یک محرک به ربات است. سومین عامل بینگر زاویه‌ی قرارگیری محرک نسبت به ربات و آخرین عامل نشان دهنده‌ی حافظه‌ی ربات از اتفاقات گذشته‌ی مرتبط با آن محرک است (شکل ۲). نویسنده‌گان^[۸] اثر خوگیری را به این صورت وارد مسئله کرده‌اند که امتیاز محرکی که برندۀ شده و جهت نگاه ربات به آن معطوف می‌گردد، ثابت باقی نمی‌ماند و به طور خطی نزول می‌کند. این اثر در واقعیت نیز مشهود است؛ زیرا انسان هیچ‌گاه تمام مدت به یک محرک خیره نمی‌ماند.

در پژوهش Aliasgari و همکاران^[۹] اصلاحاتی برروی مدل ارائه شده توسط^[۱۰] صورت گرفته است. نویسنده‌گان در این پژوهش پیشنهاد می‌کنند که در

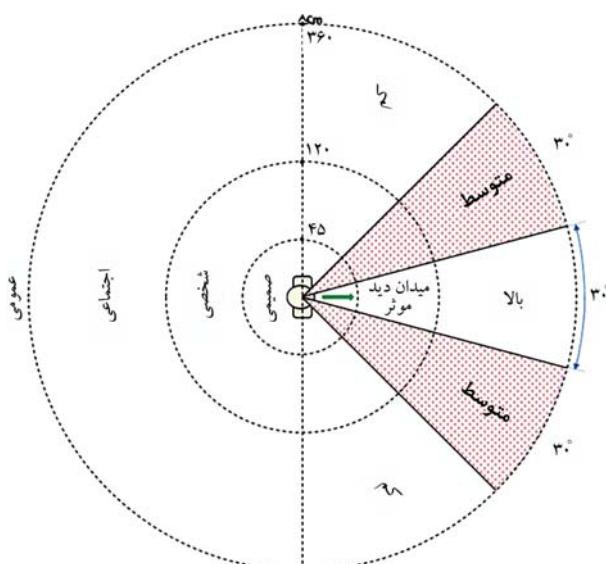
هدف از انجام این پژوهش، استخراج الگوی تجربی حرکت - زمان^[۹] چشم انسان (یا الگوی حرکت چشم با در نظر گرفتن زمان) در موقعیت‌های اجتماعی مختلف می‌باشد؛ این مدل نشان دهنده‌ی این است که فرد از میان محرک^[۷] های بصری موجود در میدان دید خود، به کدام محرک، توجه می‌کند و نیز با چه سرعتی توجه را از پک محرک به محرک دیگر تغییر می‌دهد. دستیابی به این هدف، نیازمند طراحی آزمایش برای ریابی جهت نگاه انسان می‌باشد؛ به عبارت دیگر، می‌باشد آزمایشی طراحی شود تا محل نگاه هر فرد را هنگام مواجهه با موقعیت‌های اجتماعی ضبط و ذخیره نماید. پس از انجام این آزمایش، با استفاده از ابزارهای ریاضی مناسب، یک الگوی تجربی که نماینده‌ی جهت نگاه افزاد شرکت کننده در آزمایش باشد، استخراج می‌گردد.

۲. مرور ادبیات موضوع

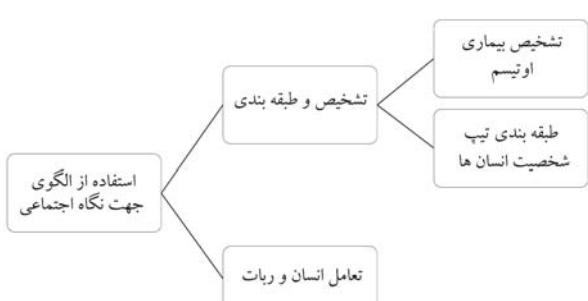
عمله پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه جهت نگاه اجتماعی را می‌توان به دو گروه عمله تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱).
عمله پژوهش‌هایی که در گروه نخست، یعنی تشخیص و طبقه‌بندی، صورت گرفته‌اند، اگرچه با هدف این مقاله همخوانی ندارند، اما حاوی روش‌هایی هستند که در انتخاب روش انجام پژوهش در این مقاله مؤثر بودند؛ به عنوان مثال، Liu و همکاران^[۱۱] با استفاده از داده‌برداری از جهت نگاه کودکان مبتلا به اتیسم^[۸] هنگام مشاهده‌ی چهره‌ی افراد و بر مبنای یادگیری مانشین^[۹]، توانستند روشی برای غربالگری کودکان سالم از کودکان مبتلا به اتیسم ارائه بدهند. در پژوهشی دیگر، Jones و همکارش^[۱۲] با اتکا بر داده‌های عددی میزان توجه کودک به چشم‌های فرد مقابل و تحلیل آماری برای داده‌ها متوجه شدند این میزان توجه در کودکان مبتلا به اتیسم با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

دسته‌ی دوم پژوهش‌ها، تعامل انسان و ربات یا به اختصار HRI^[۱۰] نام دارد. حوزه‌ی تعامل انسان و ربات در تلاش است تا یک تعامل ساده و شهودی را میان انسان‌ها و ربات‌ها فراهم سازد.^[۱۳] Yoshikawa و همکاران^[۱۴] با رو بروی هم قراردادن یک انسان و یک ربات انسان‌نمای^[۱۵] متوجه شدند در شرایطی که ربات جهت نگاه فرد مقابلش را دنبال می‌کند، می‌تواند ارتباط چشمی بهتر و مداوم تری را از فرد مقابل دریافت کند.

تعدادی از پژوهش‌ها، بدون استفاده از الگوی جهت نگاه انسان، برای کنترل جهت نگاه ربات‌های اجتماعی تلاش کرده‌اند؛ به عنوان مثال Cornia و همکاران^[۱۶] با آموزش دادن یک شبکه‌ی عصبی بازگشته از نوع LSTM^[۱۷] توانسته‌اند نقاط



شکل ۲. مدل ارائه شده توسط Zaraki^[۱۰] که نشان دهنده‌ی دو عامل فاصله و زاویه دید در تعیین جهت نگاه ربات می‌باشد.



شکل ۱. طبقه‌بندی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی جهت نگاه اجتماعی.

می‌گیرند. با توجه به این که تعداد افراد حاضر در صحنه در پژوهش فعلی تا ۴ نفر قابل افزایش است، محرک «اشاره کردن» به صورت متفاوتی از پژوهش قبلی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ یعنی به جای آن که افراد مورد اشاره‌ی یکدیگر قرار بگیرند، یک هدف مشترک مورد اشاره‌ی افراد حاضر در آزمایش قرار می‌گیرد. محرک‌های «وارد شدن به تصویر» و «خارج شدن از تصویر» به منظور بهبود دقت بررسی نسبت به پژوهش قبلی، با دو سرعت متفاوت بررسی می‌گردند. «فاصله‌ی افراد از دوربین» و «زاویه‌ی قرارگیری نسبت به دوربین» هم مشابه پژوهش قبلی بررسی می‌شوند.

براساس توضیحاتی که داده شد، هدف از این آزمایش بررسی اثر محرک‌های

اجتماعی زیر بر رفتار جهت نگاه انسان است:

- صحبت کردن؛
- دست تکان دادن؛
- اشاره کردن؛
- وارد شدن به تصویر (با دو سرعت متفاوت)؛
- خارج شدن از تصویر (با دو سرعت متفاوت)؛
- فاصله از دوربین (در دو حالت نزدیک و دور)؛
- زاویه با دوربین (در دو حالت زاویه مستقیم و زاویه بسته)؛
- تعداد افراد حاضر در صحنه (از ۲ تا ۴ نفر).

همانطور که در لیست اشاره شده مشاهده می‌شود، بررسی هر یک از پارامترهای ذکر شده در یک آزمایش جداگانه، نیازمند اجرای چند دههار آزمایش می‌باشد؛ این مسئله با توجه به وابستگی به شرکت‌کنندگان انسانی در این آزمایش، غیرممکن است؛ بنابراین، لازم است تا با روش‌های استاندارد طراحی آزمایش، اثربال پارامترهای مذکور در تعدادی آزمایش محدود گنجانده شود؛ بنابراین، از روش طراحی آزمایش تاکوچی استفاده گردید. در پایان طراحی آزمایش، یک ویدیو مورد نیاز است که تمام پارامترهای لیست بالا را شامل باشد و اثر متقابل هرکدام را مورد آزمایش قرار بدهد؛ در نتیجه ابتدا لازم است برای این ویدیو یک سناریو طراحی و پس از آن بساختن ویدیو پرداخته شود.

با توجه به این که تعداد افراد حاضر در صحنه از ۲ تا ۴ نفر متغیر است، برای هر کدام از این سه حالت طراحی تاکوچی به صورت جداگانه در نظر گرفته و سپس با کنارهای قرار دادن این سه حالت، یک سناریوی تا حد امکان پیوسته ساخته شد. در شکل ۳ ضرایر نشان‌دهنده‌ی محل‌های مجاز برای قرارگیری افراد هستند؛ به عبارت دیگر، هر خط سبز یک امتداد مجاز برای قرارگیری افراد است. همچنین

امتیاز جلب توجه برای هر محرک، به جای حاصل جمع ویژگی‌های آن محرک، از حاصل ضرب آنها استفاده شود. همچنین، در این پژوهش قابلیت پلک زدن ربات نیز به مدل [۱۰] اضافه شده است. در [۱۱] از ۲۳ نفر آزمایش ردیابی نگاه به عمل آمده که از این نظر نسبت به [۱۰] برتری دارد؛ اما داده‌برداری جهت نگاه با دقت باین تری صورت گرفته است. علمت این امر استفاده از سنسور کینکت برای ردیابی نگاه افراد بوده است. در پژوهش مذکور، محرک‌های که مورد بررسی قرار گرفتند، عبارت اند از صحبت کردن، دست تکان دادن، مورد اشاره قرار گرفتن توسط فرد دیگر، ورود به تصویر و خروج از آن و نگاه کردن فرد به دوربین.

در پژوهش Domingo و همکاران [۱۲] ایده بهینه‌سازی ضرایب برای یافتن

بهترین رفتار جهت نگاه مطرح شده است. در این پژوهش، ۷ محرک مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ قرار داشتن فرد در میدان دید ربات، صحبت کردن فرد، نگاه کردن مستقیم فرد به ربات، حرکت کردن فرد، عدم حضور فرد در میدان دید ربات به رغم شنیده شدن صدای او، عدم حضور فرد در میدان دید ربات اما مورد توجه قرار داشتن وی توسط سایر افراد حاضر در میدان دید ربات و فاصله از ربات. نکته‌ای که در این پژوهش جلب توجه می‌کند این است که از محرک‌های یاد شده، ۶ مورد آن به صورت صفر و یکی در نظر گرفته شده‌اند و هیچ‌گونه طیفی برای محرک‌ها لحاظ نشده است.

با جمع‌بندی مرور ادبیات موضوعی، مقرر گردید با تکیه بر داده‌برداری صورت گرفته از تعدادی از افراد سالم، الگوی تثبیت و حرکت چشم افراد در مجموعه‌ی تا حد امکان غنی از موقعیت‌های اجتماعی اشاره شده بررسی و استخراج گردد. موقعیت‌های مدنظر فقط شامل محرک انسانی هستند؛ اما در این پژوهش اولاً تعداد انسان‌هایی که به عنوان محرک در نظر گرفته می‌شوند، بیش از ۲ نفر خواهد بود و ثانیاً به هر محرک ویژگی‌های گستردگی‌تری نسبت داده می‌شود که هر کدام از ویژگی‌ها با وزن مشخصی در اولویت جلب توجه آن محرک تأثیرگذار است. با توجه به اینکه پژوهش فعلی به‌نوعی ادame دهنده و تکمیل‌کننده‌ی پژوهش Aliasghari و همکاران [۱۱] است، محرک‌های مورد بررسی در پژوهش فعلی نیز با هدف تکمیل محرک‌های آن پژوهش انتخاب گردیدند.

۳. روش انجام پژوهش

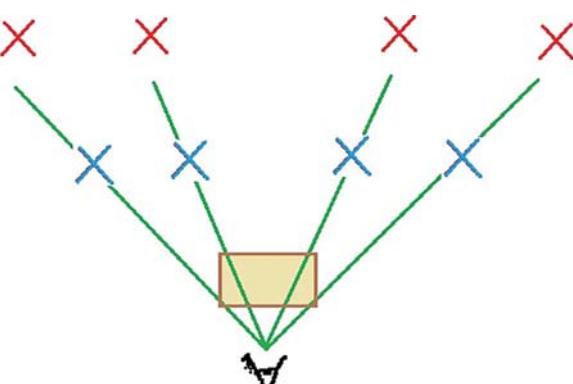
برای رسیدن به هدف این پژوهش باید دو مرحله انجام شود؛ مرحله‌ی نخست، جمع‌آوری داده‌ها نام دارد که خود شامل دو زیرمرحله اصلی است؛ طراحی آزمایش و اجرای آزمایش. در مرحله‌ی دوم نیز تحلیل داده‌ها صورت می‌گیرد که استخراج الگوی جهت نگاه در این بخش افق می‌افتد.

۱.۳. جمع‌آوری داده‌ها

نخستین گام از انجام این پژوهش، جمع‌آوری داده‌هاست. همان طورکه در عنوان این مقاله مشهود است، هدف استخراج الگویی از رفتار جهت نگاه انسان است؛ بنابراین، لازم است تا در ابتدا این رفتار مشاهده و ضبط شود. بهمنظور ضبط داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش، نیاز است تا یک آزمایش مناسب طراحی و اجرا گردد.

۱.۱.۳. طراحی آزمایش

همانطور که در مرور ادبیات مطرح شد، انتخاب محرک‌های اجتماعی مورد بررسی با هدف تکمیل پژوهش Aliasghari و همکاران [۱۱] صورت گرفته است؛ بنابراین، محرک‌های «صحبت کردن» و «دست تکان دادن» به همان شکل مورد بررسی قرار



شکل ۳. محل‌های مجاز برای قرارگیری افراد حاضر در ویدیو.

داده‌برداری تا فرکانس ۲۰۰۰ هرتز را دارد و همچنین، خطای اندازه‌گیری آن حدوداً ۱۵ درجه می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، این دستگاه دارای یک پایه‌ی نگهدارنده‌ی سر است تا سر فرد شرکت کننده در آزمایش را در یک موقعیت ثابت نگه دارد.

تعداد افراد شرکت کننده در این آزمایش ۱۵ فرد بینهایر (شامل ۹ آقا و ۶ خانم با میانگین سنی ۲۵/۴ و انحراف معیار ۳/۳ سال) بودند. داده‌برداری در این آزمایش با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز انجام گرفت. حین انجام آزمایش، هر یک از شرکت کننده‌ها به ویدیو باید به این نکته توجه داشت که باید از وجود هر متغیری جز متغیرهای مورد بررسی در هدف این پژوهش اجتناب کرد. با توجه به این مستانه، ویژگی‌های کلی شده است.

۲.۳. تحلیل داده‌ها

۱.۲.۳. پالایش داده‌های خام

داده‌های خام به دست آمده، از آزمایش ردیابی چشم به صورت زوج اعداد (y, x) هستند که بیانگر مختصات جهت نگاه برخوبی صفحه نمایش است. با توجه به فرکانس بالای داده‌برداری در این آزمایش، احتمال این که تعدادی از نمونه‌ها از دست بروند، وجود دارد. برای جایگزین کردن نمونه‌های از دست رفته از دونوں یابی خطی استفاده شد.

همانطور که گفته شد، فرکانس داده‌برداری ۱۰۰۰ هرتز است؛ اما فرکانس پخش فریم‌های ویدیوی آزمایش برابر با ۲۴ هرتز (معادل فریم بر ثانیه) می‌باشد؛ یعنی بهارای هر فریم، حدوداً ۴۰ بار نمونه‌برداری اتفاق افتاده است. برای آن که بتوان خروجی به دست آمده از تحلیل‌ها را مجدداً برخوبی ویدیوی آزمایش نمایش داد، لازم است تا تعداد نمونه‌ها با تعداد فریم‌های ویدیو برابر باشد؛ بنابراین، در مرحله‌ی بعدی پالایش داده‌های خام، میانگین حسابی هر ۴۰ نمونه به یک فریم اختصاص داده شد.

پالایش داده‌ها در این مرحله ختم نمی‌شود. در مرحله‌ی بعدی از پالایش داده‌ها تعیین می‌شود که فرد شرکت کننده در هر فریم به کدام یک از المان‌های موجود در صحنه نگاه کرده است.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افراد از چپ به راست به ترتیب A، B، C و D نامگذاری می‌شوند و جعبه‌ی موجود در جلوی تصویر نیز E نام می‌گیرد. سایر نقاط تصویر نیز env نامیده می‌شوند.

در هر فریم از ویدیو، به دور هر المان موجود در تصویر یک مستطیل رسم می‌گردد؛ بنابراین اگر مختصات جهت نگاه دونوں هر یک از این مستطیل‌ها قرار بگیرد، بیانگر این است که فرد شرکت کننده در آن فریم در حال نگاه کردن به المان



شکل ۵. چیدمان دستگاه EyeLink ۱۰۰۰ plus در مرکز موفقیان.

مستطیل رنگی رو بروی دوربین محلی است که افراد در صورتی که در حال اشاره کردن باشند، به سمت این مستطیل اشاره می‌کنند.

با استفاده از روش تاگوچی، ۱۶ سناریو برای زمانی که ۲ نفر در صحنه حضور دارند، ۳۲ سناریو برای زمانی که ۳ نفر در صحنه هستند و ۱۶ سناریو برای زمانی که ۴ نفر در صحنه حاضر هستند، طراحی شد. یعنی در مجموع با ۶۴ سناریو، تمام پارامترهای مدنظر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

پس از تشکیل سناریوی کلی ویدیو، به ساختن ویدیو پرداخته شد. برای تولید ویدیو باید به این نکته توجه داشت که باید از وجود هر متغیری جز متغیرهای مورد بررسی در هدف این پژوهش اجتناب کرد. با توجه به این مستانه، ویژگی‌های کلی زیر برای ویدیو لحاظ گردید:

- شخصیت‌های موجود در ویدیو یکسان باشند؛

- غیر از محل اشاره‌ی افراد، هیچ‌گونه عامل جالب توجهی وجود نداشته باشد؛
- تمام محرك‌های اجتماعی موجود در سناریوها به روش یکسانی انجام شوند؛
- هر کدام از رذیف‌های سناریوی کلی در مدت زمان یکسانی اجرا شوند؛
- با در نظر گرفتن ویژگی‌های فوق تصمیم بر این شد که یک انیمیشن با ویژگی‌های جدول ۱ ساخته شود.

در ساخت این انیمیشن از نرم‌افزار Blender استفاده می‌شود که یک نرم‌افزار رایگان و متن باز^{۱۴} در زمینه‌ی گرافیک سه‌بعدی است. شخصیت‌هایی که در شکل ۴ مشاهده می‌شوند، همگی یکسان می‌باشند (این شخصیت Vincent نام دارد که یک شخصیت رایگان در کتابخانه Blender و با قابلیت‌های حرکتی بسیار زیاد است). همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اگر شخصیت‌ها در حال اشاره باشند، همگی به جعبه‌ی موجود در مرکز تصویر اشاره می‌کنند. خروجی نرم‌افزار Blender در این آزمایش ۱۵۳۴۴ فریم و مدت زمان تقریبی ۳۳/۳۶ ثانیه می‌باشد.

۲.۱.۳. اجرای آزمایش

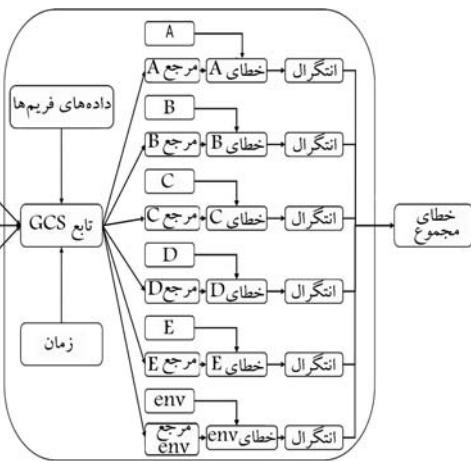
آزمایش ردیابی چشم توسط دستگاه EyeLink ۱۰۰۰ plus موجود در مرکز توانبخشی عصبی موفقیان صورت گرفت. این دستگاه قابلیت

جدول ۱. ویژگی‌های انیمیشن مورد استفاده در آزمایش.

اندازه‌ی فریم	۱۹۲۰ در ۱۰۸۰
نحو پخش فریم	۲۴ فریم بر ثانیه
مدت زمان کل	۶۴ ثانیه



شکل ۴. تصویر یک فریم از انیمیشن مورد استفاده در آزمایش.



شکل ۷. نحوه‌ی عملکرد تابع هزینه برای الگوریتم ژنتیک.

همانطور که در رابطه‌ی ۳ مشاهده می‌شود، تنها تفاوت مدل امتیازدهی در^[۱۰] با پژوهش^[۱۰] این است که تمام عوامل موثر در جلب توجه در یکدیگر ضرب می‌شوند. مدل پیشنهادی این پژوهش نیز بسیار مشابه دو روش قبل انتخاب شده است (رابطه‌ی ۴):

$$EA = \left(\prod w_i \right) P(r) \Theta(\theta) \quad (4)$$

همانطور که در رابطه‌ی ۴ مشاهده می‌شود، تنها تفاوت مدل پیشنهادی این پژوهش با^[۱۰] این است که وزن محرك‌های اجتماعی به جای جمع شدن با یکدیگر، در هم ضرب می‌شوند. همچنین علاوه بر فاکتور خوگیری، تصمیم گرفته شد که امتیاز نهایی هر فرد عددی تصادفی در یک توزیع نرمال حول خروجی رابطه‌ی ۴ باشد؛ با این روش می‌توان حرکت‌های سریع و تصادفی چشم را نیز مدل کرد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، برای این مدل ۱۴ پارامتر مجهول وجود دارد.

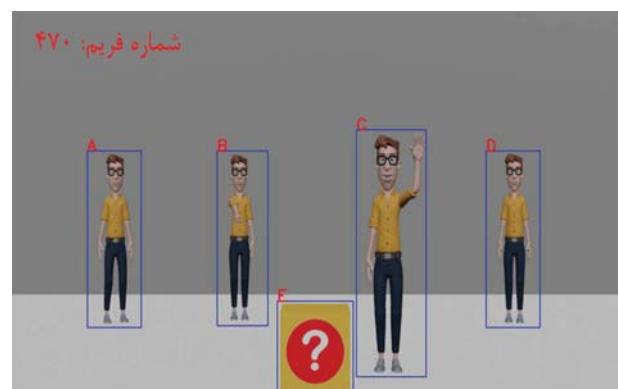
برای آنکه بتوان از داده‌های آزمایش ردیابی چشم برای یافتن مقدار بهینه‌ی پارامترهای مجهول استفاده کرد، نیاز است که از یک روش مناسب بهینه‌سازی استفاده نمود. با توجه به تعداد بالای پارامترهای مجهول و پیچیده و غیرخطی بودن تابع مدل، تصمیم گرفته شد که از روش‌های فراابتکاری استفاده شود؛ بدین‌منظور الگوریتم ژنتیک برای این کار انتخاب شد.

برای استفاده از الگوریتم ژنتیک نیاز است تا یک تابع هزینه‌ی مناسب تعریف گردد. با توجه به این که ضروری است که خروجی مدل، بیشترین شباهت را به داده‌های به دست آمده از آزمایش داشته باشد، لازم است که خطای مدل از داده‌ی واقعی اثر مستقیمی روی تابع هزینه داشته باشد.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، رودی تابع هزینه همان پارامترهای مجهول هستند. خروجی تابع GCS^[۱۵] شش سری زمانی است که اندازه‌ی آن برابر با اندازه‌ی سری‌های زمانی به دست آمده از پالایش داده‌های خام آزمایش است. ابتدا قدر مطلق تفاضل هر سری زمانی با سری زمانی خروجی از آزمایش محاسبه می‌گردد و سپس از سری‌های زمانی حاصل انتگرال گرفته می‌شود. مجموع این ۶ انتگرال برابر با خروجی تابع هزینه می‌باشد (شکل ۷).

با داشتن تابع هزینه، می‌توان الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی تابع هزینه اجرا کرد (جدول ۳).

همانطور که در گذشته نیز بیان شد، ویدیوی آزمایش فاز دوم دارای ۱۵۳۴۴ فریم است. برای آنکه بتوان از داده‌های به دست آمده از آزمایش هم برای آموزش مدل و



شکل ۶. رسم مستطیل در برگیرنده برای هر کدام از المان‌های موجود در صحنه.

منتظر با آن مستطیل بوده است. در صورتی که مختصات جهت نگاه درون هیچ‌کدام از مستطیل‌ها قرار نگیرد، این‌گونه تفسیر می‌شود که فرد در حال نگاه کردن به محیط بوده است.

مرحله‌ی بعد، تهیه‌ی ۶ سری زمانی A, B, C, D, E و env است؛ هر سری زمانی نشان‌دهنده‌ی این است که در هر فریم، چه درصدی از شرکت‌کنندگان آزمایش به المان منتظر با آن سری زمانی نگاه کرده‌اند.

در مرحله‌ی پایانی پالایش داده‌های خام، لازم است تا نویز موجود در سری‌های زمانی حذف شود. به این منظور از فیلتر Savitzky-Golay با طول پنجره‌ی ۳ و مرتبه‌ی چندجمله‌ای ۵۱ استفاده گردید.

۲.۲.۳. محاسبه میانگین و کوواریانس

پس از پالایش داده‌های خام، میانگین و کوواریانس تمام شرکت‌کنندگان آزمایش روی هر فریم محاسبه می‌شود و روی ویدیوی آزمایش ترسیم می‌گردد. هدف از انجام این کار داشتن معیاری برای مقایسه‌ی الگوی نهایی به دست آمده با رفتار کلی شرکت‌کنندگان در آزمایش است.

۳.۲.۳. مدل سازی و استخراج الگو

در پژوهش^[۱۰] یک مدل ریاضی برای امتیازدهی به افراد موجود در صحنه معرفی گردیده است (رابطه‌ی ۱):

$$EA = \left(\sum w_i \right) + P(r) + \Theta(\theta) \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، عبارت w_i بیانگر نمره محرك‌های اجتماعی است؛ یعنی هر محرك اجتماعی که فرد در حال انجام دادن آن است، دارای یک وزن است که با w_i نشان داده می‌شود. مجموع این وزن‌ها در میان جلب توجه فرد تأثیر مستقیم دارند. عبارت‌های $P(r)$ و $\Theta(\theta)$ نیز به ترتیب اثر فاصله و زاویه را در میان جلب توجه نشان می‌دهند. در^[۱۰] فاکتور خوگیری نیز که به صورت زیر تعریف می‌شود، در بالاترین امتیاز موجود ضرب می‌شود (رابطه‌ی ۲):

$$HF(\Delta t) = Peak \cdot \max \left(0, \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau} \right) \right) \quad (2)$$

در رابطه‌ی ۲، عبارت Δt بیانگر مدت زمانی است که یک فرد مشخص دارای بالاترین امتیاز بوده است.

در پژوهش Aliasghari و همکاران^[۱۱] مدل امتیازدهی به افراد مشابه زیادی (الیتی با کمی تفاوت) با پژوهش^[۱۰] دارد (رابطه‌ی ۳):

$$EA = \left(\sum w_i \right) P(r) \Theta(\theta) \quad (3)$$

جدول ۲. پارامترهای مدل پیشنهادی این پژوهش.

θ	P	w_i
		صحبت کردن (مجھول)
		دست تکان دادن (مجھول)
		اشاره کردن (مجھول)
مستقیم (مجھول)	نزدیک (مجھول)	ورود سریع (مجھول)
زاویه بسته		ورود آهستہ (مجھول)
دور (کہ برابر با یک است)		خروج سریع (مجھول)
(کہ برابر با یک است)		خروج آهستہ (مجھول)
		بی حرکت ماندن (مجھول)
		بیرون از صحنه بودن (کہ برابر با صفر است)
		اشاره شدن توسط فرد
		نزدیک و مستقیم (مجھول)
		اشاره شدن توسط فرد دور
		برای جمیع و مستقیم (مجھول)
-	-	اشاره شدن توسط فرد نزدیک و زاویه بستہ (مجھول) اشاره شدن توسط فرد دور و زاویه بستہ (مجھول)

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای پیاده‌سازی مدل.

۳۲	جمعیت اولیه
۱۶	جمعیت
۸	جمعیت خوب
۱۰	نرخ جهش
۱۰۰۰۰	حداکثر تعداد نسل
۵ / ۱	بازه‌ی مجاز w_i
۱	بازه‌ی مجاز P
۱ / ۵	بازه‌ی مجاز Θ

مسئله‌ی بعدی در انتخاب هدف نگاه کردن این است که پس از برگزیده شدن هدف، به کدام نقطه از هدف نگاه شود. راهکار پیشنهادی برای این مسئله این است که برای هر هدف، یک نقطه‌ی اصلی تعریف شود؛ سپس یک نقطه‌ی تصادفی توزیع نرمال حول نقطه‌ی اصلی و درون مستطیل محیطی هدف، به عنوان مختصات نهایی جهت نگاه برگزیده می‌شود.

۳. پیاده‌سازی الگو بر روی ریات

۳.۱. انتخاب ریات برای پیاده‌سازی

سه گزینه برای پیاده‌سازی این الگو مورد بررسی قرار گرفتند:

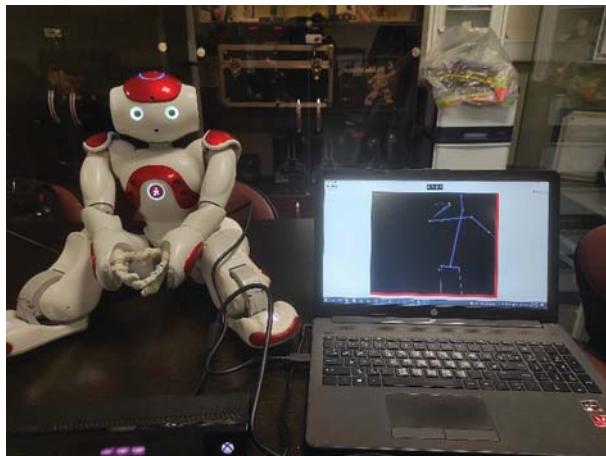
۱. ریات آبی: یک ریات اجتماعی که با هدف تقویت مهارت لب‌خوانی افراد دچار نقص شناوری در آزمایشگاه رباتیک اجتماعی دانشگاه صنعتی شریف ساخته شده است؛^[۱۲]

۲. ریات ریسا: یکی دیگر از ساخته‌های آزمایشگاه رباتیک اجتماعی دانشگاه صنعتی شریف که به صورت ویژه در پژوهش Basiri و همکاران^[۱۳] برای پیاده‌سازی زبان اشاره‌ی فارسی مورد استفاده قرار گرفته است؛

۳. ریات ناآ: ریات ناآ یک ریات انسان‌نما و محصول شرکت آلدباران فرانسه و هولالینگ سافت بنک رباتیکس می‌باشد. این ریات معروف در سال ۲۰۰۸ میلادی اولین بار در انتظار عمومی حضور یافت و پس از آن تاکنون در امور بسیاری از جمله دستیاری در شرکت‌ها و مراکز درمانی به منظور خوش‌آمدگویی، اطلاع‌رسانی و سرگرمی مراجعان مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۸).^[۱۴، ۱۵]

هم برای ارزیابی آن استفاده کرد، ۱۲۰۰۰ فریم آغازین در الگوریتم ژنتیک شرکت داده می‌شوند و سایر فریم‌ها نیز برای ارزیابی نتیجه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴.۲.۳. نحوه انتخاب هدف نگاه
 پیش از این‌که بتوان چنین الگویی را بر روی یک ریات اجتماعی پیاده‌سازی کرد، لازم است تا تعیین شود این الگو، انتخاب هدف نگاه خود را به چه نحوی انجام می‌دهد. دو روش پیشنهادی حریصانه و تصادفی وزن‌دار مطرح هستند. در روش اول، همواره المانی که دارای بیشترین امتیاز در تصویر باشد، به عنوان هدف برگزیده خواهد شد؛ اما در روش دوم، تمام المان‌های موجود در تصویر شناسی برگزیده شدن را دارند؛ به این صورت که المان با امتیاز بیشتر، از شناسی بیشتری برای برگزیده شدن برخوردار است.



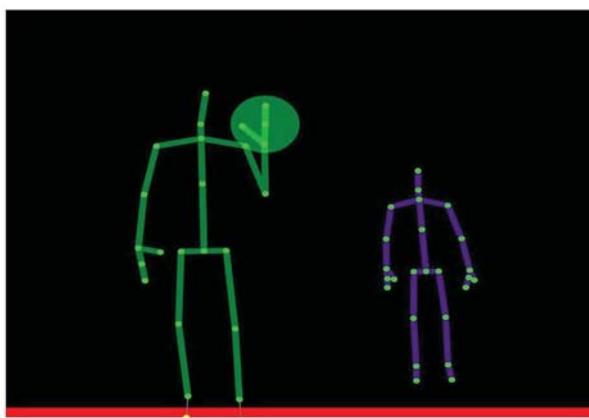
شکل ۹. پیکربندی ربات ناآو و دوربین کینکت برای پیاده‌سازی سیستم کنترل جهت نگاه.



شکل ۸. ربات ناآو در مسابقات روبوکاپ [۱۶]. ۲۰۱۶



شکل ۱۰. اجرای یک سناریو برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل جهت نگاه ربات ناآو.



شکل ۱۱. تصویر مشاهده شده توسط ربات در لحظه‌ی اجرای سناریو.

ربات ناآو درحال تعامل (پارامترهای دست تکان دادن و اشاره کردن هم در این تعامل گنجانده شده است) با ۲ نفر حاضر در صحنه است. در ویدیو اول ربات ناآو از روش انتخاب هدف حریصانه استفاده می‌کند؛ اما در دومین ویدیو از روش تصادفی وزن دار برای انتخاب هدف بهره می‌برد. سوالاتی که در پرسش‌نامه مطرح شدند و می‌بایست با پنج سطح «۱. کاملاً مخالفم»، «۲. مخالفم»، «۳. بی‌نظرم»، «۴. موافقم» و «۵. کاملاً موافقم» پاسخ داده

با توجه به امکاناتی که در زمان انجام این پژوهش در دانشگاه صنعتی شریف در دسترس قرار داشتند، ربات ناآو^{۱۶} برای پیاده‌سازی ابتدایی این الگو انتخاب گردید.

۲.۳.۳ پیاده‌سازی الگو بر روی ربات ناآو
ربات ناآو تمام تجهیزات سخت‌افزاری برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز در این پژوهش را به جز اندازه‌گیری فاصله‌ی اجسام از ربات را دارد؛ بنابراین، برای برطرف کردن این کمبود از دوربین کینکت استفاده شد. شرکت سازنده‌ی ربات ناآو، به منظور تسهیل ارسال فرامیمین به ربات مجموعه‌های نرم افزاری را ارائه نموده است. همچنین برای استفاده از قابلیت‌های دوربین کینکت، نیاز به برنامه‌نویسی به زبان C# می‌باشد. نحوه‌ی انتخاب هدف که پیش‌تر توضیح داده شد نیز نیازمند برنامه‌نویسی است که در این پژوهش با استفاده از زبان پایتون ۳ انجام گرفته است.

با استفاده از برنامه‌نویسی C#، قابلیت تشخیص موقعیت قرارگیری نسبت به دوربین (فاصله و زاویه) برای دوربین کینکت تعریف گردید. در قسمت مرتبط با ربات نیز ابتدا قابلیت تشخیص اسکلت هر فردی که مقابل دوربین قرار می‌گیرد به ربات افزوده شد. سپس با تحلیل هر اسکلت، قابلیت تشخیص حرکت‌های ورود به تصویر و خروج از آن، دست تکان دادن و اشاره کردن فراهم گردید. به منظور تشخیص صحبت کردن افراد نیز از آرایه میکروفونی سنسور کینکت استفاده شد. در نهایت با اعمال ضرایبی که از خروجی الگوریتم ژنتیک به دست آمده بود، امکان افزودن قابلیت کنترل جهت نگاه به ربات ناآو فراهم گردید (شکل ۹).

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ربات فرد نزدیک‌تر و در حال دست تکان دادن را برای نگاه کردن انتخاب کرده است. شکل ۱۱ تصویر مشاهده شده توسط ربات در لحظه‌ی اجرای سناریو را نمایش می‌دهد.

۴.۳ ارزیابی خروجی پیاده‌سازی
پس از پیاده‌سازی مدل به دست آمده بر روی ربات ناآو، با تنظیم یک پرسش‌نامه از ۱۰ نفر شرکت‌کننده (متفاوت از افراد شرکت کننده در بخش آزمایش ردیاب چشم) خواسته شد که با مشاهده‌ی دو ویدیو به تعدادی سوال پاسخ دهند. در هر دو ویدیو

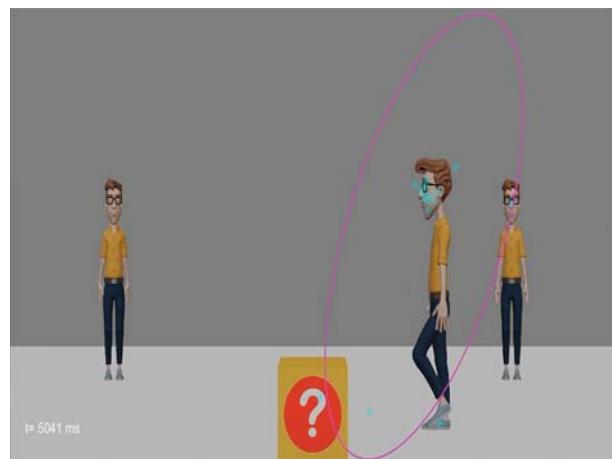
جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک (تعیین ضرایب مجھول).

۴/۳۵	صحیت کردن	
۴/۰۴	دست تکان دادن	
۴/۷۸	اشاره کردن	
۱/۴۸	ورود سریع	
۱/۹۸	ورود آهسته	
۰/۳۰	خروج سریع	
۰/۵۹	خروج آهسته	w_i
۱/۰۵	بی حرکت ماندن	
۰	بیرون از صحنه بودن	
۱/۶۰	اشاره شدن توسط فرد نزدیک و مستقیم	
۱/۷۶	اشاره شدن توسط فرد دور و مستقیم	
۰/۲۹	اشاره شدن توسط فرد نزدیک و زاویه بسته	
۰/۳۱	اشاره شدن توسط فرد دور و زاویه بسته	
۴/۰۸	نزدیک	P
۱	دور	
۴/۹۸	مستقیم	Θ
۱	زاویه بسته	

در این تحقیق، از تعداد غنی‌تری از ستاریوهای اجتماعی و با بهره‌گیری از روش‌های غیرخطی و پیچیده‌تری می‌توان خروجی‌های تابع

حال با محاسبه و در ادامه بهره‌گیری از این ضرایب می‌توان خروجی‌های تابع GCS موجود در تابع هزینه را به صورت جداگانه رسم کرد. در نمودار شکل ۱۳، منحنی نارنجی نشان‌دهنده داده‌های اصلی آزمایش (استخراج شده از میانگین نگاه شرکت‌کنندگان) پس از عبور از فیلتر-Savitzky-Golay است. منحنی سبز نیز بیانگر خروجی تابع مدل سازی شده پس از عبور از فیلتر Savitzky-Golay می‌باشد. پیکان‌های دوطرفه در بالای نمودار نیز بیانگر این هستند که در آن مدت زمان مشخص، شخصیت A در حال اجرای چه محرك اجتماعی بوده است.

همانطورکه در نمودار شکل ۱۳ قابل مشاهده است (و همچنین در سایر داده‌های تست نیز مشاهده شده است)، منحنی خروجی مدل با تقریب بسیار خوبی، منحنی داده‌های آزمایش را دنبال می‌کند. با توجه به این که مقیاس هردو نمودار یکسان است، با محاسبه ضریب همبستگی پیرسون^{۱۷} می‌توان مقدار تطبیق دو سری داده را به صورت کمی مشاهده کرد. مقدار این ضریب برای این دو سری حدود ۰/۸۳ به دست آمد که نشان‌دهنده همبستگی و به تبع آن تطبیق بالای این دو سری داده‌است. برای مقایسه با پژوهش Aliasghari و همکاران^[۱۸] ضرایب به دست آمده در جدول ۴ در رابطه‌ی ۱ قرار داده شد و مجدداً ضریب همبستگی پیرسون محاسبه گردید که این بار عدد ۶۷/۰ به دست آمد که نشان از بهبود نسبی مدل پیشنهادی پژوهش فعلی دارد.



شکل ۱۲. نمایش میانگین و کوواریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش فاز دوم بر روی ویدیوی آزمایش.

شوند، به شرح زیر هستند:

۱. از تعامل ربات با افراد حاضر در ویدیو احساس رضایت دارم؛
۲. از هماهنگی ربات با حرکات افراد ویدیو احساس رضایت دارم؛
۳. از نظر من ربات در ویدیو، افراد حاضر در ویدیو را درک می‌کنند؛
۴. حس کردم تعامل ربات در ویدیو با افراد حاضر در ویدیو مانند یک آدم واقعی بود؛

۵. به نظرم ربات در ویدیو همنشین اجتماعی خوبی است؛

۶. می‌توانم تصور کنم ربات در ویدیو موجودی زنده است؛

۷. به نظرم رسد ربات در ویدیو توجه خوبی به اطرافیان دارد؛

۸. ربات در ویدیو با هوش رفتار کرد؛

۹. به نظرم ربات در ویدیو به اقدامات افراد حاضر در ویدیو خوب واکنش نشان داد؛

۱۰. به نظرم ربات در ویدیو درک خوبی از اقدامات افراد حاضر در ویدیو داشت. داده‌های به دست آمده از طریق پرسش‌نامه با استفاده از روش paired t-test تحلیل گردیدند.

۴. نتایج

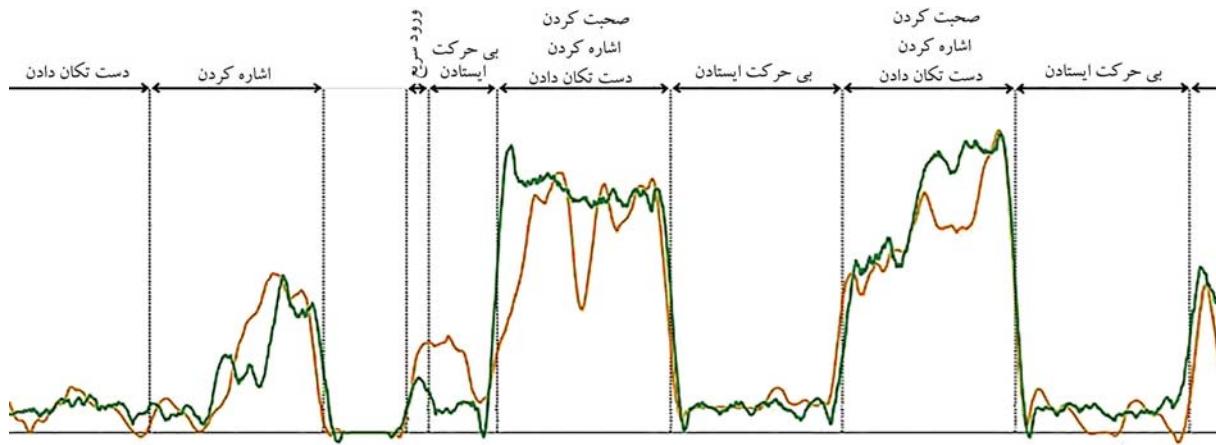
۱۴. نمایش میانگین و کوواریانس

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، داده‌های به دست آمده از محاسبه میانگین و کوواریانس داده‌های اولیه بر ویدیوی اصلی آزمایش ترسیم شده‌اند.

۲۴. نتایج مدل سازی و استخراج الگو

با اجرای ۱۰ هزار نسل از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای تابع هزینه مطابق جدول ۴ تنظیم شدند.

با داشتن این ضرایب می‌توان خروجی‌های تابع GCS موجود در تابع هزینه را به صورت جداگانه رسم نمود. در مقایسه با مطالعات^[۱۹] پارامترهای به دست آمده



شکل ۱۳. بخشی از سری زمانی متناظر با شخصیت A.

جدول ۵. نتایج آزمون paired t - test بر پرسش‌نامه‌ی خروجی پیاده‌سازی.

p - value	ویدیوی دوم			ویدیوی اول			شماره سوالات پرسش‌نامه
	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	
۰/۳۱	۱/۰۵	۴	۰/۸۴	۳/۶	۰/۸۴	۳/۶	۱
۰/۰۱	۰/۷۱	۴/۵	۰/۹۷	۳/۵	۰/۹۷	۳/۵	۲
۰/۰۷	۰/۹۲	۴/۲	۱/۰۸	۳/۵	۱/۰۸	۳/۵	۳
۰/۰۵	۰/۹۷	۳/۵	۱/۲۰	۲/۹	۱/۲۰	۲/۹	۴
۰/۸۷	۱/۲۹	۲/۹	۱/۰۵	۳	۱/۰۵	۳	۵
۰/۶۸	۱/۰۷	۲/۴	۱/۲۶	۲/۶	۱/۲۶	۲/۶	۶
۰/۳۶	۱/۴۵	۲/۹	۱/۱۶	۳/۳	۱/۱۶	۳/۳	۷
۰/۴۴	۰/۹۷	۳/۵	۱/۰۶	۳/۳	۱/۰۶	۳/۳	۸
۰/۴۶	۱/۳۴	۲/۷	۱/۰۶	۳/۳	۱/۰۶	۳/۳	۹
۰/۸۲	۱/۴۳	۲/۴	۱/۱۸	۳/۵	۱/۱۸	۳/۵	۱۰



شکل ۱۴. پیاده‌سازی روش انتخاب هدف تصادفی وزن‌دار بروی ویدیوی آزمایش.

۴. نتایج پرسش‌نامه

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در خصوص سوالات ۲، ۴ (و تا حدودی ۳) با توجه به این که میانگین امتیاز افراد به ویدیوی اول با میانگین امتیاز افراد به ویدیوی دوم نقاوت قابل توجهی دارد و مقدار p-value (۰/۰۵) باشد، می‌توان نتیجه گرفت که روش تصادفی وزن‌دار در این موارد موفق عمل کرده و توانسته نفاوت معنادار رقم بزند. به عبارت دیگر، از نظر

۳.۴. نتایج نجوهی انتخاب هدف نگاه

هردو روش انتخاب هدف مذکور بروی ویدیوی آزمایش اجرا گردید. همانطور که از مقایسه‌ی شکل‌های ۱۴ و ۱۵ قابل برداشت است، فردی که در روش حریصانه وارد تصویر شده است، نتوانسته توجهی را به خودش جلب کند؛ در صورتی که این اتفاق در روش تصادفی وزن‌دار افتاده است؛ به عبارتی این مشاهده حاصل شد که روش تصادفی وزن‌دار در عمل واقع‌گرایانه‌تر رفتار می‌کند.

این پژوهش عبارت‌اند از: صحبت کردن، اشاره کردن، دست تکان دادن، ورود به صحنه و خروج از آن (در دو سرعت مختلف). این محرک‌ها تعداد زیادی از رفتارهای اساسی انسانی در موقعیت‌های اجتماعی را شامل می‌شوند؛ اما باید دقت داشت که خروجی این پژوهش برای سایر محرک‌های اجتماعی (پیش‌بینی شده و نشده) قابل تعمیم نیست؛

- بازه‌ی سنی شرکت‌کنندگان در آزمایش؛ میانگین سنی شرکت‌کنندگان در آزمایش برابر با $25/4$ سال و انحراف معیار شرکت‌کنندگان برابر با $3/3$ سال است. مسن‌ترین شرکت‌کننده 34 سال و جوان‌ترین شرکت‌کننده 21 سال دارد. بنابراین، ممکن است توان نتایج این پژوهش را به افراد تمام سینه تعمیم داد.
- موارد زیر جهت ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌گردد:
- بهبود آزمایش ردیابی چشم با استفاده از ردیاب چشم قابل جابجایی، به جای ردیاب چشم ثابت؛
- ساخت یک ویدیوی واقع‌گرایانه‌تر (غیر کارتونی) برای آزمایش ردیابی چشم؛
- در نظر گرفتن محرک‌های اجتماعی غیر انسانی، به جای پرداختن مجدد به محرک‌های انسانی؛
- معرفی روش‌های جدید مدل‌سازی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق برای محاسبه‌ی امتیاز جلب توجه.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت گرفت اخذ شده از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف (به شماره $G980517$) و همچنین گرفت یادبود دکتر علی اکبر سیاسی انجام شده است. از مرکز تحقیقات عصبی موفقیان برای همکاری با پژوهشگران این مطالعه جهت استفاده از دستگاه ردیاب مردمک چشم قدردانی می‌گردد.

شرکت‌کنندگان پرسشنامه، روش تصادفی وزن دار باعث: **۱. هماهنگی بهتر روابط با افراد ویدیو، ۲. درک بهتر افراد حاضر در ویدیو و ۳. تعاملی که شباهت بیشتری به یک انسان واقعی دارد، شده است.**

۵. جمع‌بندی

در این پژوهش، هدف استخراج یک الگوی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در موقعیت‌های اجتماعی مختلف بود. با اجرای آزمایش این امکان فراهم شد تا با بهبود ویرگی‌های آزمایش و تغییر روش مدل‌سازی موجود در ادبیات موضوع، یک الگوی واقع‌گرایانه‌تر نسبت به پژوهش‌های گذشته ارائه شود. ویرگی اصلی این الگو مشخص بودن رابطه‌ی آن با محرک‌های اجتماعی حاضر در تصویر بود که باعث کاربردی شدن این الگو گردید. نتایج این پژوهش، قابلیت پیاده سازی برروی روابط‌های اجتماعی به عنوان سیستم کنترل جهت نگاه مشابه انسان‌ها را دارد. با پیاده سازی الگوی به دست آمده برروی ربات ناآور ارزیابی خروجی آن توسط پرسشنامه ارائه شده، اثرگذاری قابل ملاحظه‌ی الگوی پیاده شده در 3 مورد از 10 مورد پرسشنامه تایید گردید.

۶. محدودیت‌ها و کارهای آینده

وجود محدودیت در هر پژوهش امری اجتناب ناپذیر است و این پژوهش هم از این واقعیت مستثنی نیست. در این قسمت به طور خلاصه به محدودیت‌هایی که در این پژوهش وجود داشت، اشاره می‌گردد:

- تعداد محرک‌های اجتماعی بررسی شده؛ محرک‌های اجتماعی بررسی شده در

پانوشت‌ها

17. Pearson Correlation Coefficient

منابع (References)

1. Social Robot
2. Verbal
3. Nonverbal
4. Eye gaze
5. Gesture
6. Empirical Motion-Time Pattern
7. Stimulus
8. Autism
9. Machine Learning
10. Human-Robot Interaction
11. Humanoid Robot
12. Long Short-Term Memory
13. Habituation
14. Open-source
15. Gaze Control System
16. Nao Robot

1. Breazeal, C., Dautenhahn, K. and Kanda, T., 2016. *Social Robotics*, Springer Handbook of Robotics. Springer International Publishing, pp.1935-1972, doi:10.1007/978-3-319-32552-1_72.
2. Admoni, H. and Scassellati, B., 2017. Social eye gaze in Human-Robot interaction: A Review. *J. Human-Robot Interact.*, 6(1), p.25, doi:10.5898/jhri.6.1.admoni.
3. Liu, W., Li, M. and Yi, L., 2016. Identifying children with autism spectrum disorder based on their face processing abnormality: A machine learning framework. *Autism Res*, 9(8), pp. 888-898. doi:10.1002/aur.1615.

4. Jones, W. and Klin, A., 2013. "Attention to eyes is present but in decline in 2-6-month-old infants later diagnosed with autism. *Nature*, 504(7480), pp.427-431. doi: 10.1038/nature12715.
5. Admoni, H. and Scassellati, B., 2017. Social eye gaze in Human-Robot interaction: A Review. *J. Human-Robot Interact.*, 6(1), p.25. doi:10.5898/jhri.6.1.admoni.
6. Yoshikawa, Y., Shinozawa, K., Ishiguro, H., Hagita, N. and Miyamoto, T., 2006. Responsive robot gaze to interaction partner. In *Robotics: Science and Systems*, 2006, pp.37-43.
7. Cornia, M., Baraldi, L., Serra, G. and Cucchiara, R., 2018. Predicting human eye fixations via an LSTM-Based saliency attentive model. *IEEE Trans. Image Process.*, 27(10), pp.5142-5154, doi:10.1109/TIP.2018.2851672.
8. Lathuilière, S., Massé, B., Mesejo, P. and Horaud, R., 2019. Neural network based reinforcement learning for audio-visual gaze control in human-robot interaction. *Pattern Recognit. Lett.*, 118, pp.61-71. doi:10.1016/j.patrec.2018.05.023.
9. Yoo, B. and Kim, J., 2015. Fuzzy integral-based gaze control of a robotic head for Human Robot interaction. *IEEE Trans. Cybern.*, 45(9), pp.1769-1783. doi:10.1109/TCYB.2014.2360205.
10. Zaraki, A., Mazzei, D., Giuliani, M. and De Rossi, D., 2014. Designing and evaluating a social gaze-control system for a Humanoid Robot. *IEEE Trans. Human-Machine Syst.*, 44(2), pp.157-168.
11. Aliasghari, P., Taheri, A., Meghdari, A. and Maghsoodi, E., 2020. Implementing a gaze control system on a social robot in multi-person interactions. *SN Appl. Sci.*, 2(6), doi: 10.1007/s42452-020-2911-0.
12. Domingo, J.D., Gómez-Garcia-Bermejo, J. and Zalama, E., 2022. Optimization and improvement of a robotics gaze control system using LSTM networks. *Multimed. Tools Appl.*, 81(3), pp.3351-3368, doi:10.1007/s11042-021-11112-7.
13. Esfandbod, A., Nourbala, A., Rokhi, Z., Meghdari, A.F., Taheri, A. and Alemi, M., 2022. Design, manufacture, and acceptance evaluation of APO: A lip-syncing social Robot developed for lip-reading training programs. *Int. J. Soc. Robot.*, doi: 10.1007/s12369-022-00933-7.
14. Basiri, S., Taheri, A., Meghdari, A. and Alemi, M., 2021. Design and implementation of a robotic architecture for adaptive teaching: a case study on Iranian sign language. *J. Intell. Robot. Syst.*, 102(2), p.48, doi:10.1007/s10846-021-01413-2.
15. NAO the humanoid and programmable robot — Aldebaran. <https://www.aldebaran.com/en/nao> (accessed May 22, 2023).
16. Nao (robot)-Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Nao_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Nao_(robot)) (accessed May 22, 2023).

بررسی انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی هندسی طرح جدید استنت پلیمری با روش المان محدود

محمد خانمی (دانشجوی دکتری)

علی دنیوی (دانشیار)

امیرموسی ابازدی* (دانشیار)

گروه هندسی مکانیک، دانشکده هندسی، دانشگاه ارومیه

محمد فتوحی (استادیار)

گروه هاد، مکانیک، مدیریت و طراحی، دانشکده هندسی عمران و علوم زمین، دانشگاه صنعتی دلفت، دلفت، هلند

با وجود همه نوآوری‌ها در طراحی استنت‌های قلبی - عروقی، استنت‌های فلزی که مورد استفاده قرار می‌گیرند، مشکلات مختلفی مانند خوردگی، عفونت و تنگی مجدد را ایجاد می‌کنند که منجر به مشکلات جسمی یا حتی مرگ بیماران می‌شود. به‌منظور به حداقل رساندن مشکلات مرتبط با استنت‌های فلزی، مواد جدیدی مانند پلیمرها در حال توسعه هستند. در این مطالعه، سفتی و انعطاف‌پذیری استنت‌های پلیمری تجاری با استفاده از روابط تحلیلی و روش المان محدود بررسی می‌شود. طرح جدیدی برای استنت زیگ‌زاک به‌منظور کاهش حساسیت نسبت به تغییر ضخامت جهت افزایش استحکام شعاعی آن ارائه می‌شود. در پایان، از روش تاکوچی و آنالیز واریانس جهت طراحی آزمایش و تعیین میزان تأثیر پارامترهای هندسی استنت شامل عرض استرات، عرض پل و ضخامت استنت روی انعطاف‌پذیری این نوع استنت استفاده می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که عرض پل و استرات به ترتیب بیشترین تأثیر را روی انعطاف‌پذیری استنت دارند و تغییر ضخامت استنت که پارامتر تأثیرگذار در میزان استحکام شعاعی است، تأثیر معناداری روی انعطاف‌پذیری این نوع استنت ندارد.

m.khatami@urmia.ac.ir
a.donavi@urmia.ac.ir
am.abazari@urmia.ac.ir
m.fotouhi-1@tudelft.nl

واژگان کلیدی: استنت، بهینه‌سازی، آنالیز واریانس، المان محدود.

۱. مقدمه

انبساط شعاعی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، سازگاری زیستی و کنترل آسان باشند.^[۱] استنت‌ها می‌توانند از مواد مختلف ساخته شوند اما استنت‌های فلزی، به ویژه فولاد زنگ‌زن، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی خوب، متدالو ترین استنت‌های تجاری هستند. با این حال، استنت‌های فلزی دارای برخی از نقاچیان مانند تابش رادیویی کم، خوردگی، تنگی مجدد^۲ و عوارض خوربیزی هستند.^[۳] تقریباً در ۳۰٪ بیماران پس از عمل جراحی تنگی مجدد اتفاق می‌افتد و با نزد بالای مرگ و میر و همچنین هزینه‌ی بالای مراقبت‌های پهداشی، همراه است.^[۴] یکی از اصلی ترین مشکلات ناشی از تنگی مجدد، آسیب عروق توسط میله‌های فلزی استنت و در نتیجه پاسخ ایمنی و التهابی توسط بدن انسان است. به‌منظور به حداقل رساندن مشکلات مرتبط با استنت‌های فلزی، مواد جدیدی مانند پلیمرها در حال توسعه هستند.^[۵] از آنجا که استنت‌های مولتی لینک،^۶ جاذب^۷ و زیگ‌زاگ^۸ از نمونه‌های تجاری

سالانه ۴۰٪ از مرگ و میر در اتحادیه‌ی اروپا سهم بیماری‌های قلبی عروقی است که موجب هزینه‌ای در حدود ۱۹۶ میلیارد یورو می‌شود.^[۹] تصلب شرایین عروق کرونر^۱ یکی از شایع‌ترین بیماری‌های قلبی عروقی است.^[۱۰] این نوع بیماری را می‌توان با داروهایی مانند داروهای ضد انعقاد، مواد ضد پلاکت یا با روش‌های جراحی درمان کرد. استنت^۲‌های قلبی عروقی در عمل جراحی به نام آنتیپلاستی، استفاده می‌شوند^[۱۱] و دارای ساختارهای لوله‌ای و سوراخ‌دار هستند.^[۱۲] آنها برای باز نگهداشتن رگ‌ها و برقراری مجدد جریان طبیعی خون، در رگ‌های خونی قرار می‌گیرند. استنت‌ها برای استفاده به عنوان تجهیزات پزشکی قابل کاشت، باید دارای چند ویژگی مهم مانند مقاومت مکانیکی، تابش رادیویی،^۳ انعطاف‌پذیری طولی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۰ رجب ۱۴۰۱، اصلاحیه ۱۴۰۱، پذیرش ۱۹ مهر ۱۴۰۲.

استناد به این مقاله:

خانمی، محمد، دنیوی، علی، ابازدی، امیرموسی و فتوحی، محمد. ۱۴۰۳. بررسی انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی هندسی طرح جدید استنت پلیمری با روش المان محدود. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰۱، ص. ۱۵-۲۳. ۲۳. ۱۶۳۷. DOI:10.24200/J40.2023.60261.1637

پارامترهای طراحی می‌توان این نوع استنتمانات را با استنتمانات دائمی جایگزین کرد. بابل و همکاران^[۲۵] با استفاده از روش المان محدود، مقاومت شعاعی، انعطاف‌پذیری و مقاومت طولی استنتمانات پلیمری را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که این روش یک فرایند قابل اطمینان جهت آزمایشگاهی استنتمانات مکانیکی استنتمانات است. در مطالعات قبلی، از استنتمانات آزمایشگاهی جهت تأیید نتایج روش المان محدود استفاده شده که روشی مطمئن‌ولی پر هزینه می‌باشد. همچنین در مدل‌های ارائه شده پیشین، هنوز ضخامت‌های بهینه‌سازی شده مورد نیاز است.

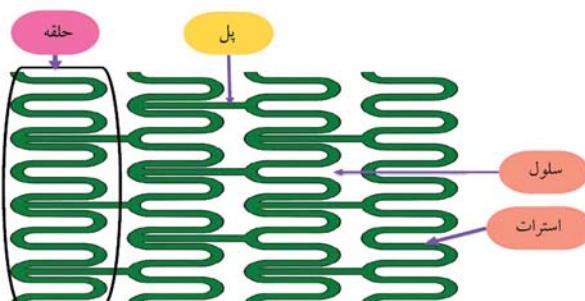
در این مقاله جهت رفع محدودیت‌های ذکر شده از روابط تحلیلی جهت صحبت‌سنجی نتایج المان محدود استفاده می‌شود. از آنجا که بیشتر تحقیقات قبلی روی استنتمانات فلزی بوده و تحقیقات کمی روی بهینه‌سازی استنتمانات پلیمری انجام شده است، لزوم ایجاد یک طرح بهینه جهت افزایش هم‌زمان انعطاف‌پذیری و استحکام شعاعی استنتمانات پلیمری بسیار احساس می‌شود. از این‌رو در این مطالعه، سفتی و انعطاف‌پذیری استنتمانات پلیمری تجاری با استفاده از روابط تحلیلی و روش المان محدود بررسی می‌شود. براساس بررسی انجام شده، طرح جدیدی از استنتمان زیگ‌زاگ ارایه می‌گردد تا از نظر انعطاف‌پذیری، حساسیت کمتری به تغییر ضخامت جهت افزایش استحکام شعاعی آن داشته باشد. در پایان، از روش تاگوچی و آنالیز واریانس جهت طراحی آزمایش و تعیین میزان تأثیر پارامترهای هندسی استنتمانات شامل عرض استنتمان، عرض پل و ضخامت استنتمان روی انعطاف‌پذیری این نوع استنتمان استفاده می‌شود.

۳. روش تحقیق

شبیه‌سازی کامپیوتوری یک ابزار پشتیبانی ارزشمند در طی مراحل طراحی و بررسی پارامترهای مؤثر استنتمان است که نسبت به روش آزمایشگاهی مشابه، باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه و زمان شده و جزئیات بیشتری ارائه می‌کند. با این وجود، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی روش‌های حل عددی از چالش‌های اساسی در این زمینه محسوب می‌شود. استفاده از مدل‌های تحلیلی ساده در مراحل اولیه طراحی و توسعه‌ی استنتمان با هدف شناسایی دامنه‌ی مناسب برای هر پارامتر، بسیار مؤثر است. پارامترهای هندسی استنتمان شامل سلول^۹، استرات^{۱۰}، پل^{۱۱} و حلقه^{۱۲} بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است. این پارامترها نقش اساسی در بهینه‌سازی خواص مکانیکی استنتمان دارند.

۴. طراحی استنتمان

در زمینه‌ی استنتمانات زیست تخریب‌پذیر، سه طرح مولتی لینک، جاذب و زیگ



شکل ۱. پارامترهای هندسی استنتمان.

و پرکاربرد استنتمانات پلیمری می‌باشند، در این مطالعه هندسه این استنتمانات مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی توسعه‌ی داربست‌های عروقی مبتنی بر پلیمر، به هندسه‌ی ساختاری جدیدی نیاز دارد، زیرا این مواد پلیمری به میزان قابل توجهی استحکام شعاعی کمتری از آلیاژهای فلزی دارند.^[۱۱] به همین دلیل استنتمانات پلیمری دارای ضخامت بیشتری هستند که باعث کاهش انعطاف‌پذیری آنها می‌شود. یک استنتمان ایده‌آل باقیستی دارای انعطاف‌پذیری کافی جهت تطابق با آناتومی رگ و حرکت آن بوده و همچنین بتواند مقاومت شعاعی مورد نیاز جهت بازیابی جریان خون را فراهم نماید. در این مطالعه، برای رفع این مشکل از بهینه‌سازی هندسه استنتمان با استفاده از روش تاگوچی استفاده می‌شود و طرح جدیدی برای استنتمان زیگ‌زاگ ارایه می‌گردد که نسبت به طرح قبلی حساسیت کمتری به تغییر ضخامت دارد و هم‌زمان با افزایش ضخامت، می‌تواند انعطاف‌پذیری استنتمان را حفظ نماید.

۲. مروری بر منابع

استنتمانات، ساختارهای زیست پژوهشی لوله‌ای شکل هستند که برای بازکردن رگ خونی مسدود شده، مجرای تفسیس یا قسمت‌های مختلف دستگاه گوارش، استفاده می‌شوند. انعطاف‌پذیری استنتمانات یکی از پارامترهای تأثیرگذار در کاشت استنتمان در عروق کرونری می‌باشد. استنتمان باعث کاهش ضخامت پلیمری بالا به راحتی از عروق پر پیچ و خم عبور کرده و به محل گرفتگی می‌رسد.^[۱۲] استنتمان پس از قرارگیری در رگ باید با فرم آن منطبق گردد.^[۱۳] استنتمانات های پلیمری زیست تخریب‌پذیر در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان غذا و داروی آمریکا تأیید شدند.^[۱۴] این نوع استنتمانات دارای استحکام شعاعی پایین نسبت به نمونه فلزی هستند که با بهینه‌سازی طراحی یا افزایش ضخامت این نفیصه بر طرف می‌شود، ولی چالش اساسی در خصوص این نوع استنتمانات، پایین بودن انعطاف‌پذیری به دلیل ضخامت زیاد می‌باشد.^[۱۵] طراحی ساختاری بهینه یکی از عوامل مهم برای استنتمانات زیست تخریب‌پذیر جهت دستیابی به عملکرد مورد انتظار است.^[۱۶] پرینت سه بعدی به عنوان یک روش ساخت انعطاف‌پذیر امکان ایجاد طرح‌های خلاقانه در زمینه استنتمان را فراهم کرده است.^[۱۷] وانگ و همکاران^[۱۸] پرینت سه بعدی استنتمانات پلیمری و تغییر شکل طولی آنها را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفته‌اند که با بهینه‌سازی طراحی، می‌توان از تغییر شکلی طولی استنتمان هنگام استقرار در رگ جلوگیری کرد. لی و همکاران^[۱۹] بهینه‌سازی طراحی و فرایندی استنتمان پلیمری زیست تخریب‌پذیر را مورد بررسی قرار داده و با بهینه‌سازی چند هدف، خواص مکانیکی استنتمان پلیمری را بهبود دادند.

روش المان محدود یک روش مفید در بررسی ساختار استنتمانات بوده و اطلاعات زیادی در مطالعه و بهینه‌سازی طراحی استنتمانات ارائه می‌کند.^[۲۰] آزویزی و همکاران^[۲۱] با استفاده از المان محدود اثر طراحی استنتمانات به ویژه پل‌ها را روی انعطاف‌پذیری استنتمان مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که المان‌های اتصال بیشترین تأثیر را روی رفتار ساختاری استنتمان دارند. موری و همکاران^[۲۲] یک روش بهینه را جهت تعیین سفتی خشنی استنتمان ابداع کردند. آنها از تست خمش چهار نقطه‌ای جهت بررسی انعطاف‌پذیری استنتمان و از روش المان محدود جهت ارزیابی تأثیر ساختار استنتمان روی انعطاف‌پذیری استنتمان با ساختار پیوندی مختلف، استفاده کردند. لی و همکاران^[۲۳] از روش بهینه‌سازی جهت بهبود خواص مکانیکی استنتمان اسستنتمانه نموده و نشان دادند که روش بهینه‌سازی در مطالعه‌ی خواص استنتمانات های قلبی عروقی بسیار مؤثر است. گروگان و همکاران^[۲۴] با استفاده از شبیه‌سازی تست موقعت^۸ خواص مکانیکی استنتمانات فلزی قابل تجزیه را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با تغییر

۵. مدل تحلیلی استنت

انعطاف پذیری استنت رابطه‌ی معکوس با سفتی آن دارد. دونوع سفتی برای استنت‌ها تعریف شده است: سفتی در مقابل تغییر شکل k_d و سفتی خمشی k_b . رابطه‌ی $1^{[26]}$ سفتی در مقابل تغییر شکل استنت را نشان می‌دهد:

$$k_d = \frac{F}{\Delta D} \quad (1)$$

در این رابطه، k_d بیانگر سفتی استنت در مقابل تغییر شکل، F معرف نیروی شعاعی اعمال شده به استنت در فشار فروپاشی ΔD و نمایانگر اختلاف قطر ایجاد شده در اثر اعمال نیرو است. فشاری که در آن 10% قطر استنت کاهش پیدا کند به عنوان فشار فروپاشی تعریف می‌شود که به عنوان معیاری جهت تحمل فشار دیواره رگ می‌باشد. این فشار در استنت جاذب، مولتی لینک و زیگ زاگ از جنس پلیمر پلی‌لکتیک اسید (PLA) $^{[14]}$ به ترتیب برابر 41×10^3 و 11×10^3 و 5×10^3 مدل سازی شده است. $^{[14]}$ این بدان معنا است که در مقابل فشار اعمالی، استنت جاذب مقاوم‌ترین و استنت زیگ زاگ ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. قطر خارجی استنت پس از گسترش، به عنوان قطر اولیه (D_0) و قطر خارجی استنت پس از اعمال فشار فروپاشی و کاهش 10% قطر، به عنوان قطر نهایی (D) در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳ نمای شماتیکی از استنت را در حالت پس از گسترش و در فشار فروپاشی، نشان می‌دهد. D از رابطه ۲ و ۳ به دست می‌آید:

$$\frac{D}{D_0} = 0.9 \quad (2)$$

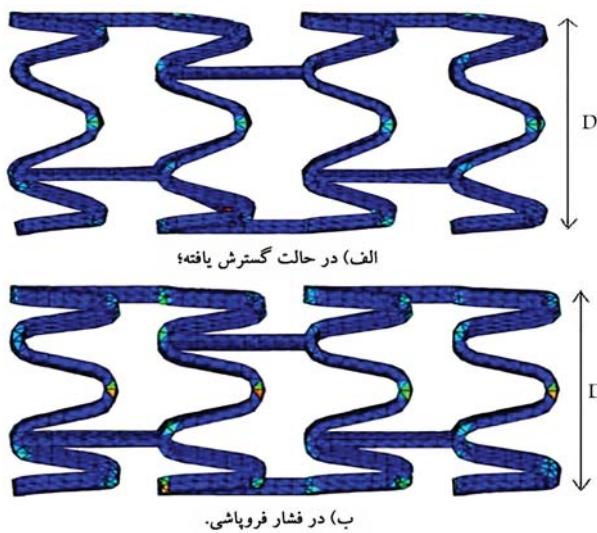
$$\Delta D = D_0 - D \quad (3)$$

جهت محاسبه‌ی نیروی شعاعی اعمال شده به استنت F در فشار فروپاشی، از رابطه $4^{[26]}$ استفاده می‌شود:

$$F = P \cdot A_{Contact} \quad (4)$$

در این رابطه، P فشار فروپاشی و $A_{Contact}$ مساحت سطح تماس استنت با رگ می‌باشد که از رابطه $5^{[26]}$ محاسبه می‌شود:

$$A_{Contact} = A_{Struts} + A_{bridges} \quad (5)$$



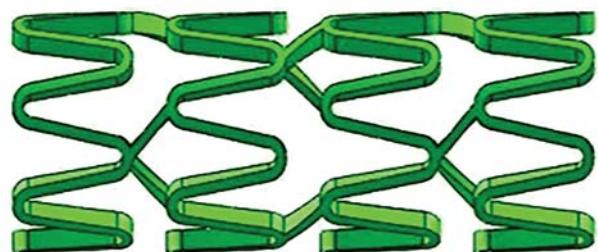
شکل ۳. نمای شماتیک از استنت.

زاگ، دارای کاربرد تجاری هستند. جدول ۱ مشخصات مربوط به این استنت‌ها را نشان می‌دهد.

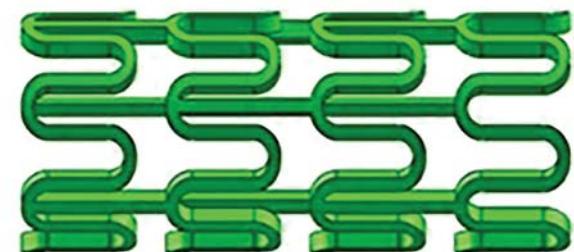
معرف قطر خارجی استنت در حالت اولیه (پیش از گسترش) بوده که برای استنت مولتی لینک $2/2$ میلی‌متر، جاذب 2 میلی‌متر و زیگ زاگ $1/65$ میلی‌متر است. D_0 بیانگر قطر خارجی استنت پس از گسترش (باز شدن) در داخل رگ توسط بالون می‌باشد که برای استنت مولتی لینک به $3/2$ میلی‌متر، جاذب 4 میلی‌متر و زیگ زاگ به $3/65$ میلی‌متر می‌رسد. در این تحقیق، سه استنت مولتی لینک، جاذب و زیگ زاگ با استفاده از جدول ۱ و به طول $5/30$ میلی‌متر با نرم افزار سالیدورکز 13 مدل سازی شده است. شکل ۲ نمای شماتیکی از این استنت‌ها را در حالت اولیه و پیش از گسترش، نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات استنت‌های مولتی لینک، جاذب و زیگ زاگ. $^{[25]}$

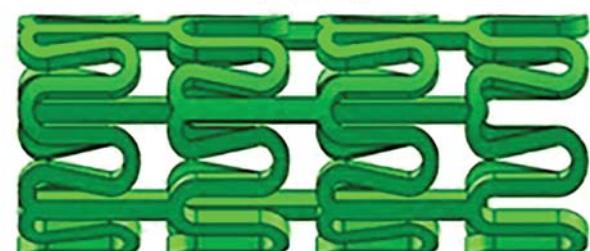
استنت	عرض استرات (μm)	عرض پل (μm)	ضخامت استنت (μm)
مولتی لینک	۱۱۰	۱۱۰	۱۵۶
جاذب	۲۰۰	۱۴۳	۱۵۶
زیگ زاگ	۸۲	۹۰	۱۷۰



الف) استنت مولتی لینک؛

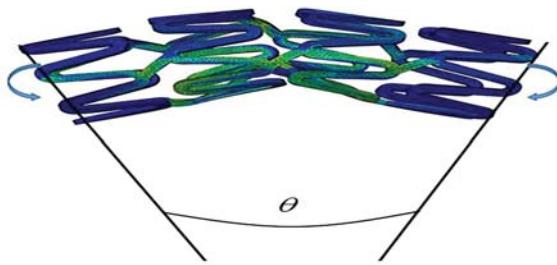


ب) استنت جاذب؛



ج) استنت زیگ زاگ.

شکل ۲. نمای شماتیک استنت‌های پلیمری در حالت اولیه.



شکل ۴. شبیه‌سازی المان محدود تست انعطاف‌پذیری استنت زیگ زاگ با طول ۵/۳۰ میلی‌متر، زاویه خم ۷۷/۰ و انحنای ۱۵/۰.

جدول ۲. پارامترهای هندسی استنت و سطوح آنها.

پارامترهای هندسی استنت	عرض استرات (mm)	عرض پل (mm)	ضخامت استنت (mm)
۳	۲	۱	سطح
°/۱۶	°/۱۳	°/۱	°/۱۴
°/۱۱	°/۸	°/۲۳	°/۴
°/۱۷		°/۲۳	°/۴

این روش با انجام کمترین آزمایش‌ها، اثر عامل‌های مختلف روی خروجی بررسی شده و بهترین پاسخ را به می‌شود. روش تاگوچی در طراحی آزمایش استفاده از آرایه‌های متعامد در کاکهش تعداد آزمایش‌ها است. با استفاده از روش تاگوچی می‌توان عواملی که بیشترین تأثیر را بر کیفیت محصول دارند، با حداقل آزمایش تعیین کرد. استفاده از روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی است. در تایید کارایی استنت بسیار مؤثر است. در این مطالعه، پس از انتخاب استنت زیگ زاگ به عنوان استنت با انعطاف‌پذیری بالا، جهت افزایش هم‌زمان انعطاف‌پذیری و استحکام شعاعی آن طرح جدیدی ارائه شده است. سپس جهت بررسی قابلیت استنت جدید، طراحی آزمایش با سه فاکتور عرض استرات، عرض پل و ضخامت استنت در سه سطح (جدول ۲) و با استفاده از روش تاگوچی و آرایه استاندارد L⁹ (تعداد ۹ آزمایش) انجام گردید. در ادامه، جهت تعیین تأثیر هر کدام از فاکتورها روی انعطاف‌پذیری استنت از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. در انتخاب سطح فاکتورها، در جدول ۲ موارد زیر لحاظ شده است:

۱. سطح ۱ کمترین مقدار پارامترها و بر اساس اندازه استاندارد استننت تجاری زیگ زاگ ^[۲۵] تعیین می شود:

۲. سطح ۲ میانگین سطح ۱ و سطح ۳ می باشد؛

۳. سطح ۳ بیشترین مقدار فاکتورها بوده و از لحاظ هندسی مقادیر بالاتر از این اعداد منجر به تماس حلقه های محیطی استنست با یا کنیدگر می شود.

٨. نتائج

۱.۸. صحت‌سنجی روش

در مرجع [۲۵] انعطاف‌پذیری استنت تجاری زیگ زاگ با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، جهت صحبت‌سنجی روش المان محدود، استنت زیگ زاگ با همان مشخصات (جدول ۱) بازطرابی شده

در این رابطه، *Struts* مساحت سطح استرات‌های استنت و *Abridges* مساحت سطح پل‌های استنت بوده که با سطح داخلی رگ در تماس می‌باشند (در شکل ۱ استرات و پل نمایش داده شده است). به دلیل ساختار مشک استنت، تماس بین استنت و دیواره‌ی رگ، تنها در محل استرات‌ها و پل‌های استنت خواهد بود و درصدی از دیواره‌ی داخلی رگ با محیط بیرونی استنت در تماس است. ارمیستون و همکاران^[۲۷] نشان دادند که استنت مولتی لینک از جنس پلی لاکتیک آسید ۲۵ درصد، استنت مینیزیمی جاذب ۱۰ درصد و استنت زیگ زاگ از جنس پلی لاکتیک آسید، ۲۴ درصد با دیواره‌ی رگ سطح تماس خواهند داشت. درنتیجه می‌توان با محاسبه مساحت سطح داخلی رگ و اعمال درصد‌های ذکر شده، مساحت سطح تماس هر استنت را محاسبه کرد. رابطه‌ی ۶ مساحت سطح داخلی رگ را نشان می‌دهد:^[۲۸]

$$A_{Vessel} = \pi D_{vessel} L \quad (5)$$

به طور یکه L بیانگر طول اولیه‌ی استنت و D_{vessel} معرف قطر رگ است. همچنین مساحت سطح تماس استنت با دیواره‌ی رگ که همان مساحت سطح خارجی استنت است را می‌توان با استفاده از نرم افزارهای طراحی مانند سالیلدو رکز به راحتی استخراج کرد. سفتمی خمی استنت شبیب قسمت خطی (الاستیک) نمودار گشتناور - اینها است که از نتایج شبیه‌سازی المان محدود استخراج می‌شود. [۲۴]

۶. شبیه‌سازی استنت

با استفاده از شیوه‌سازی المان محدود می‌توان رفتار مکانیکی استننت‌های پلیمری را ارزیابی کرد. در این مقاله، جهت شیوه‌سازی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. جنس استننت‌ها از پلی‌اکتیک اسید با مدول الاستیک ۱۵۵۴ مگاپاسکال، نسبت پوآسون 0.45° و تنش تسلیم 40° مگاپاسکال است.^[۲۵] از حلگر آباکوس /استاندارد جهت آنالیز انعطاف‌پذیری استننت استفاده شده است. جهت میش بندی استننت از المان چهاروجهی مرتبه دوم با 10° گره (C^3D10) استفاده شده و پس از بررسی استقلال از شیوه، اندازه میش برابر $1/5^{\circ}$ در نظر گرفته شده است. جهت بررسی سفتی از تست انعطاف‌پذیری در حالت قبیل گسترش^[۱۵] و گسترش یافته استننت استفاده می‌شود که مقدار سفتی در هر دو حالت یکسان است.^[۲۵] در این تست به دو طرف استننت گشتوار خمی اعمال می‌شود تا به اندازه زاویه 0° خم شود، پس از رابطه 7° انحنای استننت محاسبه می‌شود (شکل ۴) و در ادامه نمودار گشتاور- انحنای ترسیم می‌شود (شکل ۵) را بیینید که شب این نمودار نشان دهنده سفتی خمی و معکوس آن نشان دهنده انعطاف‌پذیری استننت است. هرچه شب این نمودار کمتر باشد، انعطاف‌پذیری استننت بیشتر و سفتی آن کمتر است. رابطه 7° ^[۲۵] جهت محاسبه اینحنای استننت به استفاده می‌شود:

$$\kappa = \frac{\theta}{L} \quad (\forall)$$

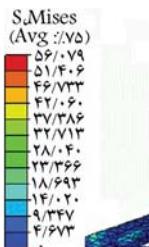
به طوری که L بیانگر طول اولیه‌ی استنت، قبل از خم می‌باشد.

۷. رهیمه‌سازی استنست

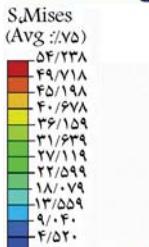
محققان برای شناخت و بررسی پدیده‌های مختلف، نیاز به انجام آزمایش‌های متعدد دارند که این امر باعث افزایش هزینه و صرف وقت زیاد می‌شود. روش طراحی آزمایش‌ها یکی از ابزارهای مهندسی کیفیت محسوب می‌شود. یکی از بهترین راهکارها جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها استفاده از روش طراحی آزمایش است. در

جدول ۳. مقادیر سفتی خمی (شیب نمودارها در شکل ۶) استنت‌های مولتی لینک، جاذب و زیگ‌زاگ.

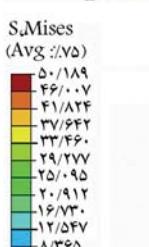
استنت	سفتی خمی ($N \cdot mm^2$)
جاذب	۲/۲۵
مولتی لینک	۰/۸۷
زیگ‌زاگ	۰/۱۳



الف) استنت جاذب؛



ب) مولتی لینک؛



ج) استنت زیگ‌زاگ.

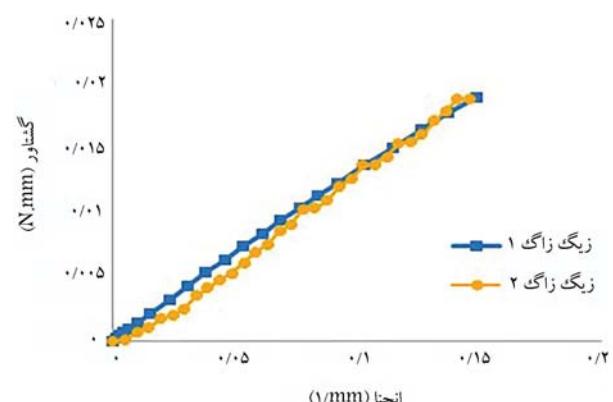
شکل ۷. توزیع تنش در اثر اعمال گشتاور خمی با زاویه انحنای 5° .

و انعطاف‌پذیری آن با استفاده از روش المان محدود تحلیل و با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۵] مقایسه گردید. همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد، حداکثر اختلاف بین نتایج روش به کار رفته در این مقاله با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۵] حدود ۵ درصد است. شکل ۶ نتایج بدست آمده از تست انعطاف‌پذیری استنت‌های مولتی لینک، جاذب و زیگ‌زاگ را نشان می‌دهد. محور افقی این نمودار، انحنای استنت بوده که از رابطه ۷ بدست می‌آید و محور عمودی گشتاور خمی اعمالی می‌باشد.

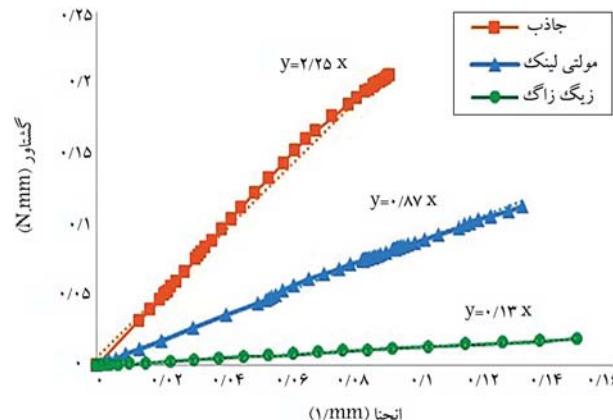
همانطور که پیشتر نیز توضیح داده شد، سفتی خمی از شیب ناحیه خطی (الاستیک) منحنی گشتاور-انحنای به دست می‌آید و هر چه شیب نمودار کمتر باشد، انعطاف‌پذیری استنت بیشتر و سفتی آن کمتر است. با توجه به نمودار شکل ۶، به صورت کیفی از شیب نمودارها مشخص است که انعطاف‌پذیری برای استنت زیگ‌زاگ بیشترین و برای استنت جاذب کمترین است که در مورد سفتی، این موضوع کاملاً بر عکس است. در جدول ۳، نتایج محاسبه سفتی خمی سه استنت جاذب، مولتی لینک و زیگ‌زاگ بر اساس شیب نمودارهای شکل ۶، گزارش شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که استنت جاذب کمترین استنت زیگ‌زاگ دارای بیشترین میزان انعطاف‌پذیری می‌باشد.

شکل ۷ توزیع تنش در استنت‌های جاذب، مولتی لینک و زیگ‌زاگ در اثر اعمال گشتاور خمی را نشان می‌دهد. در زاویه انحنای 5° بیشترین تنش ایجاد شده در استنت جاذب، مولتی لینک و زیگ‌زاگ به ترتیب برابر 0.07 ، 0.05 و 0.04 مگاپاسکال است.



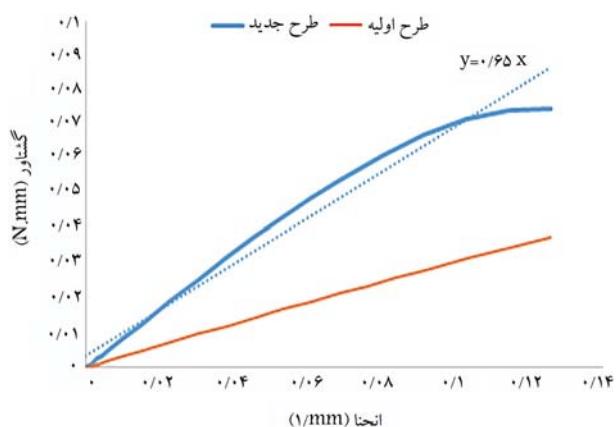
شکل ۵. مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری استنت زیگ‌زاگ طراحی شده در این مقاله (زیگ‌زاگ ۱) با نمونه‌ی مشابه آن (زیگ‌زاگ ۲) [۲۵].



شکل ۶. مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری استنت‌های مولتی لینک، جاذب و زیگ‌زاگ، با استفاده از تست انعطاف‌پذیری.



شکل ۹. مقایسه دو طرح استت زیگ زاگ.



شکل ۱۰. مقایسه انعطاف‌پذیری طرح جدید و اولیه استت زیگ زاگ با استفاده از روش المان محدود.

همچنان بیشتر از استنت‌های جاذب و مولتی لینک است و می‌تواند به عنوان استنت با انعطاف‌پذیری بالا انتخاب شود (شکل ۱۰).

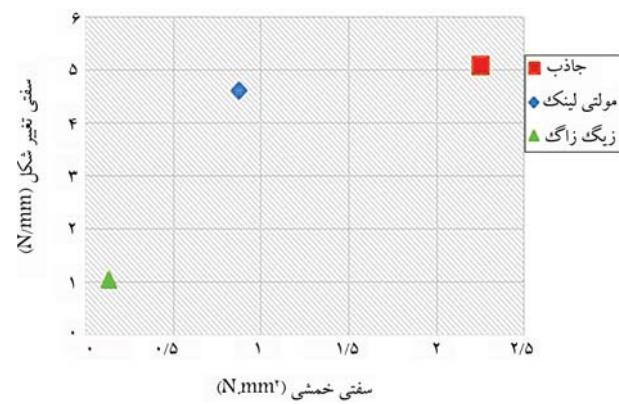
جهت بررسی طرح جدید با کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی از نرم افزار مینی تب استفاده شده است. استفاده از روش تاگوچی باعث کاهش تعداد آزمایش‌ها و رسیدن به بهترین نتیجه با صرف هزینه و زمان کم، می‌شود. ^۹ آزمایش طراحی شده با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. طرح آزمایشات و نتایج گشتاور خمی حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۵ ارائه شده است.

پس از طراحی آزمایش با استفاده از روش تحلیل واریانس می‌توان میزان تأثیر هر یک از پارامترها در انعطاف‌پذیری استنت‌ها را تعیین کرد. در جدول ۶، نتایج حاصل از تحلیل واریانس گزارش شده است. در این جدول، درجه آزادی فاکتورها یک واحد کمتر از تعداد سطوح آنها در طراحی آزمایش است.

جهت بررسی تأثیر پارامترهای هندسی در جدول تحلیل واریانس با توزیع نرمال، از پارامتر مقدار σ^2 استفاده می‌شود. با فرض سطح معنادار $\alpha = 0.05$ اگر

جدول ۴. سفتی تغییر شکل استنت‌های پلیمری با استفاده از روابط تحلیلی (روابط ۱ تا ۴).

استنت	K_d (N/mm)	ΔD (mm)	F (N)	$A_{contact}$ (mm ²)	P (MPa)
جاذب	۵/۱۰	۰/۴۰	۲/۰۴	۴۹/۸۳	۰/۰۴۱
مولتی لینک	۴/۶۲	۰/۳۲	۱/۴۸	۴۲/۴۴	۰/۰۳۵
زیگ زاگ	۱/۰۵	۰/۳۷	۰/۳۹	۲۵/۶۲	۰/۰۱۱



شکل ۸. مقایسه بین سفتی تغییر شکل و سفتی خمی استنت‌های مولتی لینک، جاذب و زیگ زاگ.

جدول ۴ سفتی تغییر شکل استنت در فشار فروپاشی را با استفاده از روابط تحلیلی ۱ تا ۴، نشان می‌دهد.

با مقایسه سفتی خمی حاصل از روش المان محدود (جدول ۳) با سفتی تغییر شکل استنت که از روابط تحلیلی محاسبه شده (جدول ۴) مشاهده می‌شود که با افزایش سفتی خمی، سفتی تغییر شکل استنت افزایش پیدا می‌کند که نشان دهنده رابطه مستقیم بین سفتی خمی و سفتی تغییر شکل استنت است (شکل ۸).

۲.۸. طرح نهایی

طراحی بهینه استنت، یکی از روش‌های مهم برای بهبود خواص مکانیکی استنت و قابلیت استفاده از آن به عنوان یک داربست جهت رفع گرفتگی عروق کرونری قلب است. در استنت‌های پلیمری به منظور تامین نیازهای طراحی، افزایش مقاومت شعاعی ضروری است. در روش‌های متداول طراحی استنت، اتصال استرات‌ها در حلقه‌های متوالی و در یک ردیف به صورت یک در میان انجام می‌شود. به دلیل نقش پل و استرات‌ها در خواص مکانیکی استنت، ^[۱۸] ایده اصلی این مقاله یعنی تغییر محل اتصال آنها در خواص مکانیکی استنت، همانطور که ملاحظه شد استنت زیگ زاگ دارای بیشترین میزان انعطاف‌پذیری و کمترین مقدار مقاومت شعاعی در بین استنت‌های پلیمری تجاری است و به همین دلیل، این استنت به منظور بهینه‌سازی انتخاب شد. در این مطالعه، جهت افزایش استحکام شعاعی استنت زیگ زاگ، طرح جدیدی ارائه شد که در آن استرات‌ها در تمامی حلقه‌ها و در یک ردیف به هم متصل شده ولی در ردیف بعدی متصل نیستند (شکل ۹). در ادامه، تحلیل طرح جدید ارائه شده با استفاده از روش المان محدود بحث می‌شود.

مقایسه انعطاف‌پذیری طرح جدید و طرح اولیه استنت زیگ زاگ با استفاده از روش المان محدود، نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری طرح جدید کاهش پیدا کرده ولی

جدول ۵. طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی و نتایج گشتاور خمی بdst آمده از شبیه‌سازی.

آزمایش‌ها	استرات	عرض	استنت	ضخامت	گشتاور
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N.mm)
۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۱۷۹	۰/۱۷۹
۲	۰/۱	۰/۱۱	۰/۲	۰/۲۶۴	۰/۲۶۴
۳	۰/۱	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۳۰۶	۰/۳۰۶
۴	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۲	۰/۲۳۹	۰/۲۳۹
۵	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۷۹	۰/۳۷۹
۶	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۴۹۲	۰/۴۹۲
۷	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۲۹۷	۰/۲۹۷
۸	۰/۱۶	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۴۷۱	۰/۴۷۱
۹	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۲	۰/۵۴۸	۰/۵۴۸

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس برای انعطاف‌پذیری استنت‌ها.

فاکتور	مقدار	مقدار	مجموع	میانگین	مقدار	مقدار	عرض
	احتمال	F	مربعات	مربعات	آزادی	درجه	عرض
عرض استرات	۲	۰/۰۴۴	۲۱/۹۴	۰/۰۳۰۷	۰/۰۶۱۴	۲	۰/۰
عرض پل	۲	۰/۰۳۶	۲۶/۷۵	۰/۰۳۷۴	۰/۰۷۴۹	۲	۰/۰
ضخامت استنت	۲	۰/۳۹	۱/۵۷	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۴۳	۲	۰/۰
خطا	۲	-	-	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۲۸	۲	۰/۰
مجموع	۸	-	-	-	۰/۱۴۳	۸	۰/۰

مقدار- p از ۰/۰۵ کوچکتر باشد نشان دهنده تأثیر معنادار آن فاکتور روی خروجی بوده و اگر این مقدار بیشتر از ۰/۰۵ باشد یعنی آن فاکتور تأثیر معناداری روی خروجی ندارد. با توجه به جدول ۶، پارامترهای هندسی عرض استرات و عرض پل روی انعطاف‌پذیری استنت مؤثر بوده ولی ضخامت استنت تأثیر معناداری روی انعطاف‌پذیری استنت ندارد.

۹. بحث و بررسی

استنت‌های قلبي عروقی با توجه به اهداف تعیین شده باید دارای پارامترهای استحکام شعاعی و انعطاف‌پذیری مناسبی باشند که این خواص در تضاد با یکدیگر هستند. لذا برای رسیدن به صلبیت شعاعی و انعطاف‌پذیری مطلوب، انتخاب مقدار بهینه خواص مکانیکی و هندسی استنت ضروری است. استنت باید دارای انعطاف‌پذیری کافی جهت انتپاق با آناتومی رگ و تغییر شکل آن بوده و همچنین بتواند مقاومت شعاعی

پانوشت‌ها

3. Radiopacity
4. Restenosis
5. Multilink
6. Absorb
7. Zig-Zag (Igaki-Tamai)

منابع (References)

8. Bench Testing
9. Cell
10. Strut
11. Bridge
12. Ring
13. Solidworks
14. Poly Lactic Acid
15. Pre-expanded
16. P-Value
1. Rebelo, R., Vila, N., Fangueiro, R., Carvalho, S. and Rana, S., 2015. Influence of design parameters on the mechanical behavior and porosity of braided fibrous stents. *Materials & Design*, 86, pp.237-247. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.051>.
2. Hansson, G.K., 2005. Inflammation, atherosclerosis, and coronary artery disease. *New England Journal of Medicine*, 352(16), pp. 1685-1695. <https://doi.org/10.1056/NEJMra043430>.
3. Wang, T. and Butany, J., 2017. Pathogenesis of atherosclerosis. *Diagnostic Histopathology*, 23(11), pp.473-478. <https://doi.org/10.1016/j.mpdhp.2017.11.009>.
4. Okereke, M.I., Khalaj, R., Tabriz, A.G. and Douroumis, D., 2021. Development of 3D printable biodegradable coronary artery stents: A virtual testing approach. *Mechanics of Materials*, 163, p.104092. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104092>.
5. Chen, W., Habraken, T.C., Hennink, W.E. and Kok, R.J., 2015. Polymer-free drug-eluting stents: An overview of coating strategies and comparison with polymer-coated drug-eluting stents. *Bioconjugate chemistry*, 26(7), pp.1277-1288. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.5b00192>.
6. Saraf, A.R. and Yadav, S.P., 2018. *Fundamentals of Bare-Metal Stents*. In *Functionalised Cardiovascular Stents*, pp.27-44. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100496-8.00002-0>.
7. Park, J., Kim, J.K., Park, S.A. and Lee, D.W., 2019. Biodegradable polymer material based smart stent: Wireless pressure sensor and 3D printed stent. *Microelectronic Engineering*, 206, pp.1-5. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.12.007>.
8. Hu, T., Yang, J., Cui, K., Rao, Q., Yin, T., Tan, L., Zhang, Y., Li, Z. and Wang, G., 2015. Controlled slow-release drug-eluting stents for the prevention of coronary restenosis: Recent progress and future prospects. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(22), pp.11695-11712. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b01993>.
9. Yang, C.S., Wu, H.C., Sun, J.S., Hsiao, H.M. and Wang, T.W., 2013. Thermo-induced shape-memory PEG-PCL copolymer as a dual-drug-eluting biodegradable stent. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(21), pp.10985-10994. <https://doi.org/10.1021/am4032295>.
10. Roopmani, P., Satheesh, S., Raj, D.C. and Krishnan, U.M., 2019. Development of dual drug eluting cardiovascular stent with ultrathin flexible poly (l-lactide-co-caprolactone) coating. *AcS Biomaterials Science & Engineering*, 5(6), pp.2899-2915. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b00303>.
11. Guerra, A.J., Cano, P., Rabionet, M., Puig, T. and Ciurana, J., 2018. 3D-printed PCL/PLA composite stents: Towards a new solution to cardiovascular problems. *Materials*, 11(9), p.1679. <https://doi.org/10.3390/ma11091679>.
12. Wu, W., Yang, D.Z., Qi, M. and Wang, W.Q., 2007. An FEA method to study flexibility of expanded coronary stents. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), pp.447-450. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2006.12.010>.
13. Foin, N., Di Mario, C., Francis, D.P. and Davies, J.E., 2013. Stent flexibility versus concertina effect: Mechanism of an unpleasant trade-off in stent design and its implications for stent selection in the cath-lab. *International Journal of Cardiology*, 164(3), pp.259-261. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2012.09.143>.
14. Ellis, S.G., Kereiakes, D.J., Metzger, D.C., Caputo, R.P., Rizik, D.G., Teirstein, P.S., Litt, M.R., Kini, A., Kabour, A., Marx, S.O. and Popma, J.J., 2015. Everolimus-eluting bioresorbable scaffolds for coronary artery disease. *New England Journal of Medicine*, 373(20), pp.1905-1915. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1509038>.
15. Li, Y., Wang, Y., Shen, Z., Miao, F., Wang, J., Sun, Y., Zhu, S., Zheng, Y. and Guan, S., 2020. A biodegradable magnesium alloy vascular stent structure: Design, optimisation and evaluation. *Acta Biomaterialia*, 142, pp.402-412. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.01.045>.
16. Li, Y., Wang, J., Sheng, K., Miao, F., Wang, Y., Zhang, Y., Hou, R., Mei, D., Sun, Y., Zheng, Y. and Guan, S., 2022. Optimizing structural design on biodegradable magnesium alloy vascular stent for reducing strut thickness and raising radial strength. *Materials & Design*, 220, p.110843. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110843>.
17. Tofail, S.A., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L. and Charitidis, C., 2018. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), pp.22-37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
18. Wang, C., Zhang, L., Fang, Y. and Sun, W., 2020. Design, characterization, and 3D printing of cardiovascular stents with zero Poisson's ratio in longitudinal deformation. *Engineering*, 7(7), pp.979-990. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.02.013>.
19. Li, H., Wang, X., Wei, Y., Liu, T., Gu, J., Li, Z., Wang, M., Zhao, D., Qiao, A. and Liu, Y., 2017. Multi-objective optimizations of biodegradable polymer stent structure and stent microinjection molding process. *Polymers*, 9(1), p.20. <https://doi.org/10.3390/polym9010020>.
20. Shen, X., Deng, Y.Q., Ji, S., Zhu, H.F., Jiang, J.B. and Gu, L.X., 2019. Bending analysis of stented coronary artery: The interaction between stent and vessel. *Journal of Mechanics*, 35(4), pp.455-463. <https://doi.org/10.1017/jmech.2018.23>.

21. Azaouzi, M., Makradi, A. and Belouettar, S., 2013. Numerical investigations of the structural behavior of a balloon expandable stent design using finite element method. *Computational Materials Science*, 72, pp.54-61. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.01.031>.
 22. Mori, K. and Saito, T., 2005. Effects of stent structure on stent flexibility measurements. *Annals of Biomedical Engineering*, 33(6), pp.733-742. <https://doi.org/10.1007/s10439-005-2807-6>.
 23. Li, N., Zhang, H. and Ouyang, H., 2009. Shape optimization of coronary artery stent based on a parametric model. *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(6-7), pp.468-475. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.01.001>.
 24. Grogan, J.A., Leen, S.B. and McHugh, P.E., 2012. Comparing coronary stent material performance on a common geometric platform through simulated bench testing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 12, pp.129-138. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.02.013>.
 25. Bobel, A.C., Petisco, S., Sarasua, J.R., Wang, W. and McHugh, P.E., 2015. Computational bench testing to evaluate the short-term mechanical performance of a polymeric stent. *Cardiovascular Engineering and Technology*, 6(4), pp.519-532. <https://doi.org/10.1007/s13239-015-0235-9>.
 26. Bonsignore, C., 2011. Open stent design. NDC,47533, pp.20-47. <https://doi.org/10.1080/136457002760273340>.
 27. Ormiston, J.A. and Serruys, P.W., 2009. Bioabsorbable coronary stents. *Circulation: Cardiovascular Interventions*, 2(3), pp. 255-260. <https://doi.org/10.1161/CIRCINTERVENTIONS.109.859173>.
 28. Qiu, T.Y., Song, M. and Zhao, L.G., 2018. A computational study of crimping and expansion of bioresorbable polymeric stents. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 22(2), pp.273-290. <https://doi.org/10.1007/s11043-017-9371-y>.

الگوریتم طراحی و بررسی عددی سیستم خنک کاری جداره آبی یک دیفیوزر شبیه ساز ارتفاع بالا

نعمت الله فولادی (استادیار)

پژوهشکده سامانه های حمل و قتل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

محمد فراهانی* (استادیار)

میلاد مهدیان دولت آبادی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی هواشناسی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

در پژوهش حاضر، الگوریتم طراحی سیستم خنک کاری برای دفع شارهای حرارتی بالا از دیوارهای دیفیوزر شبیه ساز خلاء توسعه یافته است. در این الگوریتم، دبی سیال خنک کننده، ارتفاع کanal و طول کanal خنک کاری طوری تعیین می شود که با فراهم سازی شرایط دمایی بدنه و حفظ سهولت پیاده سازی طرح، افت فشار کل نیز در بازه مطلوب قرار گیرد. از روی شبیه سازی عددی برای یافتن تقریب های مناسب انتقال حرارت و ارزیابی طراحی استفاده شده است. بررسی ها نشان می دهد که تقریب های تجزیی میر و کندا به ترتیب برای تخمین عدد ناسلت (حداکثر ۴ درصد خطای) و ضریب اصطکاک (حداکثر ۱/۱ درصد خطای) در شرایط مسئله حاضر مناسب هستند. در ادامه، قابلیت بالا از الگوریتم با ارائه نتایج طراحی با توزیع شارهای حرارتی نشان داده شده است. به طوری که برای یک شار حرارتی بحرانی (۲/۵ مگاوات بر متر مربع)، یک سیستم خنک کاری دو کanalه با دبی و ارتفاع کanal متفاوت طراحی شده است.

n.fouladi@isrc.ac.ir
mfarahani@sharif.edu
milad.mahdian@sharif.edu

واژگان کلیدی: خنک کاری چند کanalه، دیفیوزر فلزی، روش جداره آبی، شار حرارتی بالا.

۱. مقدمه

محفظه تست تخلیه می شوند و محیط فشار پایین مورد نیاز در آن ایجاد می گردد. این امر باعث ایجاد و حفظ خلاء مطلوب در محفظه تست می شود. بنابراین، عملکرد موتور با نازل طول بلند بدون تشکیل موج ضربه ای و جدایش جریان در نازل آن مورد ارزیابی قرار می گیرد. از سال ۱۹۵۰ به بعد، تحقیقات گسترش ده ای در زمینه شبیه ساز ارتفاع انجام شده است. موضوع بیشتر این تحقیقات، طراحی و بررسی عملکرد دیفیوزر شبیه ساز ارتفاع بوده است.^[۱-۲]

در عمل، گازهای احتراقی خروجی از نازل موتور با سرعت بالا (نزدیک به ۳۰۰۰ متر بر ثانیه) در داخل دیفیوزر با دمایی بالاتر از ۲۰۰۰ کلوین (گاهی با ذرات مذاب بالای ۳۰۰۰ کلوین) که بالاتر از حد تحمل سازه دیفیوزر است، جریان می یابند. بنابراین، استفاده از سیستم خنک کننده کارآمد برای محافظت از دیوارهای دیفیوزر امری ضروری است. مطالعه مراجع نشان می دهد که در رابطه با حفاظت حرارتی بدنه موتور سوخت مایع و نازل آن، تحقیقات گسترش ده ای با روش های مختلف خنک کاری

برای تست زمینی نازل های طول بلند (با نسبت انبساط بالا) که برای ایجاد نیروی پیش ران در شرایط جوی رقیق طراحی شده اند، اکثر موقع از تجهیزات تست ارتفاع بالا استفاده می شود. در یک شبیه ساز ارتفاع بالا محیط اطراف موتور و نازل تو سط یک محفظه تست (محفظه خلاء) و یک لوله گاز - دینامیکی (دیفیوزر) طویلی که قطر آن در محل نازل اندکی بزرگ تر از قطر خروجی نازل است، از محیط اتمسفر جدا می شود (شکل ۱). در این سیستم، یک گپ حلقوی برای محفظه تست در صفحه خروجی نازل شکل می گیرد که می تواند محل عبور جریان از محفظه به دیفیوزر و بر عکس باشد. در این سیستم، دیفیوزر طوری طراحی می شود که جریان گازهای احتراقی در قسمت عده آن موفق صوت باشد. با موفقی صوت شدن جریان گازهای در دیفیوزر و انبساط گازهای خروجی از نازل در رودی آن، گازهای موجود در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۵/۱۰/۱۱، اصلاحیه ۳۱/۱/۱۴۰۲، پذیرش ۱۹/۲/۱۴۰۲.

استادیار این مقاله:

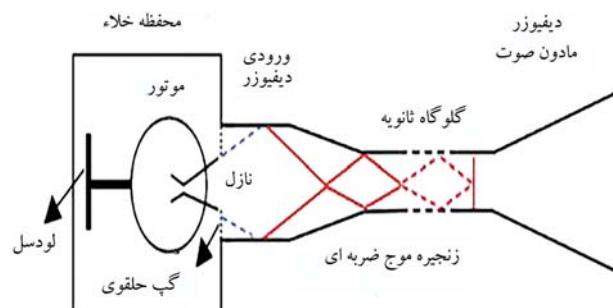
فولادی، نعمت الله، فراهانی، محمد، و مهدیان دولت آبادی، میلاد. ۱۴۰۳. الگوریتم طراحی و بررسی عددی سیستم خنک کاری جداره آبی یک دیفیوزر شبیه ساز ارتفاع بالا. دانشکده

مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰۰، ص ۳۷-۲۵. DOI:10.24200/J40.2023.61692.1668

مسیر و روشکه در سال ۱۳۲۰، هر دو روش خنک کاری با جداره آبی و اسپری آب را برای حفاظت از بدنه فازی دیفیوزر توصیه کرده‌اند.^[۸] در تحقیق آنها، یک سیستم خنک کاری پیچیده با روش جداره آبی که دارای ۵ کانال خنک کاری است، توصیه شده است. به عبارت دیگر، برای هر ناحیه، یک سیستم خنک کاری مجزا در نظر گرفته شده است. این امر موجب پیچیدگی زیاد مراحل ساخت، نصب و اجرا شده است. به همکاران در سال ۱۴۲۰، در یک مطالعه عددی به بررسی مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت درون یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه برای شبیه‌سازی تست ارتفاع بالا پرداخته‌اند.^[۹] آنها توزیع شار حرارتی بر روی بدنه دیفیوزر را در فشارهای احتراق مختلف موقر با روش عددی محاسبه کرده‌اند. در تحقیق آنها ادعا شده است که با سیستم خنک کاری جداره آبی می‌توان از بدنه فازی دیفیوزر محافظت کرد.

پژوهشگران پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی در سال ۲۰۱۶، نتایج تست موتور سوخت جامد بلوک انتقال مداری را در محیط شبیه‌ساز ارتفاع بالا با دیفیوزر کامپیوزری ارائه داده‌اند.^[۱۰] در تحقیق آنها مشخص شد که بدنه کامپیوزری دیفیوزر سبب ایجاد اغتشاشات ناخواسته در اجرای تست می‌شود و افت فشار کل بالایی را سبب می‌شود. فراهانی و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک الگوریتم طراحی برای خنک‌کاری بدنه دیفیوزر فلزی به روش اسپری آب توسعه دادند.^[۱۱] در تحقیق آنها صحت الگوریتم طراحی با شبیه‌سازی عددی جریان ارزیابی شده است. فولادی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تجربی سیستم خنک‌کاری با اسپری آب با انجام تست‌های مقایس کوچک موتورهای سوخت جامد در محیط شبیه‌ساز ارتفاع بالا پرداخته‌اند.^[۱۲] آنها کفایت الگوریتم طراحی با روش اسپری آب را اثبات کردند و نشان دادند که در عمل خطای این روش کمتر از ۱۰ درصد است. در ادامه، پژوهشگران پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی در سال ۲۰۲۰، نتایج تست خلاء موتور سوخت جامد بلوک انتقال مداری سامان را با سیستم خنک‌کاری اسپری آب ارائه دادند.^[۱۳] نتایج آنها حاکی از موفقیت کامل این روش در تست موتور در مقایس اصلی بوده است. با این حال، به این نتیجه رسیده‌اند که علی‌رغم انعطاف‌پذیری این روش در ایجاد تغییرات لازم در سیستم خنک‌کاری با تغییرات سطح دیفیوزر، این روش در مرحله اجرا از دشواری‌های بالایی در نصب، راماندازی و کنترل کیفی برخوردار است. همچنین، با توجه به استفاده از تعداد زیادی نازل به طور هم‌زمان (در عمل بیش از ۲۰۰ عدد)، قابلیت اطمینان تست کاهش پیدا می‌کند. با این حال، این روش برای مراحل اولیه توسعه فناوری موتورهای سوخت جامد مناسب بوده است. در سال ۲۰۲۱، جو و همکاران در یک مطالعه عددی به بررسی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت در یک دیفیوزر گلواگاه ثانویه با ابعاد کوچک پرداخته‌اند. در این بررسی، از سیستم خنک‌کاری جداره آبی (دو کاناله) جهت حفاظت حرارتی دیوارهای دیفیوزر استفاده شده است. آنها نشان دادند که با این سیستم خنک‌کاری می‌توان دمای بدنه فلزی دیفیوزر را در محدوده قابل تحمل آن حفظ کرد. اگرچه، مطالعه آنها بیشتر بر عملکرد سیستم خنک‌کاری متمرکز شده است و در خصوص طراحی سیستم خنک‌کاری و جزئیات سیستم مورد استفاده اطلاعاتی ارائه نشده است.^[۱۴]

فولادی و همکاران در سال ۲۰۲۲، در یک مطالعه عددی، اثر فشار جریان سیال خنک کننده را بر طراحی سیستم خنک کاری چداره آبی تک کاتالاله دیفیوزر های با ابعاد بزرگ و شار خارجی بالا مورد بررسی قرار دادند. بررسی های آنها نشان داد که انتخاب فشار کاری مناسب در طراحی سیستم خنک کاری اهمیت زیادی دارد؛ به طوری که افزایش فشار کاری از سه بار به ۱۰ بار، در شرایط یکسان، علاوه بر کاهش قابل توجه ابعاد سیستم خنک کاری، موجب کاهش ۷۵ درصدی دبی جرمی مصرفی می شود.^[۱۲]



شکل ۱. طرح شماتیک از یک دیفسوزر گلوگاه ثانویه و محفظه خلاء.

با زیبایی^۲ انجام شده است. ایده اصلی این روش، استفاده از سوخت مایع موتور به عنوان سیال خنک کننده و برگشت انرژی دفع شده از بدنه و نازل توسط این سیال به داخل محفظه احتراق است. در این روش، از تعداد زیادی کانال خنک کاری طبل با مقطع مستطیلی شکل در ابعاد کوچک (۱ تا ۳ میلیمتر) استفاده می شود. این کانال ها به روش های مختلف حول بدنه و نازل موتور قرار می گیرند. سوخت مایع با سرعت بالا (حدود ۳۰ متر بر ثانیه) از این کانال ها عبور کرده و با جذب حرارت بدنه، پیش گرم شده و در نهایت وارد محفظه احتراق می گردد که البته با افت فشار زیادی نیز همراه است. با توجه به اختلاف زیاد فشار مخزن سوخت و فشار محفظه احتراق، حذف سیال عامل خارجی و متعلقات مربوطه به راه اندازی آن و همچنین جلوگیری از هدر رفتن انرژی موتور، این روش برای موتورهای سوخت مایع از توجیه اقتصادی بالایی برخوردار است. بر این اساس، مطالعات به نسبت جامعی در زمینه طراحی این سیستم در مراجع وجود دارد.^[۱]

در موتورهای سوخت جامد به طور معمول از فتاوری عایق، به خصوص عایق‌های کامپوزیتی، برای حافظت از بدنه فازی موتور و نازل استفاده می‌شود و در بیشتر اوقات نیازی به خنک‌کاری بدنه و نازل وجود ندارد. گازهای احتراقی موتورهای سوخت جامد به دلیل استفاده از فلز آلومینیوم در ترکیبات سوخت، شامل ذرات مذاب اکسید آلومینیوم می‌باشد. بر خلاف جریان گازها که با افت دمایی قابل توجهی در پروسه انبساط در واگرایی نازل مواجه‌اند، این ذرات تا حد زیادی دمای خود را حفظ می‌کنند و با دمای بیش از ۳۰۰۰ کلوین به قسمت ورودی و همگرایی دیفیوزر برخورد می‌کنند. این امر باعث پیچیده‌تر شدن شرایط دمایی در سکوی تست ارتفاع بالا موتورهای سوخت جامد نسبت به موتورهای سوخت مایع می‌شود.^[۵] در این تحقیق، طراحی سیستم خنک‌کاری، راء، مهندسی، های، سوخت جامد نظر است.

در خصوص خنک کاری بدنه دیفیوژر فلزی که به طور معمول سطح بزرگی دارد، استفاده از تعداد زیادی کاتالیز باریک با سطح مقطع کوچک همانند آنچه که در روش های بازیابی مورد استفاده است، بدليل افت فشار بالای آنها، توجیه اقتصادی ندارد. در تعدادی از تجهیزات شیمی ساز ارتفاع بالای مطری در دنیا، برای حفاظت از بدنه دیفیوژر از روش خنک کاری جداره آبی استفاده شده است. برای خنک کاری دیفیوژر شیمی ساز خلاء به روش جداره آبی،^۳ سطح بیرونی دیفیوژر توسط کاتالیز انتقال سیال خنک کننده پوشیده می شود؛ به طوری که سیال خنک کننده از یک طرف با سطح بیرونی دیفیوژر در تماس است و از طرف دیگر توسط سطح بیرونی کاتالیز محصر شده است. تحقیقات نادری نیز وجود دارد که در آن از روش خنک کاری با اسنایر، آب، رایع، حفاظت از بدنه فناور، دیگر من، استفاده شده است.^[۷]

بررسی مراجع موجود نشان می دهد که علاوه بر وجود مراجع متعدد در خصوص خنک کاری محفظه موتور و نازل، تحقیقات کمی در خصوص طراحی و بررسی عملکرد سیستم خنک کاری دفعه از شیوه ساز ارتفاع بالا نیز صورت گرفته است.

۲. تعریف مسئله و پارامترهای حاکم

در حالت کلی برای دیفیویور شبیه‌ساز خلاء، تبادل انقال حرارت در سه محیط گاز داغ، فلز با ضخامت t و سیال خنک‌کننده با ارتفاع h صورت می‌پذیرد که شماتیک قسمتی از دیواره دیفیویور و کانال خنک‌کاری در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به هندسه شکل ۲ می‌توان معادله تبادل انرژی میان محیط‌های مختلف را به صورت رابطه زیر نوشت:

$$q'' = h_g(T_g - T_{wg}) = \frac{K_{st}}{t}(T_{wg} - T_w) = h_w(T_w - T_b) \quad (1)$$

که در معادله ۱ h_w ضریب انقال حرارت هم‌رفت در سمت سیال خنک‌کننده است. افت فشار درون کانال‌های سیستم خنک‌کننده هرچه بیش‌تر باشد، راندمان کل سیستم خنک‌کاری کاهش می‌یابد. بنابراین، باید یک مقدار مجاز برای افت فشار درون کانال‌های خنک‌کاری در نظر گرفت. افت فشار داخل کانال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_c = \frac{f}{2} \frac{L}{D_h} \rho \bar{v}^2 \quad (2)$$

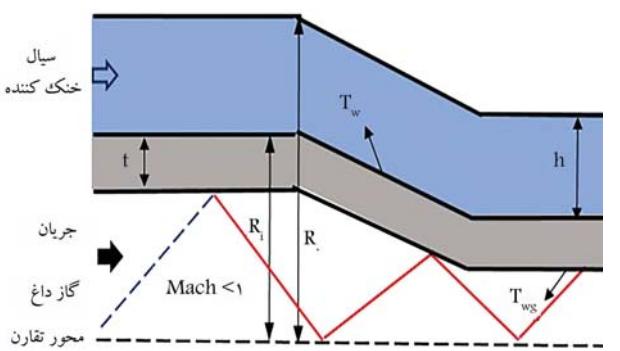
سه پارامتر مهم در طراحی حاضر وجود دارد که عبارت‌اند از: دبی جرمی سیال خنک‌کننده (m), ارتفاع کانال خنک‌کاری (h) و طول کانال خنک‌کاری. از معادلات حاکم بر مسئله می‌توان روابط زیر را استخراج کرد.^[۱۵]

$$\Delta P_c \propto \frac{\dot{m}^2}{h^2} \quad (3)$$

$$h_w \propto \frac{\dot{m}^\alpha}{h} \quad (4)$$

در معادله ۴، α توان عدد رینولدز در رابطه تجربی h_w استفاده شده می‌باشد که بطور معمول برابر عدد $8/10$ است. مطابق با روابط فوق در \dot{m} ثابت، افزایش دو برابری h موجب نصف شدن h_w و هشت برابر شدن ΔP_c می‌شود. همچنین، در h ثابت، h_w با توان α از \dot{m} و ΔP_c با \dot{m}^α متناسب است.

در روش خنک‌کاری جداره آبی برای هندسه‌های بزرگ با شار حرارتی زیاد می‌توان یک تقسیم‌بندی بر روی نواحی مختلف هندسه مذکور انجام داد تا در صورت لزوم، بیش از یک کانال برای خنک‌کاری سطح داغ در نظر گرفته شود. این امر



شکل ۲. طرح شماتیک دیواره دیفیویور و کانال خنک‌کاری با نسبت قطر = $a = \frac{D_c}{D_w} = \frac{R_i}{R_o}$

طراحی و ساخت سیستم خنک‌کاری دیفیویور استنند خلاء برای موتورهای سوخت جامد، به نحوی که از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار بوده و از سهولت ساخت و اجرا برخوردار باشد، در عمل دشوار است. از طرفی، در کشورهای در حال توسعه در صنعت فضایی مانند ایران، علاوه بر نیاز بالا به اکتساب این نوع ذائقه‌های، تجربیات کافی در این زمینه‌ها وجود ندارد. همچنین، مطابق با دانش نویسندگان، در خصوص نحوه طراحی سیستم خنک‌کاری جداره آبی دیفیویور شبیه‌ساز ارتفاع بالا در تست موتور سوخت جامد، تاکنون تحقیقی منتشر نشده است. در نتیجه موتورهای سوخت جامد، جریان گازهای احتراقی حاوی مذاب اکسید الومینیوم با دمای بالا و مومتوم بالا به سطح داخلی دیفیویور برخورد می‌کند و در صورت بالا رفتن دمای سطح و کاهش استحکام فلز در این ناحیه، سایش حرارتی شدیدی در ورودی دیفیویور رخ می‌دهد.^[۷] با توجه به شار حرارتی بالا و سطح خنک‌کاری بزرگ، گزینه‌های متعددی پیش روی یک طراح قرار دارد؛ به عنوان مثال افزایش قابلیت دفع شار حرارتی بالا با افزایش دبی جرمی سیال خنک‌کننده که منجر به هزینه بالا می‌شود، تنگ‌تر کردن مجرای جریان خنک‌کننده که منجر به افت فشار کل بالا می‌شود و تقسیم بار حرارتی با افزایش تعداد کانال‌های خنک‌کاری در طول دیفیویور که منجر به پیچیدگی در اجرای تست می‌شود. علاوه بر این، روابط تجربی و نیمه‌تجربی مورد استفاده در طراحی برای تخمین ضرایب انتقال حرارت هم‌رفت در هندسه‌های بزرگ و شار حرارتی بالا به خصوص برای یک جریان حلقوی با خطوط مواجه هستند. بنابراین، برای اطمینان به این گونه طراحی‌ها، نیاز به تست‌های آزمایشگاهی و یا بررسی با روش شبیه‌سازی عددی صحبت‌سنجی شده است. در این تحقیق، مسائل اشاره شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این پژوهش، به طراحی و تحلیل یک سیستم خنک‌کاری به روش جداره آبی برای سطوح متغیر و بزرگ و شار حرارتی بالای دیفیویور شبیه‌ساز خلاء پرداخته شده است. در این راستا، یک الگوریتم طراحی سیستم خنک‌کاری جدید به روش جداره آبی توسعه داده شود. دبی جرمی کمتر، افت فشار کل محدود و سهولت ساخت و اجرا با کمینه کردن تعداد کانال خنک‌کاری از اهداف اصلی الگوریتم است. برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در جریان سیال خنک‌کننده در هندسه‌های حلقوی هم‌محور، تقریب‌های مختلفی در مراجع معرفی شده‌اند که در این تحقیق دقت برخی از مهم‌ترین آنها برای استفاده در مسئله حاضر با تکنیک شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این تحقیق اعتبارسنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی به مکمک داده‌های تجربی صورت می‌گیرد. مطابق مرور مراجع انجام شده، ارائه الگوریتم طراحی با قابلیت طراحی چندکاناله جداره آبی (کمترین تعداد لازم) برای سطوح خنک‌کاری بزرگ و شار حرارتی بالا از جمله نوآوری این تحقیق است. همچنین، تقریب‌های مناسب برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و افت فشار در جریان حلقوی هم‌محور در کانال با مقاطع متغیر با تکنیک شبیه‌سازی عددی شناسایی و معرفی می‌شوند.

در ادامه، ابتدا مسئله مورد بررسی و پارامترهای مهم معرفی شده و در بخش بعدی، الگوریتم طراحی توسعه داده شده ارائه می‌شود. سپس، گام‌های مختلف طراحی سیستم خنک‌کاری مورد تشریح قرار می‌گیرد. در بخش بعدی، روش شبیه‌سازی عددی ارائه می‌شود. در بخش نتایج، ابتدا نتایج اعتبارسنجی و بررسی استقلال حل از شیوه ارائه می‌شود، سپس با کمک تحلیل عددی، تقریب مناسب برای تخمین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک شناسایی می‌گردد. در ادامه، نتایج طراحی سیستم خنک‌کاری با شرایط مختلف مسئله با اعمال شار حرارتی توزیعی و شار حرارتی بحرانی ارائه می‌شود.

گام ۱. پارامترهای کنترلی، ناحیه‌ای و مشخصات سیال خنک‌کاری در دمای محیط $(T_i = 300\text{ K})$ به عنوان ورودی به کد محاسباتی داده می‌شود:

گام ۲. شار حرارتی که می‌بایست از دیواره توسط سیستم خنک‌کاری دفع شود لحاظ می‌شود:

گام ۳. برای هر کانال خنک‌کاری که طراحی می‌شود، یک مقطع ورودی و یک مقطع خروجی وجود داد که n_1 شماره مقطع ورودی کانال و n شماره مقطع خروجی کانال می‌باشد که در این مرحله این دو پارامتر به عنوان ورودی به کد داده می‌شود:

گام ۴. پارامترهای هندسی دیفیوزر به عنوان ورودی به کد محاسباتی داده می‌شود. معرف طول کل دیفیوزر می‌باشد که این مقدار از مجموع طول هر ناحیه (l_r) به دست می‌آید و D نیز معرف قطر دیفیوزر می‌باشد که در نواحی مختلف متغیر است:

گام ۵. در ابتدا باید یک مقدار اولیه برای ارتفاع کانال خنک‌کاری در نظر گرفت که معمولاً این مقدار را برابر یک میلی‌متر می‌توان لحاظ کرد ($h = h_0$) سپس، می‌توان سطح مقطع عبور جریان را به کمک معادله ۵ محاسبه کرد:

$$A(x) = \frac{\pi}{4} [(D_O(x) + 2h)^2 - D_O^2(x)] \quad (5)$$

گام ۶. یک مقدار اولیه برای m در نظر گرفته می‌شود. می‌توان به کمک آن سرعت متوسط $(\bar{v}(x))$ را در مقطع مختلف از رابطه پیوستگی به دست آورد:

$$\dot{m} = \rho A(x) \bar{v}(x) \Rightarrow \bar{v}(x) = \frac{\dot{m}}{\rho A(x)} \quad (6)$$

گام ۷. برای محاسبه دمای بالک سیال خنک‌کننده می‌توان از معادله انتگرالی پیوستگی انرژی در طول داکت حلقوی استفاده کرده و با انتگرال گیری از آن، دمای بالک به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \int_0^x q''(x) * \pi * D_o(x) dx = \\ \dot{m} C_P(T(x) - T_i) \Rightarrow T(x) = \\ T_i + \frac{1}{m C_P} \int_0^x q''(x) \times \pi \times D_o(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

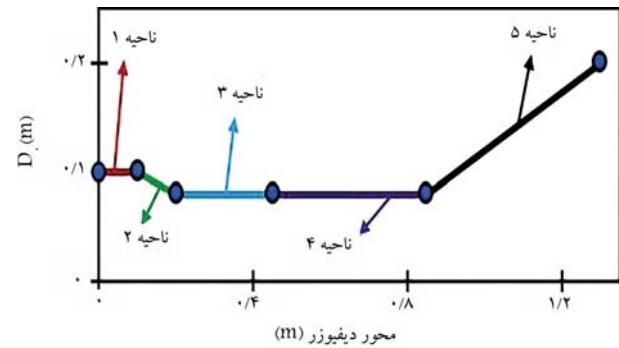
گام ۸. به کمک معادله ۸ می‌توان ضریب انتقال حرارت هم‌رفت برای سیال خنک‌کننده را در نواحی مختلف کانال به دست آورد:

$$\begin{aligned} q''(x) = h_w(T_w(x) - T_b(x)) \\ h_w = \frac{k}{D_h} N u_{D_h} \end{aligned} \quad (8)$$

معادله ۸ ارتباط ضریب انتقال حرارت هم‌رفت سیال خنک‌کننده با عدد ناسلت را نیز نشان می‌دهد. برای محاسبه عدد ناسلت با توجه به هندسه کانال حلقوی و هم‌مرکز، تقریب‌های مختلفی معرفی شده‌اند که در جدول ۱ گزارش شده است. همان‌طور که از روابط موجود در جدول ۱ مشخص است، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه عدد ناسلت، نسبت قطر مقطع حلقوی کانال می‌باشد که این پارامتر با حرف a نشان داده شده است (شکل ۲).

در محاسبه ضریب انتقال حرارت، عدد رینولدز جریان به کمک معادله ۹ محاسبه می‌شود:

$$Re(x) = \frac{\rho D_h \bar{v}(x)}{\mu} = \frac{2h \rho \bar{v}(x)}{\mu} \quad (9)$$



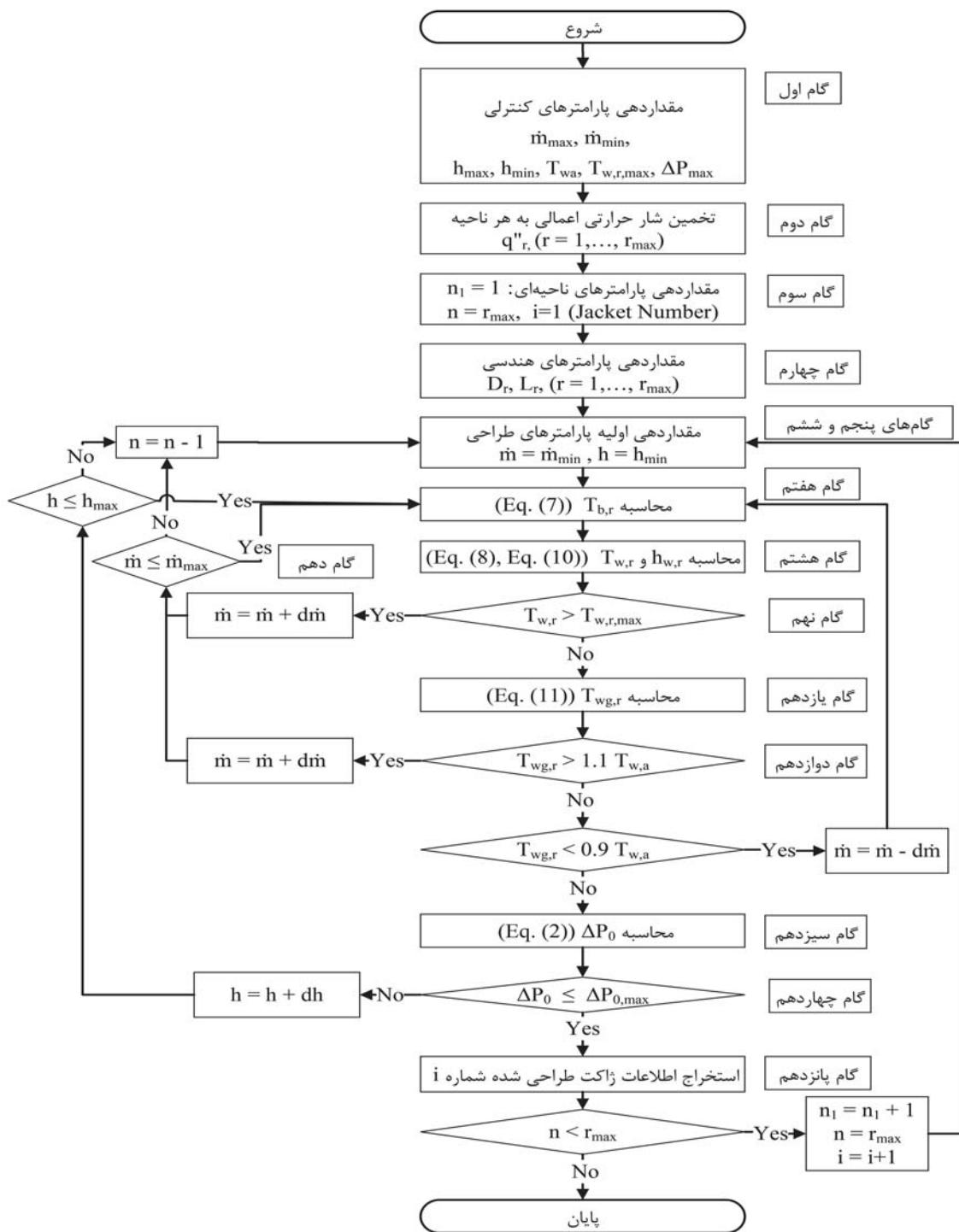
شکل ۳. تقسیم‌بندی نواحی مختلف دیفیوزر.

باعث می‌شود که دمای سیال خنک‌کاری اولیه بیش از حد بالا نزد و با ورود سیال جدید، عمل خنک‌کاری بهبود بخشدید شود. شکل ۳ نحوه تقسیم‌بندی دیفیوزر به پنج ناحیه r_{max} را نشان می‌دهد. این تقسیم‌بندی را می‌توان با تغییر شار حرارتی اعمالی به دیوارهای دیفیوزر یا با تغییر هندسه در نواحی مختلف دیفیوزر تعیین کرد.

با علم بر این که در صورت خنک‌کاری، داغ‌ترین سطح، سطح سمت گاز داغ است (T_{wg}), می‌توان یک مقدار مجاز (T_{wg}) برای این پارامتر در نظر گرفت که بهتر است این مقدار مجاز با توجه به دمای سرویس کاری فولاد خوزنگ انتخاب شود (که مقدار بالای ۹۰۰ کلوین است). بنابراین، بهتر است با حاشیه اطمینان مناسب، دمای مجاز (T_{wg}) را برابر ۲۵۰ کلوین در نظر گرفت و اجازه داد در محدوده ۱۰ درصد آن تغییر داشته باشد.

۳. الگوریتم طراحی کانال خنک‌کاری به روش جداره آبی

در شکل ۴ فلوچارت مربوط به الگوریتم توسعه داده شده برای طراحی سیستم خنک‌کاری به روش جداره آبی ارائه شده است. الگوریتم مزبور به این شکل عمل می‌کند که ابتدا به دلیل سهولت ساخت، تلاش می‌شود برای کل دیفیوزر تنها یک کانال خنک‌کاری طراحی شود. ابتدا، با فرض یک ارتفاع اولیه برای کانال خنک‌کاری، دبی جرمی مناسب با روش سعی و خطای جستجو می‌شود. در این بررسی، نقاط کنترل، دمای انتهای هر ناحیه است. این نقاط کنترل در حین طراحی بررسی می‌شوند تا افزایش یا کاهش دبی جرمی، شرایط دمایی برآورده شوند. حال اگر دبی جرمی به دست آمده بیشتر از دبی جرمی پیشنهاد شود، در این صورت یک ناحیه کم می‌شود و طراحی مجدد برای تعداد کمتری ناحیه به دنبال یک کانال مناسب می‌گردد. زمانی که شرط دمایی با فرض $\dot{m} < \dot{m}_{max}$ برآورده شود، افت فشار کل جریان (ΔP_{h}) محاسبه می‌شود. اما اگر $\Delta P_{\text{h}} < \Delta P_{\text{c},max}$ باشد، کانال برای آن تعداد ناحیه نهایی می‌شود. اما اگر $\Delta P_{\text{h}} < \Delta P_{\text{c},max}$ باشد، تلاش می‌شود که با افزایش پارامتر h ، ΔP_{h} کاهش یابد. اگر در این پروسه، $h > h_{max}$ باشد و کماکان $\Delta P_{\text{c},max} > \Delta P_{\text{h}}$ باشد، در این صورت نیز می‌بایست تعداد نواحی کمتر شود و الگوریتم مجدد برای نواحی کمتر یک کانال مناسب طراحی کند. پس از پیدا کردن کانال مناسب برای تعداد محدودی از نواحی (به روش فوق)، کانال دیگری برای نواحی باقی‌مانده طراحی می‌شود تا برای تمامی نواحی کانال خنک‌کاری طراحی شود. گام‌های مختلف الگوریتم طراحی در ادامه تشریح شده است.



شکل ۴. فلوچارت طراحی سیستم خنک کاری جداره آبی.

۹. پس از محاسبه دمای فلز در سمت سیال خنک کننده، مقویلیت T_w باید بررسی شود. برای آنکه در سیال خنک کننده درون کانال، خنک کاری جوشش رخ ندهد، باید یک حد بیشینه برای دمای فلز در سمت سیال خنک کننده $T_{w,\max}$ با توجه به فشار کاری سیال خنک کننده لحاظ کرد. زمانی که در طراحی کانال، خنک کاری دمای فلز در سمت سیال خنک کننده بیش از مقدار $T_{w,\max}$ باشد، باید ببی جرمی جریان را به قدری افزایش داد تا دمای فلز در سمت سیال خنک کننده به کمتر از $T_{w,\max}$ برسد:

که در آن D_h قطر هیدرولیکی کاتال است و مقدار آن برابر با $2h$ به دست آمده است. از ترکیب روابط ۶ تا ۹ می‌توان معادله ۱۰ را برای محاسبه دمای فلز در سمت سیال خنک‌کننده ایجاد کرد.

$$\begin{aligned} T_w(x) &= T_b(x) + \frac{q'''(x)}{\left(\frac{k}{\sqrt{h}}\right) \times N_u D_h} \\ \Rightarrow T_w(x) &= T_i + \frac{q'''(x)}{\left(\frac{k}{\sqrt{h}}\right) \times N_u D_h} + \\ &\quad \frac{1}{\bar{m} C_P} \int_{\circ}^x q'''(x) \times \pi \times D_o(x) dx \end{aligned} \quad (10)$$

جدول ۲. تقریب‌های محاسبه ضریب اصطکاک برای مقاطع حلقوی و هم مرکز.

رابطه تقریب ضریب اصطکاک	مراجع
$f = (2 \log \circ (Re^* \sqrt{f}) - 1,8)^{-1}$	جانز و لوینگ [۲۱]
$Re^* = Re_{D_h} E$	
$E = \frac{(1+a^r) \ln(a) + (1-a^r)}{(1-a) \ln(a)}$	
$f = (1 + \circ, 425a) \times B$	
$B = (\circ, 86854 \ln(F))^{-1}$	باهاتی و شاه [۲۲]
$F = \left(\frac{Re_{D_h}}{1,464 \ln(Re_{D_h}) - 1,8215} \right)$	
$\frac{f}{\lambda} = \left(1,61 + \frac{1}{1,428} \ln \left(\frac{Re_{D_h}}{\sqrt{\frac{\lambda}{f}}} \right) - G \right)^{-1}$	کندا و همکاران [۲۳]
$G = \frac{55^\circ}{Re_{D_h} \sqrt{\frac{\lambda}{f}}}$	
$f = (1,8 \log \circ (Re^*) - 1,5)^{-1}$	گنیلینسکی [۲۴]
$f = \circ, 3164 Re_{D_h}^{-0,125}$	بلازیوس [۲۵]

در غیر این حالت، h را افزایش داده تا افت فشار کل کاهش یابد. این کار تا h_{\max} می‌تواند ادامه یابد. اگر h به h_{\max} برسد و با m فرض شده همچنان شرط افت فشار کل برآورده نشود، باید کانال خنک‌کاری برای نواحی کمتری طراحی شود. در هر بار افزایش h ، محاسبات از گام هفتم تکرار می‌شود. اگر در این پروسه باشد، تعداد نواحی کانال کمتر می‌شود و محاسبات از گام پنجم $h_{\max} < h$ تکرار می‌گردد؛

گام ۱۵. اگر تعداد نواحی (n) که داکت برای آن طراحی شده است، برابر تعداد ناحیه بیشینه r_{\max} باشد، به معنی اتمام طراحی است. اما چنانچه پارامتر n کمتر از r_{\max} باشد، به این معنی است که داکت طراحی شده همچنان ناچیه یا نواحی آخری را پوشش نمی‌دهد. بنابراین، اطلاعات داکت طراحی شده، ذخیره‌سازی شده و برای نواحی باقیمانده با سیال ورودی جدید، داکت دیگری طراحی می‌شود. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که برای تمامی نواحی کاتال حنک‌کاری طراحی شود.

۴. روش شبیه‌سازی عددی

در سیستم خنک کاری جداره آبی، از داکت های حلقوی هم مرکز به عنوان کanal خنک کاری استفاده می شود. همچنین، برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک درون داکت های حلقوی هم مرکز، تقریب های تجربی و نیمه تجربی متفاوتی ارائه شده است که هر یک از این تقریب ها برای داکت هایی با نسبت قطر مشخص و جریان هایی با عدد رینولدز مشخص معرفی شده اند. در مسئله حاضر، قطر دیفیوزر نسبت به رفقاء کanal نسبتاً بزرگ است. در حالی که در بیشتر تقریب های ارائه شده، ارتفاع مجرای ابیور جریان نسبت به قطر جسم مرکزی خیلی کوچک نیست. این امر ممکن است موجب بروز خطا در محاسبات حاضر شود. بنابراین، لازم است که به کمک شبیه سازی عددی، بهترین تقریب ها را جهت استفاده در کد محاسباتی استفاده کرد.

در این برهه، کد محاسباتی، در سیستم افوار، متلت⁴ نسخه R2018A [15] تسعه

جدول ۱. تقریب‌های محاسبه عدد ناسلت برای جریان در مقاطع حلقوی و هم‌مرکز.

مرجع	رابطه تقریب عدد ناسلت
$Nu_{Dh} = C \cdot Re_{Dh}^{0.8} Pr^{1/4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$	
$C = \frac{0.034a^{-1/4.6}}{1.25 - 0.074a^{-1} + A}$	[۱۶] دیرکر و میکر
$A = \frac{1.25}{a} - \sqrt{1.57}$	
$P = 1.0 \times 10^6 e^{-0.157/a}$	
$Nu_{Dh} = \frac{0.024}{(1 + \frac{1}{a})^{1/4}} \times Re^{0.8} Pr^{1/4} B$	[۱۷] سوامی و همکاران
$B = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$	
$Nu_{Dh} = 0.024 Re_{Dh}^{0.8} Pr^n$	
$n = 0.4 \text{ heating}$	[۱۸] دیوتس و بولتر
$n = 0.3 \text{ cooling}$	
$Nu_{Dh} = 0.024 a^{-0.14} Re_{Dh}^{0.8} Pr^n B$	[۱۹] ویگند
$Nu_{Dh} = \frac{\frac{f}{\lambda} Re_{Dh} Pr}{\phi + 1/\sqrt{\frac{f}{\lambda}} (Pr^{1/4} - 1)} C$	
$C = \left[1 + \left(\frac{D_h}{L_{hx}} \right)^{(1/4)} \right] F_{ann} K$	
$\phi = 1.0 + \frac{1.0}{Re_{Dh}} - \frac{0.73}{1 + 10^{Pr}}$	[۲۰] گنیلینسکی
$K = \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.14}; F_{ann} = 0.75 \times a^{-0.14}$	
$f = (1.0 \log 10 (Re^*) - 1.0)^{-1}$	
$Re^* = Re_{Dh} \frac{(1+a^*) \ln(a) + (1-a^*)}{(1-a^*) \ln(a)}$	

گام ۱۰. در صورت افزایش دبی جرمی در گام نهم، با هر بار افزایش دبی جرمی باید شرط مقوله m را بررسی کرد. در صورت براورده شدن شرط $m < m_{\max}$ از گام هفتم و در غیر این صورت بعد از کاهش دادن تا $n = n - 1$ محاسبات از گام ششم ادامه می‌باید:

گام ۱۱. بعد از مشخص شدن مقدار دمای فلز در سمت سیال خنک‌کننده و بررسی شرط مقبولیت آن، دمای فلز در سمت گاز داغ (T_{wg}) را می‌توان به کمک معادله ۱۱ محاسبه کرد:

$$q''(x) = \frac{k_{s,t}}{t} (T_{w,g}(x) - T_w(x)) \Rightarrow \\ T_{w,g}(x) = T_w(x) + \frac{q''(x) \times t}{k_{s,t}} \quad (11)$$

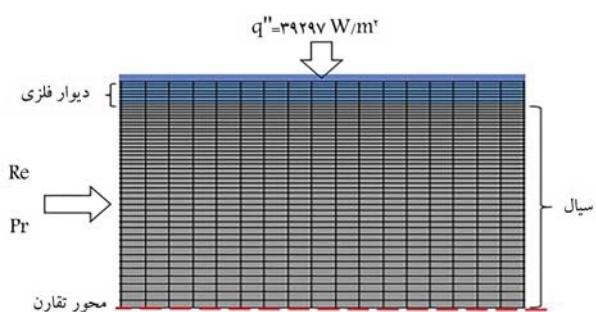
گام ۱۲. شرط مقبولیت T_{wg} بررسی می‌شود. شرط مقبولیت T_{wg} به این صورت است که T_{wg} باید در محدوده 10° درصد کمتر یا بیشتر از T_{wa} باشد، در غیر این صورت باید دبی جرمی جریان را کاهش یا افزایش داد تا شرط دمایی برآورده شود (در افزایش دبی جرمی همانند گام 10° عمل می‌شود):

گام ۱۳. افت فشار کل درون کاتال خنک کاری با استفاده از معادله ۲ محاسبه می شود. برای محاسبه ضریب اصطکاک موجود در معادله ۲، از روابط تجربی یا نیمه تجربی ارائه شده برای مقاطع حلقوی و هم مرکز مطابق جدول ۲ استفاده می شود:

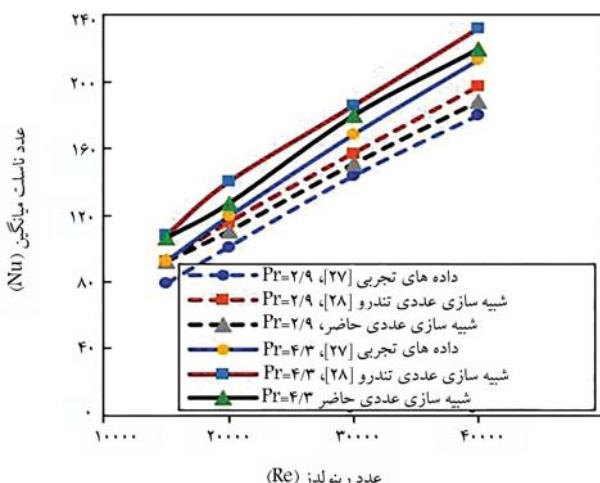
گام ۱۴. شرط مقابله افت فشار کل بررسی می شود. اگر ΔP و (دبی جرمی) فاکتور هز نه بست را آورد کند ($\Delta P_{\text{min}} < \Delta P < \Delta P_{\text{max}}$)، گام ۱۵ اجرا می شود.

جدول ۳. بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی.

موقعیت طولی (m)	موقعیت	مشخصه
۱۴۷۲۱۹	۱۴۷۲۱۹	مقدار
۳۰۸۷۸۴	۳۰۸۷۸۴	مقدار
۱۲۲۸۵۹۱	۱۲۲۸۵۹۱	مقدار
۷۳۶۰/۹۰	۷۳۲۲/۰۰	۷۳۶۰/۹۰
۵۳۴۵/۶۴	۵۳۰۷/۲۰	۵۳۴۵/۶۴
۳۲۳۶/۸۰	۳۲۱۱/۴۰	۳۲۳۶/۸۰
۲/۲۵	۲/۲۵	مقدار
۳/۰۵	۳/۰۵	مقدار
۴/۷۵	۴/۷۵	مقدار
۲۱۲/۳۲	۲۱۲/۱۲	۲۱۲/۱۲
۳۱۵/۱۶	۳۱۴/۹۶	۳۱۴/۹۶
۴/۷۵	۴/۷۵	مقدار
۳/۵	۳/۵	مقدار
۲/۲۵	۲/۲۵	مقدار
دمای بالک (K)	دمای بالک (K)	مشخصه



شکل ۵. تصویری از شبکه محاسباتی ایجاد شده با تعداد ۸۷۸۴ گره.



شکل ۶. میانگین عدد ناسلت در اعداد رینولدز متفاوت.

با مدل آشتفتگی Enhanced wall treatment و $k - \varepsilon - \text{Realizable}$ در تحقیق حاضر استفاده می‌شود، مقدار Y^+ حدود پنج و پایین‌تر مناسب است [۲۹, ۲۸].

شکل ۶ میانگین عدد ناسلت در اعداد رینولدز متفاوت که از داده‌های تجربی ویسته^[۲۷] و داده‌های عددی تندرو^[۲۸] به دست آمده است را با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی حاضر مقایسه می‌کند. در این شکل واضح است که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با داده‌های عددی تندرو، به مراتب به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. به طوری که برای محاسبه عدد ناسلت متوسط و مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی نشان می‌دهد که

داده شده و از نرم افزار انسیس و رکینج^۵ نسخه ۲۰۱۹ R1 برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. هندسه کانال خنک‌کاری که از کد محاسباتی به دست آمده است، در نرم افزار انسیس جمومتری^۶ مدل سازی شده و به کمک نرم افزار انسیس مژینگ^۷ یک شبیه با سازمان بر روی آن ایجاد می‌شود. سپس، به کمک نرم افزار انسیس فلوئنت^۸ با استفاده از حلگر فشار مبنا به صورت دو بعدی متقارن محوری، تحلیل عددی صورت می‌گیرد. برای مدل سازی آشفتگی جریان از مدل Realizable k-ε استفاده می‌شود. برای جلوگیری از خطاهای کاربری و سایر خطاهای ناشی از عدم انتخاب صحیح حلگرها، انتخاب شرایط مرزی، انتخاب مدل توربولنسی، ایجاد شبیه محاسباتی مناسب و غیره، مطالعه اعتبارسنجی با مراجع تجربی و همچنین مطالعه استقلال حل از شبیه عددی ضرورت دارد که در بخش بعدی ارائه شده است.

در شیوه‌سازی عددی از فرضیات جریان پایا، تقارن محوری، سراسر توربولانس، جریان تک فاز با ثابت بودن ویزگی‌های دمایی سیال خنک‌کننده استفاده شده است. همچنین، از انتقال حرارت تشعشعی صرف نظر شده و دیواره بیرونی سیستم خنک‌کاری آدیباتیک فرض شده است. اتخاذ این فرضیات در مسئله حاضر، مطابق با روال بررسی مرسوم در مراجع مشابه بوده و تأثیر ناچیزی در دقت ارزیابی طراحی مفهومی، دارد.

۱.۴. اعتیار سنجی و پرسی استقلال حل از شبکه

اعتبارسنجی روش حل عددی پژوهش حاضر با داده‌های تجربی مرجع [۲۷] انجام می‌شود. در این مرجع، ویستته و همکاران در یک مطالعه تجربی به بررسی انتقال حرارت درون یک لوله با سطح مقطع دایره‌ای به طول شش متر، قطر داخلی ۱۸ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر پرداخته‌اند. در پژوهش آنها، سیال عامل، اینان گلیکن - آب بوده است. آنها طول لوله را به سه ناحیه تقسیم کرده‌اند که عبارت از:

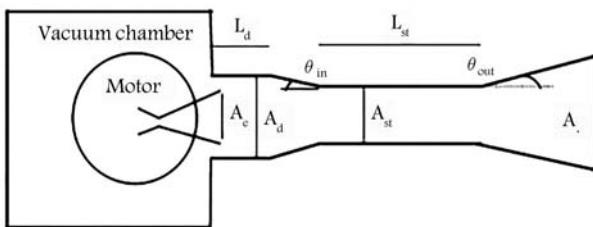
۱. یک ناحیه بدون شار حرارتی با طول $16/2$ متر برای تضمین شرایط به طور کامل توسعه یافته؛

۲. یک ناحیه با شار حرارتی ثابت 39297 وات بر متر مربع با طول $2/7$ متر؛

۳. یک ناحیه بدون شار حرارتی با طول $1/14$ متر که به عنوان خروجی عمل می‌کند.

اگرچه طول لوله شش متر است، اما انتقال حرارت و مقدار عدد ناسلت فقط در ناحیه 2 برسی می‌شود. همچنین، مقدار ضریب اصطکاک و افت فشار در یک ناحیه به طول $5/2$ متر در فاصله 40 سانتی متری از ابتدای لوله اندازه‌گیری می‌شوند. در این مطالعه، میانگین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در جریان‌های با اعداد رینولدز و پرانتل متفاوت برسی شده است. در سال $18/20$ ، تندرو و همکاران در یک مطالعه عددی، پژوهش ویسنته و همکاران را با روش شبیه‌سازی عددی مورد بررسی، قرار داده‌اند.^[۱۸]

در مطالعه حاضر، استقلال حل از شبکه محاسباتی برای سه شبکه با تعداد گره‌های ۱۴۷۲۱۹، ۳۰۸۷۸۴ و ۱۲۲۸۵۹۱ انجام شده است که نتایج آن در جدول ۳ گزارش شده است. شکل ۵ قسمتی از شبکه ایجاد شده بر روی هندسه مذکور را نشان داده است. در راستای محور z ، برای قسمت پوسته فازی هفت المان و برای قسمت سیال ۴۰ المان با ضریب رشد $1/0^3$ و در راستای محور x ، برای تمامی لوله ۶۴۳۲ المان در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که فاصله اولین گره تا دیوار بالایی 125° میلی‌متر و پارامتر Y از نرم افزار انسیس فلوبنت در حدود پنج گزارش شده است. قابل ذکر است که مطابق توصیه مراجع،

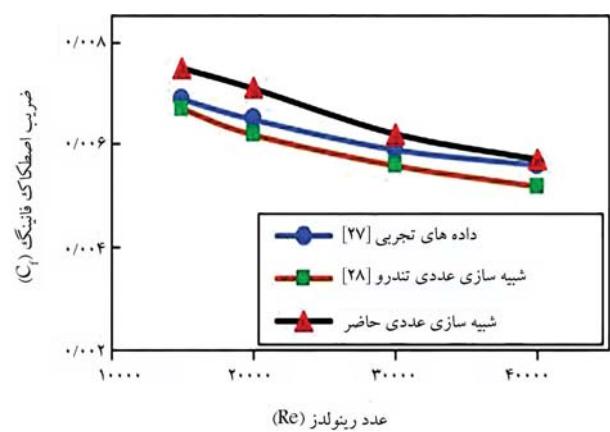

 شکل ۸. طرح شماتیک از یک دیفیوزر گلوبگاه ثانویه.^[۳۰]

جدول ۴. مقادیر پارامترهای طراحی دیفیوزر و نسبت انبساط نازل.

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۸	$(L/D)_{st}$	۶۰	A_e/A^*
۱	$(L/D)_d$	۸۲/۶۴	A_d/A^*
۶	θ_{in}	۱/۵۶	A_d/A_{st}
۷/۴۳	θ_{out}	۶/۲۵	A_o/A_{st}

نسلت که در جدول ۱ گزارش شدند، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی کاتال خنک‌کاری مقایسه می‌شود. در این پژوهش، جریان سیال در کاتال خنک‌کاری به صورت متقارن محوری با حلگر فشار مینا و با مدل توربولانسی $k - \epsilon$ – Realizable در نرم افزار انسیس فلوزئن شبیه‌سازی می‌شود. در تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، در رودی جریان، شرط مرزی دبی جرمی و رودی، در خروجی جریان، شرط مرزی فشار خروجی، در دیواره سمت سیال داغ، شرط مرزی دیواره با شار حرارتی ثابت، در دیواره داخلی سیال خنک‌کننده، شرط مرزی متصل^۹ و در سطح بیرونی سیال خنک‌کننده، شرط مرزی دیواره آدیباویک اعمال شده است. ابتدا تقریب‌های شبیه‌سازی در جریان پیش‌نیمه تجربی متناسب با هندسه مذکور که برای عدد نسلت ارائه شده‌اند، بررسی می‌شوند. ارتفاع کاتال خنک‌کاری و دبی جرمی جریان برای تمامی حالت‌ها یکسان و به ترتیب برابر $4/2$ میلی‌متر و $1/5$ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. برای شبیه‌سازی هندسه مذکور در نرم افزار انسیس فلوزئن، یک شبکه سازمان دهی شده با تعداد 706250 المان ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در شبکه محسوساتی مذکور، فاصله اولین گره تا دیواره بالایی $23/0$ میلی‌متر و پارامتر Y^+ در نرم افزار فلوزئن حدود پنج گزارش شده است. با توجه به تقسیم‌بندی دیفیوزر مطابق شکل ۳، توزیع شار حرارتی اعمالی به دیواره دیفیوزر در نواحی مختلف متغیر لحاظ می‌گردد، بدین صورت که به ناحیه‌های ۱ و ۲ شار حرارتی $2/5$ مگاوات بر متر مربع، به ناحیه‌های ۳ و ۴ شار حرارتی 2 مگاوات بر متر مربع و به ناحیه 5 شار حرارتی $1/5$ مگاوات بر متر مربع اعمال می‌شود.

شکل ۹، توزیع دمای فاز در سمت سیال خنک‌کننده را در طول دیفیوزر برای تقریب‌های مختلف عدد نسلت نشان می‌دهد. نحوه تغییرات دما در نواحی مختلف دیفیوزر بیشتر تحت تأثیر تغییرات هندسی، شار حرارتی، سرعت جریان در کاتال و دمای بالک است که در مثال‌های بعدی با جزئیات بیشتر مورد تشریح قرار می‌گیرد. با توجه به شکل مزبور، روند تغییرات دمای فاز در سمت سیال خنک‌کننده در طول دیفیوزر در همه تقریب‌ها با روند به دست آمده از شبیه‌سازی عددی یکسان است. با توجه به نتایج به دست آمده واضح است که نزدیک‌ترین نتیجه به نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به تقریب میر می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است، به غیر از ناحیه ابتدایی و رودی کاتال، در سایر قسمت‌های دیفیوزر نتایج تقریب میر و شبیه‌سازی عددی هم خوانی قابل قبولی دارند. لازم به ذکر است که دلیل اختلاف قابل توجه نتایج تجربی با عددی در بخش کوچک ناحیه ورودی کاتال، به



شکل ۷. ضریب اصطکاک فانینگ در اعداد رینولدز متفاوت.

بیشینه درصد خطای در اعداد رینولدز 30000 و 40000 زیر 10 درصد است.

شکل ۷ مقایسه‌ای میان ضریب اصطکاک فانینگ که از داده‌های تجربی و داده‌های عددی تندرو به دست آمده را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی حاضر به داده‌های تجربی و داده‌های عددی تندرو نزدیک است و دارای دقت قابل قبولی می‌باشد. در محسوسه ضریب اصطکاک فانینگ، بیشینه خطای نتایج شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با داده‌های تجربی برابر $8/4$ درصد است. با توجه به نمودار شکل ۶ و ۷ می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده دارای دقت خوبی است.

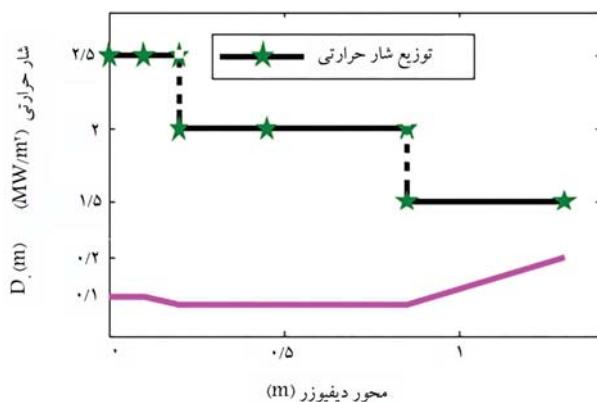
۵. نتایج

در این بخش، ابتدا با در نظر گرفتن یک توزیع شار حرارتی مناسب در طول دیفیوزر طراحی سیستم خنک‌کاری توسط الگوریتم توسعه داده شده انجام می‌شود. با استفاده از تقریب‌های مختلف عدد نسلت و ضریب اصطکاک، توزیع دمای به دست آمده بر روی دیواره دیفیوزر و افت فشار درون کاتال خنک‌کاری در تقریب‌های مختلف نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه می‌شوند و تقریب‌هایی که نزدیک‌ترین نتایج به نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه کرده‌اند، انتخاب شده و در ادامه برای طراحی‌های مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، نتایج دو مورد از طراحی انجام شده با الگوریتم مزبور که منجر به طراحی سیستم خنک‌کاری یک کاتاله و دو کاتاله شده است، ارائه شده و عملکرد الگوریتم طراحی و دقت نتایج به دست آمده مورد بحث قرار گرفته است.

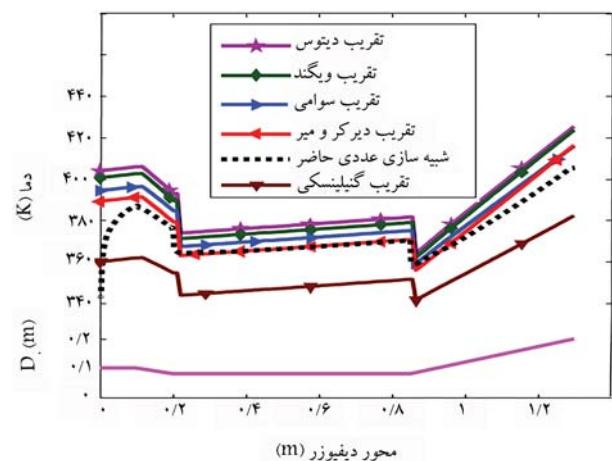
۱.۵. انتخاب تقریب‌های مناسب با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی

شکل ۸ شماتیکی از یک دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء به همراه پارامترهای هندسی آن را نشان می‌دهد. در این مطالعه، دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء برای یک نازل موتور که دارای قطر گلوبگاه 11 میلی‌متر می‌باشد، طراحی شده است. پارامترهای هندسی دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء طراحی شده مطابق با پارامترهای شکل ۸ در جدول ۸ گزارش شده است.

در ابتداء نتایج دمایی به دست آمده از تقریب‌های مختلف برای محسوسه عدد

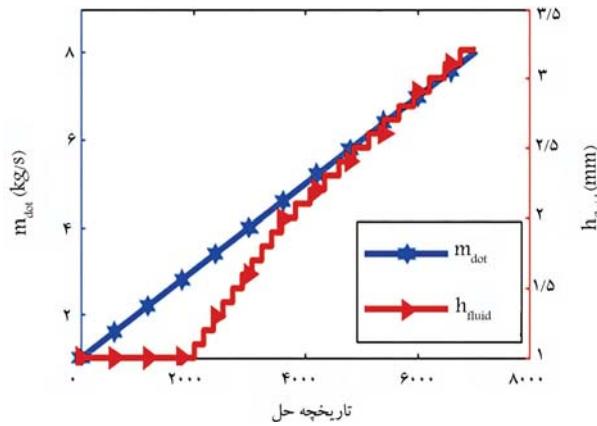


شکل ۱۰. توزیع شار حرارتی اعمالی به دیواره دیفیوزر.



شکل ۹. توزیع دمای فلز سمت سیال خنک کننده.

جدول ۵. افت فشار کل درون کانال خنک کاری.



شکل ۱۱. تاریخچه طراحی سیستم خنک کاری تک کانال.

برای نواحی مختلف طراحی شده است که توزیع شار حرارتی اعمالی به نواحی مختلف دیفیوزر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. دلیل انتخاب شار حرارتی توزیعی بار حرارتی متغیر اعمال شده از گازهای احتراقی به دیواره در طول دیفیوزر است که طبق بررسی های انجام شده در مراجع^[۲۰,۲۱] در شرایط کارکرد دائم و پایدار دیفیوزر، با روش تجربی و روش شبیه سازی عددی تخمین زده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر ارتفاع کانال یک و ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به مشخصات پمپ سیال خنک کننده موجود، در کد محاسباتی، بیشینه دبی جرمی ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه و بیشینه افت فشار کل نیز ۳۰ درصد لحاظ شده است.

تاریخچه تغییرات پارامترهای دبی جرمی و ارتفاع کانال در این طراحی، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. مطابق شکل، جستجوی حالت مطلوب از مقادیر اولیه یک کیلوگرم بر ثانیه (دبی جرمی) و یک میلی متر (ارتفاع کانال) شروع شده است. در این جستجو تا دبی جرمی سه کیلوگرم بر ثانیه، مقادیر ارتفاع ثابت بوده و تغییری نکرده است. به عبارت دیگر، در ارتفاع کانال برابر یک میلی متر و دبی جرمی پایین تر از سه کیلوگرم بر ثانیه، تمامی قیود دمایی مطابق الگوریتم برآورده نشده است. مطابق شکل، در دبی جرمی بالاتر از سه کیلوگرم بر ثانیه، ارتفاع کانال شروع به افزایش کرده است. این اتفاق به این معناست که است که علی رغم فراهم سازی قیود دمایی در این دبی ها، به دلیل افت فشار کل بالا، لازم است مطابق الگوریتم، ارتفاع کانال افزایش یابد. با افزایش ارتفاع کانال در یک دبی جرمی مشخص، به دلیل کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت، شرایط دمایی برآورده نمی شوند و لازم است مجددا دبی جرمی افزایش یابد. این روند افزایش مقادیر هر

نوع تقریب	کانال خنک کاری	مقایسه با شبیه سازی	درصد خطای در	افت فشار درون
عددی [%]	عددی [%]	عددی [%]	درصد خطای در	افت فشار درون
شبیه سازی عددی	-	۱۸/۹۳	-	-
تقریب جانز	۵/۴۰	۲۰/۰۰	۲۰/۰۰	۵/۴۰
تقریب باهاتی و شاه	۵/۴۹	۲۰/۰۲	۲۰/۰۲	۵/۴۹
تقریب کندا	۱/۰۶	۱۸/۷۲	۱۸/۷۲	۱/۰۶
تقریب گلیلسکی	۴/۲۵	۱۹/۷۸	۱۹/۷۸	۴/۲۵
تقریب بلازیوس	۲/۲۲	۱۸/۴۹	۱۸/۴۹	۲/۲۲

تفاوت الگوی جریان در شبیه سازی عددی نسبت به فرضیات تقریب های تجربی باز می گردد. در شبیه سازی عددی، الگوی جریان ورودی شبیه سازی شده است، در حالی که تقریب های تجربی برای جریان های توسعه یافته ارائه شده اند. با توجه به کوچک بودن این ناحیه، تأثیر آن در نتایج طراحی مفهومی قابل اغماض است. با صرف نظر از ناحیه ورودی کانال، از مقایسه نتایج به دست آمده از تقریب میر با شبیه سازی عددی می توان دریافت که تقریب میر با شبیه سازی عددی درصد خطای ۳/۸۱ درصد، نزدیک ترین پاسخ را به نتایج شبیه سازی عددی ارائه می کند.

جدول ۵ نتایج شبیه سازی عددی را به نتایج تقریب های مختلف برای محاسبه افت فشار درون کانال خنک کاری مقایسه می کند. لازم به ذکر است که در این پژوهش، فشار کاری سیال خنک کننده، پنج بار در نظر گرفته شده است. از نتایج جدول ۵ واضح است که نتایج به دست آمده با تقریب کندا، نزدیک ترین نتیجه را به شبیه سازی عددی با ۱/۰۶ درصد خطای دارد. بنا بر این، در کد محاسباتی برای تقریب عدد ناصلت از تقریب میر و برای تقریب ضریب اصطکاک از تقریب کندا استفاده می شود.

۲.۵. طراحی سیستم خنک کاری جداره آبی با توزیع شار حرارتی
با مشخص شدن تقریب های تجربی مناسب برای استفاده در الگوریتم طراحی (تقریب میر برای محاسبه عدد ناصلت و تقریب کندا برای محاسبه ضریب اصطکاک)، سیستم خنک کاری مناسب برای دیفیوزر (شکل ۸ و جدول ۸) با فرض شار حرارتی توزیعی

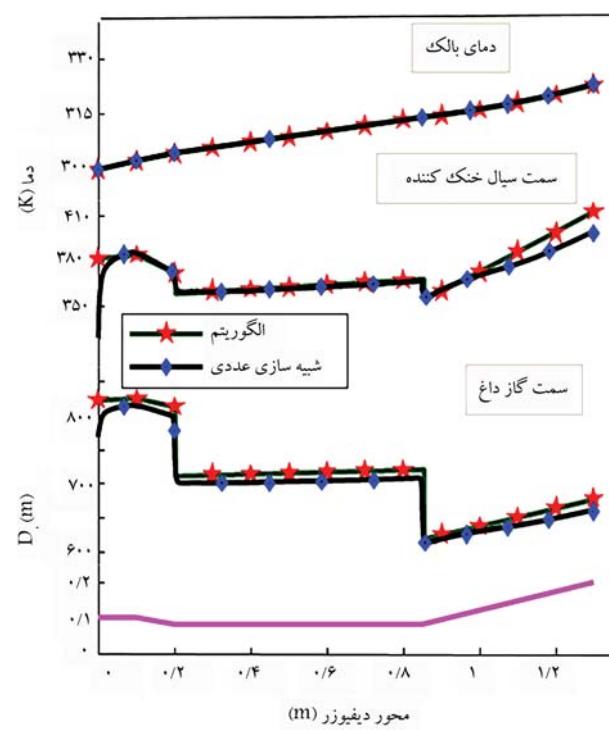
حرارتی (به علت شیب منقی همگرایی دیفیوزر) و افزایش سرعت جریان (به علت کوچک تر شدن مقطع حلقوی عبور جریان) دمای دیواره در این ناحیه در طول دیفیوزر کاهش می یابد. افت شدید دمای دیواره در ورود به ناحیه ۳، به دلیل تغییر در شار حرارتی از $2/5$ به 2 مگاوات بر متر مربع است. در طول ناحیه ۳ و ۴ که دارای شار حرارتی، سطح تبادل حرارت و سرعت جریان ثابت است، افزایش تدریجی با شیب ملایم دمای دیواره، به دلیل افزایش دمای بالک اتفاق افتاده است. همچنین، در ورود به ناحیه ۵، به دلیل کاهش شار حرارتی از 2 به $1/5$ مگاوات بر متر مربع، افت شدید دمای دیواره رخ داده است. در ادامه، به دلیل افزایش سطح تبادل حرارتی در قسمت واگرایی دیفیوزر (بزرگ تر شدن مقطع حلقوی عبور جریان)، کاهش سرعت جریان و افزایش دمای بالک، دمای دیواره با شیب تند افزایش پیدا کرده است.

به منظور ارزیابی طراحی انجام شده، شبیه سازی عددی جریان در کانال طراحی شده در این مثال انجام شده و نتایج دمایی آن شکل ۱۲ نشان داده است. لازم به ذکر است که برای انجام شبیه سازی عددی هندسه مذکور، از یک شبیه سازی محاسباتی با تعداد $780,000$ المان استفاده شده و پارامتر γ از نرم افزار فلوتنت حدود پنج گزارش شده است. مطابق شکل، با صرف نظر از ناحیه ورودی کانال، بیشینه درصد خطای میان نتایج دمایی حاصل از کد محاسباتی با نتایج شبیه سازی عددی، مربوط به انتهای ناحیه ۵ می باشد که برای دمای فلز سمت خنک کننده خطای برابر $3/65$ درصد و برای دمای فلز سمت گاز داغ برابر $2/86$ درصد می باشد. همچنین، افت فشار کل در کانال خنک کاری که از شبیه سازی عددی بدست آمده است، برابر $27/93$ درصد می باشد. بنابراین، افت فشار حاصل از کد محاسباتی در مقایسه با شبیه سازی عددی دارای $3/49$ درصد خطای است.

۳.۵. طراحی سیستم خنک کاری جداره آبی با شار حرارتی بحرانی

در این طراحی، برای تمامی نواحی، شار حرارتی $2/5$ مگاوات بر متر مربع اعمال می شود. این مقدار شار حرارتی با توجه به نتایج مرجع،^[۷] مقدار بحرانی برای این سیستم شبیه ساز خلاء می باشد. همچنین، در شرایط گذراي روشن شدن و خاموشی موتور، ممکن است بار حرارتی اعمال شده به کل بدنه دیفیوزر از سمت گازهای احتراقی به حالت بحرانی نزدیک تر باشد. برای این ممنظور، بسته به نوع مسئله، ممکن است طراحی سیستم خنک کاری بر مبنای بار حرارتی بحرانی در نظر گرفته شود. در این طراحی نیز همانند طراحی قبلی، با توجه به محدودیت پمپ سیال خنک کننده موجود، بیشینه دبی جرمی برای هر کانال 10 کیلوگرم بر ثانیه و افت فشار کل قبل قبول در حدود 30 درصد در نظر گرفته شده است.

تاریخچه تغییرات پارامترهای دبی جرمی و ارتفاع کانال در این طراحی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور، جستجوی حالت مطلوب از مقادیر اولیه یک کیلوگرم بر ثانیه (دبی جرمی) و یک میلی متر (ارتفاع کانال) شروع شده است. همانند طراحی قبلی، با افزایش دبی جرمی تا حدی (اینجا تا $5/8$ کیلوگرم بر ثانیه)، مقدار ارتفاع کانال ثابت مانده است. به عبارت دیگر، در ارتفاع کانال برابر یک میلی متر و دبی جرمی پایین تر از $5/8$ کیلوگرم بر ثانیه، شرایط دمایی مطابق الگوریتم برآورده نشده است. مطابق شکل، در دبی جرمی بالاتر از این مقدار، علی رغم فراهم کردن شرط دمایی، ارتفاع کانال به دلیل افت فشار کل بالا شروع به افزایش کرده است. با افزایش ارتفاع کانال، به دلیل کاهش ضریب انتقال حرارت و عدم برآورده سازی شرایط دمایی، دبی جرمی نیز افزایش می یابد. این روند افزایش مقادیر هر دو پارامتر تا حد اکثر مقدار دبی جرمی یعنی 10 کیلوگرم بر ثانیه ادامه یافته



شکل ۱۲. توزیع دما در طول کانال خنک کاری.

دو پارامتر تا جایی ادامه می یابد که شرایط دمایی و افت فشار کل در محدوده قابل قبول قرار گیرد.

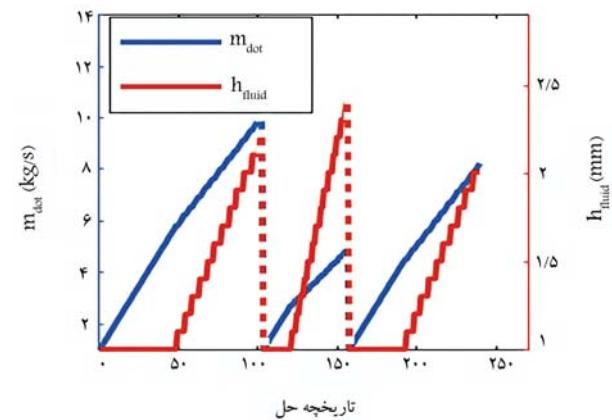
در پایان فرایند طراحی، یک سیستم خنک کاری تک کانال با ارتفاع $2/3$ میلی متر و دبی جرمی جریان $25/0$ کیلوگرم بر ثانیه طراحی شده است. مطابق الگوریتم طراحی، اولویت طراحی در گام اول تک کانال بودن سیستم خنک کاری بوده است که در این طراحی محقق شده است. در گام دوم، یافتن مقدار مطلوب دبی جرمی در محدوده قابل قبول، به شرط فراهم کردن شرایط دمایی دیواره ها بوده است. در گام آخر، کمینه ارتفاع کانال به شرط فراهم سازی افت فشار کل در حد قابل قبول بوده است. نتایج دمایی و نتایج افت فشار درون کانال خنک کاری در ادامه ارائه شده است.

شکل ۱۲ نتایج دمایی به دست آمده برای دمای بالک سیال خنک کننده، دمای فلز سمت سیال خنک کننده و دمای فلز سمت گاز داغ را نشان می دهد. مطابق شکل، بیشینه مقدار دمای فلز سمت سیال خنک کننده و سمت گاز داغ به ترتیب از 425 کلوین و 90 کلوین پایین تر است و افت فشار کل در کانال خنک کاری افت دمایی در حدود $28/94$ درصد به دست آمده است. بنابراین، کانال طراحی شده الزامات دمایی و افت فشار کل را برای فشار کاری پنج بار برآورده است.

در رابطه با نحوه تغییرات منحنی دمای بالک و دمای دیواره ها، قابل ذکر است که با توجه به ماهیت انتگرالی دمای بالک، واضح است که مقدار آن در یک کانال ثابت، پیوسته افزایشی است و با تغییرات محلی شار حرارتی و یا تغییرات محلی سطح دیفیوزر، تغییرات کمی در شیب آن ایجاد شده است. اما دمای دیواره ها کمیتی محلی است و تغییرات آن وابستگی به نسبت شدیدی با تغییر در شار حرارتی، پارامتر هندسی (قطر دیفیوزر)، سرعت جریان و دمای بالک دارد؛ به طوری که مطابق شکل ۱۲، در ناحیه ورودی دیفیوزر (ناحیه ۱ در شکل ۳)، دمای سیال خنک کننده به دلیل افزایش دمای بالک با افزایش ملایمی روبه رو بوده است و در طول ناحیه ۲، علی رغم ثابت بودن شار حرارتی و دبی جرمی، به دلیل کاهش سطح تبادل

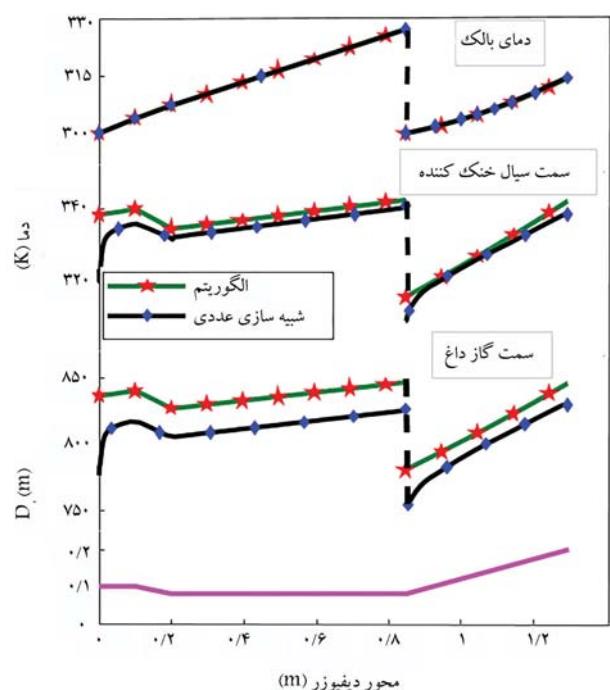
دماهی دیواره‌ها همانند مسئله قبل است؛ با این تفاوت که در این مسئله شار حرارتی در کلیه سطوح دیفیوزر ثابت بوده است. بنابراین، تغییرات دماهی دیواره‌ها در نتیجه تغییر در سطح مقطع عبور جریان (تغییر در سرعت یا ضریب انتقال حرارت جابه‌جا) و تغییر در سطح دیفیوزر (سطح تبادل حرارتی) و تغییرات دماهی بالک رخ داده است. همان‌طور که در شکل واضح است، شرایط دماهی در این سیستم خنک‌کاری برآورده شده است. همچنین، افت فشار کاتال اول (برای چهار ناحیه ابتدایی) برابر $23/11$ درصد و کاتال دوم (برای ناحیه پنجم) برابر $25/36$ درصد می‌باشند. بنابراین، محدودیت افت فشار نیز برآورده شده و می‌توان از این سیستم خنک‌کاری برای شرایط مذکور استفاده کرد. قابل ذکر است که در این بررسی، تعداد نواحی خنک‌کاری دیفیوزر محدود به پنج ناحیه است. البته با الگوریتم ارائه شده در پژوهش حاضر، به راحتی می‌توان تعداد نواحی را افزایش داد. بیشتر کردن تعداد نواحی دیفیوزر منجر به دقیق‌تر و بهینه‌تر شدن حل مسئله می‌شود.

به‌منظور ارزیابی طراحی انجام شده، شبیه‌سازی عددی جریان در کاتال‌های طراحی شده در این مثال انجام شده و نتایج مربوط به توزیع دماهی بالک، دماهی دیواره سمت سیال خنک‌کننده و سمت گاز داغ در شکل ۱۴ آورده شده است. لازم به ذکر است که برای انجام شبیه‌سازی عددی کاتال اول از شبکه‌ای با 280000 المان و برای کاتال دوم از 250000 المان استفاده شده است. همچنین، برای هر دو شبکه، پارامتر Y^+ از نرم‌افزار فلوئنت حدود پنج گزارش شده است. مطابق شکل مذکور، با صرف نظر از ناحیه ورودی کاتال‌ها، بیشینه درصد خطای میان نتایج حاصل از کد محاسباتی با نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به انتهای ناحیه ۱ می‌باشد که برای دماهی فلز سمت سیال خنک‌کننده خطای برابر $2/61$ درصد و برای دماهی فلز سمت گاز داغ برابر $3/42$ درصد می‌باشد. افت فشار کل که از شبیه‌سازی عددی به دست آمده است، برای کاتال اول $1/14$ درصد و برای کاتال دوم $2/97$ درصد می‌باشد. بنابراین، افت فشار حاصل از کد محاسباتی در مقایسه با شبیه‌سازی عددی برای کاتال اول و دوم به ترتیب دارای $4/19$ درصد و $1/54$ درصد خطای می‌باشد.



تاریخچه حل

شکل ۱۳. تاریخچه طراحی سیستم خنک‌کاری دو کاتال.



محور دیفیوزر (m)

شکل ۱۴. توزیع دما در طول کاتال خنک‌کاری.

در این پژوهش، یک الگوریتم جدید برای طراحی سیستم خنک‌کاری دیفیوزر به روش جداره‌آبی برای شار حرارتی بالا و سطوح بزرگ ارائه شد. مطابق با این الگوریتم، یک کد محاسباتی برای طراحی کاتال خنک‌کاری دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء توسعه داده شد. الگوریتم مزبور بین صورت عمل می‌کند که با در نظر گرفتن توزیع شار حرارتی و سایر الزامات، پارامترهای دبی جرمی، ارتفاع کاتال و طول کاتال خنک‌کاری را با روش سعی و خطای به‌نحوی محاسبه می‌کند که دماهی دیواره دیفیوزر از مقدار مجاز و قابل تحمل بدنی فلزی تجاوز نکرده و افت فشار کل در طول کاتال در حد قابل قبول باشد. در این تحقیق از روابط تجربی و نیمه‌تجربی موجود در مراجع برای تخمین ضرایب انتقال حرارت هم‌رفت و افت فشار در مقاطع حلقوی هم محور استفاده شد. با توجه به بازه‌های محدود هندسی و شار حرارتی یا عدد رینولدز این روابط، وجود خطای در محاسبات حاضر اجتناب ناپذیر است. بنابراین، از روش شبیه‌سازی عددی جریان برای انتخاب روابط تجربی و نیمه‌تجربی دقیق‌تر برای مسئله حاضر استفاده شد و نشان داده شد که روش میر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و روش کندا برای تخمین ضریب اصطکاک مناسب است. الگوریتم توسعه داده شده در این تحقیق قابلیت طراحی سیستم خنک‌کاری با چند کاتال خنک‌کاری را دارد. به این صورت که اگر در محدوده‌های تعیین شده برای پارامترهای دبی جرمی و ارتفاع کاتال

است. با توجه به این که در این حالت همچنان شرط افت فشار کل برآورده نشده است، به ناجار یک ناحیه (ناحیه ۵) از طراحی حاضر کنار گذاشته شده است و ابتدا طراحی سیستم خنک‌کاری برای چهار ناحیه نخست انجام شده است. به عبارت دیگر، روند طراحی با مقادیر اولیه پارامترها شروع شده و برای چهار ناحیه ابتدایی، مطابق الگوریتم طراحی، مقادیر دبی جرمی و ارتفاع کاتال را به دست آورده است که این مقدار برابر $4/9$ کیلوگرم بر ثانیه و $2/4$ میلی‌متر بوده است. در ادامه، یک کاتال جداگانه برای ناحیه ۵ طراحی شده است. روند تغییرات دبی جرمی و ارتفاع کاتال مشابه با تغییرات آنها در طراحی کاتال خنک‌کاری اول بوده است و پارامترهای ارتفاع کاتال برابر دو میلی‌متر و دبی جرمی جریان برابر $8/2$ کیلوگرم بر ثانیه محسوبه شده است.

شکل ۱۴ توزیع دماهی بالک سیال خنک‌کننده، دماهی فلز سمت سیال خنک‌کننده و دماهی سمت گاز داغ را نشان می‌دهد. در این طراحی به دلیل دو کاتال بودن سیستم خنک‌کاری در ورودی ناحیه ۴، شرط دماهی مقدار دهی اولیه شده است. بنابراین، دماهی بالک در این ورودی برابر 30°C است. تغییرات دماهی بالک و تغییرات

• علائم یونانی	P_r : عدد پرانتل؛	r : نواحی دیفیوزر؛	t : ضخامت دیواره m .	خنک کاری توان یک کانال خنک کاری طراحی کرد، الگوریتم در یک حلقه تکرار برای تعداد نواحی کمتر، کانال خنک کاری طراحی می کند تا جایی که برای تسامی نواحی، سیستم خنک کاری طراحی شده باشد. در بخش نتایج این تحقیق، دو نمونه طراحی سیستم خنک کاری با الگوریتم حاضر ارائه شد. در مسئله اول، توزیع شار حرارتی متفاوت روی نواحی مختلف دیفیوزر درنظر گرفته شده بود و یک سیستم خنک کاری تک کاناله توسط کد محاسباتی طراحی شد. همچنین، در مسئله بعدی که شار حرارتی بحرانی در کلیه سطوح دیفیوزر اعمال شده بود، در نهایت توسط کد محاسباتی یک سیستم خنک کاری دو کاناله طراحی شد. به عبارت دیگر، در مسئله دوم با توجه به قیدهای بیشینه دبی جرمی و بیشینه افت فشار مجاز، امکان طراحی یک سیستم خنک کاری تک کاناله وجود نداشته و سیستم خنک کاری دو کاناله طراحی شده است. در نهایت، تحلیل های دمایی و سیستم خنک کاری دو مورد بررسی قرار گرفت و صحبت طراحی ها با شبیه سازی عددی مورد تایید قرار گرفت.
ΔP_r : افت فشار کل %	ϵ : زبری سطح m	$P_{a.s}$: لزجت دینامیکی	\bar{v} : سرعت متوسط m/s	
h_g : ضریب انتقال حرارت همرفت سیال گاز داغ $W/m^4.K$	$Pa.s$: چگالی kg/m^3	ρ : چگالی kg/m^3	a : نسبت قطر حلقوی	
K : ضریب انتقال حرارت رسانش $W/m.K$	D : قطر m	f : ضریب اصطکاک دارسی		
L : طول کانال m	m : دبی جرمی جریان kg/s	P : فشار Pa	Re : عدد رینولدز	A : سطح مقطع m^2
q : شار حرارتی W/m^2	T : دما	h_w : ضریب انتقال حرارت همرفت $W/m^2.K$	$J/kg.K$: ظرفیت گرمایی ویژه J/kg	C_p : قدرت هیدرولیکی m
Re : عدد رینولدز	ad : آدیاباتیک	K_{st} : ضریب انتقال حرارت رسانش جداره $W/m.K$	M : عدد ماخ	h : ارتفاع کانال m
w : سمت سیال خنک کننده	b : بالک		Nu : عدد ناسلت	
wg : سمت گاز داغ	g : گاز داغ			

پانوشت ها

1. High Altitude Test Facility
2. Regenerative Cooling
3. Water-Jacket
4. Matlab
5. Ansys Workbench
6. Ansys Geometry
7. Ansys Meshing
8. Ansys Fluent
9. Coupled

منابع (References)

1. Kumaran, R.M., Sundararajan, T. and Manohar, D.R., 2010. Performance evaluation of second-throat diffuser for high-altitude-test facility. *Journal of Propulsion and Power*, 26(2), pp.248-258. <https://doi.org/10.2514/1.43298>.
2. Park, B.H., Lim, J., Park, S., Lee, J.H. and Yoon, W.S., 2012. Design and Analysis of a second-throat exhaust diffuser for altitude simulation. *Journal of Propulsion and Power*, 28(5), pp.1091-1104. <https://doi.org/10.2514/1.B34342>.
3. Marchi, C.H., Laroca, F., Silva, A.F.C.D. and Hinckel, J.N., 2004. Numerical solutions of flows in rocket engines with regenerative cooling. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 45(7), pp.699-717. <https://doi.org/10.1080/10407780490424307>.
4. Ulas, A. and Boysan, E., 2013. Numerical analysis of regenerative cooling in liquid propellant rocket engines. *Aerospace Science and Technology*, 24(1), pp.187-197. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.11.006>.
5. Brewster, M.Q., 1989. Radiation-stagnation flow model aluminized solid rocket motor internal insulator heat

- transfer. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 3(2), pp.132-139. <https://doi.org/10.2514/3.139>.
6. Li, K.Z., Shen, X.T., Li, H.J., Zhang, S.Y., Feng, T. and Zhang, L.L., 2011. Ablation of the carbon/carbon composite nozzle-throats in a small solid rocket motor. *Carbon*, 49(4), pp.1208-1215. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.11.037>.
 7. Fouladi, N., Mirbabaei, S.A. and Khosroojom, M., 2019. Experimental Study of the supersonic exhaust diffuser spray cooling system. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(7), pp.61-70. [In Persian]. <https://doi.org/10.22060/mej.2019.15138.6038>.
 8. Massier, P.F. and Roschke, E.J., 2013. Experimental investigation of exhaust diffusers for rocket engines. *Progress In Astronautics and Rocketry: Liquid Rockets and Propellants*, 2, pp.3-75. <https://doi.org/10.2514/4.864759>.
 9. Yim, K., Kim, H. and Kim, S., 2014. A Numerical study on flow and heat transfer characteristics of supersonic second throat exhaust diffuser for high altitude simulation. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 18(5), pp.70-78. <https://doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.5.070>.
 10. Group, P.R., 2016. Arash22 motor development serial tests, space transportation research institute (STRI). Upper Stage IranSat2 Project, Report Number: STRI-SC9SDC11Y/01-R-I-03/49. [In Persian].
 11. Farahani, M., Fouladi, N. and Mirbabaei, A., 2019. Design and analysis of a cooling system for a supersonic exhaust diffuser. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233(14), pp.5253-5263. <https://doi.org/10.1177/0954410019840970>.
 12. Group, P.R., 2020. Thermal protection of diffuser metal body using a cooling system. Tehran, Space Transportation Research Institute, Report Number: Stri-Ssd9980-01-R. [In Persian].
 13. Jo, S., Han, S., Kim, H.J. and Yim, K.J., 2021. Numerical study on the flow and heat transfer characteristics of a second throat exhaust diffuser according to variations in operating pressure and geometric shape. *Energies*, 14(3), <https://doi.org/10.3390/en14030532>.
 14. Fouladi, N., Farahani, M. and Mahdian, M., 2022. Numerical Investigation of coolant flow pressure effect on the water jacket design for large scale diffuser at high heat fluxes. *Space Science, Technology & Applications*, 2(1), pp.34-50. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/JSSSTA.2022.328818.1077>.
 15. Mahdian, M., 2021. Design and analysis of an optimal cooling system for a supersonic exhaust diffuser using a water jacket. Master's Thesis, Dept. Aerospace Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran. [In Persian].
 16. Dirker, J. and Meyer, J.P., 2004. Convection heat transfer in concentric annuli. *Experimental Heat Transfer*, 17(1), pp. 19-29. <https://doi.org/10.1080/08916150490246528>.
 17. Swamee, P.K., Aggarwal, N. and Aggarwal, V., 2008. Optimum design of double pipe heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(9-10), pp.2260-2266. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.028>.
 18. Dittus, F.W. and Boelter, L.M.K., 1930. University of California publications on engineering. *University of California Publications in Engineering*, 2, p.371.
 19. Wiegand, J.H., 1945. Discussion on annular heat transfer coefficients for turbulent flow. *AIChE*, 41, pp.147-153. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950399020515328>.
 20. Gnielinski, V., 2009. Heat transfer coefficients for turbulent flow in concentric annular ducts. *Heat Transfer Engineering*, 30(6), pp.431-436. <https://doi.org/10.1080/01457630802528661>.
 21. Jones, O.C. and Leung, J.C.M., 1981. An improvement in the calculation of turbulent friction in smooth concentric annuli. *Journal of Fluids Engineering*, 103(4), pp.615-623. <https://doi.org/10.1115/1.3241781>.
 22. Bhatti, M.S., 1987. *Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer In Ducts*. Handbook of single-phase convective heat transfer [Preprint]. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573387448915440896>.
 23. Kaneda, M., Yu, B., Ozoe, H. and Churchill, S.W., 2003. The characteristics of turbulent flow and convection in concentric circular annuli. *Part I: Flow* *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(26), pp. 5045-5057. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00365-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00365-X).
 24. Bergman, T.L., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. and Lavine, A.S., 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6 Ed., John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?id=vvyIoXEywMoC>.
 25. MATLAB version 9.4.0.813654 (R2018a), In, The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts.
 26. Ansys Workbench (2019 R1)- Fluid Flow (Fluent)-in 2019.
 27. Vicente, P.G., Garcia, A. and Viedma, A., 2004. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(4), pp. 671-681. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.005>.
 28. Córcoles- Tendero, J., Belmonte, J., Molina, A. and Almendros-Ibáñez, J., 2018. Numerical simulation of the heat transfer process in a corrugated tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 126(July 2017), pp. 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.028>.
 29. Guide, A.F.T., 2013. Ansys fluent tutorial guide. Ansys INC nd, 15.
 30. Fouladi, N., Mohamadi, A. and Rezaei, H., 2016. Numerical design and analysis of supersonic exhaust diffuser in altitude test simulator. *Modares Mechanical Engineering*, 16(8), pp.159-168. [In Persian]. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.8.31.8>.
 31. Mirbabaei, A., 2018. Design and analysis of hot gas diffuser for high altitude simulation. Master of Science Thesis, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Sharif University of Technology. [In Persian].

ارزیابی چیدمان سطحی خودروهای مولکولی به کمک شبیه‌سازی درشت‌دانه دینامیک مولکولی

مهمنسی واعظی (دانشجوی دکتری)

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف

حسین نجات پیشکاری* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

محمد رضا اجتها (استاد)

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهمنسی مکانیک شریف (نهم ۱۴۰۰)
دوری ۳۰۰ شماره ۱، ص ۳۹-۶۰، پژوهشی

استفاده از مدل درشت‌دانه در شبیه‌سازی دینامیک مولکولی امکان بررسی نانوساختارها را با صرف زمان و هزینه کمتر فراهم می‌سازد. در پژوهش حاضر، مدل درشت‌دانه‌ای برای توصیف چیدمان سطحی نانو‌خودروها ارائه می‌گردد. در این مدل، فرض می‌شود که در برهمکنش بین نانو‌خودروها، پیکربندی تعادلی نانو‌خودروها را ایفا می‌کند. آنالیز اثری پتانسیل بین دو نانو‌خودرو، پیکربندی تعادلی نانو‌خودروها را توصیف می‌کند. با شبیه‌سازی خوش‌هایی که شامل دو نانو‌خودرو در دمای مختلف از ۲۰°C تا ۶۰°C کلوین است، پایداری حرارتی پیکربندی‌های تعادلی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در دمای ۲۰°C، پیکربندی تعادلی نانو‌خودروها پایدار باقیمانده و در دمای ۴۰°C کلوین نانو‌خودروها می‌توانند از یک پیکربندی تعادلی به پیکربندی دیگر تغییر وضعیت دهند. این در شرایطی است که در دمای ۶۰°C کلوین و بالاتر، اثری حرارتی منتقل شده به دو نانو‌خودرو باعث جذابی آنها می‌شود. در گام بعد، چیدمان سطحی خوش‌هایی شامل چهار و هشت نانو‌خودرو بررسی می‌گردد. پیش‌بینی‌های به دست آمده از مدل درشت‌دانه، مطابق با نتایج مطالعات قبلی، پیرامون مدل تمام - اتم خوش‌هایی شامل نانو‌خودروهای است.

mehranaezi@sharif.edu
nejat@sharif.edu
ejtehadi@sharif.edu

وازگان گلیدی: شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، مدل درشت‌دانه، نانو‌خودرو،
ماشین‌های مولکولی، خودسازمانی روی سطح.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های دقیق ساخت نانومواد با ابعاد کوچک، ساخت با رویکرد پایین به بالا است،^[۱] که در آن نانومواد از طریق خودسازمانی^۱ پیش‌سازه‌های مولکولی به دست می‌آیند.^[۲] به منظور مونتاژ موقتی آمیز نانوساختار موردنظر از طریق روش ساخت پایین به بالا، ابتدا ویزگی‌های مولکولی‌های پیش‌سازه که در طی فرآیند خودآرایی به یکدیگر متصل می‌شوند، باید شناسایی شوند.^[۳] در حال حاضر، ارتباط بین ساختار مولکولی‌های پیش‌سازه و نتیجه فرآیند خودآرایی توجه بسیاری از پژوهش‌ها را به خود جلب کرده است.^[۴-۷] از حوزه‌هایی که به منظور ساخت نانومواد با دیدگاه پایین به بالا مورد توجه قرار گرفته است، طراحی و سنتز ماشین‌های مولکولی حرکت‌کننده روی سطح می‌باشد.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۲۵/۱۰/۱۴۰۰، اصلاحیه ۲۱/۱/۱۴۰۲، پذیرش ۳۰/۱/۱۴۰۲.

استناد به این مقاله:

واعظی، مهران، نجات پیشکاری، حسین و اجتها (دکتری)، محمد رضا، ۱۴۰۳. ارزیابی چیدمان سطحی خودروهای مولکولی به کمک شبیه‌سازی درشت‌دانه دینامیک مولکولی. دانشکده مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰۰، ص ۴۶-۳۹.

DOI:10.24200/J40.2023.61727.1669

می شود. پیش‌بینی‌های حاصل از مدل درست‌دانه‌ای با نتایج مطالعات قبلی که روی مدل تمام - اتم ناخودروها انجام شده مقایسه می‌گردد. در نهایت، امکان استفاده از این مدل برای سیستم‌های بزرگ تر شامل چهار و هشت ناخودرو به طور جداگانه بررسی می‌شود.

۲. روش‌های محاسباتی

در مدل درشت دانه‌ای ارائه شده، فرض می‌شود که نانوخرودروها بیشترین برهه‌کنش را از طریق چرخ‌ها با یکدیگر دارند. از این‌رو مطابق شکل ۱، چهار ذره متناظر با چهارچرخ نانوخرودرو در نظر گرفته می‌شوند. از آنجایی که در نانوخرودروها، چرخ‌ها به‌کمک پیوندهای شیمیایی به یکدیگر مقید شده‌اند، در مدل درشت دانه‌ای نیز چرخ‌ها با بخش‌های پیوندی و خمش زاویه‌ای هارمونیک با ضریب سختی زیاد (به ترتیب 10000 eV/rad^2 و 10000 eV/A^3) به‌کمک متصال می‌شوند، تا در حین شبیه‌سازی ساختارهای صلبی وجود داشته باشد. همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم، پیوندهایی که طول نانوخرودرو مستطیلی شکل را مشخص می‌کنند، فاصله تعادلی $22/8\text{ \AA}$ دارند و پیوندهایی که عرض نانوخرودرو را مشخص می‌کنند دارای طول تعادلی $12/5\text{ \AA}$ می‌باشند. مقادیری که برای طول تعادلی پیوند بین ذرات (چرخ‌ها) در نظر گرفته شده است، معادل فاصله مرکز جرم چرخ‌های نانوخرودرو در مدل تمام - انم می‌باشد.^[۲۴] زاویه‌های تعادلی در جملات خمش زاویه‌ای نیز برابر 90° درجه در نظر گرفته شده، تا ذرات مشابه چرخ‌های نانوخرودرو روی رئوس یک مستطیل قرار گیرند. لازم به ذکر است که جرم ذرات، معادل جرم 6 \AA اتم کربن (جرم فولرین) در نظر گرفته شده است.

برای تعریف برهمکنش بین ذرات چرخ در مدل درشت دانه، ابتدا انرژی برهمکنش بین دو فولرین بر حسب فاصله بین مرکز چرم آنها محاسبه شد. بدین منظور با تابت نگه داشتن یک فولرین و جایجاً یک بعدی فولرین دیگر، انرژی برهمکنش بین دو مولکول از طریق محاسبه مجموع انرژی پتانسیل بین اتم های آنها به دست می آید. برهمکنش بین اتم های دو فولرین توسط تابع انرژی پتانسیل لنارد - جونز $2-6$ تعریف شده و پارامترهای آن $\epsilon = 2/4\text{meV}$ و $\sigma = 3/4\text{\AA}$ و در نظر گرفته شده است. [۳۵] به این ترتیب مطابق شکل ۲، انرژی برهمکنش بین دو مولکول فولرین بر حسب فاصله مرکز چرم آنها به دست می آید. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، با استفاده از تابع مورس، یک منحنی بر انرژی برهمکنش دو فولرین برازش کرده و این گونه برهمکنش بین دو فولرین در شکل ۲، توسط تابع پتانسیل مورس با شعاع قطع 20 آنگستروم تعریف می گردد.

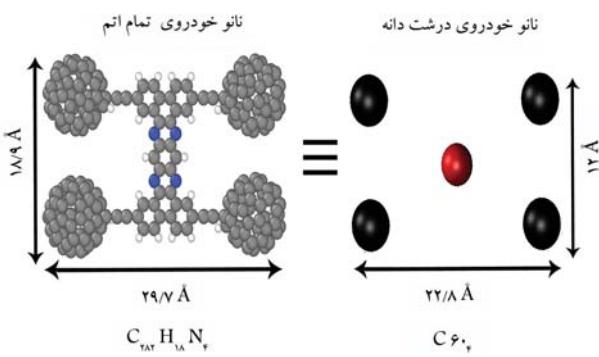
مولکولی به نام «نانو تراک» و «نانو کار» توسط جیمز توز و همکارانش^[۱۶] سنتز شد، که در آنها از چهار مولکول فولرین به عنوان چرخ استفاده شده است. ساختار کروی فولرین، این مولکول را به گزینه‌ی مناسبی جهت استفاده در نانو خودروها تبدیل می‌کند. در مطالعات بعدی، از ساختارهای دیگری نظری پی - کربورین،^[۱۷] ادمستین^[۱۸] و ترکیبات آلی - فلزی^[۱۹] به عنوان چرخ‌های نانو خودرو استفاده شده

است. به لحاظ آزمایشگاهی، جابجایی این نانوماشین‌ها روی سطح معمولاً از طریق میدان الکتریکی ناشی از میکروسکوپ تونلی رو بشی^۲ صورت می‌گیرد.^[۱۹] از این روش در مسابقات نانوخودروها که برای اولین بار در سال ۲۰۱۷ در فرانسه برگزار شد، استفاده گردید.^[۲۰]

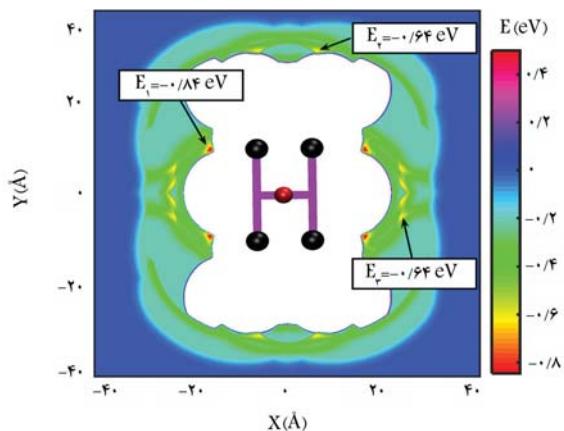
آکیمو و همکارانش^[۲۱] اولین تلاش تئوری به منظور ارزیابی حرکت نانوخودروها روی سطح را انجام دادند. در این پژوهش، حرکت نانوخودروها روی سطح طلا در دمای بالای ۴۰۰ کلوین، دامنه‌ی جابجایی قابل توجهی پیدا کرد که با مشاهدات آزمایشگاهی تطابق دارد. با توجه به بررسی حرکت نانوخودروها روی سطوح دو بعدی مانند گرافن^[۲۲] و نیتریبدیبور^[۲۳] این نتیجه حاصل می‌شود که در دمای یکسان نانوخودروها روی این سطوح نسبت به سطوح فلزی، ضریب انتشار و جابجایی بیشتری را تجربه می‌کنند. دسته دیگری از مطالعات، روی هدایت هدفمند حرکت نانوخودروها روی سطح انجام گرفته است. نعمتی و همکارانش^[۲۴-۲۵] به کمک روش دینامیک مولکولی حرکت جهت دار نانوخودرو را تحت شرایط مختلفی گزارش کردند. از جمله شرایطی که باعث حرکت جهت دار نانوخودروها می‌شود استفاده از پله‌های اتمی در سطح،^[۲۶] سطح ترکیبی،^[۲۷] ایجاد گردایان دمایی^[۲۵] و گردایان کرنش^[۲۸] در سطح می‌باشد. علاوه بر روش‌های مبتنی بر دستکاری سطح، حرکت جهت دار سطحی، دی‌نوعی، نانوخودرو با شش، هشت، نینه‌گاش، شده است.^[۱۷]

برخی از پژوهش‌های آزمایشگاهی، خودآرایی مولکولی نانوخدروها روی سطح مورد توجه قرار گرفته است. دریکی از این مطالعات، نوعی ماشین مولکولی ساخته شده که از دو قسمت مکمل تشکیل می‌گردد که به کمک پیوند هیدروزنسی و یا در مدلی دیگر با بهره‌منش فاز - لیکاند به یکدیگر متصل می‌شوند.^[۱۱] استفاده از این بهره‌منش‌های نایپوندی به دلیل جهت‌پذیری، فضایی مناسب برای ساخت نانوخدروها مورد توجه هستند. در ادامه، با ایجاد دو عامل برقرارکننده پیوند هیدروزنسی در واحد ساختاری این نانوخدروها، زنجیره خود مونتاژ تولید می‌شود، که این زنجیره «نانوقطار» نامیده شده است.^[۱۲] در مشاهدات آزمایشگاهی طول زنجیره خود مونتاژ به دست آمده، از این روش تا چند میکرومتر اندازه‌گیری شده است. در شرایطی که از خودآرایی در ساخت ماشین‌های مولکولی استفاده شده است، چیدمان و آرایش این ساختارها روی سطح کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، در آزمایشگاه با مجموعه‌ای از نانوخدروها روی سطح مواجه هستیم.^[۱۳] شناخت بهره‌منش نایپوندی بین نانوخدروها و چیدمان سطحی آنها، می‌تواند در طراحی نانوساختارهای سطحی مفید واقف شود.

روش متدالوی که در بررسی حرکت سطحی مولکولی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تمام - اتم است. [۳۴-۳۰] استفاده از این روش که در آن غالباً از میدان نیروی مکانیک مولکولی^۳ [۲۱] استفاده می‌شود، نیازمند صرف وقت و هزینه قابل توجهی می‌باشد. در پژوهش حاضر، به‌منظور افزایش سرعت محاسبات جهت تعیین آرایش سطحی نانوخودروها و نیز ممکن بررسی آرایش سطحی نانوخودروهای دیگر، اقدام به طراحی مدل درشت دانه‌ای برای شبیه‌سازی ماشین‌های مولکولی بر پایه فولرین شده است. در ابتدا، برهمکنش سطحی دو نانوخودرو و پیکر بندهای تعادلی آنها توسط مدل درشت‌دانه‌ای به دست می‌آید. با تغییر دمای شبیه‌سازی، پایداری حرارتی این پیکربندی‌های تعادلی در دمای‌های مختلف ارزیابی



شکل ۱. نمایش مدل تمام - اتم و درشت‌دانه نانو‌خودرو.

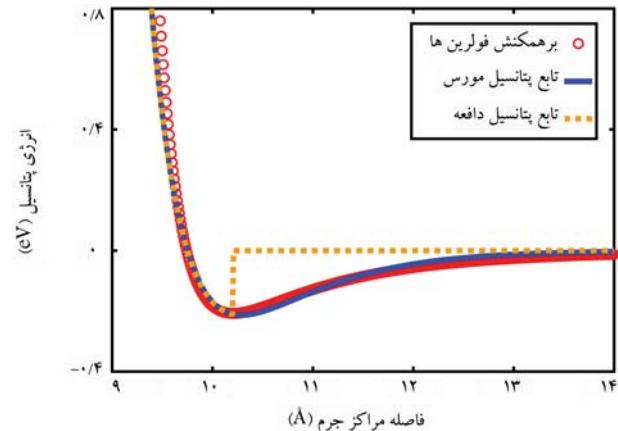


شکل ۳. کمترین انرژی پتانسیل بین دو نانوخدرو در حالی که، نانوخدرو مرکز در مبدأ مختصات قرار گرفته و نانوخدرو محیطی در اطراف آن به نقاط مختلف جایجا شده و نسبت به آن در زوایای مختلف قرار می‌گیرد.

نانوخدروی دیگر، مکان‌های مختلف در اطراف نانوخدروی مرکزی، نانوخدروی دوم حول محور عمود بر در هر نقطه در اطراف نانوخدروی مرکزی، نانوخدروی دوم حول محور عمود بر سطح ۹۰ درجه می‌چرخد و در هر موقعیت انرژی پتانسیل بین دو نانوخدرو محاسبه می‌گردد. برای هر نقطه در اطراف نانوخدروی مرکزی، کمترین انرژی پتانسیل بین دو نانوخدرو که از چرخش نانوخدروی محیطی به دست آمده ثبت می‌گردد. به این طریق، ما در فواصل مختلف دو نانوخدرو، کمترین انرژی پتانسیل برهمکنش دو نانوخدرو را به ازای پیکربندی‌های متفاوت (زاویه‌های نسبی مختلف دو نانوخدرو) به دست می‌آوریم. لازم به ذکر است که انرژی برهمکنش بین دو نانوخدرو از طریق پتانسیل مورس و پتانسیل دافعه معروفی شده، در شکل ۲ محاسبه می‌شود. نانوخدروی محیطی با گام‌های ۱۰ درجه می‌چرخد. علت چرخش ۹۰ درجه‌ای نانوخدروی در هر نقطه با گام‌های ۱ درجه می‌چرخد.

مانند شکل ۳، کمترین انرژی پتانسیل بین دو نانوخدرو در فواصل مختلف مرکز جرم در پیکربندی‌های متفاوت را نشان می‌دهد. طبق این شکل، با توجه به تقارن موجود در نانوخدرو تقریباً سه نوع نقطه کمینه موضعی وجود دارد. انرژی برهمکنش بین دو نانوخدرو در این حالات تعادلی، معادل 8.4° ، 56° و 64° الکترون‌رلت است. براساس شکل ۳، در حالات تعادلی ۱ و ۲، که به ترتیب دارای انرژی پتانسیل 8.4° و 56° الکترون‌رلت هستند، مرکز جرم نانوخدروی محیطی در نقاط در این حالات راستای محور دو نانوخدرو عمود بر یکدیگر می‌باشد.

به‌منظور نمایش بهتر پیکربندی‌های تعادلی دو نانوخدرو، موقعیت نسبی آنها در سه حالت تعادلی نام برده شده، در شکل ۴ به نمایش درآمدند. براساس مدل درشت‌دانه ارائه شده برای نانوخدروها، پیکربندی موازی می‌باشد. با توجه به انرژی پیکربندی تعادلی دو نانوخدرو می‌باشد. در پیش‌گذشتی که اخیراً (۰/۶۴ eV)، این ساختارها از پایداری یکسانی برخوردارند. در پیش‌گذشتی که اخیراً روى مدل تمام - اتم نانوخدروها انجام دادیم،^[۳۹] سه حالت تعادلی برای سیستم دو نانوخدرو یافت شد. طبق این تحقیق، موقعیت نسبی دو نانوخدرو در حالات تعادلی مشابه پیکربندی‌های تعادلی به دست آمده از حالت درشت‌دانه می‌باشند. از طرفی،



شکل ۲. انرژی برهمکنش دو مولکول فولرین بر حسب فاصله مرکز جرم آنها.

$$U(x) = D(e^{(-\alpha(x-x_0))} - 2e^{(-\alpha(x-x_0))}) \quad (1)$$

در رابطه ۱ ضرایب تابع مورس برازش شده، عبارت‌اند از $\alpha = 1/29 \text{ \AA}^{-1}$ ، $D = 10/29 \text{ \AA}^0$ و $x_0 = 10/29 \text{ \AA}$.

همانطورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تابع مورس استفاده شده برای تعریف پتانسیل بین دو مولکول و تابع پتانسیل جهت ایجاد دافعه در مرکز نانوخدرو نیز بر حسب فاصله ذرات رسم شده‌اند. مشکلی که در شبیه‌سازی نانوخدرو چهار ذره‌ای با آن مواجه هستیم، در هم فرورفت نانوخدروهاست. مطابق نمایش تمام - اتم نانوخدرو (شکل ۱)، فواصل بین چرخ‌ها توسط شاسی اشغال شده است و چرخ‌های نانوخدروی دیگر نمی‌توانند در این فواصل قرار گیرند. اما هنگام استفاده از مدل درشت‌دانه با چهار ذره، چرخ‌های یک نانوخدرو درون بخش داخلی نانوخدروی مقابله قرار می‌گیرند که در حالت طبیعی این مکان با شاسی نانوخدرو اشغال شده است.

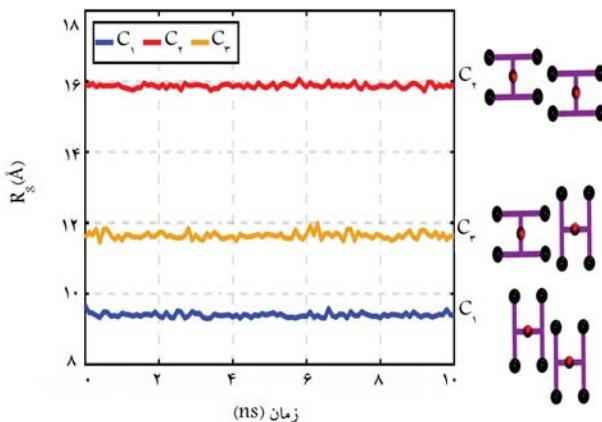
به‌منظور حل این مشکل، یک ذره به جرم شاسی در مرکز نانوخدرو تعییه می‌شود (ذره قرمزنگ در شکل ۱). تفاوت این ذره با چرخ‌ها در این است که این ذره صرفاً برهمکنش دافعه با ذراتی که به آن نزدیک می‌شوند برقرار می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، انرژی پتانسیل برهمکنش سایر چرخ‌ها با این ذره می‌مرکزد در واقع همان تابع پتانسیل مورس است که در آن شعاع قطع به نحوی انتخاب شده که صرفاً به نیروی دافعه اجازه اثر می‌دهد و مانع از پیکربندی نامطلوب دو نانوخدرو می‌شود.

در مدل ارائه شده، به‌منظور افزایش سرعت شبیه‌سازی‌ها زیرلایه‌ای در نظر نمی‌گیریم و مسئله در دو بعد حل می‌شود. از ترموستات نوز - هور^[۲۷, ۳۶] برای ایجاد دمای ثابت در شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم‌افزار لپیس^[۲۸] پیاده‌سازی شده است که از روش انتگرال‌گیری و رله سرعتی برای حل معادلات حرکت استفاده می‌گردد. برای شبیه‌سازی مدل درشت‌دانه ای نانوخدروها از گام زمانی ۱ فرمتوئیه استفاده می‌گردد.

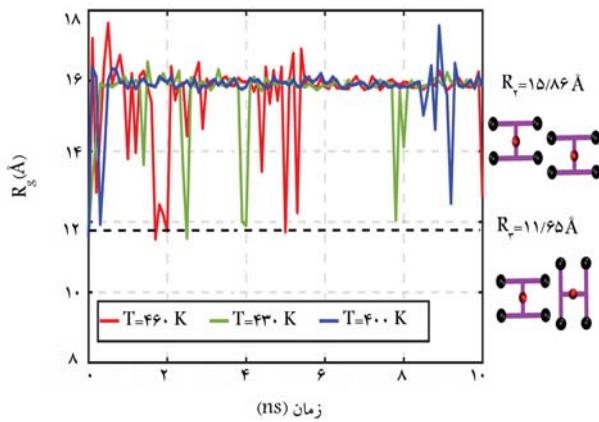
۳. بحث و نتایج

۳.۱. انرژی پتانسیل برهمکنش دو نانوخدرو

به‌منظور درک موقعیت تعادلی دو نانوخدرو، آنالیز انرژی پتانسیل انجام شد. در این آنالیز، با استفاده از مدل درشت‌دانه، یک نانوخدرو در مبدأ مختصات قرار می‌گیرد.



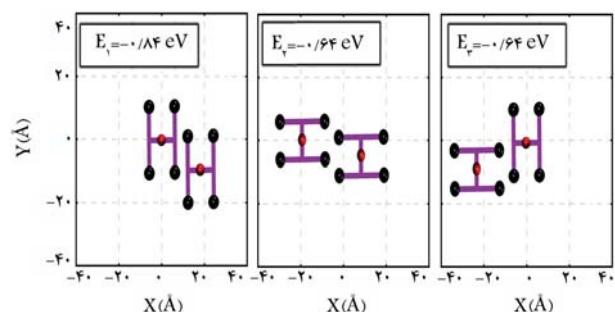
شکل ۵. شعاع ژیراسیون مربوط به پیکربندی های تعادلی شماره ۱، ۲ و ۳ در حین شبیه سازی در دمای ۲۰۰ کلوین.



شکل ۶. شعاع ژیراسیون مربوط به خوش دو تایی نانو خودرو در دمای ۴۰۰، ۴۳۰ و ۴۶۰ کلوین بر حسب زمان شبیه سازی.

شماره ۱، ۲ و ۳ قرار داده شده اند، پیکربندی خود را تا پایان شبیه سازی نانو ثانیه حفظ می کنند. از طرفی، پایداری حرارتی وضعیت های تعادلی در این دما، با مطالعات قبلی پیرامون پایداری پیکربندی های تعادلی نانو خودرو های تمام - اتم سازگاری دارد. [۲۹]

در گام بعدی، پیکربندی های تعادلی دو نانو خودرو را در دمای ۴۰۰ و ۴۳۰ کلوین مورد آزمایش قرار می دهیم. شکل ۶، شعاع ژیراسیون دو نانو خودرو را در دمای های مذکور و در طول ۱۰ نانو ثانیه شبیه سازی نشان می دهد. طبق این شکل، شعاع ژیراسیون متناظر با پیکربندی تعادلی شماره ۲، در حین شبیه سازی مقادیر کمتری پیدا می کند که به معنای تغییر وضعیت نسبی نانو خودرو ها در طول شبیه سازی می باشد. همان طور که در تغییرات شعاع ژیراسیون خوش دو تایی نانو خودرو مشخص است، دو نانو خودرو در بازه های زمانی مشخص مقدار شعاع ژیراسیون (۱۱/۶۵ Å) متناظر با پیکربندی شماره ۳ را پیدا می کنند. در واقع در بازه های زمانی کوتاهی وضعیت نسبی از پیکربندی تعادلی شماره ۲ به پیکربندی تعادلی شماره ۳ تغییر می کند. با افزایش دما به ۴۶۰ کلوین، بسامد تغییر وضعیت نسبی نانو خودروها افزایش می یابد، زیرا در این دما با افزایش انرژی گرمایی، دو نانو خودرو این توانایی را پیدا می کنند تا مطابق با شکل ۳، از نقاط کمینه انرژی پتانسیل خارج شده و وضعیت های تعادلی با انرژی متفاوتی را تجربه کنند. تغییر وضعیت نسبی نانو خودروها و تبدیل پیکربندی های تعادلی به یکدیگر در بررسی های تمام - اتم



شکل ۴. موقعیت نسبی دو نانو خودرو در پیکربندی های متناظر با کمینه انرژی پتانسیل.

انرژی حالات تعادلی در مدل تمام - اتم، کمی با آنچه از مدل درشت دانه به دست می آید، متفاوت است. تفاوت مقادیر انرژی در مدل درشت دانه و تمام - اتم مربوط به در نظر گرفتن ذره مرکزی در نانو خودرو درشت دانه شده است. به طور خلاصه، مدل درشت دانه ارائه شده برای نانو خودرو موقعیت نسبی تعادلی دو نانو خودرو را درست پیش بینی کرده، اما مقدار انرژی حالات تعادلی را کمی متفاوت تخمین می زند.

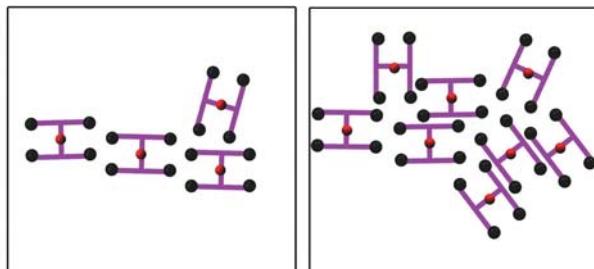
۲.۳. پایداری حرارتی پیکربندی های تعادلی

طبق آنچه در بررسی مدل درشت دانه - اتم نانو خودروها مشخص شده است، [۲۹] با توجه به اینکه پیکربندی های تعادلی متناظر با نقاط کمینه موضعی انرژی پتانسیل هستند، در اثر افزایش دما نانو خودروها می توانند از یک حالت تعادلی (یک کمینه انرژی موضعی)، خارج شده و پیکربندی تعادلی دیگری را پیدا کنند. با توجه به پژوهش ذکر شده، دو نانو خودرو در دمای ۲۰۰ کلوین و پایین تر پیکربندی تعادلی خود را حفظ می کنند. در دمای ۴۰۰ کلوین، تغییر پیکربندی های تعادلی به یکدیگر گزارش شده و در دمای های بالا (۶۰۰ کلوین و بیشتر)، با توجه به انرژی حرارتی زیاد، جدا شدن دو نانو خودرو از یکدیگر مشاهده می گردد. [۲۹]

به منظور بررسی صحبت مدل درشت دانه در تخمین پایداری حرارتی پیکربندی های تعادلی، دو نانو خودرو درشت دانه در دمای های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کلوین مورد بررسی قرار گرفتند. کمیتی که برای بررسی پایداری حرارتی ساختارهای تعادلی مورد ارزیابی قرار می گیرد، شعاع ژیراسیون مربوط به خوش دو تایی نانو خودرو است که از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\mathbf{r}(i) - \mathbf{r}_{cm}|^2} \quad (2)$$

در رابطه ای اخیر، \mathbf{r} و \mathbf{r}_{cm} به ترتیب مختصات مرکز جرم خوش و مختصات مرکز جرم نانو خودروهای درون خوش می باشند. همچنین، N تعداد نانو خودروهای موجود در خوش می باشد. همان طور که در این حالت برابر ۲ در نظر گرفته می شود. مطابق شکل ۵، در دمای ۲۰۰ کلوین هر یک از پیکربندی های تعادلی از خود شعاع ژیراسیون منحصر به فردی را نشان می دهدند. در پیکربندی شماره ۱، با توجه به اینکه ذرات در فاصله نزدیک تری نسبت به مرکز جرم خوش قرار می گیرند، شعاع ژیراسیون نسبت به سایر پیکربندی ها کمتر است ($R_g = 9/39 \text{ Å} = 11/65 \text{ Å}$). در پیکربندی های تعادلی شماره ۲ و ۳، شعاع ژیراسیون به - ترتیب مقادیر متوسط $15/86 \text{ Å}$ و $11/65 \text{ Å}$ را دارد. با توجه به ثابت بودن مقادیر شعاع ژیراسیون در شبیه سازی با پیکربندی های تعادلی مختلف در دمای ۲۰۰ کلوین، این نتیجه به دست می آید که این پیکربندی ها در این دما پایدار هستند. نانو خودروهایی که در ابتدا در وضعیت های نسبی تعادلی



الف) هشت تایی؛

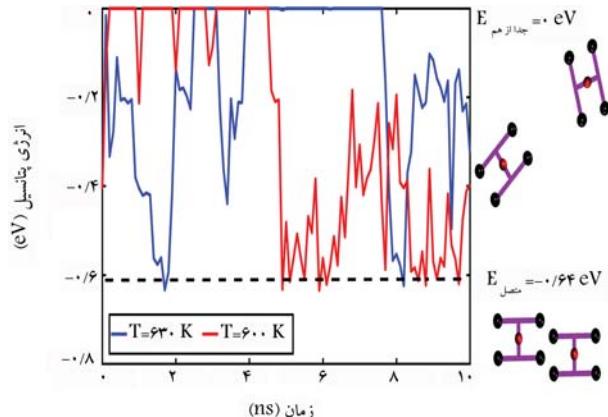
ب)

چهارتایی نانو خودرو، در دمای ۲۰۰ کلوین. شکل ۸. ساختارهای نهایی به دست آمده از شبیه‌سازی خوشه‌های الف و ب در دمای ۲۰۰ کلوین.

نانو خودرو به دست آمد. در شکل ۸، ساختار نهایی نانو خودروها پس از ۲۰ نانوثانیه مشاهده می‌شود.

مطابق با شکل ۸، در اکثر موارد وضعیت نسبی هر زوج نانو خودرو مجاور، مشابه اتصالات تعادلی به دست آمده در قسمت‌های قبل می‌باشد. در شکل ۸ ب، ملاحظه می‌شود که سه نانو خودروها در پیکربندی تعادلی شماره ۲ قرار دارند و نانو خودروی چهارم پیکربندی شماره ۳ را با نانو خودروی همسایه، تجربه می‌کند. با دقت در نانو خودروهای موجود در همسایگی هم‌دیگر در خوشه هشت تایی، می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت نسبی نانو خودروهای مشابه در اغلب حالات، وضعیت پیکربندی‌های تعادلی است که در خوشه دو تایی مشاهده شد. لازم به ذکر است که وجود پیکربندی‌های تعادلی مربوط به خوشه دو تایی در خوشه‌های بزرگ‌تر نانو خودرو مطابق با نتایج مدل تمام - اتم می‌باشد.

از محدودیت‌های مطالعه رفتار نانو خودروها به روش تمام - اتم زمان بر بودن اجرای محاسبات می‌باشد. روش درشت‌دانه حاضر، با هدف کاهش هزینه محاسباتی و به منظور بررسی چیدمان سطحی نانو خودروها ارائه گردیده است. همان‌طور که در بخش ۱-۳ و ۲-۳ این مطالعه ملاحظه گردید، روش ارائه شده، پیکربندی‌های تعادلی را در اتصال دو نانو خودرو و پایداری حرارتی آنها را به درستی پیش‌بینی می‌کند. با افزایش تعداد نانو خودروها به چهار و هشت نانو خودرو در یک خوشه، اگرچه پیکربندی‌های تعادلی مشاهده شده (پیکربندی‌های شماره ۱، ۲ و ۳)، در مدل درشت‌دانه خوشه‌ها، مطابق با پیکربندی‌های تعادلی به دست آمده از مدل تمام - اتم است، ولی روش درشت‌دانه پیش‌بینی دقیقی در مورد تعداد هر نوع پیکربندی ارائه نمی‌دهد. به عنوان مثال، در شکل ۸ - الف که نتیجه شبیه‌سازی هشت نانو خودروی درشت‌دانه نشان داده شده است، یک زوج نانو خودرو تعادلی قرار می‌گیرند. برخورد مجدد نانو خودروها به یکدیگر پس از جدایش، بستگی به بعد جعبه شبیه‌سازی دارد. اگر شبیه‌سازی در یک جعبه بسیار بزرگ صورت گیرد، نانو خودروها پس از یک بار جدا شدن، نیاز به مدت زمان بسیار زیادی نیاز دارند تا دوباره روی سطح برخورد کرده و یکدیگر را بیابند.



شکل ۷. انرژی پتانسیل مربوط به خوشه شامل دو نانو خودرو در دمای ۶۰۰ و ۶۳۰ کلوین.

خودروهای مولکولی در دمای ۴۰۰ کلوین نیز گزارش شده است^[۴۹] که این صحت مدل درشت‌دانه را تأیید می‌کند. همان‌طور که در قسمت قبل مشاهده شد، پیکربندی‌های تعادلی پایداری حرارتی خود را در دمای کلوین و بالاتر از دست می‌دهند. با این وجود، در این دما دو نانو خودرو، درون یک خوشه قرار دارند و جاذبه و اندروالسی بین نانو خودروها مانع جدایش آنها می‌شود.

با افزایش دما به بازه ۶۰۰ کلوین و بیشتر، طبق پژوهش‌های اخیر پیرامون حرکات سطحی نانو خودروهای تمام - اتم و ساختارهای مشابه،^[۴۰,۴۲] انرژی حرارتی بالا این امکان را فراهم می‌کند تا مولکول‌ها بر جاذبه و اندرالسی بین خود غلبه کنند و از یکدیگر جدا شوند. شکل ۷، انرژی پتانسیل بین مولکولی را برای خوشه‌ی شامل دو نانو خودرو در دمای ۶۰۰ و ۶۳۰ کلوین در بازه زمانی ۰-۱۰ نانوثانیه نشان می‌دهد. براساس تغییرات انرژی پتانسیل، دو نانو خودرو در دمای ۶۰۰ کلوین در بازه زمانی قابل توجهی سطح انرژی صفر پیدا می‌کنند که این به معنای جدا شدن دو مولکول از یکدیگر است. با افزایش دما به ۶۳۰ کلوین در بازه زمانی طولانی‌تری سطح انرژی پتانسیل صفر و انرژی گرمایی ذرات در این دما باعث واجذب مولکول‌ها از یکدیگر می‌شود. لازم به ذکر است که افت مجدد مقدار انرژی پتانسیل از مقادیر صفر به مقادیر کمتر به معنای برخورد و اتصال مجدد نانو خودروها روی سطح است.

در برخی زمان‌ها، سطح انرژی به مقدار انرژی متناظر با پیکربندی‌های تعادلی ۲ و ۳ می‌رسد و در این بازه‌های محدود زمانی دو نانو خودرو در این موقعیت‌های تعادلی قرار می‌گیرند. برخورد مجدد نانو خودروها به یکدیگر پس از جدایش، بستگی به بعد جعبه شبیه‌سازی دارد. اگر شبیه‌سازی در یک جعبه بسیار بزرگ صورت گیرد، نانو خودروها پس از یک بار جدا شدن، نیاز به مدت زمان بسیار زیادی نیاز دارند تا دوباره روی سطح برخورد کرده و یکدیگر را بیابند.

۴.۳ آرایش سطحی خوشه‌های بزرگ‌تر نانو خودرو

پس از بررسی آرایش سطحی دو نانو خودرو در دمای‌های مختلف، ساختارهای دو بعدی خوشه‌های نانو خودروی که شامل ۴ و ۸ خودرو می‌باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجاکه در دمای ۲۰۰ کلوین، وضعیت تعادلی نانو خودروها به لحاظ حرارتی پایدار هستند، خوشه‌های مذکور در این دما، به مدت ۲۰ نانوثانیه شبیه‌سازی می‌شوند. از طرفی مطابق با نتایج مطالعات اخیر، در خوشه‌های بزرگ‌تر نانو خودروها، اتصالات بین هر زوج نانو خودرو مشابه پیکربندی‌های تعادلی است که در بررسی خوشه دو تایی

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از روش دینامیک مولکولی، مدل درشت‌دانه جهت بررسی چیدمان سطحی مашین‌های مولکولی ارائه شد. در مدل ارائه شده، برهمکنش نانو خودروها بر پایه فولرین بیشتر از طریق چرخ‌ها در نظر گرفته می‌شود. در

تعادلی، مقدار ثابتی را در طول شبیه‌سازی نشان داد که این به معنای پایداری حرارتی پیکربندی‌ها در این دما می‌باشد. در دمای ۴۰۰ کلوین، شعاع ژیراسیون بین مقدار متناظر با پیکربندی تعادلی شماره ۳ و شعاع ژیراسیون پیکربندی ۲ در تناوب قرار داشت. با افزایش دما به ۴۳۰ و ۴۶۰ کلوین، بسامد غیر پیکربندی دو نانوخودرو افزایش یافت. درنتیجه، در بازه دمایی اطراف ۴۰۰ کلوین، نانوخودروها انرژی لازم را برای اینکه از یک نقطه با انرژی پتانسیل کمیته به نقطه دیگر (از یک پیکربندی تعادلی به پیکربندی دیگر) غیروضعیت دهند، بدست آوردند.

در بازه دمایی بالاتر (۴۶۰ کلوین و بیشتر)، انرژی حرارتی متنقل شده به دو نانوخودرو به قدری افزایش یافت که دو نانوخودرو توانستند بر جاذبه واندروالسی بین خود غلبه کنند و از یکدیگر جدا شوند. رفتار دمایی مدل درشت‌دانه خوش دوتابی نانوخودرو در دمای‌های نامبرده (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کلوین)، با مطالعه مدل تمام - اتم خوش شامل دو نانوخودرو سازگاری دارد. با شبیه‌سازی خوش‌های بزرگ‌تر که شامل ۴ و ۸ نانوخودرو می‌باشند، موقعیت تعادلی نانوخودروها در دمای ۲۰۰ کلوین به دست آمد. با در نظر گرفتن نحوه اتصال هر نانوخودرو با نانوخودروهای مجاور، این نتیجه حاصل شد که آرایش نسبی هر زوج نانوخودرو مجاور با پیکربندی‌های تعادلی دیده شده در سیستم دو نانوخودرو مشابه می‌باشد که این مورد در تحقیقات مدل تمام - اتم نانوخودروها نیز مشاهده شده است. مدل درشت‌دانه ارائه شده برای بررسی چیدمان سطحی نانوخودروها، پیکربندی تعادلی زوج نانوخودروها و پایداری حرارتی آنها را بدروستی پیش‌بینی می‌کند. مدل درشت‌دانه مزبور که با فرض غالب بودن سهم برهمنکشن چخ‌ها در برهمنکشن بین دو نانوخودرو ایجاد شده است، برای سایر نانوخودروها، بهویه نانوخودروهای برپایه فولرین قابل توسعه است که این روش از نظر هزینه و زمان، روشی کاملاً مقرون به - صرفه می‌باشد.

ساختار درشت‌دانه نانوخودروها، چهار ذره به عنوان چخ‌های فولرینی نانوخودرو یک ذرهی مرکزی به عنوان شاسی انتخاب می‌شوند. ذرات تشکیل دهنده نانوخودرو، توسط باندهایی با ضریب سختی بالا به یکدیگر متصل می‌شوند تا مشابه مدل تمام - اتم، در حین شبیه‌سازی نانوخودرو صلب باشد. بهکم تابع انرژی پتانسیل مورس، برهمنکشن واندروالسی موجود بین چخ‌های نانوخودروها تعریف می‌شوند و با در نظر گرفتن بخش دافعه‌ی تابع پتانسیل برای ذرهی مرکزی، از برهمنکشن نامطلوب نانوخودروها جلوگیری می‌شود.

برای تعیین پیکربندی‌های تعادلی دو نانوخودرو، آنالیز انرژی پتانسیل بر روی خودروهای مولکولی انجام شد. در این آنالیز، یک نانوخودرو در مبدأ مختصات ثابت فرض گردید و نانوخودروی دیگر در اطراف نانوخودروی مرکزی، به نقاط مختلف متنقل شده و در هر نقطه، حول محور و عمود بر سطح، یک دور چرخانده شد. به ازای نقاط مختلف در اطراف نانوخودروی مرکزی و به ازای جهت‌گیری‌های نسبی مختلف دو نانوخودرو، کمترین سطح انرژی پتانسیل، ثبت گردید. با توجه به تغییرات سطح از یک پتانسیل که به ازای فواصل مختلف و جهت‌گیری‌های متفاوت دو نانوخودرو به دست آمد، سه نقطه با کمترین انرژی پتانسیل ملاحظه شد. در این نقاط کمینه انرژی پتانسیل که متناظر با پیکربندی‌های تعادلی دو نانوخودرو هستند، انرژی برهمنکشن بین مولکولی برابر با $-0,64$ و $-0,64$ - الکترون‌ولت شد. وضعیت نسبی دو نانوخودرو در پیکربندی‌های تعادلی، مطابق با نتایج بدست آمده از بررسی مدل تمام - اتم سیستم دو نانوخودرو می‌باشد.

با مطالعه شعاع ژیراسیون و سطح انرژی پتانسیل مربوط به برهمنکشن بین دو نانوخودرو، پایداری حرارتی پیکربندی‌های تعادلی در دمای‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ کلوین بررسی شدند. در دمای ۲۰۰ کلوین، شعاع ژیراسیون مربوط به هر سه پیکربندی

پانوشت‌ها

1. Self-Assembly
2. Scanning Tunneling Microscope
3. Molecular Mechanics Force Field

منابع (References)

1. Zhang, X., Gärisch, F., Chen, Z., Hu, Y., Wang, Z., Wang, Y., Xie, L., Chen, J., Li, J., Barth, J.V. and Narita, A., 2022. Self-assembly and photoinduced fabrication of conductive nanographene wires on boron nitride. *Nature Communications*, 13(1), p.442. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27600-1>.
2. Villagómez, C.J., Sasaki, T., Tour, J.M. and Grill, L., 2010. Bottom-up assembly of molecular wagons on a surface. *Journal of the American Chemical Society*, 132(47), pp.16848-16854. <https://doi.org/10.1021/ja10542j>.
3. Adorf, C.S., Moore, T.C., Melle, Y.J. and Glotzer, S.C., 2019. Analysis of self-assembly pathways with unsupervised machine learning algorithms. *The Journal of Physical Chemistry B*, 124(1), pp.69-78. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.9b09621>.
4. Li, M., Li, S., Zhang, K., Chi, X., Zhou, H., Xu, H.B., Zhang, Y., Li, Q., Wang, D. and Zeng, M.H., 2021. Coordination-directed self-assembly of molecular motors: Towards a two-wheel drive nanocar. *Nanoscale*, 13(39), pp.16748-16754. <https://doi.org/10.1039/D1NR05046J>.
5. Schmaltz, T., Khassanov, A., Steinrück, H.G., Magerl, A., Hirsch, A. and Halik, M., 2014. Tuning the molecular order of C 60-based self-assembled monolayers in field-effect transistors. *Nanoscale*, 6(21), pp.13022-13027. <https://doi.org/10.1039/C4NR03557G>.
6. Baskar, A.V., Benzigar, M.R., Talapaneni, S.N., Singh, G., Karakoti, A.S., Yi, J., Al-Muhtaseb, A.A.H., Ariga, K., Ajayan, P.M. and Vinu, A., 2022. Self-assembled fullerene nanostructures: Synthesis and applications. *Advanced Functional Materials*, 32(6), p.2106924. <https://doi.org/10.1002/adfm.202106924>.
7. Vaezi, M., Pishkenari, H.N. and Ejtehadi, M.R., 2022. Collective movement and thermal stability of fullerene clusters on the graphene layer. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(19), pp.11770-11781. <https://doi.org/10.1039/D2CP00667G>.

8. Shirai, Y., Osgood, A.J., Zhao, Y., Yao, Y., Saudan, L., Yang, H., Yu-Hung, C., Alemany, L.B., Sasaki, T., Morin, J.F. and Guerrero, J.M., 2006. Surface-rolling molecules. *Journal of the American Chemical Society*, 128(14), pp.4854-4864. <https://doi.org/10.1021/ja058514r>.
9. Morin, J.F., Shirai, Y. and Tour, J.M., 2006. En route to a motorized nanocar. *Organic Letters*, 8(8), pp.1713-1716. <https://doi.org/10.1021/ol060445d>.
10. Nemati, A., Meghdari, A., Nejat Pishkenari, H. and Sohrabpour, S., 2018. Investigation into thermally activated migration of fullerene-based nanocars. *Scientia Iranica*, 25(3), pp.1835-1848. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20321>.
11. Sasaki, T., Guerrero, J.M. and Tour, J.M., 2008. The assembly line: Self-assembling nanocars. *Tetrahedron*, 64(36), pp.8522-8529. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2008.05.074>.
12. Khatua, S., Godoy, J., Tour, J.M. and Link, S., 2010. Influence of the Substrate on the Mobility of Individual Nanocars. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(22), pp.3288-3291. <https://doi.org/10.1021/jz101375q>.
13. Khatua, S., Guerrero, J.M., Clayton, K., Vives, G., Kolomeisky, A.B., Tour, J.M. and Link, S., 2009. Micrometer-scale translation and monitoring of individual nanocars on glass. *ACS Nano*, 3(2), pp.351-356. <https://doi.org/10.1021/mn800798a>.
14. Chu, P.L.E., Wang, L.Y., Khatua, S., Kolomeisky, A.B., Link, S. and Tour, J.M., 2013. Synthesis and single-molecule imaging of highly mobile adamantane-wheeled nanocars. *ACS Nano*, 7(1), pp.35-41. <https://doi.org/10.1021/nn304584a>.
15. Jin, T., Garcia-López, V., Kuwahara, S., Chiang, P.T., Tour, J.M. and Wang, G., 2018. Diffusion of nanocars on an air-glass interface. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(33), pp.19025-19036. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b05668>.
16. Sasaki, T., Morin, J.F., Lu, M. and Tour, J.M., 2007. Synthesis of a single-molecule nanotruck. *Tetrahedron Letters*, 48(33), pp.5817-5820. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2007.06.081>.
17. Hosseini Lavasani, S.M., Nejat Pishkenari, H. and Meghdari, A., 2019. How chassis structure and substrate crystalline direction affect the mobility of thermally driven p-carborane-wheeled nanocars. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(8), pp.4805-4824. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b10779>.
18. Vives, G. and Tour, J.M., 2009. Synthesis of a nanocar with organometallic wheels. *Tetrahedron Letters*, 50(13), pp.1427-1430. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2009.01.042>.
19. Zhang, J., Osgood, A., Shirai, Y., Morin, J.F., Sasaki, T., Tour, J.M. and Kelly, K.F., 2007. Investigating the motion of molecular machines on surfaces by STM: The nanocar and beyond. In 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO). (pp. 243-246). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NANO.2007.4601180>.
20. Rapenne, G. and Joachim, C., 2017. The first nanocar race. *Nature Reviews Materials*, 2(6), pp.1-3. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.40>.
21. Akimov, A.V., Nemukhin, A.V., Moskovsky, A.A., Kolomeisky, A.B. and Tour, J.M., 2008. Molecular dynamics of surface-moving thermally driven nanocars. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 4(4), pp.652-656. <https://doi.org/10.1021/ct7002594>.
22. Mofidi, S.M., Nejat Pishkenari, H., Ejtehadi, M.R. and Akimov, A.V., 2021. Locomotion of the C60-based nanomachines on graphene surfaces. *Scientific Reports*, 11(1), p.2576. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82280-7>.
23. Vaezi, M., Pishkenari, H.N. and Nemati, A., 2022. Mechanism of the motion of nanovehicles on hexagonal boron-nitride: A molecular dynamics study. *Computational Materials Science*, 207, p.111317. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2022.111317>.
24. Nemati, A., Nejat Pishkenari, H., Meghdari, A. and Ge, S.S., 2019. Controlling the diffusive motion of fullerene-wheeled nanocars utilizing a hybrid substrate. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(42), pp.26018-26030. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08335>.
25. Nemati, A., Pishkenari, H.N., Meghdari, A. and Ge, S.S., 2020. Directional control of surface rolling molecules exploiting non-uniform heat-induced substrates. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(46), pp.26887-26900. <https://doi.org/10.1039/D0CP04960C>.
26. Nemati, A., Nejat Pishkenari, H., Meghdari, A. and Ge, S.S., 2020. Influence of vacancies and grain boundaries on the diffusive motion of surface rolling molecules. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(30), pp.16629-16643. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c03697>.
27. Nemati, A., Pishkenari, H.N., Meghdari, A. and Sohrabpour, S., 2018. Directing the diffusive motion of fullerene-based nanocars using nonplanar gold surfaces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(1), pp.332-344. <https://doi.org/10.1039/C7CP07217A>.
28. Vaezi, M., Nejat Pishkenari, H. and Ejtehadi, M.R., 2023. Programmable transport of C60 by straining graphene substrate. *Langmuir*, 39(12), pp.4483-4494. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00180>.
29. Sasaki, T., Guerrero, J.M., Leonard, A.D. and Tour, J.M., 2008. Nanotrains and self-assembled two-dimensional arrays built from carboranes linked by hydrogen bonding of dipyridones. *Nano Research*, 1, pp.412-419. <https://doi.org/10.1007/s12274-008-8041-4>.
30. Sezginel, K.B. and Wilmer, C.E., 2020. Modeling diffusion of nanocars on a Cu (110) surface. *Molecular Systems Design & Engineering*, 5(7), pp.1186-1192. <https://doi.org/10.1039/C9ME00171A>.
31. Kianezhad, M., Youzi, M., Vaezi, M. and Pishkenari, H.N., 2022. Rectilinear motion of carbon nanotube on gold surface. *International Journal of Mechanical Sciences*, 217, p.107026. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.107026>.
32. Vaezi, M., Nejat Pishkenari, H. and Nemati, A., 2020. Mechanism of C60 rotation and translation on hexagonal boron-nitride monolayer. *The Journal of Chemical Physics*, 153(23). <https://doi.org/10.1063/5.0029490>.
33. Vaezi, M. and Pishkenari, H.N., 2021. Comparison of Diffusive Motion of C60 on Graphene and Boron Nitride Surfaces. *ArXiv Preprint ArXiv:2108.00477*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.00477>.

34. Kianezhad, M., Youzi, M., Vaezi, M. and Nejat Pishkenari, H., 2023. Unidirectional motion of C60-based nanovehicles using hybrid substrates with temperature gradient. *Scientific Reports*, 13(1), p.1100. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28245-4>.
35. Rafii-Tabar, H., 2004. Computational modelling of thermo-mechanical and transport properties of carbon nanotubes. *Physics Reports*, 390(4-5), pp.235-452. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2003.10.012>.
36. Nosé, S., 1984. A unified formulation of the constant temperature molecular dynamics methods. *The Journal of Chemical Physics*, 81(1), pp.511-519. <https://doi.org/10.1063/1.447334>.
37. Hoover, W.G., 1985. Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions. *Physical Review A*, 31(3), p.1695. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.1695>.
38. Plimpton, S., 1995. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *Journal of Computational Physics*, 117(1), pp.1-19. <https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039>.
39. Vaezi, M., Pishkenari, H.N. and Ejtehadi, M.R., 2022. Nanocar swarm movement on graphene surfaces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(45), pp.27759-27771. <https://doi.org/10.1039/D2CP03856K>.
40. Mofidi, S.M., Nejat Pishkenari, H., Ejtehadi, M.R. and Akimov, A.V., 2019. Role of graphene surface ripples and thermal vibrations in molecular dynamics of C60. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(32), pp.20026-20036. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03947>.

بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفتگی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به روش اویلری - لاگرانژی

عطیه فرج (دانشجوی کارشناسی ارشد)

میراعلم مهدی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

در این مقاله، جریان آشفته‌ها شامل، نانوذرات مس در جریان پشت پله با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به روش اویاری - لاگرانژی شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی به دو صورت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای CFX و FLUENT انجام و نتایج به دست آمده با یکدیگر و با نتایج تجربی گزارش شده در مطالعات پیشین به عنوان مثال مطالعه گریفزو مقایسه می‌گردد. در مدل سازی از کوپل دوراهه بین سیال پیوسته هوا و فاز گسسته نانوذرات استفاده و اثرات نیروهای برآی ساقن، گرادیان فشار و اثرات آشفتگی بر روی نانوذرات لحاظ می‌شود. نتایج عددی حاصل از مدل‌های اویاری - لاگرانژی و مدل تک فاز در حالت‌های پایا و گذرا نیز با یکدیگر مقایسه می‌گردد. مطابق نتایج حاصل، ماکریزم خطای در روش تک فاز برابر با ۲۵ درصد و در روش اویاری - لاگرانژی برابر ۱۹ درصد است. در ادامه، اثرات مدل آشفتگی بر حرکت ذرات و برحسب قطرهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر و همچنین ترتیب جفت شدن بین فاز حامل پیوسته و فاز پراکنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی اثر قطر ذره بر مسیر حرکت و رفتار ذرات و مطالعه تأثیر عدد استوکس بر حضور ذرات در گردابه ایجاد شده در پشت پله، بخش بعدی این پژوهش است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که عدد استوکس و مدل آشفتگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حرکت ذرات پشت پله را دارند. ذراتی که دارای عدد استوکس کوچک‌تر از $1/2$ (معادل قطر 35 میکرومتر در این مطالعه) باشند، حضور گردابه را حس کرده و وارد گردابه می‌شوند. از بین مدل‌های آشفتگی کمترین خطای برای مدل برابر با $25/6$ بیشترین خطای برای مدل K_s استاندارد برابر با $18/75$ می‌باشد.

atie.farrok@yahoo.com
m.mahdi@sru.ac.ir

واژگان کلیدی: نانو سیال، مدل آشفتگی، روش اویاری-لاگرانژی، جریان پشت پله، فلوقنت، سی اف - ایکس.

۱. مقدمه

سیالات محاسباتی (CFD) امکان حصول بینشی در مورد طیف گستره‌ای از جریان‌های سیال را ارائه می‌دهد. در سال‌های اخیر، مدل‌های CFD برای شبیه‌سازی دقیق برهمکنش ذره سیال و همچنین ذره ذره را در جریان‌های آرام یا آشفته توسعه یافته است.

مطابق پژوهش کرو و همکاران،^[۱] دو رویکرد متدال برای توصیف خواص جریان پر از ذرات وجود دارد که عبارتند از: مدل دو سیال اویاری^[۲] براساس

جریان‌های شامل ذرات پراکنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند انتقال پنوماتیک، جداسازی ذرات از سیال پایه یافت می‌شوند.^[۱] به منظور طراحی، بهینه‌سازی یا ارتقای مقیاس چنین فرایندها و مکانیزم‌های مربوطه، پیش‌بینی دقیق جریان‌های سیال پیچیده با کمک شبیه‌سازی عددی، مورد توجه ویژه مهندسان قرار گرفته است. دینامیک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۱/۱/۱۴۰۱، اصلاحیه ۹/۲/۱۴۰۲، پذیرش ۹/۳/۱۴۰۲.

استناد به این مقاله:

فرخ، عطیه و مهدی، میراعلم، ۳، ۱۴۰۰. بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفتگی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به روش اویاری - لاگرانژی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، ص ۴۷-۶۰. DOI:10.24200/J40.2023.61626.16665

پله توسط یک مدل ردبایی ذرات لاگرانژی و یک مدل اویلری - اویلری، مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که مدل $k - \epsilon$ و مدل RNG و مدل $k - \epsilon$ - ارائه شده توسط شیه و همکاران، ^{۱۰۶} نتایج بهتری نسبت به مدل استاندارد $k - \epsilon$ دارد. مدل اویلری در مقایسه با نتایج تجربی، نتایج بسیار دقیق تری نسبت به مدل لاگرانژی ارائه کرد. شبیه‌سازی عددی دو بعدی و چربان آشفته دوفازی بروی یک چربان پشت پله در مطالعه یو انجام شده است. ^{۱۰۷} میانگین‌های آماری مرتبه اول مانند پروفیل‌های طول اتصال مجدد و میانگین سرعت با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشتند. اما میانگین آماری مرتبه دوم مانند پروفیل‌های نوسان سرعت مورد مطالعه قرار نگرفت. برخی از نتایج و مقایسه‌ها را می‌توان در مقالات یو ^{۱۰۸} یافت. مطابق با مطالعه مهدوی، ^{۱۰۹} برای شبیه‌سازی نانوسیال با استفاده از روش DPM، برای لحاظ شدن تمام حرکت‌های مماسی و شعاعی ذره و حصول نتایج دقیق‌تر (حتی در صورت امکان استفاده از تقارن محوری)، باید از روش 3° بعدی استفاده کرد. هنگامی که از روش DPM استفاده می‌شود، با وجود افت فشار نمی‌توان از نیروی گرانش صرف نظر کرد. این روش برای کسر حجمی کمتر از 3° درصد برای شبیه‌سازی انتقال حرارت و افت فشار جریان آرام نانوسیال برای هر نوع ذره و قطر ذره قابل قبول است، ولی برای کسر حجمی‌های بالاتر به دلیل وقوع پدیده‌هایی مثل خوشه‌بندی و رسوب روش ضعیفی محسوب می‌شود. کومار و پیورانیک ^{۱۱۰} پیشنهاد کردند برای جریان آشفته نانوسیال (به همراه انتقال حرارت هم‌رفتی) تا درصد حجمی 5% این روش قابل اعتماد و برای درصد حجمی‌های بالاتر از مدل تک فاز استفاده می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش در اندازه نانوذرات، عدد ناسلت کاهش می‌باید و هنگامی که در جریان آشفته از روش DPM استفاده می‌شود، نیروی درگ و گراش دو نیروی غالب هستند. همچنین، کومار در مطالعاتی، هندسه مورد نظر را کمی پیچیده‌تر کرده و به بررسی رفتار نانوذرات و تأثیر آن در خواص نانوسیال با استفاده از روش DPM پرداخت و نتیجه را با روش‌های دیگر و نتایج تجربی مقایسه کردند. مکتی و همکاران ^{۱۱۱} معتقد بودند که هندسه U شکل پیچیده‌ترین نوع هندسه است و بررسی‌های خود را روی میکروکانال‌های موازی انجام دادند و برای مدل سازی هندسه‌های مذکور، استفاده از مدل دوفاز غیرهمگن را معتبرتر دانسته و پیشنهاد کردند. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که در موقعیت‌هایی که انتقال حرارت وجود دارد و غلظت کم است، اثرات مهاجرت ذرات ناشی از حرکت براونی، ترموفورسیس ^۱ و گردایان فشار یا تنش برشی منجر به تغییرات غیربدینی در غلظت ذرات می‌شود. مانع مثیلی شکل، هندسه‌ی دیگری بود که رشیدی و همکاران ^{۱۱۲} جریان نانوسیال اطراف آن را شبیه‌سازی کردند و بیان کردند که فرض توزیع یکنواخت ذرات در مدل سازی تک فاز نتیجه‌ای غیرقابل اعتماد دارد و علت رد این روش برای شبیه‌سازی می‌باشد. نیروی براونی روی انتقال حرارت اثر بیشتری از نیروی ترموفورز دارد. افزایش پارامتر ترموفورز منجر به کاهش عدد ناسلت می‌شود. عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی کاهش می‌باید. کاهش قطر نانوذرات منجر به افزایش پتانسیل انتقال گرمای هم‌رفت طبیعی می‌شود. کامبیز و فایی و احمد الیوچمال ^{۱۱۳} با بررسی POD نمی‌توانند به طور کمی، ساختار گردابی حل شده را برای مجموعه‌ای عمومی از شرایط دارزی و اولیه تعیین کنند. ساختارهای گردابی به طور کامل بدون هیچ‌گونه مدل سازی آشیتگی تجربی در DNS حل می‌شوند. با این وجود، این روش تنها برای جریان های ساده با اعداد رینولدز بایین به دلیل حجم زیاد محاسبات مناسب است. یک فیلتر رضایی پایین گذر در LES به معادلات ناوبر استوکس اعمال می‌شود و معادلات فیلتر شده مستقیماً حل می‌شوند. این تکنیک، برای جریان‌های مهندسی با اعداد رینولدز کم تا متوسط بسیار امیدوارکننده است.

تیان و همکاران، ^{۱۱۴} رفتار یک جریان گازدره رقیق را بروی یک جریان پشت

رویکرد اویلری - اویلری (E-E) و مدل مسیر لاگرانژی ^{۱۱۵} براساس رویکرد اویلری - لاگرانژی (E-L). مسیر ذرات با ادغام معادلات حرکت ذرات در مدل مسیر لاگرانژی محاسبه می‌شود. مدل اویلری - اویلری مبتنی بر فرض پیوستگی برای فاز ذره است. پاده‌سازی و حل معادلات ذرات باهمان روش‌های عددی فاز سیال آسان می‌باشد. با این وجود، فرض پیوسته بودن ذرات چندان با فیزیک واقعی سازگار نیست و این رویکرد نمی‌تواند به درستی ویژگی‌های خاصی را که شامل اثرات زمان هستند، پوشش دهد. ^{۱۱۶} در رویکرد E-L، ذرات به عنوان اجسام مجرما در چارچوب مرجع لاگرانژی در نظر گرفته می‌شوند و حرکت یک ذره منفرد در حین حرکت در میدان جریان، دنبال می‌شود. به دلیل مشکل در تحمیل اثر آشیتگی فاز سیال بر حرکت و واکنش ذرات، این رویکرد قادر است در بررسی نیروهای مختلفی از نیروی پسا، نیروی پرخورد و نیروی جاذبه وغیره را که بر ذرات وارد می‌کنند، رفتار گستته ذرات و اثرات زمان ذرات را در نظر بگیرد. بنابراین، هر دو روش دارای مزایای هستند و معمولاً در محاسبه جریان‌های دوفازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب یک مدل خاص به ساختار جریان و نوع اطلاعاتی که قرار است استخراج شود، بستگی دارد. در مطالعه حاضر، رویکرد اویلری - لاگرانژی برای پیش‌بینی میدان جریان ذرات و ردبایی حرکت ذرات اتخاذ شده است.

شبیه‌سازی عددی فاز پیوسته با محاسبه میانگین آماری خواص جریان که در آن ویژگی‌های مکانی - زمانی ساختار گردابی آشفته با میانگین زمانی فیلتر می‌شوند تا معادلات جریان متوسط به دست آید. این روش، به روش میانگین ناوبر استوکس رینولدز معروف است. ^{۱۱۷} وقتی ذرات در جریان میانگین مجموعه پیش‌بینی شده دنبال می‌شوند، اثر گرداب‌ها وجود ندارد و باید توسط مدل‌های تجربی در نظر گرفته شود. در حال حاضر، مدل‌های محاسباتی متعددی که برای شبیه‌سازی حرکت ذرات استفاده می‌شوند، از روش ذرات لاگرانژی تصادفی استفاده می‌کنند. این مدل‌ها شامل مدل‌های جریان جدا شده قطعی (DSF)، ^{۱۱۸} مدل‌های جریان جدا شده تصادفی (SSF)، ^{۱۱۹} مدل‌های پراکندگی همبسته با زمان ^{۱۲۰} و مدل‌های انتشار تابع چگالی احتمال ^{۱۲۱} (PDF) می‌باشند. با این وجود، در این مدل‌ها، تأثیر گرداب‌ها بر ذرات صرفاً بر اساس قوانین تجربی است که بهبود یا تأیید از طریق آگاهی از تأثیر واقعی گرداب‌ها بر حرکت ذرات نیاز دارد.

پیشرفت در تکنیک‌های کامپیوترا، پیش‌بینی جریان سیال را به کمک شبیه‌سازی گردابه‌ها ممکن نموده است که می‌تواند حداقل برخی از ویژگی‌های مکانی - زمانی ساختارهای گردابی آشفته را ارائه دهد. این مزیت کلیدی، این شبیه‌سازی‌ها برای بررسی مستقیم برهمکنش ذره گردابی است. روش دینامیک گردابی (VD)، ^{۱۲۲} مدل تجزیه متعامد مناسب (POD)، ^{۱۲۳} شبیه‌سازی گردابی بزرگ (LES) و شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، ^{۱۲۴} روش‌های رایج برای شبیه‌سازی سیال هستند. روش VD صرفاً برای نمایش دو بعدی مناسب است. مدل‌های POD نمی‌توانند به طور کمی، ساختار گردابی حل شده را برای مجموعه‌ای عمومی از شرایط مرزی و اولیه تعیین کنند. ساختارهای گردابی به طور کامل بدون هیچ‌گونه مدل سازی آشیتگی تجربی در DNS حل می‌شوند. با این وجود، این روش تنها برای جریان های ساده با اعداد رینولدز بایین به دلیل حجم زیاد محاسبات مناسب است. یک فیلتر رضایی پایین گذر در LES به معادلات ناوبر استوکس اعمال می‌شود و معادلات فیلتر شده مستقیماً حل می‌شوند. این تکنیک، برای جریان‌های مهندسی با اعداد رینولدز کم تا متوسط بسیار امیدوارکننده است.

حرکت نامیده می‌شود. براساس قانون دوم نیوتن، برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند برابر با تغییرات خالص مومنتوم می‌باشد:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\rho \vec{V} \vec{V} \right) = -\operatorname{grad} P + \mu \left(\nabla^2 \vec{V} \right) + S_v \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\rho \vec{V} C_p T \right) = k \left(\nabla^2 T \right) + S_h \quad (3)$$

که در آن V , P , T و t به ترتیب معرف بردار سرعت، فشار، دما و زمان هستند. علاوه بر این، μ , C_p و k به ترتیب بیانگر لزجت، چگالی، ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی برای هوا به عنوان فاز پیوسته هستند. توجه داشته باشید که S_v و S_h به ترتیب عبارت‌های مربوط به تم چشممه تکانه و انرژی ذرات با سیال می‌باشند. این دو تم به صورت زیر بیان می‌شوند:^[۲۴]

$$S_v = \sum_{n_p} -\frac{m_p}{\delta V} \frac{dV_p}{dt} \quad (4)$$

$$S_h = \sum_{n_p} -\frac{m_p}{\delta V} C_p \frac{dT_p}{dt} \quad (5)$$

به طوریکه t زمان و V_p و T_p سرعت و دما نانوذرات و همچنین، m_p و np به ترتیب معرف جرم نانوذرات، تعداد ذرات درون یک حجم سلول و حجم سلول می‌باشند.

معادلات فاز گسسته

معادله تعادل نیرو برای یک ذره معلق در سیال، برای محاسبه مسیر ذرات استفاده می‌شود. نیروهای برهمنش بین سیال و ذرات شامل نیروهای درگ، براونی و ترموفورتیک می‌باشد. نیروهای براونی و ترموفورتیک در اثر برخورد تصادفی مولکول‌های سیال به ذرات معلق ایجاد می‌شوند. توجه داشته باشید که نیروی گرانش برای نانوذرات بسیار کم است، مخصوصاً در این مورد که قطر ذرات برابر با ۱۰ نانومتر می‌باشد. برای ذرات با قطر بزرگتر از پنجاه نانومتر، نیروی گرانش ممکن است تأثیر کمی داشته باشد. بنابراین، در محاسبات از این نیرو صرف‌نظر می‌گردد. معادله حرکت یک فاز ذره به صورت زیر است:^[۲۵]

$$\frac{dX_p}{dt} = V_p \quad (6)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D (V_f - V_p) + f_{th} + f_{th} \quad (7)$$

که در آن $Zیرنوس$ های f و P به ترتیب بیانگر سیال و ذره هستند. اولین عبارت در سمت راست معادله ۷، نیروی پسا می‌باشد که در اینجا از نیروی کشش استوکس کائینگهام استفاده شده است. بنابراین:^[۲۶]

$$F_D = \frac{18\mu_f}{d^3 \rho_p C_c} \quad (8)$$

به طوریکه C_c ضریب تصحیح کائینگهام بوده و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} [1,257 + 0,4e^{-(1,1d/2\lambda)}] \quad (9)$$

۸ معادل است با مسیر آزاد میانگین سیال و نیروی ترموفورتیک که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{th} = \frac{18\mu_f C_s}{\rho_f \rho_p d_p^3 (1 + C_m K_n)} \times \frac{(k_f/k_p + C_t + K_n)}{(1 + k_f/k_p + C_t K_n)} \times \frac{\nabla T}{T} \quad (10)$$

استفاده از روش اویلری - لاگرانژی و نرم‌افزار فلوئنت انجام شد. نتایج ارائه شده توسط آنها نشان می‌دهد که برای حل معادلات انتقال حرارت در فلوئنت UDF حداکثر رسوب بین زاویه‌ی ۲۵ تا ۳۵ درجه و حداکثر ضریب انتقال حرارت بین زاویه‌ی ۳۰ تا ۴۵ درجه می‌باشد و نیروی واندروالسی بیشترین اثر را در رسوب‌گذاری دارد.

سعید و الدلیمی^[۲۸] رویکرد تک فازی و چهار مجموعه مختلف از خواص ترموفیزیکی را برای مطالعه جریان آرام یک نانوسيال در یک لوله یکنواخت گرم شده به کار برند. به طوریکه، مشخص شد که هر دو مدل وابسته به دما و مستقل از دما، خواص ترموفیزیکی نانوسيال‌ها می‌توانند به درستی رفتار نانوسيال‌ها را در طول جریان آرام شبهیه‌سازی کنند. اوریبه و همکاران^[۲۹] جریان‌های آرام و آشفته سه بعدی نانوسيال را در یک لوله یکنواخت گرم شده با استفاده از روش رویکرد تک فاز بررسی کردند و مشخص شد که ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد، در شرایطی که ضخامت مرز حرارتی با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. بنابراین، نیازی به اعمال مدل‌های دو فازی برای توصیف رفتار نانوسيال نیست. تاسکسین و همکاران^[۳۰] تأثیر هندسه کانال (دایره، مربع، مثلث و مستطیل) را بر رفتار ترموفیزیکی نانوسيال در طول جریان آرام مورد مطالعه قراردادند. یک مدل تک فاز با خواص وابسته به دما، اعمال شد. افزایش انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی مشاهده گردید که سطح مقطع دایره‌ای نسبت به سایر هندسه‌ها برتری داشت. بیلزیز و آکتork^[۳۱] از یک رویکرد تک فازی برای مطالعه جریان آشفته سه بعدی یک نانوسيال در داخل یک لوله یکنواخت گرم شده استفاده کردند. مدل استاندارد تلاطم ϵ - k با خواص وابسته به دما اعمال و افزایش قابل توجهی در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت ثبت شد. با این وجود ضریب اصطکاک به طور قابل توجهی با افزایش کسر حجمی، افزایش یافت. بسیاری از محققان، تحقیقات بیشتر در مورد خواص ترموفیزیکی نانوسيال‌های را ضروری می‌دانند و در این زمینه باید محدودیت‌های تحقیقات تجربی را لحاظ نمود.^[۳۲]

در این مطالعه، رفتار ذرات با قطرهای مختلف در مرتبه میکرومتر در هندسه پشت پله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مساله به صورت پایا و گذرا برای جریان آشفته به دو صورت دو بعدی و سه بعدی به کمک دو نرم‌افزار فلوئنت و CFX شبیه‌سازی شده و نتایج آن اعتبار سنجی گردید.

۲. مدل‌سازی ریاضی مساله

۲.۱. معادلات حاکم

معادلات فاز پیوسته

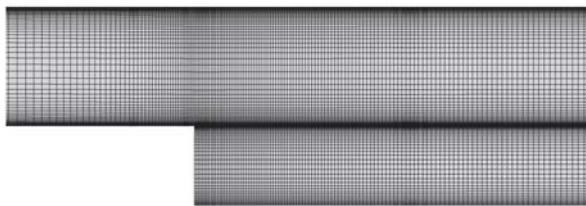
معادله پیوستگی

اصل بقای جرم، یک اصل اساسی در مکانیک سیالات است. طبق این اصل، جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود. این اصل، در قالب معادله پیوستگی برای سیالات تراکم ناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود:^[۳۳]

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم

تنهایا با داشتن معادله پیوستگی نمی‌توان رفتار مکانیکی سیالات را مشخص نمود و برای رسیدن به این هدف، باید معادلات مربوط به اصل بقا، اندازه حرارت یا قانون دوم نیوتن را نیز لحاظ نمود. حاصل ضرب سرعت در جرم، همان اصل اندازه



شکل ۲. شبکه بندی.

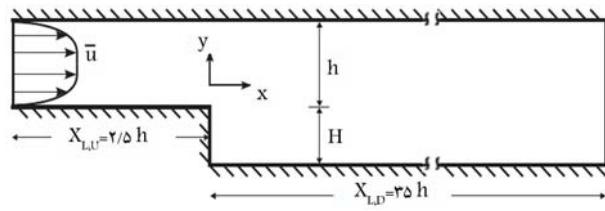
جدول ۲. استقلال از شبکه.

درصد تغییرات طول گردابه	تعداد سلول میلیمتر
٪/۲۵	۱۷۲۵۲
٪/۵۴	۳۲۱۴۷
٪/۲۴	۷۸۲۹۰

جدول ۳. خواص مواد و شرط مرزی.

واحد	مقدار	خواص مواد
kg/m^3	۸۸۰۰	چکالی فازگسسته
μm	۷۰	قطر ذره
kg/s	$۱/۵۸ \times ۱۰^{-۵}$	نخ جرمی جریان ذره
m/s	(۱۰/۵ ۰ ۰)	سرعت تزریق فاز پیوسته
m^3/s	$۱/۵ \times ۱۰^{-۶}$	شرط مرزی ورودی ویسکوزیته
m/s	۱۰/۵	U_x
m/s	(۹/۳۳ ۰ ۰)	\bar{u}_{avg}
m^3/s^2	۰/۴۵	k
$1/s$	۲۸۰۰	ω
pa	۰	شرط مرزی خروجی \bar{p}
m/s	(۰۰۰)	شرط مرزی دیواره \bar{u}

است. همان‌طورکه در جدول ۲ مشاهده می‌شود با بیش از دو برابر کردن تعداد سلول، طول گردابه در مرحله سوم، تغییرات چندانی در طول گردابه مشاهده نشده است. بنابراین، شبکه با ۳۲۱۴۷ سلول برای ادامه حل انتخاب شده است. این مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلورنت با هدف مطالعه و بررسی رفتار ذرات در جریان آشفته و تأثیر ذرات در آشفتگی جریان و بالعکس انجام شده است. اطلاعات فازگسسته (مس) و پیوسته (هوا) در جدول ۳ آمده است. جریان هوا با پروفیل سرعت هایپربولیک تائزانت با مقدار میانگین $9/۳۳$ متر بر ثانیه وارد شده است و شرط مرزی خروجی فشار، صفر پاسکال است. شبیه‌سازی عددی انجام شده به روش حجم محدود به دو صورت پایا و گذرا در نرم‌افزار فلورنت نسخه ۲۰۲۱ انجام شده است. در شبیه‌سازی گذرا مقدار گام زمانی $۱۰^{-۳}$ ثانیه است. مسئله به صورت دوراhe و با استفاده از مدل آشفتگی $SST - \omega$ مدل‌سازی شده است. فشار و سرعت به یکدیگر کوپل شده و از مدل استاندارد برای فشار و مرتبه دوم برای مومتووم و انرژی جنبشی آشفتگی استفاده شده است. از بین نیروهای موجود



شکل ۱. هندسه مدل.

جدول ۱. مشخصات ابعادی هندسه مدل.

مشخصات کانال		مشخصات پله
ارتفاع کanal h	۴۰ mm	ارتفاع پله H
پهنای کanal w	۴۵۷ mm	w/H
	۵ : ۳	h/H

در این رابطه k_f ، k_p و K_n به ترتیب بیانگر رسانایی حرارتی سیال، نانو ذره و عدد نادسن می‌باشند و مقادیر ثابت به صورت $C_m = ۱/۱۴$ ، $C_t = ۲/۱۸$ و $C_s = ۱/۱۷$ تعریف می‌شوند. در معادله (۷)، نیروی براونی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_B = \zeta \sqrt{\frac{\pi S}{\Delta t}} \quad (11)$$

در اینجا، ζ اعداد تصادفی گاووسی مستقل با میانگین صفر و واریانس واحد است. در رابطه (۱۱) S شدت طیفی نیروی براونی است که به صورت زیر ارزیابی می‌شود:

$$S_c = \frac{۲۱۶ v K_B T}{\pi^2 \rho_f d_p^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right) C_c} \quad (12)$$

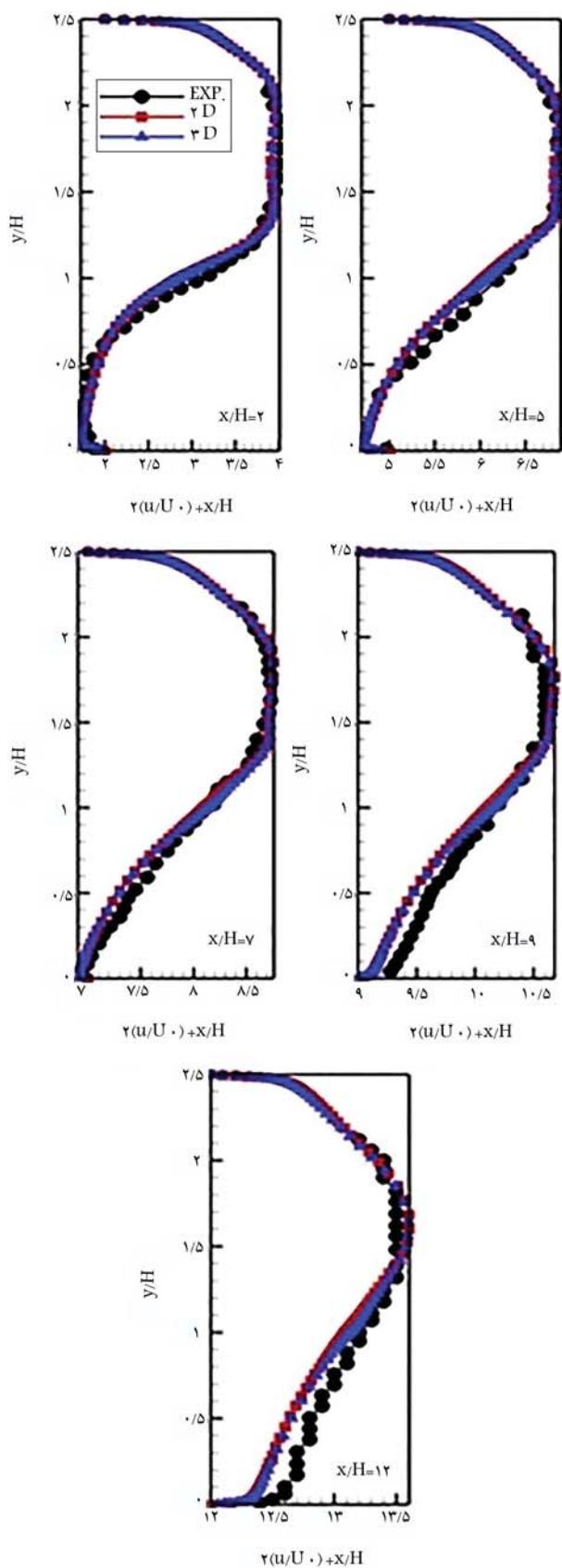
مطابق با فرمول $K_B v$ به ترتیب دمای مطلق سیال، ویسکوزیته سینماتیکی و ثابت بولتزمن بوده و برابر با $(JK^{-1}) - ۲۳ \times ۱۰ e - ۱/۳۸$ می‌باشد.

۲.۲. مدل‌سازی و شرایط مرزی

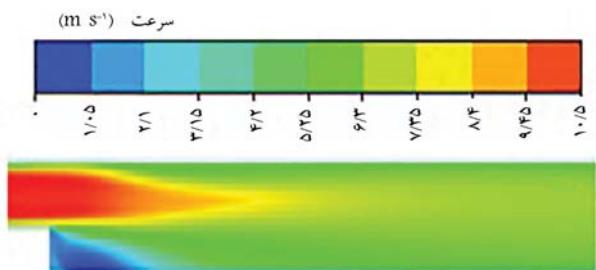
در این پژوهش، رفتار سیال شامل، نانو ذره روی مدل جریان پشت پله با هندسه ای که در شکل ۱ نشان داده شده، بررسی و با مشخصات ابعادی ارائه شده در جدول ۱ بیان شده است.

مدل‌سازی ۷ میدان، به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده و شبکه بندی آن به صورت با سازمان مستطیلی انتخاب شده است. شبکه در نزدیک دیواره‌ها به منظور بهبود کیفیت بررسی و حساسیت مطالعه تغییرات رفتار جریان در نزدیکی دیواره ریزتر و کوچک شده است. در نتیجه شبیه‌سازی انجام شده نشده تعداد سلول و ریزتر کردن اندازه المان‌ها تغییری در نتیجه شبیه‌سازی انجام شده نشده است، بنابراین نتیجه حاصل مستقل از اندازه مشن است. در حالت سه بعدی پهنای کanal ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده و برای شبکه بندی این پهنای یک بار آن را به صورت یک قسمت و حالت دوم به صورت ده قسمت شبکه بندی شده شد که نتایج حاصل از حالت اول بهتر بوده و از نظر هزینه زمان و محاسبه مناسب تر است. در شکل ۲، شبکه بندی انجام شده را مشاهده کرد.

استقلال از شبکه: برای بررسی استقلال حل و نتایج نسبت به شبکه بندی، سه شبکه با تعداد سلول ۱۷۲۵۲ و ۳۲۱۴۷ و ۷۸۲۹۰ برای حل دو بعدی در نظر گرفته شد که نتایج برای طول گردابه در جدول زیر برای هر شبکه بندی بیان شده



شکل ۴. نمودار سرعت در راستای x در پنج محور در مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ برای نتایج تجربی، دو بعدی، سه بعدی.



شکل ۳. توزیع سرعت در راستای x .

در روش اوپلری - لانگرانزی نیروی جرم مجازی و گرادیان فشار انتخاب شده و گزینه کوپلینگ توربولنس دوطرفه^۲ فعال شد. برای قانون پسا مدل کروی استفاده گردید. برای وارد کردن رابطه سرعت با مقدار ماکریم $10/5$ و میانگین $9/33$ متر بر ثانیه از معادله زیر به عنوان رابطه سرعت ورودی در راستای x استفاده شده است:

$$u = -1,9z^1 + 2z^9 + 4,7z^8 - 4,8z^7 - 4,3z^6 + 4,1z^5 + 1,6z^4 - 1,4z^3 - 1,0z^2 + 0,32z^1 + 1,0,5 \quad (13)$$

$$z = x - 0,045/0,014 \quad (14)$$

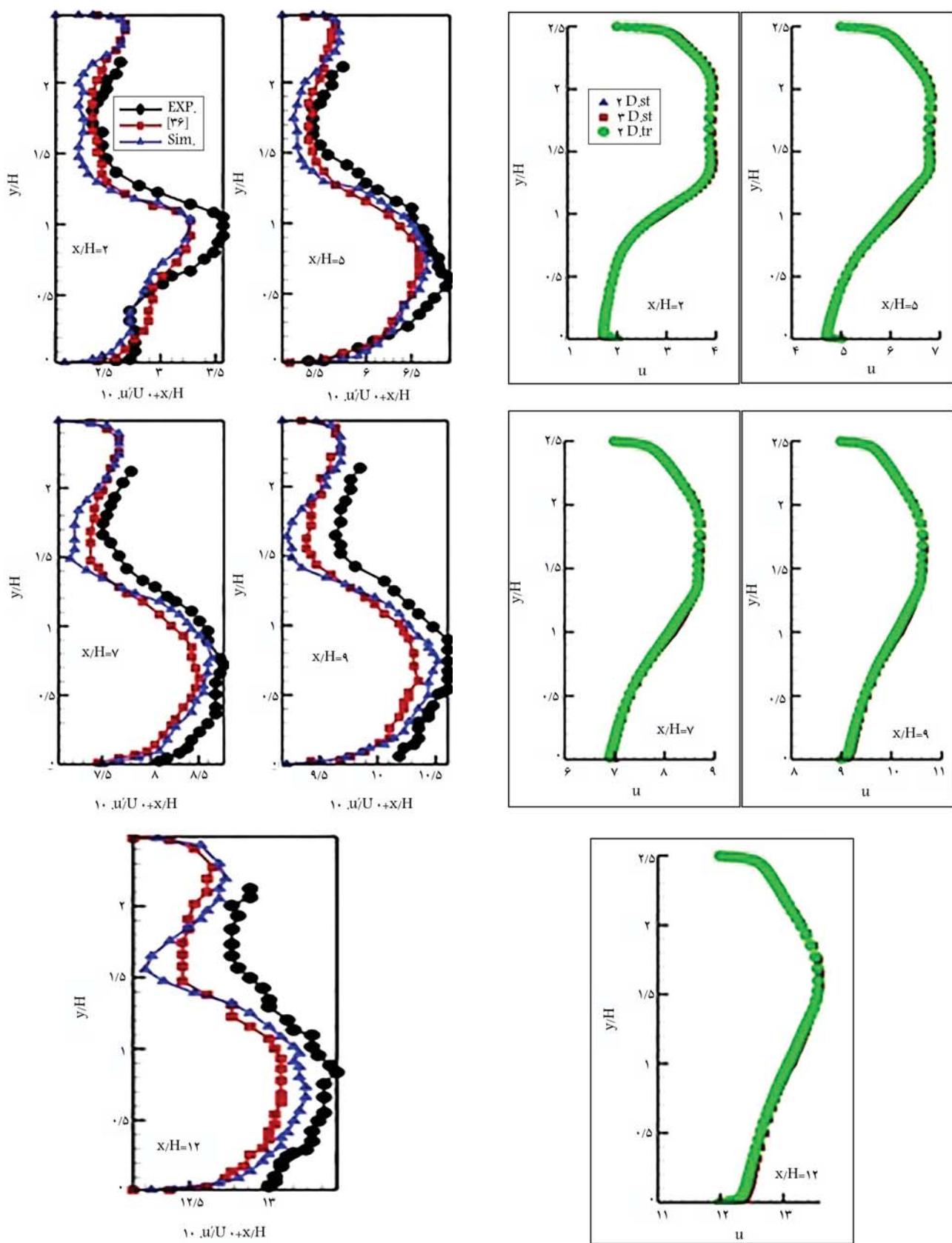
در شکل ۳ می توان توزیع سرعت در راستای x را در دامنه حل مشاهده کرد.

۳. بررسی نتایج

در شکل ۴، توزیع سرعت در راستای x نشان داده شده است. براساس این شکل، می توان دریافت که بیشترین مقدار سرعت در ورودی برابر با $10/5$ بوده و کمترین در گردابه تشکیل شده در پشت پله است که مقداری در خلاف جهت x دارد. مقدار سرعت صفر در نزدیکی دیواره مطابق با فرض عدم لغزش روی دیواره می باشد.

در شکل ۴ مقایسه ای بین سرعت در راستای x برای دو حالت دو بعدی و سه بعدی با مقادیر تجربی در ۵ مقطع $\{2, 5, 7, 9, 12\}$ در طول کاتال انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد که اختلاف نتایج دو بعدی (قرمز) با نتایج مساله به صورت سه بعدی (آبی) اندک بوده و منطبق با نتایج آزمایشگاهی می باشد. با افزایش فاصله از پله، در نزدیکی دیوار بایینی مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می شود که با افزایش فاصله مقدار خطای بیشتر می شود. بیشترین خطای در خط پنجم یعنی $x/H = 12$ نزدیک دیواره پایین برابر با 19 درصد است. بنابراین، می توان برای مدل سازی مساله کاهش هزینه محاسباتی و زمان حل از مدل دو بعدی استفاده نمود.

محاسبات شبیه سازی در حالت گذرا به دلیل وارد شدن زمان به معادلات، در زمانی طولانی تری انجام می شود. بنابراین، اگر پاسخ حل گذرا با حالت پایا تفاوتی نداشته باشد، حالت پایا مناسب تر و از نظر زمان و محاسبات مفروض به صرفه تر خواهد بود. از آنجایی که متغیر زمان در سرعت آشفتگی بیشترین تأثیر را دارد و موضوع مورد بحث نیز آشفتگی است، در شکل ۵ بین دو حالت پایا و گذرا در دو حالت دو بعدی و سه بعدی برای سرعت آشفتگی در ۵ مقطع مقایسه ای انجام شده است. همان طور که در شکل مشهود است، در حل ارائه شده هیچ تفاوتی بین دو حالت پایا و گذرا برای هندسه دو بعدی و سه بعدی دیده نمی شود و نتایج حاصل از آنها کاملا بر هم منطبق هستند.



شکل 6. مقایسه مقدار سرعت آشنازی حاصل از شبیه‌سازی و مقدار تجربی و مقاله گریزرو و همکاران [36].

شکل 5. مقایسه مقدار سرعت آشنازی در پنج مقطع کانال $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ در دو حالت پایا و گذرا برای دو مدل گسسته و پیوسته.

تراکم ذرات نزدیک دیواره بالایی بیشتر است، کanal را ترک می‌کنند. برای ذرات با قطر ۳۵ شکل (شکل ۷ - ب) اکثر ذرات مسیرشان را تا نصف طول کanal در نیمه بالایی کanal و در دو فاصله از دیواره طی می‌کنند و بعد از آن کمک پخش شده و مانند ذرات با قطر ۲۰ با تراکم تقریباً یکسان از کanal خارج می‌شوند. برای ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر (شکل ۷ - ت) ذرات در نقطه‌ی نزدیک ۴۰ درصد طول کanal، از ورودی به دیواره پایینی برخورد کرده و در ادامه اکثریت ذرات از مرکز کanal عبور کرده و مقداری نیز به طور بسیار نزدیک از دو دیواره بالایی و پایینی مسیر را ادامه می‌دهند و مابین ذرات عبورکننده از مرکز و دیواره می‌شوند. برای ذرات با قطر ۷۰ میکرومتر در نیمه بالایی کanal انتها را در شکل ۷ - ج مشاهده می‌شود، ذرات با قطر ۷۰ میکرومتر در همان طورکه در شکل ۷ - ج با دیواره پایینی کanal برخورد کرده و در ادامه دچار انحراف شده و سپس از انتهای کanal خارج می‌شود.

شکل ۷ - ج نشان می‌دهد ذراتی که دارای قطر ۱۰۰ هستند، در نقطه دورتری نسبت به ذرات با قطر ۷۰ به دیواره پایینی برخورد کرده که البته درصد این ذرات نسبت به کل ذرات، خیلی کم است و بیشتر ذرات در نیمه بالایی کanal جریان دارند و بعد از طی شدن ۷۵ درصد از طول کanal، ذرات در عرض کanal پخش می‌شوند و با تراکم یکسان از انتهای کanal عبور می‌کنند. برای ذرات با قطر ۲۰۰ میکرومتر شکل ۷ - ح، جریان ابتدا دچار یک انحراف می‌شود و سپس اکثر ذرات در ۸۰ درصد بالایی کanal را در انتهای ترک می‌کنند. جهت بهتر نشان دادن نتایج حاصل از تأثیر اندازه قطر ذرات بر مسیر حرکت، محل برخورد ذرات بر حسب درصد طول کanal در جدول ۴ به صورت کمی آورده شده است.

۲.۳. تأثیر عدد استوکس بر حضور ذره در گردابه مکانیزم اختلاط ذرات با سیال و انتشار ذرات توسط ساختار آشتفتگی، موضوعات مورد توجه در بسیاری از کاربردهای مهندسی است. درک تعامل بین ذرات و سیال آشفته برای بهبود عملکرد دستگاه‌های مهندسی مهم است. اکنون به خوبی شناخته شده است که تلاطم معمولاً توسط بسیاری از ساختارهای گردابی از مقیاس کولومگروف تا مقیاس طول مشخصه غالب است. انتظار می‌رود چنین ساختارهایی تأثیر قوی برای حرکت ذرات به شیوه‌ای سازمان یافته داشته باشند. در این بخش، اثرات گردابه‌ها بر ذرات با اعداد استوکس مختلف مقایسه شده است. نسبت زمان آرامش دینامیکی ذرات τ_p به مقیاس زمانی سیال τ_f جریان به عنوان عدد استوکس ذره تعریف می‌شود:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (16)$$

که در آن τ_p معرف زمان ریلکسیشن دینامیکی ذرات معياری از پاسخگویی یک ذره به میدان جریان سیال است و τ_f بیانگر مقیاس زمانی سیال، معياری از زمان موجود برای برهمنکش گردابی ذره می‌باشد. نقش اصلی عدد استوکس در تعیین اثرات تلاطم بر حرکت ذره در بررسی کرو و همکارانش اشاره شده است.^[۲۷]

جدول ۴. مقدار عدد استوکس بر حسب قطر ذرات.

قطر(میکرومتر)	۱۰۰	۷۰	۵۰	۳۵	۲۰	۱
درصد فاصله	۰	۰	۰	۰	۰	۰
طول برخورد (%)	۶۶/۶۶	۴۱/۶۶	۲۲/۵	۴۱/۶۶	۴۵	۵۵

در شکل ۶، مقایسه‌ای بین سرعت آشتفتگی جریان شبیه‌سازی و مقدار بدست آمده از نتیجه مقاله گریفو و همکاران^[۲۶] و مقدار تجربی در مقطع ۵ از کanal با مختصات $\{x/H = ۲, ۵, ۷, ۹\}$ صورت گرفته است. برای مدل‌های $\epsilon - k$ سرعت آشتفتگی از رابطه زیر بدست آمده است:

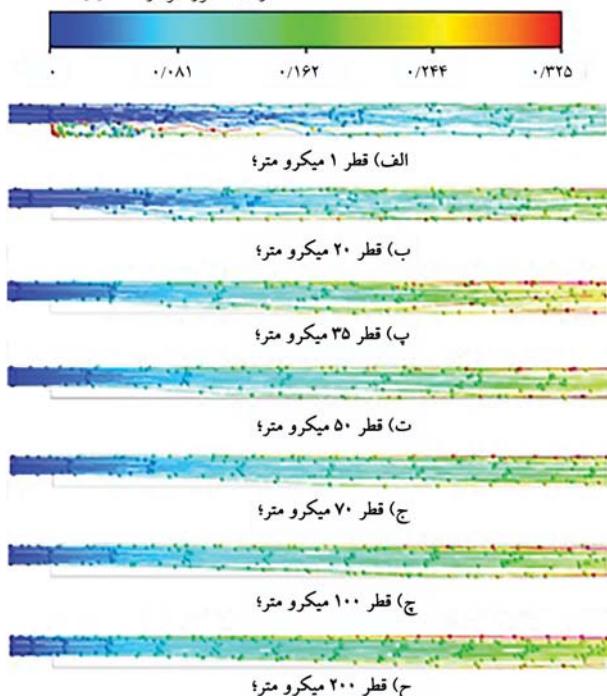
$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (15)$$

همان‌طورکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نتیجه ارائه شده در مقاله دارد و با درصد خطای ماکریزم ۱۹ درصد در نمودار پنجم در نیمه بالایی کanal اعتبارسنجی شده است.

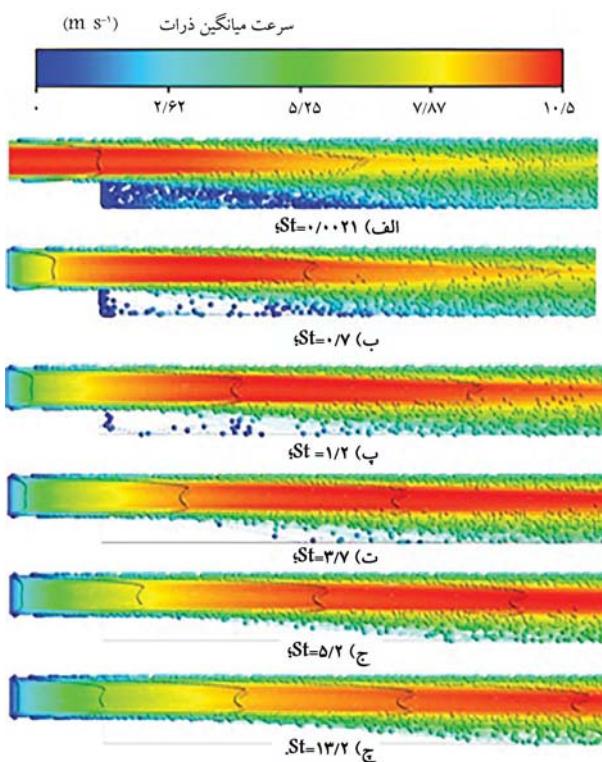
۱.۳. تأثیر قطر ذرات بر روی مسیر حرکت ذرات

با توجه به نتایجی که تاکنون گزارش شد، استفاده از هندسه دو بعدی و حالت پایانخانی مناسب برای شبیه‌سازی این مساله است و در ادامه با استفاده از این نتایج به بررسی رفتار ذرات در قطرهای مختلف $1, ۳۵, ۲۰, ۵۰$ و ۱۰۰ میکرومتر داخل جریان آشفته با رینولدز 18600 و مسیر ذرات و تأثیر قطر بر آنها پرداخته شده است. در شکل ۷ مسیر حرکت ذرات به ازای قطرهای مختلف آمده است. در شکل ۷ - الف مسیر حرکت نانوذرات با قطر ۱ - میکرومتر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود ذره در این اندازه بیشترین پخش شوندگی را نسبت به سایر اندازه‌ها دارد. با این وجود اکثر ذرات بعد از ورودی، ابتدا به صورت همگرا طول کanal را طی کرده و سپس به طور تدریجی پخش شده به طوریکه، کanal را با تراکم تقریباً یکدستی ترک نموده‌اند. در میانه کanal ذرات کمتری نزدیک دیواره بالا و پایینی حضور دارند. از شکل ۷ - ب مشاهده می‌شود برای ذرات با قطر 20 میکرومتر از میزان همگرایی اکثریت ذرات کاسته شده و ذرات بیشتر در نیمه بالایی کanal حضور دارند به طوریکه

زمان حضور نانوذرات [۸]



شکل ۷. مسیر حرکت ذرات به ازای قطرهای مختلف.



شکل ۸. حضور ذره با قطر های مختلف در گردابه پشت پله.

در فاصله دورتری از پشت پله به دیواره پایینی کانال برخورد می کنند که این نشان دهنده تطابق و پاسخ کمتر ذرات به سیال می باشد.

به عنوان نتیجه کلی، ذرات با عدد استوکس بسیار کوچک ($St < 1$) به شدت توسط ساختار گردابی فاز گاز کشته می شوند و از نزدیک گردابه های گاز را نبال می کنند. چنین ذراتی را نمی توان متمرکز کرد. ذرات با مقیاس زمانی مشابه مقیاس زمانی سیال ($0 \sim 10$) توسط یک گرداب چرخیده می شوند و در امتداد ناحیه محیطی گرداب متمرکز می شوند. ذرات با عدد استوکس بزرگ ($St > 1$) در حفظ حرکت خود پایدارتر هستند. آنها نمی توانند به حرکت گردابی در مقیاس زمانی سیال موجود پاسخ دهند و همچنین متمرکز نخواهند شد.

در شکل ۸، مقایسه ای برای سرعت آشفتگی نانوذرات در دو حالت دو بعدی و سه بعدی با نتایج تجربی و نتایج حاصل از مطالعه یوکین فونگ^[۳۹] در پنج مقطع کانال با مختصات $\{x/H = 2, 5, 7, 9, 12\}$ است. وی در مطالعه خود برای بدست آوردن سرعت آشفتگی یک حجم کشته در نظر گرفته و برای آن فرمولی نوشته است. در حالت دو بعدی اختلاف بسیاری در مطالعه فونگ دیده می شود و داده ها به نسبت نتایج سه بعدی از پراکندگی بیشتری برخوردار هستند که باعث خطای بالای آن شده است. در شبیه سازی انجام شده، نتایج سه بعدی در اکثر نقاط بیشتر از نتایج دو بعدی به داده های تجربی نزدیک می باشد. با این وجود، بیشینه خطای نتایج دو بعدی شبیه سازی از نتایج دو بعدی فونگ، بسیار کمتر است و نشان دهنده دقت بالای شبیه سازی می باشد. بنابراین، برای بررسی رفتار ذره و بررسی سرعت آشفتگی مدل سازی سه بعدی دارای دقت بالاتری است.

همان طور که پیش تر به آن اشاره شد، ذرات با قطر کمتر از 20 - میکرومتر ، گردابه پشت پله را به طور محسوس و با تأثیر پذیری بیشتری نسبت به ذرات با قطر بزرگتر احساس می کنند. در شکل ۱۰ مقدار سرعت منفی پشت پله برای سه قطر $1, 10, 20$ میکرومتر ذرات به 70 و 100 (شکل ۸ - ج و شکل ۸ - ج) ذرات با افزایش قطر

جدول ۵. مقدار عدد استوکس بر حسب قطر ذرات.

ذره چگالی	مس
۱۰۰	۸۸۰
۷۰	
۵۰	
۳۵	
۲۰	
۱	
۰/۰۲۱	
۰/۷	
۰/۲	
۵/۲	
۳/۷	
۰/۰۲۱	
۰/۷	
۱/۲	
۰/۰۲۱	

با توجه به آزمایش فسلرو ایتون،^[۳۸] مقیاس زمانی سیال را می توان با رابطه 16 نشان داد:

$$\tau_f = \frac{\rho H_0}{U_0} \quad (17)$$

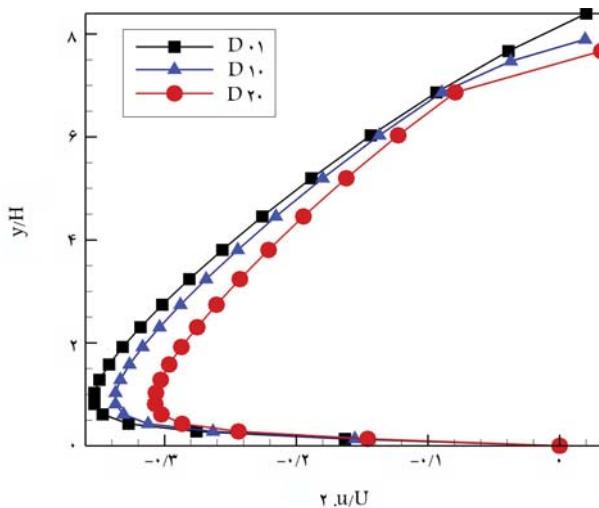
به طور یکه براساس یک فرکانس تقریبی عبوری از گردابه بزرگ در لایه برشی جدا شده است. زمان ریلکسشن دینامیکی ذرات اصلاح شده توسط فسلرو ایتون به شرح زیر است:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^3}{18\mu \left(1 + 0.15 Re_p^{0.687} \right)} \quad (18)$$

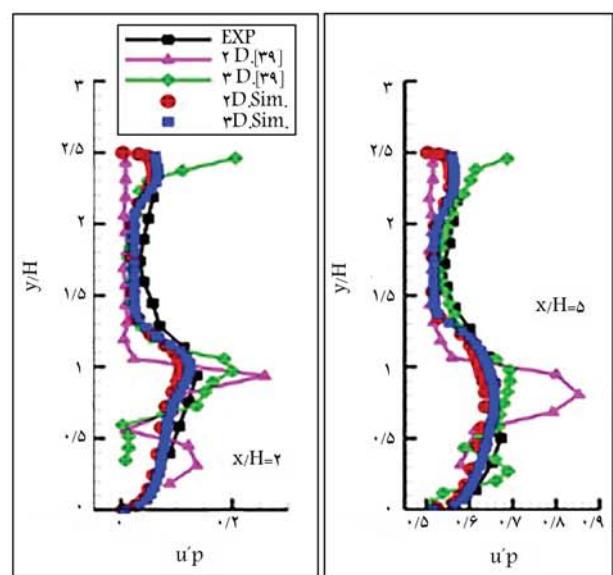
در این رابطه Re_p عدد رینولدز میانگین ذرات است که بر اساس یافته های تجربی فسلرو ایتون با میانگین سرعت لغزش فرضی $1/2$ متر بر ثانیه محاسبه می شود. اگر $St < 1$ باشد، زمان ریلکسشن ذرات بسیار کمتر از زمان مشخصه مرتبط با میدان جریان است. بنابراین، ذرات و سیال تقریباً در تعادل سرعت هستند. از طرف دیگر اگر $St > 1$ باشد، ذرات اساساً زمانی برای پاسخ به تغییرات سرعت سیال ندارند و سرعت ذرات تحت تأثیر فاز سیال قرار نمی گیرد.

کره های مسی با قطرهای $1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 50, 70$ و 100 میکرومتر به ترتیب برای شبیه سازی ذرات با عدد استوکس های مختلف همانطور که در جدول ۵ فهرست شده است، انتخاب شده اند. هر مجموعه ای از کره های هماندازه، زمانی وارد جریان می شود که نتیجه شبیه سازی فاز گاز همگرا شده باشد. سرعت اولیه ذرات برابر با سرعت سیال محلی تنظیم شده است و اطمینان حاصل می شود که ذرات در تعادل دینامیکی با جریان گاز هستند.

شکل ۸، مسیر حرکت ذرات نانو در اعداد استوکس مختلف را در میدان جریان نشان می دهد. حضور ذره با قطر 1 میکرومتر در جریان با عدد استوکس $0/00211$ که بسیار کوچکتر از 1 است در شکل ۸ - الف آمده است. ذره کاملاً خود را با تغییرات سرعت جریان منطبق کرده و بنابراین، می توان شاهد حضور زیادی از ذرات در گردابه پشت پله باشیم. با افزایش قطر ذره به 20 میکرومتر عدد استوکس $0/704$ می شود که عددی بسیار نزدیک به 1 است. مطابق شکل ۸ - ب ذرات کمتری گردابه پشت پله را احساس کرده و همراه جریان سیال پایه می شوند. این ذرات برای قطر 35 میکرومتر بسیار کاهش یافته و ذراتی هم که گردابه را احساس می کنند از مرز آن عبور کرده و به داخل آن کشیده نمی شوند و مطابق شکل ۸ - پ اکثر ذرات با این قطر از کنار گردابه عبور کرده اند بدون این که حضور آن را احساس کنند و به تغییرات سیال پایه، پاسخ دهند. برای ذرات با قطر 50 میکرومتر شکل ۸ - ت عدد استوکس $3/7$ است و برای قطر بیشتر از 1 ، این ذرات بدون این که حتی از مرز گردابه عبور کنند و به سمت پشت پله بازگردند به مسیر خود ادامه داده و تنها پاسخ آنها به تغییرات فاز گاز برخورد با دیواره پایینی کانال بعد از گردابه بوده است. با بیشتر شدن سایز ذرات به 70 و 100 (شکل ۸ - ج و شکل ۸ - ج) ذرات با افزایش قطر

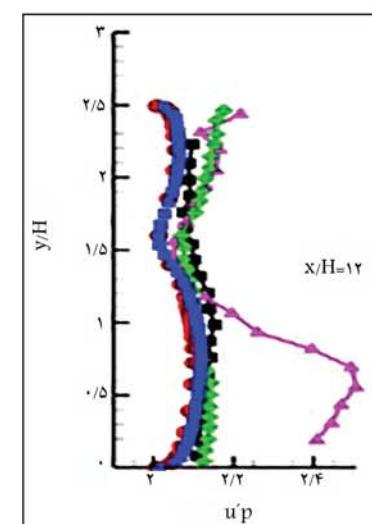
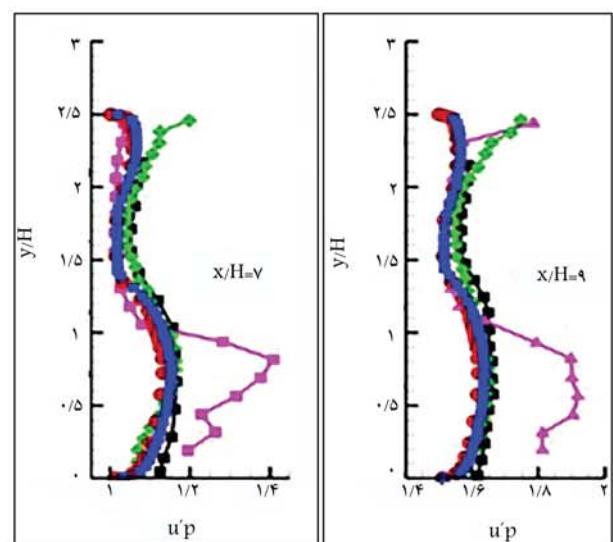


شکل ۱۰. مقایسه مقدار سرعت منفی پشت پله برای سه قطر ۱، ۱۰، ۲۰ میکرومتر در مختصات $x/H = \{2\}$ در گردابه.



همان‌طورکه در شکل قبل مشاهده است، ذرات سبکتر با ارتفاع بیشتری نسبت به دیواره پایینی کانال، شروع به برگشت کرده و سرعت برگشت بیشتری دارند. به‌طوری‌که به ترتیب ذرات با قطرهای ۱، ۱۰ و ۲۰ میکرومتر بیشترین فاصله بازگشت را دارند. از نظر اندازه سرعت بازگشت، ذره با قطر ۱ میکرومتر (با مقدار بیش از -0.35) دارای بیشترین مقدار و بعد از آن ذرات با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میکرومتر با مقدار کمتر از -0.5 و بیشتر از -0.3 به ترتیب مقداری بعده را به‌خود اختصاص داده‌اند.

در شکل ۱۱، مدل‌های مختلف آشتفتگی دو معادله $K\omega$ و $K\epsilon$ بررسی شده است. به‌طورکلی، معادلات مربوط به مدل $K\omega$ به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌باشد. بیشترین اختلاف مدل‌های آشتفتگی $K\epsilon$ در قسمت بیشینه پروفایل سرعت است که این مقدار خطأ با پیش‌روی در طول کانال افزایش می‌یابد. درین مدل‌های $K\omega$ بیشترین تطابق با نتایج تجربی را مدل SST دارد و بعد از آن، با اختلاف $K\omega$ خیلی کم، مدل BSL برای شبیه‌سازی آشتفتگی جریان مناسب می‌باشد و در پایان، مدل استاندارد $K\omega$ در جایگاه سوم قرارمی‌گردد. بنابراین، در این مطالعه از مدل $K\omega$ برای شبیه‌سازی آشتفتگی استفاده شده است.

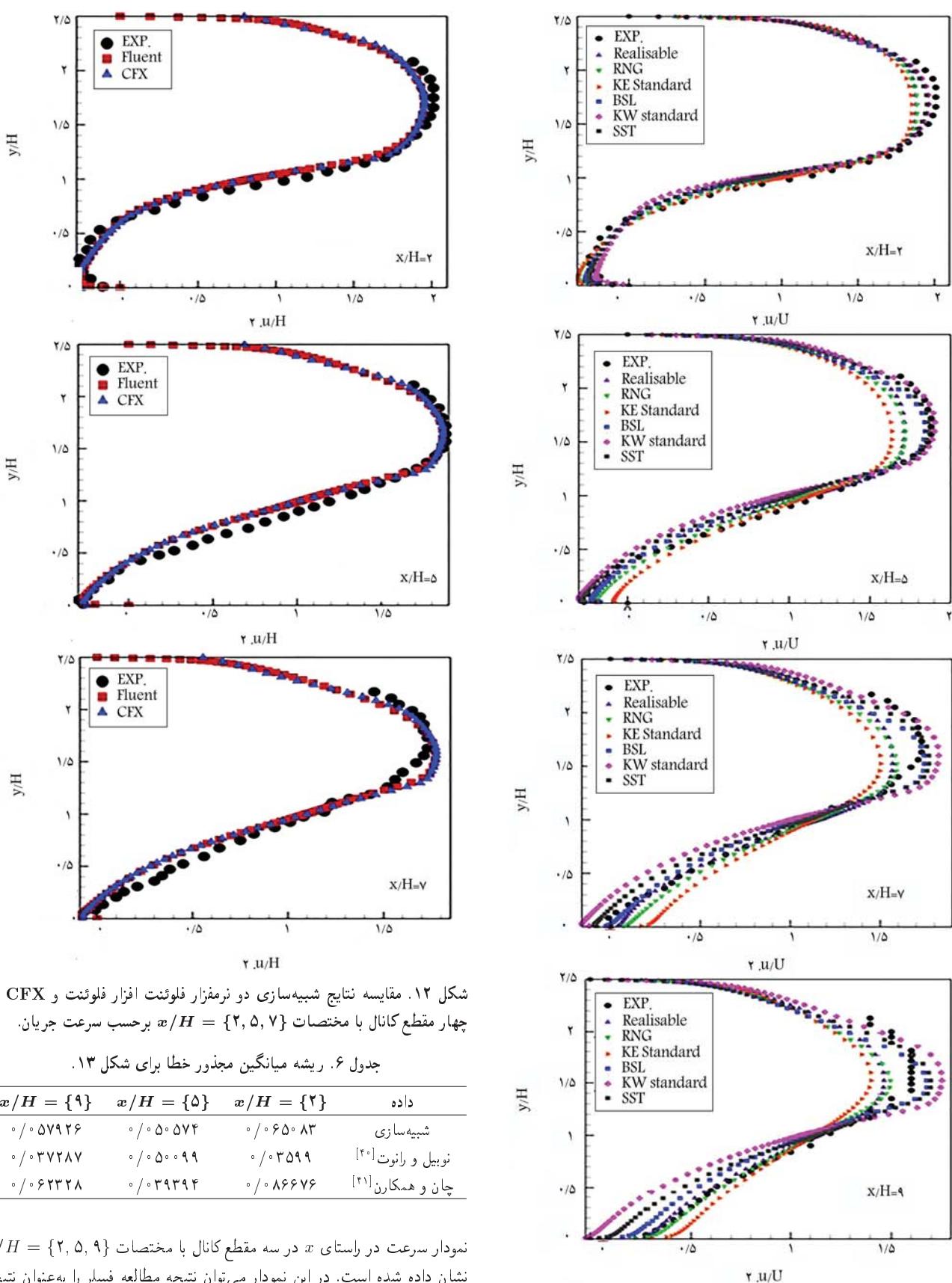


شکل ۹. مقایسه آشتفتگی سرعت نانوذرات در پنج مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ دو حالت دو بعدی و سه بعدی. [۳۹]

۳. شبیه‌سازی مساله جریان پشت پله با نرم‌افزار CFX

در ادامه، جهت شبیه‌سازی ناؤسیال در جریان آشتفته در نرم‌افزار CFX و بررسی میزان تطابق نتایج حاصل با داده‌های تجربی این مساله در CFX شبیه‌سازی شد. برای یکسان بودن شرایط مقایسه از همان هندسه و مش قبلی در حل فلوئینت استفاده شده است. هندسه دو بعدی می‌باشد و حل با روش حجم محدود و رویکرد اویلری - لاگرانژی به صورت دوراهه انجام شده است. حل به صورت پایا بوده و برای ورود هندسه دو بعدی به نرم‌افزار CFX که فقط هندسه‌های سه بعدی را حل می‌کند، از گزینه تقارن استفاده شده است. به‌این ترتیب، نرم‌افزار به طور خودکار هندسه دو بعدی را به هندسه سه بعدی با عمق بسیار کوچکی تبدیل می‌کند که تأثیر چندانی روی نتیجه حل ندارد. همان‌طورکه از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تطابق خوب و قابل قبولی در شبیه‌سازی دوفازی با رویکرد اویلری - لاگرانژی با نتایج تجربی و توسط فلوئینت و CFX وجود دارد. از این جهت می‌توان از مزایای سرعت همگرایی و حل نرم‌افزار CFX مخصوصاً در مسائل پایا استفاده کرد.

نتیجه با شبیه‌سازی نوبیل و رانوت^[۴۰] اعتبار سنجی شد. در شکل ۱۳، می‌توان



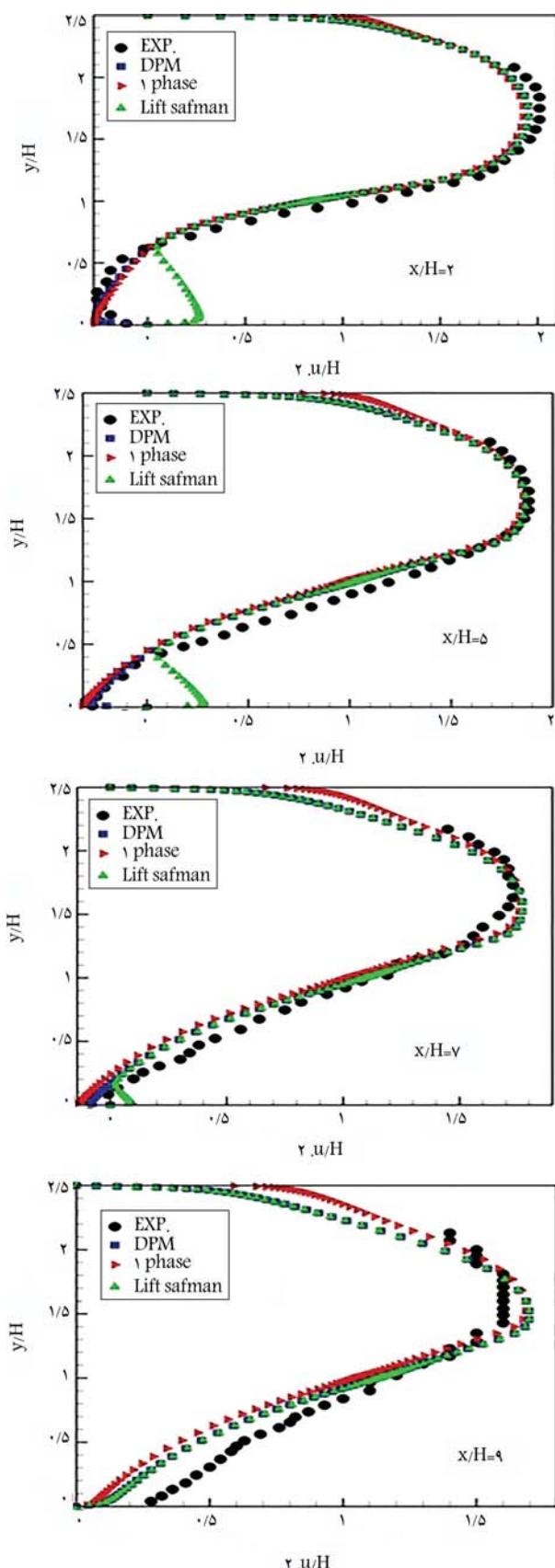
شکل ۱۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو نرم‌افزار فلوئیت افزار فلوئیت و CFX در چهار مقطع کanal با مختصات $\{2, 5, 7, 9\}$ بر حسب سرعت جریان.

جدول ۶. ریشه میانگین مجدور خطای شکل ۱۳.

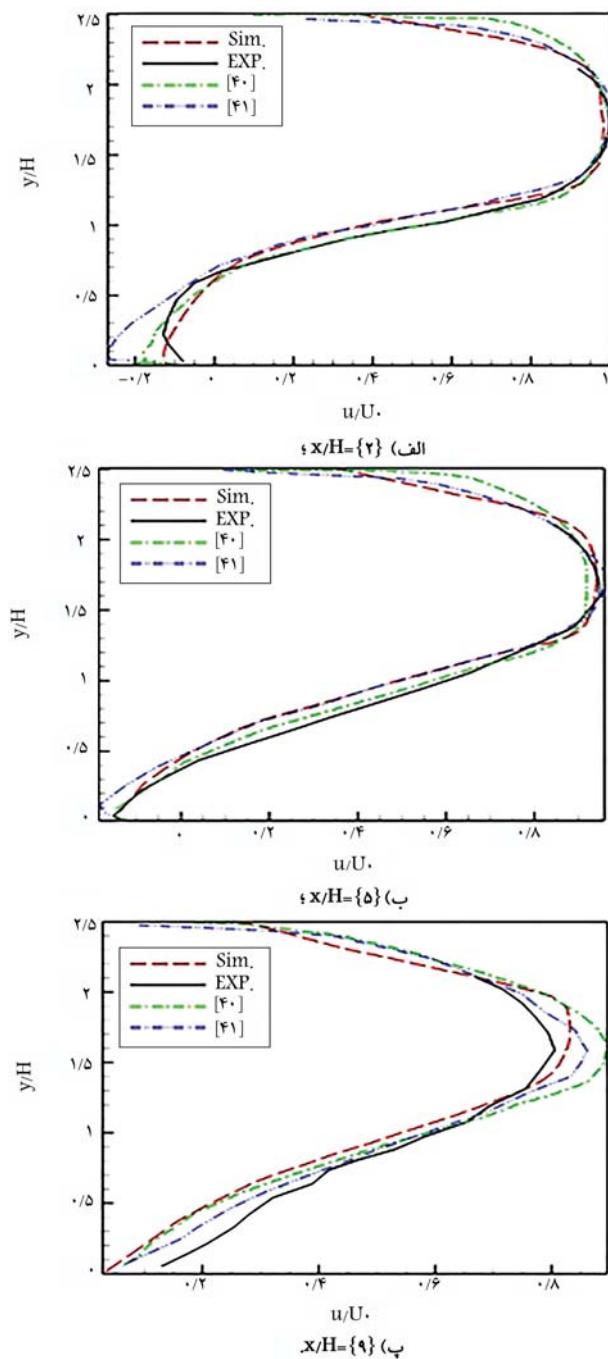
$x/H = \{9\}$	$x/H = \{5\}$	$x/H = \{2\}$	داده شبیه‌سازی
$\circ/0.57926$	$\circ/0.50574$	$\circ/0.65083$	نوبل و رانوت [۴۰]
$\circ/0.37287$	$\circ/0.50099$	$\circ/0.3599$	چان و همکاران [۴۱]
$\circ/0.62228$	$\circ/0.39394$	$\circ/0.86676$	

نمودار سرعت در راستای x در سه مقطع کanal با مختصات $\{2, 5, 9\}$ نشان داده شده است. در این نمودار می‌توان نتیجه مطالعه فسیر را به عنوان نتیجه تجربی و نتیجه مطالعه‌ی چان و همکاران [۴۱] را نیز مشاهده کرد. در جدول ۶، می‌توان ریشه میانگین مجدور خطای برای داده‌های شکل ۱۳

شکل ۱۱. مقایسه مدل‌های آشنتگی در چهار مقطع کanal با مختصات $\{2, 5, 7, 9\}$ بر حسب سرعت جریان.



شکل ۱۴. مقایسه نتایج شبیه سازی دو نرم افزار فلوئنت افزار فلوئنت و CFX در چهار مقطع کانال با مختصات $\{x/H = \{2, 5, 7, 9\}\}$ بر حسب سرعت جریان.



شکل ۱۳. پروفیل سرعت در راستای x .

مشاهده کرد. همان طور که از جدول مشاهده می شود میانگین خطای برای شبیه سازی در سه مختصات یاد شده برابر با $57/0$ می باشد. این مقدار میانگین خطای برای داده های نویل و رانوت، چان و همکاران به ترتیب برابر است با $41/0$ و $27/0$ از بین این سه خطای کمترین خطای مربوط به نویل و رانوت است و بعد از آن خطای مطالعه حاضر و در آخر مطالعه چان و همکاران قرار دارد.

در این بخش از مطالعه به بررسی اعتبار روش DPM پرداخته شده است که نتایج آن در شکل ۱۴ آورده شده است. در این روش معادلات برای فاز گسیله و پیوسته به صورت جداگانه حل می شود و در نهایت فاز گسیله توسط ترم چشممه به فاز پیوسته ربط داده می شود. این روش حل، مستلزم محاسبات و هزینه زمانی

فهرست علائم

ρ : کسر حجمی ذره؛
ρ_{eff} : چگالی مؤثر نانوسيال (kg/m^3)؛
ρ_p : چگالی فاز دوم (ذره) (kg/m^3)؛
ρ_f : چگالی فاز اول (سيال) (kg/m^3)؛
$\rho_{n,f}$: چگالی نانوسيال (kg/m^3)؛
τ : تنش برشی (N/m^2)؛
τ_{TD} : نسبت قطر ذرات؛
τ_p : زمان ريلکسشن ديناميکي ذرات؛
τ_f : مقیاس زمانی سیال؛
μ : ویسکوزیته دیناميکی ($kg/m\ s$)؛
μ_f : ویسکوزیته دیناميکی سیال ($kg/m\ s$)؛
$\mu_{n,f}$: ویسکوزیته دیناميکی نانوسيال ($kg/m\ s$)؛
λ : مسیر آزاد سیانگین سیال (m)؛
v : اعداد تصادفی گاوی سیال با میانگین صفر و واریانس واحد؛
v : ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)؛
ω : فرکانس آشفتگی (s^{-1})؛
δV : حجم سلول (m^3)؛
A_p : مساحت سطح ذرات (m^2)؛
C_c : تصحیح کانیشگاه؛
C_p : ظرفیت گرمایی ($J/kg\ K$)؛
$C_{p,bf}$: ظرفیت گرمایی سیال پایه ($J/kg\ K$)؛
$C_{p,p}$: ظرفیت گرمایی نانوذرات ($J/kg\ K$)؛
$C_{p,nf}$: ظرفیت گرمایی نانوسيال ($J/kg\ K$)؛
d_f : قطر ذرات سیال (m)؛
d_p : قطر ذره (m)؛
e : عدد نپر؛
f_B : نیروی براونی (N)؛
F_D : نیروی پسا (N)؛
f_{th} : نیروی ترموفورز (N)؛
h : ارتفاع کanal (m)؛
H : ارتفاع پله (m)؛
u_B : سرعت براونی نانوذرات (m/s)؛
u' : سرعت آشفتگی در راستای x (m/s')؛
Re_p : عدد رینولدز بر اساس سرعت نسبی و قطرذره؛
K : انرژی جنبشی آشفتگی ($J/s^2\ m^3$)؛
K_B : ثابت بولتزمن؛
K_{eff} : هدایت حرارتی موثر برای نانوسيال ($W/m\ K$)؛
k_f : رسانایی حرارتی سیال ($W/m\ K$)؛
k_p : رسانایی حرارتی ذره ($W/m\ K$)؛
Kn : عدد ناسن؛
l_{BF} : طول آزاد (m)؛
m_p : جرم ذره (kg)؛

بیشتری می‌باشد. اما در روش تک فاز یک سیال، پیوسته با خواص موثر جدید که تابع خواص سیال و نانوذره و درصد حجمی می‌باشد تعريف شده و معادلات تها برای یک سیال تک فاز حل می‌گردد. اگرچه این روش در محاسبات و زمان به صرفه می‌باشد اما، دقت در ازای این صرفه جویی کم شده و درصد خطای بالا می‌رود. در این مسئله برای رویکرد DPM ماکریزم خطای سرعت ۱۹ درصد بوده و برای روش نک فاز این مقدار خطای ۲۵ درصد افزایش می‌باشد. در حل DPM نیروهای مگرایان فشار، جرم مجازی و درگ فعال می‌باشد. زمانی که نیروی سافمن را وارد حل نموده، مشاهده می‌شود نمودار سرعت در بخش گردا به دچار خطای زیادی شده و از روند تجزیبی فاصله می‌گیرد. برای محاسبه رویکرد تک فاز چگالی موثر نانوسیال، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\rho_{nf} = (1-x)\rho_f + x\rho_p \quad (19)$$

به طوریکه در رابطه فوق m چگالی ذره (مس)، چگالی سیال پایه (هوا) و x کسر حجمی و برابر ۳ درصد می باشد.

۴. نتیجہ گیری

برای شبیه‌سازی جریان نانوسيال در هندسه پشت پله و بهمنظور بهترین انتخاب و بررسی رفتار نانوذرات در جریان آشفته و تأثیر آشفتگی بر روی ذرات و بالعکس، دو هندسه دو بعدی و سه بعدی در دو حالت پایا و گذرا با استفاده از رویکرد اویلری - لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفت. رینولدز جریان مورد مطالعه 18600 است. تأثیر قطر ذره و عدد استوکس روی مسیر حرکت ذره در جریان آشفته نیز بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای یافتن نمودار سرعت در راستای x در حالت هندسه سه بعدی نسبت به نتایج حالت دو بعدی، تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد. نتایج برای سرعت آشفتگی در دو حالت پایا و گذرا کاملاً برهم منطبق شد و هیچ تفاوتی در آنها دیده نشد. برای ذرات با قطر کوچکتر از 35 میکرومتر، نانوذرات گردابه پشت پله را احساس کرده و در نزدیکی دیواره مسیری را برخلاف جریان طی می‌کنند و با افزایش قطر این مسیر بازگشت کوتاه می‌شود. همچنین، در این مطالعه، تأثیر قطر ذره در مسیر و پراکنده‌گی بررسی گردید که مطابق با نتایج حاصل، برای ذرات با استوکس پایین نانوذرات با پراکنده‌گی بیشتر و به صورت پخش از کانال خارج می‌شود. با افزایش عدد استوکس و سینکنگین‌تر شدن ذرات میزان پراکنده‌گی کاهش یافته و مسیر ذرات ابتدا دچار یک انحراف شده و سپس بیشتر ذرات از نیمه بالایی کانال خارج شدند. ذرات با عدد استوکس کمتر از 1 ، فرست کافی برای پاسخ به تغییرات جریان را دارند و از این جهت وارد گردابه‌ها شده و جریان سیال پایه را دنبال می‌کنند. بنابراین، با توجه به هدف این مطالعه که بررسی رفتار ذره در جریان آشفته است، ذراتی انتخاب شدند که دارای عدد استوکس بسیار کوچک و کمتر از 1 باشند تا وارد گردابه‌ها در جریان آشفته شوند و امکان مطالعه و بررسی رفتارشان وجود داشته باشد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی با نتایج تجربی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه بعدی با خطای بسیار کم تطبیق بالایی با نتایج تجربی دارند. نتایج حاصل از مدل SST نشان می‌دهد که این مدل با کمترین درصد خطا بهترین مدل و بعد از آن مدل BSL برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان نانوسيال پیشنهاد می‌شود. مطابق با نتایج به دست آمده، استفاده از نیروی برای سازمان توصیه نمی‌شود و استفاده از این نیرو سبب ایجاد خطای در پیش‌بینی مقادیر در ناحیه گردابه می‌شود.

: زمان (s)	: t	: تعداد ذرات درون یک حجم سلول:	: np
: بردار سرعت (m/s)	: \vec{V}	: فشار (p)	: P
: سرعت سیال (m/s)	: V_f	: عدد استوکس:	: st
: سرعت ذره (m/s)	: V_p	: ترم چشمی از ری ذرات:	: S_h
: سرعت آشفتگی در راستای y (m/s)	: v'	: ترم چشمی تکانه ذرات:	: S_v
: پهنای کاتال (m)	: w	: شدت طیفی نیروی براونی:	: S.
: سرعت آشفتگی در راستای (m/s)	: w'	: دما (k)	: T
: مکان ذره (m)	: X_p	: دمای ذره (k)	: T_p

پانوشت‌ها

1. Thermophores
2. Two-Way Turbulence Coupling

منابع (References)

1. Sommerfeld, M., von Wachem, B. and Oliemans, R., 2008. Best practice guidelines for computational fluid dynamics of dispersed multiphase flows. European Research Community On Flow, Turbulence and Combustion.
2. Crowe, C.T., Troutt, T.R. and Chung, J.N., 1996. Numerical models for two-phase turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28, pp.11-43.
3. Spalding, D.B., 1981. A general purpose computer program for multi-dimensional one- and two-phase flow. *Mathematics and Computers in Simulation*, 23, pp.267-276.
4. Crowe, C.T., Sharma, M.P. and Stock, D.E., 1977. Particle-Source in Cell (Psi-Cell) Model for Gas-Droplet Flows. *Journal of Fluids Engineering-Transactions Of the ASME*, 99(2), pp.325-332.
5. Crowe, C.T., Chung, J.N. and Troutt, T.R., 1988. Particle mixing in free shear flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 14(3), pp.171-194.
6. Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972. Lectures in mathematical models of turbulence, New York: Academic Press.
7. Faeth, G.M., 1987. Mixing, transport and combustion in sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 13(4), pp.293-345.
8. Yuu, S., Yasukouchi, N., Hirosawa, Y. and Jotaki, T., 1978. Particle diffusion in a duct laden jet. *Aiche Journal*, 24, pp.509-519.
9. Berlemont, A., Desjonquieres, P. and Gouesbet, G., 1990. Particle lagrangian simulation in turbulent flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 16(1), pp.19-34. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(90\)90034-G](https://doi.org/10.1016/0301-9322(90)90034-G).
10. Lockwood, F.C., and Papadopoulos, C., 1989. A New method for the computation of particulate dispersion in turbulent 2-Phase flows. *Combustion and Flame*, 76(3-4), pp.403-413. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90121-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90121-1).
11. Wen, F., Kamalu, N., Chung, J.N., Crowe, C.T. and Troutt, T.R., 1992. Particle dispersion by vortex structures in plane mixing layers. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 114, pp. 657-666.
12. Joia, I.A., Ushijima, T., and Perkins, R.J., 1997. Numerical study of bubble and particle motion in a turbulent boundary layer using proper orthogonal decomposition. *Applied Scientific Research*, 57(3-4), pp.263-277.
13. Moin, P. and Kim, J., 1982. Numerical investigation of turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 118, No. May, pp. 341-377. <https://doi.org/10.1017/S0022112082001116>.
14. Elghobashi, S. and Truesdell, G.C. 1992. Truesdell, direct simulation of particle dispersion in a decaying isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 242, pp.655-700. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112092002532>.
15. Tian, Z.F., Tu, J.Y. and Yeoh, G.H., 2005. Numerical simulation and validation of dilute gas-particle flow over a backward-facing step. *Aerosol Science and Technology*, 39(4), pp.319-332. <http://dx.doi.org/10.1080/027868290930961>.
16. Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z.G. and Zhu, J., 1995. A New kappa-epsilon eddy viscosity model for high reynolds-number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), pp. 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T).
17. Yu, K.F., 2002. Large eddy simulation of particle-laden turbulent flow over a backward-facing step, MPhil Thesis: The Hong Kong Polytechnic University.
18. Wang, B., Zhang, H.Q., Yu, K.F., Wang, X.L., Guo, Y.C., and Lin, W.Y., 2003. Numerical simulation of large eddy structures evolution behind backward-facing step. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 24(2), pp.166-173. [10.1115/FEDSM2003-45743](https://doi.org/10.1115/FEDSM2003-45743).

19. Wang, B., Zhang, H.Q., Yu, K.F., X.L. Wang, X.L., Guo, Y.C., and Lin, W.Y., 2003. Large eddy simulation of a gas-particle two-dimensional backward-facing step flow. *Journal of Combustion Science and Technology*, 9(5), pp.447-452. <http://dx.doi.org/10.1115/FEDSM2003-45743>.
20. Yu, K.F., Lau, K.S. and Chan, C.K., 2004. Numerical simulation of gas-particle flow in a single-side backward-facing step flow. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 163(1), pp.319-331. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2003.08.077>.
21. Yu, K.F., Lau, K.S., and Chan, C.K., 2004. Large eddy simulation of particle-laden turbulent flow over a backward-facing step. *Communications In Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 9, pp.251-262. [http://dx.doi.org/10.1016/S1007-5704\(03\)00113-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1007-5704(03)00113-8).
22. Mahdavi, M., Sharifpur, M. and Meyer J.P., 2015. CFD modelling of heat transfer and pressure drops for nanofluids through vertical tubes in laminar flow by Lagrangian and Eulerian approaches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, pp. 803-813. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.112>.
23. Kumar, N. and Puranik, B.P. 2016. Numerical study of convective heat transfer with nanofluids in turbulent flow using a Lagrangian-Eulerian approach. *Applied Thermal Engineering*, 111, 25 January 2017, pp.1674-1681. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.038>.
24. Maganti, L.S., Dhar, P., Sundararajan, T. and Das, S. K. 2016. NanofluidsParticle and thermohydraulic maldistribution of nanofluids in parallel microchannel systems. *Microfluidics and Nanofluidics*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10404-016-1769-3>.
25. Rashidi, S., Bovand, M., Abolfazli Esfahani, J. and Ahmadi, G. 2016. Discrete particle model for convective AL2O3-water nanofluid around a triangular obstacle. *Thermal Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.076>.
26. Albojamal, A. and Vafai, K. 2017. Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, pp.225-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.030>.
27. Mahdavi, M., Sharifpur, M. and Meyer. J.P., 2018. Discrete modelling of nanoparticles in mixed convection flows. *Powder Technology*, 338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.025>.
28. Saeed, F.R. and Al-Dulaimi, M.A., 2021. Numerical investigation for convective heat transfer of nanofluid laminar flow inside a circular pipe by applying various models. *Archives of Thermodynamics*, 42, pp.71-95. DOI:10.24425/ather.2021.136948.
29. Uribe, S., Zouli, N., Cordero, M.E. and Al-Dahhan, M. 2021. Development and validation of a mathematical model to predict the thermal behaviour of nanofluids. *Heat Mass Transf*, 57, pp.93-110. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-020-02927-5>.
30. Taskesen, E., Tekir, M., Gedik, E. and Arslan, K. 2021. Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation of Fe3O4/water nanofluids in different cross-sectioned channel geometries. *J. Therm. Eng*, 7, pp.1752-1767. <http://dx.doi.org/10.18186/thermal.1025984>.
31. Yildiz, M. and Aktürk, A. 2021. Numerical investigation on heat transfer and hydraulic performance of Al2O3-Water nanofluid as a function of reynolds number and flow velocity. *Int. J. Heat Mass Transf*, 11, pp.535-547. <http://dx.doi.org/10.21597/jist.770939>.
32. Zhang, X. and Li, J. 2022. A review of uncertainties in the study of heat transfer properties of nanofluids. *Heat Mass Transf*, pp.1-33. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-022-03276-1>.
33. Goutam, S. and Paul, M.C. 2014. Discrete phase approach for nanofluids flow in pipe. In: *Second International Conference on Advances In Civil, Structural and Mechanical Engineering- CSM 2014*, 16-17 Nov. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-054-5-59>.
34. Deepak Selvakumar, R., Dhinakaran, S., 2017. Heat transfer and particle migration in nanofluid flow around a circular bluff body using a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115. pp.282-293. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.103>.
35. Bovand, M., Rashidi, S., Ahmadi, G. and Abolfazli Esfahani, J. 2016. Effects of trap and reflect particle boundary conditions on particle transport and convective heat transfer for duct flow-A two-way coupling of Eulerian Lagrangian Model, *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.124>.
36. Franziska Greifzu, Christoph Kratzsch, Thomas Forger, Friederike Lindner, and Rüdiger Schwarze. 2016. Assessment of particle-tracking models for dispersed particle-laden flows implemented in OpenFOAM and ANSYS FLUENT. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2015.1104266>
37. Crowe, C.T., Chung, J.N., and Troutt, T.R., 1988. Particle Mixing in Free Shear Flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 14(3), pp.171-194. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(88\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0360-1285(88)90008-1).
38. Fessler, J.R. and Eaton, J.K., 1999. Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 394, pp.97-117. <https://doi:10.1017/S0022112099005741>.
39. YU KIN FUNG. 2015. Numerical investigation on the interaction between particles and eddies in gas-particle flows behind a backward-facing step.
40. Ranut, P. and Nobile, E. 2014. Multiphase flows examples solved with ANSYS CFX. Università degli Studi di Trieste. Dipartimento di Ingegneria e Architettura.
41. Chan, C.K., Zhang, H.Q. and Lau, K.S., 2001. Numerical simulation of gas-particle flows behind a backward-facing step using an improved stochastic separated flow model. *Computational Mechanics*, 27, pp.412-417.

بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی یک ماهاواره بر بازگشت‌پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان

مطهره مجیبی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محسن فتحی جگرکنی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی هواپیما، دانشگاه صنعتی شریف

در این پژوهش، مسئله بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی یک ماهاواره بر انعطاف‌پذیر بازگشت‌پذیر فرمول شده است. هدف ارائه یک ساختار طراحی مناسب به منظور طراحی نامعین و بهینه مسیر تحت قیود کنترلی - سازه‌ای و ضخامت بهینه پوسته و عایق با توجه به معیارهای طراحی سازه انعطاف‌پذیر به‌گونه‌ای است که طرح نهایی قابلیت دستیابی به قابلیت اطمینان مطلوب را داشته باشد. در این طرح، برای مدل‌سازی آیروالاستیک به عنوان نوآوری از مدل تیر برنولی - اویلر و اصل دالامبر در تحلیل سازه برای مدل استاتیک استفاده شده است. ساختار تحلیل قابلیت اطمینان سری و الگوریتم فرالاکاری رنگیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب به عمل ابعاد مسئله و پیچیدگی قیود غیرخطی نامعین انتخاب شده است. ارزیابی نتایج بهینه‌سازی مسئله معین، کاهش ۷۵ درصدی هزینه محاسباتی در تعداد فراخوانی تابع هدف در مقایسه با الگوریتم گریدیان پایه را نشان می‌دهد.

وازگان کلیدی: آیروالاستیک، بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی، تقریب قابلیت اطمینان، طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان، ماهاواره بر انعطاف‌پذیر، ماهاواره بر بازگشت‌پذیر به جو، مدل‌سازی عدم قطعیت.

۱. مقدمه

سوق داده شدند. با کمک این روش‌ها می‌توان بهینه‌ترین طرح‌های ممکن را با در نظرگیری تمام چرخه عمر یک وسیله از طراحی مفهومی تا عملیاتی کردن و فرایند استفاده مجدد، ایجاد کرد.^[۱] یکی از موضوعات مهم در این رویکرد، نزدیک کردن حداکثری شرایط طراحی به شرایط واقعی است. به طور ذاتی، جسم در فاز عملیاتی خود با مقدار زیادی عدم قطعیت مواجه خواهد بود. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند از سیستم، محیط و شرایط عملیاتی نشأت گرفته شده باشند. یک راه مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در چرخ عمر یک سیستم، شناسایی عدم قطعیت در پارامترهای مدل (منشأ عدم قطعیت) و طراحی سیستم تحت این عدم قطعیت‌ها است. این روش تحت عنوان طراحی نامعین شناخته می‌شود و به معنای مدل‌سازی ریاضی عدم قطعیت از طریق شناسایی دقیق آن است.^[۲] علاوه بر عدم قطعیت، انتخاب ساختار طراحی در سیستم‌های پیچیده مانند ماهاواره بر از نظر زمان، هزینه و همگرایی نیز چالش اصلی طراحان است. مسئله طراحی سیستم‌های مهندسی مانند ماهاواره برها، عموماً به طراحی موضوعات مختلف

با توسعه فناوری‌های پیشرفته در زمینه کنترل و هدایت از سویی و نگاه رقابتی از سوی دیگر از طریق ایجاد طرح‌های با هزینه کمتر، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری عملیاتی پیشتر، به تهابی برتری مفهوم «قابل استفاده مجدد» را به خوبی نشان می‌دهد. در واقع، استفاده مجدد از پرتابگرها در سامانه‌های کم هزینه عملاً اجتناب ناپذیر است. به همین دلیل، پرتابگرهای قابل استفاده مجدد، مفهوم امیدوارکننده‌ای برای الزامات جدید هستند.^[۳]

در حالت کلی، در طراحی پکارچه یک پرتابگر در فاز طراحی مفهومی، حداقل پنج حوزه آیرودینامیک، سازه، مسیر، حرارت آیرودینامیکی و بهینه‌سازی دخیل هستند. برای طراحی دقیق‌تر، مواردی مانند اثرات انعطاف‌پذیری، پیشرانش و سیستم کنترل به موارد فوق اضافه می‌شوند. به منظور ایجاد طرح‌هایی با معیارها و موضوعات ذکر شده که اغلب در آنها تناقض دیده می‌شود؛ طراحان به سمت روش‌های طراحی جدیدی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۱/۱/۱۴۰۱، اصلاحیه ۹/۴/۱۴۰۲، پذیرش ۲۵/۴/۱۴۰۲.

استناد به این مقاله:

مجیبی، مطهره، و فتحی جگرکنی، محسن، ۱۴۰۳. بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی یک ماهاواره بر بازگشت‌پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان. مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰۰(۱)، صص. ۷۴-۶۱.

DOI:10.24200/J40.2023.61713.1667

معایب دیگر این رویکرد طراحی نامعین، عدم قطعیت با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی و انتشار آن در سیستم بررسی می‌شود. مزیت اصلی این روش، کاهش هزینه و رسیک طراحی و امکان مقام‌سازی و اندازه‌گیری قابلیت اطمینان طرح است.

۱۰. مسئله بهینه‌سازی طراحی نامعین مبتنی بر قابلیت اطمینان

طراحی نامعین به‌منظور پوشش نواقص طراحی سنتی در برخورد با عدم‌قطعیت‌ها توسعه پیدا کرده است. در این رویکرد، عدم‌قطعیت‌های موجود در متغیرها و یا پارامترهای مسئله پس از شناسایی به‌کمک روش‌های مختلف مدل‌سازی می‌شوند. به همین جهت، هزینه طراحی تنها در نواحی شکست برای دستیابی به معیار طراحی (مقام و یا قابلیت اطمینان) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هیچگونه طراحی غیرضروری بجز در برخی نواحی نیاز نیست. هدف از فرمولاسیون مسئله RBDO، بیان شانس شکست براساس مدهای شکست با استفاده از روش‌ها و تئوری‌های مختلف است. در تئوری احتمالات متغیرهای عدم‌قطعیت‌دار تحت عنوان متغیر اتفاقی، تعریف و اطلاعات آماری مورد نیاز برای توصیف ریاضی آنها به‌طور معمول توسط نویسه‌برداری به دست می‌آید. اما به‌منظور مدل‌سازی و حل مسائل کاربردی از جمله تقریب قابلیت اطمینان، روش‌های تقریبی مانند روش‌های مبتنی بر محتمل‌ترین نقطه^۳ توسعه پیدا کرده‌اند.

روش محتمل‌ترین نقطه برای تقریب قابلیت اطمینان از تقریب تابع مدد نظر در فضای گوسی استاندارد بهره می‌برد. با انتقال تابع قید به این فضا، توزیع احتمالی متغیرها به فرم نرمال استاندارد تبدیل می‌شود. در این حالت کمترین فاصله تقریب خطی $g(x) = (x)$ (مرز شکست در قید) تا مبدأ مختصات بیانگر محتمل‌ترین نقطه شکست و یا به‌طور اصطلاح، شاخص قابلیت اطمینان β است. در نتیجه، مسئله RBDO با استفاده از روابط ۱ و ۲ فرمول‌بندی می‌شود. این مسئله شامل یک حلقه بهینه‌سازی اصلی به‌منظور بهینه‌سازی تابع عملکرد و برآورده کردن قید معین مطابق رابطه ۱ و یک حلقه تقریب قابلیت اطمینان مطابق رابطه ۲ به‌منظور تبدیل قید ساخت به قید نرم خواهد بود. ۲ در این رابطه بردار متغیرهای قید در فضای گوسی استاندارد است. [۱]

$$\begin{aligned}
 & \min f(d, X, P) \\
 \text{S.T:} \\
 & \beta_j(d, X, P) \geq \beta_{tj} \quad j = 1, 2, \dots, N_R \\
 & G_k^s(d, P) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, N_S
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\beta = \min \sqrt{uu^T} \quad (1)$$

در رابطه فوق، P ، d و X به ترتیب پارامترهای طراحی، متغیرهای معین و متغیرهای عدم قطعیت دار مسئله هستند. G_k^s قید معین lkm و β_j شاخص قابلیت اطمینان قید سخت زام را نشان می‌دهد که از حلقه تخمین قابلیت اطمینان در هر تکرار به دست می‌آید. برای حل این مسئله، دو رویکرد کلی توسعه داده شده است. رویکرد شاخص قابلیت اطمینان: ^۴ در این رویکرد، قابلیت اطمینان مطلوب توسط طراح انتخاب می‌شود. این مسئله همان فرم استاندارد RBDO است. RIA به اطراف ایجاد تکینگی در انحراف معیار نزدیک صفر از پایداری محاسباتی برخوردار نیست و این موضوع موجب توسعه روش اندازهگیری عملکرد شد. [۵] رویکرد اندازهگیری عملکرد: ^۵ رویکرد این روش، براساس کاراکتر محسوساتی، یک

^۵ رویکرد اندازه‌گیری عملکرد: روش پراساس کارایی محاسباتی، پک

به معنی زیرسیستم‌های متفاوت مانند طراحی سازه، طراحی سیستم پیشran و ... تقسیم می‌شود. عدم توانایی روش‌های طراحی موجود در بیان ریاضی مناسب و قابل قبول برای تعاملات میان موضوعات و تکیه بالا بر داده‌های تجربی، انگیزه توسعه روش‌های طراحی چند موضوعی بر پایه خودکار نمودن^۱ فرازیند طراحی را فراهم نمود. رویکرد بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی^۲ با ساختار مناسب در تفکیک، مدل سازی و ارزیابی سیستم با لحاظ کردن تأثیر متقابل روابط موضوعی، موجب بهبود مشکل زمان و هزینه در طراحی سیستم‌های پیچیده می‌شود. ساختارهای بهینه‌سازی چند موضوعی می‌توانند اطیمانان به عنوان یکی از بهینه‌ترین ساختارهای طراحی سیستم‌های مدرن از نظر هزینه محاسباتی و عملکرد هستند.^[۴]

۱.۱. اهداف و نوآوری

این پژوهش به دنبال ارائه ساختاری بهینه برای مسئله طراحی تحت عدم قطعیت برای مرحله اول یک ماهواره بر در مسیر بازگشت به اتسفر با در نظر گیری اثرات انعطاف پذیری است. در تمامی کارهای گذشته در زمینه طراحی بهینه مسیر بازگشت به اتسفر به روش کنترل بهینه، مسئله بلرا به تهابی تحت عنوان موضوع مسیر مدنظر بود. در این پژوهش با وارد کردن اثرات انعطاف پذیری به معادلات دینامیکی، موضوع سازه در کنار موضوع مسیر به مفهوم طراحی یکپارچه، مسئله طراحی را تشکیل می‌دهند. این انتخاب با توجه به روابط کوپل شده میان معادلات حالت و ویژگی‌های سازه‌ای استاتیکی و دینامیکی بدنه انعطاف پذیر انجام شده است. به همین مفهوم نوآوری دیگر این پژوهش، حضور قید سازه به مفهوم حفظ اینمنی بدنه انعطاف پذیر مانند تنش، کمانش، حرارت جذب شده عایق و پایداری استاتیکی از طریق بهینه سازی ضخامت پوسته و عایق در طی پرواز مأمور صوت است. در طراحی نامعین حضور عدم قطعیت‌های جدید و مرتبط به انعطاف پذیری مانند عدم قطعیت در فرکانس طبیعی مود خمی اول و ضریب میرایی سازه در کنار عدم قطعیت‌های بحرانی در مسیر بازگشت به جو مانند عدم قطعیت در سرعت اولیه، ضریب برا و ضریب عایق مدل سازی شده‌اند.

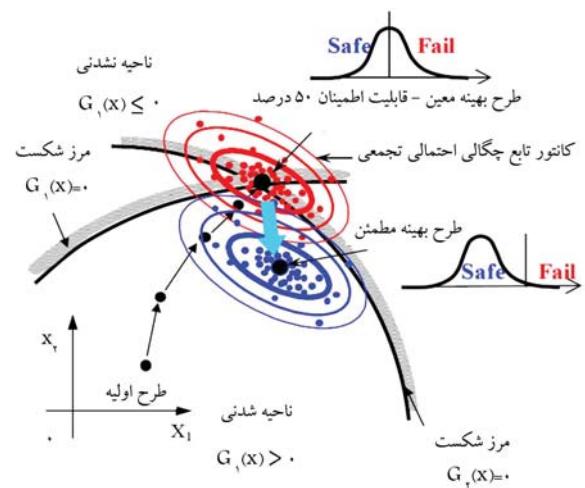
به این ترتیب، در پژوهش حاضر ابتدا به فرمول بندی مسئله طراحی تحت عدم قطعیت با معیار قابلیت اطمینان و همچنین ساختارهای تحلیل حلقه قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. سپس، ساختارهای مسئله MDO و ساختار تحلیل چندموضعی مبتنی بر قابلیت اطمینان متوالی تشریح می‌گردد. با مدل سازی موضوعات طراحی، محدودیت‌ها و الزامات مسئله طراحی به ویژه قیود مربوط به بازگشت پذیری و انعطاف‌پذیری ماهواره بر عینی می‌گردد. در نهایت، مسئله طراحی نامعنی فرمول بندی و نتایج تشریح می‌شوند.

۲. بهینه‌سازی طراحی، تحت عدم قطعیت

در مسائل طراحی بهینه معین، در برخورد با عدم قطعیت‌ها و قیود سخت فعال شده (دارای عدم قطعیت)، از ضرایب اینمی و خرابی استفاده می‌شود. در این رویکرد، طراح با اعمال ضرایب بزرگ‌تر از یک در بارهای وارد شده سعی در ایجاد شرایط سخت‌گیرانه یا با اعمال ضرایب خرابی کوچک‌تر از یک در مشخصه‌های استحکامی سعی در محدود کردن قیود دارد. این ضرایب از مسائل طراحی قبلی تعیین می‌شوند و همین موضوع می‌تواند موجب افزایش هزینه برای ضرایب دست بالا یا اختلال شکست برای ضرایب دست پایین گردد. همچنین، محدود شدن فضای طراحی، توسط ضرایب اینمی - خدام، در مسائل بزرگ با تعداد قيد ممکن است

چندموضعی را به امکان پذیری چندموضعی^۷، امکان پذیری تکموضعی^۸ و همه در یک زمان^۹ تقسیم کردند و این سه روش را روش بهینه سازی یکپارچه نامیدند.^[۸] این روش ها از یک الگوریتم بهینه ساز در سطح سیستم به منظور بهینه سازی استفاده می کردند. برای مثال، روش AAO بدون انکا به تحلیل موضوعی، به دنبال پاسخ بهینه کلی مسئله در سطح سیستم است. در این حالت روابط بین موضوعی تو سط متغیرهای فرعی در موضوعات به کار گرفته شده و در سطح سیستم تحت قیود تساوی با مقادیر متناظر خود برابر خواهند شد. اما در روش MDF، تحلیل موضوعی در هر تکرار به صورت حل معادلات حالت پاسخ مسئله را تضمین می کند. در روش IDF نیز به جای تحلیل موضوعی، تخمینی از متغیرهای موضوعات دیگر که به متغیرهای کمکی معروف هستند در موضوع متناظر استفاده می شوند. در نهایت از قیود تساوی به منظور همگرایی متغیرهای تخمین زده و مقادیر متناظر آن استفاده می شود.^[۹] این روش ها عملاً برای مسائل متوسط و بزرگ صفتی غیرقابل هستند.

در همان سال ۱۹۹۴، سایسیکی و بالینک میان ساختارهای ارائه شده توسط کرم و ساختارهایی که از چندین الگوریتم بهینه سازی در سطح موضوعات استفاده می کنند و اصطلاحاً چندسطحی نامیده می شوند تمايز قائل شدند.^[۱۰] در این روش ها، علاوه بر بهینه سازی مستقل موضوعات، بهینه ساز سطح سیستم در راستای همگرایی بین موضوعات و محاسبه متغیرهای مشترک عمل می کند. بهینه سازی مشترکتی^{۱۰} در سال ۱۹۹۷ تو سط برآون و کروو به عنوان اولین ساختار دو سطحی معرفی شد.^[۱۱] در این روش، بهینه ساز در سطح سیستم تها در راستای همگرایی متغیرهای تخمین زده شده و مقادار اصلی متناظر آن عمل می کند. ساختار بهینه سازی زیرسیستم همزمان^{۱۱} نیز تو سط و وزیرک و همکارانش مطرح شد.^[۱۲] در این ساختار، تحلیل چندموضعی و تحلیل حساسیت به طور همزمان با ایجاد یک مدل تقریبی، به زیرسیستم ها اجازه می دهد تا برآورده تأثیر متغیرهای موضوعات دیگر بر زیرسیستم متنظر، به طور مستقل در فرایند بهینه سازی سهیم باشند. بهینه ساز سطح سیستم در نهایت به دنبال بروزرسانی متغیرها با توجه به مدل تقریبی ایجاد شده و خروجی مسائل بهینه سازی زیرسیستم ها برای حلقه بعد خواهد بود.^[۱۳] حضور هم زمان تحلیل سیستمی و تحلیل حساسیت موجب افزایش هزینه محاسباتی در این روش می شود و در نهایت، سیستم یکپارچه دو سطحی^{۱۴} ۱۹۹۸ تو سط سایسیکی مطرح شد.^[۱۵] هدف این ساختار، بهینه سازی موضوعی محاسبه ضریب لاگرانژ قیود هر کدام از موضوعات از طریق پیدا کردن مقدار بهینه متغیرهای محلی است. بهینه ساز سطح سیستم نیز با استفاده از اطلاعات به دست آمده از بهینه ساز موضوعی، متغیرهای مشترک (سطح سیستم) را برای حلقه بعد بروزرسانی می کند.^[۱۶] با ورود عدم قطعیت به مسائل طراحی، ساختارهای MDO وارد چالش جدیدی شدند. با ادغام مسئله تقریب قابلیت اطمینان با مسئله بهینه سازی چندموضعی، یک حلقه درونی به مسئله طراحی اضافه می شود. این موضوع کارآئی MDO را به خصوص در مسائل متوسط و بزرگ تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می دهد. کوچ و همکارانش^[۱۷] دو و چن^[۱۸] و سوئز و همکارانش^[۱۹] با استفاده از ساختار موازی و با استفاده از نمونه برداری مونت کارلو^{۲۰} تو سط ساختار AAO برای اولین بار مسئله MDO مبتنی بر قابلیت اطمینان^{۲۱} را فرمول بندی کردند.^[۲۲] سوئز در پژوهش دیگری از روش مدل سطح پاسخ به علت کاهش هزینه محاسباتی نسبت به روش های نمونه برداری برای تقریب قابلیت اطمینان استفاده کرد. آگاوال و همکارانش،^[۲۲] جون و همکارانش^[۲۳] و ون و همکارانش^[۲۴] با حذف تحلیل موضوعی از طریق رویکرد تحلیل و طراحی همزمان، یک ساختار دو حلقه ای و تک سطحی که در آن ارزیابی قابلیت اطمینان در حلقه داخلی با تقریب مرتبه اول



شکل ۱. مفهوم هندسی جابه جایی قیود در فاصله MPP

تابع پیچیده تحت قیود ساده به جای یک تابع ساده تحت قیود پیچیده (RIA) است. در این حالت حلقه تخمین قابلیت اطمینان برای قید احتمالی نام مطابق رابطه^۳ خواهد بود.^[۶] در واقع با جابه جا کردن تابع هدف و قید سرعت همگرایی و مقاومت به خصوص در مسائل غیرخطی به شدت افزایش می یابد.

$$\begin{aligned} \min G_i(u) \\ \text{S.T } \|u\| = \beta_i \end{aligned} \quad (3)$$

۲.۲. ساختارهای مسئله RBDO

در حل مسائل RBDO، دو حلقه بهینه سازی اصلی و تخمین قابلیت اطمینان هم زمان وجود دارند. این دو حلقه به یکدیگر وابسته هستند و نحوه قرار گرفتن و ترتیب حل این دو مسئله به شکل موازی و یا سری در هزینه محاسباتی و سرعت همگرایی مؤثر خواهد بود. رویکرد موازی در بخش قبل تشریح شد. در این رویکرد پس از همگرایی حلقه تخمین قابلیت اطمینان، قید احتمالی در مسئله بهینه سازی اصلی موراد ارزیابی قرار می گیرند. با توجه به اینکه به ازای هر قید سخت یک مسئله تخمین قابلیت اطمینان وجود دارد، هزینه محاسباتی برای مسائل با عدای قید احتمالی بالا در این روش به شدت افزایش یافته و در واقع کارایی خود را از دست می دهد. رویکرد سری به منظور رفع مشکل روش موازی اولین بار تو سط دو و چن مطرح شد.^[۷] در این رویکرد، مسئله بهینه سازی به صورت معین حل شده و پس از آن برای متغیرهای ارزیابی قابلیت اطمینان انجام می شود. سپس، در تکرار بعد، متغیرهای عدم قطعیت دار به اندازه MPP حلقه قبل جابه جا می شوند و این فرایند تا زمانی که قید در محدوده قابل قبول قرار گیرند، ادامه می یابد. در واقع، به جای اینکه به اندازه MPP از قید سخت فاصله گرفته شود، قید سخت به اندازه MPP مطابق شکل ۱ جابه جا می شوند. به این روش اصطلاحاً بهینه سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سری گفته می شود.

۳. بهینه سازی طراحی چندموضعی مبتنی بر قابلیت اطمینان

برای اولین بار، کرم و همکارانش در سال ۱۹۹۴ ساختارهای طراحی و بهینه سازی

۱.۳. بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی تحت ساختار تحلیل قابلیت اطمینان سلسیله‌مراتی

نحوه بهره‌گیری و اعمال عدم قطعیت در مسائل UMDO می‌تواند بهشدت همگرایی کل مسئله را تحت تأثیر قرار دهد. این موضوع به دلیل انتشار عدم قطعیت در موضوعات و تأثیر آن در تحلیل چندموضعی و تحلیل قابلیت اطمینان است. ساختار RBMDO مشابه RBDO به دو دسته موازی و متوالی تقسیم می‌شود. ساختارهای موازی به دلیل عدم کارآیی حتی در مسائل متوسط عمل استفاده نمی‌شوند. ساختار مسئله SMRA به حلقة‌های سلسله‌مراتبی بهینه ساز اصلی و تحلیل قابلیت اطمینان تقسیم می‌شود. برای یک سیستم 26 موضوعی، فرایند این مسئله شامل مراحل زیر است ۱. حل مسئله MDO به صورت معین. در حلقة اول مسئله MDO به صورت معین حل شده و از حلقة دوم براساس اطلاعات حلقة قبل مسئله MDO مطابق رابطه ۴ فرمول بندی می‌شود.

$$\begin{aligned}
& \min_{(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M)} f(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, p_i^M, y_{\cdot i}^M) \\
& \text{S.T :} \\
& G^i(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M - s_s^{(i)}, \mu_{x_i}^M - s_i^{(i)}, y_{\cdot i}^{MPP(i)}, p_i^{MPP(i)^{k-1}}) \leq \circ \\
& g^i(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, y_{\cdot i}^M, p_i^M) \leq \circ \\
& y_{\cdot i}^M = y_{\cdot i}(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, y_{ji}^M) \\
& s_s^{(i)} = \mu_{x_s}^{M(i)^{k-1}} - x_s^{MPP(i)^{k-1}} \\
& s_i^{(i)} = \mu_{x_i}^{M(i)^{k-1}} - x_i^{MPP(i)^{k-1}}
\end{aligned}
\tag{4}$$

G^i : قید سخت موضوع i ، g^i قید معین موضوع i ، $\mu_{x_i}^M$ و $\mu_{x_s}^M$ به ترتیب بردار میانگین متغیرهای احتمالی مشترک و موضوع i ام بوده و برابر با مقدار بهینه حلقه قابل هستند. p_i^M بردار پارامترهای احتمالی موضوع i ام و برابر با میانگین آن است. $s_s^{(i)}$ بردارهای جایه جایی متغیرهای موضوعی و مشترک هستند. $y_i^{MPP(I)^{K-1}}$ مقادیر به دست آمده از تحلیل قابلیت اطمینان حلقه l هستند.

۲. تحلیل قابلیت اطمینان در مختصات بهینه. برای پارامترهای احتمالی $(u_p^{(i)}, u_s^{(i)}, u_y^{(i)})$ متغیرهای احتمالی $(u_i^{(i)}, u_s^{(i)}, u_y^{(i)})$ در فضای گوسی استاندارد برای قید احتمالی λ مطابق رابطه ۵ اجسام می‌شود. معادلات حالت یا قیود تساوی مطابق ساختار MDO مدنظر تنظیم می‌شوند.

$$\max_{(u_s^{(i)}, u_i^{(i)}, u_p^{(i)})} G^i \left(d_s, d_i, u_s^{(i)}, u_i^{(i)}, u_p^{(i)}, y_{.i}^{(i)} \right)$$

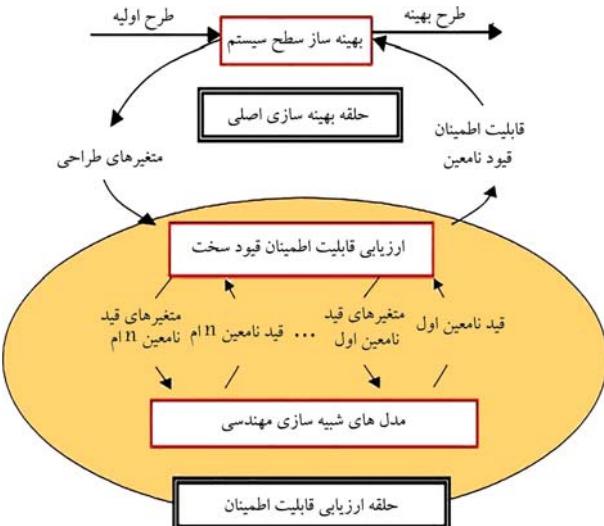
S.T :

$$\left\| u_s^{(i)}, u_i^{(i)}, u_p^{(i)} \right\| = \beta_t \quad (4)$$

$$y_{.i}^{(i)} = y_{.i} (d_s, d_i, \left(\mu_{x_s}^M + u_s^{(i)} \sigma_s \right),$$

$$\left(\mu_{x_i}^M + u_i^{(i)} \sigma_i \right), y_{ii}^{(i)})$$

۳. ارزیابی معیارهای همگرایی. بازی هر کدام از بهینه ساز و تحلیل های قابلیت اطمینان قیود احتمالی، معیار همگرایی وجود دارد. در صورت عدم همگرایی، مقدار MPP اولیه حلقه جدید برابر با مقدار بهینه حلقه قبل، پارامترهای احتمالی برابر با حلقه قبل و بردار جابجایی متغیرهای احتمالی از مقدار بهینه و خروجی حلقه تحلیل قابلیت اطمینان حلقه قبل به دست می آیند.

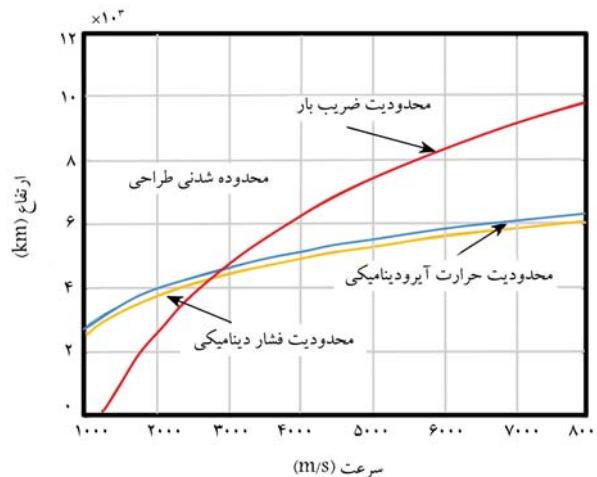


شکل ۲. حلقه از باره قابلیت اطمینان در مسئله MDO. [۲۶]

کرش - کان - λ^{16} محاسبه می‌گشت را توسعه دادند. به عملت افزایش متغیرهای کمکی و قیود مسئله، روش‌های توسعه یافته بر اساس KKT به نسبت کارآمد نیویند و در مسائل بزرگ با تعداد قبود بالا به دلیل افزایش خطای تقریب دقت مناسبی

استراتژی دیگر در حل موثر RBMDO، تفکیک حلقه‌های مسئله طراحی است. ایده این روش براساس قرارگیری حلقه‌های متواالی MDO معین و تحلیل قابلیت اطمینان چندموضعی^{۱۷} تحت عنوان ارزیابی قابلیت اطمینان چندموضعی سلسله‌مراتبی^{۱۸} مشابه ساختار SORA برای مسائل تک موضوعی مشابه ساختار شکل ۲ شکل گرفت.

ساختمان MRA در کارایی RBMDO نقش بسیار کلیدی ایفا می‌کند. به عبارت دیگر، مقدار زیادی از محاسبات در مسائل RBMDO مربوط به تحلیل چندموضعی و تحلیل قابلیت اطمینان چندموضعی از طریق ارزیابی‌های مذکور می‌شود. الکساندروف و لوئیس به منظور افزایش کارایی RBMDO، رویکرد تقریبی RIA را با ساختار چندموضعی IDF ادغام کردند.^[۲۷] هرچند در این روش تحلیل قابلیت اطمینان به صورت موازی در مسئله قرار می‌گرفت، اما حفظ روابط میان موضعی توسط متغیرهای کمکی در این ساختار نسبت به وجود حلقه تحلیل موضعی در ساختار MDF، به عملکرد بهتر حلقه تحلیل قابلیت اطمینان کمک کرد. پادمانا هن و بتل نیز از ترکیب RIA و ساختار CSSO استفاده کردند.^[۲۸] اما همانطور که اشاره شد، همگرایی RIA مشکلات همگرایی را به همراه داشت. آن و کوون از روش تقریب قابلیت اطمینان درجه اول در ساختار BLISS استفاده کردند و مشخص شد این روش در مواجهه با قیود احتمالی غیرخطی عملکرد مناسبی ندارد.^[۱] دو و همکارانش نیز از ادغام MDF و IDF با رویکرد اندازه‌گیری عملکرد PMA برای تقریب قابلیت اطمینان استفاده کردند.^[۲۹] در این مطالعه نشان داده شد که افزایش تحلیل قابلیت اطمینان در MDF-PMA و افزایش متغیرهای کمکی در IDF-PMA، موجب ناکارامدی آن‌ها می‌شود. مسئله قرارگیری تحلیل قابلیت اطمینان در ادغام با DMDO در پژوهش‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته و جداسازی حلقه MRA و قرارگرفتن سلسله‌مراتبی در کنار DMDO تحت عنوان SMRA برای مسائل بزرگ با قیود بالا، از منظور زمان و هزینه محاسباتی عملکرد سیستم بهینه‌تری داشت.^[۳۰]



شکل ۳. محدوده قابل قبول برای سرعت و ارتفاع بر حسب قیود مسیر.

قیود مسیر به طور متناول شامل سه دسته محدوده تغییرات متغیرهای کنترلی رابطه ۱۳، شرایط نهایی متغیرهای حالت رابطه ۱۴ و سایر قیود مربوط به الزامات مسیر و محدودیت‌های سازه مانند فشار دینامیکی، ضریب بار شار حرارتی آیروپی دینامیکی مشابه شکل ۳، دمای ایستایی، شتاب عرضی/کنترلی، انحراف سطح کنترلی، پسا و ... می‌شوند.

$$u_{i_{\min}} \leq u_i(t) \leq u_{i_{\max}} \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

$$|\dot{u}_i(t)| \leq \dot{u}_{i_{\max}}$$

$$|x_j(t_f) - x_{fj}| \leq \Delta x_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$Q_s = 9,95306 \times 10^{-5} \sqrt{\rho} V^{3.07} \quad (15)$$

$$q_{\infty} = 0.5 \rho V^2$$

$$n_T = \frac{1}{\tau_{mg}} \rho V^2 S \sqrt{C_L^r + C_D^r}$$

به منظور محاسبه حداقل زاویه حمله مجاز در هر لحظه، چگالی یا ارتفاع مورد نیاز برای قرار گرفتن جسم در شرایط حداکثر حرارت آیروپی دینامیکی مجاز و حداکثر فشار دینامیکی مجاز در سرعت مطابق رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود. محدودیت نهایی را حداکثر چگالی مشخص خواهد کرد. سپس با حل معادله ۱۷ برای ضریب بار در شرایط بحرانی به دست آمده از مرحله قبل، ضریب بار و ضریب پسا متضایر با حداقل زاویه حمله مجاز در سرعت مشخص استخراج خواهد شد.^[۲۴]

به این ترتیب، قید زاویه حمله بحرانی محاسبه خواهد شد. این مقدار باید همواره از حداقل زاویه حمله مشخص شده توسط الزامات ماموریت $\alpha_{\min lim}$ بیشتر باشد.

$$\rho Q_{s_{\max}} = (Q_{s_{\max}} / 9,95306 \times 10^{-5} V^{3.07})^2 \quad (16)$$

$$\rho q_{\infty_{\max}} = q_{\infty_{\max}} / (0.5 \times V^2)$$

$$\frac{q_{\infty}}{mg} \sqrt{C_L^r(\alpha_{cr}, M) + C_D^r(\alpha_{cr}, M)} - n_{T_{\max}} = 0 \quad (17)$$

$$\alpha_{\min}(V) = \max(\alpha_{cr}, \alpha_{\min lim}) \quad (18)$$

در تقریب یک تابع مانند منحنی زاویه حمله، درون یابی چندجمله‌ای در صفرهای چندجمله‌ای متعامد چیزیست می‌تواند میران حداکثر خط را در فواصل درون یابی به حداقل رساند. در واقع، درون یابی چندجمله‌ای چیزیست یک تقریب بهینه تابع خواهد بود.^[۲۵] منحنی زاویه حمله کنترلی توسط چندجمله‌ای چیزیست مطابق رابطه ۱۹

۴. مدل‌سازی موضوعات ماهواره‌بر

۱.۴. موضوع مسیر

در این پژوهش، معادلات سه درجه آزادی حرکت در دستگاه مسیر و یک درجه آزادی ایستیک (مود خمینی اول) در راستای محور Z در دستگاه بدنی مطابق ۶ مدنظر است. نیروها و ممان آیروپی دینامیکی، کنترلی و پیشرانش در دستگاه بدنی مطابق ۷ و بسط خطی زاویه حمله در طول جسم مطابق ۸ خواهد بود. از ترم‌های غیرخطی مختصات تعیین باقیه به عملت کوچک بودن صرف نظر شده است. معادلات برای مرکز جرم تغییر شکل نیافته توسعه داده شدند.^[۲۶]

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{m} (F_x^B \cos \alpha_0 + F_z^B \sin \alpha_0 - mg \sin \gamma) \\ \dot{\gamma} &= \frac{1}{V_m} (-F_x^B \sin \alpha_0 + F_z^B \cos \alpha_0 - mg \cos \gamma) + \frac{V \cos \gamma}{r} \\ \dot{q} &= \frac{1}{T_y} M_y \\ \dot{\alpha}_0 &= q - \dot{\gamma} \\ \ddot{\xi}_1 &= -2\mu_1 \omega_n \dot{\xi}_1 - 2p \dot{\eta}_1 - (\omega_{n1}^r - p^r - q^r) \xi_1 \\ &+ \frac{1}{M_1} \int_L F_z^B(x) \varphi_1(x) dx \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_x^B &= F_{T_x} + F_{A_x} + F_{C_x} \\ F_z^B &= F_{T_x} \xi_1 \varphi_1'(x_T) + F_{A_x} \xi_1 \varphi_1'(x_D) + F_{C_z} \\ &- q s \left(\int_L c_{l\alpha}(\alpha, M, x) \alpha(x, t) dx + \sum_{k=1}^m c_{l\alpha}(\alpha, M, x_{w_k}) \alpha(x_{w_k}, t) \right) \\ M_y &= -x_T F_{T_x} \xi_1 \varphi_1'(x_T) + F_{T_x} \xi_1 \varphi_1(x_T) \\ &+ F_{A_x} \xi_1 \varphi_1(x_D) \\ &- q s \left(\int_L c_{l\alpha}(\alpha, M, x) \alpha(x, t) \varphi_1(x) dx \right. \\ &\left. + \sum_{k=1}^m x_{w_k} c_{l\alpha}(\alpha, M, x_{w_k}) \alpha(x_{w_k}, t) \right) \\ \varphi_1(x_{w_k}) &+ M_{C_z} \\ \alpha(x, t) &= \alpha_0(t) - \delta_z(x, t) + \frac{1}{u} \dot{\delta}_z(x, t) - \frac{q_x}{u} \\ &= \alpha_0(t) - \varphi_1'(x) \xi_1(t) + \frac{1}{u} \varphi_1(x) \dot{\xi}_1(t) - \frac{q_x}{u} \end{aligned} \quad (7)$$

۱.۴.۱. طراحی مسیر بهینه

هدف اصلی مسئله بهینه‌سازی مسیر بازگشت، طراحی مسیری است که قادر به حداقل یا حداکثر کردن شاخص عملکرد تحت قیود غیرخطی و محدودیت‌های مختلف باشد. در کنترل بهینه چنین مسئله‌ای به فرم استاندارد مسئله بدلرا^[۱۹] فرمول بندی می‌گردد. مسئله بدلرا به دنبال یافتن مقادیر متغیرهای حالت $u \in \mathbb{R}^n$ و $x \in \mathbb{R}^n$ حداقل گردد. کنترلی در طول مسیر بگونه‌ای است که تابع هدف بدلرا مطابق رابطه ۹ مینماید.

در این رابطه ϕ شاخص عملکرد نقطه پایانی و g شاخص عملکرد انتگرالی در طول مسیر است. تابع عملکرد تحت قیود مربوط به معادلات دینامیکی جسم مرزی ۱۱ و قیود مسیر ۱۲ قرار دارد.^[۱]

$$J = \phi(x(t_0), t_0, x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt \quad (9)$$

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (10)$$

$$\phi(x(t_0), t_0, x(t_f), t_f) = 0 \quad (11)$$

$$C(x(t), u(t), t) \leq 0 \quad (12)$$

با نوشتن معادلات تعادل مطابق رابطه ۲۳، نیروی برشی و ممان خمی برای هر مقطع از ماهواره بردست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \sum f_z &= 0 : -f_{z_{shear}}(x_i) + f_{z_{inertia}}(x_i) + L(x_i) = 0 \\ \sum M_y &= 0 : M_{ybending}(x_i) + M_{y_{inertia}}(x_i) + \\ &L(x_i)x_{cp}(x_i) + f_{z_{inertia}}(x_i)x_{cg}(x_i) = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

برای محاسبه تنش محوری کل، علاوه بر تنش خمی، تنش حاصل از نیروی محوری نیز با استفاده از نیروی پسا و شتاب محوری مشابه مسیر قبل محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{total} = \sigma_{bending} \pm \sigma_{axial} = \frac{M_{bc}}{I_y} \pm \frac{P}{A} \quad (24)$$

ارزیابی کمانش: کمانش به عنوان یک ناتوانایی در سازه به علت تغییر شکل‌های غیرقابل بازگشت در مواجهه با بارهای محوری و عمودی تعریف می‌شود. تنش خمی و فشاری بحرانی در یک استوانه چدار نازک از روابط ۲۵ و ۲۶ محاسبه می‌شوند.^[۲۵]

$$\sigma_{cr_p} = 0,65E \frac{t}{r} \left(1 - 0,731 \left(1 - e^{\frac{1}{12} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right) \right) [Mpa] \quad (25)$$

$$\sigma_{cr_b} = 0,65E \frac{t}{r} \left(1 - 0,901 \left(1 - e^{\frac{1}{12} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right) \right) [Mpa] \quad (26)$$

به منظور حفظ سلامت سازه و عدم بروز کمانش بدون نیاز به تقویت‌کننده ضربی کمانش کل باید بزرگ‌تر از واحد باشد.

$$C_{buckle} = \frac{1}{\frac{\sigma_{axial}}{\sigma_{cr_p}} + \frac{\sigma_{bending}}{\sigma_{cr_b}}} \quad (27)$$

ارزیابی حاشیه پایداری استاتیکی: ^{۲۰} با توجه به تغییرات مستقیم جرم در تعیین ضخامت پوسته، اطمینان از حفظ حاشیه پایداری استاتیکی در طی طراحی امری ضروری تلقی می‌شود.

سیستم عایق حرارت: ^{۲۱} محدودیت‌های سازه‌ای مسیر و نزدیک کردن هرچه بیشتر مسیر به پرواز بایدار و افزایش برد موجب افزایش زمان پرواز و در نتیجه افزایش بار حرارتی جذب شده توسط سیستم عایق می‌گردد. از سوی دیگر، سرعت موفق صوت جسم بازگشت‌پذیر موجب بروز موج‌های صوتی پی در پی و در نتیجه افزایش ناگهانی دما به ویژه در نوک جسم می‌گردد. به همین علت، طراحی بهینه ابعاد و ضخامت عایق از طریق ارزیابی و مصالحه با الزامات و محدودیت‌های مسیر یکی از موضوعات طراحی اجسام بازگشت‌پذیر است.^[۲۶] مقدار حرارت جذب شده توسط عایق در یک بازه زمانی مشخص از طریق معادله ۲۸ به دست می‌آید. ضریب هدایت عایق $C_{conductivity}$ تابعی از دما است.

$$\begin{aligned} Q_{Conductive_{TPS}} &= \int_{t_i}^{t_f} \dot{q}_{abs} S dt \\ &= C_{Conductivity} \rho_{TPS} t_{TPS} S (t_f - t_i) \end{aligned} \quad (28)$$

۵. شبیه‌سازی

۱.۵. صحنه سنجی

سه چهارچوب اصلی یک سطحی با دوساختار تخمین قابلیت اطمینان چندموضعی موازی و سری مطابق مرجع^[۲۶] به منظور صحنه سنجی فرمول بندی مسئله MDO نامعین و بررسی کارایی از جهت هزینه محاسباتی انتخاب شده‌اند. همانطور که

تقریب زده می‌شود. در این $I_k^{N_\alpha}$ رابطه برابر با k اامین تابع پایه چندجمله‌ای چبیشف مرتبه N_α و $\eta_k^{N_\alpha}$ ضریب متناظر آن خواهد بود. τ متغیر اصلی چندجمله‌ای و در بازه $[0, 1]$ به صورت تابعی از سرعت مطابق رابطه ۲۰ تعریف می‌گردد. بردار ضرایب $X = [\eta_1^{N_\alpha} \quad \eta_2^{N_\alpha} \quad \dots \quad \eta_{N_\alpha}^{N_\alpha}] \in [0, 1]$ بیانگر بردار متغیرهای طراحی هستند. با تعیین این بردار، منحنی زاویه کنترلی مشخص و انتگرال‌گیری عددی معادلات حالت صورت می‌گیرد.^[۱]

$$\eta(\tau) = \sum_{k=1}^{N_\alpha} \eta_k^{N_\alpha} I_k^{N_\alpha}(\tau) \quad (19)$$

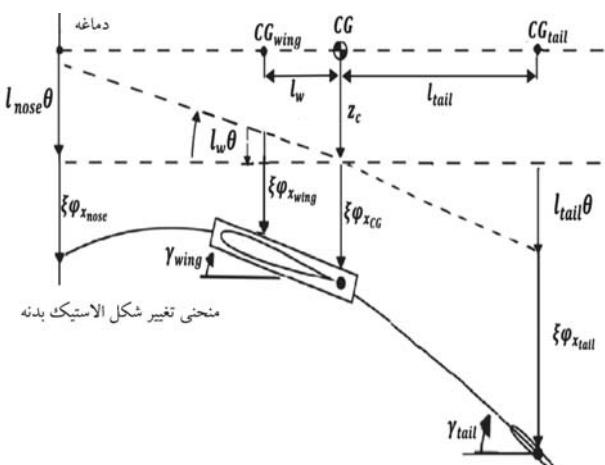
$$\begin{aligned} \alpha(V) &= (1 - \eta(\tau))\alpha_{min}(V) + \eta(\tau)\alpha_{max} \\ \tau &= 2 \frac{V(t) - V_i}{V_f - V_i} - 1 \end{aligned} \quad (20)$$

۲.۴. موضوع سازه

ارزیابی تنش: پس از تعیین بارهای وارد بر ماهواره برو مشخص شدن شرایط بحرانی به عنوان نقطه طراحی، تنش و کمانش پوسته دو معیار اصلی برای تعیین ضخامت خواهد بود. در تحلیل استاتیکی، بدن ماهواره برد مقاطع کوچک تقسیم‌بندی شده و توزیع جرم، توزیع ضرایب آیرودینامیکی، مرکز فشار و مرکز جرم متناظر با هر قسمت در طول ماهواره، با توجه به شرایط پروازی محاسبه می‌شود. مقدار زاویه حمله در مرکز آیرودینامیکی هر قسمت از بدن از بسط زاویه حمله به دست خواهد آمد. شتاب زاویه‌ای در طول جسم ثابت و برابر با مقدار متناظر آن در مرکز جرم است. اما برای محاسبه شتاب شتاب خطی در طول بدن نیاز به محاسبه موقعیت هر قسمت نسبت به مرکز جرم می‌باشد. این مقدار مطابق شکل ۴ از رابطه ۲۱ می‌باشد.

$$z_{x_i} = z_{CG_{total}} + \theta(x_i - x_{CG}) + \xi\varphi(x_i) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_{z_{inertia}}(x_i) &= -(|\ddot{z}_{CG}| m(x_i) + \ddot{\theta}(x_i - x_{CG}) + \ddot{\xi}\varphi(x_i)) \\ M_{inertia}(x_i) &= -\ddot{\theta} I_y(x_i) \end{aligned} \quad (22)$$

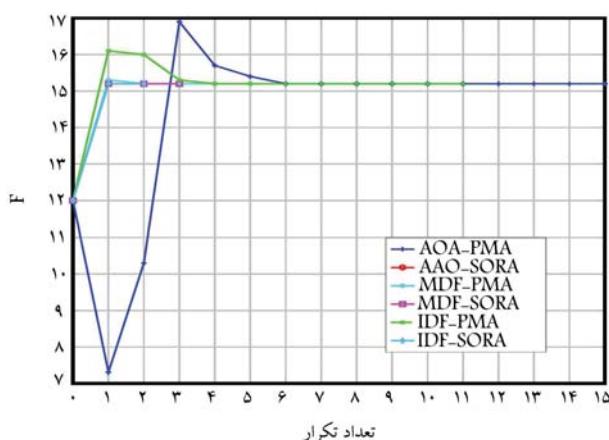


شکل ۴. جابه‌جایی قسمت‌های مختلف ماهواره بر اعطا‌پذیر.

$$\begin{aligned}
& \min_d \quad \int_{t_0}^{t_f} Q_s(t) dt + \lambda_1(G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7 + G_8) + \lambda_2(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5) \\
& \quad m_{dry} + \lambda_3(G_9 + G_{10} + G_{11} + G_{12}) + \lambda_4(C_6 + C_7 + C_8 + C_9 + C_{10} + C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14}) \\
& \text{S.T.:} \\
& G_1 : \frac{1}{\tau} \rho V (\mu_{V_1})^\tau \leq Q_{max} \\
& G_2 : \frac{1}{\tau} \rho V (\mu_{V_2})^\tau \leq Q_{max} \\
& G_3 : \frac{1}{\tau} \rho S V (\mu_{V_3})^\tau \sqrt{(\mu_{c_{z_rigid}} - S_{c_{z_rigid}})^\tau + C_D(Mach(\mu_{V_3}), \alpha(\mu_{V_3}))} \leq n_{max} \\
& G_4 : \left| V(t_f, \mu_{V_4}) - V_f \right| \leq \delta_{V_f} \\
& G_5 : \left| \gamma(t_f, \mu_{V_5}) - \gamma_f \right| \leq \delta_{\gamma_f} \\
& G_6 : \left| z(t_f, \mu_{V_6}) - z_f \right| \leq \delta_{z_f} \\
& G_7 : \left| \alpha(t_f, \mu_{V_7}) - \alpha_f \right| \leq \delta_{\alpha_f} \\
& G_8 : \sigma_{axial_{total}}(\mu_{c_{z_{flex}}}, S_{c_{z_{flex}}}, \ddot{\xi}(\omega_n(\mu_{E_1}), \mu_{c_s}, \mu_{c_{z_{flex}}}, S_{c_{z_{flex}}})) \leq \frac{S_y}{n_{SF}} \\
& G_9 : C_{buckle}(\mu_{E_9}) \geq C_{buckle_{min}} \\
& G_{10} : \frac{x_{CP}(\mu_{V_{10}}) - x_{CG}}{L} \geq SSM \\
& G_{11} : Q_{conductive_{TPS}}(\mu_{c_{TPS}} - S_{c_{TPS}}) \leq Q_{allowable} \\
& C_k : c_k - d_{[11-111]} = d_i^L \leq d_i \leq d_i^U, k = [1 \ 2 \ \dots \ 111], i = [1 \ 2 \ \dots \ 111] \\
& \quad (29)
\end{aligned}$$

جدول ۱. مقایسه ساختارهای یک سطحی MDO برای تحلیل قابلیت اطمینان سری و موازی.

RBMD0 ساختار	AAO-PMA	AAO-SORA	IDF-PMA	IDF-SORA	MDF-PMA	MDF-SORA
تعداد قیود تساوی سطح سیستم	۸	۸	۴	۴	۰	۰
تعداد متغیر طراحی	۱۱	۱۱	۷	۷	۳	۳
تابع عملکرد	f_{opt}	۱۵,۱۸۴۳	۱۵,۱۸۴۳	۱۵,۱۸۴۳	۱۵,۱۸۴۳	۱۵,۱۸۴۳
پارامترهای طراحی	x_1	۲,۲۴۸۸	۲,۲۴۶۶	۲,۲۴۸۷	۲,۲۴۹۳	۲,۲۴۹۸
	x_1	۲,۲۵۰۸	۲,۲۵۳۰	۲,۲۵۰۸	۲,۲۵۰۲	۲,۲۴۹۸
	x_s	۲,۲۵۰۸	۲,۲۴۹۸	۲,۲۴۹۸	۲,۲۴۹۸	۲,۲۴۹۸
تعداد فراخوانی تابع عملکرد	f^+	۱۹۲	۲۸۸	۱۰۵	۲۰۱	۲۴
تعداد کل فراخوانی قیود برای MPP جستجو	g_1^+	۹۶۵	۸	۵۳۰	۸	۱۲۵
	g_2^+	۹۶۵	۸	۵۳۰	۸	۱۲۵
زمان اجرا (ثانیه)	۴۳۸۱۵۶	۳۰۲۰	۰,۷۵۶۷	۰,۷۲۰۰	۱۹,۱۸۷۶	۱۱,۸۹۵۰



شکل ۵. نمودار همگرایی ساختارهای یک سطحی MDO نامعین.

در جدول ۱ و نمودار همگرایی شکل ۵ مشخص است، چهارچوب یک مرحله‌ای IDF با ساختار سلسه مراتبی تخمین قابلیت اطمینان چندموضعی در مقایسه با دو ساختار کلاسیک یک سطحی دیگر یعنی AAO و MDF به دلیل تعداد متغیر طراحی کمتر نسبت به AAO و عملکرد بهینه‌تر در مسائل با وابستگی پایین میان موضوعات نسبت به MDF با حلقة درونی تحلیل موضعی، چهارچوب مناسب‌تری برای مسئله طراحی مدنظر بوده و ساختار سلسه مراتبی با توجه به تعداد فراخوانی بسیار پایین‌تر برای تخمین قابلیت اطمینان برای مسئله طراحی با تعداد قبود غیرخطی عملکرد همینه‌تری خواهد داشت.

۲.۵. فرمول بندی مسئله طراحی

پس از مدل سازی موضوعات، جریان اطلاعات و داده ها میان موضوعات از طریق

جدول ۲. متغیرهای طراحی مرکزی.

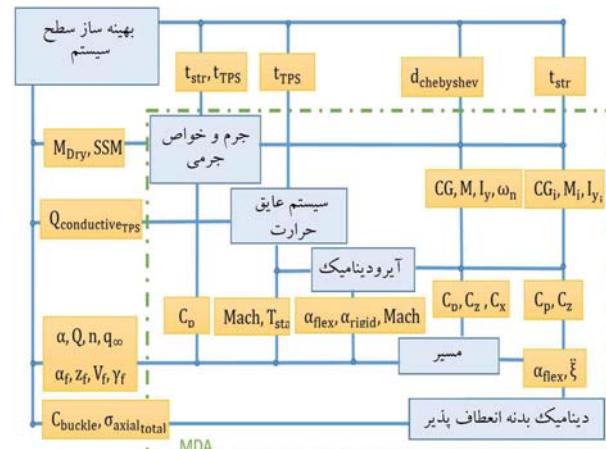
متغیرهای طراحی اصلی	علامت	واحد	بازه تغییرات
ضخامت پوششی	t_{str}	m	$[15/50\,mm]$
ضخامت عایق	t_{TPS}	m	$[12/50\,mm]$
ضرایب چند جمله‌ای چهیشیف	$di_{chebyshev}$	-	$i = 1, 2, 3, 4, 5$

۳. متغیرهای طراحی فرعی.

متغیرهای طراحی فرعی	علامت	واحد	بازه تغییرات
جرم تخمینی	m'	kg	$[\times 910^4 \times 1,510^5]$
جرم تعمیم یافته تخمینی	M'_i	kg	$[\times 510^4 \times 10^5]$
میان دوم سطح تخمینی حول محور y	I'_y	$Kg.m^2$	$[10^6 \times 710^6]$
فرکانس طبیعی تخمینی مود اول خمینی	ω'_n	Hz	$[16/8 \times 16/9]$
مرکز جرم تخمینی	x'_{CG}	m	$[18 \times 27]$
ماخ تخمینی در بار آیرودینامیکی ماکریم	$Mach'_{n_{max}}$	-	$[8 \times 11]$
فشار دینامیکی تخمینی در بار آیرودینامیکی ماکریم	$q'_{\infty n_{max}}$	Pa	$[45^\circ \times 30000]$
شتاب مختصات تعمیم یافته تخمینی در بار آیرودینامیکی ماکریم	$\ddot{\xi}'_{n_{max}}$	m/s^2	$[-5 \times 5]$
زاویه حمله بال دلتا در بار آیرودینامیکی ماکریم	$\alpha'_{Delta-Wing n_{max}}$	degree	$[^\circ \times 27]$
زاویه حمله فین در بار آیرودینامیکی ماکریم	$\alpha'_{Vertical-Fin n_{max}}$	degree	$[^\circ \times 27]$
بردار زاویه حمله بدنه در بار آیرودینامیکی ماکریم	$\alpha'_{Flexible-Body n_{max}}$	degree	$[^\circ \times 27]$
مرکز ذشار مینیم تخمینی	$x'_{CP_{max}}$	m	$[32 \times 35]$
دمای استاتیکی تخمینی در نقطه ماکریم حرارت جذب شده توسط عایق	$\theta'_{static TPS_{max}}$	$^\circ C$	$[10000 \times 4600]$
ثانیه تخمینی در نقطه ماکریم حرارت جذب شده توسط عایق	$t'_{TPS_{max}}$	s	$[90 \times 300]$

قیود تساوی به منظور همگرایی بین موضوعات به مسئله اعمال شده‌اند. متغیرها و رامترهای طراحی شامل متغیرها و پارامترهای طراحی مطابق جدول ۲ و متغیرها و رامترهای تخمینی مطابق جدول ۳ خواهند بود. متغیرها و پارامترهای تخمینی در اقاع تخمین مقدار متناظر خروجی موضوعات دیگر و ورودی موضوع مدنظر هستند. در فاز بازگشت به اتمسفر، متغیرهایی مانند زاویه حمله و ارتفاع و پارامترهای مانند سرعت اولیه و ارتفاع اولیه ورود به جو، از منابع اصلی عدم قطعیت‌های ذاتی هستند و تأثیر بسیار زیادی در مقاوم بودن و قابلیت اطمینان پاسخ مسئله خواهند داشت. درینجا، متغیر ضریب برا و پارامتر سرعت اولیه به عنوان منابع عدم قطعیت ر. موضوع مسیر انتخاب شدند. در موضوع سازه نیز خواص مربوط به مواد از هم‌ترین منابع عدم قطعیت شناختی و موضوعات مربوط به فرایند ساخت اغلب از نوع شناسی هستند. در این پژوهش، پارامترهای ضریب میرایی سازه و مدول یانگ و مچمچنین متغیر ضریب هدایت عایق (تابع دما) به عنوان پارامترهای عدم قطعیت دار

در مسئله طراحی مدل نظر، متغیرهای عدم قطعیت دار بردارهایی به طول گام های مانی شبیه سازی هستند. به همین جهت، متغیر موضوعی مانند ضریب برآ (خروجی بروزدینامیک و ورودی مسیر و سازه) به صورت یک ماتریس با تعداد ریف کل گام های مانی و تعداد ستون به اندازه تعداد قسمت بندی های بدنه انعطاف پذیر خواهد بود. در این حالت، ارزیابی قابلیت اطمینان برای متغیر عدم قطعیت دار در تعداد مشخصی نقطه ر، طول مسیر انجام شده و پس از ایجاد بردار جایگاهی، ضریب برآ و ضریب هدایت عاقی در طول بهینه سازی در زمان های مختلف از طریق میان بابی به دست می آید. حلقة تحلیلی، قابلیت اطمینان را ای ۱۱ قدر عدم قطعیت دار شامام، ۱۱ مسئله



شکل ۶. ماتریس طراحی ماهواره‌بر انعطاف‌پذیر.

ماتریس طراحی مشابه شکل ۶ به دست می‌آید. در ساختار طراحی یک سطحی IDF، متغیرهای کمکی در جهت تخمین داده‌های جریانی میان موضوعات عمل می‌کنند و به شکل قیود تساوی در بهینه‌سازی با مقدار متناظر خود برابر خواهند شد. در نهایت، فرمول بندی مسئله IDF مبتنی بر قابلیت اطمینان با ساختار سلسیله مراتبی شامل حلقه DMDO مطابق رابطه ۲۹ و حلقه مربوط به مسائل قابلیت اطمینان قیود سخت شامل روابط ۳۰ تا ۳۹ خواهد بود. در رابطه ۲۹، ۲۱ و ۲۲ به ترتیب ضرایب حر، به قیود رایی دو موضوع میسر و سازه هستند. قیود ناساواهی قیود مسئله طراحی،

جدول ۴. نتایج مسئله بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی ماهواره‌بر.

$$S.T : u_{V.}^{(\lambda)} = \beta \quad (39)$$

$$\min_{\substack{(u_{c_s}, u_E^{(1)}) \\ (u_{C_z \text{flex}})}} \frac{S_y}{n_{SF}} - \sigma_{axial_{total}} \left(\xi \left(\begin{array}{l} \mu_{C_z \text{flex}} + u_{C_z \text{flex}} \sigma_{C_z \text{flex}}, \\ \mu_{c_s} + u_{c_s} \sigma_{c_s}, \mu_{C_z \text{flex}} + \\ u_{C_z \text{flex}} \sigma_{C_z \text{flex}}, \\ \omega_n \left(\mu_E + u_E^{(1)} \sigma_E \right) \end{array} \right) \right)$$

S.T : $\sqrt{u_{C_z \text{flex}}^r + u_{c_s}^r + u_E^{(1)r}} = \beta$

(40)

٦. نتایج

بهینه‌سازی مسئله طراحی توسط الگوریتم زنیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب ۲۲ انجام شده است. نتایج با مسئله معین و الگوریتم گرگ‌دیان پایه Patternsearch مقایسه شده است. با مقایسه مسئله معین با دو الگوریتم گرگ‌دیان - پایه و زنیک کاهش محسوس هزینه محاسباتی در تعداد فراخوانی تابع هدف در الگوریتم زنیک تا ۷۵ درصد مطابق جدول ۴ مشهود است. همچنین، با توجه به ارزیابی نتایج با مسئله معین در شکل‌های ۷ و ۸ و هدف پژوهش می‌توان عنوان کرد که طرح نامعین ارائه شده در حضور عدم قطعیت‌های تعریف شده قابلیت دستیابی به قابلیت اطمینان مطلوب و انجام ماموریت بدون شکست را دارد. به بیان دیگر طرح ارائه شده نسبت به عدم قطعیت‌های تعریف شده مقاوم شده است. همچنین، عدم توانایی الگوریتم گرگ‌دیان پایه در موضوع سازه در شکل ۸ در رسیدن به پاسخ بهینه سراسری مشهود است. به همین دلیل، در بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده با چندین اکسترمم محلی الگوریتم‌های فراابتکاری با جستجوی سراسری انتخاب مناسب‌تری هستند. همچنین، با توجه به شکل ۸ در طراحی نامعین برای رسیدن به قابلیت اطمینان مد نظر در شرایط ساخت موضوع سازه) نیاز به صرف هزینه بیشتری تقریباً وجود نداشته است. در واقع، طرح راهه شده توانسته در توزیع احتمالی تعریف شده برای پارامترها و متغیرهای عدم قطعیت‌دار سازه، مختصات قابلیت اطمینان مد نظر را بدون صرف هزینه بیشتری به دست آورد. یکی از مهم‌ترین عدم قطعیت‌های مسئله طراحی مسیر، سرعت اولیه است. به ازای هر قدم و اینسته به سرعت (شکل ۹)، نمودار سرعت با سرعت اولیه

بهینه‌سازی با ساختار IDF خواهد بود:

$$\min_{(u_{V.}^{(1)})} -Q \left(\mu_{V.} + u_{V.}^{(1)} \sigma_{V.} \right) + Q_{\max} \quad (3.1)$$

S.T : $u_V^{(1)} = \beta$

$$\min_{(u_V^{(\tau)})} -q_\infty \left(\mu_{V.} + u_V^{(\tau)} \sigma_{V.} \right) + q_{\infty \max}$$

S.T : $u_V^{(1)} = \beta$

$$\min_{\substack{(u_V^{(\tau)}) \\ (\tau)}} - \left| V(t_f, \mu_{V.} + u_V^{(\tau)} \sigma_{V.}) - V_f \right| + \delta_{V_f} \quad (32)$$

$$\min - \left| \gamma(t, \mu_V + \mu^{(0)} \sigma_V) - \gamma_c \right| + \delta$$

$$S \cap \mathcal{U}_{V'}^{(s)} = \beta \quad (33)$$

$$\min \quad \left| \alpha(t) \right|$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_1}{\partial (u_{V_i}^{(s)})} = \mathbf{z}_j (\mathbf{v}_j, \mathbf{u}_V, \mathbf{v}_i) - \mathbf{z}_j \mathbf{v}_i$$

• 166

$$\min_{(u_{V_i}^{(v)})} \left| \alpha_f(v_f, \mu_{V_i}) + u_{V_i}^{(v)} \circ v_i \right| = \left| \alpha_f(v_f, \mu_{V_i}) \right| + \left| u_{V_i}^{(v)} \circ v_i \right|$$

3.4. α_V

$$\min_{(u_{CTPS})} Q_{allowable} = Q_{TPS} (\mu_{CTPS} + u_{CTPS} \sigma_{CTPS})$$

S.T. $u_{CTPS} \equiv \beta$

CHI-SQUARE TESTS

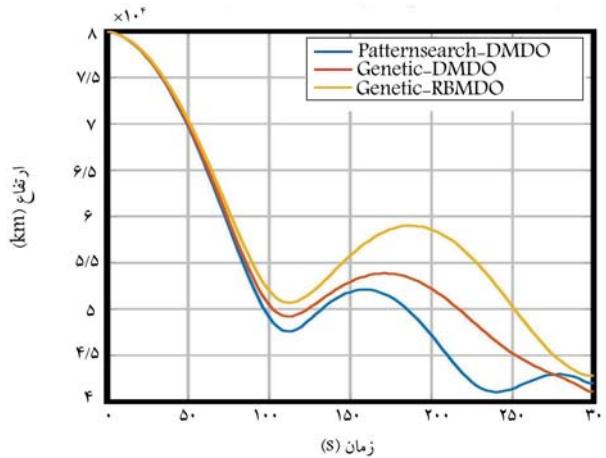
$$\min_{(u_V^{(r)}, u_{Cz_rigid})} \mathbf{n}_{load} - n_{load} \begin{pmatrix} \mu Cz_{rigid} + u_{Cz_rigid} \sigma_{Cz_rigid} \\ , \mu V. + u_V^{(r)} \sigma_V. \end{pmatrix}$$

$$S.T : \sqrt{u_{C_z \text{ rigid}}^r + u_{V.}^r} = \beta$$

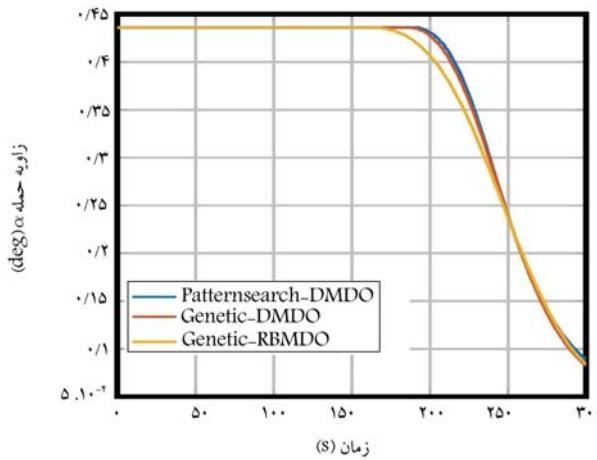
$$\min_{(u_E^{(\dagger)})} -C_{buckle} + R_{buckle} \begin{pmatrix} \mu_E + u_E^{(\dagger)} \sigma_E, \sigma_{bending} \\ , \sigma_{axial}, t_{TPS_{opt}} \end{pmatrix} \quad (\dagger \wedge)$$

S.T : $u_E^{(r)} = \beta$

$$\min_{(u_V^{(\gamma)})} \frac{x_C P(\mu_{V.}^{(\gamma)}) - x_C G}{L} - SSM$$

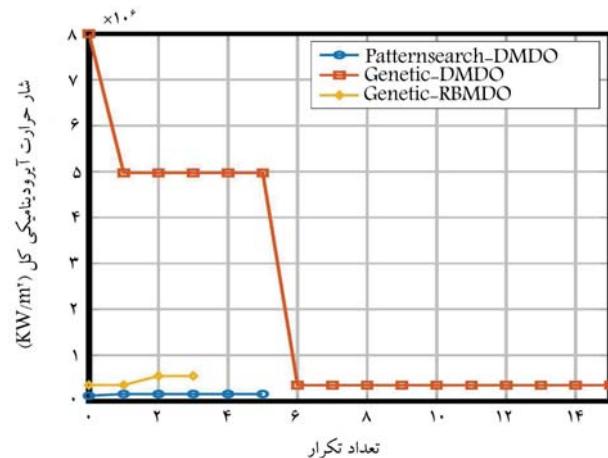


شکل ۱۰. نمودار مسیر بازگشت ماهواره‌بر.

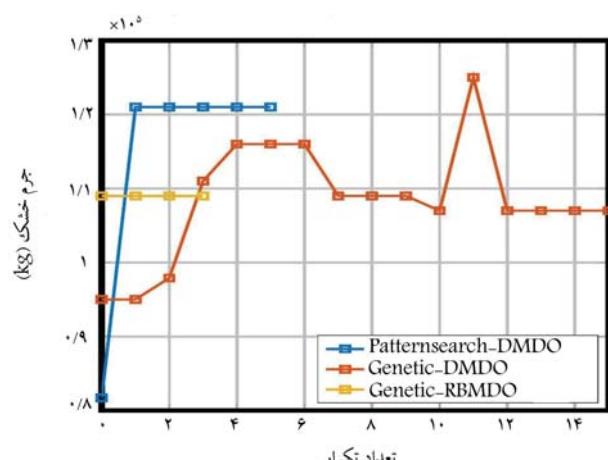


شکل ۱۱. نمودار زاویه حمله در مرکز جرم ماهواره‌بر.

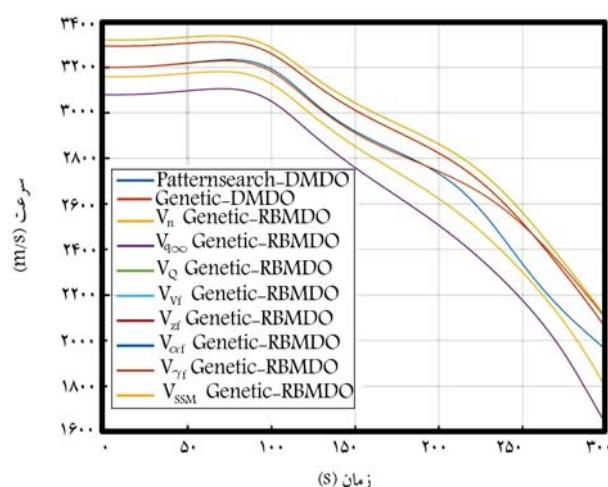
افزایش جرم کل پرتاب می‌گردد. همانطور که در نمودار ارتفاع شکل ۱۰ مشخص شده است، با کاهش ارتفاع برای ارضای قیود فشار دینامیکی، ضریب بار و حرارت آبودینامیکی با وجود عدم قطعیت در سرعت، پیک ارتفاع مشاهده شده است. در نمودار زاویه حمله شکل ۱۱ نیز تطابق بالای مسئله معین و نامعین عدم وجود عدم قطعیت را در پارامترهای مربوط به تابع منحنی زاویه حمله مشخص می‌کند. با توجه به عدم قطعیت در سرعت اولیه، هر قید وابسته به این پارامتر، مقدار متفاوتی از سرعت اولیه را برای دستیابی به قابلیت اطمینان ۳ تجربه می‌کند. حرارت آبودینامیکی (نمودار شکل ۱۲) و فشار دینامیکی (نمودار شکل ۱۳) تنها تابعی از ارتفاع و سرعت هستند. در مسئله نامعین ارتفاع برای همه قیود یکسان است و به همین دلیل، نمودار سرعت فشار دینامیکی و حرارت آبودینامیکی بر هم منطبق هستند. اما ضریب بار علاوه بر ارتفاع و سرعت به ضریب بار (متغیر عدم قطعیت دار) نیز وابسته است. به همین دلیل، پیک ضریب بار در مسئله نامعین در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. همچنین، پیک بالای حرارت جذب شده توسط عایق در شکل ۱۵ در مسئله نامعین حاکی از مصالحه میان مینیمم‌سازی جرم در تابع هدف و قرارگیری قید حرارت جذب شده توسط عایق در قابلیت اطمینان مطلوب برای عدم قطعیت در ضریب هدایت عایق است. با توجه به ابعاد ماهواره بر نوسانات ناشی از انعطاف‌پذیری با وجود مدل‌سازی عدم قطعیت در پارامترهای مرتبط، قابل مقاوم سازی بوده و مشکلات مربوط به ناپایداری استاتیکی و یا دینامیکی در سازه



شکل ۷. نمودار همگرایی نزخ حرارت آبودینامیکی کل.

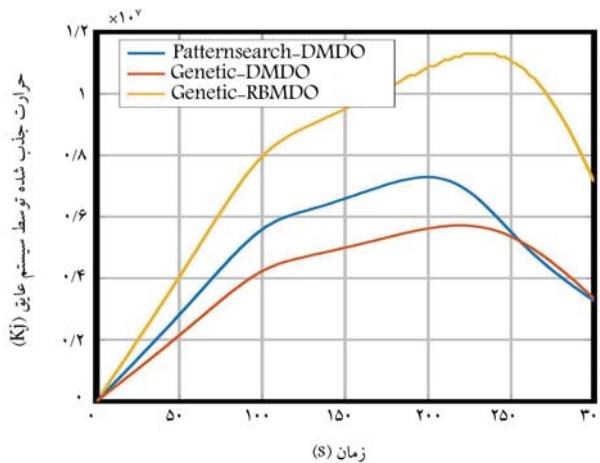


شکل ۸. نمودار همگرایی جرم خشک.

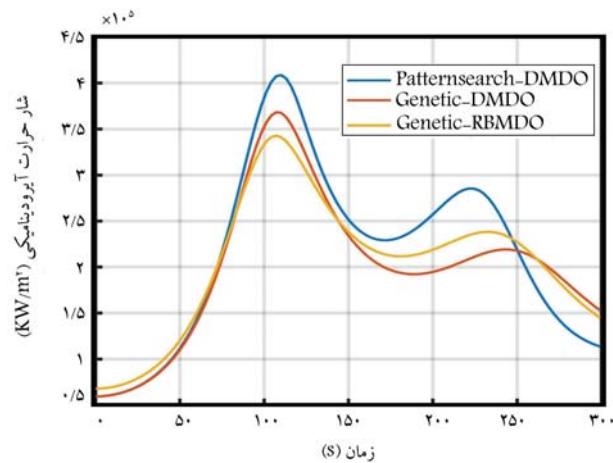


شکل ۹. نمودار سرعت ماهواره‌بر در طول مسیر بازگشت.

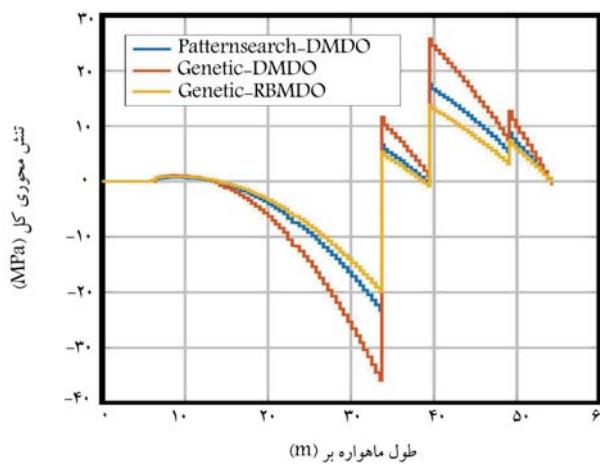
متقاوایت بهمنظور دستیابی به قابلیت اطمینان معین شده برای قید، وجود خواهد داشت. کاهش زیاد سرعت اولیه ورود به حود بعضی قیود به معنی مصرف سوخت بیشتر برای کاهش سرعت ماهواره‌بر قبل از رسیدن به ارتفاع ۸۰ کیلومتری است. این شرایط منجر به ایجاد هزینه بالا برای سیستم پیشran چه از نظر سوخت و چه از نظر



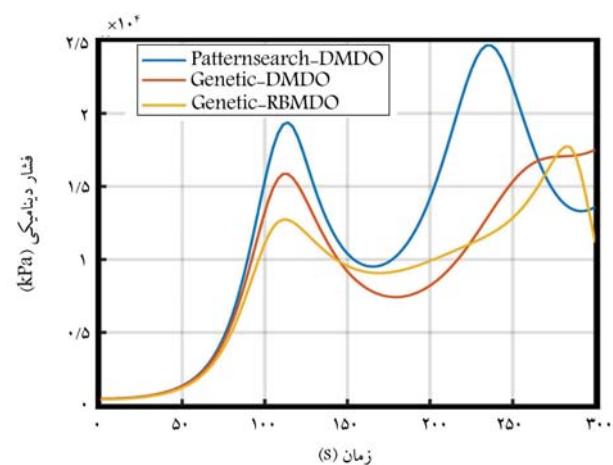
شکل ۱۵. نمودار حرارت جذب شده از طریق هدایت توسط عایق.



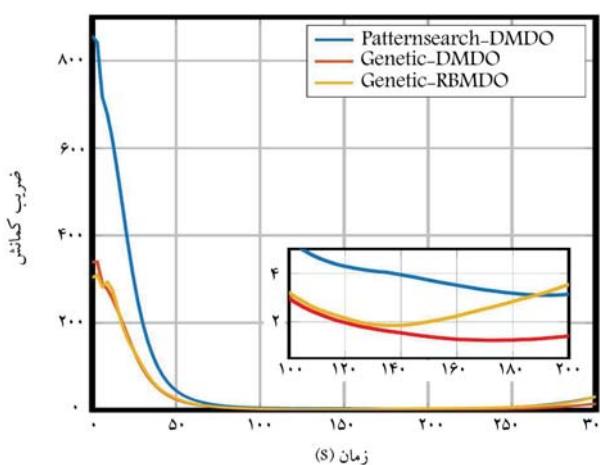
شکل ۱۶. نمودار حرارت آبیودینامیکی در طول مسیر بازگشت ماهواره‌بر.



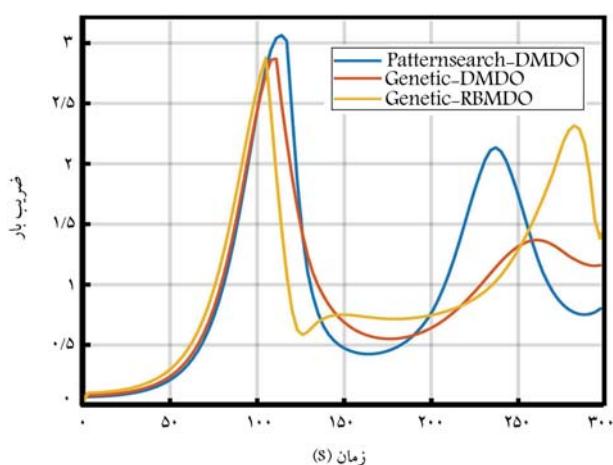
شکل ۱۶. نمودار تنش در حداکثر فشار دینامیکی در طول ماهواره‌بر.



شکل ۱۸. نمودار فشار دینامیکی در طول مسیر بازگشت ماهواره‌بر.



شکل ۱۹. نمودار ضریب کمانش محوری کل در طول مسیر بازگشت ماهواره‌بر.



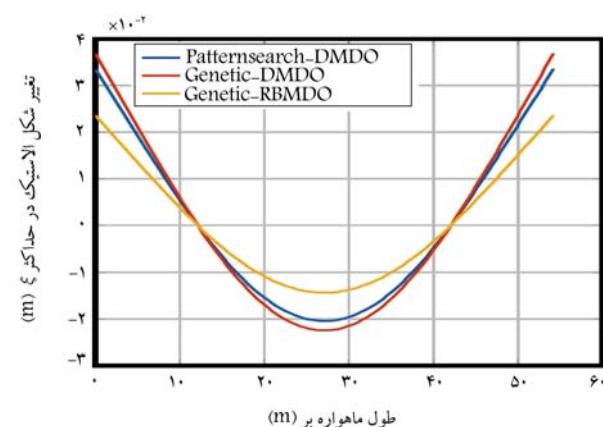
شکل ۲۰. نمودار ضریب بار در طول مسیر بازگشت ماهواره‌بر.

در نمودار تنش و کمانش مشهود است. افزایش عدم قطعیت در پارامتر مدول یانگ در قید کمانش و تنش و یا ضریب میرایی سازه و ضریب پرا اعطا پذیر در قید تنش، مشکلات همگرایی در بازه تعریف شده برای ضخامت پوسته (متغیر طراحی) را به دنبال خواهد داشت.

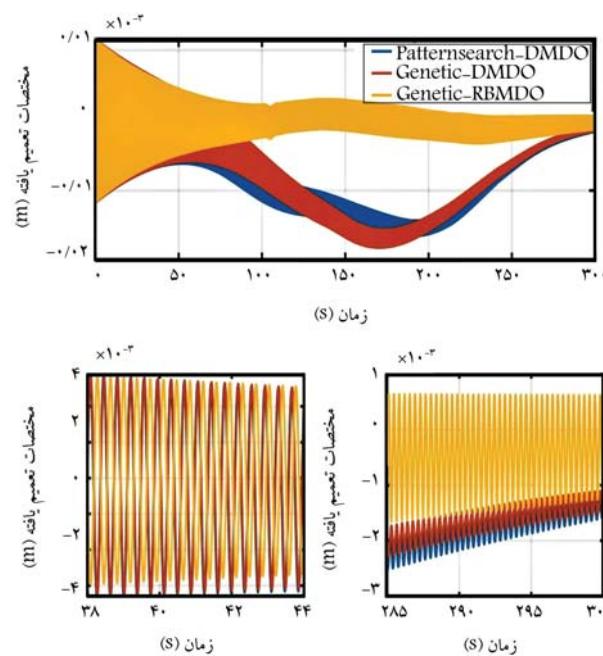
در مورد خواص اعطا پذیری در مسئله طراحی، مدول یانگ از طریق فرکانس

و دینامیک بدن اعطا پذیر وجود نداشته است. موضوع مهم در این نتیجه‌گیری، عدم کوپلینگ بالا و شدید میان دو موضوع مسیر و سازه است. در حالت کلی باید به انتشار عدم قطعیت توسط متغیرهای موضوعی در هر دو موضوع سازه و مسیر توجه شود و نتیجه‌گیری کلی در این زمینه می‌تواند فاقد دقت کافی باشد. همچنین، در نمودار شکل‌های ۱۶ و ۱۷ عدم نیاز به هزینه ساخت بیشتر در طراحی نامعین

- x_i : متغیر طراحی موضوع i ؛
 y_i : متغیر موضوعی خروجی موضوع زام و ورودی موضوع زام؛
 q : نزخ زاویه پیچ ماهواره‌بر؛
 p : نزخ زاویه رول ماهواره‌بر؛
 α : زاویه حمله صلب؛
 ξ : مختصات تعمیم‌یافته در راستای محور z ؛
 w_n : فرکانس طبیعی مود خمشی اول؛
 η : مختصات تعمیم‌یافته در راستای محور y ؛
 m : جرم ماهواره‌بر؛
 M_1 : جرم تعمیم‌یافته ماهواره‌بر؛
 φ : شکل مود خمشی اول در راستای محور z ؛
 M : ماخ؛
 x_D : مرکز فشار در راستای محور طولی؛
 x_{w_k} : محل قرارگیری بالک‌ها در راستای محور طولی؛
 x_T : محل اعمال نیروی تراست در راستای محور طولی؛
 F_T : نیروی تراست؛
 F_A : نیروی آبرودینامیکی؛
 F_C : نیروی کترلی؛
 M_C : ممان کترلی حول محور y ؛
 $c_{I\alpha}$: مشتق استاتیکی ضریب برا؛
 δ_z : تغییر شکل استیک در راستای محور z ؛
 $Q_{S_{\max}}$: حداکثر نزخ حرارت آبرودینامیکی مجاز؛
 $\rho_{Q_{S_{\max}}}$: چگالی متناظر با حداکثر نزخ حرارت آبرودینامیکی مجاز؛
 $q_{\infty \max}$: حداکثر فشار دینامیکی مجاز؛
 $\rho_{q_{\infty \max}}$: چگالی متناظر با حداکثر فشار دینامیکی مجاز؛
 $\sigma_{bendimng}$: تنش خمشی؛
 σ_{axial} : تنش محوری فشاری/کششی؛
 σ_{total} : تنش محوری کل؛
 M_b : ممان خمشی؛
 P : نیروی محوری فشاری/کششی؛
 t : ضخامت پوسته ماهواره‌بر؛
 c : بیشترین فاصله از مرکز قطع ماهواره‌بر؛
 σ_{crp} : کمانش فشاری بحرانی؛
 σ_{crb} : کمانش خمشی بحرانی؛
 C_{buckle} : ضریب کمانش کل؛
 t_{TPS} : ضخامت عایق؛
 $C_{conductivity}$: ضریب هدایت عایق؛
 q_c : نزخ گرمای هدایت داخل عایق در هر لحظه؛
 $Q_{conductivetePS}$: شار حرارت کل از نوع هدایت در عایق.



شکل ۱۸. نمودار تغییر شکل استیک در مازکیم مختصات تعمیم‌یافته.



شکل ۱۹. نمودار مختصات تعمیم‌یافته.

طبیعی و ضریب میرایی سازه بر متغیر مختصات تعمیم‌یافته و در نتیجه بر تغییر شکل الاستیک ماهواره‌بر انطباق‌پذیر مطابق شکل ۱۸ اثرگذار هستند. اثر عدم قطعیت مدول یانگ در فرکانس طبیعی نوسانات و اثر عدم قطعیت ضریب میرایی سازه در دامنه نوسانات مسئله نامعین در شکل ۱۹ مشهود است.

فهرست علاوه

- β : شاخص قابلیت اطمینان؛
 x_s : متغیر طراحی مشترک؛

پانوشت‌ها

6. Sequential Optimization and Reliability Assessment (SORA)
7. Multi Discipline Feasible (MDF)
8. Individual Discipline Feasible (IDF)
9. All at Once (AAO)
10. Collaborative Optimization (CO)
11. Concurrent Subspace Optimization (CSSO)
12. Bi-level Integrated System Synthesis (BLISS)
13. Monte Carlo Sampling
14. Reliability-Based Multidisciplinary Design Optimization (RB-MDO)
15. Simultaneous Analysis and Design (SAND)
16. Karush-Kuhn-Tucker (KKT)
17. Multidisciplinary Reliability Analysis (MRA)
18. Sequential Multidisciplinary Reliability Analysis (SMRA)
19. Bolza Problem
20. Static Stability Margin (SSM)
21. Thermal Protection System (TPS)
22. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II)

منابع (References)

1. Wei, X., Liu, L., Wang, Y. and Yang, Y., 2018. Reentry trajectory optimization for a hypersonic vehicle based on an improved adaptive fireworks algorithm. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/8793908>.
2. Bataleblou, A., 2011. Robust design optimization of a launch vehicle in presence of parametric uncertainties, Diss. K.N. Toosi University of Technology. [In Persian].
3. Doulabi, M., 2014. Reliability-based multidisciplinary design optimization for a liquid proplant launch vehicle using fuzzy sets theory. Diss. K.N. Toosi University of Technology. [In Persian].
4. Ahn, J. and Kwon, J.H., 2004. Sequential approach to reliability analysis of multidisciplinary analysis systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28, pp.397-406. <https://doi.org/10.1007/s00158-004-0459-z>.
5. Tu, J., Choi, K. K. and Park, Y. H., 1999. A new study on reliability-based design optimization. 121(4), pp.557-564. <https://doi.org/10.1115/1.2829499>.
6. Thunnissen, Daniel Pierre., 2005. Propagating and mitigating uncertainty in the design of complex multidisciplinary systems. Diss. California Institute of Technology. doi:10.7907/0FX2-AM50. <https://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-01072005-162147>.
7. Du, X. and Chen, W., 2004. Sequential optimization and reliability assessment method for efficient probabilistic design. *J. Mech. Des.*, 126(2), pp.225-233. <https://doi.org/10.1115/1.1649968>.
8. Zang, Thomas A., 2002. Needs and opportunities for uncertainty-based multidisciplinary design methods for aerospace vehicles. *National Aeronautics and Space Administration*, Langley Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020063596>.
9. Yi, S.I., Shin, J.K. and Park, G.J., 2008. Comparison of MDO methods with mathematical examples. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35, pp.391-402. <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0150-2>.
10. Balling, R. J. and Sobiesczanski-Sobieski, J. 1995. An algorithm for solving the system-level problem in multilevel optimization. *Structural Optimization*, 9, pp.168-177. <https://doi.org/10.1007/BF01743966>.
11. Braun, R. D. and Kroo, I. M., 1995. Development and application of the collaborative optimization architecture in a multidisciplinary design environment. *Multidisciplinary design optimization: State of the art*, 80, pp.98-116. NASA Langley Technical Report Server. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040111288>.
12. Wujek, B. A., Renaud, J.E. and Batill, S., 1997. A concurrent engineering approach for multidisciplinary design in a distributed computing environment. *Multidisciplinary Design Optimization: State of the art*, 80, pp.189-208.
13. Balesdent, M., Bérend, N., Dépincé, P. and Chriette, A. 2012. A survey of multidisciplinary design optimization methods in launch vehicle design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45, pp.619-642. <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0701-4>.
14. Khosravi, Somayeh, 2016. A survey on synthesis of some multidisciplinary design optimization with attitude on reliability. Diss. Shiraz University of Technology. [In Persian].
15. Sobiesczanski-Sobieski, J., Agte, J. and Sandusky, Jr, R., 1998. Bi-level integrated system synthesis (BLISS). In 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. AIAA-98-4916. <https://doi.org/10.2514/6.1998-4916>.
16. Kim, H.M., Michelena, N.F., Papalambros, P.Y., Jiang, T. 2003. Target cascading in optimal system design. *J. Mech. Des.*, 125(3), pp. 474-480. <https://doi.org/10.1115/1.1582501>.
17. Hashemi Doulabi, S.M., Darabi, H., Roshnian, J., 2012. Comparison between traditional method (Statistical Method) and multidisciplinary optimization method (AAO) in designing of a lightweight liquid propellant LV', *Space Science and Technology*, 5(1), pp.61-72. [In Persian]. <https://jsst.ias.ir/article.14433.html>.
18. Koch, P., Wujek, B. and Golovidov, O., 2000. A multi-stage, parallel implementation of probabilistic design optimization in an MDO framework. In 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. p. 4805. <https://doi.org/10.2514/6.2000-4805>.
19. Du, X. and Chen, W., 2000. Methodology for managing the effect of uncertainty in simulation-based design. *AIAA Journal*, 38(8), pp. 1471-1478. <https://doi.org/10.2514/2.1125>.
20. Liu, J., Yu, Z., Zhang, D., Liu, H. and Han, X., 2021. Multimodal ellipsoid model for non-probabilistic structural uncertainty quantification and propagation. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 17(3), pp.633-657. <https://doi.org/10.1007/s10999-021-09551-z>.
21. Oakley, D.R., Sues, R.H. and Rhodes, G.S., 1998. Performance optimization of multidisciplinary mechanical systems subject to uncertainties. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 13(1), pp.15-26. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(97\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(97)00004-0).

22. Agarwal, H., Renaud, J.E., Preston, E.L. and Padmanabhan, D., 2004. Uncertainty quantification using evidence theory in multidisciplinary design optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 85(1-3), pp.281-294. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.03.017>.
23. Li, L., Wan, H., Gao, W., Tong, F. and Li, H., 2019. Reliability based multidisciplinary design optimization of cooling turbine blade considering uncertainty data statistics. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 59(2), pp.659-673. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2081-5>.
24. Yao, W., Chen, X., Ouyang, Q. and Van Tooren, M., 2013. A reliability-based multidisciplinary design optimization procedure based on combined probability and evidence theory. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48, pp.339-354. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0901-1>.
25. Li, L., Liu, J.H. and Liu, S., 2014. An efficient strategy for multidisciplinary reliability design and optimization based on CSSO and PMA in SORA framework. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49, pp.239-252. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0966-x>.
26. Du, X., Guo, J. and Beeram, H., 2008. Sequential optimization and reliability assessment for multidisciplinary systems design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35, pp.117-130. <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0121-7>.
27. Alexandrov, N., and Lewis, R., 2000. Algorithmic perspectives on problem formulations in MDO. In 8th symposium on multidisciplinary analysis and optimization, p.4719. <https://doi.org/10.2514/6.2000-4719>.
28. Padmanabhan, D. and Batill, S., 2002. Reliability based optimization using approximations with applications to multi-disciplinary system design. In 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, p.0449. <https://doi.org/10.2514/6.2002-449>.
29. Du, X. and Chen, W., 2002. Efficient uncertainty analysis methods for multidisciplinary robust design. *AIAA Journal*, 40(3), pp.545-552. <https://doi.org/10.2514/2.1681>.
30. Zhang, M., Yao, Q., Sun, S., Li, L. and Hou, X., 2020. An efficient strategy for reliability-based multidisciplinary design optimization of twin-web disk with non-probabilistic model. *Applied Mathematical Modelling*, 82, pp.546-572. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.01.066>.
31. Shi, Y., Lu, Z., Zhou, J. and Zio, E., 2020. Time-dependent reliability-based design optimization considering aleatory and epistemic uncertainties. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62, pp.2297-2321. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02691-4>.
32. Chiralaksanakul, A. and Mahade van, S., 2007. Decoupled approach to multidisciplinary design optimization under uncertainty. *Optimization and Engineering*, 8, pp.21-42. <https://doi.org/10.1007/s11081-007-9014-2>.
33. Fathi Jegarkandi, M., 2009. Aerostervoelastic modeling and analysis of supersonic agile flight vehicle at high angle of attack, Diss. Amir Kabir University of Technology [In Persian].
34. Sushnidha, G. and Joshi, A., 2018. Reentry trajectory design with pigeon inspired optimization using derived angle of attack profile. *Journal of Aerospace Engineering*, 31(6), 04018104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000929](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000929).
35. Bodramoni, Balakrishna. and Reddy, Rahul., 2005. Calculation of airphase load and airframe design of a typical missile, 10.13140/RG.2.1.3818.3446. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3818.3446>.
36. Kabganian, M., Hashemi, S.M. and Roshanian, J., 2022. Multidisciplinary design optimization of a Re-Entry spacecraft via radial pseudospectral method. *Applied Mechanics*, 3(4), pp.1176-1189. <https://doi.org/10.3390/applmech3040067>.

بررسی کمانش و ناپایداری وابسته به ابعاد ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی و میدان الکترواستاتیک در میکرو ورق‌های توخالی متخلخل

مهندسی مکانیک شریف (نهم ۱۶۰)
دوری ۴۰ شماره ۱، ص ۷۵-۸۷ (پژوهشی)

مهدى مجاهدى* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مجیدرضا آیت‌اللهی (استاد)

محمد مجاهدى (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

در این مقاله، ناپایداری و کمانش ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی در میکرو ورق‌های متخلخل تحت میدان الکترواستاتیک از طریق توری کوپل تشن اصلاحی و با استفاده از روش‌های نیمه‌تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ورق به صورت متخلخل در نظر گرفته شده و توزیع تخلخل به فرم غیریکنواخت لحاظ می‌گردد. همچنین روشی بر مبنای مشتق‌گیری برای محاسبه بار کمانش و ولتاژ ناپایداری ارائه می‌شود که این روش با نتایج ناپایداری و کمانش حاصل از نمودارهای روش گالرکین مقایسه و درصد خطای این روش بررسی می‌گردد. در بخش نتایج، تفاوت توری‌های کلاسیک و غیرکلاسیک مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای نظریه غیرکلاسیک و نسبت تخلخل بر جایگاهی و ولتاژ ناپایداری و بار کمانش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تغییرات نسبت تخلخل منجر به تغییرات یکنواخت بار کمانش و ولتاژ ناپایداری شده و روابط خطی برای محاسبه بار کمانش و ولتاژ ناپایداری بر حسب تغییرات نسبت تخلخل به دست می‌آید.

mojahedi62@gmail.com
m.ayat@iust.ac.ir
mojahedi74@gmail.com

واژگان کلیدی: متخلخل، کمانش، توری وابسته به ابعاد، روش عددی، ناپایداری.

۱. مقدمه

ماده متخلخل منجر به افزایش حفره‌ها و متعاقبً افزایش سختی و کاهش چگالی (جرم ویژه) ماده می‌شود. از طرفی، توزیع تخلخل در ماده در عملکرد مکانیکی سازه، تأثیر قابل توجهی دارد.^[۱-۲] از توزیع‌های رایج تخلخل در فوم‌های فلزی و نیمه فلزی، توزیع یکنواخت و توزیع درج تابعی می‌باشد.^[۳-۴]

در زمینه استفاده از مواد متخلخل فعالیت‌های متنوعی در سالیان اخیر انجام پذیرفته است.^[۵-۶] در همین راستا، جلالی و سیوالک^[۷] ناپایداری دینامیکی نانوتیر متخلخل ویسکوالاستاتیک مدرج تابعی تعییه شده، بر روی محیط ویسکو پاسترناک که تحت یک بار نوسان محوری و همچنین میدان مغناطیسی قرار گرفته است، را مورد بررسی قرار دادند. خو و همکاران^[۸] رفتار ارتعاشی یک نانوتیر خمیده متخلخل را با توجه به نظریه گرایان کریشن غیرموضعی مورد بررسی قرار داده و تغییر شکل و

ورق‌ها، عضو سیار مهمی از سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیک رایج در حسگرها و عملکردها هستند که در این مجموعه‌ها، به عنوان المان اصلی انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری و انجام عملی خاص مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.^[۹] مواد متخلخل، تکیبی از عناصر جامد با مایع یا گاز می‌باشند. چوب‌ها، سنگ‌ها و اسفنج‌ها نمونه‌ای از این مواد هستند. فوم‌های فلزی نیز نمونه‌ای از مواد متخلخل می‌باشند که وزن کم و سختی قابل توجه سبب شده است که کاربرد آنها به عنوان مواد پیشرفتی در زمینه‌های مختلف علوم رشد پیدا کنند. مشخصه مهم این مواد، تخلخل می‌باشد که پارامتر مربوطه نسبت حجم حفره‌ها به حجم کل را نشان می‌دهد. افزایش تخلخل در یک

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۶/۱/۱۱، اصلاحیه ۲۰/۱/۱۴۰، پذیرش ۲۳/۱۲/۱۴۰.

استناد به این مقاله:

مجاهدى، مهدى، آیت‌اللهی، مجیدرضا، و مجاهدى، محمد، ۱۴۰۳. بررسی کمانش و ناپایداری وابسته به ابعاد ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی و میدان الکترواستاتیک در میکرو ورق‌های توخالی متخلخل. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، ص ۷۵-۸۷. DOI:10.24200/J40.2023.61768.1673.

آمده است. اثرات پارامتر مقیاس طول، شاخص قانون توان و نسبت ضخامت به شعاع بر کمانش حزاری و رفتار پسکمانش میکرو صفحه‌ای دایره‌ای بررسی شده است.

شهرخی و همکاران^[۲۳] یک تابع گرین برای تحلیل خمی میکرو صفحات تحت یکبار نامتقارن پیشنهاد دادند و با در نظر گرفتن اثر مقیاس طول، از نظریه کوپل تنش اصلاحی استفاده کردند. معادله تعادلی وابسته به ابعاد میکرو صفحه دایره‌ای تحت بار غیرمحوری با استفاده از حداقل اصل انرژی پتانسیل کل به دست آمده و نشان داده شده است، که مقیاس طولی تأثیر معنی داری بر خمی میکرو صفحات دارد. سیمیک و همکاران^[۲۴] خمی استاتیکی و ارتعاش اجباری یک میکرو صفحه مدرج تابعی حامل بار متحرک را براساس نظریه صفحه میندلین نظریه کوپل تنش اصلاحی بررسی کردند. برای به دست آوردن پاسخ میکروورق از معادلات لاگرانژ استفاده شده و معادلات حرکت میکرو صفحه در حوزه زمان با استفاده از روش نیومارک حل شده است. اثرات تغییرات مواد، کسر حجمی تخلخل و هندسه تخلخل، پارامتر مقیاس طول و سرعت بار متحرک بر پاسخ‌های دینامیکی بررسی شده است.

براتی و شاهوردی [۲۵] رفتار ارتعاشی نانو صفحات سیلیکونینا توکریستالی دولایه را که بر روی پایه وینکلر پستنک قرار دارد، تجزیه و تحلیل کردند. آنها از نظریه کوپل تنش اصلاحی برای اثرات وابسته به اندازه استفاده کردند و معادلات حاکم را از طریق اصل همیلتون در چارچوب مدل صفحه‌ای دو متغیره بهبودیافته به دست آوردند. حسینی و همکاران [۲۶] یک مدل تحلیل ارتعاشی را برای نانو صفحه دایره‌ای با خواص ماده مدرج تابعی پیشنهاد دادند و تأثیر میدان مغناطیسی و پارامتر مقیاس طول را بر رفتار ارتعاشی بررسی کردند. آنها از نظریه تغییر شکل بررشی مرتبه اول و توری کوپل تنش اصلاحی برای دستیابی به معادلات حاکم استفاده کردند. شریفی نسب و مجاهدی [۲۷] پاسخ دینامیکی و ارتعاشات غیرخطی یک میکرورزوناتور حاوی یک میکروپیل با جرم گواه واقع در وسط را بر مبنای تئوری کوپل تنش اصلاحی بررسی نمودند. جرم گواه میکرورزوناتور توسط میدان الکترواستاتیکی به گونه‌ای تحریک می‌شود که با اعمال یک ولتاژ مستقیم موقوفیت تعادل خاصی پیدا می‌کند و سپس تحت ولتاژ متناسب به لرزش در می‌آید. با اتخاذ تئوری کوپل تنش اصلاح شده و در نظر گرفتن تحریک الکترواستاتیکی، معادله دینامیکی حرکت با استفاده از اصل همیلتون توسعه یافته به دست آمده است. علاوه بر این، با تقریب روش گالرکین، معادله حاکم بر حرکت استاتیکی و نوسانی کاهش می‌یابد و معادله حاصل با روش‌های تحلیلی (مقیاس‌های چندگانه) و عددی حل گردیده است. برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی و استاتیکی وابسته به ابعاد در میکرورزوناتورهای نازک، مانو و همکاران [۲۸] یک المان ورق مثیل سه گرهای ناسازگار را با استفاده از اصل لاغرانژ - دالامبر به دست آورندند. مسیبی و همکاران [۲۹] انتشار موج را در میکرورزوناتورهای ساندویچی و پیکوالاستیک توسط نظریه زیگراگ اصلاح شده و تئوری کوپل تنش اصلاحی بررسی نمودند. سازه متشکل از هسته کامپوزیتی تقویت شده گرفنی و لایه‌های پیزوالکتریک به عنوان حسگر و مجرک می‌باشند. که لایه‌های هسته و پیزوالکتریک در معرض میدان الکترومغناطیسی قرار دارند. مدول یانگ، چگالی جرم و نسبت پواسون براساس مدل اصلاح شده هالپین - تسای و قانون مخلوط‌ها محاسبه و خواص پیکوالاستیک سازه با مدل کلوفن - ویت شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی و همکاران [۳۰] راه حلی عددی برای پایداری و یافتن فرکانس نانو صفحه مستطبی ای ساخته شده از مواد الکتریکی انجام داده‌اند. برای مدل سازی عوامل وابسته به اندازه سیستم‌های نانو الکترومکانیکی پیزوالکتریک، نظریه کوپل تنش اصلاحی با یک پارامتر مقیاس، طول، و یک علاما، غیر موضعی، ارائه شده است. در این بیو هشت،

تششی های نرمال و برشی وابسته به زمان را که توسط بار دینامیکی القاء می شود، محاسبه نمودند. آنها از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه بالا (با در نظر حرکات کویل شده) در به دست آوردن معادله حرکت به، $\ddot{\theta}$ ، فته و اثرات تخلیخا، دارای سیخ دینامیک

مطالعه کردند. در پژوهش سعید و همکاران^[11] ارتعاشات آزاد میکروتیپر ساندویچی با هسته متخاصل و ورق های تقویت شده نانو لوله کربنی مدرج تابعی روی بستر وینکار - پاسترناک بررسی گردیده است. آنها تیر را تحت بار حرارتی در نظر گرفته و مولفه های جایجا یی را براساس تئوری تغییر شکل برشی سینوسی بیان نمودند. اثرات مقیاس با توجه به تئوری کوبیل تشن اصلاحی لحظه گردیده است. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش تخلخل فرکانس کاوش می یابد.

در گذشته به منظور تحلیل و شیبیه‌سازی سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیک از دو روش دینامیک مولکولی و روش مکانیک محیط پیوسته استفاده می‌شد. روش دینامیک مولکولی عمولاً ایاز به زمان محسابات طولانی دارد و روش مکانیک محیط پیوسته کلاسیک نیز به دلیل نادیده گرفتن خواص و پیکربندی ابعاد کوچک، ابزاری مطمئن نمی‌باشد. مطالعات متعددی برای غلبه بر این محدودیت‌ها در شیبیه‌سازی رفتار مکانیکی میکرو/نانو سازه‌ها انجام شده است. نظریه‌های گرایان کرنش، کوپل تشن و همچنین کوپل تشن اصلاحی از جمله تئوری‌های معتبری می‌باشند که در سالیان گذشته برای شیبیه‌سازی رفتار مکانیکی سازه‌های میکرو مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این بین نظریه کوپل تشن اصلاحی به دلیل دقیق نسبت مناسب و سادگی اعمال در مدل‌سازی با اقبال بیشتری مواجه گردیده است.^[۱۸-۱۲] در این تئوری، ارزی کرنشی به صورت تابعی از تانسور انتخا و تانسور کرنش آمده است. در تئوری کوپل تشن اصلاحی به دلیل وجود تنش‌ها و کرنش‌های غیرکلاسیک مراتب بالا و کوپل‌های ایجاد شده، پارامتر جدیدی به نام پارامتر مقیاس طول را تعریف می‌کنند که این پارامتر ارتباط میدان جایه‌جایی و تنش را در همسایگی یک نقطه بیان می‌کند. در فرمول کوپل تشن اصلاحی، از روابط تعادلی نیروها و گشتاور نیروها استفاده می‌شود.^[۱۹]

فوجان و همکاران^[۲۰] به بررسی ارتعاشات یک میکروصفحه حلقوی کامپوزیت چندلایه با استفاده از نظریه کوپل تنش اصلاحی پرداختند. ساختار با یک پایه از طریق مدل کلوبن - ویت شیبیه سازی شده است. معادلات حاکم غیرکلاسیک و شرایط مرزی میکروصفحه حلقوی وابسته به اندازه با افزودن گردایان چرخش متقاضی و تنسورهای تنش مرتبه بالاتر به انرژی کرنش به دست می آیند. معادلات حاکم غیرکلاسیک، با استفاده از روش مربعات دیفرانسیل تعمیم یافته برای شرایط مرزی مختلف حل می شوند. آنها نشان دادند که افزایش پارامتر ویسکوالاستیک نمی تواند تعییری در فرکانس دسک ایجاد کند.

آرشید و همکاران^[۲۱] ارتعاش آزاد و کمانش مکانیکی یک میکروتیر سه لایه را که تحت بار مغناطیسی لورنس در بستر ویسکو-الاستیک قرار گرفته است، را با استفاده از تئوری کوپل تنش اصلاحی بررسی نمودند. اثر محيط حرارتی بر خواص مکانیکی در نظر گرفته شده، معادلات حاکم براساس نظریه تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر و روش انرژی استخراج شده و با بهره‌گیری از روش ناویر حل شده است. در نتایج، فرکانس‌های طبیعی و بارهای کمانشی بحرانی با افزایش زاویه باز شدن مرکزی کاهش یافته و افزایش ضریب تخلخل، مقادیر ذکر شده را کاهش داده است.

در پژوهش زندگریمی و همکاران،^{۲۲} کمانش حرارتی و رفتار پس کمانش وابسته به اندازه یک میکروصفه مدور تابعی مدرج تحت میدان افزایش دمای یکنواخت و شرایط مرزی گیردار بررسی شده است. معادلات تعادل و شرایط مرزی براساس تئوری کو، با، تئوری، اصلاحی، نظریه صفحه کلاسیک و ترم غیرخطی، فون کارمان به دست

به بررسی رفتار استاتیکی و ناپایداری میکروورق‌های دایره‌ای متخلخل در میدان الکترواستاتیک پرداخته می‌شود. این ورق دارای تخلخل بوده و توزیع تخلخل در آن به صورت مدرج تابعی است. با توجه به نوع کاربرد، شرایط مرزی به صورت تمام گیردار در نظر گرفته می‌شود. اثر بار فشاری ناشی از تکیه‌گاه و همچنین تأثیر نیروی الکترواستاتیک ناشی از اختلاف پتانسیل الکتریکی بین ورق و لایه ژلت، در مدل سازی و تعیین معادلات حاکم لحاظ می‌گردد. در محاسبه تغییر شکل ورق و تشن‌های آن، با توجه به ابعاد سازه، از تئوری کوبیل تشن اصلاحی که مورد توجه گسترده محققان در سال‌های اخیر بوده است، استفاده می‌شود. در مدل سازی، تئوری ورق کلاسیک به کار گرفته خواهد شد و معادلات تغییر شکل استاتیکی ورق متخلخل با استفاده از روش‌های انرژی به دست می‌آید. معادلات با استفاده از روش‌های کاهش مرتبه حل شده و تغییر شکل استاتیکی نانو ورق تعیین می‌گردد. از آنجا که سازه تحت تأثیر بار گسترده تکیه‌گاهی قرار دارد، در تحلیل نتایج، کمانش مورد توجه قرار گرفته و بار کمانش در حضور میدان الکترواستاتیک (اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی) محاسبه می‌شود.

تعیین می‌گردد. در تئوری کوبیل تشن اصلاحی که اولین بار توسط یانگ معرفی شده، انرژی کرنش، تابعی از هر دو تانسور کرنش مربوط به تانسور تشن و اتحاد مربوط به تانسور کوبیل تشن است؛ بنابراین، انرژی کرنش U برای یک میکروورق استاتیک خطی با حجم V به صورت زیر نوشته می‌شود:^[۲۱]

$$U_s = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + m_{ij} \chi_{ij}) dV \quad (2)$$

$i, j = 1, 2, 3$

در رابطه ۲، ε_{ij} تانسور کرنش، σ_{ij} تانسور تشن، x_i تانسور متقارن اتحاد و m_{ij} تانسور عرضی تشن کوبیل بوده و طبق دسته روابط زیر محاسبه می‌شوند:^[۲۲]

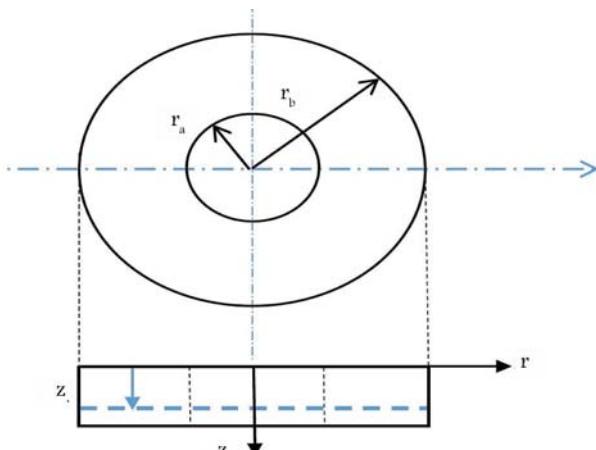
$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \\ \chi_{ij} &= \frac{1}{2} (\theta_{i,j} + \theta_{j,i}) \\ m_{ij} &= 2\mu \nabla^T \chi_{ij} \\ \theta &= \frac{1}{2} \operatorname{curl}(\bar{u})_i \end{aligned} \quad (3)$$

که u بردار جایه‌جایی، r_a دلتای کرونکر، λ پارامتر مقیاس طول، θ بردار چرخش و μ ثوابت لامه می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\lambda = \frac{E(z)v}{(l+v)(1-2v)} \quad \mu = \frac{E(z)}{2(l+v)} \quad (4)$$

به طوریکه v نسبت پواسون است. همان‌طور که رابطه ۴ نشان می‌دهد، مقدار ضریب الاستیستیته با توجه به پارامتر تخلخل تغییر می‌کند. در شکل ۲، یک ورق متخلخل را که داری شعاع خارجی r_b و ضخامت h است، نشان می‌دهد. با توجه به متخلخل بودن ورق، محل قرارگیری صفحه خشی در موقعیت z قرار می‌گیرد. برای مدل سازی سیستم مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) همان‌طور که نشان داده شده است اتخاذ می‌شود.

با توجه به تقارن محوری در هندسه، بارگذاری و قیود تکیه‌گاهی، مسئله به صورت متقارن محوری لحاظ می‌گردد. از آنجا که بارگذاری به صورت استاتیکی اعمال می‌شود و بار الکترواستاتیکی در راستای محیطی ثابت است، تنها مدهای متقارن، به ویژه مد اول که مدل غالب است، در پاسخ اثر می‌گذارند. بنابراین می‌توان از اثر مدهای نامتقارن صرف نظر نمود و پاسخ مسئله را با توجه به فرضیات متقارن محوری به دست آورد.



شکل ۲. میکرو ورق متخلخل.

۲. مدل سازی و حل مسئله

۱.۲. معادلات حاکم بر مسئله

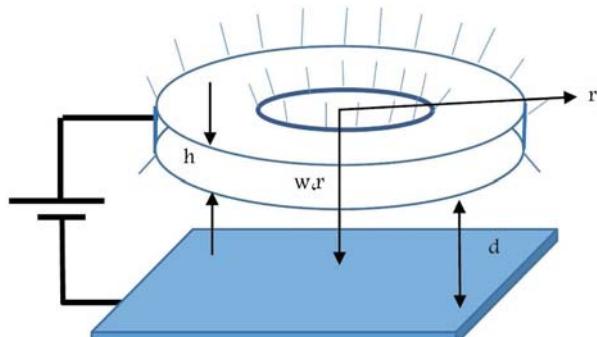
ورق به صورت توانایی با شعاع داخلی r_a و شعاع خارجی r_b در نظر گرفته می‌شود که از دو طرف گیردار است و تحت خیز $w(r, \theta)$ قرار دارد. برای تعیین پاسخ، تحلیل ناپایداری و کمانش، ابتدا معادلات با استفاده از روش‌های انرژی، تعیین می‌شود. در شکل ۱ نمایی از یک میکرو ورق تحت میدان الکترواستاتیک نشان داده شده است.

در شکل فوق t و d نشان‌دهنده ضخامت میکروورق و فاصله بین صفحه ثابت و میکروورق است. همچنین ورق از ماده متخلخل تشکیل گردیده است. برای توزیع غیریکنواخت تخلخل، از رابطه خاصیت فیزیکی در دو ماده با توزیع مدرج تابعی غیریکنواخت بهره گرفته می‌شود. که فرم خطی به صورت توزیع غیریکنواخت لحاظ می‌شود:^[۲۳]

$$E(z) = E - \Phi E \left[1 - \frac{2(z - \frac{h}{2})}{h} \right] \quad (1)$$

به طوریکه پارامتر Φ نسبت تخلخل، E مدول یانگ، h ضخامت ورق و z متعیر موقعیت در راستای ضخامت می‌باشد.

در این بخش، معادلات دیفرانسیل حرکت از طریق تئوری کوبیل تشن اصلاحی



شکل ۱. میکرو ورق تحت میدان الکترواستاتیک.

با توجه به مقادیر به دست آمده تشن ها و کرنش های کلاسیک و مرتبه بالاتر، می توان ارزی کرنشی را با توجه به جیر تانسوری به دست آورد:

$$U = \int_V^h [(\sigma_{ij}\varepsilon_{ij} + m_{ij}\chi_{ij})] dV \quad (12)$$

$(i, j = 1, 2, 3)$

بنابراین، مطابق با رابطه فوق و تفکیک انتگرال های وارد بر سطح و ضخامت، تغییرات ارزی پتانسیل محاسبه می شود:

$$\delta U = \int_A^h [\sigma_{rr} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{rr}^1] + \sigma_{\theta\theta} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{\theta\theta}^1] + \sigma_{zz} (\delta \varepsilon_{zz}^1) + 2m_{r\theta} (\delta \chi_{r\theta})] dz r dr d\theta \quad (13)$$

با در نظر گرفتن تقارن محوری، تغییرات ارزی پتانسیل کرنشی از طریق رابطه ۱۴ به دست می آید:

$$\delta U = 2\pi \int_r^h [\sigma_{rr} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{rr}^1] + \sigma_{\theta\theta} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{\theta\theta}^1] + \sigma_{zz} (\delta \varepsilon_{zz}^1) + 2m_{r\theta} (\delta \chi_{r\theta})] dz r dr \quad (14)$$

و با در نظر گرفتن بار گستردگی شعاعی تکیه گاهی $P(r)$ و بار گستردگی عرضی الکترواستاتیک $q(r, \theta)$ و تقارن محوری، کار مجازی از طریق رابطه ۱۵ تعیین می شود:

$$\delta W = 2\pi \int_r^h [-P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right) \delta \left(\frac{dw}{dr} \right) + q(r, \theta) \delta w] r dr \quad (15)$$

به طور یکه w تغییرات خیز را نشان می دهد. با ساده سازی و استفاده از ممان های خمشی، ارزی کرنشی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\delta U = \int_r^h [M_{rr} \delta \varepsilon_{rr}^1 + \frac{1}{r} M_{\theta\theta} \delta \varepsilon_{\theta\theta}^1 + 2\bar{M}_{r\theta} \delta \chi_{r\theta}] dr \quad (16)$$

با در نظر گرفتن تغییرات کرنش و انتخنا بر حسب جایگایی عرضی، رابطه ۱۷ به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\delta U = \int_r^h [M_{rr} \delta \left(-\frac{d^r w}{dr^r} \right) + \frac{1}{r} M_{\theta\theta} \times \delta \left(-\frac{dw}{dr} \right) + \bar{M}_{r\theta} \delta \left(-\frac{d^r w}{dr^r} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right)] dr \quad (17)$$

با ساده سازی و جایگزینی ممان های رابطه ۱۰ و لحاظ نمودن تقارن محوری در روابط ۱۵ و ۱۷، روابط زیر به دست می آید:

$$\delta U = 2\pi \left\{ -r M_{rr} \delta \left(\frac{dw}{dr} \right) \Big|_r + \frac{d(r M_{rr})}{dr} \delta w \Big|_r - M_{\theta\theta} \delta w \Big|_r - r \bar{M}_{r\theta} \delta \left(\frac{dw}{dr} \right) \Big|_r + \frac{d(r \bar{M}_{r\theta})}{dr} \delta w \Big|_r + \bar{M}_{r\theta} \delta w \Big|_r + \int_r^h \left[-\frac{d^r(r M_{rr})}{dr^r} + \frac{d(M_{\theta\theta})}{dr} - \frac{d(r \bar{M}_{r\theta})}{dr^r} - \frac{d(\bar{M}_{r\theta})}{dr} \right] \delta w dr \right\} \quad (18)$$

$$\delta W = 2\pi \left\{ -r P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right) \delta w \Big|_r \right\} + \frac{1}{r} \int_r^h \left[\frac{d}{dr} (r P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right)) + q(r) \right] \delta w r dr \quad (19)$$

در مدل حاضر، به دلیل ناچ بودن ورق، از نظریه ورق کلاسیک استفاده می شود، این نظریه گسترش یافته تئوری تیر اوپل برولی برای ورق می باشد. بنابراین، طبق ورق کلاسیک، میدان جایگایی برای مسئله متقاضی محوری را می توان به صورت زیر نوشت:

$$u_r(r) = -(z - z_0) \frac{dw(r)}{dr}, \quad (5)$$

$$u_\theta(r) = 0, \quad u_z(r) = w(r)$$

w جایگایی عرضی یک نقطه دلخواه است. با توجه به میدان جایگایی تعریف شده توسط معادله ۵، اجرای کرنش و تانسور انتخنا متقاضی را می توان با استفاده از روابط ۶ به دست آورد.

$$\varepsilon_{rr} = (z - z_0) \varepsilon_{rr}^1 = -(z - z_0) \frac{d^r w}{dr^r}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = (z - z_0) \varepsilon_{\theta\theta}^1 = -\frac{(z - z_0)}{r} \frac{dw}{dr},$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{rz}^1 = \varepsilon_{\theta z} = \varepsilon_{\theta z}^1 = 0.$$

$$\chi_{r\theta} = \chi_{\theta r} = \frac{1}{r} \left(-\frac{d^r w}{dr^r} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right),$$

$$\chi_{rr} = \chi_{\theta\theta} = \chi_{zz} = \chi_{rz} = \chi_{\theta z} = 0.$$

حال اجزای تشن کلاسیک و مرتبه بالاتر آن را می توان از طریق رابطه زیر به دست آورد:

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{rr} + \nu \varepsilon_{\theta\theta}) \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\nu \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta})$$

$$m_{r\theta} = m_{\theta r} = 2\mu l^r \chi$$

z_0 مختصات صفحه خنثی است که با محاسبه برآیند بار شعاعی و بار محیطی ناشی از تشن های شعاعی و محیطی در مقطع ورق و تعادل این بارها به صورت زیر محاسبه می شود:

$$z_0 = \frac{\int_r^h E(z) z dz}{\int_r^h E(z) dz} \quad (8)$$

در ادامه، ممان های خمشی و ممان حاصل از کوپل تشن از طریق رابطه زیر تعیین می شود:

$$M_{rr} = \int_r^h \sigma_{rr} (z - z_0) dz$$

$$M_{\theta\theta} = \int_r^h \sigma_{\theta\theta} (z - z_0) dz$$

$$\bar{M}_{r\theta} = \int_r^h m_{r\theta} dz$$

با جایگزینی تشن ها و کرنش ها با میدان جایگایی مطابق با رابطه ۶، روابط ۱۰ به صورت زیر نوشتند:

$$M_{rr} = \left[-D_{11} \frac{d^r w}{dr^r} - \frac{D_{12}}{r} \frac{dw}{dr} \right]$$

$$M_{\theta\theta} = \left[-D_{21} \frac{d^r w}{dr^r} - \frac{D_{22}}{r} \frac{dw}{dr} \right]$$

$$\bar{M}_{r\theta} = D_m \left(-\frac{d^r w}{dr^r} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (10)$$

که ضرایب D_{11} ، D_{12} و D_m از طریق رابطه ۱۱ تعیین می شوند:

$$D_{11} = \int_r^h \left(\frac{E}{1 - \nu^2} \right) (z - z_0)^r dz$$

$$D_{12} = \int_r^h \left(\frac{E\nu}{1 - \nu^2} \right) (z - z_0)^r dz$$

$$D_m = \int_r^h G l^r dz \quad (11)$$

که برای حل رابطه فوق، از روش سعی و خطای استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا
اندیس m به بردارهای و نیرو به $\{F\}$ اختصاص داده می‌شود:

$$\begin{aligned} [K] \{a^{m+1}\} &= \{F^m(\{a\})\} \\ K_{ij} &= \frac{1}{Eh^4} (D_{11} + D_m) \\ &\times \int_r \left[\frac{d^4 \phi_i}{dr^4} + \frac{1}{r} \frac{d^3 \phi_i}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \phi_i}{dr^2} \right. \\ &\left. + \frac{1}{r^3} \frac{d \phi_i}{dr} \right] \phi_j \hat{r} d\hat{r} \\ -\hat{P} \int_r \frac{1}{\hat{r}} \frac{d}{d\hat{r}} \left(\hat{r} \left(\frac{d\phi_i}{d\hat{r}} \right) \right) \phi_j \hat{r} d\hat{r} \\ F_j^m &= \hat{V}^i \int_r \frac{\phi_j \hat{r} d\hat{r}}{(1 - [\phi_1, \phi_2, \dots, \{a\}^m])^2} \end{aligned} \quad (26)$$

به منظور استفاده از رابطه فوق، ابتدا برای $\{a\}$ به عنوان حدس اول مقداری در نظر گرفته می‌شود و مطابق با رابطه 26 ، بردار $\{F\}$ تعیین شده و طبق رابطه مذکور، مقدار $\{a\}$ تعیین می‌شود. این روند ادامه پیدا کرده تا بردار $\{a\}$ همگرا شده و بیشینه میزان خیز ورق به یک مقدار مشخص همگرا گردد.

با محاسبه $\{a\}$ ، میزان جابجایی با در نظر گرفتن یک و چند تابع تقریب (تا همگرایی پاسخ) تعیین می‌شود.

در نزدیکی کمانش، شبیه منحنی جابجایی بر حسب مقادیر a بسیار بزرگ می‌گردد^[23] و این انتظار وجود دارد که پس از تغییر ماتریس $[K]$ ، به دو بخش شامل نیروی تکیه‌گاهی و بدون نیروی تکیه‌گاهی، تساوی $\frac{d\hat{P}}{da} = 0$ برقرار باشد. همچنین برای حالت ناپایداری کششی در اثر ولتاژ، تساوی $\frac{d\eta}{da} = \hat{V}^i$ برقرار است. بنابراین، با فرایند مشتق‌گیری از معادلات و حل آنها می‌توان با رکمانش و ولتاژ ناپایداری کششی را مطابق با تغییرات بزرگ جابجایی در محدوده ناپایداری محاسبه نمود.

۳. نتایج

در این بخش با توجه به روابط به دست آمده در بخش 3 ، به بررسی نتایج مستخرج از مدل سازی و حل پرداخته می‌شود.

در جدول 1 ، مشخصات میکرو ورق ذکر گردیده است. بر همین مبنای جابجایی و پایداری مجموعه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل 3 برای درصد تخلخل 10 ، همگرایی بیشینه جابجایی، بر حسب بار گسترشده تکیه‌گاهی در یک ولتاژ بی بعد مشخص، $\hat{V} = 7$ برای تئوری کلاسیک بررسی گردیده است. با افزایش تدریجی برای بیشینه جابجایی افزایش یافته تا این‌که در بار کمانش، شبیه منحنی مذکور به مقدار بزرگی می‌رسد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با در نظر گرفتن پنج تابع تقریب، همگرایی نتایج روش گالرکین حتی تا محدوده ناپایداری رخ می‌دهد.

در شکل 4 ، برای مقادیر بی بعد $-2 = \hat{P} = 7$ و پارامتر بی بعد مقیاس طول $0/02 = \hat{r}$ و درصد تخلخل مورد اشاره، نمودار جابجایی بر حسب موقعیت با استفاده از روش تحلیلی با در نظر گرفتن تقریب‌های مختلف برای تئوری کوبیل تنش اصلاحی ترسیم شده است. در این نمودار و نمودارهای بیشینه جابجایی بر حسب

جدول 1 . مشخصات ورق.

r_a	r_b	h	\hat{r}	E	v
$0/5$	1	$0/01$	$0/02$	150 (Gpa)	$0/33$

با استفاده از اصل کمینه‌سازی انرژی پتانسیل و جایگزینی گشتاورهای کلاسیک و غیرکلاسیک از رابطه 10 ، معادله حرکت استاتیکی و شرایط مرزی به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} (D_{11} + D_m) \left[\frac{d^4 w}{dr^4} + \frac{1}{r} \frac{d^3 w}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 w}{dr^2} \right. \\ \left. + \frac{1}{r^3} \frac{dw}{dr} \right] - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right) \right) \\ - q(r) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

به همراه شرایط مرزی زیر:

$$\begin{aligned} w(r_a) = w(r_b) = 0 \\ \frac{dw}{dr}(r_a) = \frac{dw}{dr}(r_b) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

به طوریکه با رگسترده عرضی با توجه به بار الکترواستاتیکی اعمال شده به ورق توسط رابطه 22 ، تعیین می‌شود:

$$q(r) = -\frac{\varepsilon V_d^i}{2(d-w)^4} \quad (22)$$

در رابطه فوق ε ثابت گذرهای الکتریکی و V_d اختلاف پتانسیل مستقیم اعمالی بین ورق و الکترود زیرین می‌باشد.

چنانچه در رابطه 20 ، ضرایب مربوط به اثرات کوبیل تنش و بار شعاعی اعمالی حذف گردد، همان معادله تغییر شکل استاتیکی ورق کلاسیک در میدان الکترواستاتیک به دست می‌آید:

$$D_{11} \left[\frac{d^4 w}{dr^4} + \frac{1}{r} \frac{d^3 w}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{dw}{dr} \right] - \frac{\varepsilon V_d^i}{2(d-w)^4} = 0 \quad (23)$$

۲.۲. معادلات حاکم بر مسئله

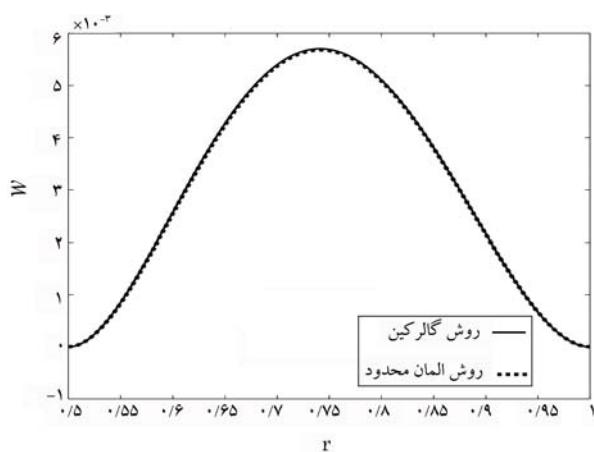
حال با در نظر گرفتن بار محوری تکیه‌گاهی و براساس معادلات به دست آمده، تعییر شکل ورق دایره‌ای در میدان الکترواستاتیک بر مبنای تئوری کوبیل تنش اصلاحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا با استفاده از توابع تقریب، پاسخ ورق به صورت ترکیبی از توابع تقریب نوشه می‌شود:

$$w = \sum_i a_i \phi_i(\hat{r}) \quad (24)$$

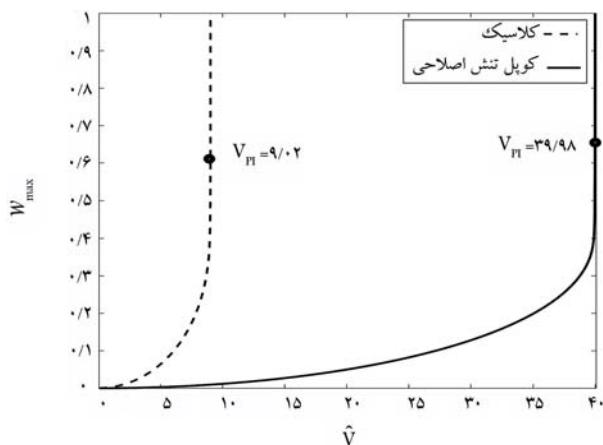
به طوریکه $(r) \phi$ توابع تقریبی هستند که شرایط مرزی را ارضاء می‌نمایند. با توجه به تقارن محوری، از توابع شکل مود تیر دو سردرگیر که شرایط مرزی را ارضاء می‌نمایند، استفاده می‌شود. که a_i ثابت مجھول ضریب هر تابع می‌باشد که با تعیین آنها، میزان جابجایی ورق در ولتاژهای مختلف محاسبه می‌گردد.

با جایگزینی رابطه 24 در معادله دیفرانسیل تعادل رابطه 20 و ضرب تابع وزنی و انگل‌گیری روی ناحیه ورق، مطابق با روش گالرکین، معادله دیفرانسیل تعادل کاهش می‌یابد. رابطه به دست آمده یک معادله غیرخطی است و به فرم ماتریسی مطابق با رابطه 25 بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} [K] \{a\} &= \{F(a_1, a_2, \dots)\} \\ K_{ij} &= \frac{1}{Eh^4} (D_{11} + D_m) \\ &\times \int_r \left[\frac{d^4 \phi_i}{dr^4} + \frac{1}{r} \frac{d^3 \phi_i}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \phi_i}{dr^2} \right. \\ &\left. + \frac{1}{r^3} \frac{d \phi_i}{dr} \right] \phi_j \hat{r} d\hat{r} \\ -\hat{P} \int_r \frac{1}{\hat{r}} \frac{d}{d\hat{r}} \left(\hat{r} \left(\frac{d\phi_i}{d\hat{r}} \right) \right) \phi_j \hat{r} d\hat{r} \\ F_j &= \hat{V}^i \int_r \frac{\phi_j \hat{r} d\hat{r}}{(1 - \sum_i a_i \phi_i)^2} \end{aligned} \quad (25)$$



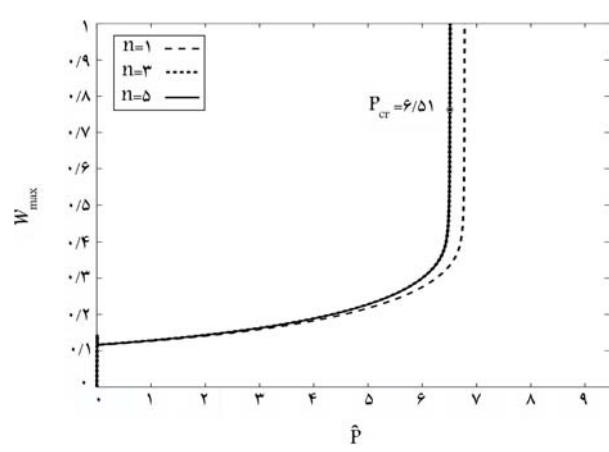
شکل ۶. همگرایی بیشینه جابجایی بر حسب بار شعاعی تکیه‌گاهی برای تئوری کوپل تنش اصلاحی.



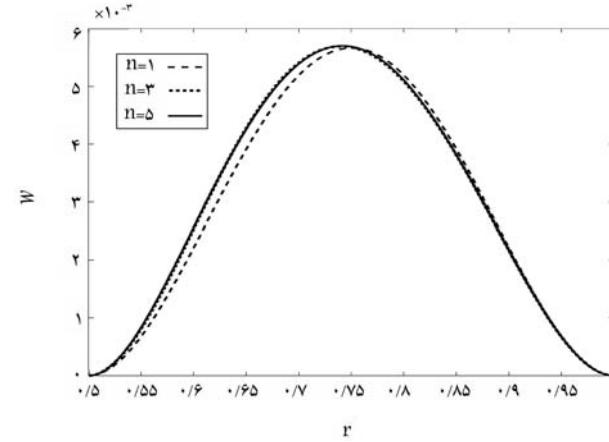
شکل ۷. مقایسه بیشینه جابجایی بر حسب ولتاژ بی بعد محاسبه شده از طریق تئوری های کلاسیک و کوپل تنش اصلاحی.

تماس برقرار می‌شود. به این پدیده ناپایداری کششی و ولتاژ متناظر با آن را ناپایداری کششی می‌گویند.

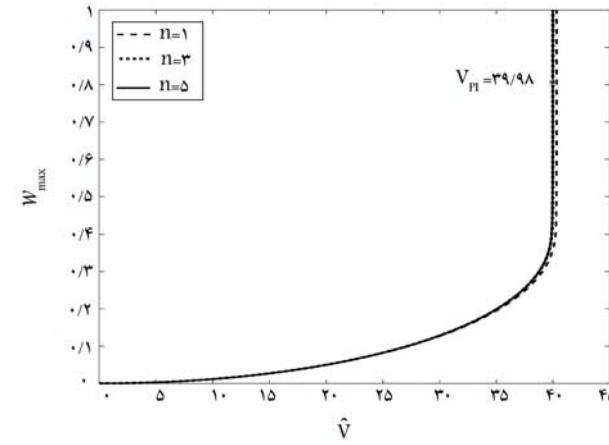
در شکل ۶ نتایج دو روش تحلیلی و المان محدود با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از روش تحلیلی بر مبنای روش گالرکین و با در نظر گرفتن ۱۰ تابع تقریب نتایج به دست آمده و در روش المان محدود از ۵۰ المان برای محاسبات بهره گرفته شده است. در محاسبات صورت گرفته، میزان ولتاژ و بار بی بعد $\hat{V} = 7$ و $\hat{P} = -2$ برابر با $V = 9/0.2 = 45$ در نظر گرفته شده است. نتایج در محدوده ناپایداری محاسبه گردیده است و یک تطابق بسیار خوب در نمودار جابجایی بر حسب موقعیت (حتی در محدوده قله) در دو روش ملاحظه می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن ۱۰ تابع تقریب در روش تحلیلی و ۵۰ المان در روش المان محدود، امکان بیشینه دقیقی از تغییر شکل سازه و بررسی دقیق ناپایداری کششی و کمانش وجود دارد. با توجه به پارامترهای ارائه شده در بخش‌های قبلی به مقایسه بیشینه جابجایی بر حسب ولتاژ در تئوری‌های کلاسیک و کوپل تنش اصلاحی قابلیت پراکنده می‌شود. در نمودار شکل ۷، بیشینه جابجایی بر حسب ولتاژ برای دو تئوری مذکور نشان داده شده است. مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که تئوری کلاسیک در مقایسه با کوپل تنش اصلاحی، جابجایی بزرگتری را پیش‌بینی می‌کند، این اختلاف به دلیل پیش‌بینی



شکل ۳. همگرایی بیشینه جابجایی بر حسب ولتاژ بی بعد برای تئوری کلاسیک.



شکل ۴. همگرایی جابجایی بر حسب بار شعاعی تکیه‌گاهی در تئوری کوپل تنش اصلاحی.

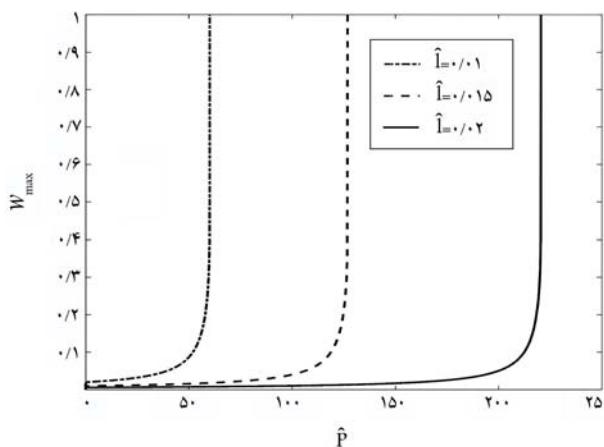


شکل ۵. همگرایی بیشینه جابجایی بر حسب ولتاژ در تئوری کوپل تنش اصلاحی.

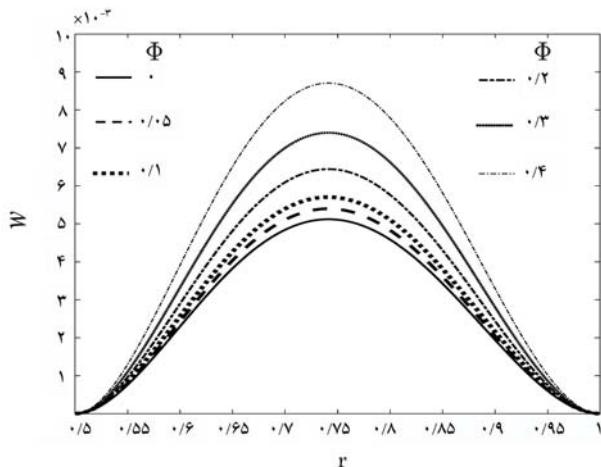
ولتاژ در شکل ۵ نیز ملاحظه می‌شود که در نظر گرفتن پنج تابع تقریب، می‌تواند منجر به همگرایی شود. بدگونه‌ای که در بیشینه جابجایی‌های به دست آمده با استفاده از سه تابع تقریب و پنج تابع تقریب تفاوتی مشاهده نمی‌شود. همچنین، شکل مذکور نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ بیشینه جابجایی و شیب آن افزایش یافته تا در یک ولتاژ مشخص، این شیب بسیار بزرگ شده و جابجایی به سمت عدد یک میل نماید. در این حالت میزان جابجایی و فاصله اولیه بین الکترودها باهم برابر شده و

جدول ۲. بارکمانش و ولتاژ ناپایداری کششی برای مقادیر مختلف پارامتر مقیاس طول بی بعد در تئوری کوبیل تنش اصلاحی.

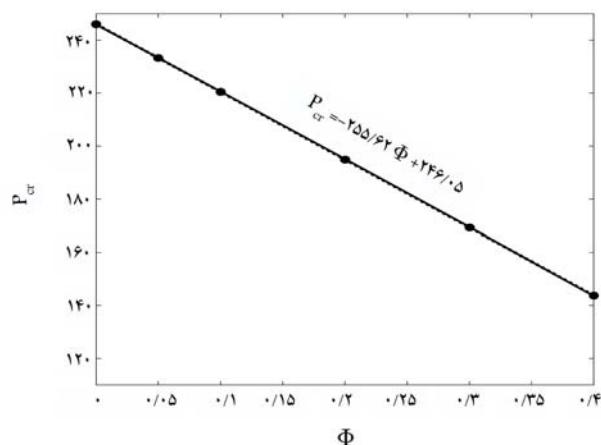
$\hat{\ell} = 0/02$		$\hat{\ell} = 0/015$		$\hat{\ell} = 0/01$	
یک مود همگرا	یک مود	یک مود همگرا	یک مود	یک مود همگرا	یک مود
۲۲۰/۶	۲۲۸/۸	۱۲۷	۱۳۱/۶۲	۶۰/۱	۶۲/۲
۳۹/۹۸	۴۰/۱۳	۳۰/۵۹	۳۰/۶۷۹	۲۱/۵	P_{cr}



شکل ۸. بیشینه جابجایی بر حسب بار شعاعی در تئوری کوبیل تنش اصلاحی برای مقادیر مختلف پارامتر مقیاس طول بی بعد.



شکل ۹. جابجایی بر حسب موقعیت شعاعی در تئوری کوبیل تنش اصلاحی برای مقادیر مختلف پارامتر نسبت تخلخل.



شکل ۱۰. بارکمانش بر حسب میزان نسبت تخلخل.

سختی کوچک‌تر در تئوری کلاسیک می‌باشد که منجر به محاسبه جابجایی بزرگ‌تر در این تئوری گردیده است. در این نمودار، تئوری کوبیل تنش اصلاحی در مقایسه با تئوری کلاسیک، محدوده پایداری و ولتاژ ناپایداری بزرگ‌تری را پیش‌بینی می‌نماید. به‌گونه‌ای که ولتاژ ناپایداری کششی در تئوری کوبیل تنش اصلاحی $\hat{V}_{PI} = 39/97 = 0/02$ می‌شود. بنابراین این مشاهدات در مقیاس میکرو لروم استفاده از تئوری کوبیل تنش اصلاحی به جای تئوری کلاسیک را بر جسته می‌نماید. زیرا تئوری کلاسیک منجر به پیش‌بینی سختی و محدوده پایداری کوچک‌تر و جابجایی بزرگ‌تر از مقادیر واقعی می‌شود.

در ادامه با در نظر گرفتن پارامترهای $\hat{P} = -2$, $\hat{V} = 7$, محاسبات مربوط به تعیین جابجایی و بررسی پایداری برای مقادیر مختلف پارامتر بی بعد مقیاس طول انجام می‌ذیرد. این پارامتر بی بعد با ابعاد شعاعی نسبت عکس داشته و نقش اساسی و انحصاری در تأثیر تئوری کوبیل تنش اصلاحی بر نتایج دارد و اگر این پارامتر در تحلیل نادیده گرفته شود، نتایج حاصل از تئوری کوبیل تنش اصلاحی بر نتایج تئوری کلاسیک منطبق می‌شود. برای سه مقدار پارامتر مقیاس طول بی بعد شده ($\hat{\ell} = 0/02$, $0/015$, $0/01$), در شکل ۸، تأثیر این پارامتر بر تغییر شکل استاتیکی و کماش مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در نتایج مشاهده می‌شود، با افزایش این پارامتر، بیشینه جابجایی (در مقایسه با تئوری کلاسیک) با کاهش قابل ملاحظه‌ای همراه است و محدوده پایداری و بارکمانش بزرگ‌تر می‌گردد. بنابراین با افزایش این پارامتر سازه سخت تر شده و شاهد افت شدید خیز خواهیم بود. در جدول ۲، بارکمانش و ولتاژ ناپایداری کششی در مقادیر مختلف پارامتر مقیاس طول محاسبه و نتایج آن را روش مشتق‌گیری اشاره شده در بخش قبل مقایسه گردیده است. نشان داده شده است که با تغییر پارامتر مقیاس طول به دو برابر، بارکمانش حدود $7/2$ برابر بزرگ‌تر می‌شود. ولتاژ ناپایداری نیز با همین تغییر $86/4$ درصد بزرگ‌تر می‌گردد. همچنین اختلاف کمی بین روش ارائه شده برای محاسبه ولتاژ ناپایداری و بارکمانش محاسبه شده توسط ابزار مشتق‌گیری با نتایج ناپایداری ایجاد شده در نمودارهای بیشینه جابجایی و لتاژ و بیشینه جابجایی پایداری با وجود دارد. این اختلاف در ولتاژ ناپایداری به $5/0$ درصد و برای بارکمانش به $5/3$ درصد می‌رسد. بنابراین روش ارائه شده مشتق‌گیری می‌تواند با دقت بالا برای محاسبه ولتاژ ناپایداری و با دقت مناسبی برای تخمین بارکمانش در تئوری کوبیل تنش اصلاحی مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه تأثیر تخلخل در بارکمانش و ولتاژ ناپایداری بررسی می‌شود. نتایج این بخش برای پارامتر مقیاس طول بی بعد $\hat{\ell} = 0/02$, $\hat{P} = -2$, $\hat{V} = 7$ برای مقادیر مختلف درصد تخلخل استخراج گردیده است. در شکل ۹ تغییرات جابجایی بر حسب موقعیت برای نسبت‌های مختلف تخلخل و در شکل ۱۰ تغییرات بارکمانش بر حسب نسبت تخلخل محاسبه شده است. به دلیل کاهش سختی سازه، با افزایش نسبت تخلخل، میزان جابجایی افزایش می‌یابد و کاهش محدوده پایداری و بارکمانش رخ می‌دهد. مطابق با جدول ۳، تغییرات بارکمانش بر حسب نسبت تخلخل به صورت خطی است و از رابطه $5/662\Phi + 246/05 = \hat{P}_{cr}$ تعیت می‌کند. لازم به ذکر

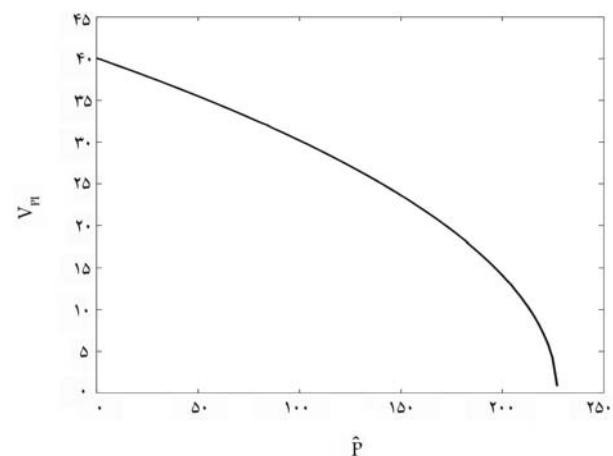
بسیار بزرگ شده و ولتاژ ناپایداری کششی بسیار کوچک می‌شود. این بار یک بار بحرانی است. ملاحظه می‌گردد که در این بار بحرانی، برای ولتاژهای بسیار کوچک نیز ناپایداری رخ می‌دهد که این رویداد همان پدیده کمانش می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، با استفاده از تئوری کوپل تشن اصلاحی، رفتار استاتیکی، ناپایداری و کمانش در میکروورق‌های تحت میدان الکترواستاتیک مورد بررسی قرار گرفته است. در روش گالرکین همگرایی نمودارهای جابجایی و بیشینه آن با در نظر گرفتن پنج تابع تقریب، حتی تا محدوده ناپایداری، رخ می‌دهد و همچنین، یک تطابق بسیار خوب بین دو روش گالرکین و المان محدود مشاهده می‌شود. نتایج همگرا شده (چند تابع تقریب) نسبت به نتایج روش مشتق‌گیری در ولتاژ ناپایداری کششی، مطابقتی با خطای کمتر از یک درصد برای ولتاژ ناپایداری و زیر چهار درصد برای کمانش دارد. مقایسه بین نتایج تئوری‌های کلاسیک و کوپل تشن اصلاحی نشان می‌دهد که تئوری کلاسیک در مقایسه با تئوری کوپل تشن اصلاحی، جابجایی بزرگ‌تری پیش‌بینی می‌کند که این اختلاف بدليل پیش‌بینی سختی کوچک‌تر در تئوری کلاسیک است که منجر به بزرگ‌تر شدن جابجایی، کاهش محدوده ناپایداری و بار کمانش در این تئوری گردیده است. در ادامه، اثر تخلخل بر رفتار ورق مورد بررسی قرار گرفته است ملاحظه می‌گردد که با افزایش تخلخل جابجایی بزرگ‌تر شده و ناحیه پایداری، ولتاژ ناپایداری و بار کمانش کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات ولتاژ ناپایداری و بار کمانش بر حسب نسبت تخلخل به صورت یکنواخت است، تغییرات ولتاژ نسبت تخلخل به صورت خطی می‌باشد که رابطه و تغییرات بار کمانش بر حسب نسبت تخلخل به صورت خطی می‌باشد که رابطه خطی آن نیز به دست آمده است. تغییرات ولتاژ ناپایداری کششی بر حسب بار فشاری تکیه‌گاهی بی بعد نشان می‌دهد که با افزایش بار تکیه‌گاهی، ولتاژ ناپایداری کششی ابتدا به صورت خطی و یکنواخت کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج حاصل، از یک محدوده‌ای به بعد، شبیب این نمودار، افزایش ناگهانی داشته تا در یک بار مشخص، شبیب مذکور بسیار بزرگ شده و ولتاژ ناپایداری کششی، بسیار کوچک می‌شود. این بار مشخص همان بار بحرانی کمانش است.

جدول ۳. بارکمانش و ولتاژ ناپایداری کششی برای مقادیر مختلف پارامتر غیرموضعی

Φ	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲	۰/۴
P_{cr}	۲۲۳/۲۳۵	۲۲۰/۵۷	۱۹۵/۱۲۵	۱۴۲/۵۶
V_{PI}	۴۱/۰۸	۳۹/۹۷۵	۳۷/۶۶	۲۲/۴۵۵



شکل ۱۱. ولتاژ ناپایداری بی بعد بر حسب بار بی بعد.

است که منحنی بارکمانش بر حسب نسبت تخلخل در مقایسه با رابطه ولتاژ ناپایداری نسبت تخلخل، به نمودار خطی نزدیک‌تر است. اما رابطه ولتاژ ناپایداری بر حسب $\hat{V}_{PI} = -24/17\Phi + 42/312$ نسبت تخلخل نیز با تقریب مناسبی از رابطه \hat{V}_{PI} می‌نماید.

با توجه به درون‌یابی انجام شده پیروی می‌نماید. در نمودار شکل ۱۱، ولتاژ ناپایداری کششی بر حسب بار فشاری تکیه‌گاهی بی بعد محاسبه گردیده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش بار تکیه‌گاهی، ولتاژ ناپایداری کششی کاهش می‌یابد. در محدوده ابتدای نمودار مشاهده می‌شود که ارتباط کاهشی بین ولتاژ ناپایداری کششی و بار به صورت خطی است و به صورت یکنواخت با افزایش بار، ولتاژ ناپایداری کاهش پیدا می‌کند. اما از یک محدوده‌ای به بعد شبیب این نمودار افزایش ناگهانی داشته تا در یک بار مشخص این شبیب

منابع (References)

1. Saghir, S. and Younis, M.I., 2018. An investigation of the mechanical behavior of initially curved microplates under electrostatic actuation. *Acta Mechanica*, 229, pp.2909-2922. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2141-3>.
2. Wang, Y.Q., Zhao, H.L., Ye, C. and Zu, J.W., 2018. A porous microbeam model for bending and vibration analysis based on the sinusoidal beam theory and modified strain gradient theory. *International Journal of Applied Mechanics*, 10, pp.1850059. <https://doi.org/10.1142/S175882511850059X>.
3. She, G.L., Yuan, F.G. and Ren, Y.R., 2018. On wave propagation of porous nanotubes. *International Journal of Engineering Science*, 130, pp.62-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.05.002>.
4. Hong, J., Wang, S., Qiu, X. and Zhang, G., 2022. Bending and wave propagation analysis of magneto-electro-elastic functionally graded porous microbeams. *Crystals*, 12, p.732. <https://doi.org/10.3390/crys12050732>.
5. Liu, Z., Yang, C., Gao, W., Wu, D. and Li, G., 2019. Non-linear behaviour stability of functionally graded porous arches with graphene platelets reinforcements. *International Journal of Engineering Science*, 137, pp.37-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.12.003>.
6. Dang, V.H. and Do, Q.C., 2021. Nonlinear vibration and stability of functionally graded porous microbeam un-

- der electrostatic actuation. *Archive of Applied Mechanics*, 91, pp.2301-2329. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01884-7>.
7. Zhang, Y., Liu, B., Du, C. and Zhou, R., 2019. On the behaviors of porous shape memory alloy beam with gradient porosity under pure bending. *Journal of Materials Research*, 34, pp.282-289. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.423>.
 8. Heshmati, M. and Daneshmand, F., 2019. Vibration analysis of non-uniform porous beams with functionally graded porosity distribution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233, pp.1678-1697. <https://doi.org/10.1177/146442071878090>.
 9. Jalaei, M. and Civalek, Ö., 2019. On dynamic instability of magnetically embedded viscoelastic porous FG nanobeam. *International Journal of Engineering Science*, 143, pp.14-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.06.013>.
 10. Xu, X., Karami, B. and Shahsavari, D., 2021. Time-dependent behavior of porous curved nanobeam. *International Journal of Engineering Science*, 160, p.103455. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103455>.
 11. Amir, S., Soleimani-Javid, Z. and Arshid, E., 2019. Size-dependent free vibration of sandwich micro beam with porous core subjected to thermal load based on SSDBT. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 99, p.e201800334. <https://doi.org/10.1002/zamm.201800334>.
 12. Farokhi, H. and Ghayesh, M.H., 2019. Modified couple stress theory in orthogonal curvilinear coordinates. *Acta Mechanica*, 230, pp.851-869. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2331-z>.
 13. Soleimani, I. and Beni, Y.T., 2018. Vibration analysis of nanotubes based on two-node size dependent axisymmetric shell element. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, pp.1345-1358. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.04.009>.
 14. Jiao, P., Alavi, A.H., Borchani, W. and Lajnef, N., 2018. Micro-composite films constrained by irregularly bilateral walls: a size-dependent post-buckling analysis. *Composite Structures*, 195, pp.219-231. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.046>.
 15. Hakamiha, S. and Mojahedi, M., 2017. Nonlinear analysis of microswitches considering nonclassical theory. *International Journal of Applied Mechanics*, 9, p.1750113. <https://doi.org/10.1142/S1758825117501137>.
 16. Moradi, A., Yaghootian, A., Jalalvand, M. and Ghanbarzadeh, A., 2018. Magneto-Thermo mechanical vibration analysis of FG nanoplate embedded on visco Pasternak foundation. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 49, pp. 395-407. <https://doi.org/10.22059/JCAMECH.2018.261764.300>.
 17. Bina, R. and Mojahedi, M., 2017. Static deflection, pull-in instability and oscillatory behavior of the electrostatically actuated microresonator with a distributed proof mass considering non-classical theory. *International Journal of Applied Mechanics*, 9, p.1750023. <https://doi.org/10.1142/S1758825117500235>.
 18. Mahinzare, M., Ranjbarpur, H. and Ghadiri, M., 2018. Free vibration analysis of a rotary smart two directional functionally graded piezoelectric material in axial symmetry circular nanoplate. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 100, pp.188-207. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.07.041>.
 19. Malikan, M. and Eremeyev, V.A., 2023. On time-dependent nonlinear dynamic response of micro-elastic solids. *International Journal of Engineering Science*, 182, p.103793. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2022.103793>.
 20. Al-Furjan, M., Samimi-Sohrforozani, E., Habibi, M., won Jung, D. and Safarpour, H., 2021. Vibrational characteristics of a higher-order laminated composite viscoelastic annular microplate via modified couple stress theory. *Composite Structures*, 257, p.113152. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113152>.
 21. Arshid, E., Arshid, H., Amir, S. and Mousavi, S.B., 2021. Free vibration and buckling analyses of FG porous sandwich curved microbeams in thermal environment under magnetic field based on modified couple stress theory. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21, pp.1-23. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00150-x>.
 22. Zandekarimi, S., Asadi, B. and Rahaeifard, M., 2018. Size dependent thermal buckling and postbuckling of functionally graded circular microplates based on modified couple stress theory. *Journal of Thermal Stresses*, 41, pp.1-16. <https://doi.org/10.1080/01495739.2017.1364612>.
 23. Shahrokhi, M., Jomehzadeh, E. and Rezaeizadeh, M., 2019. Size-dependent green's function for bending of circular micro plates under eccentric load. *Journal of Solid Mechanics*, 11, pp.14-25. <https://doi.org/10.22034/jsm.2019.664212>.
 24. Simsek, M. and Aydin, M., 2017. Size-dependent forced vibration of an imperfect functionally graded (FG) microplate with porosities subjected to a moving load using the modified couple stress theory. *Composite Structures*, 160, pp.408-421. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.034>.
 25. Barati, M.R. and Shahverdi, H., 2017. Dynamic modeling and vibration analysis of double-layered multi-phase porous nanocrystalline silicon nanoplate systems. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 66, pp.256-268. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.07.010>.
 26. Hosseini, M., Mahinzare, M. and Ghadiri, M., 2018. Magnetic field effect on vibration of a rotary smart size-dependent two-dimensional porous functionally graded nanoplate. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29, pp.2885-2901. <https://doi.org/10.1177/1045389X187810>.
 27. Sharifinsab, E. and Mojahedi, M., 2018. Nonlinear vibration of size dependent microresonators with an electrostatically actuated proof mass. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 18, p.1850057.
 28. Mao, Y.H., Shang, Y., Cen, S. and Li, C.F., 2023. An efficient 3-node triangular plate element for static and dynamic analyses of microplates based on modified couple stress theory with micro-inertia. *Engineering with Computers*, 39, pp.3061-3084. <https://doi.org/10.1007/s00366-022-01715-5>.

29. Mosayyebi, M., Ashenai Ghasemi, F. and Aghaee, M., 2022. Modified couple stress theory for wave propagation in viscoelastic sandwich microplates with FG-GPLRC core and piezoelectric face sheets as sensor and actuator. *Waves in Random and Complex Media*, pp.1-44. <https://doi.org/10.1080/17455030.2022.2106387>.
30. Yu, X., Maalla, A. and Moradi, Z., 2022. Electroelastic high-order computational continuum strategy for critical voltage and frequency of piezoelectric NEMS via modified multi-physical couple stress theory. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, p.108373. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108373>.
31. Ke, L.L., Wang, Y.S., Yang, J. and Kitipornchai, S., 2012. Free vibration of size-dependent Mindlin mi-
croplates based on the modified couple stress theory. *Journal of Sound and Vibration*, 331, pp.94-106. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.08.020>.
32. Park, S. and Gao, X.L., 2008. Variational formulation of a modified couple stress theory and its application to a simple shear problem. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, 59, pp.904-917. <https://doi.org/10.1007/s00033-006-6073-8>.
33. Niknam, H. and Aghdam, M., 2015. A semi analytical approach for large amplitude free vibration and buckling of nonlocal FG beams resting on elastic foundation. *Composite Structures*, 119, pp.452-462. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.023>.

مطالعه تجربی اثر نانوسيالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی

فاطمه مرادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مرتضی خیاط* (استادیار)

محمد حسن نوبختی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

مهمنگی مکانیک شریف (نیار ۱۴۰۰)
دوری ۱۰۰ شماره ۱، ص ۷۵-۸۰، پژوهشی

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تجربی مشخصه‌های انتقال حرارت نانوسيالات پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی با چیش سری و موازی می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی سیال پایه روغن حاوی نانوذرات فلزی و غیرفلزی TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی ۰/۵ و ۱/۰ درصد در سه دبی مختلف /۵، ۱/۵ لیتر بر دقيقه و چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده افزایش عدد ناسلت سیال پایه تا ۴۱/۸ درصد در چیش سری و کاهش دمای سطح در چیش سری نسبت به موازی می‌باشد. همچنین، نانوسيالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۱/۰ درصد به ترتیب بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت را تا ۵۶ و ۵۲/۷ درصد در چیش موازی و ۴۲ و ۴۵ درصد در چیش سری نسبت به سیال پایه داشته‌اند. در نهایت، افت فشار مقطع تسمت در چیش سری ۱/۸۲ درصد بیشتر از چیش موازی ثبت گردید.

iamfatemehmoradi@gmail.com
mkhayat@srbiau.ac.ir
m.nobakhti@srbiau.ac.ir

واژگان کلیدی: افت فشار، انتقال حرارت جابه‌جایی، جریان آرام، عدد ناسلت، میکروکانال، نانوسيال، پایه روغن.

۱. مقدمه

پیچیدگی‌های بسیار در طراحی عمدتاً غیرقابل استفاده هستند. از روش‌های غیرفعال می‌توان به اضافه نمودن افزودنی‌ها به سیال پایه و کاهش ابعاد کانال اشاره کرد. در این پژوهش از روش غیرفعال (استفاده توام از مبدل میکروکانالی و افزودن نانوذرات به سیال پایه) استفاده شده است. میکروکانال با افزایش تأثیر رسانش و گرادیان دما در قطعه، نقش به سازی در بهبود عملکرد قطعات گرمایی دارد. از دیگر ویژگی‌های آن می‌توان به فشرده‌سازی و افزایش نسبت سطح به حجم، کارایی بالای گرمایی و وزن کم میکروکانال‌هایی که در زمینه‌ی خنک‌سازی قطعات و ابزارهای گوناگون کاربرد دارند را به اصطلاح چاه گرمایی میکروکانالی^۱ می‌نامند. ایده‌ی استفاده از میکروکانال‌ها اولین بار توسط تاکرمن و پیس مطرح شد.^[۱] آنها از یک میکروکانال مستطیلی به همراه یک زیرلایه‌ی سیلیکونی به ابعاد 1×1 سانتی‌متر مربع استفاده کردند و با استفاده از آب به عنوان سیال خنک‌کننده و میکروکانال طراحی شده توانستند میزان 790 w/cm^2 شار حرارتی را

با پیشرفت فناوری در زمینه‌های مختلف از جمله الکترونیک، ابزار نوری، راکتورهای هسته‌ای، سیستم‌های ماکروویو با فرکانس بالا و میکروپروسسورها، نیاز به خنک کردن موثر این ابزار با نزد گرمایی بالا وجود دارد که به عملت تولید حرارت زیاد هنگام کار توسط این قطعات ایجاد می‌شود. کرم شدن قطعات سبب پایین آمدن توان و بازده دستگاه، خرابی و از کارافتادگی آن می‌گردد. بنا بر این، یکی از مهم‌ترین مسائل در صنعت، دفع این گرما از دستگاه‌ها می‌باشد که به کارکرد مناسب دستگاه در دمای پایین و مطلوب کم می‌کند. برگاز و همکاران روش‌های بهبود انتقال حرارت را به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم کردند.^[۲] روش‌های فعال شامل استفاده از توان خارجی جهت ایجاد اختلاط مکانیکی، ارتعاش سطح و سیال، لرزش، مکش، تزریق و القای میدان الکترواستاتیکی یا مغناطیسی می‌باشد که به عملت هزینه‌های سنگین و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۱۰/۱۴، اصلاحیه ۷/۱۰/۱۴۰۲، پذیرش ۷/۱۰/۱۴۰۲.

استاد به این مقاله:

مرادی، فاطمه، خیاط، مرتضی و نوبختی، محمد حسن. ۱۴۰۳. مطالعه تجربی اثر نانوسيالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی. مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰، صص. ۷۵-۸۰. DOI:10.24200/J40.2023.62014.1676

بلجی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت چاه حرارتی میکروکاتال با نانوپیالات پایه گرافن محلول در آب پرداختند.^[11] آنها اثر غلظت و دبی جرمی را بر این امر تراهایی مانند ضرب انتقال حرارت جابه جایی، افت دما، عدد ناسلت و افت فشار بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوپیالات پایه گرافن دمای چاه حرارتی را تا $10^{\circ}C$ کاهش و ضرب انتقال حرارت و عدد ناسلت را به ترتیب 71 و 60 درصد افزایش می دهد. این نتایج همراه با افزایش افت فشار به میزان 12 درصد نسبت به آزمایشات سیال پایه می باشد. دینگ و همکاران در مطالعه ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوپیال پایه آب TiO_2 در داخل میکروکاتال پرداختند. نتایج نشان داد در غلظت حجمی 1 درصد نانوپیال، عدد ناسلت به میزان 19 الی 41 درصد افزایش یافته است.^[12] همچنین، تنها 8 درصد افت فشار در بی استفاده از نانوپیال مشاهده شده است. لی و همکاران در مطالعه ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوپیال پایه آب آلمینیا با غلظت حجمی $1/10$ الی $1/5$ درصد درون میکروکاتال مارپیچی پرداختند.^[13] محدوده رینولزد مورد بررسی آنها $124-1000$ بود. نتایج نشان داد که عدد ناسلت نانوپیالات $1/12-1/66$ برابر 6 کسر حجمی مختلف تهیه شدند.^[14] میزان هدایت حرارتی سیال پایه با افزودن نانوپیال الماس 25 درصد افزایش داشته است. همچنین، نتایج نشان داد که نانوپیال الماس منجر به افزایش انتقال حرارت تا 30 درصد در بیشترین غلظت حجمی می گردد. سیمیک و همکاران در پژوهشی تجربی به بررسی متغیرهای انتقال حرارت و افت فشار در نانوپیال آب - نانوپیال نقره داخل میکروکاتال مستطیلی پرداختند.^[15] محدوده عدد رینولزد مورد بررسی آنها $20-71$ بود. نتایج این بررسی بر روی سه میکروکاتال با سطوح مقطع مختلف نشان داد که انتقال حرارت نانوپیال در مقایسه با سیال پایه به میزان 56 درصد افزایش یافته است. باورز و همکاران در مطالعه ای تجربی به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوپیال آب - سیلیکا و آب - آلمینیا در داخل میکروکاتال پرداختند.^[16] نتایج بیانگر افزایش انتقال حرارت جابه جایی نانوپیال در مقایسه با سیال پایه حتی در غلظت های حجمی پایین بود. همچنین نتایج آنها نشان داد که افزایش عدد رینولزد در میکروکاتال سبب بهبود انتقال حرارت جابه جایی می گردد. سرافراز و همکاران در مطالعه ای تجربی به بررسی متغیرهای افت فشار، ضرب اصطکاک، انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در جریان نانوپیال آب - نقره با غلظت های حجمی $5/10$ و $1/10$ درصد داخل میکروکاتال مستطیلی پرداختند.^[17] نتایج نشان داد که انتقال حرارت میکروکاتال با استفاده از نانوپیال در مقایسه با سیال پایه افزایش یافته و همینطور افزایش کمی در میزان افت فشار، ضرب اصطکاک و مقاومت گرمایی رخ می دهد. با افزایش دبی جریان در میکروکاتال و افزایش غلظت حجمی نانوپیال، افزایش در میزان انتقال حرارت و افت فشار مشاهده می شود. همچنین، بیشترین میزان انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در بیشترین غلظت حجمی اتفاق

هدف از تحقیق حاضر، بالا بردن ضریب رسانایی حرارتی و افزایش میزان انتقال حرارت سیال پایه روغن هیدرولیک به کمک افزودن نانوذرات در غلظت‌های حجمی مختلف و همچنین بررسی تأثیر ترکیب میکروکانال‌های موجی از جنس مس به صورت سری و موازی بر مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار می‌باشد. مطالعات قبلی بیشتر در زمینه استفاده تنها از میکروکانال‌ها (بدن نانوذرات) با سیال پایه آب و اینان

جدب کنند. گایکواد و نالاوده در مطالعه‌ای تجربی به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت آب درون میکروکاتال های مستقیم و موجی پرداختند.^[۲] تمامی آزمایشات در محدوده رینولدزهای ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ صورت گرفت. نتایج پژوهش آنها نشان داد که میکروکاتال موجی افزایش چشمگیری در میزان انتقال حرارت نسبت به میکروکاتال مستقیم داشته است. آنها همچنین گزارش کردند که افزایش ۵۸ الی ۸۸ درصدی انتقال حرارت درون میکروکاتال موجی، با افزایش ۲۲ تا ۳۵ درصدی میزان افت فشار نیز همراه بوده است. کونگ و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی یک چاه گرمایی مینیفولد میکروکاتالی ساخته شده به وسیله پرینت سه بعدی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که چاه گرمایی مذکور قابلیت دفع شارگرمایی تا 240 w/cm^2 را در 395 gr/min نزد جریان جرمی را دارا می‌باشد و تنها $1/7$ کیلوپاسکال افت فشار ایجاد می‌کند.^[۳] اسپیز یچینو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار ترموهیدرودینامیکی یک میکروکاتال مارپیچی با سطح مقطع مریعی و یک میکروکاتال موجی سینوسی پرداختند و نتایج آزمایشات خود را با یک میکروکاتال موازی مستقیم مقایسه نمودند.^[۴] محدوده رینولدز مورب بررسی آنها $50-150$ و در رژیم جریان آرام بود. نتایج نشان داد عملکرد حرارتی میکروکاتال موجی سینوسی بهتر از مدل مارپیچی و عملکرد مدل مارپیچی بهتر از گونه موازی مستقیم بوده است. زنگ و همکاران طی یک آزمایش با استفاده از هندسه نامتران پرداختند.^[۵] در این مبدل‌های میکروکاتالی زیگزاگی با استفاده از هندسه نامتران پرداختند. هیدرولیکی پژوهش، میکروکاتالی با کاتال های زیگزاگی نامتران به همراه دیواره‌های سرد و گرم بررسی گردید و سیال عامل مورد استفاده آب بود. در مقایسه با بخش سرد، قطر هیدرولیکی کاتال های بخش گرم، بزرگ‌تر طراحی شدند که این امر منجر به افزایش سطح انتقال حرارت گردید و عملکرد حرارتی میکروکاتال با ساختارهای نامتران و متقارن مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که میکروکاتال نامتران از نظر حجم، وزن و اثربخشی سطح نسبت به میکروکاتال متقارن بهتر است و هرچه دمای کاری بالاتر باشد، این برتری افزایش می‌یابد.

بنگ و همکاران طی یک مطالعه تجربی به بررسی عملکرد حرارتی میکروکاتال مارپیچی - زیگزاگی پرداختند. سیال عامل مورد استفاده آنها آب دیوینه بود.^[۶] نتایج نشان داد میکروکاتال مارپیچی - زیگزاگی در مقایسه با میکروکاتال ساده عملکرد حرارتی بهتری دارد. ژو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی عملکرد حرارتی - هیدرولیکی میکروکاتال زیگزاگی با هندسه متقارن پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که به دلیل ساختار صفحه یکسان، انتقال حرارت سمت سرد و گرم مبدل حرارتی میکروکاتالی یکسان است.^[۷] دای و همکاران در یک مطالعه تجربی به بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و انتقال حرارت آب از طریق میکروکاتال موج دار و زیگزاگ شکل بای محدوده رینولدز $50-90$ پرداختند.^[۸] نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش انتقال حرارت قابل توجهی در کاتال های موج دار و زیگزاگ در مقایسه با کاتال مستقیم حاصل می‌شود، اما موجب تشدید افت فشار نیز خواهد شد. در پی مطالعات اولیه بر روی میکروکاتال ها، برخی از محققین در تلاش بوده‌اند تا با استفاده از نانوپیالات انتقال حرارت را بهبود بخشند. از کاربردهای نانوپیالات می‌توان به استفاده از آنها در سرمایش (رادیاتور خودرو، مبدل های صنعتی، راکتورهای هسته‌ای، قطعات الکترونیکی، پره های توربین، گرمایش، فرایند خشک کردن)، انرژی‌های تجدید پذیر (کلکتورهای خورشیدی، آبگرمکن و پنل های خورشیدی)، پرشه‌کی (رساندن دارو به نقطه خاصی از بدن و درمان سرطان) و ... اشاره کرد.^[۹] پس از پیدایش نانوذرات محققین بسیاری به بررسی عملکرد حرارتی آنها درون میکروکاتال ها با درصدهای حجمی متفاوت، پیالات پایه‌ی گوناگون و میکروکاتال هایی با هندسه های متفاوت پرداختند.

اندازه‌گیری شود. در جدول ۳ محاسبات جرم نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

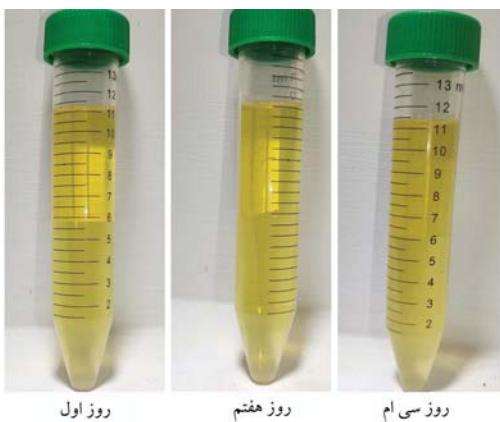
$$m = \frac{\rho_{nf} \times V_{nf} \times (\varphi \times 10^{-2})}{(1 - \varphi \times 10^{-2})} \quad (1)$$

در ادامه، از همزن مغناطیسی به مدت دو ساعت (جهت توزیع ذرات درون سیال پایه)، دستگاه پرباولتراسونیک به مدت دو ساعت (جهت از بین بردن کلخه‌های احتمالی) و در نهایت از حمام اولتراسونیک به مدت دو ساعت (جهت همگن و پایدارسازی محلول) استفاده شده است. پس از ساخت نانوسيال، جهت رؤیت بصری پایداری آن، عکس برداری در زمان ساخت، یک هفته پس از ساخت و ۳۰ روز پس از ساخت انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است، نانوسيالات SiO_2 پس از ۳۰ روز همچنان از پایداری مناسبی برخوردار بوده‌اند اما نانوسيال TiO_2 به مقدار کم شروع به تنشیفی کرده‌اند.

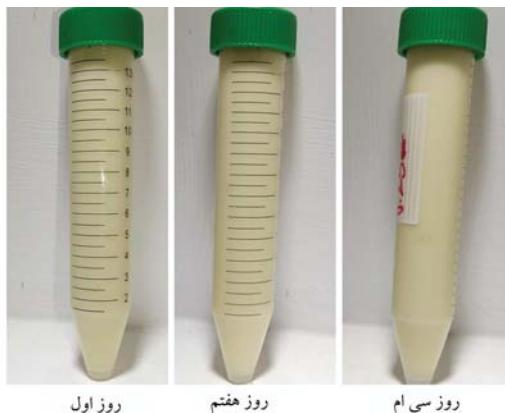
جهت بررسی ابعاد ذرات و همچنین پایداری نانوسيالات، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری، تصاویر TEM از نانوسيالات با غلظت حجمی ۰/۰۵ درصد در مقیاس ۱۰۰۰ نانومتر تهیه شده است. با بررسی این تصاویر در

جدول ۳. جرم نانوذرات مورد استفاده در پژوهش حاضر.

جرم SiO_2 (gr)	جرم TiO_2 (gr)	درصد غلظت حجمی
۰/۰۵	۶/۳۴۸	۲/۹۷۶
۰/۱	۱۲/۷۰۲	۷/۹۵۷



شکل ۱. پایداری نانوسيال SiO_2 در بازه‌های زمانی متفاوت.



شکل ۲. پایداری نانوسيال TiO_2 در بازه‌های زمانی متفاوت.

گلیکول یا استفاده از نانوسيال پایه آب و اتیلن گلیکول درون میکروکانال بوده است و هیچ‌گونه مطالعه‌ای بر روی استفاده ترکیبی از میکروکانال‌های موجی (سری - موازی) به همراه نانوذرات در سیال پایه روغن انجام نپذیرفته است.

۲. شرح انجام آزمایشات و روابط حاکم

۱.۲. بیان مسئله

در پژوهش حاضر به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسيال پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی پرداخته شده است. به‌منظور بررسی مجزای عملکرد هر کدام از میکروکانال‌ها و همچنین شهولت در ترسیم نمودارهای آنها، دو میکروکانال به‌صورت ۱ و ۲ نام‌گذاری گردیده‌اند. سیال پایه روغن هیدرولیک ۶۸ حاوی نانوذرات اکسید فلزی و غیرفلزی TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد درون میکروکانال‌های موجی با آرایش سری و موازی مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایشات در سه دبی مختلف ۰/۰۵، ۱/۰۵ و ۱/۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌اند. آزمایشات در حالت جریان دائم، تراکم نانوذرات و شار حرارتی ثابت انجام گردیدند. نایه مورد مطالعه، تاثیه توسعه‌یافته هیدرودینامیکی و در حال توسعه حرارتی و رژیم جریان نیز از نوع آرام می‌باشد. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات روغن پایه و نانوذرات را ارائه می‌دهند.

۲.۲. نحوه آماده‌سازی نانوسيال

اولین گام مهم در این مطالعه، آماده سازی نانوسيال می‌باشد. تهیه‌ی یک نانوسيال پایدار شده در انتقال حرارت نانوسيالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نانوسيالات تهیه شده به روش نامناسب منجر به انتقال حرارت دوفازی (جامد - مایع)، چسبیدن ذرات به یکدیگر، تشکیل ذرات بزرگتر (به اندازه میکرومتر) و در نهایت رسوب آنها در کانال، مخزن، لوله، پمپ و سایر تجهیزات حرارتی می‌شود. در ابتدای مرحله ساخت نانوسيال می‌باشد جرم نانوذره مورد نیاز (با توجه به غلظت حجمی آن در سیال پایه) توسط رابطه ۱ محاسبه و به کمک ترازوی دیجیتال

جدول ۱. مشخصات روغن H۶۸ در 40°C .

چگالی (kg/m^3)	۸۷۹/۲
ویسکوزیته سینماتیکی (mm^2/s)	۶۸/۸
ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J}/\text{kg.K}$)	۲۰۷۰
ضریب هدایت حرارتی ($\text{w}/\text{m.K}$)	۰/۱۳

جدول ۲. مشخصات نانوذرات SiO_2 و TiO_2 .

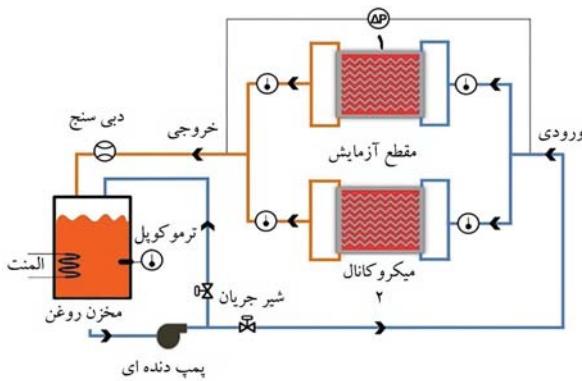
SiO_2	TiO_2	نوع نانوذره
۲۶۵۰	۴۲۲۰	چگالی (kg/m^3)
۱/۵	۸/۴	ضریب هدایت حرارتی ($\text{w}/\text{m.K}$)
۷۳۰	۶۹۲	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J}/\text{kg.K}$)
۲۰	۲۰	قطر متوسط (nm)
سفید	سفید	رنگ
Arminano	Npyekta	برند

پس از انجام آخرین آزمایش به ثبت رسیده است و همان‌طور که قابل مشاهده است، مقدار بسیار کمی از نانوذرات TiO_2 درون میکروکانال‌ها رسوب کرده است.

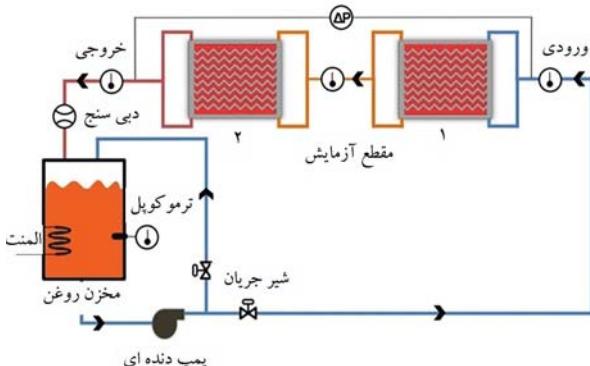
۳.۲. دستگاه آزمایشگاه

دستگاه آزمایش پژوهش حاضر شامل سه بخش اصلی سیستم نگهداری و انتقال سیال (پمپ)، تجهیزات آزمایشگاهی و چاه‌گرمایی می‌باشد. در شکل‌های ۶ و ۷ شماتیک مدار آزمایش به ترتیب در چینش‌های موازی و سری نشان داده شده است. سیستم نگهداری و انتقال سیال شامل مخزن آهنهای به حجم ۵ لیتر و پمپ دندنهای جهت پمپاژ سیال به درون سیکل می‌باشد. برخی از تجهیزات آزمایشگاهی نیز شامل فلومتر مدرج روغنی جهت اندازه‌گیری و تنظیم دبی مورد آزمایش، مانومترهای روغنی جهت اندازه‌گیری افت فشار، شیر ہواگیری اتومات جهت از بین بردن حباب‌های احتمالی موجود در سیکل، سنسورهای PT ۱۰۰ جهت قرائت دمای سطح، سیال ورودی به میکروکانال و خروجی از آن، کنترلر دما جهت نمایش و کنترل دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و کتاکتور به منظور تنظیم و تابت نگه داشتن دما بر روی مقدار مشخص می‌باشد.

چاه‌گرمایی پژوهش حاضر که در شکل ۸ نشان داده شده است، شامل بلوك زیرین، بلوك فوقانی، میکروکانال مسی، المنت گرمایی و سنسورهای PT ۱۰۰ جهت قرائت دمای سطح میکروکانال می‌باشد. بلوك زیرین از جنس استیل ضدزنگ در ابعاد می‌باشد. $75 \times 95 mm^2$ به منظور مشاهده جریان سیال درون کانال‌ها، بلوك فوقانی از جنس پلاکسی گلاس شفاف انتخاب شده است. جهت اطمینان از جریان یافتن سیال درون تمامی کانال‌ها، دو ورودی در طرفین بلوك و جهت تخلیه سیال نیز دو خروجی تعییه شده است. همچنین جهت حصول اطمینان بیشتر از



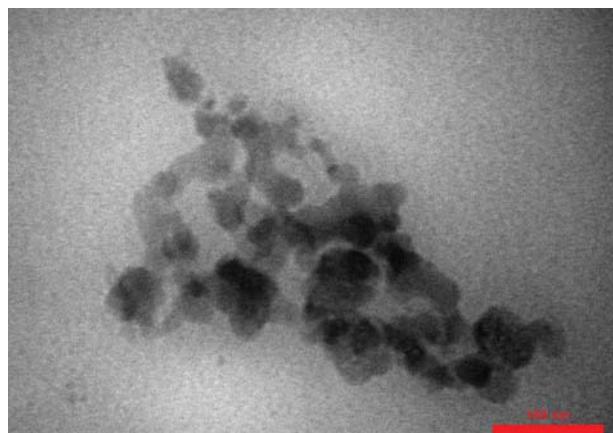
شکل ۶. شماتیک مدار آزمایش در آرایش موازی.



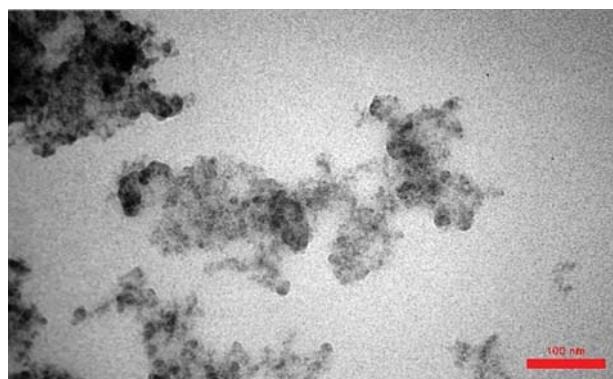
شکل ۷. شماتیک مدار آزمایش در آرایش سری.

شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که ابعاد گزارش شده در تصویر با ابعاد اعلام شده توسط شرکت سازنده از تطابق خوبی برخوردار بوده و نانوپیالات نیز از پایداری مناسبی برخوردار هستند.

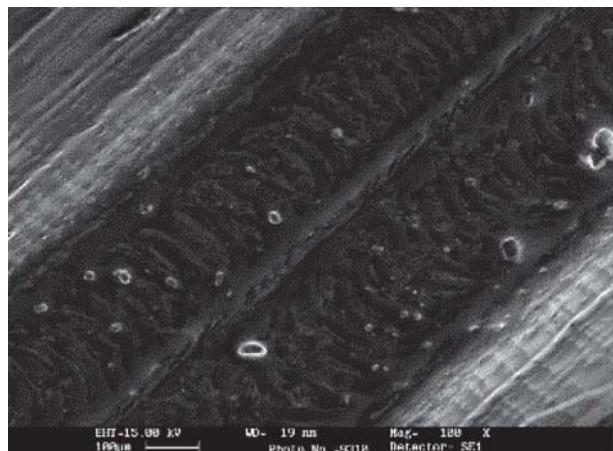
در تحقیق حاضر به منظور بررسی مورفولوژی سطح، تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح میکروکانال پس از انجام آزمایش صورت پذیرفته و به عنوان نمونه تصویر SEM نانوپیال TiO_2 با غلظت حجمی ۱٪ درصد در شکل ۵ نشان داده شده است. این تصویر پس از گذشت ۴۵ روز



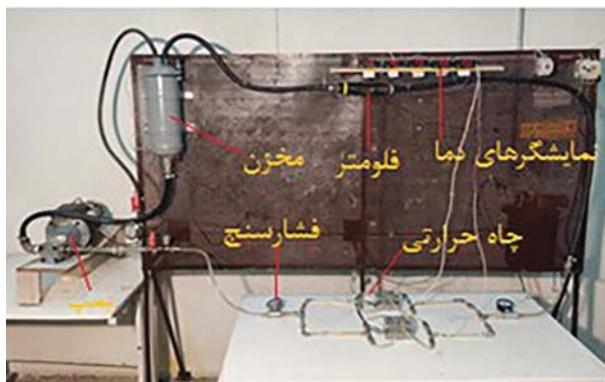
شکل ۳. تصویر TEM نمونه‌ی TiO_2 .



شکل ۴. تصویر SEM نمونه‌ی TiO_2 .



شکل ۵. تصویر SEM کانال به همراه نانوذرات TiO_2 ۱٪ درصد.



شکل ۱۰. تصویر دستگاه آزمایش پژوهش حاضر.

ثابت باقی می‌ماند. همچنین، جهت اطلاع از مقدار تغییرات دمای ایجاد شده توسط المنت میکروکانال‌ها و اطمینان از عملکرد صحیح آنها در حین آزمایش، داده‌ها در حالت المنت خاموش و حالت المنت روشن به ثبت رسیده‌اند. پس از رسیدن شرایط به حالت پایا، مقدار دماهای ورودی، خروجی و دمای سطح میکروکانال‌ها و همچنین فشارهای ورودی و خروجی ثبت می‌گردد. در شکل ۱۰ تصویر دستگاه آزمایش پژوهش حاضر به همراه نام تجهیزات نشان داده شده است.

۵.۲. روابط حاکم

برای محاسبه نرخ انتقال حرارت نانوسيالات از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$\dot{Q}_{nf} = \dot{m}_{nf} C p_{nf} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (2)$$

نرخ گرمای منتقل شده از هیتر گرمایی به میکروکانال از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$\dot{Q} = V \times I \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، دمای بالک و عدد ناسلت نانوسيال به ترتیب از روابط ۴، ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند.

$$h_{nf} = \frac{\dot{Q}_{nf}}{A_{HS}(T_s - T_{nf})} \quad (4)$$

$$T_{nf} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (5)$$

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D_H}{K_{nf}} \quad (6)$$

در رابطه ۴، T_s دمای سطح میکروکانال است که توسط سنسورهای PT۱۰۰۰ تعبیه شده در زیر آن قرائت می‌گردد.

۳. نتایج

۱.۳. عدد ناسلت حالت موازی

تمامی آزمایشات پژوهش حاضر چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌اند اما با توجه به اینکه یافته‌ها در تمامی دماهای ورودی رفتار نسبتاً یکسانی داشته‌اند، بنابرین به عنوان نمونه تمامی نمودارها تنها برای دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد ترسیم گردیده‌اند. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات عدد ناسلت بر



شکل ۸. تصویر چاه گرمایی پژوهش حاضر.



شکل ۹. تصویر میکروکانال مسی پژوهش حاضر.

یکنواخت و مساوی بودن جریان سیال درون تمامی کانال‌ها، فضایی کلکتور شکل درون بلوك در نظر گرفته شده است.

به طور معمول میکروکانال‌ها از جنس‌های متنوعی از قبیل فولاد ضد زنگ، شیشه، پلیمر، سیلیکون و فلزات مختلف مانند آلومینیوم، مس و غیره ساخته می‌شوند. میکروکانال مورد استفاده در این پژوهش از جنس مس با ضخامت ۲ میلی‌متر، قطر هیدرولیکی ۱ میلی‌متر و به ابعاد $28 \times 23 \text{ mm}^2$ می‌باشد که با استفاده از دستگاه فرز پاتوگراف و با دقت $1/10$ میلی‌متر ساخته شده است. تصویر میکروکانال پژوهش حاضر در شکل ۹ نشان داده شده است.

۴.۲. روش انجام آزمایش‌ها

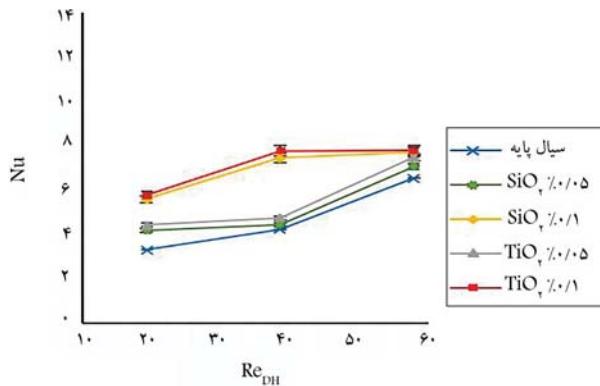
پیش از شروع آزمایش، به منظور جلوگیری از انسداد کانال‌ها توسط ذرات معلق احتمالی، تمامی تجهیزات، اتصالات و همچنین مخزن روغن به خوبی شسته شده و سپس مخزن تا حجم ۳ لیتر از روغن پر می‌شود. پس از راهاندازی پسپ سیال به مدت یک ساعت در سیکل جریان می‌باشد تا حباب‌های احتمالی موجود در سیکل از بین رفته و سیستم به حالت پایا برسد. حالت پایا زمانی برقرار می‌شود که تغییرات قابل توجهی در درجه حرارت و افت فشار بالک پسپ سیال رخ ندهد. پس از رسیدن به حالت پایا، دبی جریان سیال به کمک فلومتر و با استفاده از شیر با پس تنظیم می‌گردد. جهت تنظیم دمای سیال ورودی به کمک کنترلر دما و کنترلر، دمای سیال بر روی مقدار موردنظر تنظیم و ثابت نگهداشته می‌شود. قابل ذکر است که دمای سیال ورودی به کمک هیتر تعبیه شده در کف مخزن روغن افزایش یافته و به مقدار مشخص می‌رسد. مقدار شار حرارتی المنت میکروکانال‌ها به وسیله‌ی یک دیمر تنظیم می‌گردد و تا پایان انجام آزمایشات

۲.۳. عدد ناسلت حالت سری
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در آرایش سری میکروکانال‌ها نشان داده شده است.

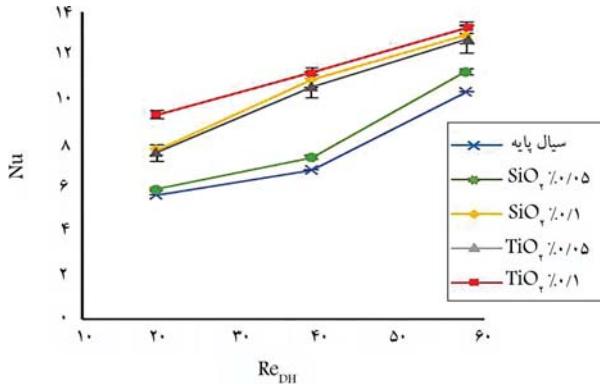
نانوپارچه‌های TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $1/0$ درصد به ترتیب $45/8$ و 42 درصد در بلوک ۱ و $45/5$ و $28/1$ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه افزایش انتقال حرارت داشته‌اند. نانوپارچه‌های TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $0/5$ درصد نیز در آرایش انتقال حرارت موثر بوده‌اند، به طوری که به ترتیب به میزان 45 و $36/9$ درصد در بلوک ۱ و $21/6$ و 17 درصد در بلوک ۲، انتقال حرارت سیال پایه را بهبود بخشیده است. همچنین، تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوپارچه‌ها بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.

۳. مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش سری و موازی
به منظور مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش سری و سری میکروکانال‌ها، مقادیر عدد ناسلت این دو چیدمان برای چهار دمای ورودی 40 ، 45 ، 50 و 55 درجه سانتی‌گراد در عدد رینولدز مشترک $19/29$ حالت سری و موازی و برای دو بلوک ۱ و ۲ در جدول ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت سیال پایه در عدد رینولدز ثابت در بلوک ۱ در حالت سری و موازی تقریباً برابر است، اما در بلوک ۲ حالت سری مقدار بیشتری نسبت به حالت موازی دارد. به عبارت دیگر، در حالت سری، میزان انتقال



شکل ۱۳. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای $40^{\circ}C$ برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

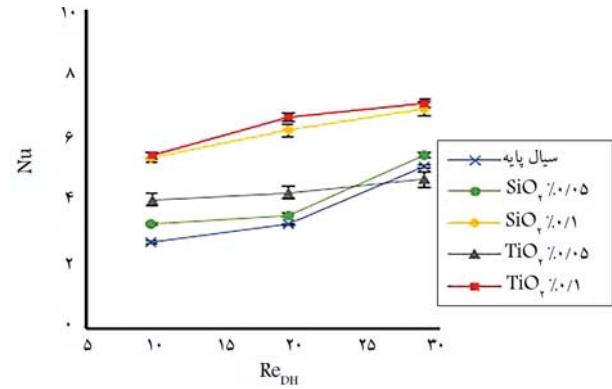


شکل ۱۴. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای $40^{\circ}C$ برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

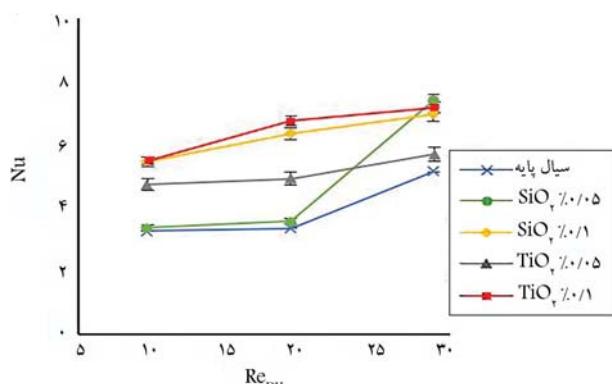
حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و بلوک ۲ نشان داده شده است. این تغییرات برای سیال پایه و نانوپارچه‌های TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی $0/05$ و $1/0$ درصد در سه دبی مختلف $1/5$ ، $1/0$ و $1/5$ لیتر بر دقیقه گزارش شده است.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، با افزایش مقدار عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش یافته است. به عبارتی دیگر، با توجه به رابطه عدد رینولدز ($Re = \frac{\pi D_v}{\nu}$) و همچنین دمای حجمی ($Q = VA$) می‌توان دریافت که با افزایش میزان نجف جریان و همچنین افزایش سرعت جریان، انتقال حرارت بهبود می‌یابد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نانوپارچه‌های TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $1/0$ درصد در تمامی رینولدزها بیشترین میزان انتقال حرارت را به خود اختصاص داده‌اند. با این وجود، نانوپارچه TiO_2 با فاصله در صدر این نمودار قابل مشاهده است که عملت آن بالاتر بودن میزان ضریب هدایت حرارتی این ذرات نسبت به ذرات SiO_2 می‌باشد. به عبارتی دیگر، نانوپارچه TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $0/5$ درصد، به ترتیب 56 و $52/7$ درصد در بلوک ۱ و $55/8$ و $42/4$ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه افزایش انتقال حرارت داشته‌اند. استفاده از نانوپارچه TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $0/05$ درصد نیز در آرایش انتقال حرارت موثر بوده است، به طوری که به ترتیب به میزان $48/6$ و $48/5$ درصد در بلوک ۱ و $32/8$ و $32/3$ درصد در بلوک ۲ انتقال حرارت سیال پایه را بهبود بخشیده است. بدین ترتیب، اثر مثبت افزایش غلظت نانوپارچه‌ها بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱۱. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای $40^{\circ}C$ برای بلوک ۱ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.



شکل ۱۲. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای $40^{\circ}C$ برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.

جدول ۴. عدد ناسلت سیال پایه در آرایش موازی و سری میکروکانال‌ها.

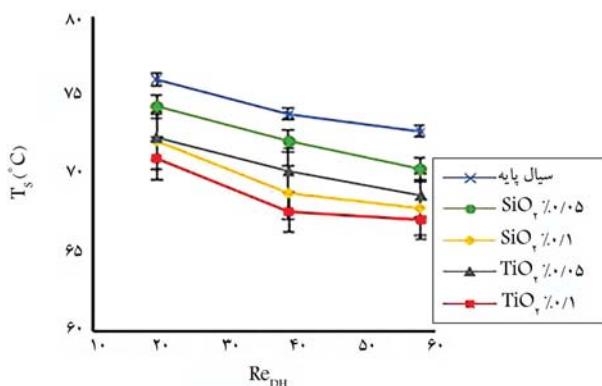
عدد ناسلت سیال پایه					
آرایش سری		آرایش موازی		عدد	دماه ورودی
بلوک	بلوک ۱	بلوک	بلوک ۱	رینولدز	($^{\circ}\text{C}$)
۲	۵/۶۷	۳/۲۹	۳/۲۳	۳/۲۷	۴۰
	۶/۴۰	۳/۵۹	۳/۷۲	۳/۵۷	۴۵
	۶/۶۹	۳/۶۶	۴/۰۸	۳/۶۴	۵۰
	۷/۱۲	۴/۱۱	۵/۵۱	۴/۰۶	۵۵

دماه سطح گشته‌اند. نانوپلیات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۵٪ نیز به میزان ۴/۶ و ۳/۶۶ درصد در بلوک ۱ و ۳/۲ و ۳ درصد در بلوک ۲ در کاهش دما موثر بوده‌اند.

حرارت بلوک ۲ تا ۴۱/۸ درصد بیشتر از حالت موازی می‌باشد که این موضوع بیانگر مناسب‌تر بودن چیزیش سری میکروکانال‌ها نسبت به موازی است.

۵.۳. دماه سطح حالت سری

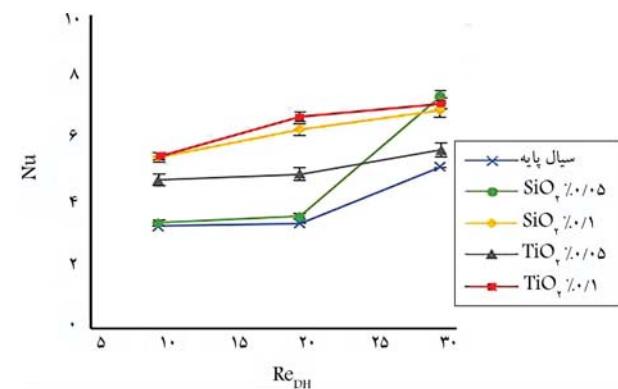
در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تغییرات دماه سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش سری میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و ۲ گزارش شده است. نانوپلیات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۱٪ به ترتیب ۷۴/۸ و ۶/۲ درصد در بلوک ۱ و ۹/۵ و ۸/۵ در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش دما



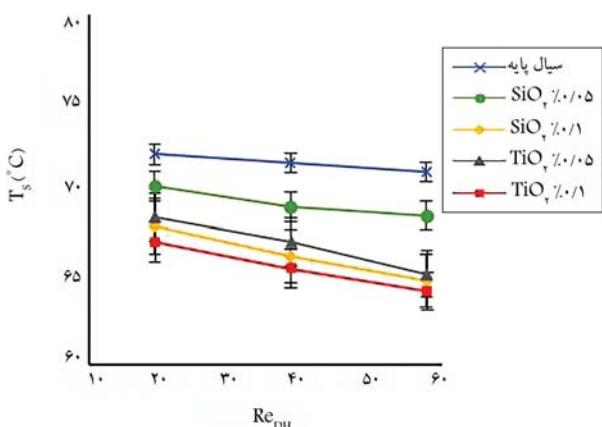
شکل ۱۷. تغییرات دماه سطح بر حسب عدد رینولدز در دماه 40°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات دماه سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و ۲ نشان داده شده است.

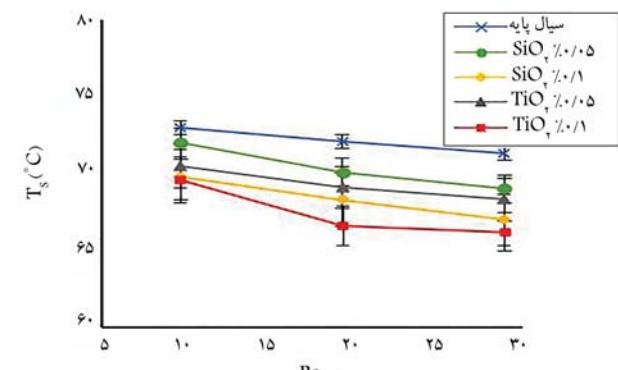
همان‌طور که در این دو نمودار مشاهده می‌شود و مطابق با رابطه $\dot{Q} = \rho Q C_P \Delta T$ می‌توان دریافت که با افزایش دمی جریان، دماه سطح کاهش می‌یابد. نانوپلیات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۱٪ به ترتیب ۹/۸۶ و ۷/۱ درصد در بلوک ۱ و ۹/۷ و ۷/۳ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش



شکل ۱۵. تغییرات دماه سطح بر حسب عدد رینولدز در دماه 40°C برای بلوک ۱ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.



شکل ۱۸. تغییرات دماه سطح بر حسب عدد رینولدز در دماه 40°C برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.



شکل ۱۶. تغییرات دماه سطح بر حسب عدد رینولدز در دماه 40°C برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.

فشار در مسیر جریان نیز افزایش می‌یابد. بر اساس این داده‌ها، افت فشار چنین شری میکروکانال‌ها بین $7/7$ ٪ تا $8/2$ ٪ بیشتر از چنین موازی می‌باشد که این امر منجر به ورود فشار بیش از حد به پمپ و ایجاد خلل در عملکرد صحیح پمپ در تامین هد مورد نیاز می‌گردد و بدین ترتیب انتخاب پمپ مورد نیاز را با هزینه و چالش‌های جدیدی روبرو می‌کند. با افزایش غلظت نانوپلیات افزایش افت فشار به مقدار کم در درصد حجمی بالای نانوپلیات نیز رخ می‌دهد که این پدیده از دیگر ویژگی‌های قابل ذکر نانوپلیات یعنی بهبود انتقال حرارت به همراه مقدار کمی افت فشار می‌باشد.

۸.۳. صحبت‌سنگی داده‌های حرارتی

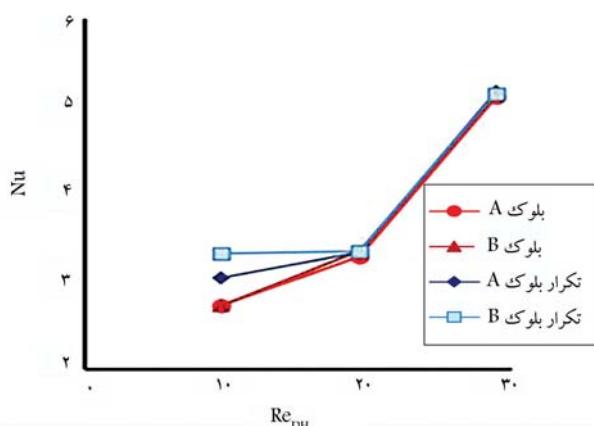
در پژوهش حاضر، پس از اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر المنت توسط مولتی‌متر، نزخ گرمای مستقل شده از المنت به هر کانال به کمک رابطه $Q = V \times I$ محاسبه گردیده است که برابر با $8 J/s$ می‌باشد. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال از رابطه 10 قابل محاسبه است.

$$\Delta T = \frac{Q}{m C_P} \quad (10)$$

در جدول ۷ به منظور صحبت‌سنگی داده‌های انتقال حرارت، مقادیر ΔT قرائت شده در آزمایش با مقادیر ΔT محاسبه شده به کمک رابطه 10 مقایسه گردیده است. این اختلاف دما برای سیال پایه در آرایش سری و برای بلوک 1 ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی و تئوری از مطابقت مناسبی برخوردار هستند. در محاسبات پژوهش حاضر، غیر از کف کانال، دیواره‌های کانال به عمل تقارن و ایجاد گردایان دمای صفر، عایق در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که در واقعیت اندکی تبادل حرارتی دارند و این عمل اختلاف دمای تئوریک و تجربی می‌باشد. از طرفی، با توجه به بطور کامل عایق نبودن بلوک زیرین، بخشی از حرارت تولید شده توسط المنت صرف گرمایش بلوک و بخشی به صورت اتلاف حرارتی به محیط نیز مستقل می‌گردد.

به منظور بررسی دقت داده‌های اندازه‌گیری شده، آزمون تکرار پذیری برای کلیه آزمایش‌های پژوهش حاضر در دو هفته متوالی صورت گرفته است که به عنوان نمونه، نمودار تکرار پذیری آزمایشات سیال پایه برای آرایش موازی میکروکانال‌ها در دمای $40^\circ C$ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حداکثر میزان خطای 11 درصد بوده است که تنها در دبی پایین و شروع انجام آزمایشات رخ داده است.



شکل ۱۹. نمودار تکرار پذیری سیال پایه در دمای $40^\circ C$ در آرایش موازی.

سطح گشته‌اند. نانوپلیات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی $0/5$ نیز به میزان $6/7$ ٪ $4/5$ درصد در بلوک 1 و $7/5$ ٪ $3/6$ درصد در بلوک 2 در کاهش دما موثر بوده‌اند.

با مقایسه میزان گرمای دفع شده از سطح میکروکانال‌های سری و موازی می‌توان نتیجه گرفت که چنین سری میکروکانال‌ها در خنک‌کاری سطح آنها عملکرد مناسب‌تری داشته است که از دلایل این پدیده می‌توان به دو برابر بودن دبی جریان عبوری در چنین سری نسبت به موازی اشاره کرد.

۶.۳. صحبت‌سنگی داده‌های هیدرودینامیکی

به منظور صحبت‌سنگی داده‌های آزمایش، مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده در این پژوهش با داده‌های به دست آمده از معادله دارسی - ویشاخ مطابق رابطه 7 مقایسه و نتایج آن در جدول 5 ارائه شده است.

پارک و پانچ، ضریب اصطکاک جریان آرام توسعه یافته درون میکروکانال را از رابطه 8 محاسبه نموده‌اند که در آن G از رابطه 9 به دست می‌آید.^[18]

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \rho \quad (7)$$

$$fRe = 4,7 + 19,64G \quad (8)$$

$$G = \frac{\alpha^2 + 1}{(\alpha + 1)^2} \quad (9)$$

در رابطه 9 ، α نسبت ارتفاع به عرض میکروکانال می‌باشد. جدول 5 مربوط به آرایش سری میکروکانال‌ها در دمای $40^\circ C$ و در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی این پژوهش از تطابق خوبی با داده‌های تئوری برخوردار هستند.

۷.۳. مقایسه میزان افت فشار سیال در آرایش سری و موازی

در جدول 6 مقایسه میزان افت فشار سیال پایه در آرایش سری و موازی میکروکانال‌ها در دمای $40^\circ C$ آورده شده است.

همان‌طور که از جدول 6 مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان، میزان افت

جدول ۵. مقایسه افت فشار تجربی و تئوری مقطع آزمایش.

ردصد رینولدز	افت فشار تئوری (bar)	افت فشار تجربی (bar)	عدد (%)
$19/29$	$1/15$	$1/34$	$14/1$
$38/58$	$2/42$	$2/76$	$12/3$
$57/87$	$3/20$	$3/66$	$12/5$

جدول ۶. مقایسه افت فشار سیال پایه در آرایش سری و موازی میکروکانال‌ها.

افت فشار سیال پایه (bar)	دبی (lit/min)	سیال پایه سری	سیال پایه موازی
$0/5$	$0/5$	$1/15$	$0/2$
1	1	$2/42$	$0/6$
$1/5$	$1/5$	$3/20$	1

جدول ۷. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال بلوک ۱.

اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال (°C).					
دما ورودی (°C)	دبی ۰ / ۵ تئوری	دبی ۱ / ۵ تئوری	دبی ۱ / ۵ تجربی	دبی ۰ / ۵ تئوری	دبی ۰ / ۵ تجربی
(lit / min)	(lit / min)	(lit / min)	(lit / min)	(lit / min)	(lit / min)
۴۰	۰ / ۳	۰ / ۲	۰ / ۴۵	۰ / ۲	۰ / ۹۱
۴۵	۰ / ۳	۰ / ۲	۰ / ۴۵	۰ / ۲	۰ / ۹۱
۵۰	۰ / ۳	۰ / ۲	۰ / ۴۵	۰ / ۲	۰ / ۹۱
۵۵	۰ / ۳	۰ / ۲	۰ / ۴۵	۰ / ۲	۰ / ۹۱

جدول ۸. عدم قطعیت تجهیزات پژوهش حاضر.

نوع تجهیز	عدم قطعیت
سنسرور PT ۱۰۰	± ۰ / ۱۰ C
مانومتر	± ۰ / ۱ bar
فلومتر	± ۰ / ۲ / ۵
ماشین کاری	± ۰ / ۱ mm
کولیس (قطر کانال)	± ۰ / ۲ mm

جدول ۹. عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده در پژوهش حاضر.

کمیت	مقدار خطا
عدد رینولدز	٪ ۶ / ۷ ±
عدد ناسلت	٪ ۸ / ۲ ±
شار حرارتی	٪ ۴ / ۵ ±

در جدول ۹ عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده در پژوهش حاضر ارائه شده‌اند. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب مقادیر عدد ناسلت در بلوک ۲ آرایش موازی و سری میکروکانال‌ها در تمامی دماهای مورد آزمایش (۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد) و سه دبی ۰ / ۵، ۱ / ۵ لیتر بر دقیقه برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰ / ۰۵ و ۰ / ۰ درصد گزارش شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شده است با روش آزمایشگاهی و ترکیب نانوذرات در سیال پایه روغن و استفاده از آنها در میکروکانال‌های موازی و سری، تأثیر آنها بر مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار بررسی شود. به عبارت دیگر، اثر دمکایزم میکروکانال و نانوسیالات به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰ / ۰۵ و ۰ / ۰ درصد محلول در روغن هیدرولیک ۶۸ به عنوان سیال عامل انتخاب شدند. همچنین، تمامی آزمایش‌ها در سه دبی ۰ / ۵ و ۱ / ۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفتند.

در زیر به نتایج بدست آمده از این پژوهش اشاره شده است:

۱. با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت (عدد ناسلت) افزایش می‌یابد که در تمامی حالات آزمایش‌ها این موضوع برقرار است؛

۲. افزودن نانوذره TiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰ / ۰۵ و ۰ / ۰ درصد به سیال پایه

۹.۳ آنالیز خطای داده‌ها

به طورکلی دو نوع خطای موجب فاصله گرفتن نتایج داده‌های آزمایش با مقادیر واقعی آن می‌شود که نوع اول خطای ناشی از کالیبره نبودن دستگاهها و تجهیزات اندازه‌گیری و نوع دوم ناشی از خطای انسانی است که در صورت طراحی آزمایش‌های بسیار دقیق نیز به طور کامل حذف نمی‌شود. در تحقیق حاضر سعی شده است تا تمامی خطاهای اندازه‌گیری به حداقل برستند تا داده‌های حاصل از آزمایش‌ها قابل استناد باشند. همچنین، به منظور محاسبه عدم قطعیت و خطاهای، از روش موقات بهره گرفته شده است [۱۹].

۹.۴. خطای تجهیزات

خطای تجهیزات پژوهش حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:

- خطای سنسورها در خواندن درجه حرارت که به منظور به حداقل رساندن آن، کالیبراسیون سنسور به همراه نمایشگرها انجام شده است؛
- خطای دبی سنج در تنظیم دبی که به منظور اطمینان از دقت آن، دبی سنج کالیبره گردید؛
- شرایط محیطی آزمایشگاه که به منظور اطمینان از دقت نتایج، آزمایشات در دو هفته‌ای متفاوت جهت بررسی آزمون تکرارپذیری انجام شده است؛
- خطای مانومتر در نمایش دقیق فشار؛
- غایض حجمی نانوسیال (هندگام ساخت نانوسیال، پس از وزن کردن جرم نانوذره، عاملی که ممکن است ایجاد خطای کند، چسیبدن نانوذره به صفحه آزمایشگاهی و یا پخش شدن مقدار کمی از نانوذره در هوا و در نتیجه کم شدن جرم آن اندازه‌گیری شده است).

در جدول ۸ عدم قطعیت تجهیزات مورد استفاده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

۹.۵. خطای محاسبات

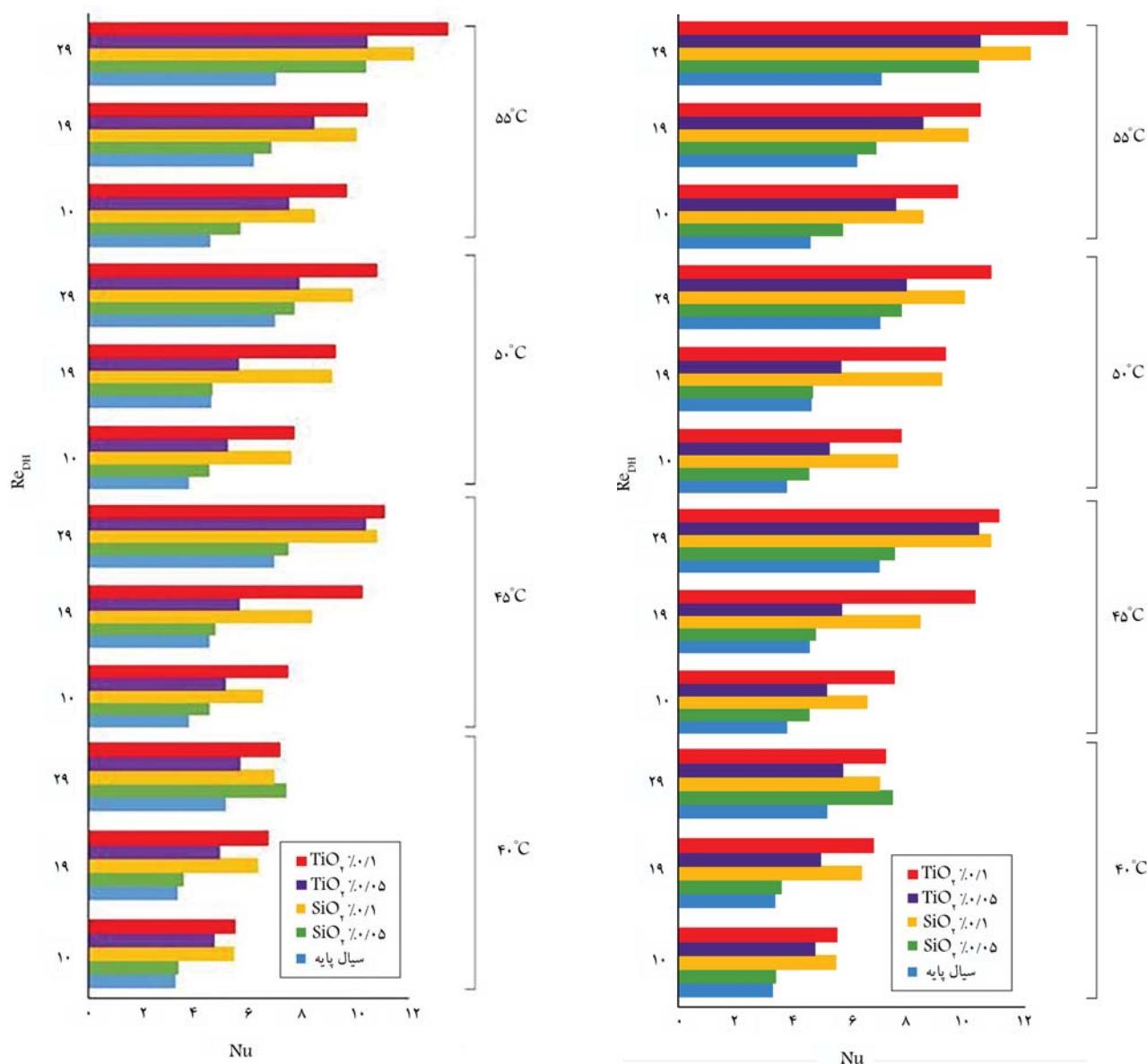
با استفاده از نتایج روش موقات، از روابط ۱۱ الی ۱۴ به ترتیب عدم قطعیت عدد رینولدز، عدد ناسلت، شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محاسبه شده است:

$$U_{Re} = \left[\left(\frac{VD}{\mu} U_p \right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{\rho D}{\mu} U_v \right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{\rho V}{\mu} U_D \right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{\rho VD}{\mu} U_\mu \right)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{h}{k} U_D \right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{D}{K} U_h \right)^{\frac{1}{4}} + \left(-\frac{hD}{k} U_k \right)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$U_{q''} = \left[\left(\dot{m} C_p U_{\Delta T} \right)^{\frac{1}{4}} + \left(\dot{m} \Delta T U_{Cp} \right)^{\frac{1}{4}} + \left(C_p \Delta T U_{\dot{m}} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$U_h = \left[q'' U_{\Delta T} \right]^{\frac{1}{4}} + \left(\Delta T U_{q''} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$



شکل ۲۱. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در تمامی دماهای مورد آزمایش برای بلوك ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

علت این موضوع، بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی TiO_2 نسبت به SiO_2 می‌باشد؛

۷. چینش سری میکروکانال‌ها به دو دلیل نسبت به چینش موازی برتری دارد؛ اول: عدد ناسلت سیال پایه در حالت سری تا $1/8$ درصد بیشتر از حالت موازی می‌باشد. دوم: دمای سطح در حالت سری خنک‌تر از حالت موازی می‌باشد. از دلایل این پدیده می‌توان به کمتر بودن دبی جریان عبوری از میکروکانال‌ها در چینش موازی نسبت به چینش سری اشاره کرد، زیرا در چینش موازی، جریان سیال عبوری میان دو میکروکانال تقسیم شده و نصف چینش سری میکروکانال‌ها می‌باشد؛

۸. چینش سری با وجود عملکرد مناسب‌تر حرارتی نسبت به موازی، به علت افزایش میران افت فشار تا $11/82$ درصد نسبت به موازی، دارای ضعف می‌باشد و باید این موضوع هنگام خرید و انتخاب پمپ مورد استفاده در نظر گرفته شود.

شکل ۲۰. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در تمامی دماهای مورد آزمایش برای بلوك ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا $3/48$ و 56 درصد در آرایش موازی و تا $8/45$ و 45 درصد در آرایش سری شده است؛

۳. افزودن نانوذره SiO_2 با غلظت‌های حجمی $0/05$ و $0/1$ درصد به سیال پایه به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا $3/32$ و $7/52$ درصد در آرایش موازی و تا $9/36$ و $9/42$ درصد در آرایش سری شده است؛

۴. افزایش کسر حجمی نانوذرات درون سیال پایه نقش مثبتی در افزایش انتقال حرارت سیال عامل دارد؛

۵. همراه با افزایش انتقال حرارت در پی افزودن نانوذرات درون سیال پایه، افزایش ناچیزی در افت فشار به میران $9/0$ درصد نیز مشاهده می‌شود؛

۶. نانوذره TiO_2 با غلظت حجمی $1/1$ تا $0/21$ درصد، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانوذره SiO_2 با غلظت حجمی $1/0$ درصد نشان داده است که

فهرست علائم

• علائم انگلیسی

شار حرارتی q :

دماي سطح (${}^{\circ}C$): T_S

دمای ورودی (${}^{\circ}\text{C}$): T_{in}

C) دمای خروجی: T_{out}

نرخ انتقال گرما (J/s): Q

• ضریب انتقال حرارت h

فستار (bar):

ن. حراریت هدایت صریب:

میں) سچے میں: AHS

ساعت متوسط (\bar{V})

ض، س اصطکاک: *f*

60

رینولدز: Re عدد

عدد ناسلت: Nu

میکروسکوپی: TEM

میکروسکو: *SEM*

یادو شت

- ## 1. Microchannel Heat Sink

مراجع (References)

1. Bergles, A., 1998. *Techniques To enhance Heat Transfer. Handbook of Heat Transfer*, 3, pp.11.1-11.76.
 2. Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., 1981. High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, 2, pp.126-129. <https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>.
 3. Gaikwad, S.M. and Nalawade, M., 2021. Investigation of heat transfer and fluid flow characteristics in straight and zigzag microchannels with water as working medium. *International Journal of Ambient Energy*, pp.1-7. <http://dx.doi.org/10.1080/01430750.2021.1924858>.
 4. Kong, D., Jung, E., Kim, Y., Manepalli, V.V., Rah, K.J., Kim, H.S., Hong, Y., Choi, H.G., Agonafer, D. and Lee, H., 2023. An additively manufactured manifold-microchannel heat sink for high-heat flux cooling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 248, 108228. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108228>.
 5. Spizzichino, M., Sinibaldi, G. and Romano, G.P., 2020. Experimental investigation on fluid mechanics of micro-channel heat transfer devices. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 118, p.110141. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110141>.
 6. Zeng, C., Song, Y., Zhou, X., Zhang, F., Chao, M., Jiao, M., Liu, M. and Gu, H., 2022. Optimization of a zigzag microchannel heat exchanger with a porous medium. *International Journal of Thermal Sciences*, 103, p.100831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.009>.
 8. Zhou, X., Zeng, C., Song, Y., Jiao, M., Zhang, F. and Liu, M., 2022. Experimental study on heat transfer and flow resistance performance of a microchannel heat exchanger with zigzag flow channels. *Progress in Nuclear Energy*, 147, p.104190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104190>.
 9. Dai, Z., Fletcher, D.F. and Haynes, B.S., 2015. Impact of tortuous geometry on laminar flow heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, pp.382-398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.019>.
 10. Chamkha, A.J., Molana, M., Rahnama, A. and Ghadami, F., 2018. On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review. *Powder Technology*, 332, pp.287-322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.044>.
 11. Balaji, T., Selvam, C., Lal, D.M. and Harish, S., 2020. Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 117, 104716. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104716>.

- <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104716>.
12. Ding, M., Liu, C. and Rao, Z., 2019. Experimental investigation on heat transfer characteristic of TiO₂-H₂O nanofluid in microchannel for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.019>.
 13. Li, C., Huang, J., Shang, Y. and Huang, H., 2020. Study on the flow and heat dissipation of water-based alumina nanofluids in microchannels. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, p.100746.
 14. Alshayji, A., Asadi, A. and Alarifi, I.M., 2020. On the heat transfer effectiveness and pumping power assessment of a diamond-water nanofluid based on thermophysical properties: An experimental study. *Powder Technology*, 373, pp.397-410. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.068>.
 15. Şimşek, E., Coskun, S., Okutucu-Özyurt, T. and Unalan, H. E., 2018. Heat transfer enhancement by silver nanowire suspensions in microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 123, pp.1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.08.021>.
 16. Bowers, J., Cao, H., Qiao, G., Li, Q., Zhang, G., Mura, E. and Ding, Y., 2018. Flow and heat transfer behaviour of nanofluids in microchannels. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28, pp.225-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.03.005>.
 17. Sarafraz, M., Nikkhah, V., Nakhjavani, M. and Arya, A., 2017. Fouling formation and thermal performance of aqueous carbon nanotube nanofluid in a heat sink with rectangular parallel microchannel. *Applied Thermal Engineering*, 123, pp.29-39. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.056>.
 18. Park, H.S. and Punch, J., 2008. Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, pp.4535-4543. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.009>.
 19. Moffat, R.J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, pp.3-17. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100746>.

توسعه یک حلگر کوپل تعقیب سطح فاصل برای حل عددی میدان جریان‌های دوفازی در اعداد رینولدز پایین در بستر foam – extend

بهنام چراغی (دانشجوی دکتری)

شیدوش وکیلی پور* (دانشیار)

دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه نهران

در این پژوهش، برای اولین بار یک حلگر حجم محدود کوپل، برای حل عددی همزمان معادلات جریان سیال تراکم‌نایزیر دوفازی در اعداد رینولدز پایین و معادله موقعیت سطح فاصل بین دوفاز با اعمال شرط مرزی روی سطح فاصل در بستر فوم - اکستند توسعه می‌یابد. جریان‌های مورد مطالعه برای جابه‌جایی سطح شبکه به صورت آرام، در محدوده اعداد رینولدز کمتر از 10^0 در نظر گرفته می‌شود. این حلگر، مبتنی بر الگوریتم تعقیب سطح فاصل می‌باشد که به‌کمک ترفندهای سلولی با ضخامت صفر، پیاده‌سازی می‌شود. مزیت اصلی این حلگر در این است که تمامی معادلات حاکم بر هر دوفاز به‌وسیله سلول‌های مجاور سطح واصل با یکدیگر و با معادله موقعیت سطح فاصل کوپل شده و به صورت همزمان حل می‌گردند. عملکرد حلگر، با حل جریان درون مجزا و روی پله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و می‌باید امکان ایجاد شده روی سطح فاصل و نحوه تعییر متغیرهای جریان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج به‌دست آمده از حلگر پیشنهادی در مقایسه با سایر حلگرهای جریان ارائه شده در پژوهش‌های پیشین حاکی از تطبیق کامل نتایج حاصل است.

واژگان کلیدی: جریان دوفازی، حلگر کوپل، الگوریتم تعقیب سطح فاصل، فوم - اکستند، روش حجم محدود.

۱. مقدمه

حل جریان‌هایی است که امکان جدا شدن بخشی از سیال، از سطح وجود داشته باشد. عدم محاسبه دقیق موقعیت سطح فاصل می‌تواند از نقاط ضعف این دسته از روش‌ها باشد. روش معروف و شناخته شده VOF^۱ در این دسته بندی قرار می‌گیرد.^[۱, ۲] در مقابل، روش‌های مبتنی بر دنبال کردن سطح یا محاسبه‌ی دقیق سطح فاصل می‌باشند که به روش‌های IT^۳ معروفند.^[۳] این روش‌ها، با در نظر گرفتن سطح فاصل به صورت یک وجه از شبکه محاسباتی، عملاً موقعیت دقیق سطح را در ابتدای شروع حل در اختیار داشته و با ادامه حل و تعییر مقادیر خواص جریان، موقعیت جدید سطح را پیدا می‌کنند. یافتن موقعیت جدید سطح، نیازمند حرکت سطح و مطابقت شبکه داخلی با آن است، به‌همین دلیل، این روش‌ها در کشان الگوریتم‌های جابه‌جایی شبکه معنا می‌یابند. روش‌های مختلفی بر پایه دو رویکرد اشاره شده، توسعه داده شده‌اند، به عنوان مثال می‌توان به روش MAC^[۴]

با توجه به کاربردهای چشمگیر جریان‌های دو یا چند فازی، شبیه‌سازی این جریان‌ها، همواره یکی از زمینه‌های جذاب تحقیقاتی و صنعتی می‌باشد. به عنوان مثال در صنایع دریایی، نفت و گاز، هواپیما، خنک‌کننده‌ها و سیستم‌های توان و تبرید در حال توسعه می‌باشد. رویکردهای مختلفی جهت شبیه‌سازی و مطالعه‌ی جریان‌های دوفازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک دسته‌بندی کلی، می‌توان روش‌های تخمین موقعیت^۱ دو سیال را در مقابل روش‌های مبتنی بر حرکت دقیق یا دنبال کردن^۲ سطح فاصل^۳ میان دو سیال مطح نمود. در رویکرد اول، متغیری برای هر یک از سلول‌های محاسباتی حل می‌شود که نمایانگر نسبت یا درصد اشغال آن سلول توسط هریک از فازها می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین مزیت این روش‌ها، توانایی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰، ۱۴۰۲، ۲/۲، اصلاحیه ۶، ۱۴۰۲، ۲/۶، ۲۷، پذیرش ۱۴۰۲، ۲/۶، ۲۷.

استناد به این مقاله:

چراغی، بهنام و وکیلی پور، شیدوش، ۱۴۰۳. توسعه یک حلگر کوپل تعقیب سطح فاصل برای حل عددی میدان جریان‌های دوفازی در اعداد رینولدز پایین در بستر foam-extend. مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰، صص. ۱۱۰-۹۷، نیار ۱۴۰۰، پذیرش ۱۶۸۱، DOI:10.24200/J40.2023.62339.1681.

روش دنبال کردن ناحیه جلویی^[۶] و غیره اشاره نمود. یکی از اصلی ترین چالش ها در تمامی روش های اشاره شده، حفظ دقت و تیزی^۷ سطح فاصل، در عین رفتار مطلوب پایداری و نیز مناسب همگرایی است.

موزافریجا و پریک^[۷,۸] روش جابه جایی دومرحله ای سطح را با موفقیت برای مسائل سطح آزاد پیاده سازی نمودند. هاچستین و ولیامز^[۹] یک روش ضمیمی دو بعدی برای محاسبه کشش سطحی ارائه داده و این الگوریتم ضمیمی را برای شبیه سازی جریان حباب مورد استفاده قرار دادند. اوشی و همکاران^[۱۰] نیز یک الگوریتم ضمیمی سه بعدی برای حل مسائل سطح آزاد ناپایا با روش MAC توسعه دادند و حلی با پایداری بیشتر حاصل شد. دنرو واچم^[۱۱] یک بستر کوپل را برای روش VOF چه در حالت گستته سازی ضمیمی و چه صریح، پیشنهاد دادند که درنهایت منجر به افزایش اندازه گام زمانی شد. آپسلی و هو^[۱۲] روش تعقیب سطح فاصل را برای توسعه یک حلگر حجم محدود جهت مدل کردن تقابل امواج سطحی به همراه جسم زیرسطحی اعمال کردند. احمدی و همکاران^[۱۳] یک مدل حجم محدود ضمیمی و دو بعدی را برای شبیه سازی جریان های امواج سطحی براساس روش تصویر کردن توسعه داده اند.

اصلی ترین نلاش ها جهت حل کاملا کوپل، به صورت ضمیمی و همزمان جریان های دوفازی را می توان، پژوهش وکیلی بور و همکاران^[۱۴] دانست که به صورت دو بعدی صورت گرفته است. در این پژوهش، جریان سطح سیال و جریان دوفازی به کمک یک الگوریتم جدید با شرط سطح فاصل کوپل شده اند و جابه جایی سطح نیز با استفاده از یک روش جدید اعمال شده است. می توان ادعا نمود که عموم مطالعات گزارش شده در حوزه جریان های دوفازی مبتنی بر رویکرد غیرکوپل یا کوپل جزئی برای حل معادلات جریان سیال و شرط سطح فاصل بوده است. در بستر فوم - اکستند نیز حلگر پیش فرض فوم - اکستند از الگوریتم شناخته شده PIMPLE^{۱۰} به حل هیدرودینامیکی سیال می پردازد. درحالی که معادلات و شرط روى سطح فاصل را به صورت کاملا مجزا و با یک تاخیر زمانی نسبت به جریان سیال دوفازی، حل می نماید. معادلات مربوط به سطح فاصل در این حلگر، به کمک کلاس ها و توابع اختصاصی رویه ها^[۱۱] و سطح ها صورت می گیرد. همچنین الگوریتم جابه جایی سطح فاصل نیز، الگوریتم دو مرحمله ای معروف موزافریجا و پریک^[۷] می باشد. در مطالعه حاضر، اعمال کوپلینگ جریان و شرط مرزی سطح فاصل دو فاز در بستر فوم - اکستند، برای اولین بار انجام شده است. تاکنون تمامی الگوریتم های مورد استفاده در بستر فوم - اکستند از نوع جدا از هم^[۱۲] بوده اند. اعمال کوپلینگ در کنار استفاده از ترفندهای سلول با ضخامت صفر منجر به ایجاد حلگری جدید با قابلیت حل جریان های دوفازی برای اعداد رینولدز کم گردیده است. در این حلگری، معادلات هر دو فاز سیال شامل معادلات مومنتوم و جرم به همراه معادلات و شرط سطح فاصل میان دو فاز که شامل معادلات دینامیکی، برایری سرعت و شرط فشاری هستند، به صورت همزمان و کوپل در یک سیستم ماتریسی سرهم بندی^[۱۳] و حل شده اند. در واقع می توان گفت که در حلگر توسعه داده شده، کوپلینگ میان هر دو فاز به همراه شرط مرزی سطح فاصل مشابه با الگوریتم وکیلی بور و همکاران^[۱۴] صورت گرفته است. روند پیاده سازی مراحل مختلف با بهره بردن از توابع و کلاس های پیش فرض در محیط فوم - اکستند نیز شرح داده شده است. به منظور بررسی صحت عملکرد این حلگر، برای حل جریان های دوفازی از نوع لایه ای نازک،^[۱۴] دو جریان داخل مجرای و جریان روی پله مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در این کار اولین مرحله بعد از کوپلینگ معادلات، یعنی مرحله جابه جایی شبکه مورد توجه بوده که حلگر موفق به رساندن سطح به پاسخ مورد نظر شده است. نمایش نحوه خروج امواج و به خصوص موج اول نیز مورد توجه قرار گرفته است. می توان ادعا نمود که کار حاضر در واقع شروع روند و

۲. مدل سازی ریاضی

۱.۲. معادلات حاکم بر فازها

معادلات حاکم بر دو فاز سیال در دو طرف سطح فاصل عبارت است از معادلات پیوستگی و مومنتوم که به صورت زیر ارائه شده است:^[۱۵]

$$\oint_S \rho \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \, dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \oint_V \rho \mathbf{u} \, dV + \oint_S (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \, dS = - \oint_S \nabla p \, dV + \oint_S \mathbf{n} \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \, dS \quad (2)$$

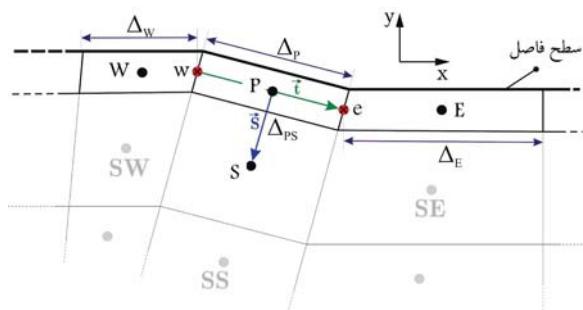
که در آن \mathbf{n} بردار یکه عمود بر سطح^۸ و به سمت بیرون با شکل مولفه ای $(n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k})$ می باشد. \mathbf{u} ، \mathbf{p} ، ρ و μ به ترتیب بردار سرعت، فشار دینامیکی، چگالی و لزجت سیال می باشند که ضرایب لزجت و چگالی به صورت ثابت در نظر گرفته شده اند.

۲.۲. معادلات و شرایط حاکم بر سطح فاصل

شکل ۱ یک سطح فاصل سه بعدی به همراه راستهای عمودی و مماسی بر آن را نشان می دهد.

معادلات حاکم بر سطح فاصل از قوانین توازن نیرو (تعادل دینامیکی)، قانون بقای حجم (فضا) و تبادل جرم و انرژی در سطح فاصل استخراج می شوند. معادلات مذکور نقش شرط مرزی را برای هر یک از میدان های جریان سیال در دو طرف سطح فاصل ایفا می کنند. در واقع معادلات حاکم بر روی سطح فاصل شرط مرزی را برای هر دو بخش جریان سیال کامل می کنند. معادلات حاکم بر سطح فاصل از شرطی استخراج می شوند که عبارتند از:^[۱۶,۱۷]

- شرط تعادل نیرویی در سه راسته ای عمودی، مماسی طولی و مماسی عرضی که معادلات دینامیک سطح فاصل از آنها استخراج می شوند؛
- شرط بقای حجم سیال محصور در زیر سطح فاصل که معادله حرکت سطح فاصل از آن به دست می آید؛



شکل ۲. یک سلول در مجاورت سطح فاصل.

یک رابطه مرسوم برای محاسبه انحنای سطح فاصل به عنوان یک رویه‌ی سه‌بعدی (در حالت عمومی) با معادله $z = f(x, y)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$K = \frac{(1 + f_x^2) f_{xx} - 2 f_x f_y f_{xy} + (1 + f_y^2) f_{yy}}{2(1 + f_x^2 + f_y^2)^{3/2}} \quad (9)$$

به منظور محاسبه مشتقات در جهت‌های محورهای مختصات، با در نظر گرفتن یک سلول مزی و سلول‌های همسایه آن، مطابق با شکل ۲، ابتدا گرادیان در سه جهت مرکز تا مرکز، مماس طولی و مماس عرضی نوشته شده‌اند:

$$\frac{\partial \phi}{\partial s} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial s} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t_1} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t_1} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t_1} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t_1} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t_2} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t_2} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t_2} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t_2} \quad (12)$$

اکنون به کمک روش کرامر، عبارت گرادیان برای سه جهت مختصاتی موردنظر به دست می‌آیند که جزئیات بسط یافته عبارات اصلی معادله دینامیکی گرادیان‌ها در پیوست ارائه شده است. طرح‌های ^{۱۷} عددی مرسوم نیز جهت محاسبه گرادیان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲.۲.۲. معادله حرکت سطح فاصل

معادله حرکت سطح فاصل تضمین‌کننده شرط بقای حجم سیال محصور در سطح فاصل و حرکت ذرات هر دو فاز سیال یا یکدیگر روى آن می‌باشد. در حالتی که، تبادل جرم بین دو فاز در سطح فاصل وجود نداشته باشد، این معادله برابر مولفه‌های سرعت عمودی سیال و سطح فاصل را در نقطه تماس، به شکل زیر بیان می‌کند:

$$(\rho A \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} - \rho \dot{\Omega})_{\text{interface}} = 0 \quad (13)$$

به طوریکه A و $\dot{\Omega}$ ، به ترتیب معرف مساحت سطح فاصل و مقدار حجم جاروب شده توسط هر یک از وجوده تشكیل‌دهنده سطح فاصل می‌باشد. وکیلی بور و همکاران ^[۲۳] یک رهیافت نوین برای محاسبه جابه‌جایی سطح فاصل را مبتنی بر شب و طول سطح کترلی سلول مجاور سطح فاصل، توسعه دادند.

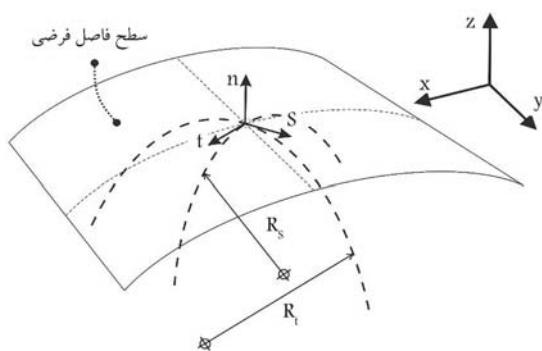
۳.۲.۲. معادله برابری سرعت در سطح فاصل

همان‌طورکه پیشتر اشاره شد، در صورت عدم انتقال جرم از سطح فاصل، شرط بقای جرم به معادله برابری سرعت در سطح فاصل تقلیل یافته که با در نظر گرفتن مولفه‌های سرعت در سه راستای محلی، به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\mathbf{u}_{iL} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}_{iG} \cdot \mathbf{n} \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_{iL} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{u}_{iG} \cdot \mathbf{t} \quad (15)$$

$$\mathbf{u}_{iL} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{u}_{iG} \cdot \mathbf{s} \quad (16)$$



شکل ۱. سطح فاصل سه‌بعدی به همراه راستاهای عمودی و مماسی.

- شرط بقای جرم و انرژی گذرنده از سطح فاصل که در نبود تبادلات جرم و انرژی، این شرط به معادلات برابری سرعت و دمای سیال هر فاز در (دو سوی) سطح فاصل منتج می‌شود:
- شرط پیوند میدان‌های فشار در دو طرف سطح فاصل که به وسیله ارتباط فشار سطح با داخل دامنه جریان سیال برقرار می‌شود.

۱.۲.۲. معادلات دینامیک سطح فاصل

معادلات دینامیک سطح فاصل با اعمال شرط تعادل نیروی میان دو فاز سیال در راستاهای عمودی، مماسی طولی و مماسی عرضی دو طرف سطح فاصل را برقرار کرده و به صورت زیر برای هر سه راسته ارائه می‌شود:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{iL} \cdot \mathbf{n} - \sigma K - p_{iL} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{iG} \cdot \mathbf{n} - p_{iG} \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{iL} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{iG} \cdot \mathbf{t} \quad (4)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{iL} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{iG} \cdot \mathbf{s} \quad (5)$$

در روابط بالا، T ، σ و K به ترتیب تانسور تنش کل، کشش سطحی و انحنای سطح فاصل می‌باشند. همچنین، بردارهای t و s نشان‌دهنده راستاهای مماسی طولی و عرضی بوده و پانویس‌های iL و iG نیز به ترتیب مشخص‌کننده بخش‌های مایع و گاز هستند. تانسور تنش کل (T) را می‌توان در جریان‌های تراکم ناپذیر و براساس فرض استوکس، با استفاده از تانسور نزد کرنش (D) و میدان سرعت سیال به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\mathbf{T} = 2\mu \mathbf{D} = \mu \left[\nabla \otimes \mathbf{u} + (\nabla \otimes \mathbf{u})^T \right] \quad (6)$$

در رابطه ۶، عملگر \otimes نشان‌دهنده ضرب خارجی ^{۱۶} می‌باشد. در دستگاه مختصات کارتزینی، تانسور تنش کل، با استفاده از گرادیان‌های سرعت در قالب تنش‌های برشی و عمودی (τ) و فشار ترمودینامیکی (p) به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} - p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} - p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} - p \end{bmatrix} \quad (7)$$

مولفه‌های تنش‌های برشی، τ ، با روابط زیر به وسیله گرادیان‌های سرعت محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

٤.٢.٣. معادله تنظیم فشار

این معادله برای تنظیم فشار روی سطح فاصل و داخل میدان هر یک از فازها به کار گرفته می شود. به صورت عمومی، شرط مرزی فشار به صورت زیر بیان می شود: [۲]

$$\nabla p_i \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (14)$$

به طوری که در حالت مرتبه اول و دوم، به عنوان شرط گرادیان صفر شناخته می شود، و در بستر فرم - اکستنند معادل با zeroGradient است که در اینجا با توجه به محاسبه گرادیان ها به صورت مجزا، از شرط پیش فرض استفاده نشده و به صورت مرتبه دوم پسرو اعمال شده است.

۳. اعمال معادلات و فرآیند حل د، محیط فوم - اکستند

معادلات حاکم بر میدان جریان و سطح فاصل تماماً با توابع موجود در فوم - اکستنند نسخه ۵ توسعه یافته و گیسته سازی شده اند. شکل ۲ ساختار الگوریتم و بخش های اصلی حلگر توسعه داده شده حاضر را با استفاده از بخش بندی های با رنگ و شماره گذاری مجزا نشان می دهد. در این شکل، بخش های با رنگ سبز و نارنجی مربوط به فرایندهایی است که توابع محاسباتی آنها به صورت عمومی در فوم - اکستنند توسعه داده شده اند. همچنین تعدادی از توابع و ساختارهای موجود در حلگر inter Track Foam در فوم - اکستنند نیز به کار رفته که بخش فرایندهای آنها در شکل ۳ با رنگ آبی نشان داده شده است.

در ادامه، عملکرد بخش‌های شماره‌گذاری شده در شکل ۳ به صورت مختصر آرایه می‌شود.

بخش ۱: کلیه فرایند های مربوط به ایجاد فهرست ها و دیگر مخازن خالی داده های اصلی که در حین اجرا مورد استفاده قرار می گیرند، در این بخش صورت می گیرد.

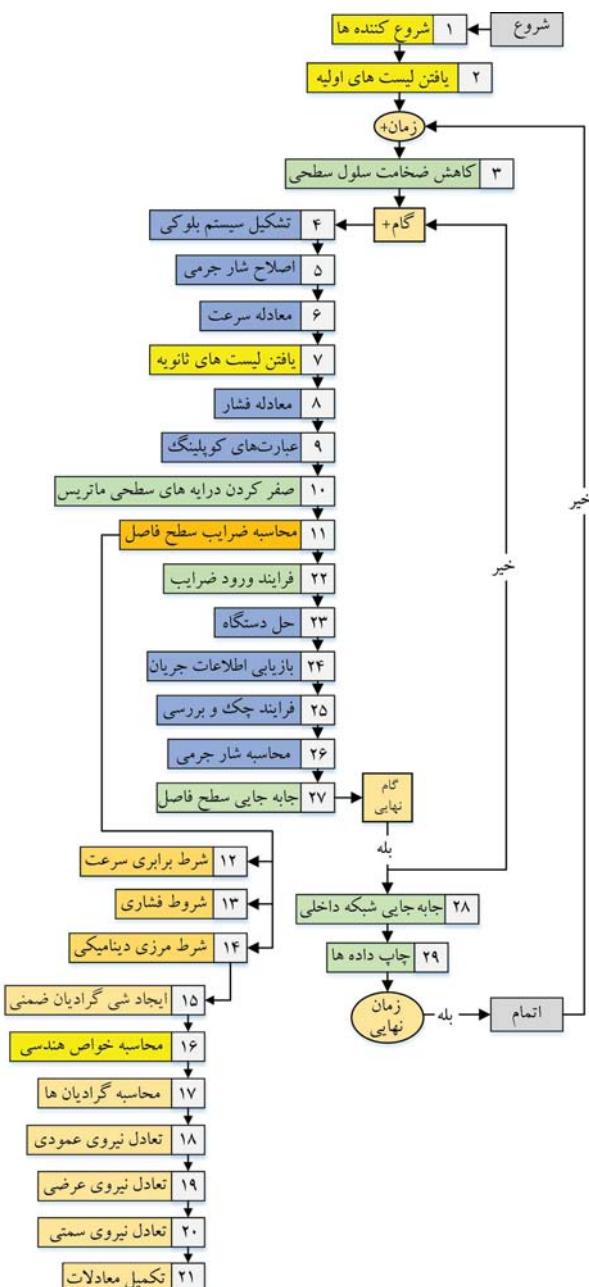
بخش ۲: جستجو و بستن انواع فهرست های مورد نیاز در ادامه بروز نامه در این بخش انجام می گیرد. در واقع، خروجی این بخش شامل مجموعه ای از مخازن داده است که عموماً به صورت آدرس یا آندیس و به منظور استفاده در حلقة های محاسباتی بر روی سلسله ها با هر مشخصه مورد نیاز دیگر، از سطح فاصله ای، گدازه ای، شدائداند.

عملکرد بخش‌های شماره‌گذاری شده در شکل ۳ به صورت جزئی در ادامه توضیح شده‌اند.

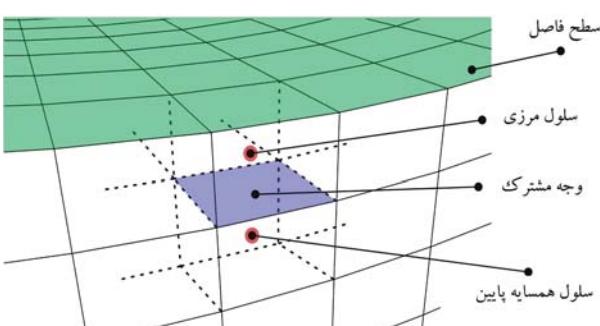
بخش ۳: پیاده‌سازی ترفندهای سلول‌های محاسباتی مرزی با خاصیت نزدیک به صفر movePoints در این بخش انجام شده است. کاهش خاصیت سلول‌ها به مکان تابع fvMesh از کلاس پایه movePoints صورت گرفته است. به نظر اعمال صحیح این ایده، نیاز به اصلاح ضرایب ری و چاو (PWIM) [۱۴، ۱۵] مربوط به سلول‌های سطح فاصل است. این اصلاح منجر به محاسبه صحیح مقادیر روی وجه میان سلول سطح فاصل و نزدیکترین سلول داخل میدان به آن می‌گردد (شکل ۴) که علاوه بر خاصیت سلول ناک شده، مخفف می‌شود.

بخش ۴: این بخش مربوط به ایجاد سیستم بلوکی با در نظر گرفتن تعداد متغیر m باشد.^[۱۹-۲۰] تمامی فرایندهای سرهم‌بندی ضرایب، در دستگاه ماتریسی نهایی به کمک توابعی است که با کلاس‌های این بخش، همچون `fvBlockMatrix` همانهنج شده‌اند:

بخش ۵: به منظور تصحیح مقدار شار جرمی روی سطوح بعد از انجام هر جابجایی در شبکه، این بخش ایجاد شده است. در واقع عمل تصحیح شار جرمی موجود در عبارت جابه جایی معادلات جریان و حرکت شبکه (روش ALE^{۱۹}) را بر عهده دارد. تابع اصلی مورد استفاده در این مرحله، $fvc:meshPhi$ (می باشد که عمل



شکل ۳. نمودار مربوط به بخش‌های اصلی حلگر توسعه داده شده.



شکل ۴. شکل شماتیک سلول سطح فاصلی، سلول داخل دامنه و وجه مشترک.

همانظور که پیشتر اشاره شد، تابع پیش فرض فوم - استنند که در این مرحله مورد استفاده قرار گرفته و وظیفه جایه جایی شبکه را بر عهده دارد، تابع (`movePoints`) از کلاس `fvMesh` باشد:

بعش ۲۸: جابه‌جایی نقاط داخل میدان مناسب با شروط مرزی داده شده و همچنین جابه‌جایی اعمال شده برای سطح سیال، دراین مرحله انجام شده است. الگوریتم جابه‌جایی شبکه داخلی به دو صورت کلی حل معادله لایلز برای تعامی نقاط و یا جابه‌جایی براساس نسبت فاصله اولیه می‌باشد. در مسائل جریان لایه‌ای، جابه‌جایی یکواخت شبکه هزینه محاسباتی کمتری دارد؛

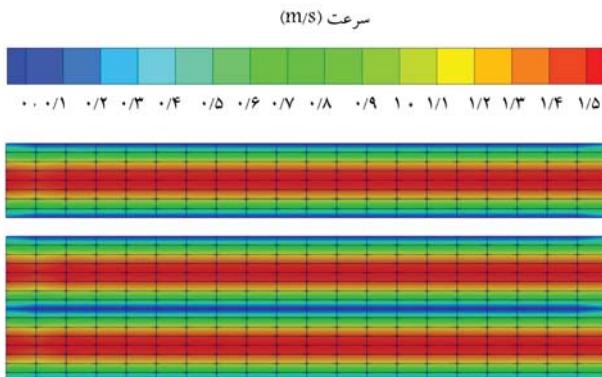
بعش ۲۹: در پایان، عملیات مربوط به چاپ یا استخراج داده‌های مورد نیاز جهت پس پردازش صورت گرفته است.

٤. نتائج

در ابتدا به منظور اعتبارسنجی حلگر جریانی، مقابله‌ای میان نتایج مراجع و کیلی پور و همکاران، سنجی و سیمیلا^[۲۰] و گارتلینگ^[۲۱] با نتایج حاصل از حلگر توسطه داده شده ارائه شده است. همچنین، پیش از بررسی جریان دوفازی در حالت کوبن شده، ابتدا یک ارزیابی در حالتی که هر دوفاز به صورت غیرکوبن هستمند، انجام شده است. به عبارتی، فاز بالا و پایین کاملاً مستقل از یکدیگر بوده‌اند که در این حالت گویا دو جریان تک‌فاز به یکدیگر متصل شده‌اند. این حالت در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

پس از این برسی اولیه در حالت‌های مختلف از شبکه و زوایای مختلف دامنه (که به منظور اختصار ذکر نشده‌اند)، برسی مربوط به فعال شدن شرط مزی روی سطح فاصل و همچنین فعال شدن معادله سینماتیک جهت حرکت سطح مورد ارزیابی قرارگرفته است. توجه شود که در کلیه مراحل، خواص هر دو فاز به صورت کاملاً یکسان مقداردهی شده‌اند، اما می‌توان در مطالعات آینده، خواص متفاوت را در نظر فعال‌سازی عبارت مربوط به کشش سطحی و انحنای سطح مورداً ارزیابی قرار داد.

نمونه های مورد بررسی به منظور ارزیابی جایه جایی سطح و شروط روی سطح شامل چندین نمونه آزمون جریان درون م جدا با سطح فاصل اولیه در وسط و به صورت کاملاً افقی، جریان درون م جدا با سطح فاصل اولیه در وسط و نیمه افقی - نیمه زاویه دار، جریان درون م جدا با سطح فاصل اولیه در بخش پایین یا بالا و در پایان، جریان بر روی پله و سطح فاصل اولیه در وسط بخش ورودی جریان می باشد. اعداد رینولدز



شکل ۵. میدان جریان در حالتی که دوفاز کاملاً مستقل از یکدیگر هستند، بالا (جریان درون مجريات تکفاز و یا بینیان) جریان درون مجرای دوفاز ولی غریبکویل.

محاسبه سرعت نسبی شبکه را بر عهده دارد؛
بخش ۶: ایجاد معادله مومنتوم به همراه محاسبات ماتریس ضرایب و فرایند داخل سازی در دستگاههای لوکوی دراین بخش صورت گرفته است. عبارت فشاری معادله مومنتوم در بخش ۹ وارد شده است:

بخش ۷: این بخش جهت پر کردن و ساختن مخازن داده‌ای موردنیاز که وابسته به ماتریس ضرایب متغیرها (در اینجا سرعت) است ایجاد شده است و الزاماً باید بعد از تکمیل یکی از معادلات سرعت یا فشار قرار گیرد؛

بخش ۸: مشابه با بخش مریبوط به معادله مومنتوم، در اینجا معادله فشار تکمیل شده و در دستگاه بلوکی وارد می‌گردد. عبارت سرعت درون معادله فشار در بخش ۹ وارد شده است:

بخش ۹: عبارت‌های مربوط به کوپلینگ معادلات، یعنی عبارت فشاری معادله مومنتوم و عبارت سرعتی معادله فشار در این بخش، به دستگاه بلوکی اصلی وارد شده است:

بخش ۱۵: صفر کردن درایه های مربوط به سلول های سطح فاصل به منظور آماده سازی جهت اعمال شرط روی سطح نیز در این مرحله انجام می گردد:

بخش ۱۱: این بخش که از مهم ترین بخش های فرایند پیاده سازی می باشد، در واقع وظیفه محاسبه ضرایب مناسب سلول های سطح فاصل را با توجه به معادلات و شرایط حاکم بر سطح پر عهده دارد. مراحل داخلی، این بخش، در ادامه تشرییح می شود:

بخش ۱۲: شرط برابری سرعت در دو طرف سطح فاصله که می‌تواند مشابه با شرط عدم لغزش دیواره ولی به طور همزمان و برای دو طرف سطح دو سیال قلمداد شود، در این بخش اعمال شده است. در حالتی که انتقال جرم از سطح وجود نداشته باشد،

این سرت حاکم حواهد بود:
بخش ۱۳: شروط مربوط به فشار روی سطح فاصل و ارتباط آن با فشار داخل میدان در این بخش پیاده‌سازی شده است. برای هر سمت، شرط مرزی گرادیان صفر به صورت مرتبه اول و مرتبه دوم اعمال شده است؛

بخش ۱۴ تا ۲۱: شرط مرزی دینامیکی و یا همان تعادل نیروی بی دراین بخش پیاده‌سازی شده است. درایندا در بخش ۱۵ یک شی ۲۰ از کلاس ۲۱ گردیدن ایجاد شده است. این عمل، مستلزم تغییر کلاس پیش‌فرض فوم - اکسنت‌جت دریافت

متغیر سرعت است. سپس، در مرحله ۱۶ مشخصات هندسی که بایستی در هر تکرار محاسبه و به روزرسانی شوند، محاسبه و دریافت شده‌اند. در مرحله ۱۷، یاتوجه به الگوریتم مردم‌نظریمان رای، محاسبه گردید: همچنین، فاصله و خواص هندسی

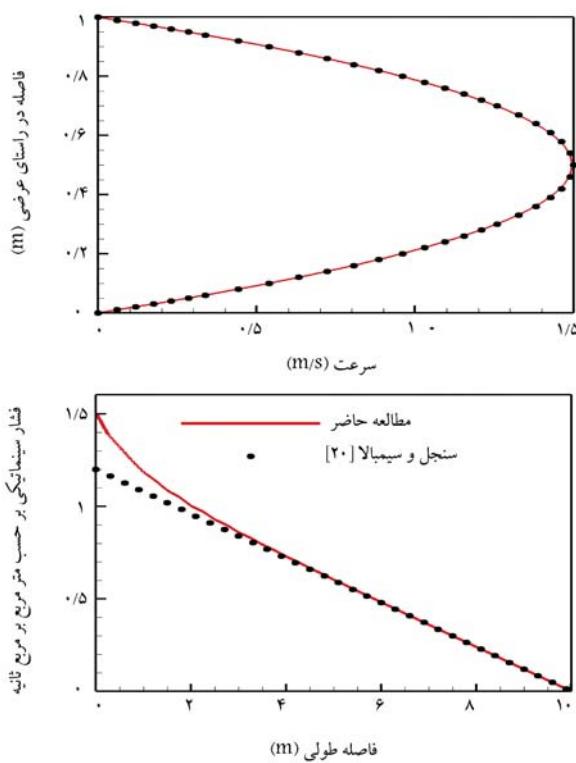
بخش ۱۶، کار محاسبه عبارت گردایان انجام شده است. پس از آن در مرحله ۱۸ تا ۲۰، براساس محاسبات گردایانی انجام شده، در مرحله ۱۷، شرط تعادل نیرویی در هر سه جهت عمودی، مماسی و در راستای عمق دامنه پیاده‌سازی شده است. در پایان، عبارت‌های مریپوت به انحنای سطح و همچنین فشار درون معادله تعادل

نیروی عمودی نیز در بخش ۲۱ نهایی شده‌اند؛
مرحله ۲۲ انتقال و اعمال ضرایب محاسبه شده برای سلول‌های روی سطح فاصل
در، دستگاه بلک، دارای مرحله صورت گرفته است؛

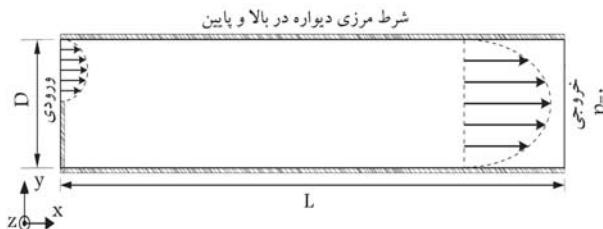
بخش ۲۳ تا ۲۵: در این بخش‌ها، حل دستگاه بلوکی و استخراج با قیمانده‌ها و بررسی شروط و معیارهای همگرایی یا دیگر کنترل‌ها را عهده‌دار انجام می‌شود. همچنین، این بخش‌ها ممکن است تا در اینجا تذکر نشوند.

بازدرازیافت سایج حاصل از حل، به صورت ممکن است سده براي منعیرهای گرفتاری به دستگاه بلوکی (در اینجا سرعت و فشار)، دراین بخش ها صورت گرفته است؛ بخش ۲۶: محاسبه سرعت جرمی به مفظور استفاده در معادله مومسون با توجه به

بخش ۲۷: اعمال الگوریتم جایه جایه، سطح فاصل دراین مرحله صورت گرفته است.



شکل ۸. مقایسه میان پروفیل سرعت توسعه یافته و شبیه فشار با حل تحلیلی.



شکل ۹. دامنه، شرط مرزی و شبکه مورداستفاده جهت حل جریان پله.

لوله مطابق با مرجع [۲۰] به کمک روابط زیر قابل محاسبه است:

$$u(y) = 1.5 u_{in} \left(1 - \frac{y^2}{(D/2)^2} \right) \quad (19)$$

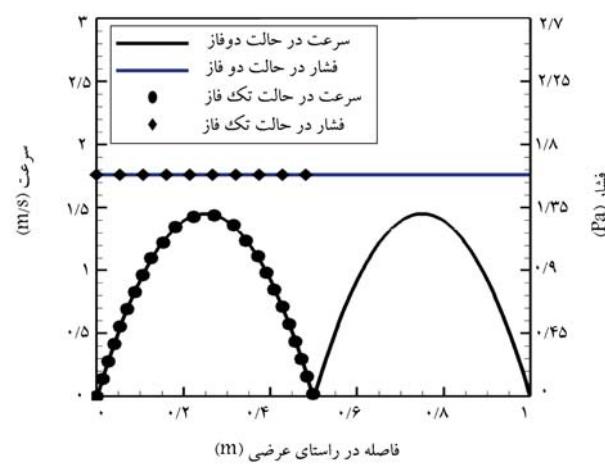
$$\frac{dp}{dx} = - \frac{2\mu}{(D/2)^2} u_{in} \quad (20)$$

همانطورکه مشاهده می شود، رابطه ارائه شده یک سهمی با حداکثر مقدار $1/5$ برابر سرعت ورودی است. مقایسه نتایج حاصل از حلگر توسعه داده شده با رابطه بالا نشان از تطابق کامل میان نتایج می دهد.

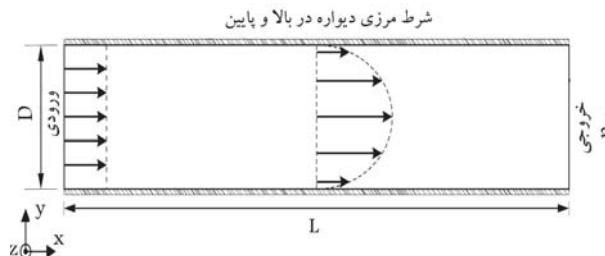
همانطورکه در شکل ۸ مشاهده می شود، مطابقت مناسبی میان شبیه نمودار فشار در ناحیه توسعه یافته با نتایج حاصل از حل وجود دارد. همچنین پروفیل سرعت توسعه یافته کاملاً مطابق با حل تحلیلی می باشد.

همچنین، جریان در عبور از پله در عدد رینولدز 800 نیز با کارهای وکیلی پور و همکاران [۲۱] و گارتلینگ [۲۲] مورد مقایسه قرار گرفته است. طول دامنه 30 و عرض آن 1 است. سرعت در ورودی به صورت سهمی و با مقدار حداکثر $1/5$ اعمال و هندسه و همچنین شرط مرزی مورد استفاده به صورت شکل ۹ ارائه شده است.

همچنین، شبکه مکانی مطابق با مرجع [۲۳] به اندازه 180 سلول در راستای طولی



شکل ۶. سرعت و فشار در فاصله طولی 4625 .



شکل ۷. دامنه، شرط مرزی و شبکه مورداستفاده جهت حل جریان درون مجراء.

بررسی شده برای جریان مجراء 100 و برای جریان پله 10 می باشد. همچنین طول دامنه 10 مورد استفاده قرار گرفته است و مقیاس طولی معیار جهت محاسبه عدد رینولدز نیز عرض دامنه درنظر گرفته شده است. در ابتدای نیز به منظور بررسی اندازه کلی دامنه حل و کیفیت شبکه، دامنه هایی با نسبت طول به عرض 5 ، 10 و 20 و یکی از دامنه هایی با نسبت طول به عرض 10 مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار سطح فاصل با توجه به فیزیک جریان و موقعیت اولیه سطح در نتایج پیش رو مورد توجه و ارزیابی قرار گرفته است. در بررسی های صورت گرفته، میزان اختلاف نسبی به صورت رابطه زیر ارائه شده است.

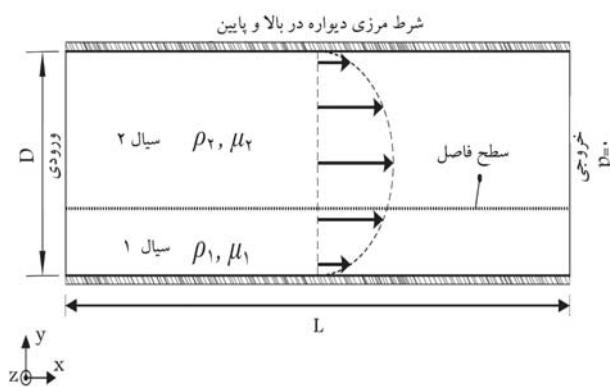
$$RD(\phi) = \left| \frac{\phi_k - \phi_{k-1}}{\phi_{k-1}} \right| \times 100 \quad (18)$$

در این رابطه، ϕ و k به ترتیب مقدار کمیت مورد مطالعه و اندیس تکرار می باشند.

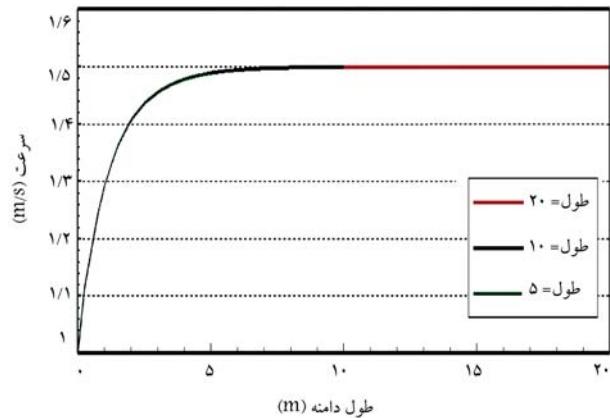
۱.۴. اعتبارسنجی حل جریان

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل جریان و بررسی دقیق حلگر، توابع مربوط به جابه جایی شبکه را غیرفعال نموده و حل جریان درون مجراء برای اعداد رینولدز 10 و 100 با روابط ارائه شده تحلیلی در مرجع [۲۰] مورد مقایسه قرار گرفته است. جریان درون مجراء یکی از پایه ای ترین جریان هاست که می تواند جهت ارزیابی عملکرد حلگرهای جریان های دوفازی مورد استفاده قرار گیرد. این جریان به کمک هندسه مجراء با یک ورودی و یک خروجی به همراه دیواره های جانبی قابل دریافت می باشد. هندسه و شرط مرزی مورد استفاده در شکل ۷ نمایش داده شده است.

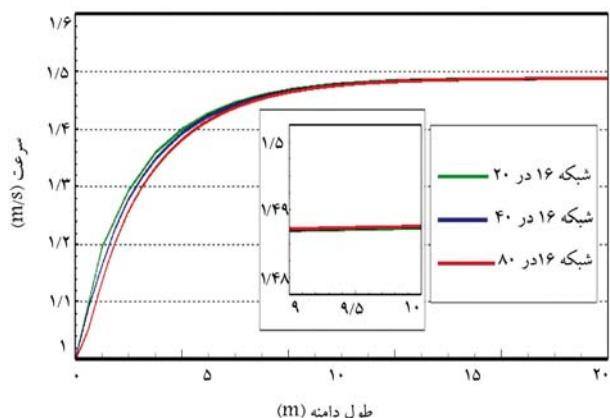
پروفیل سرعت و شبیه فشار در راستای طولی برای جریان توسعه یافته درون



شکل ۱۱. دامنه، شرط مزی و شبکه مورد استفاده جهت حل جریان درون مجرای ریکر جریان دوفازی.



شكل ۱۲. نتایج حل جریان درون مجرای سه دامنه با طول مختلف.

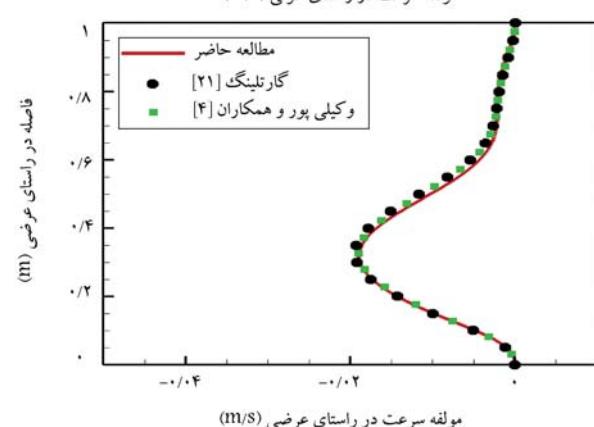
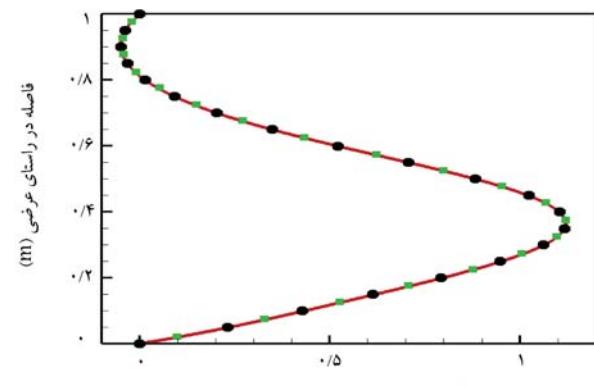


شکل ۱۳. نتایج حل جریان درون مگرا برای سه کیفیت مختلف شبکه در راستای طولی.

پیه عرض ۵، ۱۰ و ۲۰ در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

همان طورکه مشاهده می شود، افزایش طول بیش از ۵، صرفا در مقدار نهایی سرعت خود را نشان داده و تأثیر چندانی بر روی جریان و رفتار جزئی آن نداشته است. همچنین، نتیجه حل جریان برای شبکه ها با تعداد سلول ۲۰، ۴۰ و ۸۰ در راستای طولی و ۱۶، ۳۲ و ۶۴ برای راستای عرضی نیز در شکل های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

مشاهده می‌شود که تعداد شبکه در راستای عرضی اثر چشمگیرتری در دقت



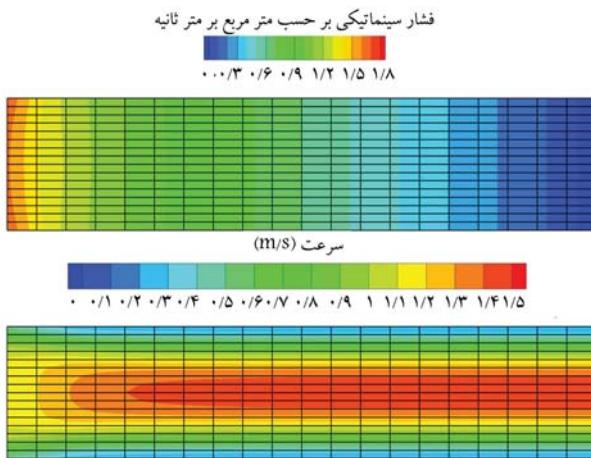
شکل ۱۰. مقایسه میان پروفیل سرعت در راستای طولی و عرضی در مقطع طولی به فاصله ۷ متر از ورودی.

و ۸۰ سلول در راستای عرضی انتخاب شده است. شکل ۱۰ مقایسه میان نتایج پروفیل های سرعت در مقطع به فاصله ۷ متر از ورودی را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود، مطابقت خوبی میان نتایج محاسبه شده با نتایج ارائه شده در مراجع [۲۱-۲۴] دیده می شود. در ادامه، با فعال سازی توابع مربوط به جایه جایی سطح فاصل، عملکرد این توابع و رفتار سطح برای مسائل جریان درون مجرأ و جریان پله، با رویکرد جریان های دوفازی بررسی می گردد.

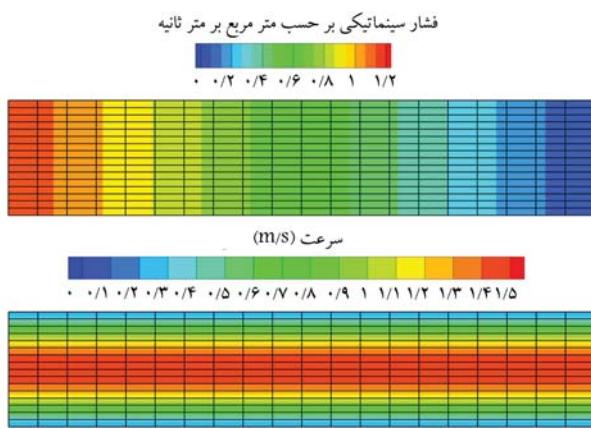
۲۰۴. جریان درون مجرما

هندسه و شروط مزی مورداستفاده جهت حل جریان درون مجرأ، مطابق با شکل ۱۱ ارائه شده است.

در این بخش، تحلیل جریان درون ماجرا با رویکرد جریان دوگانی صورت می‌گیرد. در این مرحله، تواع مربوط به جایه‌جایی سطح فاصل، فعل شده‌اند. شبکه مکانی مورداستفاده در میگرا، ۱۶ در ۲۰ به ترتیب در راستای عرض و طول دامنه می‌باشد. شرط مرزی سرعت در ورودی ماجرا به دو صورت سرعت ثابت با بزرگی ۱ و همچنین پروفایل سهموی سرعت با حداقل مقدار ۱/۵ اعمال شده است. در خروجی نیز شرط مرزی سرعت به صورت گرادیان صفر و همچنین، شرط مرزی فشار در ورود و خروج به ترتیب گرادیان صفر و مقدار ثابت صفر اعمال گردیده است. شرط مرزی دیواره‌های بالا و پایین نیز شرط عدم لغزش می‌باشند. در رابطه با شرط مرزی سطح فاصل نیز در بخش معادلات حاکم، جزئیات آن ارائه شده است. در ابتدا، جهت بررسی اندازه مناسب نسبت طول به عرض و همین‌طور کیفیت شبکه، نتایج مربوط به حل جریان با ورودی کاملاً توسعه یافته برای سه نسبت طول



شکل ۱۶. سرعت و فشار برای جریان درون مبدأ در حالت های سطح فاصل افقی و ورودی با سرعت یکنواخت برای عدد رینولدز ۱۰۰.

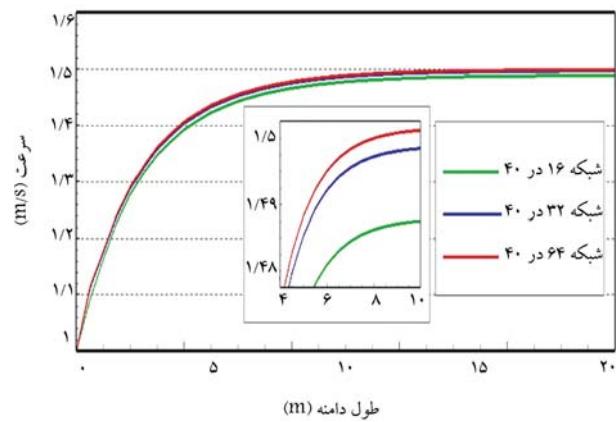


شکل ۱۷. سرعت و فشار برای جریان درون مبدأ در حالت های سطح فاصل افقی و ورودی با سرعت سهموی برای عدد رینولدز ۱۰۰.

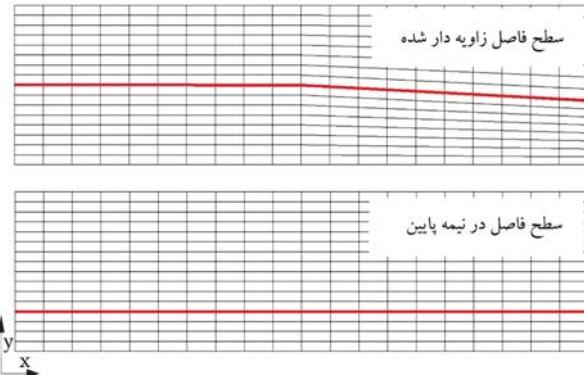
و صرفا جریان تا حل نهایی خود پیش رفته است. البته در اعداد رینولدز بالا امکان ایجاد امواج موقتی کوچک و سپس میراثی آنها وجود دارد. نتیجه چنین حلی برای عدد رینولدز ۱۰۰ در شکل های ۱۶ و ۱۷ نمایش داده است.

همچنین از نظر دقت محاسبات، حل نهایی جریان در جریان دوفازی با سطح فاصل در میانه میدان در مقایسه با جریان کاملا تک فازی مطابقت خوبی دارد. نمودارهای سرعت و فشار برای مقطع، در فاصله ۹ و در حالت ورودی توسعه یافته، در شکل های ۱۸ و ۱۹ نمایش داده شده است. در شرایطی که، سطح فاصل در نیمه پایین یا بالای دامنه قرار گرفته باشد و سرعت ورودی به صورت یکنواخت تنظیم شود، جریان دو طرف سطح فاصل، سطح فاصل را به نحوی جابجا می کند که دبی ورودی هر طرف به سمت دبی حالت توسعه یافته یا همان سرعت سهموی در خروجی برسد. در واقع تمایل حرکت سطح فاصل به سمتی است که در دو طرف سطح، یک پروفایل سهموی برای سرعت ایجاد شود و میزان دبی به دام افتاده در هر طرف، دقیقاً برابر با میزان ابتدایی دبی هر طرف باشد.

۱.۲.۴. سطح فاصل در وسط و زاویه داده شده
اولین و شاید ساده ترین حالت حرکت سطح، حرکت سطح زاویده شده باشد. چراکه شرایط در ورودی را می توان هم به صورت جریان توسعه یافته و هم به صورت



شکل ۱۴. نتایج حل جریان درون مبدأ برای سه کیفیت مختلف شبکه در راستای عرضی.

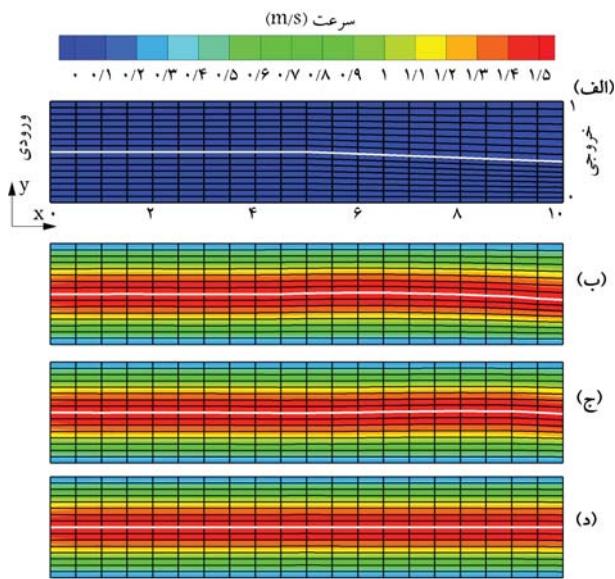


شکل ۱۵. دو آرایش سطح فاصل جهت بررسی عملکرد معادلات و جایه جایی سطح.

پاسخ نهایی دارد. هرچند که رفتار جریان، تفاوت چندانی ندارد و در واقع همه حل ها خود را به پاسخ صحیح نزدیک نموده اند. بنابراین چه در بحث طول دامنه و چه کیفیت شبکه، سعی بر استفاده از ساده ترین هندسه جهت بررسی بهتر و واضح تر رفتار حرکت سطح فاصل شده است. بدین منظور، برای جریان درون مبدأ، شبکه با نسبت طول به عرض ۱۰ و تعداد سلول ۱۶ در ۲۰ برای دو راستای عرضی و طولی انتخاب شده است.

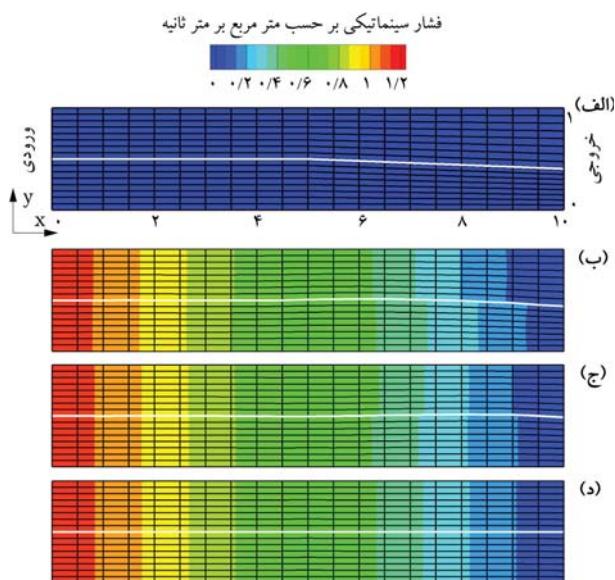
جهت ارزیابی صحیح عملکرد معادلات و توابع مربوط به جایه جایی سطح فاصل و شبکه، سه حالت اولیه اصلی برای سطح فاصل در نظر گرفته شده است. ساده ترین حالت قرارگیری سطح فاصل به صورت کاملا افقی و در میانه عرض مبدأ می باشد. در این حالت انتظار می رود شبکه جایه جایی نداشته باشد. حالت دوم که در واقع به عنوان اولین قدم در جایه جایی شبکه در نظر گرفته شده شامل سطح فاصل در وسط عرض دامنه به صورت افقی تا میانه میدان و پس از آن شکستگی و زاویه دار شدن تا انتهای میدان است. حالت سوم نیز سطح فاصل در فاصله ای مشخص به صورت افقی در بخش پایین یا بالای میدان است. شکل ۱۵ دو چیدمان اصلی جهت بررسی عملکرد حلگر را نمایش داده است.

در جریان پایایی مجرما، در صورتی که سرعت ورودی به صورت کاملا توسعه یافته یا به صورت سرعت یکنواخت داده شود، سطح فاصل افقی جایه جایی قابل توجهی از خود نشان نخواهد داد چراکه در واقع حالت نهایی سطح فاصل، همان حالت ابتدایی آن می باشد. به عبارتی در حالت سطح فاصل افقی چه در وسط عرض و چه در موقعیت نیمه پایین یا بالای عرض، هیچ گونه حرکت نوسانی مشاهده نشده است



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع موج شدن سطح فاصل؛
ج) نوسان و خروج امواج بعدی؛
د) خروج کامل امواج و ثبیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۰. حرکت سطح در حالت سطح فاصل زاویه‌دهی شده به همراه کانتورهای سرعت در عدد رینولدز ۱۰۰.

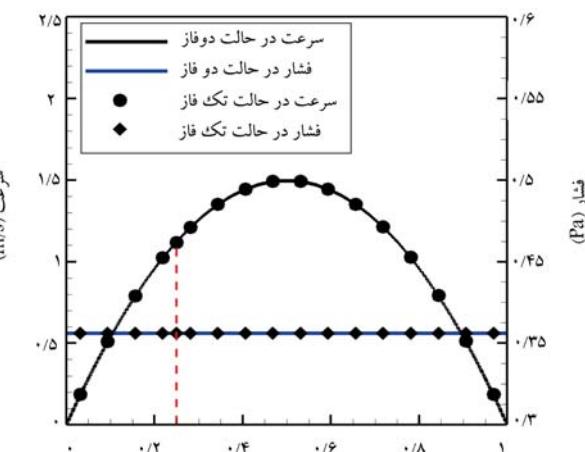


الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع حرکت سطح فاصل؛
ج) نوسان و خروج امواج بعدی؛
د) خروج کامل امواج و ثبیت موقعیت سطح فاصل.

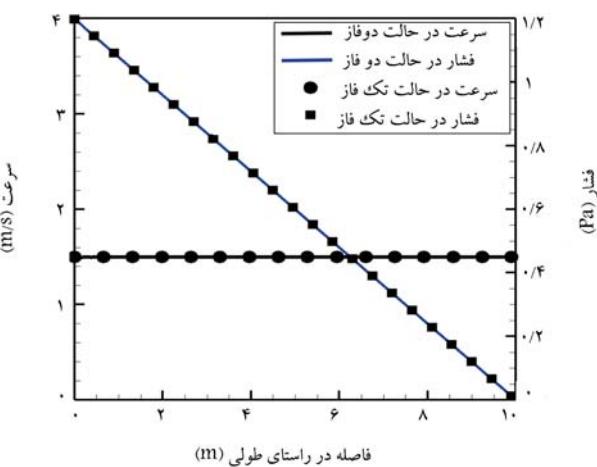
شکل ۲۱. حرکت سطح در حالت سطح فاصل زاویه‌دهی شده به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱۰۰.

شده اصلی، بر میزان دامنه آن افزوده شده است.

در اعداد رینولدز بالا، این رفتار هم افزایی امواج یا به عبارتی رشد دامنه و کاهش فرکانس چشمگیرتر خواهد بود. درواقع این رفتار می‌تواند یکی از عوامل محدودکننده حل در جریان‌های با عدد رینولدز بالا باشد و برای کنترل آن نیاز به ابزارهایی همچون مدیریت شبکه‌های زمانی و مکانی و همچنین استفاده از



شکل ۱۸. منحنی سرعت و فشار در مقطع طولی با فاصله ۰.۷.



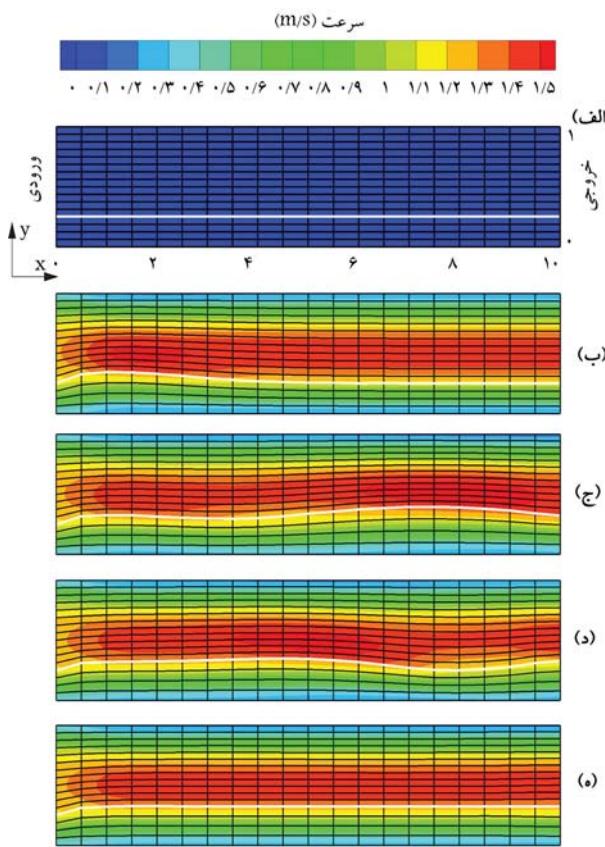
شکل ۱۹. منحنی سرعت و فشار در مقطع عرضی با فاصله ۰.۵.

جریان یکنواخت اعمال نمود و در هر دو حالت وجود تقارن هندسی و فیزیکی در بخش نزدیک به ورودی سبب سادگی و پایداری بیشتر حل می‌گردد. تصاویر مربوط به حرکت سطح و جایه‌جایی نقاط شبکه به همراه سرعت و فشار در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده‌اند.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، سطح موقعیت نهایی را به خوبی یافته است و امواج نیز به تدریج میرا شده‌اند. امواج شکل‌گرفته، حرکت نسبتاً یکنواخت داشته و بدون افزایش شدت و دامنه تا رسیدن به حالت نهایی، پیش‌رفته‌اند.

۲۰. سطح فاصل در یک نیمه و افقی
دومین حالت جایه‌جایی سطح، حالتی است که سطح فاصل با فاصله از خط میانی مجاور به صورت افقی موقعیت‌دهی اولیه شده است. با اعمال شرط سرعت یکنواخت در ورود، انتظار می‌رود حرکت سطح به سمت بالا تا برآورده شدن شرایط جریان توسعه یافته در پایین دست با ثابت بودن دبی جریان دو طرف سطح وجود داشته باشد. رفتار جایه‌جایی سطح فاصل برای این حالت در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ ارائه شده‌است.

در این حالت با پیش‌روی حل، امواج به تدریج در بخش ورودی میرا شده‌اند و شکل نهایی را به سطح داده‌اند، درحالی که امواج بخش پایین دست جریان دامنه بزرگتر و فرکانس کمتری را به خود گرفته‌اند. به عبارت دیگر، امواج از ورود به سمت خروج، سبب هم افزایی بر یکدیگر شده‌اند و تا زمان خارج شدن همه یا بخش تحریک



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛

ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع امواج شدن سطح فاصل؛

ج و د) توسعه امواج اولیه تا خروج کامل آن؛

د) خروج کامل امواج و تثیت موقعیت سطح فاصل.

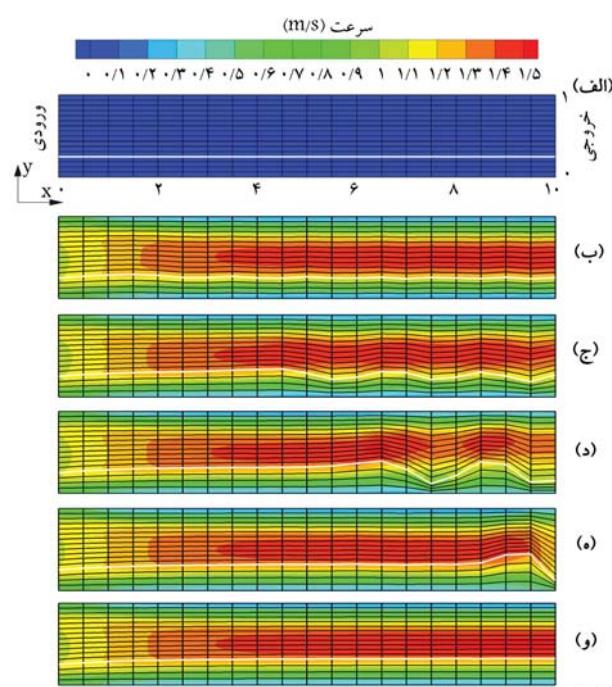
شکل ۲۴. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱.

تقلیل دهنده‌ها^{۲۲} و میراکننده‌های مصنوعی وجود دارد. حرکت امواج برای عدد رینولدز ۱ در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نمایش داده شده است. حرکت ملایم‌تر امواج از ورود تا خروج و همین طور نوین میرایی امواج ابتدایی، به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد. در تمام نمونه‌های مورد بررسی بالا، تغایر سطح فاصل به حرکت و قرارگیری در موقعیتی است که بتواند به تعادل نیرویی برسد. به عبارت دیگر، در مواردی که سطح نهایی به صورت افقی است، تعادل نیرویی به معنای برآور شدن فشار دو طرف نیز می‌باشد. در حالتی که سطح به موقعیت نهایی خود نرسیده باشد، حرکت سطح به سمتی است که فشار کمتری دارد. شاید این تعبیری ملموس‌تر باشد که ناحیه با فشار بیشتر، سطح را به سمت ناحیه با فشار کمتر سوق می‌دهد.

۳.۴. جریان بر روی پله

جریان بر روی پله نیز می‌تواند به عنوان یک نمونه مناسب جهت بررسی عملکرد حرکت سطح فاصل و همچنین رفتار نوسانات شکل‌گیرنده تا رسیدن به پاسخ پایا مورد توجه قرارگیرد. دامنه و شرایط مرزی برای جریان روی پله در شکل ۲۶ نمایش داده شده است.

شبکه برای جریان روی پله، ۴۰ در ۱۰۰ به ترتیب، در راستای عرض و طول



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛

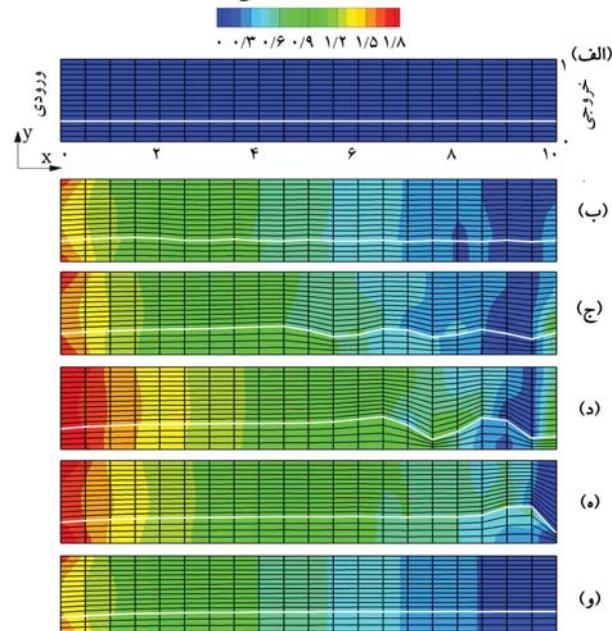
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع امواج شدن سطح فاصل؛

ج تا ه) توسعه امواج اولیه تا خروج کامل آن؛

د) خروج کامل امواج و تثیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۲. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای سرعت در عدد رینولدز ۱۰۰.

فشار سینماتیکی بر حسب متر مربع بر متر ثانیه



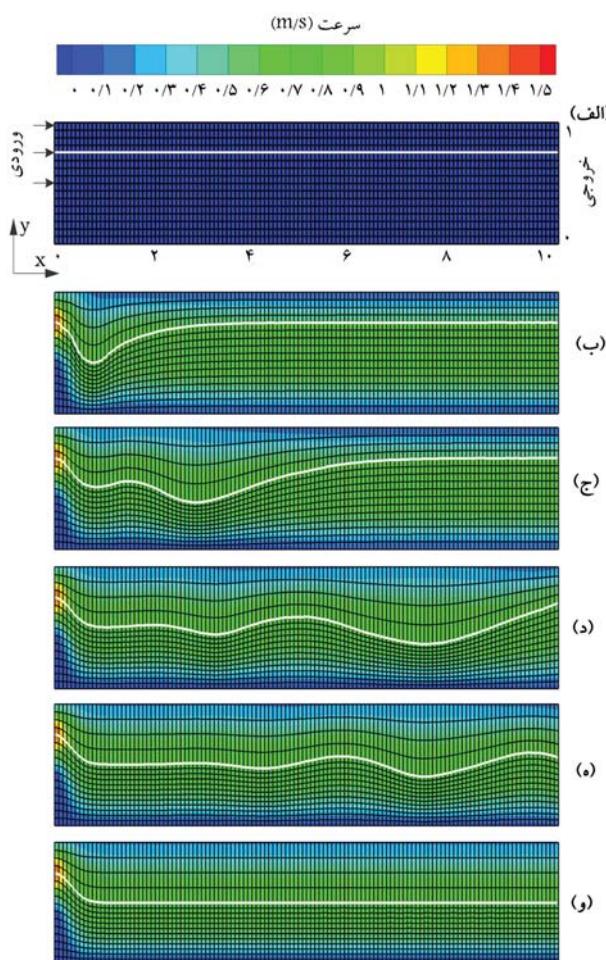
الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛

ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع امواج شدن سطح فاصل؛

ج تا ه) توسعه امواج اولیه تا خروج کامل آن؛

د) خروج کامل امواج و تثیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۳. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱۰۰.



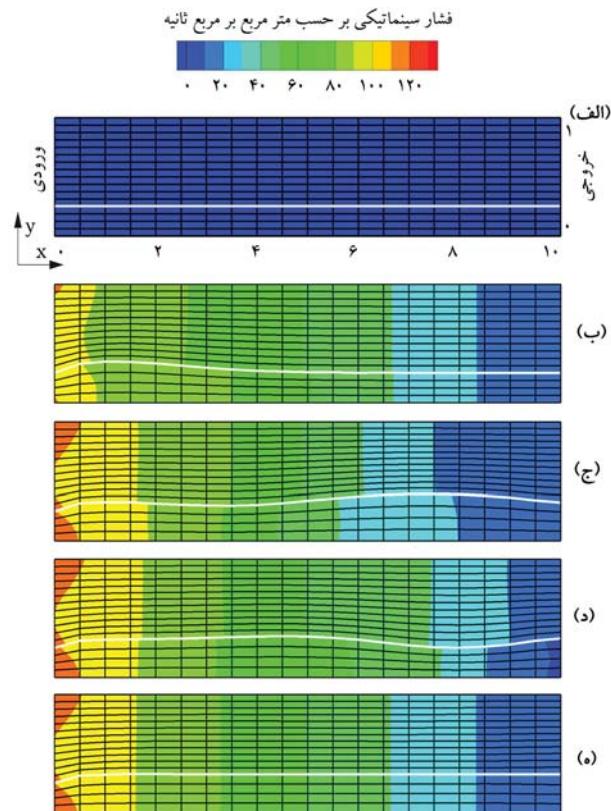
الف) سطح فاصل در حالت اولیه؟

- ب) تو رفتگی سطح فاصل و شکل گیری موج اول؛
- ج) توسعه موج اولیه و تشکیل موج ثانویه؛
- د و ه) حرکت امواج تا خروج کامل از دامنه؛
- و) ثبیت کامل موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۷. حرکت سطح فاصل در جریان بر روی پله بهمراه کانتورهای سرعت در عدد رینولدز ۱۰.

یده آل و نهایی خود قرارداد، اما دیگر نقاط سطح سیال با شکل‌گیری جریان، شروع به تغییر شکل می‌نمایند. مراحل حرکت سطح سیال و رفتار امواج شکل گرفته تا رسیدن به حل نهایی پایا به صورت شکل‌های ۲۷ و ۲۸ ارائه شده است.

همانظور که مشاهده می‌شود، پس از ورود جریان به تانه‌یه بعد از پله، موج اولیه و درشتی نیز شکل می‌گیرد. همانگونه که پیشتر نیز اشاره شد، در اعداد رینولدز بالاتر به دلیل افزایش ابعاد این موج، نیازمند اباره‌ای کنترل شدت موج همچون ضرائب تقلیلی یا توابع تقلیل دامنه می‌باشیم. با حرکت موج به سمت خروجی، به تدریج در چند حرکت زیگزاگی به سمت بالا و پایین، موج اصلی از دامنه حل خارج شده و سطح فاصل، موقعیت نهایی خود را پیدا می‌کند. موقعیت نهایی، در واقع یک خط جریان است که از ورودی تا خروجی امتداد یافته است. درینجا نیز حرکت سطح با مشاهده توزیع فشار تاحد زیادی قابل توجه می‌باشد، به خوبی که سطح به سمت نهایی با فشار پایین متمایل شده و تا رسیدن به تعادل نیزی نهایی، این حرکت رفت و برگشتی سطح ادامه داشته است.



الف) سطح فاصل در حالت اولیه:

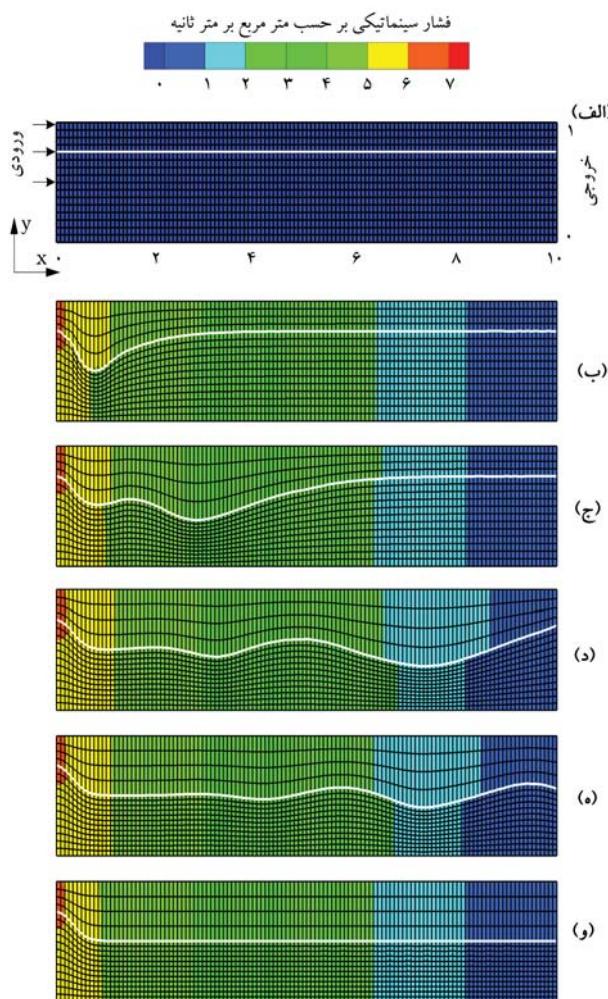
- ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع امواج شدن سطح فاصل؛
- ج و د) توسعه امواج اولیه تا خروج کامل آن؛
- د) خروج کامل امواج و ثبیت موقعیت سطح فاصل.

۲۵. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجزا به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱.

شرط مرزی دیواره در بالا و پایین

می باشد. در جریان بروی پله، سیال پس از ورود به صورت توسعه یافته به میدان حل، با عبور از یک پله، با فضایی واگرای نسبت به ورودی مواجه می شود. این فضای در کنار تمیل سیال، جهت حرکت روبروی جلو، سبب شکل گیری گردابه در ناحیه پله یا در پایین دست جریان می گردد که بسته به عدد رینولذر و دیگر مشخصات جریان می تواند هم از جهت اندازه و هم از نظر تعداد، توسعه یابد. در این برسی، به دلیل عدم وجود شرایط با اعداد رینولذر بالا، صرفا عدد رینولذر ۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. هرچند اعداد رینولذر بالاتر نیز می تواند به عنوان زمینه تحقیقاتی جذابی در آینده مورد توجه قرار گیرد.

- ترفند سلول با ضخامت ناچیز، به راحتی در بسترهای با کد متن باز قابل اعمال است. چراکه نیازی به تغییر رویکرد از مرکز سلولی به دیگر دیدگاهها وجود ندارد و به راحتی با رویکرد حجم محدود مطابقت دارد؛
- روند ارائه شده در بستر فوم - اکستند، قابلیت کار با کلاس‌ها و ابزارهای جایه‌جایی شبکه با روش‌های مختلف را دارد؛
- در صورت بهره بردن از قابلیت‌های موجود در بستر فوم - اکستند و در اختیار گرفتن کلاس‌ها و اوپرаторهای گرادیانی، قابلیت حل موازی نیز به خوبی حفظ می‌گردد؛
- در حل جریان‌های دوفازی با اعداد رینولدز پایین، امواج شکل گرفته، می‌تواند بدون اعمال ضرایب تصحیح، از دامنه خارج شوند. در حالی که برای اعداد رینولدز بالاتر، امکان تشدید امواج و متعاقب آن استفاده از ضرایب تقلیل دهنده دامنه دور از انتظار نخواهد بود؛
- در محدوده اعداد رینولدز پایین، موج اول شکل گیرنده بر سطح فاصل بحرانی ترین موج است، به‌نحوی که با خروج یا میرایی این موج اول، عملاً سطح فاصل موقعیت خود را پیداکرده و به سمت ثبیت شدن پیش رفته است؛
- فرایند انجام شده در واقع، گام ابتدایی و شروع برای رسیدن به یک حلگر، برای انواع رژیم جریان‌ها و در مراحل آینده با خواص متفاوت در هریک از دوفاز، به همراه در نظر گرفتن مباحث دمایی و انتقال جرم می‌باشد.



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) تو رفتگی سطح فاصل و شکل گیری موج اول؛
ج) توسعه موج اولیه و تشکیل موج ثانویه؛
د و) حرکت امواج تا خروج کامل از دامنه؛
و) ثبیت کامل موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۸. حرکت سطح فاصل در جریان بر روی پله به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱۰.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، جزئیات بخش‌های حلگر و نحوه اعمال معادلات جریان و شرط سطح فاصل به منظور رسیدن به حل همزمان معادلات و شرط مرزی سطح فاصل در بستر فوم - اکستند تشریح گردید. حلگر ایجاد شده برای جریان‌های با عدد رینولدز پایین، با موقیت آزموده شد. نمونه‌های آزمون جریان درون مجرأ و جریان روی پله، با موقعیت‌های اولیه مختلف برای سطح فاصل موردارزیابی قرار گرفت. برخی از نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- ترفند سلول با ضخامت ناچیز می‌تواند به منظور اعمال شرط مرزی سطح فاصل و به منظور ایجاد سلول‌های فعال در دستگاه معادلات وارد شوند. این سلول‌ها عملاً به عنوان سلول‌های محاسباتی مرزی و ضمنی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛

- T**: تانسور تنش؛
D: تانسور نز کرنش؛
n: بردار یکه عمود بر سطح؛
s: بردار اول یکه مماس بر سطح؛
t: بردار دوم یکه مماس بر سطح؛
n_x, n_y, n_z: مولفه‌های بردار یکه عمود؛
S_x, S_y, S_z: مولفه‌های بردار اول یکه مماس؛
t_x, t_y, t_z: مولفه‌های بردار دوم یکه مماس؛
u: بردار سرعت سیال (m/s)؛
u: مولفه‌های بردار سرعت سیال؛
p: فشار دینامیکی سیال (Pa)؛
ρ: چگالی (kg/m^3)؛
μ: لزجت دینامیکی سیال ($Pa.s$)؛
K: انحنای سطح؛
S: نمایشگر سطح؛
A: مساحت سطح (m^2)؛
Ω: حجم جاروب شده (m^3)؛
τ_z: مولفه‌های تنش برشی؛
σ: کشش سطحی (kg/s^2)؛
ϕ: هر متغیری از جریان؛
iL, iG: بخش روی سطح مربوط به هریک از فازهای گاز یا مایع.

1. Capture
2. Track
3. Interface
4. Volume of Fluid
5. Interface Tracking
6. Marker and Cell
7. Sharpness
8. Muzaferija & Peric
9. Projection
10. Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations
11. Area Mesh and Matrices
12. Segregated
13. Assemble
14. Film Flows
15. Assemble
16. Outer Product
17. Scheme
18. Rhee & Chow
19. Arbitrary Lagrangian Eulerian
20. Object
21. Class
22. Relaxation Factors

منابع (References)

1. Gueyffier, D., Li, J., Nadim, A., Scardovelli, R. and Zaleski, S., 1999. Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows. *Journal of Computational Physics*, 152(2), pp.423-456. <https://doi.org/10.1006/jcph.1998.6168>.
2. Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp.201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
3. Tukovic, Z. and Jasak, H., 2012. A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow. *Computers & Fluids*, 55, pp.70-84. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.11.003>.
4. Vakilipour, S., Mohammadi, M. and Ormiston, S., 2021. A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver. *Journal of Computational Physics*, 427, p.110054. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.110054>.
5. McKee, S., Tomé, M.F., Ferreira, V.G., Cuminato, J.A., Castelo, A., Sousa, F.S. and Mangiavacchi, N., 2008. The MAC method. *Computers & Fluids*, 37(8), pp.907-930. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2007.10.006>.
6. Tryggvason, G., Bunner, B., Esmaeeli, A., Juric, D., Al-Rawahi, N., Tauber, W., Han, J., Nas, S. and Jan, Y.J., 2001. A front-tracking method for the computations of multiphase flow. *Journal of Computational Physics*, 169(2), pp.708-759. <https://doi.org/10.1006/jcph.2001.6726>.
7. Muzaferija, S. and Perić, M., 1997. Computation of free-surface flows using the finite-volume method and moving grids. *Numerical Heat Transfer*, 32(4), pp.369-384. <https://doi.org/10.1080/10407799708915014>.
8. Williams, T.L., 1993. An implicit surface tension model (Doctoral dissertation, Memphis State University). <https://doi.org/10.2514/6.1996-599>.
9. Oishi, C.M., Tomé, M.F., Cuminato, J.A. and McKee, S., 2008. An implicit technique for solving 3D low Reynolds number moving free surface flows. *Journal of Computational Physics*, 227(16), pp.7446-7468. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.04.017>.
10. Denner, F. and van Wachem, B.G., 2015. Numerical time-step restrictions as a result of capillary waves. *Journal of Computational Physics*, 285, pp.24-40. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.01.021>.
11. Apsley, D. and Hu, W., 2003. CFD simulation of two and three dimensional free surface flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 42(5), pp.465-491. <https://doi.org/10.1002/fld.523>.
12. Ahmadi, A., Badiei, P. and Namin, M.M., 2007. An implicit two dimensional non hydrostatic model for free surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 54(9), pp.1055-1074. <https://doi.org/10.1002/fld.1414>.
13. Holzmann, T., 2016. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®. Loeben, Germany: Holzmann CFD. <https://Holzmann-cfd.de>.
14. Rhee, C.M. and Chow, W.L., 1983. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA Journal*, 21(11), pp.1525-1532. <https://doi.org/10.2514/3.8284>.
15. Miller, T.F. and Schmidt, F.W., 1988. Use of a pressure-weighted interpolation method for the solution of the incompressible Navier-Stokes equations on a nonstaggered grid system. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 14(2), pp.213-233. <https://doi.org/10.1080/1040778808913641>.
16. Vakilipour, S. and Ormiston, S.J., 2012. A coupled pressure-based co-located finite-volume solution method for natural-convection flows. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 61(2), pp.91-115. <https://doi.org/10.1080/10407790.2012.642281>.
17. Darwish, M., Abdel Aziz, A. and Moukalled, F., 2015. A coupled pressure-based finite-volume solver for incompressible two-phase flow. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 67(1), pp.47-74. <https://doi.org/10.1080/10407790.2014.949500>.
18. Ashrafiyeh, A., Alinia, B. and Mayeli, P., 2015. A new co-located pressure-based discretization method for the numerical solution of incompressible Navier-Stokes equations. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 67(6), pp.563-589. <https://doi.org/10.1080/10407790.2014.992094>.
19. Uroic, T., 2019. Implicitly coupled finite volume algorithms (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture). urn:nbn:hr:235:593963.
20. Cengel, Y. and Cimbala, J., 2013. Ebook: Fluid mechanics fundamentals and applications (si units). McGraw Hill. ISBN13: 9781259696534.
21. Gartling, D.K., 1990. A test problem for outflow boundary conditions-flow over a backward facing step. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 11(7), pp.953-967. <https://doi.org/10.1002/fld.1650110704>.

سه بخش اصلی از معادلات دینامیکی درادامه ارائه شده‌اند. [۴]

$$\begin{aligned} n \cdot T \cdot n = & ۴\mu \left(n_x n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y n_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z n_x \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ & + n_x n_y \frac{\partial v}{\partial x} + n_y n_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_z n_y \frac{\partial v}{\partial z} \\ & \left. + n_x n_z \frac{\partial w}{\partial x} + n_y n_z \frac{\partial w}{\partial y} + n_z n_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (۲۱)$$

$$\begin{aligned} n \cdot T \cdot t = & \mu \left(n_x t_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x t_y \frac{\partial u}{\partial y} + n_x t_z \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ & + n_y t_x \frac{\partial v}{\partial x} + n_y t_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_y t_z \frac{\partial v}{\partial z} \\ & + n_z t_x \frac{\partial w}{\partial x} + n_z t_y \frac{\partial w}{\partial y} + n_z t_z \frac{\partial w}{\partial z} \\ & + n_x t_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y t_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z t_x \frac{\partial u}{\partial z} \\ & + n_x t_y \frac{\partial v}{\partial x} + n_y t_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_z t_y \frac{\partial v}{\partial z} \\ & \left. + n_x t_z \frac{\partial w}{\partial x} + n_y t_z \frac{\partial w}{\partial y} + n_z t_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (۲۲)$$

$$\begin{aligned} n \cdot T \cdot s = & \mu \left(n_x s_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x s_y \frac{\partial u}{\partial y} + n_x s_z \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ & + n_y s_x \frac{\partial v}{\partial x} + n_y s_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_y s_z \frac{\partial v}{\partial z} \\ & + n_z s_x \frac{\partial w}{\partial x} + n_z s_y \frac{\partial w}{\partial y} + n_z s_z \frac{\partial w}{\partial z} \\ & + n_x s_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y s_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z s_x \frac{\partial u}{\partial z} \\ & + n_x s_y \frac{\partial v}{\partial x} + n_y s_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_z s_y \frac{\partial v}{\partial z} \\ & \left. + n_x s_z \frac{\partial w}{\partial x} + n_y s_z \frac{\partial w}{\partial y} + n_z s_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (۲۳)$$

سه مولفه گرادیان برای سهجهت دستگاه مختصات به صورت زیر حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} = & \left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial z} \right) \right. \\ & - \frac{\partial \phi}{\partial t_1} \left(\frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial \phi}{\partial t_1} \left(\frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial z} \right) \\ & \left. / \left(\frac{\partial x}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial z} \right) \right. \right. \\ & - \frac{\partial y}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & \left. \left. + \frac{\partial z}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial t_1} - \frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (۲۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial y} = & \left(- \frac{\partial \phi}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \right. \\ & + \frac{\partial \phi}{\partial t_1} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial \phi}{\partial t_1} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & \left. / \left(\frac{\partial x}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial z} \right) \right. \right. \\ & - \frac{\partial y}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & \left. \left. + \frac{\partial z}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial t_1} - \frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (۲۵)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial z} = & \left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial t_1} - \frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \right. \\ & - \frac{\partial \phi}{\partial t_1} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t_1} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial \phi}{\partial t_1} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t_1} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & \left. / \left(\frac{\partial x}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial z} \right) \right. \right. \\ & - \frac{\partial y}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial z}{\partial t_1} - \frac{\partial z}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \\ & \left. \left. + \frac{\partial z}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_1} \frac{\partial y}{\partial t_1} - \frac{\partial y}{\partial t_1} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (۲۶)$$

ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آبودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان

سام سهام (کارشناس ارشد)

سید کریمیان علی‌آبادی*

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

در این تحقیق، نوع توربین محور عمودی از منظر آبودینامیکی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. توربین‌های مورد استفاده دارای پره‌های صاف و مستقیم (H - شکل) و زاویه‌دار (V - شکل) بوده که دارای مشخصات ابعادی باری هستند. این مشخصات متناسب با شرایط اقیایی شهر زاهدان و توزیع سرعت باد میانگین در این منطقه لحاظ شده است. برای ارزیابی آبودینامیکی توربین‌ها از روش نیمه تحلیلی DMST استفاده شده است. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که توان تولید شده در نوع V - شکل بسیار کمتر از نوع H - شکل می‌باشد که این موضوع ناشی از کاهش مساحت مؤثر توربین و همچنین کاهش گشتاور تولید شده توسط رotor آن است. از سوی دیگر، توان منفی هنگام راهاندازی در نوع وی-شکل حدود هفت برابر کمتر از نوع H - شکل بوده و این موضوع موجب بهبود راهاندازی این نوع توربین خواهد شد. از نظر اقتصادی نیز هزینه تولید انرژی متوسط سالیانه برای توربین وی-شکل حدود ۱۰ دلار می‌باشد که نسبت به هزینه ۶۶ دلاری نوع H - شکل بسیار است و این موضوع موجب کاربردی تر شدن توربین V - شکل در مقیاس شهری و کوچک می‌شود.

واژگان کلیدی: ارزیابی اقتصادی، توربین بادمحور عمودی، عملکرد آبودینامیکی.

۱. مقدمه

بیشتری تولید می‌کنند، اما نیازمند صرف هزینه بیشتر و اختصاص دادن منطقه‌ای تحت عنوان مزرعه توربین بادی هستند. به همین علت، استفاده از توربین‌های محور عمودی با توان کمتر، ابعاد کوچک‌تر، عدم حساسیت به جهت وزش باد و هزینه ساخت و سرویس کمتر، یکی از گزینه‌های مناسب برای بهره‌مندی از مکان‌هایی همچون بام منازل، بام کارگاه‌ها، حاشیه بزرگراه‌ها و سایر مکان‌های مشابه بوده که استفاده از توربین‌های محور افقی در آن مکان‌ها امکان‌پذیر نیست و یا صرفه اقتصادی ندارد. از آنجا که موقیت جغرافیایی ایران در ناحیه کم فشار است، بنابراین برخی از نقاط آن تحت تأثیر جریان‌های قدرتمند تابستانی و زمستانی قرار خواهد گرفت. این جریان‌ها شامل بادهای زمستانی و تابستانی بوده که از سمت اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه و اقیانوس هند می‌وزند. یک مطالعه در دانشگاه شریف نشان می‌دهد که پتانسیل ۲۶ نقطه در کشور در حدود ۶۵۰۰ مگاوات بوده که منطقه مناسبی برای استقرار توربین‌های بادی می‌باشد.^[۱] این قسمت‌ها شامل بخش اعظمی از جنوب شرقی ایران است که به طور کلی با دخیز تلقی می‌شود. اولین تجربه ایران در نصب توربین‌های بادی با هدف تولید برق به سال ۱۹۹۴ برمی‌گردد. در آن زمان،

صرف سوخت‌های فسیلی باعث مشکلات زیست محیطی از جمله آلودگی جو، تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب و خاک می‌شود.^[۱] ذخایر نفت و گاز با گذشت زمان کاهش می‌یابد، اما با گسترش صنایع و کارخانجات، نیاز به انرژی افزایش می‌یابد. از همین‌رو، بسیاری از کشورها سعی دارند تا واسطه‌گی خود را به سوخت‌های فسیلی کاهش دهند و انرژی مورد نیاز خود را با واسطه انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی باد و خورشید تأمین کنند. این نوع از انرژی که نیز نامیده می‌شود، بیش از ۲۰ درصد تقاضای انرژی جهان را تأمین می‌کند.^[۲] انرژی بادی به دلیل رایگان و در دسترس بودن آن، یکی از روش‌های مناسب تأمین انرژی محسوب می‌شود. بهره‌مندی از انرژی باد نیازمند استفاده از توربین‌های بادی بوده تا بتوان به کمک این توربین‌ها انرژی باد را به انرژی مکانیکی و در نهایت به کمک ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل کرد. توربین‌ها به دو دسته محور افقی و محور عمودی تقسیم شده می‌شوند که به طور معمول توربین‌های محور افقی نسبت به نوع محور عمودی توان

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۲/۲، ۱۴۰۲، اصلاحیه ۴/۲، ۱۴۰۲/۵، پذیرش ۲۲، ۱۴۰۲/۵.

استناد به این مقاله:

سهام، سام و کریمیان علی‌آبادی، سعید، ۱۴۰۳. ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آبودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان. مهندسی مکانیک شریف، ۱۱۱-۱۱۸، ۱۱۸-۱۱۱، ص ۱۱۱-۱۱۷، ۱۱۸-۱۱۷/۲، ۱۴۰۲/۴، اصلاحیه ۴/۲، ۱۴۰۲/۵، پذیرش ۲۲، ۱۴۰۲/۵.

DOI:10.24200/J40.2023.62309.1680

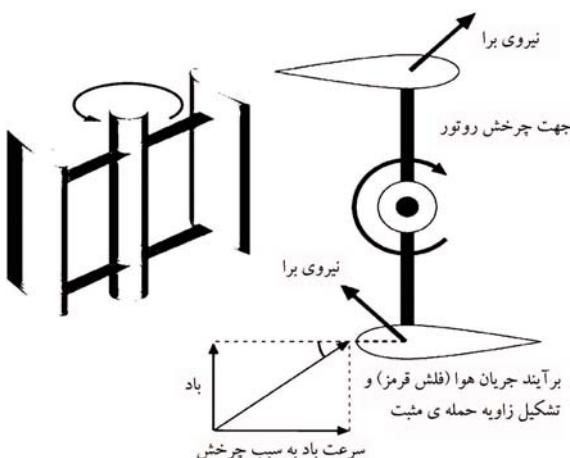
ایجاد تفاوت میان دو توربین می‌شود، استفاده از پره‌های زاویه‌دار در نوع V - شکل است. در نهایت، پس از بررسی عملکردی و فنی توربین‌ها، هزینه‌های اجرای طرح و تخمینی از ارزیابی اقتصادی مربوط به هر یک از آنها ارائه شده است.

۲. معرفی اجزاء و عملکرد توربین محور عمودی

همانطور که در بخش پیشین بیان شد، توربین‌های بادی ارزی جنبشی باد را به کمک پره‌ها دریافت کرده و با دوران روتور این ارزی را به ارزی مکانیکی تبدیل کرده و به شفت نگه‌دارنده پره‌ها منتقل می‌کنند. انتهای دیگر این شفت در جعبه دنده قرار دارد و در آن سرعت دوران شفت افزایش یافته و در نهایت وارد ژنراتور می‌شود. این توضیح کوتاه، اساس کار توربین‌های بادی است. اما نحوه دریافت ارزی باد توسط پره‌ها بنا به نوع توربین متفاوت است. برخی از توربین‌ها مانند نوع ساونوس براساس نیروی پسا و برخی براساس نیروی برآ عمل می‌کنند. اما در توربین‌های داریوس (مشابه توربینی که در این تحقیق استفاده شده است) از نیروی برآ بهره‌گرفته شده است و پره‌ها مشابه شکل ۱، به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا مقدار پسا در مقابل جریان کم بوده و از طرف دیگر مقدار برابر تولید شده توسط پره‌ها بیشتر باشد. این نیروی برآ که ناشی از اختلاف فشار میان سطوح پرفشار و کم فشار پره است، به طور معمول چندین برابر نیروی پسا بوده و باعث ایجاد گشتاور حول محور توربین و به حرکت درآمدن پره توربین می‌شود.

اجزای اصلی توربین‌های محور عمودی را می‌توان به قسمت‌های زیر تقسیم‌بندی کرد:

- برج توربین: برج یا پایه توربین، قسمت ثابت توربین باد بوده و وظیفه تحمل وزن استاتیک توربین و همچنین بار دینامیکی وارد بر آن را بر عهده دارد. در این نوع توربین، برخلاف نوع محور افقی، به طور معمول ژنراتور و جعبه دنده در قسمت پایینی برج (زندیک زمین) نصب می‌شود;
- پره‌های توربین: پره‌های توربین واسطه تبدیل ارزی باد به ارزی مکانیکی بوده و از آنجا که تولید ارزی خروجی و استگی به نسبت زیادی به پره‌های توربین دارد، بنا بر این از نظر آبودینامیکی جزو قسمت‌های اصلی و مهم به شمار می‌رود. این قسمت نیاز به طراحی دقیق و مناسبی دارد، چرا که دارای رابطه مستقیمی با تولید نیرو و به چرخش درآوردن روبرو است;
- جعبه دنده و ژنراتور: جعبه دنده باعث افزایش سرعت دورانی محور خروجی از

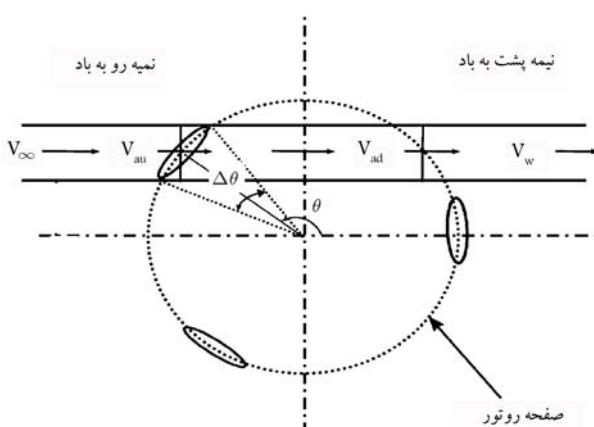


شکل ۱. نحوه عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس (براساس نیروی برآ).^[۲۲]

دو مزرعه توربین بادی با توان ۵۰۰ کیلووات در منجیل و رودبار، واقع در استان گیلان احداث گردید که ارزی سالیانه آن به بیش از ۱/۸ میلیون کیلووات ساعت رسید.^[۲۳] دو میان تجربه در سال ۱۹۹۹ و با احداث ۲۷ توربین بادی در منجیل و رودبار صورت پذیرفت که ۲۱ توربین مربوط به منجیل بوده که شامل ۱۵ توربین ۳۰۰ کیلوواتی، ۵ توربین ۵۵ کیلوواتی و یک توربین ۵۰ کیلوواتی است.^[۲۴] از دیگر نقاط ایران که از توربین‌های بادی بهره می‌برند، می‌توان به بیتلود در خراسان و لوتاک در سیستان و بلوچستان اشاره کرد.

قریشی و رحیمی به بررسی جزئیات ارزی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و همچنین به اتفاق ارزی در برخی از صنایع پرداختند و پیشنهادی برای بهبود این مشکل ارائه دادند.^[۲۵] علمدری و همکاران به بررسی پتانسیل ارزی بادی در ایران پرداختند. آنها سرعت باد را در سال ۲۰۰۷ و در ارتفاعاتی ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری از سطح زمین مورد مقایسه قرار دادند. آنها سرعت میانگین باد، تابع توزیع سرعت باد و میانگین تراکم باد را توسط ۶۸ مرکز اطلاعاتی آب و هوا ایران تخمین زدند.^[۲۶] مصطفی پورامکان‌سنگی بهره‌برداری از ارزی باد در منطقه یزد ایران را بررسی کرد، او سرعت باد را به صورت ماهانه و سالیانه در ارتفاعات مختلف در سال‌های تا ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ در ۱۱ استگاه هواشناسی مورد ارزیابی قرار داد. طبق تحقیقات او، سرعت باد میانگین سالیانه در اکثر استگاه‌های هواشناسی کمتر از ۴/۵ متر بر ثانیه بوده که برای نصب توربین‌های بادی (به خصوص توربین‌های بزرگ) نامناسب است.^[۲۷] وی در تحقیقی دیگر به ارزیابی اقتصادی استفاده از توربین‌های بادی کوچک در شهر کرمان پرداخت. در این تحقیق سه توربین کوچک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شهر کرمان دارای پتانسیل ارزی بادی به نسبت بهتری برای نصب توربین‌های بادی کوچک است.^[۲۸] موسوی و همکاران به مقایسه روش‌های موجود برای تولید برق با توربین‌بادی در ایران پرداختند و بیان کردند که نیروگاه‌های متکی به ارزی باد می‌توانند یکی از نیروگاه‌های رقابتی در صنعت بوده و از طرفی بیان کردند که موضوع یارانه‌ها می‌تواند در آینده بر توسعه صنعت بادی ایران تأثیرگذار باشد. همچنین، در نتایج آنها اشاره شده است که با توجه به وضعیت اقتصادی ایران و جهان، حرکت به سوی ارزی‌های پاک از جمله توربین‌بادی، یکی از رویکردهای مناسب برای کشور است.^[۲۹] با توجه به اهمیت ارزی باد و مزایای آن، بسیاری از محققان به بررسی پتانسیل ارزی باد در مناطق مختلف ایران و جهان پرداختند که می‌توان به شهرهای مانند یزد، تهران^[۱۱] و منجیل^[۱۲] در ایران و کشورهای ترکیه،^[۱۳] یونان^[۱۴] و آلمان^[۱۵] آتشاره کرد. بنا بر این، با توجه به آمارهای ذکر شده، واضح است که به طورکلی کشور ایران با وجود برخی مناطق مناسب از ارزی باد، نسبت به سایر کشورها در مقام پایین‌تری قرار گرفته است که این مسئله به تهایی نشان می‌دهد که استفاده از توربین‌های محور عمودی و کوچک می‌تواند بازدهی بهتری در سطح کشور داشته باشد. این در حالی است که اکثر نیروگاه‌های بادی کشور از توربین‌های محور افقی عظیم استفاده می‌کنند که علاوه بر پیچیدگی ساخت و بهره‌برداری، دارای هزینه‌های تولید و نگهداری بیشتری نسبت به نوع محور عمودی هستند.

در این تحقیق سعی شده است تا عملکرد آبودینامیکی دو نوع توربین محور عمودی H - شکل و V - شکل متناسب با شرایط جوی و سرعت هوای موجود در منطقه سیستان و شهر زاهدان مورد بررسی قرار گیرد. از معیارهای مهم برای انتخاب توربین جهت تولید برق در این منطقه می‌توان به مقدار سرعت باد میانگین در هر ماه و توزیع فلکونی هر سرعت اشاره کرد. برای این منظور، قطر توربین‌ها و سایر پارامترهای هندسی متناسب با شرایط اقلیم منطقه انتخاب شده و برای هر دو نوع توربین از نسبت منظر یکسان استفاده شده است؛ تنها پارامتری که موجب



شکل ۳. مسیر جریان در روش دی ام اس تی. [۲۳]

نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد) نشان می‌دهد. به طور مشابه، سرعت V_e نیز با عبور از پره‌های نیمه پشت به باد، با کاهش انرژی مواجه شده و در نهایت سرعت خروج جریان از روتور (V_w) به کمترین مقدار خود می‌رسد. این پارامتر همان سرعت جریان دنباله (Wake) است. در این میان، سرعت جریان در محل عبور از میان پره‌های دو نیمه به ترتیب ($V_{ad}V_{au}$) بوده که متأثر از ضرایب القایی (نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد) یعنی a_u و a_d است. این ضرایب که نشان‌دهنده میزان تأثیر پره بر جریان عبوری از روتور است، توسط روش سعی و خطأ و با کمک روابط مومنتوم در دو صفحه مجزا از هم (برای دو نیمه روتور) به دست می‌آیند.

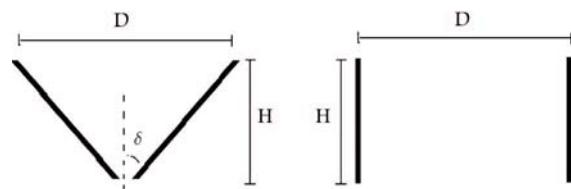
$$V_\infty > V_{au} > V_e > V_{ad} > V_w \quad (1)$$

$$V_{au} = a_u V_\infty \quad (2)$$

$$V_e = V_\infty (2a_u - 1) \quad (3)$$

$$V_{ad} = a_d V_e \quad (4)$$

در روابط فوق، پارامترهای V_{au} و V_{ad} به ترتیب بیانگر سرعت جریان در دیسک محرک جلویی (Upwind actuator disc) و سرعت جریان در دیسک محرک عقبی (Downwind actuator disc) است. این پارامترها از متغیرهای پایه‌ای برای محاسبه سرعت نسبی و زاویه حمله است. ضرایب a_u و a_d نیز به ترتیب ضرایب القایی محروری برای نیمه رو به باد دیسک محرک جلویی (Upwind actuator disc) و نیمه پشت به باد دیسک محرک عقبی (Downwind actuator disc) است. با فرض دلخواه ضرایب القایی اولیه (a)، می‌توان سرعت جریان را در مقطع مورد نظر محاسبه کرده و با کمک آن سرعت جریان عمود بر پره، سرعت جریان مماس بر پره در راستای وتر و همچنین سرعت جریان مماس بر پره در راستای طول پره را مشابه روابط ۵ و ۶ به دست آورد. از آنجاکه در محاسبات آبروپیانمیک برای دستیابی به نیروهای برآ و پسا، ممکن است براساس سرعت نسبی جریان است، بنابراین توسط رابطه ۷، سرعت نسبی جریان در لحظه برخورد به پره به دست آمده و با کمک آن می‌توان زاویه حمله ظاهری را مشابه رابطه ۸ به دست آورد. شکل ۴ نیز نشان‌دهنده وضعیت قرارگیری پره در چهار لحظه متفاوت است. همانطور که مشاهده می‌شود، سرعت نسبی جریان و زاویه حمله در هر لحظه دارای جهت و مقدار متفاوتی بوده و پس از به دست آمدن نیروهای برآ و پسا می‌توان با تغییر دستگاه مختصات، این نیروها را به نیروهای مماس و عمودی بر پره تبدیل کرد. همچنین، از آنجاکه پره‌های توربین دارای طول محدودی هستند، بنابراین مقداری از جریان در نوک پره از سطح پرنشار پره به سطح کم‌شار آن منحرف شده است که



شکل ۲. شماتیک جانبی هندسه روتور H - شکل (سمت راست) و V - شکل (سمت چپ).

جدول ۱. مشخصات توربین H - شکل و V - شکل.

V - type	H - type	مشخصه
ناکا ۰۰۱۵	ناکا ۰۰۱۵	نوع ایرفویل
۳ عدد	۳ عدد	تعداد پره
۰/۳ متر	۰/۳ متر	طول وتر پره
۶ متر	۶ متر	قطر روتور
۶ متر	۶ متر	طول پره
۰/۲۵ متر	۰/۲۵ متر	ارتفاع روتور
۰	۰	زاویه دلتا
۵۰ دور بر دقیقه	۵۰ دور بر دقیقه	سرعت چرخش روتور

جمعه‌دهندۀ شده که موجب انتقال سرعت به نسبت پایین روتور به سرعت مناسب برای ژنراتور می‌شود. در نهایت، محور خروجی از جعبه‌دهندۀ با ژنراتور در ارتباط بوده و توسط ژنراتور انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

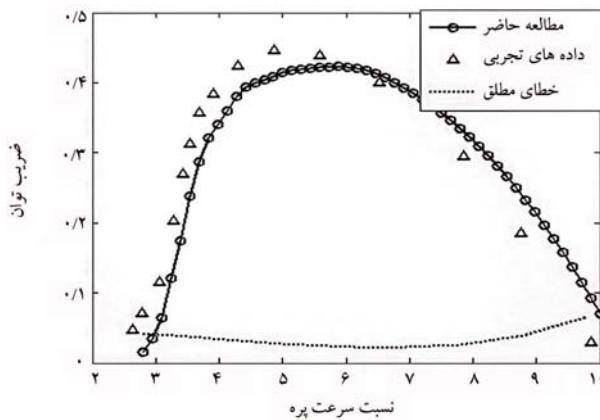
همانطور که گفته شد، در این تحقیق از دو نوع توربین استفاده شده است؛ نوع اول استفاده از پره‌های مستقیم (H - شکل) و نوع دوم از پره‌های زاویه دار است که به آن توربین V - شکل می‌گویند. شماتیک توربین‌ها در شکل ۲ و مشخصات ابعادی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای مقایسه دو توربین با شرایط هندسی مشابه، از نسبت طول پره به قطر روتور یکسان (نسبت منظری یکسان) استفاده شده است. برای این مانظور، در حالت H - شکل، قطر روتور ۶ متر در نظر گرفته شده است و براساس این قطر، ارتفاع روتور در توربین V - شکل معادل ۰/۲۵ متر خواهد بود. در شماتیک شکل ۲ نیز مشخص است که با تابت نگه داشتن قطر روتور H - شکل از قسمت بالای آن و نزدیک کردن قسمت پایینی روتور به یکدیگر، می‌توان هندسه روتور V - شکل را ایجاد کرد. زاویه حاصل شده از امتداد پره با محور توربین تحت عنوان زاویه مخروطی یا زاویه دلتا نامیده می‌شود. این زاویه معادل ۴۵ درجه لحاظ شده است.

۳. معادلات و مدل‌سازی

تحلیل توربین مورد نظر در این تحقیق براساس روش دی ام اس تی^۱ و با کمک نرم افزار متلب^۲ انجام می‌شود. این روش براساس روش مومنتوم بوده و در این روش روتور توربین به دو قسمت رو به باد و پشت به باد تقسیم شده و برای هر بخش روابط مومنتوم جریان به صورت جداگانه اعمال می‌شود. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، روتور توربین در امتداد مسیر جریان به بخش‌هایی تقسیم می‌شود که این موضوع با تقسیم‌بندی زاویه آزمیوت ($\Delta\theta$)^۳ متناسب است. جریان آزاد (V_∞) با برخورد به پره‌های روتور در نیمه رو به باد مقداری از انرژی خود را از دست داده و به V_e تقلیل پیدا می‌کند؛ این متغیر، سرعت جریان را در میانه توربین (میان

جدول ۲. مشخصات اولیه توربین مبنای.

ناتاکا	نوع ایرفول
۲ عدد	تعداد پره
۱۵۰ / ۰	وتر پره
۱ / ۰۵	ارتفاع پره
۰۵	قطر روتور
۱۶۲ / ۰ rpm	سرعت چرخش



شکل ۵. اعتبارسنجی مدل دی ام اس تی با داده‌های تجربی. [۲۶]

نیمه روتور به صورت جداگانه تکرار می‌شود.

$$f = \frac{Bc}{\lambda \pi r} \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \left(C_n \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} - C_t \frac{\sin \theta}{|\cos \theta| \cos \delta} \right) \left(\frac{W}{V_a} \right)^r d\theta \quad (13)$$

$$a_{new} = \pi / (f + \pi) \quad (14)$$

در گام بعد، با کمک نیروی مماسی وارد بر پره، گشتاور مورد نظر ایجاد شده و در نهایت توان تولیدی توربین توسط روابط ۱۵ تا ۱۸ به دست می‌آید که در این روابط، گشتاور پره متناسب با هر زاویه آزیموت، \bar{Q} گشتاور میانگین روتور \bar{Q} ضرایب C_Q گشتاور میانگین، λ نسبت سرعت پره و A مساحت جاروب شده توسط روتور توربین است.

$$Q(\theta) = r \cdot F_T(\theta) \quad (15)$$

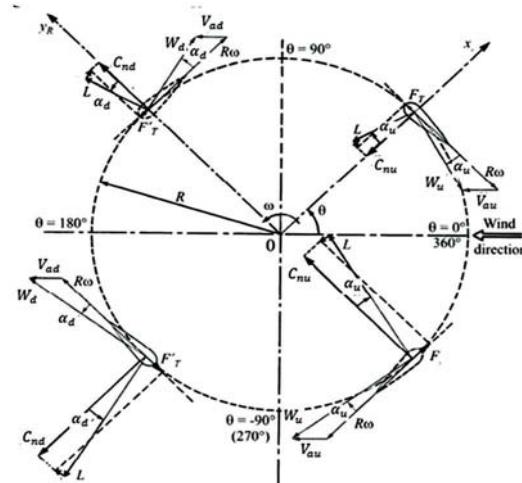
$$\bar{Q} = \frac{N}{2\pi} \int Q d\theta \quad (16)$$

$$C_{\bar{Q}} = \frac{\bar{Q}}{1/2 \cdot \rho A \cdot R \cdot V_a^r} \quad (17)$$

$$C_P = \lambda \cdot C_{\bar{Q}} \quad (18)$$

۴. اعتبارسنجی روش حل

به منظور اعتبارسنجی روش مورد استفاده، از یک توربین H - شکل و با مشخصات هندسی مطابق با جدول ۲ استفاده شده است و نتیجه حاصل شده از مقیاس ضریب توان با داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایشگاه سندیا^۶ در شکل ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده نسبت سرعت



شکل ۴. عکس العمل نیروها در صفحه روتور. [۲۴]

این عمل باعث می‌شود تا گردابهای تحت عنوان گردابهای نوک پره^۷ و به دنبال آن جریان فرو وریش^۸ و تغییر زاویه سرعت نسبی جریان و در نهایت کاهش زاویه حمله موثر در این نواحی ایجاد شود که نتیجه آن، کاهش عملکرد آبروی دینامیکی در قسمت نوک پره خواهد بود. بنابراین، برای بهبود روش دی ام اس تی، زاویه حمله موثر از اختلاف زاویه حمله ظاهری و زاویه حمله القابی ناشی از افت جریان از نوک پره است که از طریق روابط پرانتل به دست می‌آید.^۹

$$V_n = V_a \cos \theta \cos \delta \quad (5)$$

$$V_t = r\omega - V_a \sin \theta \quad (6)$$

$$W = \sqrt{(V_n)^r - (V_t)^r} \quad (7)$$

$$\alpha = \sin^{-1} (V_n/W) \quad (8)$$

در گام بعد می‌توان ضرایب نیروی برآ و پسا و به دنبال آن با تغییر دستگاه مشخصات، ضرایب نیروی عمودی و مماسی بر پره را مشابه روابط ۱۳ و ۱۴ به دست آورد. پس از به دست آمدن ضرایب نیرو، می‌توان مقدار نیرو را در هر مقطع از پره طبق روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه کرد. در این روابط، δ زاویه مخروطی پره، ρ چگالی هوا، c وتر Δh طول المان پره، W سرعت نسبی جریان در لحظه برخورد به پره و C_n و C_t به ترتیب ضرایب نیروی عمودی و مماسی بوده که متناسب با ضرایب برآ و پسای پره است.

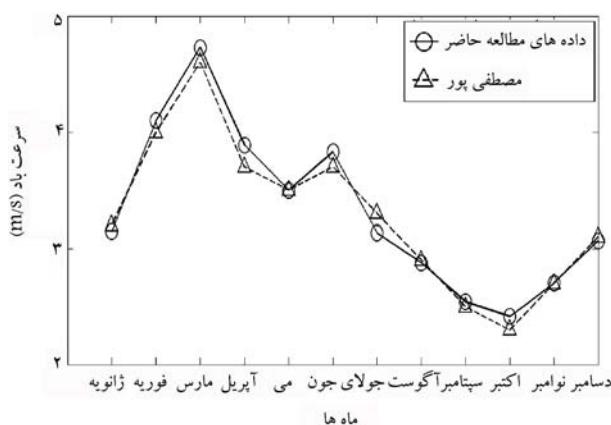
$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (9)$$

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (10)$$

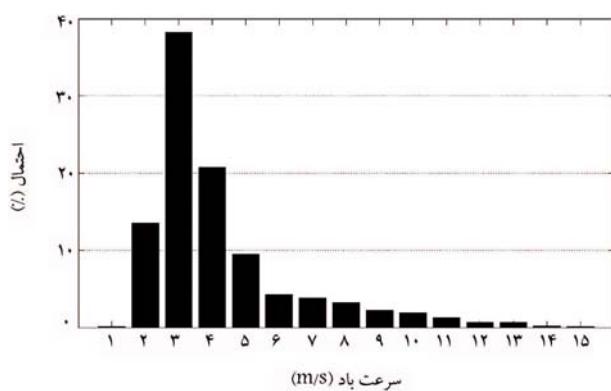
$$F_N(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_n \rho c \Delta h W^r \right) \quad (11)$$

$$F_T(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_t \rho c \Delta h W^r \right) \quad (12)$$

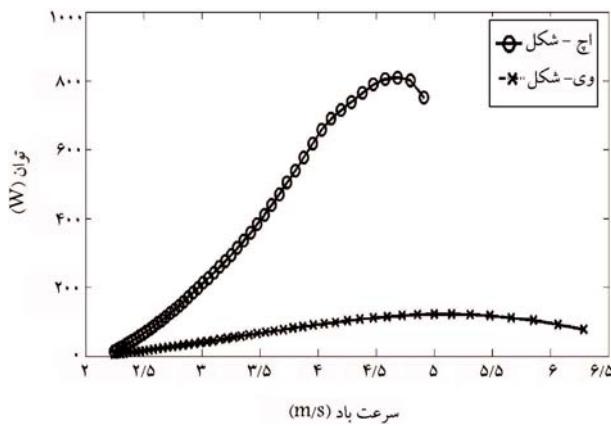
با محاسبه ضرایب نیروی عمودی و مماسی و با کمک روابط ۱۳ و ۱۴ می‌توان مقدار ضریب القابی جدید را به دست آورد. میزان همگرایی مدل ۱۳ / ۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. با محاسبه ضریب القابی جدید، سرعت نسبی جریان، زاویه حمله و ضرایب نیروهای مماسی و عمودی مجدداً محاسبه می‌شوند و این حلقه تا زمانی که به همگرایی متناسب برسد، برای هر المان از پره، هر زاویه آزیموت و برای هر دو



شکل ۶. اعتبارسنجی پروفیل سرعت باد با مرجع.^[۲۸]



شکل ۷. احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف در طول سال (Zahadan).



شکل ۸. منحنی توان توربین.

توانی در حدود 810 و 120 وات در سرعت بادهای $4/6$ و $4/8$ متر بر ثانیه حاصل کنند.

آنچه که از شکل ۸ استنباط می‌شود، کاهش 85 درصدی توان توربین V شکل نسبت به نوع H - شکل است. این موضوع ناشی از دو دلیل اصلی می‌باشد که عبارتند از: کاهش گشتاور خروجی از توربین به دلیل نزدیک تر شدن المان‌های پره به محور توربین و همچنین کاهش مساحت موثر رotor توربین V - شکل. از سوی دیگر، در محاسبه ضریب توان توربین، لازم است تا توان خروجی نسبت به توان باد عبوری از مساحت موثر آن سنجیده شود. منحنی ضریب توان نشان داده شده در شکل ۹ بیانگر کاهش ضریب توان به میزان 37 درصد نسبت به حالت H - شکل

پره V و محور قائم نشان دهنده ضریب توان توربین است. مشاهده می‌شود که روش دی ام اس تی مورد استفاده در این تحقیق توانسته است تا ضریب توان توربین را در نقطه کاری خود (محدوده نسبت سرعت 5) با مقدار خطای نسبی شش درصد تخمین بزند. همچنین، منحنی خطای مطلق نیز در شکل نشان داده شده است. اختلاف میان تحلیل انجام شده و داده‌های تجربی را می‌توان ناشی از عواملی همچون دنباله جریان،^۸ انبساط جریان^۹ و استال دینامیکی^{۱۰} دانست.

۵. پتانسیل انرژی باد در زاهدان

شهر زاهدان در مرکز استان سیستان و بلوچستان، در جنوب شرقی ایران و ارتفاع ۱۳۸۵ متری از سطح دریا واقع شده است که دارای جمعیتی حدود 6000 هزار نفر و مساحتی به میزان 78 کیلومتر مربع است. این شهر در ناحیه بادخیز قرار گرفته است که در طول سال در معرض بادهای قدرتمند فصلی در جهات مختلف قرار می‌گیرد. از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به بادهای 120 روزه اشاره کرد. روش محاسبه سرعت باد برای هر ماه (به صورت جداگانه) از میانگین‌گیری سرعت باد ماهانه در سه سال متوالی 2018 الی 2020 و در ارتفاع 10 متری از سطح زمین به دست آمده است. می‌توان پروفیل سرعت باد برای شهر زاهدان را مطابق روشی که ذکر شد، در شکل ۶ مشاهده کرد. همچنین، منبع داده‌های مورد استفاده با اطلاعات مرجع 27 مورد توربین مورد نظر است. با توجه به نمودار این شکل، مشاهده می‌شود که سرعت میانگین در طول سال برابر $3/77 m/s$ می‌باشد و بیشینه و کمینه سرعت متوسط باد به ترتیب در حدود $4/87 m/s$ و $2/9 m/s$ بر ثانیه است و در ماههای فوریه و اکتبر رخ می‌دهد. مطابق شکل ۷، با توزیع احتمال سرعت باد استنباط می‌شود که احتمال رخداد سرعت باد در بازه 3 الی 4 متر بر ثانیه به ترتیب در حدود 38 و 21 درصد است که از بیشترین احتمال برخوردار است.

در ادامه، با توجه به رابطه 19 و 20 می‌توان به ترتیب توان و چگالی انرژی باد در در این شهر را تخمین زد. در این روابط، V_n معرف سرعت باد در توزیع احتمال مورد نظر و p احتمال رخداد این سرعت است. در رابطه 20 پس از محاسبه توان باد، می‌توان با در نظر گرفتن یک سال (معادل 8760 ساعت)، بیشینه انرژی باد منطقه را محاسبه کرد. بنابراین، با توجه به توزیع سرعت باد زاهدان و این روابط می‌توان توان و انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود $855 kWh/m^3$ و $98 W/m^2$ تخمین زد.

$$P \sum_{n=1}^{15} \frac{1}{2} \rho V_n^3 \cdot p \quad (19)$$

$$E = P \cdot 8760 \quad (20)$$

۶. نتایج

با توجه به توزیع سرعت باد و احتمال رخداد آن در شهر زاهدان، مشاهده می‌شود که بیشترین پتانسیل انرژی باد در محدوده سرعت 3 الی 4 متر بر ثانیه رخ می‌دهد. با رسم منحنی توان توربین‌های مورد نظر، نمودارهای شکل ۸ حاصل می‌شود. مشاهده می‌شود که توربین‌های H - شکل و V - شکل به ترتیب توانسته‌اند بیشینه

جدول ۳. ارزیابی عملکرد توربین H - شکل و V - شکل.

نوع توربین	توان (W)	گشتاور منفی (N.m)	توان (W)	بیشینه	تولیدی	بیشینه	انرژی تولیدی
H - شکل	۸۱۰	۱۳۵	۲۴۵۰	۰/۴۵	۲۴۵۰	۰/۴۵	ضریب سالیانه
V - شکل	۱۲۰	۱۵	۴۵۰	۰/۲۸	۴۵۰	۰/۲۸	توان (K.W.h)

۷. تخمین هزینه تولید توان

به کمک ارزیابی اقتصادی می‌توان هزینه‌های تولید انرژی و میران سرمایه‌گذاری لازم را تخمین زد. هدف از ارزیابی اقتصادی، مقایسه مالی طرح‌های مختلف و اطمینان از به صرفه بودن پروژه است. لازم است تا مدیران و سرمایه‌گذاران از هزینه‌های اولیه و جاری پروژه و همچنین از مزایا و معایب طرح اطلاع داشته باشند. روش مورد استفاده برای این منظور مطابق مرجع [۲۷] است؛ هزینه تولید توان توربین به دو قسمت هزینه اولیه و هزینه جاری، مانند هزینه‌های سروپس و تعمیر و نگهداری تقسیم می‌شود. در رابطه ۲۱، بیانگر هزینه اولیه توربین و C_{OM} هزینه‌های جاری پروژه بوده که به صورت ضریبی (m) از هزینه اولیه توربین تعریف می‌شود؛ این بدان معناست که هزینه جاری توربین متناسب با هزینه اولیه توربین است.

$$C_{OM} = mC_I \quad (21)$$

با در نظر گرفتن هزینه اولیه، می‌توان هزینه خالص تمام شده (NPV) را با در نظر گرفتن نیخ تورم I و برای n سال به صورت رابطه ۲۲ بیان کرد. در نهایت، با توجه به تولید انرژی سالیانه (AEP) برای هر توربین، می‌توان میران هزینه لازم برای تولید هر کیلووات ساعت انرژی را به کمک رابطه ۲۳ نیز محاسبه کرد.

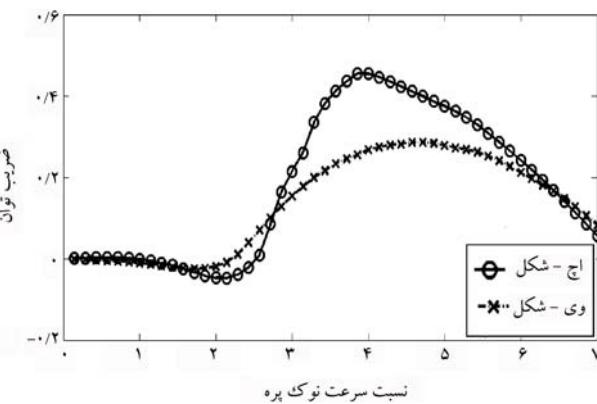
$$NPV = \frac{C_I}{n} \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (22)$$

$$C = \frac{NPV}{AEP} \quad (23)$$

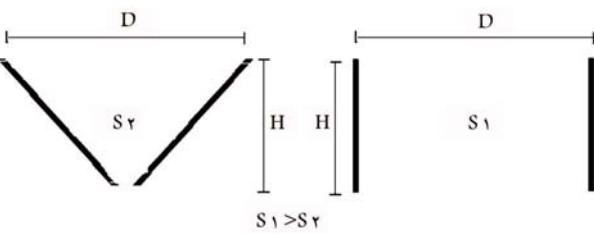
همچنین، فرض‌های زیر با توجه به مرجع [۲۸] در متغیرهای ذکر شده در روابط فوق دخیل است:

- هزینه اولیه توربین 10000 دلار به ازای هر کیلووات در نظر گرفته شده است؛
- هزینه‌های جاری از قبیل سروپس، تعمیر و نگهداری معادل 40 درصد قیمت اولیه توربین در نظر گرفته شده است؛
- هزینه‌های حمل و نقل، نصب و ... معادل شش درصد قیمت اولیه توربین در نظر گرفته شده است؛
- نیخ تورم معادل 35 درصد در نظر گرفته شده است؛
- عمر مفید توربین 20 سال در نظر گرفته شده است.

بنابراین، با در نظر گرفتن مقادیر فوق و استفاده از میران تولید انرژی سالیانه (جدول ۳) و جایگذاری آن‌ها در روابط ۲۱ الی ۲۳، می‌توان تخمینی از هزینه تولید انرژی به واسطه توربین بادی محور عمودی برای نوع H - شکل و V - شکل به دست آورد. این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. از آنجا که توان تولید شده توسط توربین H - شکل بیشتر است، بنابراین نیازمند ژراتور بزرگ تر و ادوات کترولی گران‌تری بوده و از همین رو، هزینه اولیه آن بیشتر از نوع V - شکل خواهد بود.



شکل ۹. منحنی ضریب توان توربین.



شکل ۱۰. مقایسه تصویر مساحت جاروب شده (مساحت موثر) توربین H - شکل و V - شکل.

است. کاهش مساحت موثر توربین V - شکل را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد. با توجه به پارامترهای ابعادی در نظر گرفته شده در بخش‌های قبل، مساحت موثر در توربین H - شکل و V - شکل به ترتیب معادل 36 متر مربع و 13 متر مربع است.

با ارزیابی بیشتر منحنی‌های عملکردی توربین، مشاهده می‌شود که توربین V - شکل دارای منحنی صاف‌تری بوده و برای سرعت بادهای مختلف دارای تغییر توان کمتری است؛ به عبارت دیگر، در این نوع توربین، توان خروجی حساسیت کمتری نسبت به تغییر سرعت باد دارد، در حالی‌که این موضوع برای توربین H - شکل بیشتر است. از تفاوت دیگر این دو نوع توربین می‌توان به لحظه راه‌اندازی اشاره کرد. با توجه به منحنی ضریب توان، مشخص است که در لحظه راه‌اندازی TSR (پایین) مقداری توان منفی ایجاد شده که به معنای وجود گشتاور منفی بوده و موجب عدم راه‌اندازی توربین خواهد شد. این توان منفی برای توربین V - شکل کمتر از 10 وات می‌باشد که نسبت به نوع H - شکل (حدود 70 وات) کمتر است؛ این بدان معناست که با زاویه دار کردن پره‌ها (با زاویه 45 درجه) مقدار توان منفی هفت برابر کوچکتر می‌شود. همچنین، انتظار می‌رود که با افزایش زاویه محرومی (δ)، از این گشتاور منفی کاسته شود. در توربین‌های H - شکل نیز به منظور کاهش این گشتاور نامطلوب در هنگام راه‌اندازی از روش‌هایی از جمله موتور راه‌انداز پره‌های جی - شکل، ترکیب روتورهای داریوس و ساونیوس و ... استفاده می‌شود.

در نهایت، خلاصه‌ای از عملکرد توربین در حالت H - شکل و V - شکل در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به توزیع سرعت باد در شهر زاهدان، مقدار انرژی تولید شده سالیانه برای توربین H - شکل در حدود 2450 کیلووات ساعت می‌باشد، در حالی‌که این مقدار برای نوع V - شکل در حدود 450 کیلووات ساعت است. این موضوع نشان می‌دهد که هر چند راه‌اندازی اولیه توربین H - شکل دشوارتر است اما توان خروجی از آن بسیار بیشتر از نوع V - شکل خواهد بود.

جدول ۴. مقایسه اقتصادی توربین های H - شکل و V - شکل.

هزینه	اولیه	جاری	خالص تمام شده	تولید انرژی
(\$/KWh)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
توربین H - شکل	۱۱۳۴	۶۸	۷۰	۰/۰۲۷۱
توربین V - شکل	۲۲۰	۱۰	۱۰	۰/۰۲۱۹

هزینه جاری توربین نیز صادق بوده و در نهایت می توان هزینه خالص تولید انرژی سالیانه (NPV) را برای توربین H - شکل حدود ۷۰ دلار برای توربین V - شکل ۱۰ دلار تعیین کرد.

- توان و ضریب توان توربین H - شکل به ترتیب 810 وات و 45% می باشد، در حالی که این مقادیر برابر نوع V - شکل 120 وات و 28% است:

- توربین V - شکل در هنگام راه اندازی اولیه دارای توان منفی در حدود 15 وات می باشد که هفت برابر از نوع H - شکل کمتر است. از این رو، راه اندازی این نوع توربین سهولت بیشتری داشته و نیاز به ادوات خاصی ندارد؛ از نظر اقتصادی نیز هزینه خالص تولید انرژی در توربین H - شکل حدود هفت برابر از توربین وی-شکل بیشتر است.

بنابراین، با توجه به مزایا و معایب هر کدام از این توربین ها می توان به این نتیجه رسید که توربین وی-شکل در مقایس کوچک شهری به دلیل هزینه های پایین تر و راه اندازی آسان تر نسبت به نوع H - شکل دارای اولویت است. از طرفی، توربین H - شکل به دلیل تولید توان بیشتر و بازدهی بالاتر می تواند برای نیروگاه ها و مزارع بادی مناسب باشد.

۸. نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی آماری سرعت باد در سه سال اخیر (۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰) در شهر زاهدان پرداخته شد. ارزیابی توزیع سرعت باد در این شهر نشان داد که زاهدان دارای سرعت میانگین سالیانه $3/77 m/s$ بوده و با توجه به احتمال رخداد سرعت های باد مختلف، پتانسیل بادی این شهر در حدود $98 W/m^2$ وات بر متر مربع است. توربین های H - شکل و V - شکل استفاده شده می توانند به ترتیب 10 وات را در سرعت باد $4/8 m/s$ بر ثانیه و 120 وات را در سرعت باد $4/8 m/s$ بر ثانیه تولید کنند. از نظر بازدهی نیز توربین H - شکل به دلیل داشتن مساحت مؤثر بیشتر و تولید گشتاور بالاتر نسبت به نوع V - شکل، دارای ضریب توانی در حدود 45% بوده و این در حالی است که ضریب توان توربین وی-شکل حدود 28% است.

پابلوشت ها

1. DMST Method
2. MATLAB
3. Azimuth Angle
4. Tip Vortex
5. Downwash
6. Sandia Lab
7. Tip Speed Ratio
8. Wake
9. Stream Tube Expansion
10. Dynamic Stall

منابع (References)

1. Eskin, N., Artar, H. and Tolun, S., 2008. Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), pp.839-851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.016>.
2. Kumar, A. and Prasad, S., 2010. Examining wind quality and wind power prospects on Fiji Islands. *Renewable Energy*, 35(2), pp.536-540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.021>.
3. Chaparzadeh, Feseqandis, R., 1999. Feasibility of applying wind turbine for achieving sustainable development. *Proceedings of 2th National Conference of Energy*.
4. Mirhosseini, M., Sharifi, F. and Sedaghat, A., 2011. Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp.449-459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.029>.
5. Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A. and Kalantar, V., 2011. Wind energy feasibility study for city of Shahr-e-Babak in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), pp.2545-2556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.030>.
6. Ghorashi, A.H. and Rahimi, A., 2011. Renewable and non-renewable energy status in Iran: Art of know-how and technology-gaps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp.729-736. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.037>.
7. Alamdari, P., Nematollahi, O. and Mirhosseini, M., 2012. Assessment of wind energy in Iran: A review. *Renew-*

- able and Sustainable Energy Reviews, 16(1), pp.836-860. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.007>.
8. Mostafaeipour, A., 2010. Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.93-111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.009>.
 9. Mostafaeipour, A., 2013. Economic evaluation of small wind turbine utilization in Kerman, Iran. *Energy Conversion and Management*, 73, pp.214-225. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.018>.
 10. Mousavi, S.M., Ghanbarabadi, M.B. and Moghadam, N.B., 2012. The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran. *Energy Policy*, 42, pp.651-656. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.038>.
 11. Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M. and Abbaszadeh, R., 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35(1), pp.188-201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.009>.
 12. Mostafaeipour, A. and Abarghooei, H., 2008. Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), pp.1758-1766. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.029>.
 13. Akdağ, S.A. and Güler, Ö., 2010. Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. *Applied Energy*, 87(8), pp.2574-2580. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.015>.
 14. Ucar, A. and Balo, F., 2009. Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy*, 86(10), pp.1864-1872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.016>.
 15. Fyriplis, I., Axaopoulos, P.J. and Panayiotou, G., 2010. Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy*, 87(2), pp.577-586. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.031>.
 16. Xydis, G., Koroneos, C. and Loizidou, M., 2009. Exergy analysis in a wind speed prognostic model as a wind farm siting selection tool: A case study in Southern Greece. *Applied Energy*, 86(11), pp.2411-2420. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.017>.
 17. Weigt, H., 2009. Germany's wind energy: The potential for fossil capacity replacement and cost saving. *Applied Energy*, 86(10), pp.1857-1863. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.031>.
 18. Bekele, G. and Palm, B., 2009. Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia. *Applied Energy*, 86(3), pp.388-396. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.05.012>.
 19. Jowder, F.A., 2009. Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain. *Applied Energy*, 86(4), pp.538-545. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.08.006>.
 20. Elhadidy, M.A. and Shaahid, S.M., 1999. Feasibility of hybrid (wind+ solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 16(1-4), pp.970-976. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00344-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00344-9).
 21. Kumara, E.D., Hettiarachchi, N. and Jayathilake, R., 2017. Overview of the vertical axis wind turbines. *Int. J. Sci. Res. Innov. Technol.*, 4, pp.56-67. doi:10.1016/j.egypro.2015.03.259.
 22. Mohammed, A.A., Ouakad, H.M., Sahin, A.Z. and Bahaidarah, H.M., 2019. Vertical axis wind turbine aerodynamics: Summary and review of momentum models. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(5), p.050801. <https://doi.org/10.1115/1.4042643>.
 23. Paraschivou, I., 2002. *Wind Turbine Design: With Emphasis On Darrieus Concept*. Presses Inter Polytechnique. [Book].
 24. Anderson, J.D., 1998. *A History of Aerodynamics: And Its Impact on Flying Machines (No. 8)*. Cambridge University Press. [Book].
 25. Mohammed, A.A., Ouakad, H.M., Sahin, A.Z. and Bahaidarah, H.M., 2020. Parametric study and comparison of aerodynamics momentum-based models for straight-bladed vertical axis wind turbines. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, pp.729-741. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04133-w>.
 26. Moghimi, M. and Motawej, H., 2020. Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, p.100616. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100616>.
 27. Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K. and Sedaghat, A., 2014. An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp.641-650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.016>.

تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه شارپی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شست و پنج با ضخامت متفاوت

جلال الدین صدر* (دانشجوی دکتری)

سید حجت هاشمی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه پری جند

علی‌اکبر مجیدی جیوندی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه پام‌نور

هدف از انجام این تحقیق، تعیین نیروهای تسلیم و بیشینه بارگذاری دینامیکی و ضرایب اصلاح برای پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انرژی با چقرمگی بالا است. برای این منظور، انرژی رشد ترک در فولاد API X65 با استفاده از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده به دست آمد. برای توصیف رفتار دینامیکی فولاد به ازای تغییر ضخامت نمونه شارپی، روابط توانی با دقت بالا برای تخمین انرژی شروع ترک، انرژی رشد ترک و نیروهای مذکور به دست آمد. میانگین ضرایب اصلاح برای کاربرد در مدل‌های پیش‌بینی شکست لوله‌های فولادی انتقال انرژی از تحقیق حاضر برابر $1/26$ به دست آمد که با نتایج موجود در پژوهش‌های صورت گرفته پیشین از مطابقت خوبی برخوردار است. با بررسی نیروهای مشخصه و ترسیم نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه، مشخص شد که افزایش ضخامت نمونه منجر به کاهش قابلیت کارسختی فولاد آزمایش شده می‌شود.

jalaleddin.sadr@yahoo.com
shhashemi@birjand.ac.ir
aliakbar.majidi@pnu.ac.ir

واژگان کلیدی: انرژی رشد ترک، انرژی شروع ترک، انرژی شکست، فولاد API X65، ماشین شارپی مجهز شده.

۱. مقدمه

تسلیم و بیشینه را تعیین نمایند.^[۱] با این حال، در دو دهه اخیر، استفاده از دستگاه شارپی مجهز شده قابل توجه نیست. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که موسسات و دانشگاه‌های مانند دانشگاه پوهانگ کره جنوبی، دانشگاه آخن آلمان، مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا و ... به منظور برآورده خواص مکانیکی فولادهای استفاده شده در صنعت نفت و گاز به سمت استفاده از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده مانند X65، X70، X80، X100 و X120 حرکت کرده‌اند. در دهه ۷۰ میلادی، به دلیل نگرانی از شکست خطوط انتقال نفت و گاز مدرن پژوهش‌گران بحثی با عنوان کنترل گسترش شکست نرم مطرح شد. مکسی در شرکت بیتل، مدل دو منحنی^۱ را جهت تعیین چقرمگی مورد نیاز برای توقف شکست نرم فولادهای مذکور در قالب انرژی ضربه شارپی توسعه داد.^[۲] این مدل شامل دو منحنی مستقل است که عبارتند از: ۱. منحنی فشارگذاری گاز^۲ که به عنوان منحنی محرك شکست^۳ معروف است و ۲. منحنی مقاومت گسترش ترک دینامیکی^۴ که به عنوان منحنی مقاومت شکست^۵ معرفی می‌شود.

مطالعه رفتار مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی از مسائل مهم در زمینه مهندسی است. از سازه‌هایی که در معرض بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند می‌توان به مخازن تحت فشاری که تحت نیروی زلزله قرار دارند یا هاوپیماهای، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها که به ترتیب در معرض نیروهای آزاد دینامیکی و هیدرودینامیکی (به خصوص ضربه‌های امواج دریا) قرار دارند، اشاره نمود. در همین راستا، جوامع مهندسی برای تعیین استحکام شکست مواد و سازه‌ها، آزمایش‌هایی را برای شبیه‌سازی نیروهای دینامیکی طراحی کرده‌اند. آزمون ضربه شارپی یکی از این آزمایش‌ها است. این آزمون کیفی است و تهی می‌توان چقرمگی و انرژی شکست مواد را از آن به دست آورد. مهندسان طراح برای طراحی سازه‌های تحت بارگذاری استاتیکی به نیروی تسلیم و بیشینه ماده برای مقایسه دو حالت حین کار و بحرانی نیاز دارند. به همین دلیل، دانشمندان متعددی اقدام به مجهز کردن دستگاه شارپی به نیروسنج نمودند تا بتوانند نیروهای نویسنده مسئول

* تاریخ: دریافت ۲۸/۳/۱۴۰۲، اصلاحیه ۱۱/۷/۱۴۰۲، پذیرش ۶/۸/۱۴۰۲.

استادیهای مقاله:

صدر، جلال الدین، هاشمی، سید حجت، و مجیدی جیوندی، علی‌اکبر، ۱۴۰۳. تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه شارپی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شست و پنج با ضخامت متفاوت. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰۰-۱۱۹، ص. ۱۱۹، DOI:10.24200/J40.2023.62502.1686.

همکاران نیز با استفاده از ضربه شارپی مجهز شده ۴۵۰ ژول، نمودارهای نیرو - جاهایی را برای عمق شیارهای متفاوت استخراج کرده و به محاسبه انرژی های جزء و نیروهای مشخصه پرداختند. در این تحقیق، اثر عمق شیار بر انرژی شکست و ضرایب تصحیح مطالعه شد.^[۱۷] آنها همچنین در حال انجام تحقیق بر روی اثر عمق شیار و ضخامت نمونه شارپی بر چقرمگی شکست (K_I) هستند. علاوه بر این، اثر زاویه شیار و شعاع نیز شیار بر انرژی شکست و چقرمگی شکست و ضرایب اصلاح انجام شده است که در آینده نزدیک به چاپ خواهد رسید.

ونگ و همکاران نیز یک مدل ریاضی برای انرژی ضربه شارپی ارائه کرده و کارایی آن را با تعدادی آزمون تجربی تأیید کردند.^[۱۸] تجزیه و تحلیل نظری و نتایج تجربی نشان داد که رابطه میان ارتفاع باقیمانده شیار^{۱۰} و انرژی ضربه از درجه دو پیروی می کند، در حالی که رابطه میان ضخامت نمونه و انرژی ضربه خطی است. مطالعه اثر ابعاد نمونه بر انرژی شکست از اهمیت ویژه ای برخوردار است و در آزمایش ضربه سقوطی برای فولادهای API X۷۰ و API X۸۰ نیز مطالعه شده است.^[۱۹]

همانگونه که در بالا اشاره شد، تعداد پژوهش هایی که از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده چهت ربرسی رفتار مواد در برابر نیروهای دینامیکی استفاده شده است، در مقایسه با پژوهش هایی که از دستگاه شارپی معمولی استفاده کرده اند، بسیار ناچیز است. اهمیت استفاده از این دستگاه زمانی مشخص می شود که طراح نیاز به پارامترهای طراحی سازه در برابر نیروهای دینامیکی داشته باشد. چرا که با استفاده از اطلاعات خروجی آن می توان ضرایب چقرمگی شکست دینامیکی (J_{Id} و k_{Id})^[۲۰] و در نتیجه ارزیابی اثرات دما و نیز بارگذاری بر ماده مورد نظر را به دست آورد.^[۲۱] از این رو، در این تحقیق به تعیین پارامترهای مهم شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه برای فولاد X۶۵ API با استفاده از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده پرداخته شده است. علاوه بر این، یک رابطه توانی جهت تخمین انرژی شکست برای ضخامت های متفاوت نمونه شارپی از فولاد مذکور است. همچنین، تغییرات ضربه اصلاح به ازای تغییر ضخامت محاسبه و گزارش شده است.

۲. ماده و روش انجام آزمایش

۱.۲. ماده آزمایش

فولادی که در این تحقیق استفاده شده است با نام تجاری API X۶۵ شناخته می شود. از این فولاد در لوله های انتقال صنعت نفت و گاز ایران بسیار استفاده می شود. مشخصات مربوط به این نوع فولادها در موسسه بین المللی نفت آمریکا^{۱۱} استاندارد شده است.^[۲۲] استحکام تسلیم و نهایی این فولاد به ترتیب برابر با ۴۹۰ و ۵۵۲ مگاپاسکال می باشد که نسبت ۴۹/۰ را تأمین می نماید. درصد ازدیاد طول در ۵۰ میلی متر برابر با ۲۱ درصد به دست آمد.^[۲۳] الزامات موسسه بین المللی نفت آمریکا حداقل و حداقل تنش تسلیم را برابر این فولاد به ترتیب برابر با ۴۴۸ و ۶۰۰ مگاپاسکال و در مورد تنش نهایی به ترتیب ۵۳۱ و ۷۵۸ مگاپاسکال تعریف می کند. مشاهده می شود که تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد مورد نظر در محدوده مورد نظر این استاندارد قرار گرفته است. در جدول ۱ علاوه بر ترکیب شیمیایی این فولاد مقدار مشخص شده آنها در موسسه بین المللی نفت آمریکا آورده شده است.

این فولاد با دو ریساختر فریت - پرلیتی یا فریت سوزنی - بینیتی تولید می شود که ساختار دوم به دلیل ترکیب بهتر، استحکام و چقرمگی، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و همچنین جوش پذیری عالی نسبت به ساختار اول در خطوط

براساس نتایج این مدل، برای طیف وسیعی از خواص مکانیکی و مقادیر انرژی شکست شارپی CVN، چقرمگی توقف شکست^۶ برای نمونه شارپی با ضخامت ۲/۳ برابر ضخامت نمونه استاندارد (که ۱۰ میلی متر ضخامت دارد)، به عنوان تابعی از تنش محیطی و هندسه لوله (شعاع و ضخامت) به صورت زیر کمی سازی شد:^[۲۴]

$$C_{V(2/3)} = 7/2 \times 10^3 \cdot \sigma_h^{1/3} (R t)^{1/3} \quad (1)$$

در این رابطه، R شعاع لوله، t ضخامت لوله و σ_h تنش محیطی می باشد. با استفاده از این معادله، یک مجهول (انرژی شارپی، هندسه یا فشار داخلی لوله) قابل حصول است.

با بهبود استحکام فولاد، چقرمگی شکست نیز افزایش یافت. اما مشخص شد که این مدل و دیگر مدل ها برای فولادهای با چقرمگی بالا (بالاتر از ۹۵ ژول) نتایج غیر محافظه کارانه ای را در مقایسه با انرژی شکست شارپی در آزمایشگاه پیش بینی می کند. به همین علت، محققین متعددی تحقیقات گستره ای برای اصلاح مدل مذکور انجام دادند.^[۲۵] هاشمی برای فولاد X۶۵ API نسبت انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک را به عنوان ضریب تصحیح معرفی کرد و از آن برای تخمین انرژی شکست شارپی فولاد پا به، فلز جوش و فلز ناچیه متأثر از حرارت^۷ استفاده کرد.^[۲۶] وی، همچنین برای سه فولاد API X۷۰، API X۸۰ و API X۱۰۰ ضرایب تصحیحی را به دست آورد.^[۱۰-۱۵]

انرژی شکست مواد نرم که به هنگام شکست دچار تغییر شکل پلاستیک می شوند، تنها در سطح مقطع مصرف نمی شود (محل تماش چکش با قطعه و اصطکاک نمونه با ستدان). ضمن این که مصرف انرژی در سطح مقطع یکسان نیست. بنابراین، انرژی شکست را نمی توان به خودی خود به عنوان یک خاصیت مکانیکی در نظر گرفت، زیرا تا حدودی به هندسه وابسته است. به همین دلیل، نمی توان ظرفیت تحمل ضربه یک سازه یا قطعه ای را که اندازه آن مشابه به اندازه استاندارد نیست، پیش بینی کرد. از این رو، تحقیقاتی متعددی برای یافتن ارتباط میان انرژی ضربه و بعد نمونه انجام شده است.

در مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا، لوکان و همکاران در پژوهشی^۸ انرژی شکست، نمودارهای دمای انتقال شکست نرم به ترد و ظاهر شکست برشی^۹ را برای فولادهای X۵۲، X۶۵ و X۱۰۰ گزارش کردند.^[۱۷] در این پژوهش، آنها روابطی را برای ارتباط انرژی شکست نمونه شارپی که دارای اندازه کامل است با نمونه های شارپی که اندازه های آن به ترتیب ۲/۳، ۲/۲، ۱/۲، ۱/۱/۴ برابر نمونه کامل است. ارائه کردند. لوکان در یک گزارش فنی نیروهای ویژه را برای فولادهای نام برده شده و با ابعاد بیان شده ارائه داد.^[۱۲] همچنین رابطه ای برای تخمین استحکام کششی نهایی دینامیکی از نیروی بیشینه اندازه گیری شده در آزمون شارپی مجهز شده توسط وی ارائه شد.^[۱۳] لوکان با انجام آزمایش های کششی در نیزه های کرنش مختلف و آزمایش های شارپی مجهز شده برای ۱۰ ماده مختلف، مقادیر استحکام تسلیم دینامیکی را که از آزمایش های کششی اندازه گیری شده و با استفاده از معادله سرور^۹ برآورد شده اند، جهت برآورد نیز کرنش معادل، مقایسه کرد.^[۱۴]

حسین زاده و همکاران با استفاده از شبیه سازی به مطالعه رابطه میان عمق شیار و انرژی شکست فولاد API X۶۵ پرداختند. آنها نتایج خود را با نتایج از آزمون های تجربی به دست آمده از دستگاه شارپی معمولی ۷۵۰ ژول زوئیک مقایسه کرده و یک رابطه نمایی میان انرژی شکست و عمق شیار نمونه شارپی ارائه کردند.^[۱۵] به طور مشابه، شاهسونی و هاشمی اثر شعاع شیار بر انرژی شکست فولاد API X۶۵ را با نرم افزار آباکوس شبیه سازی کرده و نتایج را با آزمون های تجربی انجام شده توسط دستگاه شارپی ۷۵۰ ژول معمولی مقایسه کردند.^[۱۶] صدر و



شکل ۲. نمای کلی از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده سنتام مدل ۴۵°.SIT



شکل ۳. یک دسته از نمونه های شاربی بعد از شکسته شدن در نیتروژن مایع (اعداد ضخامت های نمونه شاربی هستند).

برابر با $32/2$ کیلوگرم می‌باشد. زاویه‌ای که چکش از آن رها می‌شود برابر با 150° درجه می‌باشد. سرعت در لحظه برخورد برابر با $5/26$ متر بر ثانیه است. شعاع نوک چکش مطابق با استاندارد ASTM E $23^{[47]}$ برابر با 8 میلی‌متر است.

۱. نتایج تجربی

مطابق با استاندارد شارپی ASTM E23 و یا ASTM A370 نمونه استاندارد شارپی دارای سطح مقطع مربعی شکل به ابعاد $10 \times 10 \times 55$ میلیمتر و طول ۵۵ میلیمتر است که در وسط آن یک شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ میلیمتر ایجاد شده است.^[۲۷] اما در این تحقیق تعداد ۷ دسته از نمونه شارپی با خصامت‌های ۴ الی ۱۰ میلیمتر ساخته شد (شکل ۳). برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، از هر دسته ۳ عدد نمونه شارپی در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش، نمودارهای نیرو- جایه‌جایی برای هر نمونه استخراج شد. از نمودار میانگین در هر دسته برای گزارش نیروهای ویژه و میزان انرژی جذب شده و تعیین اثر تغییر خصامت بر انرژی شکست استفاده شد. برای گزارش نیروی تسلیم، مطابق با دستورالعمل استاندارد ۱۳-۲۲۹۸ ASTM و ۲۰۰۰ BS EN ISO ۱۴۵۵۶ عمل شده است.^[۲۸] با مراجعة به شکل ۵ قسمت ب دیده می‌شود یک منحنی، که معمولاً چند جمله‌ای می‌باشد، در قسمت بالایی، نمودار نیرو- جایه‌جایی، عبور داده شده است. محل برخورد این منحنی، با

جدول ۱. مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی.

عنصر	درصد وزنی	API 5L X65
آهن (Fe)	پایه	-
کربن معادل (CE)	٪/۳۴	حداکثر ٪/۴۳
کربن (C)	٪/٪۷۲	حداکثر ٪/٪۲۲
منگنز (Mn)	٪/٪۴۵	حداکثر ٪/٪۴۵
فسفور (P)	٪/٪٪۸	حداکثر ٪/٪۰۵
سولفور (S)	٪/٪٪۲	حداکثر ٪/٪۰۶
تیتانیوم (Ti)	٪/٪۱۵	-
سیلیکون (Si)	٪/٪۰۱	-
نایجیوم (Nb)	٪/٪۴۷	-
کرم (Cr)	٪/٪٪۴	-
مولیبدن (Mo)	٪/٪٪۴	-
وانادیوم (V)	٪/٪٪۵	-
نیکل (Ni)	٪/٪٪۹	-
مس (Cu)	٪/٪٪٪۸	-
آلومینیوم (Al)	٪/٪٪٪۳	-

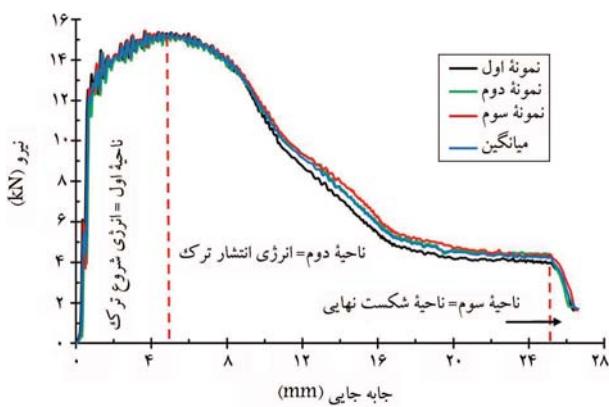


شکل ۱. ریزساختار فلز پایه فولاد API X65.

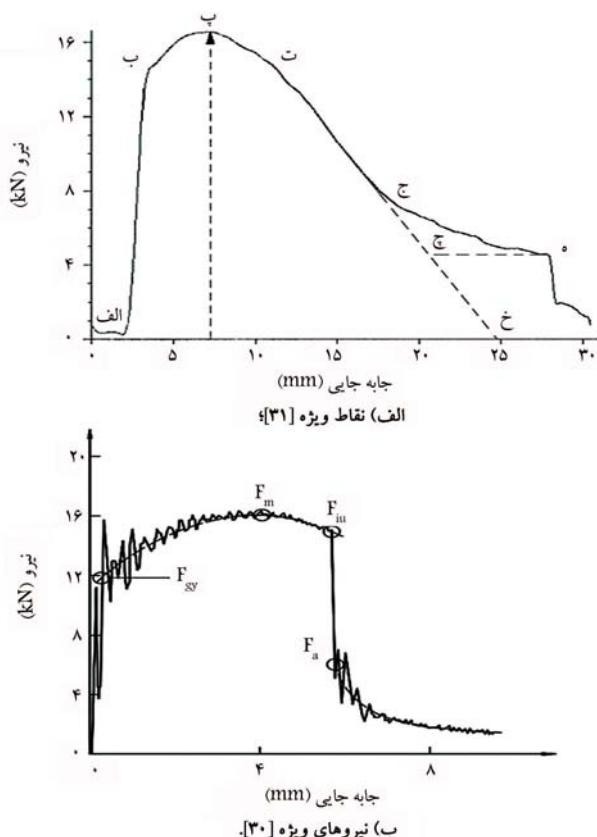
انتقال نفت و گاز ارجحیت دارد. ترکیب ویژگی های مذکور اجازه می دهد این نوع فولاد در ساخت لوله های با قطر زیاد برای انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر کاربرد داشته باشد. همانطور که در شکل ۱ دیده می شود، ریزساختار فلز یا به در این فولاد بسیار ریزدانه است (میانگین اندازه دانه حدود ۳ الی ۷ میکرون).^[۲۲] فریت سوزنی، ساختاری بسیار مناسب جهت افزایش چرمگی ناحیه جوش می باشد. بدلیل ماهیت درهم قفل شوندگی^[۱۲] ساختار فریت سوزنی به همراه دانه بندی ریز آن، مقاومت در برابر رشد ترک تورقی^[۱۳] افزایش می یابد. هاشمی و همکاران میکروساختار فلز یا به^[۱۴] فلز جوش^[۱۵] و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)^[۱۶] این فولاد را مطالعه کردند.^[۲۳,۲۴]

۲.۲. دستگاه شاریه مجهز شده

برای انجام آزمایش از دستگاه شارپ ۴۵۰ SIT سنتام استفاده شده است (شکل ۲).
مزیت این دستگاه نسبت به دیگر دستگاه‌های این شرکت قوانینی ثبت و گزارش داده‌های نیرو بر حسب جایه‌گایی است. علاوه بر این، به دلیل داشتن بندن‌هایی که به صورت یکپارچه ریخته‌گری شده است، صلیبیت و دقیق دستگاه به مقدار قابل توجهی، افزایش یافته است. این دستگاه مجهز به حکس C شکل است و وزن آن



شکل ۴. نمودار نیرو - جایه جایی برای نمونه های استاندارد شارپی.



شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی.

با گوشش‌های چکش با شعاع ۸ میلی‌متر (استاندارد E ۲۳ ASTM) است. نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که این پرش در نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از دستگاه ضربه شارپی که شعاع چکش آن مطابق با استاندارد ۲ - ۲ ISO ۱۴۸ [۲۳] میلی‌متر است، دیده نمی‌شود. [۲۴-۲۷] نوک این چکش به صورت یک منحنی ساده ۲ میلی‌متری است. نمونه شارپی در این قسمت از نمودار همچنان بر روی چکش و بدون گوشش است. نمونه شارپی در این قسمت از نمودار همچنان بر روی چکش قرار دارد اما در حال پرتاب شدن به بیرون از دستگاه شارپی می‌باشد. به عبارت دیگر چکش نمونه را خم کرده و از حد فاصل میان دو تکیه‌گاه (سندان) گذرانده است. در قسمتی از نمودار که سه منحنی از یکدیگر جدا می‌شوند (در جابه‌جایی حدود ۹ میلی‌متر)، دلیل آن می‌تواند عدم رفاقت یکسان نمونه‌ها نسبت به یکدیگر در نیرو - جابه‌جایی، که ماده وارد حالت بلاستیک شده است، باشد. به همین

قسمتی از نمودار نیرو - جایه جایی که در آن رفتار میان نیرو و جایه جایی متناسب است (بعد از قله دوم نوسانات) به عنوان نیروی تسلیم تعریف می شود. نیروی بیشینه نیز بیشترین نیرو حاصل شده از ضربه در منحنی نیرو - جایه جایی است.

نکته قابل توجه این است که با کم شدن ضخامت نمونه شاربی عمالاً چکش در محل مرکز ضربه^{۱۷} به نمونه شاربی ضربه وارد نمی‌کند. بنا براین، هر چقدر ضخامت نمونه شاربی کاهش یابد، خطای دستگاه شاربی در گزارش انرژی شکست افزایش می‌یابد. محل مرکز ضربه ۵ میلی‌متر بالاتر از سطحی است که نمونه استاندارد شاربی بر روی آن قرار داده می‌شود تا از طرف چکش به آن ضربه وارد شود. به همین دلیل، برای این که بتوان نمونه‌های شاربی با ضخامت ۴ الی ۹ میلی‌متر را به گونه‌ای بر روی ستدان قرار داد که مرکز ارتفاع نمونه دقیقاً منطبق با مرکز ضربه قرار گیرد، نمونه‌هایی با شکلی کاملاً مشابه با نمونه شاربی اما از جنس اسید پلی‌لاکتیک یا پلی‌لاکتايد^{۱۸} با استفاده از پرینتر سه بعدی ساخته شد و در زمان آزمایش در زیر نمونه‌ها به عنوان زیرکاری قرار داده شد. ضخامت‌های ۴/۰ الی ۳ میلی‌متر با گام ۰/۵ به ترتیب برای ضخامت‌های ۹ الی ۴ میلی‌متر ساخته شد. اما از آنجایی که این نمونه‌ها می‌توانند موجب افزایش انرژی شکست شوند، شیاری با عمق ۹/۷ میلی‌متر و با شعاع صفر در آن‌ها ایجاد شد تا مقاومت آنها به کمترین حد امکان در سده.

۲.۳. تفسیر نمودار شارپی

نمودار نیرو - جایه جایی نمونه استاندارد شارپی فولاد X65 API با استفاده از دستگاه شارپی مجهز شده ۴۵۰ ژول برای اولین بار به همراه مقدار میانگین آن در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. مطابق با استاندارد ۲۰۰۰ BS EN ISO ۱۴۵۵۶ این نمودار دارای نقاط ویژه ای است. نمودار به دست آمده از نوع F می باشد.^[۲۰] این نمودار دارای نقاط ویژه ای است. برای تفسیر نمودار شکل ۴ و نحو تعیین مقادیر مذکور شکل ۵ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۵ قسمت الف چنانچه رفتار ماده بسیار ترد باشد، نقطه ت بر پ منطبق می شود. در مواد با تردی کمتر، نمودار در نقطه ت دچار یک افت ناگهانی مشابه شکل ۵ قسمت ب می شود و نیرو به صورت جایه جایی - ثابت و به صورت عمودی تا نقطه ت که به نیروی توقف ترک 1° معروف است، افت یا سقوط ناگهانی می گردد.

اما همان گونه که در شکل ۴ دیده می شود، این قسمت از نمودار نه دارای شیب ثابت و نه دارای افت ناگهانی است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت فولادی که دارای چنین نموداری است (شکل ۴)، از چرمگی بالا و دمای انتقال شکست نرم به ترد بسیار پایین برخوردار است. این موارد هر دو از ویژگی های باز فولاد API X65 است. نکته دیگری که از نوع نمودار می توان به آن رسید این است که عدم وجود شیب مذکور بیان کننده آن است که فولاد در برابر رشد ترک ناپایدار بسیار مقاوم است. هرچند که در برخی از پژوهش های صورت گرفته اذاعان شده است که نمونه شاربی برای ایجاد یک حالت شکست پایدار بسیار کوچک است.^[۲۲] همچنین، با این نوع نمودار می توان گفت که نمونه دچار شکست نرم شده است. باید این نکته را به خاطر سپرد که شکست ترد به دما و اندازه دانه در نمونه شاربی وابسته است. بنابراین، دستگاه شاربی مجهز شده این امکان را به محقق می دهد تا با استخراج نمودار نیرو - جایه جایی مقومت ماده را در برابر رشد ترک ناپایدار در برابر نیروهای ضربه ای براورد کند.

همانگونه که در شکل ۴ دیده می شود، در انتهای منحنی نیرو - جایه جایی یک در، ایجاد شده است. دلیل این در، احتمالاً هدایت اثر رهمنشتر نمونه شاره به

جدول ۲. مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی.

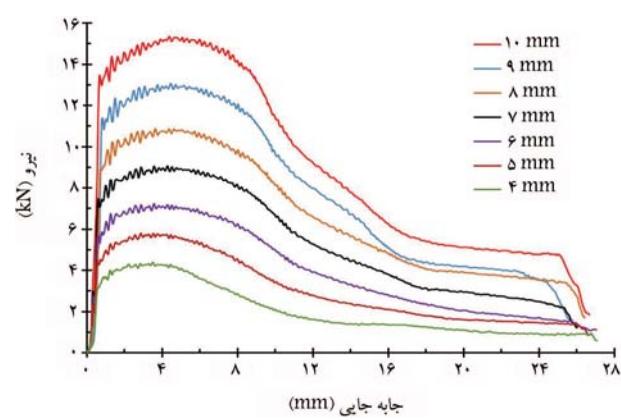
انرژی (ژول)												نمونه‌ها	نمونه	ضخامت	نیروی تسلیم	نیروی	شماره		
نسبت	نسبت	نسبت	نسبت	درصد	انرژی کلی	انرژی کلی	انرژی	تسلیم	تسلیم	بیشینه	F_{max}	(کیلونیوتون)	(کیلونیوتون)	(میلی‌متر)	گروه				
انرژی کلی	انرژی	انرژی	انرژی	اختلاف	انرژی کلی	انرژی کلی	انرژی	F_y/F_{max}	(MPa)	بیشینه	F_{max}	(کیلونیوتون)	(کیلونیوتون)	(میلی‌متر)	گروه	نمونه‌ها	ضخامت	نیروی	
شکست به رشد	شکست به ترک به ترک	شکست به ترک به ترک	شکست به ترک به ترک	شکست از رشد	شکست از رشد	شکست از ترک	شکست از ترک	شکست از مدار	شکست از صفحه	از صفحه	شکست	تسلیم	تسلیم	نیروی	شماره	نمونه‌ها	ضخامت	نیروی	
(ضرب کلی) E _{SG} / E _P	E _P / E _{SG}	E _i / E _{SG}	E _i / E _{SG}	درج	درج	کرنش‌سنج	کرنش‌سنج	درج	درج	دستگاه	دستگاه	ED	ED	ED	شماره	نمونه‌ها	ضخامت	نیروی	
1/۲۶	0/۸	0/۲	۴۷	۱۲	۵	۵۹	۶۲	0/۷۱	۳۴۲	۴/۳۹	۳/۱۳	۴	۱						
1/۲۴	0/۸۱	0/۱۹	۶۷	۱۶	۹	۸۳	۹۱	0/۷۲	۳۶۱	۵/۷۲	۴/۱۳	۵	۲						
1/۲۵	0/۸	0/۲	۹۴	۲۴	۶	۱۱۸	۱۲۶	0/۷۶	۳۹۶	۷/۱۴	۵/۴۵	۶	۳						
1/۲۶	0/۷۹	0/۲۱	۱۲۰	۳۱	۷	۱۵۱	۱۶۳	0/۷۷	۴۳۱	۸/۹۵	۶/۹۲	۷	۴						
1/۲۶	0/۸	0/۲	۱۴۶	۳۷	-۱	۱۸۳	۱۸۱	0/۸۲	۴۷۹	۱۰/۷۵	۸/۷۹	۸	۵						
1/۲۷	0/۷۹	0/۲۱	۱۷۴	۴۷	۱	۲۲۲	۲۲۰	0/۸۳	۵۲۱	۱۲/۹۶	۱۰/۷۳	۹	۶						
1/۳۰	0/۷۵	0/۲۵	۱۹۶	۶۴	-۲	۲۶۰	۲۵۵	0/۸۴	۵۵۹	۱۵/۲۲	۱۲/۸۰	۱۰	۷						
1/۲۶	0/۷۹	0/۲۱										میانگین							

همان‌گونه که در بالا اشاره شد، هدف تعیین نیروهای ویژه برای فولاد مورد نظر است. در جدول ۲ علاوه بر انرژی کلی شکست خوانده شده از صفحه مدرج دستگاه، انرژی کلی شکست محاسبه شده با استفاده از اطلاعات به دست آمده از مدار کرنش‌سنج، اختلاف میان این دو انرژی، انرژی شروع تک و انرژی رشد تک، نیروی تسلیم F_{gy} و نیروی بیشینه F_{max} آورده شده است.

بیشترین مقدار انرژی که از صفحه مدرج خوانده شد برابر با ۲۵۵ ژول برای نمونه با ضخامت کامل (۱۰ میلی‌متر) و کمترین مقدار نیروی تسلیم به ترتیب برابر با ۳ و ۴ میلی‌متر به دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار نیروی تسلیم به ترتیب برابر با ۳ و ۱۳ کیلونیوتون حاصل شد. مقادیر متناظر برای نیروی بیشینه نیز به ترتیب برابر با ۴ و ۱۵ کیلونیوتون به دست آمد. برای محاسبه تنش تسلیم نیاز به ضربی قید C_{gy} است که به نوع چکش (۲ یا ۸ میلی‌متری) و شعاع نوک شیار نمونه شارپی بستگی دارد.^{۱۲} از آنجاکه در این تحقیق نمونه‌های با شیار V شکل توسط دستگاه شارپی مجهز شده با چکش ۸ میلی‌متر (مطابق با استاندارد ASTM E۲۳) آزمایش شده‌اند، ضربی مذکور برابر با $1/۳۳۶$ می‌باشد.^{۱۳} رابطه محاسبه تنش تسلیم در مرجع مذکور به صورت زیر است و نتایج آن برای این تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

$$\sigma_{gy} = \frac{۳/۷۳۲ F_{gy} W}{C_{gy} B(W-a)^۲} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، W عرض نمونه شارپی، a عمق شیار، B ضخامت نمونه شارپی، F_{gy} نیروی تسلیم و C_{gy} ضربی قید است. به لحاظ ریاضی، در رابطه ۲ تمامی متغیرها به غیر از F_{gy} و B ثابت هستند. بنابراین، این دو متغیر تعیین‌کننده تنش تسلیم خواهد بود. همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است، با افزایش ضخامت، تنش تسلیم افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد اثر نیروی تسلیم که در صورت کسر قرار دارد، به مراتب بیشتر از اثر ضخامت است که در مخرج کسر قرار گرفته است. این امر به دلیل ماهیت دینامیکی بارگذاری است. در انتها، می‌توان به این موضع اذعان داشت که تغییر تنش تسلیم با تغییر ضخامت به صورت خطی است. در جدول ۲ نسبت انرژی شروع تک به انرژی کلی شکست و نسبت انرژی رشد تک به انرژی کلی شکست محاسبه شده‌اند. در ستون آخر جدول ۲ نیز نسبت



شکل ۶. میانگین نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای تمامی ضخامت‌ها (۷ گروه نمونه‌ها).

دلیل است که معیارهای آسیب مقاومت و با دقت‌های متفاوت برای توصیف رفتار مواد زمانی که وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند، ارائه شده است. از جمله این معیارها که سیار پرکاربرد است می‌توان به معیار گرسون - تیورگارد - نیدلمن ۲° اشاره کرد. شاهسونی، محیط‌زاده و هاشمی با استفاده از این معیار به شیوه‌سازی آزمایش ضربه شارپی پرداختند و ضربی قید مذکور را استخراج نمودند.^{۱۴} شایان ذکر است که در دو مرجع مذکور از دو دستگاه شارپی مقاومت استفاده شد.

جهت اطمینان از دقت اطلاعات به دقت آمده از کرنش سنج باید به منطقی بودن قسمت الاستیک ماده برای هر سه نمونه استناد نمود. در شکل ۴ دیده می‌شود که هر سه نمودار از سه نمونه استاندارد شارپی در قسمت مذکور از انطباق بسیار خوبی برخوردار هستند. علاوه بر این، در قسمت تغییر شکل پلاستیک و قسمت نرم شوندگی بعد از آن (حدفاصل نقاط پ-تا-ت) بر یکدیگر منطبق هستند.

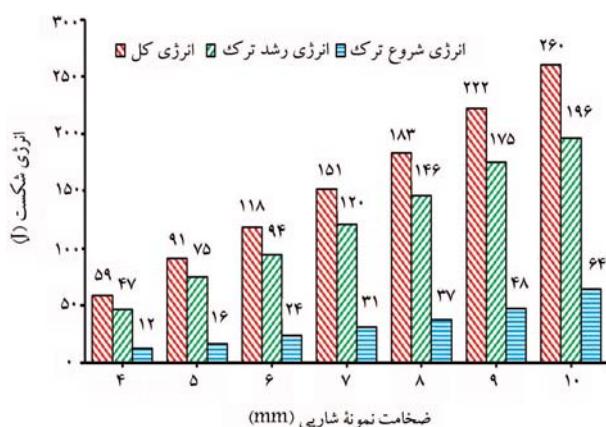
در شکل ۶ مقادیر میانگین نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای ۷ ضخامت مختلف برای مقایسه آورده شده است. مطابق با این شکل، با کاهش ضخامت نمونه شارپی اندازه نمودار نیرو - جابه‌جایی نیز کوچک می‌شود. متعاقب با آن نیز انرژی مورد نیاز برای شکست نمونه و البته نیروهای ویژه کاهش می‌یابد.

انزی کل حاصل از اطلاعات کرنش‌سنج است. t ضخامت، E_i انزی شروع ترک و E_p انزی رشد ترک است.

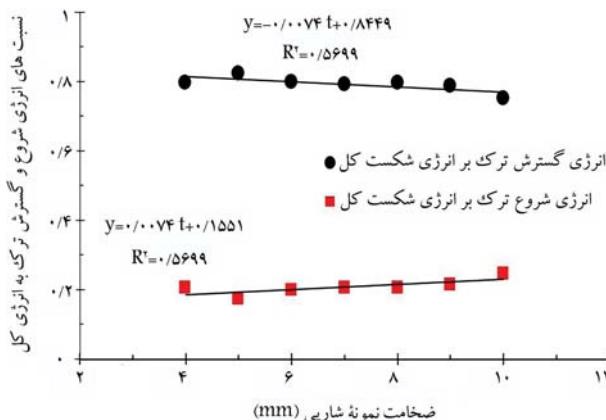
برای مقایسه بهتر تغییرات انزی های بیان شده نسبت به تغییرات ضخامت، یک نمودار ستوانی در شکل ۸ آورده شده است.

در شکل ۹ تغییرات نسبت انزی شروع ترک به انزی کل شکست و نسبت انزی رشد ترک به انزی کل شکست در برابر تغییرات ضخامت ترسیم و یک برازش خطی انجام شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، تا ضخامت ۹ میلی‌متر نسبت انزی شروع ترک به انزی کل روند افزایشی آرامی دارد. به همین ترتیب، در رابطه با نسبت انزی رشد ترک به انزی کل نیز روند کاهشی آرام دیده می‌شود. اما در ضخامت ۱۰ میلی‌متر یک پرش ۵ درصدی در هر دو انزی دیده می‌شود. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت باعث می‌شود که انزی شروع ترک سهم بیشتری را برای رشد ترک تقاضا کند تا بتواند قیود (مواد) جلوی ترک را تسیل کرده و ناحیه پلاستیک را در آن نقطه ایجاد نماید.

این موضوع، همانطور که قبلاً برای ضرایب اصلاح نیز بیان شد، نظریه وابسته بودن انزی و ضرایب اصلاح به انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای و اندازه ناحیه پلاستیک را تقویت می‌کند، ثابت می‌کند. از این نمودار چنین استنباط می‌شود که در ضخامت‌های کمتر از ۴ میلی‌متر، تمامی انزی صرف رشد ترک می‌شود. علت این امر این است که با نازک‌تر شدن نمونه ماده کمتری در برابر نوک ترک برای جذب انزی تغییر شکل پلاستیک موجود است، به همین دلیل.



شکل ۸. تغییرات انزی شروع، رشد و کل ترک در برابر تغییرات ضخامت.



شکل ۹. تغییرات نسبت انزی شروع و رشد ترک به انزی کل شکست در برابر تغییرات ضخامت.

انزی شکست کل به انزی رشد ترک که به عنوان ضریب اصلاح معرفی می‌شود، برای تمامی ضخامت‌ها آورده شده است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، از این مقادیر برای پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انزی با چقورمگی بالا که با دستگاه ضربه شارپی مرسوم آزمایش می‌شوند، استفاده می‌شود.

با توجه به مقادیر حاصل شده دیده می‌شود که ضرایب تصحیح تا ضخامت ۹ میلی‌متر میان مقادیر $1/25$ الی $1/27$ تغییر می‌کنند. به محض آن که ضخامت به

۱۰ میلی‌متر می‌رسد، مقدار مذکور به $1/30$ ارتقا می‌یابد. علت این امر را می‌توان به انتقال از حالت تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای نسبت داد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب اصلاح به حالت بارگذاری و متعاقباً به اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک بستگی دارند.

مقدار ضرایب اصلاح به دست آمده در این تحقیق برای ضخامت ۱۰ میلی‌متر با مقدار به دست آمده در مرجع^[۱] برابر می‌باشد. میانگین حاصل نیز برابر با $1/26$ است.

برای توصیف رفتار ماده، تغییرات انزی در برابر تغییرات ضخامت در شکل ۷ ترسیم شد. همان‌گونه که از شکل ۷ و نتایج ارائه شده در جدول ۲ قابل مشاهده است، نتایج ارائه شده توسط صفحه مدرج دستگاه با نتایج حاصل شده از مساحت زیر منحنی نیرو - جایه‌جایی اختلاف بسیار کمی دارد. بیشترین و کمترین اختلاف به ترتیب برابر با ۶ و ۱ درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان رفتار ماده را به ازای تغییر ضخامت با یک رابطه ریاضی که از برازش منحنی بر داده‌های حاصل شده از صفحه مدرج دستگاه به دست آمده است، توصیف نمود.

در شکل ۷، علاوه بر نتایج دایال دستگاه و کرنش‌سنج، انزی شروع و رشد ترک نیز ترسیم و با نمودار توانی برازش شد. روابط توانی حاصل شده در تمامی موارد دارای دقت بسیار بالا است.

روابط ریاضی برای انزی دایال یا صفحه مدرج دستگاه، انزی کرنش‌سنج، انزی شروع و رشد ترک به ترتیب در روابط ۳ الی ۶ آورده شده است:

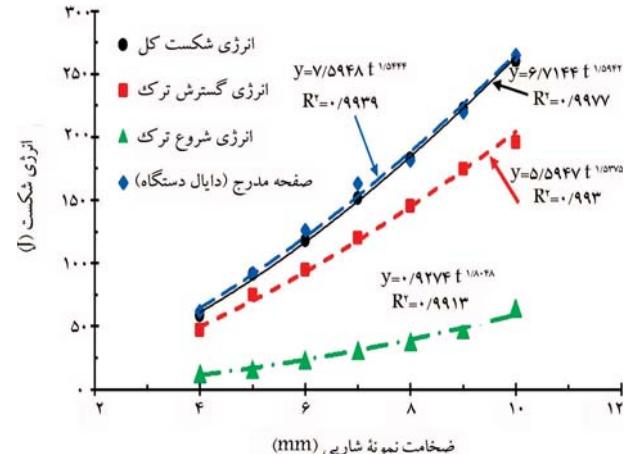
$$ED = 7/0948 t^{1/5444} \quad (3)$$

$$ESG = 6/7114 t^{1/594} \quad (4)$$

$$E_i = 0/9274 t^{1/5444} \quad (5)$$

$$EP = 5/9247 t^{1/5372} \quad (6)$$

در روابط بالا، ED و ESG به ترتیب انزی کل صفحه مدرج دستگاه شارپی و



شکل ۷. تغییرات انزی در برابر تغییرات ضخامت.

انرژی کل شکست فولاد API X65 به طور مستقیم و تجربی از دستگاه شارپی مجهز شده و تعیین ضرایب اصلاح جهت پیش‌بینی شروع شکست از اهداف این تحقیق بود.

نتایج این پژوهش را می‌توان به صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

۱. با استفاده از نتایج آزمایش شارپی مجهز شده نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای ضخامت‌های مختلف و محاسبه نیروهای ویژه و انرژی‌های مذکور مطابق جدول ۲ محاسبه شد:

۲. به دلیل ماهیت دینامیکی بارگذاری، اثر افزایش نیروی تسلیم بر تنش تسلیم به مراتب بیشتر از اثر افزایش ضخامت است:

۳. روابط توانی برای تخمین انرژی‌های شکست و نیروهای ویژه به ازای تغییر ضخامت نمونه شارپی با دقت بالا ارائه شد:

۴. با بررسی ضرایب اصلاح مشخص شد که این ضرایب به حالت بارگذاری (تشن) صفحه‌ای یا کرنش صفحه‌ای) و اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک وابسته‌اند:

۵. انرژی شکست به حالت بارگذاری و اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک وابسته است:

۶. کاهش ضخامت، سهم انرژی رشد ترک نسبت به شروع ترک را بیشتر می‌کند:

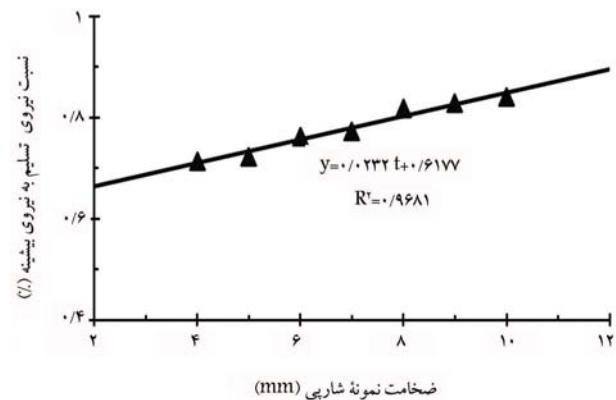
۷. طرفیت دستگاه ضربه شارپی برای نمونه‌هایی با انرژی کمتر از ۲۵ ژول تأثیری بر جذب انرژی فولاد آزمایش شده ندارد:

۸. برای ضخامت‌های ۴ تا ۹ میلی‌متر، انرژی شروع ترک مقدار ۲۰ درصد از کل انرژی را دریافت می‌گیرد، اما با افزایش ضخامت به ۱۰ میلی‌متر، به دلیل انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای این مقدار به ۲۵ درصد افزایش یافت:

۹. از کاربردهای مهندسی روابط به دست آمده می‌توان به تعیین انرژی شکست ورقهایی که ضخامت آنها کمتر از ابعاد نمونه استاندارد شارپی است (۱۰ میلی‌متر) اشاره کرد. بنابراین، دیگر نیازی به صرف هزینه برای ساخت نمونه و آزمایش ضربه شارپی نمی‌باشد.

فهرست علامت

- J: انرژی شکست نمونه شارپی با ضخامت ۲/۳ ضخامت نمونه استاندارد (۲/۳): C_V
- R : شاعر لوله mm
- t : ضخامت لوله mm
- σ_h : تنش محیطی MPa
- F_{gy} : نیروی تسلیم kN
- F_{max} : نیروی بیشینه kN
- E_D : انرژی شکست صفحه مدرج J
- E_{SG} : انرژی شکست کرنش سنج J
- E_i : انرژی شروع ترک J
- E_p : انرژی گسترش ترک J



شکل ۱۰. تغییرات نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه در برابر تغییرات ضخامت.

نیازی کمتری به انرژی برای شروع ترک نیاز است. در نقطه مقابل، اگر ضخامت زیاد شود، این انرژی شروع ترک است که سهم بیشتری را برای شروع درخواست می‌کند.

نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه در جدول ۲ آورده شده است و تغییرات آن نسبت به ضخامت در شکل ۱۰ ترسیم شده است. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش ضخامت نسبت مذکور کاهش می‌یابد. و این یعنی که کارخانه فولاد با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰ این نسبت با یک رابطه خطی که از دقت بسیار خوبی برخوردار است، برآش شده است.

با بررسی نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نهایی، مشخص شد که می‌توان آنها را نیز با یک متابع نهایی توصیف نمود. این دو نیرو به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$F_y = 0.3447t^{1.558} \quad (7)$$

$$F_{max} = 0.6432t^{1.3617} \quad (8)$$

نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که معمولاً در پژوهش‌های تجربی متابع و درصد خطای بیان می‌شود. محیط زاده و هاشمی در پژوهشی علاوه بر مطالعه اثر تغییرات تکانه بر انرژی شکست شارپی به بررسی میزان خطای روابط ارائه شده (انرژی شکست در برابر انرژی برخورد و سرعت برخورد) در آزمون ضربه شارپی پرداخته‌اند.^[۲] حداقل میزان خطای سیار کم و حدود ۴/۲ درصد گزارش شد. همچنین، برین به بررسی متابع خطای و تحلیل آماری انرژی ضربه شارپی ۲۰ لوله فولادی API X65 با هندسه و ترکیب شیمیایی یکسان برای سه منطقه فلز پایه، فاز جوش و منطقه متأثر از حرارت پرداخت.^[۳] تحلیل ۶۰۰ داده از فلز پایه نشان داد توزیع هیستوگرامی انرژی شکست نرمال است و توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک بود. بیشترین انحراف معیار ۲۰ ژول گزارش شد.

مسلمان متغيرهای بسیار زیادی مانند ابعاد و هندسه نمونه و چکش، سرعت اولیه، ساخت نمونه‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری، وضعیت سندان و قرارگیری نمونه بر روی آن در تنایع دخیل هستند، اما در حالت کلی خطای ناشی از این آزمون سیار کم است. بنابراین، برای دریافت اطلاعات بیشتر در مورد متابع و درصد خطای در آزمون ضربه شارپی می‌توان به دو مرجع مذکور مراجعه کرد.

تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید بابت در اختیار قرار دادن فولاد API X65 و از دانشگاه پیام نور کرمان جهت فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی قدردانی می‌نماید.

۴. نتیجه‌گیری

تعیین نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه، انرژی شروع و رشد ترک و

1. Battelle Two-curve Model
2. Gas-Decompression
3. Fracture-Driving Curve
4. Dynamic Crack-Propagation Resistance
5. Fracture Resistance Curve
6. Arrest Fracture Toughness
7. Heat Affected Zone
8. Shear Fracture Appearance
9. Server's Equation
10. Ligament
11. American Petroleum Institute
12. Interlocking Nature
13. Cleavage Crack
14. Base Material
15. Weld Metal
16. Heat Affected Zone
17. Center of Percussion
18. Polylactic Acid or Polylactide, PLA
19. Crack Arrest Force
20. Gurson-Tvergaard-Needleman
21. Constrain Factor

منابع (References)

1. Manahan, M.P. and Siewert, T.A., 2006. The history of instrumented impact testing, *Journal of ASTM International*, 31(2), <https://doi.org/10.1520/JAI12867>.
2. Maxey, W.A., 1974. Fracture initiation, propagation, and arrest. 5th Symposium on Line Pipe Research, Houston, USA.
3. Zhu, X.-K. and Leis, B.N., 2013. Ductile fracture arrest methods for gas transmission pipelines using Charpy impact energy of DWTT energy. *Journal of Pipeline Engineering*, pp.259-272.
4. Hashemi, S.H., 2009. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, pp.533-540. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.01.011>.
5. Hashemi, S.H., 2008. Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85, pp. 879-884. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.04.011>.
6. Hashemi, S.H., Howard, I.C., Yates, J.R. and Andrews, R.M., 2004. The transferability of micro-mechanical damage parameter in modern line pipe steel. *European Conf. on Fracture*, Stockholm, Sweden.
7. Hashemi, S.H., Howard, I.C., Yates, J.R. and Andrews, R.M., 2005. Measurement and analysis of impact test data for X100 pipeline steel. *Applied Mechanics and Materials*, 3-4, pp.369-376. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.3-4.369>.
8. Hashemi, S.H., Howard, I.C., Yates, J.R., Andrews, R.M. and Edwards, A.M., 2006. Estimation of slant tearing energy for high-grade pipeline steel from instrumented Charpy test data and its transferability to large structures. *6th Int. Pipeline Conf*, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2006-10069>.
9. Hashemi, S.H. and Jalali, M.R., 2006. Experimental study of Charpy impact characteristics of high strength spiral welded gas pipeline. *Int Pipeline Conf*, Calgary, Alberta, Canada, <https://doi.org/10.1115/IPC2006-10068>.
10. Hashemi, S.H. and Jalali, M.R., 2008. Evaluation of fracture initiation energy in API X65 pipeline steel. *7th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2008-64149>.
11. Lucon, E., McCowan, C.N. and Santoyo, R.L., 2016. Overview of NIST activities on sub-size and miniaturized charpy specimen: Correlation with full-size specimens and verification specimens for small-scale pendulum machines. *Journal of Pressure Vessel Technology*. <https://doi.org/10.1115/1.4032474>.
12. Lucon, E., McCowan, C.N. and Santoyo, R.L., 2015. Impact characterization line pipe steels by means of standard sub-size and miniaturized Charpy specimens. *National Institute of Standards and Technology*. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1865>.
13. Lucon, E., 2016. Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data. *Materials and Design*, 97, pp. 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.116>.
14. Lucon, E., 2016. Experimental assessment of equivalent strain for an instrumented Charpy test. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 121, pp.165-179. <https://doi.org/10.6028/jres.121.007>.
15. Hosseinzadeha, A., Hashemi, S.H., Rastegari, H. and Maraki, M.R., 2022. Investigation of the notch depth effect on Charpy fracture energy and fracture surface features of API X65 steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 35, <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2066241>.
16. Shahsavani, A.R. and Hashemi, S.H., 2020. Experimental and numerical investigation of initial notch radius effect on Charpy fracture energy in API X65 steel. *Amirkabir Journal of Mechanical engineering*, 52(5), pp.1139-1152. [In Persian]. <https://doi.org/10.22060/MEJ.2018.14130.5804>.
17. Sadr, J., Hashemi, S.H. and MajidiJirandehi, A.A., 2023. Determination of energy-notch depth relationship using force-displacement diagrams in instrumented Charpy impact testing of API X65 steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 12(6), pp.149-162. [In Persian]. <https://doi.org/10.22044/JSFM.2023.12084.3624>.
18. Wang, W., Wang, P., Liu, X., Dong, Z. and Fang, H., 2021. Mathematical model for Charpy impact energy of V-notch specimen. *Advances in Materials Science and Engineering*, ID 5330068. <https://doi.org/10.1155/2021/5330068>.
19. Hong, S., Shin, S.Y., Lee, S. and Kim, N.J., 2011. Effects of specimen thickness and notch shape on fracture modes in the drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(9), pp.2619-2632. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0697-9>.

20. Shin, S.Y., Hwang, B., Lee, S. and Kang, K.B., 2007. Effects of notch shape and specimen thickness on drop-weight tear test properties of API X70 and X80 line-pipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(3), pp.537-551. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-9073-6>.
21. Pereira, L.C., Garcia de Blas, J.C., Griza, S. and Darwisch, F.A.I., 2021. Use of instrumented Charpy testing on the fracture toughness characterization of metallic materials. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 18, pp.1-11. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20212469>.
22. API Specification 5L. 2013. Specification for line pipe.
23. Hashemi, S.H., 2011. Strength hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering A*, 528, pp. 1648-1655. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.089>.
24. Hashemi S.H., and Mohammadyani, D. 2012. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, pp.8-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.011>.
25. Majidi-Jirandehi, A.A., Hashemi, S.H., Ebrahimi-Nejad, S. and Kheybari, M., 2021. Impact of crack propagation path and inclusion elements on fracture toughness and micro-surface characteristics of welded pipes in DWTT. *Material Research Express*, 8, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac2ae0>.
26. Tazimi, M., Hashemi, S.H. and Rahnama, S., 2020. Experimental study of fracture surface characteristics if inhomogeneously drop weight tear test specimen made from API X65 steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 10(1), pp.77-91. [In Persian]. <https://doi.org/10.22044/JSF.M.2020.9029.3053>.
27. ASTM E23-16b, 2016. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.
28. ASTM A370-16, 2016. Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products.
29. ASTM E2298-13a, 2013. Standard test method for instrumented impact testing of metallic materials.
30. BS EN ISO 14556, 2002. Steel-Charpy V-notch pendulum impact test-Instrumented test method.
31. Vodopivec, F., Arzensek, D., Vojvodi-Tuma, J. and Celin, R., 2008. The Charpy fracture process in ductile range. *Metalurgija*, 47, pp.173-179. <https://hrcak.srce.hr/22656>.
32. Vodopivec, F., Arzensek, B., Kmeti, D. and Vojvodi-Tuma, J., 2003. On the Charpy fracture process. *Materiali In Tehnologije*, 37(6), p.317. UDK 669.14.018.298:539.42.
33. ISO 148-2., 2009. Metallic materials-Charpy pendulum impact test-Part 2: Verification of testing machines.
34. Panin, S.V., Maruschak, P.O., Vlasov, I.V. and Ovechkin, B.B., 2016. Impact toughness of 12Cr1MoV steel Part1-Influence of temperature on energy and deformation parameters of fracture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83, pp.105-113. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.12.008>.
35. Panin, S.V., Maruschak, P.O., Vlasov, I.V., Sergeev, V.P., Ovechkin, B.B. and Neifeld, V.V., 2016. Impact toughness of 12Cr1MoV steel. Part 2-Influence of high intensity ion beam irradiation on energy and deformation parameters and deformation mechanisms of fracture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83, pp.82-92. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.12.009>.
36. Panin, S.V., Vassel, A., Maruschak, P.O., Moiseenko, D.D., Berto, F. and Vinogradov, A., 2017. Influence of stress concentrator shape and testing temperature on impact bending fracture of 17Mn1Si pipe steel. *Presented at the AIP Conf. Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5017392>.
37. Hojjati, R., Steinhoff, M., Cooreman, S., Van den Abeele, F. and Verleysen, P., 2016. Effect of high strain rate on ductile slant fracture behaviour of pipeline steel-experiments and modeling. *In 11th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64332>.
38. Mohitzadeh, S.S. and Hashemi, S.H., 2020. Experimental and numerical evaluation of momentum variation effect of striker on fracture energy in Charpy impact testing of API X65 steel. *Modares Mechanical Engineering*, 20(9), pp.2275-2287. [In Persian]. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-38867-en.html>.
39. Barin, M.R, 2016. Identification of scatter factors and statistical analysis of Charpy fracture energy variations in API X65 steel. MSc. Thesis, Mechanical engineering, University of Birjand. [In Persian].

* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوستونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تامی معادلات، علام ریاضی، رابطه ها الزاما فقط در محیط Mathtype) ارائه شود و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنمایی سایت مجله ای http://journal.sharif.ir به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسؤول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کالیه نویسنده کان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسمی نویسنده مسؤول و ذکر نویسنده مسؤول، درج آخرین درجه علمی کالیه نویسنده کان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

* سایر اجزای اصلی مقاله، نظری مقدمه، عنوانی بخش های اصلی و زیربخش ها، نتیجه گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه - با احتساب شکل و نمودار - باشد.

* کلیه عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون های ۸/۵ سانتی متری آراسته می شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی متر با خصامت کادر ۸px و خط نمودار ۶px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با 600 Resolution JPG یا Tif امکان پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متدال فارسی می باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل های کالیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کاترور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با فرمت جنرال (عدد معمولی) ارائه شود (طبق شکل های نمونه) و از آوردن اعداد به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

* کلیه متابع مورد استفاده، شماره بندی (از شماره یک و به طور مسلسل)، و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کالیه متابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انها واژه (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forcasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, 4(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The perforation of circular plat with four sided pyramidal - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

الشريف

مجله‌ی علمی و پژوهشی «شريف» از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعترافی سطح داشن نظری و علمی آنان و نیز تهیه مجموعه مفید است. چاپ مقالات در مجله‌ی شريف منوط به دارا بودن یکی از پژوهش‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بیان در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفت، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با تقدیم و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به تابع تازیمی دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار بر جسته‌ی علمی و فنی باشند.

energy in API X65 steel were calculated. The results showed that the total energy provided by the machine dial was in agreement with the total energy calculated from the area under the force-displacement curve. Characteristic forces were also determined from the force-displacement curve as described in the BS 14556 standard. After that, power law expressions with high accuracy were extracted to describe the behavior of the tested steel against variations of the Charpy sample thickness for crack initiation energy, crack propagation energy, and characteristic forces. Additionally, the average correction factor, which is used in prediction models of energy transmission steel pipelines, was found to be 1.26, which is in good agreement with the available results for

the current steel in the literature. It was shown that by increasing the thickness, due to the transition from plain stress to plain strain condition, the correction factor changed from 1.26 to 1.3 in 8 to 10 mm thicknesses, while it did not change so much from 4 to 8 mm thicknesses. By examining the characteristic forces and plotting the ratio of the yield force to the maximum force versus thickness variation, it was also found that increasing the thickness leads to decreasing the work hardening of the steel.

Key Words: Fracture energy, crack initiation energy, crack propagation energy, instrumented charpy impact machine, API X65.

simultaneously with the interface conditions in an implicit manner and in the same block matrix system. The movement of the interface was done separately, and in another step. For this purpose, the kinematic condition was implemented. The computational performance of the coupled solver was evaluated by solving the equations of two-phase fluid flow inside a channel and on a backward-facing step. In the beginning, a preliminary investigation was done for the case, where both phases were completely independent and decoupled. Matching the interface with the streamlines, as well as the reasonable and justifiable movement of the surface, has been observed from the physical point of view. Also, the damping of the numerical oscillations generated on the interface and changing the flow variables will be investigated. The present results are in excellent agreement with other results reported in the literature.

Key Words: Two-phase flow, interface tracking algorithm, foam-extend, finite volume method.

A COMPARATIVE STUDY OF THE AERODYNAMIC PERFORMANCE AND ECONOMIC VIABILITY OF H-SHAPE AND V-SHAPE WIND TURBINES IN THE CLIMATE OF ZAHEDAN CITY

S. Saham

s.saham@modares.ac.ir

S. Karimian Aliabadi (corresponding author)

karimian@modares.ac.ir

Faculty of Mechanical Engineering

Tarbiat Modares University

DOI:10.24200/J40.2023.62309.1680

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 111-118, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 May 2023; received in revised form 11 July 2023; accepted 13 August 2023.

Abstract

This research evaluates two types of vertical axis turbines from both an aerodynamic and economic perspective. The turbines used in this study have straight (H-shaped) and angled (V-shaped) blades, with equivalent dimensional characteristics that are suitable for the climatic conditions and average wind speed distribution in Zahedan city. The aerodynamic evaluation of the turbines was conducted using the semi-analytical DMST

method. The results indicate that the V-shaped turbine generates significantly less power than the H-shaped turbine due to the reduction of the effective area of the turbine and the torque produced by its rotor. However, during startup, the V-shaped turbine exhibits about seven times less negative power than the H-shaped turbine, which improves the overall startup process. Economically, the cost of energy production per kWh for a V-shaped turbine is approximately 20% lower than that of an H-shaped one. This makes the V-shaped turbine a more suitable option for urban and small-scale applications.

Key Words: Vertical axis wind turbine, aerodynamic performance, economic evaluation.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CORRECTION FACTORS FROM CHARPY IMPACT TESTING OF API X65 STEEL WITH VARYING SPECIMEN THICKNESS

J. Sadr (corresponding author)

jalaleddin.sadr@yahoo.com

S.H. Hashemi

shhashemi@birjand.ac.ir

Faculty of Mechanical Engineering
University of Birjand

A.A. Majidi-Jirandehi

aliakbar.majidi@pnu.ac.ir

Faculty of Mechanical Engineering
Payame Noor University

DOI:10.24200/J40.2023.62502.1686

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 40, Issue 1, Page 119-127, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 18 June 2023; received in revised form 3 October 2023; accepted 28 October 2023.

Abstract

The purpose of this research, in addition to determining the characteristic forces, including the yield force and maximum force, was to calculate the correction factors to predict the onset of failure in the energy transmission pipelines with high toughness under dynamic (impact) loading. To achieve this goal, an instrumented Charpy impact machine, which plots the force-displacement diagram during the impact test, was used. Then, by dividing the area under the force-displacement diagram into two parts, both the initiation energy and crack growth

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF OIL-BASED NANOFUID ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN DIFFERENT ARRANGEMENTS OF WAVY MICROCHANNELS

F. Moradi

iamfatemehmoradi@gmail.com

M. Khayat (corresponding author)

mkhayat@srbiau.ac.ir

M.H. Nobakhti

m.nobakhti@srbiau.ac.ir

Faculty of Mechanics

Electricity and Computer

Islamic Azad University of Science and Research

DOI:10.24200/J40.2023.62014.1676

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 85-96, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 24 April 2023; received in revised form 29 October 2023; accepted 29 October 2023.

Abstract

The development of microchannel manufacturing technology has led to a growing interest in using them as heat exchangers. Microchannels are used to control the temperature of equipment and components that generate a high amount of heat flux. Heat transfer can be further increased by dispersing particles (nano-sized particles) with a low volume fraction into the base fluid (nanofuid). A nanofuid can change the thermophysical properties of a base fluid and improve its thermal performance. The purpose of this study was to examine the heat transfer characteristics of oil-based nanofuid within wavy microchannels in series and parallel arrangements of microchannels. In order to examine the performance of each microchannel separately and to make it easier to draw their diagrams, they are named 1 and 2. Experiments were performed on TiO_2 and SiO_2 oil-based nanofuids in volume fractions of 0.05 and 0.1, flow rates of 0.5, 1.0, and 1.5 lit/min, and inlet temperatures of 40°C, 45°C, 50°C, 55°C. The results show an increase in the Nusselt number of the base fluid up to 41.8% in the series arrangement and also a decrease in the surface temperature in the series arrangement compared to the parallel arrangement. Also, TiO_2 and SiO_2 nanofuids with a volume fraction of 0.1 caused the highest increase in heat transfer, up to 56% and 52.7% in parallel arrangement and up to 45.8% and 42% in series arrangement compared to the base fluid, respectively. The pressure drop of the test section in series arrangement was up to 82.1% higher than parallel.

Key Words: Microchannel, oil-based nanofuid, convective heat transfer, nusselt number, laminar flow, pressure drop.

DEVELOPING AN INTERFACE TRACKING COUPLED SOLVER FOR SOLVING TWO PHASE FLOW FIELDS AT LOW REYNOLDS NUMBERS IN FOAM-EXTEND PLATFORM

B. Cheraghi

aer.b.cheraghi@ut.ac.ir

Sh. Vakilipour (corresponding author)

vakilipour@ut.ac.ir

Faculty of New Sciences and Technologies
University of Tehran

DOI:10.24200/J40.2023.62339.1681

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 97-110, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 April 2023; received in revised form 28 August 2023; accepted 18 September 2023.

Abstract

In the present study, for the first time, a finite volume coupled solver is developed for the simultaneous numerical solving of two-phase incompressible fluid flow equations at low Reynolds numbers, and for solving the the interface position equation by applying interface boundary conditions using the foam-extend platform. The studied flows with interface and mesh motion are considered to be laminar and in the range of Reynolds numbers less than 100. The Foam-extend is a fork of OpenFOAM, an opensource object-oriented C++ library for computational continuum mechanics. This solver is based on the interface tracking algorithm, which is developed using an innovative technique called zero-thickness cell. This technique removes the distance effect for the cell adjacent to the interface, and the interface is modeled with zero thickness cells. The main advantage of the present coupled solver compared to the previously developed solvers is that in this solver, all the equations in both phases are coupled with each other by cells adjacent to the interface and with an the interface position equation. All the governing equations and the interface position equation are assembled in a single linear system of equations and simultaneously solved. In fact, unlike the usual segregated procedure of solving two phase flows, where the phases are solved with lagged value boundary conditions, in the present solver the phases are solved

sidered to be involved disciplines in the design problem. The study's purpose will be to obtain an optimal trajectory to meet all the control and structure restrictions while estimating optimal body skin and thermal protection thicknesses based on structural design criteria evaluating the re-entry trajectory, which is in process. The flexible space launcher body has been considered as a free-free Bernoulli-Euler beam for bending variation and D'Alembert's principle for inertia force in static model with the aim of assessing structural design standards. The 3DOF longitudinal dynamic equations plus the first bending mode have been considered. By Chebyshev polynomial interpolation, the angle of attack scope has been achievable, and then the trajectory optimization problem has been transformed to a discrete nonlinear programming problem (NLP), which leads to numerical integration of state equation and satisfying all path constraints in Bolza optimal control problem. All highly nonlinear uncertainty-based constraints in the model have led to taking advantage of the evolutionary optimization algorithm that has been implemented here by Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II). Finally, epistemic and aleatory uncertainties have been applied through Probability Theory to estimate the reliability of constraints that had been affected by uncertainties. The result shows a 75 percent decrease through utilizing the evolutionary multi-objective technique against the gradient-based algorithm in design space optimization regarding computational cost in recalling objective functions. The other conclusion is that the sequential reliability analysis structure modeling efficiency is much better compared to the parallel one.

Key Words: Flexible reusable space launch vehicle, uncertainty, reliability analysis, multidisciplinary design optimization, re-entry trajectory, aeroelasticity.

School of Mechanical Engineering
Iran University of Science and Technology
DOI:10.24200/J40.2023.61768.1673

Sharif Mechanical Engineering Journal
 Volume 40, Issue 1, Page 75-84, Original Article
 © Sharif University of Technology

- Received 5 February 2023; received in revised form 11 March 2023; accepted 14 March 2023.

Abstract

In this paper, the static behavior, instability and buckling in porous micro plates under electrostatic field are investigated based on the modified couple stress theory and with regard to modeling, determining equations and solution methods. The plate is considered to be porous and the porosity distribution is considered to be non-uniform. The equations are obtained considering the distributed support load. By using the definition of dimensionless parameters such as load, voltage and length scale, the equations of motion become dimensionless. It can be seen that in the special case, by removing the dimensionless non-classical parameters, the equation of the classical plate under the electrostatic field is obtained. Galerkin mode summation and numerical methods are utilized to solve the static deformation equation and assess the pull-in instability voltages and buckling loads. Convergence analysis is done and the number of approximation functions and elements required for both methods are calculated and the compatibility of the results obtained from the two methods is examined. In the results section, the difference between classical and non-classical theories is examined and the effect of dimensionless parameters of length scale and porosity ratio on maximum displacement, pull-in instability voltages and buckling load is studied. The results show that the use of modified stress couple theory leads to a very large stiffness prediction compared to classical theory. This result highlights the necessity of using the modified couple stress couple theory for the micro-scale. It is observed that the length scale parameter plays the role of stiffening. The change of porosity ratios also shows that as this ratio increases, the displacement increases and the stable areas decrease. Variations in this ratio lead to uniform changes in buckling load and pull-in instability voltage, and linear relationships are obtained to calculate buckling load and pull-in instability voltage versus porosity ratio. Also, in small values of support load, it is shown that the relationship between the instability voltage and the compressive load of the support is linear, but in the buckling range, this relationship is not linear.

Key Words: Porous, buckling, size dependent theory, numerical method, instability.

INVESTIGATING OF SIZE-DEPENDENT BUCKLING AND INSTABILITY CAUSED BY SUPPORT FORCES AND ELECTROSTATIC FIELD IN POROUS ANNULAR MICROPLATES

MA. Mojahedi(corresponding author)

mojahedi62@gmail.com

Faculty of Mechanical and Energy Engineering
Shahid Beheshti University

M.R. Ayatollahi

m.ayat@iust.ac.ir

MO. Mojahedi

mojahedi74@gmail.com

NANOPARTICLES IN THE TURBULENT FLOW BEHIND THE BACKWARD STEP BY EULERIAN-LAGRANGIAN METHOD

A. Farrok

atie.farrokh@yahoo.com

M. Mahdi(corresponding author)

m.mahdi@sru.ac.ir

Faculty of Mechanical Engineering

Shahid Rajaee Teacher Training University

DOI:10.24200/J40.2023.61626.1665.

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 47-60, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 22 January 2023; received in revised form 29 April 2023; accepted 30 May 2023.

Abstract

Turbulent backward step flow, including air and copper nanoparticles, has been simulated using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method by the Eulerian-Lagrangian method. The simulation was done using two- and three-dimensional methods with CFX and FLUENT software. The obtained results were compared with each other and with the experimental results. The two-way coupling discrete phase model (DPM) was used for simulation. The Saffman lift force, pressure gradient, and turbulence effects on nanoparticles are considered. Numerical results obtained with Eulerian-Lagrangian models and single-phase models in steady and transient have been compared with experimental data. The effect of the turbulence model on the trajectory of particles and in terms of different diameters of 10, 20, 30, 50, 70, 100, and 200 micrometers have been investigated. The effects of particle diameter on the trajectory and behavior of particles and the effect of Stokes number on the presence of particles in the vortex created behind the step have been investigated. The results have been presented as various contours and graphs for two- and three-dimensional, steady, and transient states. Particle trajectories are shown as contours for different Stokes numbers and particle diameters. The continuous phase velocity variation across the channel for different distances of step are presented as graphs. Standard, RNG, and Realizable k-e and standard and SST k-w models are considered for the modeling of turbulent flow. The results show that SST k-w is more accurate than the experimental data. Furthermore, simulation was done using CFX software. Variations of velocity profile are compared with experimental and Fluent data. The results show that the Stokes number and the turbulence model have a significant effect on the trajectory of particles. Three-dimensional modeling of the flow increases

the accuracy of the results. The maximum error in the single-phase method is equal to 25% and for the Eulerian-Lagrangian method is equal to 19%. Particles with a Stokes number smaller than 1.2 (equivalent to a diameter of 35 micrometers in this study) sense the presence of the vortex and enter the vortex. Among the turbulence models, the lowest error for the sst model is equal to 6.25, and the highest error for the standard $K\epsilon$ model is equal to 18.75.

Key Words: Nanofluid, turbulence model, eulerian-lagrangian method, backward step flow, fluent, cfx.

RELIABILITY-BASED MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION UNDER UNCERTAINTY FOR REUSABLE FLEXIBLE SPACE LAUNCHER UTILIZING NSGA-II

M. Mojibi

motahareh.mojibi@alum.sharif.edu

M. Fathi Jegarkandi(corresponding author)

fathi@sharif.edu

Faculty of Aerospace Engineering

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J40.2023.61713.1667

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 61-74, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 25 January 2023; received in revised form 30 June 2023; accepted 16 July 2023.

Abstract

Complex systems design problems entail a suitable structure in which all disciplines, including their coupled relationships, have been considered and modeled at the same time. These types of design problems involve time and computational cost challenges. Multi-Disciplinary Design Optimization (MDO) methods have been developed to address these issues simultaneously. This article aims to provide a proper design structure for an uncertainty-based re-entry trajectory design optimization problem under the control restrictions and structural constraints of a Reusable Flexible Space Launch Vehicle (RFSLV) alongside the determination of optimal skin thickness and thermal protection system thickness concerning the design criteria of the flexible structure in such a way that the final design would meet the desired reliability. Trajectory, structure, aerodynamics, aeroelasticity, and thermal protection systems are con-

Abstract

Usually, in a high-altitude test facility, an exhaust diffuser is applied to create and maintain a vacuum condition in the motor test chamber utilizing the energy of the exhaust gases. In this system, the temperature of the exhaust gases, which directly hit the diffuser's inner walls, is much higher than the tolerable temperature of the diffuser metal body. In the current research, a new algorithm has been developed to design the cooling system to remove high heat fluxes from the vacuum simulator diffuser walls. In this algorithm, the three parameters of coolant mass flow rate, channel height, and cooling channel length are calculated based on the heat flux distribution along the diffuser, in such a way that, in addition to satisfying the temperature conditions of the metal body and maintaining the ease of implementation of the design, the total pressure drop also is in the desired range. Due to the error of empirical and semi-empirical relationships used to estimate convection heat transfer coefficients in concentric annular flows with large wall surfaces and high heat flux, a numerical simulation technique has been used to find suitable correlations and evaluate the design. The present studies show that the experimental correlations of Meyer and Kaneda are suitable for estimating the Nusselt number (with a maximum error of 3.81 %) and the friction coefficient (with a maximum error of 1.06 %) in the conditions of the present problem, respectively. Furthermore, the high capability of the algorithm is shown by presenting design results with different heat flux distributions. So, by distributed heat flux attributed to the stable working conditions of the vacuum simulator, a single cooling channel with a height of 3.2 mm and a mass flow rate of 8.025 kg/s has been designed, while for a critical heat flux of about 2.5 MW/m^2 , a two-channel cooling system with different mass flow rates and channel heights has been designed.

Key Words: Metal diffuser, multi-channel cooling, water-jacket method, high heat flux.

NANOCARS ASSEMBLY ON A SURFACE: COARSE-GRAINED MOLECULAR DYNAMICS STUDY

M. Vaezi

mehran.vaezi@sharif.edu

Institute for Nanoscience and Nanotechnology

Sharif University of Technology

H. Nejat Pishkenari (corresponding author)

nejat@sharif.edu

Faculty of Mechanical Engineering

Sharif University of Technology

M.R. Ejtehadi

ejtehadi@sharif.edu

Dept. of Physics

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J40.2023.61727.1669

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 39-46, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 15 January 2023; received in revised form 10 April 2023; accepted 19 April 2023.

Abstract

Using coarse-grained molecular dynamics (CGMD), the simulations of the nanostructures are performed considerably faster and with low computational costs. In the present study, a coarse-grained model is proposed for describing the surface assembly of a molecular machine called a nanotruck. In this model, we assumed that the interactions of fullerene wheels have the main role in the nanocars interactions. The analysis of the potential energy reveals three stable configurations in the interaction of two nanocars. The stable configuration of nanocars obtained from the coarse-grained model is in agreement with the results of the all-atom molecular dynamics simulations. Simulating the stable configurations at temperatures of 200, 400 and, 600 K, we examined the thermal stability and separation of nanocars. Since each stable configuration shows a specific radius of gyration, we employed this parameter to study the thermal stability of configurations at different temperatures. At 200 K, the nanocars maintain their stable configurations, and at the temperature of 400 K, the nanocars are able to change their relative orientations. The thermal energy supplied at 600 K and higher temperatures is sufficient to break the cluster of two nanocars, and the molecules are separated at this temperature range. The potential energy of the interaction of two molecules finds zero value during the simulation time, which refers to the separation of nanotrucks at this temperature. In the next step, we evaluate the surface arrangement of larger clusters, including four and eight nanocars. Considering the relative orientations of each pair of neighboring nanocars, it is concluded that the stable orientations of nanocars are similar to those observed in the cluster of two nanocars. The results of the coarse-grained model on the assembly of nanocars are consistent with the conclusions of the all-atom simulations of nanocars. The proposed coarse-grained model can be employed to study the assembly of other fullerene-based nanocars.

Key Words: Molecular dynamics simulations, coarse-graining, nanocars, molecular machines, self-assembly.

the genetic algorithm (which is an optimization process), we were able to extract the relative coefficient of each of the mentioned social behaviors in our proposed model. The results of reconstructing the participants' gaze on the test data are very similar to the real performance of the subjects. Finally, the ability to implement this model was successfully tested by implementing it on a Nao robot, and its positive performance was confirmed using a survey. The model showed significant differences between the two studied situations in 3 questions out of the whole survey's 10 questions.

Key Words: social robot, social eye gaze, eye tracking, motion-time pattern, genetic algorithm.

FLEXIBILITY AND GEOMETRIC OPTIMIZATION OF A NEW STRUCTURE FOR A POLYMER STENT WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

M. Khatami

m.khatami@urmia.ac.ir

A. Doniavi

a.doniavi@urmia.ac.ir

A.M. Abazari(corresponding author)

am.abazari@urmia.ac.ir

Dept. of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Urmia University

M. Fotouhi

m.fotouhi-1@tudelft.nl

Dept. of Materials, Mechanics

Management & Design (3MD)

Faculty of Civil Engineering and

Geosciences, Delft University

Delft, Netherlands

DOI:10.24200/J40.2023.60261.1637

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 15-23, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 10 January 2023; received in revised form 5 March 2023; accepted 9 May 2023.

Abstract

Cardiovascular diseases cause many problems for patients, and the main reason is associated with arteriosclerosis. According to the American Heart Association, atherosclerosis is a condition caused by the accumulation of a substance called plaque in the walls of arteries. Today, special methods are used to help the patient survive in the event of a heart attack and diagnose the patient's condition. One of the safest methods in medical

science is to use a stent. Despite all the innovations in the design of cardiovascular stents, the metal stents that are commonly used cause various problems such as corrosion, infection, and restenosis, which lead to physical problems or even death of patients. In order to minimize the problems associated with metal stents, new materials such as polymers are now being developed. On the other hand, the development of polymer-based vascular scaffolds requires a new structural geometry, because these polymeric materials have significantly less radial strength than metal alloys. In this study, the stiffness and flexibility of commercial polymer stents were investigated using analytical relationships and the finite element method, and it was shown that there is a good correlation between these two methods. Then, a new design for a zigzag stent is introduced to make it less sensitive to changes in thickness to and increase its radial strength. Finally, the Taguchi method and analysis of variance were used to design the experiment and determine the effect of stent geometric parameters, including strut width, bridge width, and stent thickness, on the flexibility of this type of stent. The results showed that the width of the bridge and the strut have the greatest effect on the flexibility of the stent, respectively, and the change in stent thickness, which is an effective parameter in the radial strength of the stent, has no significant effect on the flexibility of this type of stent.

Key Words: Stent, optimization, analysis of variance, finite element.

A DESIGN ALGORITHM AND NUMERICAL INVESTIGATION OF A WATER-JACKET COOLING SYSTEM FOR A HIGH-ALTITUDE SIMULATOR DIFFUSER

N. Fouladi

n.fouladi@isrc.ac.ir

Space Transportation Research Institute

Iranian Space Research Center

M. Farahani(corresponding author)

mfarahani@sharif.edu

M. Mahdian Dowlatabadi

milad.mahdian@sharif.edu

Dept. of Aerospace Engineering

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J40.2023.61692.1668

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 25-37, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 15 January 2023; received in revised form 20 April 2023; accepted 9 May 2023.

Abstracts of Papers in English

PROPOSING AN EMPIRICAL MOTION-TIME PATTERN FOR HUMAN GAZE BEHAVIOR IN DIFFERENT SOCIAL SITUATIONS

M.H. Mashaghi

mh.mashaghi@student.sharif.edu

A.R. Taheri(corresponding author)

artaheri@sharif.edu

S. Behzadipour

behzadipour@sharif.edu

Faculty of Mechanical Engineering

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J40.2023.61604.1664

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 40, Issue 1, Page 3-13, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 24 December 2022; received in revised form 27 June 2023; accepted 16 July 2023.

Abstract

Social robots that are fabricated to interact with humans and to help them in education, healthcare, etc.,

are required to have an interactive behavior similar to humans. One of the important interactive behaviors of humans is social eye gaze. Eye gaze is significantly more important than other nonverbal signals; it is shown that eyes are special cognitive stimuli with unique hardwired pathways in the brain dedicated to their interpretation. Studying the literature, we found out that in previous research conducted to control the social robots' gaze behavior, human gaze behavior was investigated in some limited situations, such as two- or three-way conversation, in order to extract the pattern of this behavior. Therefore, increasing the variety of studied social situations is a way to fill this gap. In order to design a gaze control system for a social robot, details about human gaze behavior must be found. The purpose of this research is to propose an empirical motion-time pattern for human gaze behavior in a number of different social situations; these situations include scenes with 2 to 4 people in a prepared video where the people in the scene show the social behaviors of "talking", "waving", "pointing", "entering the scene" and "exiting the scene" in a structured way. Fifteen normal adults (mean age: 24 and std: 3.3 years) watched this movie, and their gaze positions were recorded using an eye tracker system (SR-Research EyeLink 1000 plus). Next, by using

Mechanical Engineering

Sharif

1

Spring
2024

Editor-in-Chief: Mehrdad Taghizadeh Manzari

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published semiannually in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, "Sharif" publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN
Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983
Web: <http://journal.sharif.ir/> <http://www.globalsciencejournals.com>
E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

- 3 **PROPOSING AN EMPIRICAL MOTION-TIME PATTERN FOR HUMAN GAZE BEHAVIOR IN DIFFERENT SOCIAL SITUATIONS**
M.H. Mashaghi, A.R. Taheri and S. Behzadipour
- 15 **FLEXIBILITY AND GEOMETRIC OPTIMIZATION OF A NEW STRUCTURE FOR A POLYMER STENT WITH THE FINITE ELEMENT METHOD**
M. Khatami, A. Doniavi, A.M. Abazari and M. Fotouhi
- 25 **A DESIGN ALGORITHM AND NUMERICAL INVESTIGATION OF A WATER-JACKET COOLING SYSTEM FOR A HIGH-ALTITUDE SIMULATOR DIFFUSER**
N. Fouladi, M. Farahani and M. Mahdian Dowlatbadi
- 39 **NANOCARS ASSEMBLY ON A SURFACE: COARSE-GRAINED MOLECULAR DYNAMICS STUDY**
M. Vaezi, H. Nejat Pishkenari and M.R. Ejtehadi
- 47 **NANOPARTICLES IN THE TURBULENT FLOW BEHIND THE BACKWARD STEP BY EULERIAN-LAGRANGIAN METHOD**
A. Farrokh and M. Mahdi
- 61 **RELIABILITY-BASED MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION UNDER UNCERTAINTY FOR REUSABLE FLEXIBLE SPACE LAUNCHER UTILIZING NSGA-II**
M. Mojibi and M. Fathi Jegarkandi
- 75 **INVESTIGATING SIZE-DEPENDENT BUCKLING AND INSTABILITY CAUSED BY SUPPORT FORCES AND ELECTROSTATIC FIELD IN POROUS ANNULAR MICROPLATES**
M.A. Mojahedi, M.R. Ayatollahi and M.O. Mojahedi
- 85 **EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF OIL-BASED NANOFUID ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN DIFFERENT ARRANGEMENTS OF WAVY MICROCHANNELS**
F. Moradi, M. Khayat and M.H. Nobakhti
- 97 **DEVELOPING AN INTERFACE TRACKING COUPLED SOLVER FOR SOLVING TWO PHASE FLOW FIELDS AT LOW REYNOLDS NUMBERS IN FOAM-EXTEND PLATFORM**
B. Cheraghi and Sh. Vakilipour
- 111 **A COMPARATIVE STUDY OF THE AERODYNAMIC PERFORMANCE AND ECONOMIC VIABILITY OF H-SHAPE AND V-SHAPE WIND TURBINES IN THE CLIMATE OF ZAHEDAN CITY**
S. Saham and S. Karimian Aliabadi

RESEARCH NOTES:

- 119 **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CORRECTION FACTORS FROM CHARPY IMPACT TESTING OF API X65 STEEL WITH VARYING SPECIMEN THICKNESS**
J. Sadr, S.H. Hashemi and A.A. Majidi-Jirandehi

APPENDIX

- 136 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**