



مقالات پژوهشی:

- ارائه ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف
محمدحسین مشاقی، علیرضا طاهری و سعید بهزادی پور
- بررسی انعطاف پذیری و بهینه سازی هندسی طرح جدید استنت پلیمری با روش المان محدود
محمد خاتمی، علی ندوی، امیرموسی ایازی و محمد فتوحی
- الگوریتم طراحی و بررسی عددی سیستم خنک کاری جداره آبی یک دیفیووزر شیب ساز ارتفاع بالا
نعمتاله فولادی، محمد فراهمی و میلاد مهدیان دولت آبادی
- ارزیابی چیدمان سطحی خودروهای مولکولی به کمک شبیه سازی درشت داده دینامیک مولکولی
مهران واعظی، حسین نجات پیشکاری و محمدرضا اجتهادی
- بررسی عددی تأثیر مدل های آشغنگی و عدد استوکس بر رفتار نانو ذرات در جریان آشفته پشت پله به روش اویاری - لاگرانژی
علیه فرخ و میراعلم مهدی
- بهینه سازی طراحی چندموضوعی یک ماهواره بر بارگشت پذیر انعطاف پذیر تحت عدم قطعیت میسنی بر قابلیت اطمینان
منظیره مجیبی و محسن فتحی جگرکندی
- بررسی گشتش و ناپایداری وابسته به ابعاد ناشی از نیروهای تکیه گاهی و میدان الکترواستاتیک در میکرو ورق های توخالی متخلخل
مهدی مجاهدی، مجیدرضا ایتناهی و محمد مجاهدی
- مطالعه تجربی اثر نانوسایلات پایه روغن بر مشخصه های انتقال حرارت در آرایش های مختلف میکرو کانال های موجی
فاطمه مرادی، برنسی خیاط و محمد حسن نوبختی
- توسعه یک حلگر کوپل تعقیب سطح فاصل برای حل عددی میدان جریان های دوفازی در اعداد رینولدز پایین در بستر foam-extend
بهنام چراغی و شیدوش وکیلی پور
- ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آپرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان
سام سهام و سعید کریمیانی علی آبادی

یادداشت فنی:

- تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه ضربه مجهز شده روی نمونه های فولادی ایکس شفت و پنج با ضخامت متفاوت
جلال الدین صدر، سیدجنت هاشمی و علی اکبر مجیدی جیرندهی

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. Eftehadi
- 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. Mojibi and M. Fathi Jegarkandi
- 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
- 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. Vakillipour
- 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:

- 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. Majid

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سر دبیر: دکتر مهرداد تقی زاده منظری

سر دبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب پور

ویرایش: گروه ویراستاری ویرافر

حروف چینی: ساناز نادری، راضیه قربانی

صفحه آرایی و امور گرافیکی: غزل احمدی میرقائد

امور اجرایی: شیمیا آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

مجله ی مهندسی مکانیک شریف در پایگاه های ISC، DOAJ و SID نمایه می شود.

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵

دفتر مجله ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۰۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰۹۳

نمبر: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی سایت: <http://journal.sharif.ir>

رایانامه: 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 محمدرضا اسلامی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمدتقی احمدیان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محسن اصغری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمدرضا اعلم

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه برکلی، آمریکا

دکتر محمد اقتصاد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

دکتر آریا السستی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عبدالرضا اوحدی همدانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر احمد براری

دانشکده مهندسی مکانیک، انستیتو آنتاریو

دکتر مهرداد تقی زاده منظری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن سالاریه

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمدحسن سعیدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر سعید سهراب پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیررضا شاهانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر محمد شرعیات

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر محمود مهرداد شکرپه

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر مجید صفاراول

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر حسن ظهور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فمیدا فلاح رجب زاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر هادی محمدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیریتیش کلمبیا، کانادا

دکتر علی مقداری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر سید محمد باقر ملائک

دانشکده مهندسی هوا فضا، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسین نجات پیشکناری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمود یعقوبی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

دکتر داود یونسیان

دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

هیأت مشاوران

دکتر مهرداد تقی زاده منطری

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احسان جبّاری

دانشکده‌ی فنی و مهندسی - دانشگاه قم

دکتر محمدرضا جهان‌نما

پژوهشگاه فضایی ایران

دکتر سیامک حسین‌پور

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

دکتر حمیدرضا حیدری

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه ملایر

دکتر حامد دیلمی عضدی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اراک

دکتر مجید سلطانی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

دکتر سیما ضیائی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه یاسوج

دکتر جواد علیرزاده کاکلی

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 میرعبداله 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 هوافضا - 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 شاهرود

دکتر علیرضا نوین‌زاده

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

دکتر سیدحسن نوربخش شورابی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه شهرکرد

دکتر محمد وجدی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه محقق اردبیلی

مقالات پژوهشی:

- ۳ ارائه‌ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف
محمدحسین مشاقي، علیرضا طاهري و سعید بهزادی پور
- ۱۵ بررسی انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی هندسی طرح جدید استمنت پلیمری با روش المان محدود
محمد خاتمی، علی دنیوی، امیرموسی ابادری 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 نجات‌پیشکناری و محمدرضا اجتهادی
- ۴۷ بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفته‌گی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به‌روش اویلری - لاگرانژی
عطیه فرخ و میراعلم مهدی
- ۶۱ بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک ماهواره بر بازگشت‌پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان
مطهره مجیبی و محسن فتحی جگرکندی
- ۷۵ بررسی گمانش و ناپایداری وابسته به ابعاد ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی و میدان الکترواستاتیک در میکرو ورق‌های توخالی متخلخل
مهدی مجاهدی، مجیدرضا آیت‌اللهی و محمد مجاهدی
- ۸۵ مطالعه تجربی اثر نانوسیالات 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 آبرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان
سام سهام و سعید کریمیان علی‌آبادی

یادداشت فنی:

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

ضمائم:

- ۱۳۶ چکیده مقالات به انگلیسی

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

محمدحسین مشاقي (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا طاهري* (استادیار)

سعید یهزادی پور (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دور ۴۰، شماره ۱، ص. ۱۳-۳، (پژوهشی)

رابط‌های 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، ارائه‌ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف است؛ این موقعیت‌ها شامل صحنه‌هایی 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 ردیاب چشم ثبت گشته است. در ادامه، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ضریب اهمیت هر کدام از رفتارهای اجتماعی ذکر شده استخراج گردید. نتایج بازسازی نگاه شرکت‌کنندگان بر روی داده‌های تست، به عملکرد واقعی افراد بسیار شبیه بود. در انتها قابلیت پیاده‌سازی این الگو، با اجرای آن بر روی ربات ناو با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت و عملکرد مثبت آن با استفاده از تحلیل داده‌های پرسش‌نامه ارائه شده به ۱۰ شرکت‌کننده تأیید گردید. در سه مورد از سوالات مطرح شده، تفاوت معنادار آماری الگوها در دو وضعیت مطالعه شده، مشاهده گردید.

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

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

۱. مقدمه

۱.۱. اهمیت و کاربرد موضوع

رفتار تعاملی ربات اجتماعی باید طبیعی و شبیه به انسان باشد تا ربات بتواند با جامعه‌ی هدفش ارتباط مؤثری برقرار کند. در حالی که در تعامل انسان با انسان ارتباطات کلامی^۲ دارای نقش اساسی هستند، رفتارهای غیرکلامی^۳ مانند جهت نگاه^۴ یا ژست^۵ می‌توانند حالت ذهنی فرد را منتقل و ارتباط کلامی را تکمیل کنند (با آنچه را که گفته می‌شود، تقویت نمایند). از دیدگاه روانشناسی، جهت نگاه از اهمیت بیشتری نسبت به سایر رفتارهای غیرکلامی برخوردار است.^[۲] عمده پژوهش‌هایی که برای بهبود تعامل ربات‌های اجتماعی با انسان صورت گرفته‌اند، تنها متمرکز بر رفتارهای کلامی بوده‌اند؛ بنابراین، حرکت در راستای بهبود رفتار جهت نگاه ربات‌های اجتماعی حائز اهمیت می‌باشد (که در ادبیات موضوعی کمتر به آن پرداخته شده است).

با توجه به روند روبه‌رشد 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 به‌کار گرفته می‌شوند.^[۱] تعامل با ربات‌ها همواره برای انسان‌ها و مخصوصاً کودکان جذابیت خاصی دارد. بنابراین، می‌توان از این جلب توجه و جذابیت برای هدف‌هایی که به آنها اشاره گردید، به‌خوبی استفاده نمود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۳/۱۰/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۳/۴/۶، پذیرش ۱۴۰۳/۴/۲۵.

استناد به این مقاله:

مشاقي، محمدحسین، طاهري، علیرضا، و یهزادی پور، سعید، ۱۴۰۳. ارائه‌ی یک الگوی تجربی حرکت - زمان از رفتار جهت نگاه انسان در تعدادی موقعیت اجتماعی مختلف.

مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۳-۳. DOI:10.24200/J40.2023.61604.1664

۲.۱. هدف پژوهش

هدف از انجام این پژوهش، استخراج الگوی تجربی حرکت - زمان^۶ چشم انسان (یا الگوی حرکت چشم با در نظر گرفتن زمان) در موقعیت‌های اجتماعی مختلف می‌باشد؛ این مدل نشان‌دهنده‌ی این است که فرد از میان محرک^۷‌های بصری موجود در میدان دید خود، به کدام محرک، توجه می‌کند و نیز با چه سرعتی توجه را از یک محرک به محرک دیگر تغییر می‌دهد. دستیابی به این هدف، نیازمند طراحی آزمایش برای ردیابی جهت نگاه انسان می‌باشد؛ به عبارت دیگر، می‌بایست 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 افراد شرکت‌کننده در آزمایش باشد، استخراج می‌گردد.

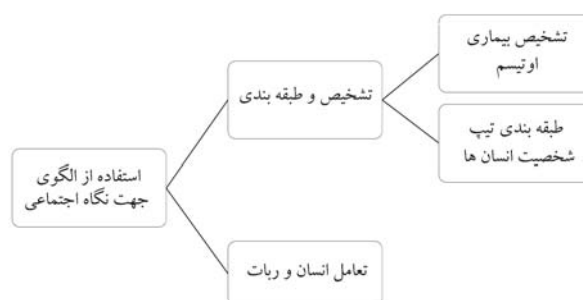
۲. مرور ادبیات موضوع

عمده پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه جهت نگاه اجتماعی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱).

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 موثر بودند؛ به عنوان مثال، Liu و همکاران^[۳] با استفاده از داده‌برداری از جهت نگاه کودکان مبتلا به اتیسم^۸ هنگام مشاهده‌ی چهره‌ی افراد و بر مبنای یادگیری ماشین^۹، توانستند روشی برای غربالگری کودکان سالم از کودکان مبتلا به اتیسم ارائه بدهند. در پژوهشی دیگر، Jones و همکارش^[۴] با اتکا بر داده‌های عددی میزان توجه کودک به چشم‌های فرد مقابل و تحلیل آماری بر این 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.^[۵] Yoshikawa و همکاران^[۶] با رویی هم‌قرار دادن یک انسان و یک ربات انسان‌نما^{۱۱} متوجه شدند در شرایطی که ربات جهت نگاه فرد مقابلش را دنبال می‌کند، می‌تواند ارتباط چشمی بهتر و مداوم‌تری را از فرد مقابل دریافت کند.

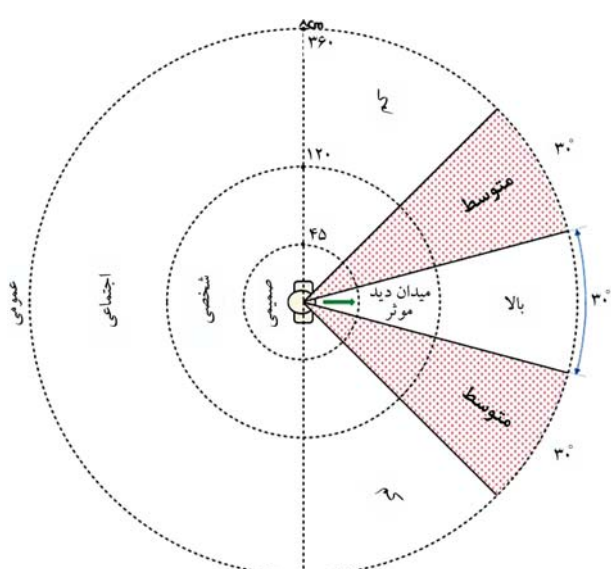
تعدادی از پژوهش‌ها، بدون استفاده از الگوی جهت نگاه انسان، برای کنترل جهت نگاه ربات‌های اجتماعی تلاش کرده‌اند؛ به عنوان مثال Cornia و همکاران،^[۷] با آموزش دادن یک شبکه‌ی عصبی بازگشتی از نوع LSTM^{۱۲} توانسته‌اند نقاط



شکل ۱. طبقه بندی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی جهت نگاه اجتماعی.

برجسته‌ی تصاویر ایستا را استخراج کنند. در پژوهشی دیگر، Lathuilière و همکاران^[۸] با استفاده از یادگیری تقویتی، روشی برای کنترل جهت نگاه ربات ارائه کرده‌اند. 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 افراد در میدان دیدش بیشینه شود. شبکه‌ی طراحی شده ابتدا با استفاده از ویدیوهای از پیش تهیه شده آموزش داده می‌شود و سپس برای صحت‌سنجی در محیط واقعی قرار می‌گیرد. همچنین در یک پژوهش بسیار جامع، Yoo و همکارش^[۹] یک روش بر مبنای انتگرال فازی برای کنترل جهت توجه و نگاه یک سربا تیک 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^[۱۰] یک سیستم کنترل جهت نگاه برای ربات انسان‌نمای FACE ارائه شده است. در این سیستم با در نظر گرفتن عواملی مانند: میزان نزدیکی بودن فرد به ربات، نشانه‌های کلامی و غیرکلامی، میدان دید مؤثر و اثر خوگیری^{۱۳} به هر کدام از محرک‌های محیط یک امتیاز منظور می‌گردد. امتیاز بالاتر یک محرک، بیانگر اولویت ربات برای معطوف 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 شده‌ی محرک است؛ یعنی ویژگی هر محرک در میزان اهمیت آن ویژگی ضرب و مجموع حاصل ضرب‌ها برای تمام ویژگی‌های آن محرک محاسبه می‌گردد. دومین عامل بیانگر میزان نزدیکی یک محرک به ربات است. سومین عامل بیانگر زاویه‌ی قرارگیری محرک نسبت به ربات و آخرین عامل نشان‌دهنده‌ی حافظه‌ی ربات از اتفاقات گذشته‌ی مرتبط با آن محرک است (شکل ۲). نویسندگان^[۱۰] اثر خوگیری را به این صورت وارد مسئله کرده‌اند که امتیاز محرکی که برنده شده و جهت نگاه ربات به آن معطوف می‌گردد، ثابت باقی نمی‌ماند و به‌طور خطی نزول می‌کند. این اثر در واقعیت نیز مشهود است؛ زیرا انسان هیچ‌گاه تمام مدت به یک محرک خیره نمی‌ماند.

در پژوهش Aliasghari و همکاران،^[۱۱] اصلاحاتی بر روی مدل ارائه شده توسط^[۱۰] صورت گرفته است. نویسندگان در این پژوهش پیشنهاد می‌کنند که در



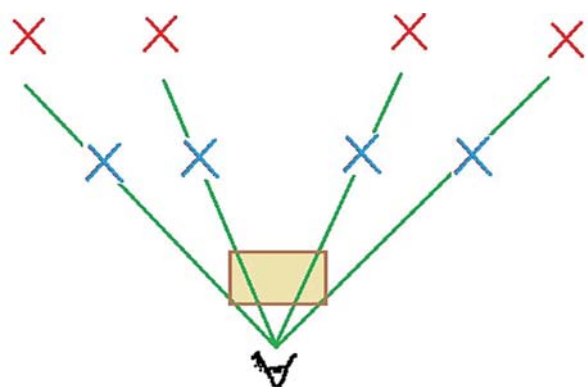
شکل ۲. مدل ارائه شده توسط Zaraki^[۱۰] که نشان‌دهنده‌ی دو عامل فاصله و زاویه دید در تعیین جهت نگاه ربات می‌باشد.

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 اشاره ی یکدیگر قرار بگیرند، یک هدف مشترک مورد اشاره ی 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. «فاصله ی افراد از دوربین» و «زاویه ی 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 ده هزار آزمایش می‌باشد؛ این مسئله با توجه به وابستگی به شرکت‌کننده‌های انسانی در این آزمایش، غیرممکن است؛ بنابراین، لازم است تا با روش‌های استاندارد طراحی آزمایش، اثر تمام پارامترهای مذکور در تعدادی آزمایش محدود گنجانده شود؛ بنابراین، از روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده گردید. در پایان طراحی آزمایش، یک ویدیو مورد نیاز است که تمام پارامترهای لیست بالا را شامل باشد و اثر متقابل هر کدام را مورد آزمایش قرار بدهد؛ در نتیجه ابتدا لازم است برای این ویدیو یک سناریو طراحی و پس از آن به ساختن 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 تاگوجی به صورت جداگانه در نظر گرفته و سپس با کنار هم قرار دادن این سه حالت، یک سناریوی تا حد امکان پیوسته ساخته شد. در شکل ۳ ضربدرها نشان‌دهنده ی محل‌های مجاز برای قرارگیری افراد هستند؛ به عبارت دیگر، هر خط سبز یک امتداد مجاز برای قرارگیری افراد است. همچنین



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

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 پایین‌تری صورت گرفته است. علت این امر استفاده از سنسور کینکت برای ردیابی نگاه افراد بوده است. در پژوهش مذکور، محرک‌هایی که مورد بررسی قرار گرفتند، عبارت‌اند 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 ی 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 تشبیت و حرکت چشم افراد در مجموعه ی تا حد امکان غنی از موقعیت‌های اجتماعی اشاره شده بررسی و استخراج گردد. موقعیت‌های مد نظر 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 گسترده‌تری 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 به نوعی ادامه دهنده و تکمیل‌کننده ی 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؛ مرحله ی نخست، جمع‌آوری داده‌ها نام دارد که خود شامل دو زیرمرحله اصلی است؛ طراحی آزمایش و اجرای آزمایش. در مرحله ی دوم نیز تحلیل داده‌ها صورت می‌گیرد که استخراج الگوی جهت نگاه در این بخش اتفاق می‌افتد.

۱.۳. جمع‌آوری داده‌ها

نخستین گام از انجام این پژوهش، جمع‌آوری داده‌هاست. همان‌طور که 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. به منظور 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

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

با استفاده از روش تاگوجی، 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 مد نظر 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 مسئله، 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 محرک‌های اجتماعی موجود در سناریوها به روش یکسانی انجام شوند؛
- هر کدام از ردیف‌های 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.

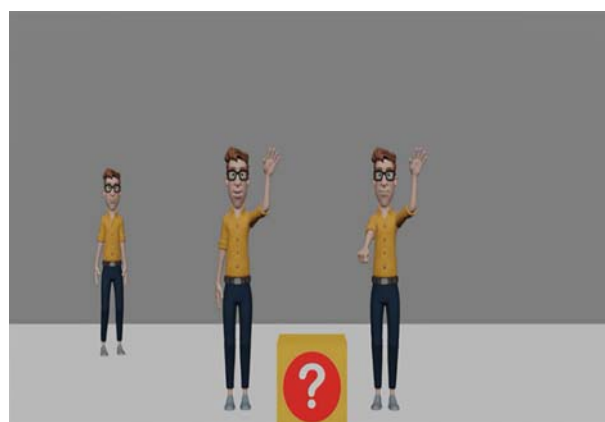
در ساخت این انیمیشن از نرم‌افزار Blender استفاده می‌شود که یک نرم‌افزار رایگان و متن‌باز^{۱۴} در زمینه‌ی گرافیک سه‌بعدی است. شخصیت‌هایی که در شکل ۴ مشاهده می‌شوند، همگی یکسان می‌باشند (این شخصیت Vincent نام دارد که یک شخصیت رایگان در کتابخانه‌ی Blender و با قابلیت‌های حرکتی بسیار زیاد است). همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اگر شخصیت‌ها در حال اشاره باشند، همگی به جعبه‌ی موجود در مرکز تصویر اشاره می‌کنند. خروجی نرم‌افزار Blender دارای ۱۵۳۴۴ فریم و مدت زمان تقریبی ۶۳۹/۳۳ ثانیه می‌باشد.

۲.۱.۳. اجرای آزمایش

آزمایش ردیابی چشم توسط دستگاه SR-Research 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
نرخ پخش فریم	۲۴ فریم بر ثانیه
مدت زمان کل	۶۴۰ ثانیه



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

داده‌برداری تا فرکانس ۲۰۰۰ هرتز را دارد و همچنین، خطای اندازه‌گیری آن حدوداً ۱۵/۰ درجه می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، این دستگاه دارای یک پایه‌ی نگهدارنده‌ی سر است تا سر فرد شرکت‌کننده در آزمایش را در یک موقعیت ثابت نگه دارد.

تعداد افراد شرکت‌کننده در این آزمایش ۱۵ فرد بهنجار (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 شرکت‌کننده‌ها به ویدئوی طراحی شده نگاه کرده و موقعیت نگاه آنها بر روی تصویر دو بعدی ثبت شده‌است.

۲.۳. تحلیل داده‌ها

۱.۲.۳. پالایش داده‌های خام

داده‌های خام به دست آمده، از آزمایش ردیابی چشم به صورت زوج اعداد (x, y) هستند که بیانگر مختصات جهت نگاه بر روی 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 درون‌یابی خطی استفاده شد.

همانطور که گفته شد، فرکانس داده‌برداری ۱۰۰۰ هرتز است؛ اما فرکانس پخش فریم‌های ویدیوی آزمایش برابر با ۲۴ هرتز (معادل ۲۴ فریم بر ثانیه) می‌باشد؛ یعنی به ازای هر فریم، حدوداً ۴۰ بار نمونه‌برداری اتفاق افتاده است. برای آن که بتوان خروجی به دست آمده از تحلیل‌ها را مجدداً بر روی 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.

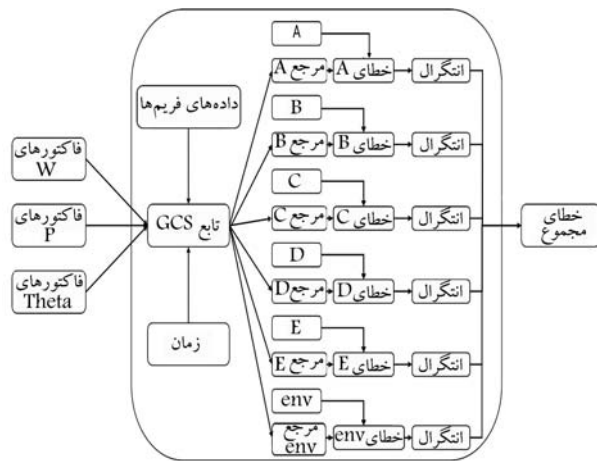
پالایش داده‌ها در این مرحله ختم نمی‌شود. در مرحله‌ی بعدی از پالایش داده‌ها تعیین می‌شود که فرد شرکت‌کننده در هر فریم به کدام یک از المان‌های موجود در صحنه نگاه کرده است.

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 درون هر یک از این مستطیل‌ها قرار بگیرد، بیانگر این است که فرد شرکت‌کننده در آن فریم در حال نگاه کردن به المان



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



شکل ۷. نحوه‌ی عملکرد تابع هزینه برای الگوریتم ژنتیک.

همانطور که در رابطه‌ی ۳ مشاهده می‌شود، تنها تفاوت مدل امتیازدهی در^[۱۱] 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^[۱۱] این است که وزن محرک‌های اجتماعی به‌جای 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.

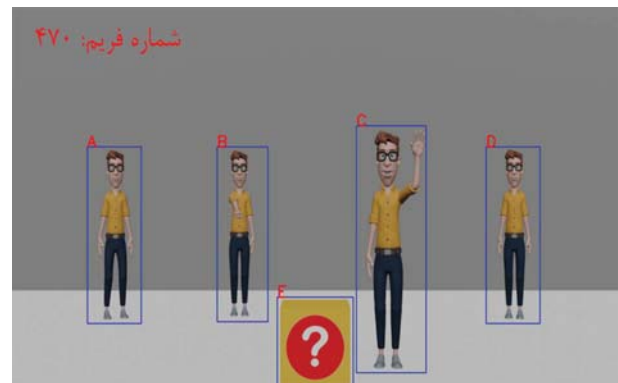
برای آنکه بتوان از داده‌های آزمایش ردیابی چشم برای یافتن مقدار بهینه‌ی پارامترهای مجهول استفاده کرد، نیاز است که از یک روش مناسب بهینه‌سازی استفاده نمود. با توجه به تعداد بالای پارامترهای مجهول و پیچیده و غیرخطی بودن تابع مدل، تصمیم گرفته شد که از روش‌های فراابتکاری استفاده شود؛ بدین منظور، الگوریتم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

برای استفاده از الگوریتم ژنتیک نیاز است تا یک تابع هزینه مناسب تعریف گردد. با توجه به این که ضروری است که خروجی مدل، بیشترین شباهت را به داده‌های به‌دست 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، ورودی تابع هزینه همان پارامترهای مجهول هستند. خروجی تابع GCS^{۱۵} شش سری زمانی است که اندازه‌ی آن برابر با اندازه‌ی سری‌های زمانی به‌دست 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 به‌دست آمده از آزمایش هم برای آموزش مدل و



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

متناظر 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 متناظر 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 به‌دست آمده با رفتار کلی شرکت‌کنندگان در آزمایش است.

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

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

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 مشابهت زیادی (البته 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 (مجهول)
		دست تکان دادن (مجهول)
		اشاره کردن (مجهول)
		ورود سریع (مجهول)
		ورود آهسته (مجهول)
		خروج سریع (مجهول)
		خروج آهسته (مجهول)
		بی حرکت ماندن (مجهول)
		بیرون از صحنه بودن (که برابر با صفر است)
		اشاره شدن توسط فرد
		نزدیک و مستقیم (مجهول)
		اشاره شدن توسط فرد دور
		و مستقیم (مجهول)
		اشاره شدن توسط فرد نزدیک و زاویه بسته (مجهول) اشاره شدن توسط فرد دور و زاویه بسته (مجهول)
-	-	برای افراد
		برای جعبه

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مدل.

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

۳.۳. پیاده‌سازی الگو بر روی ربات

۱.۳.۳. انتخاب ربات برای پیاده‌سازی

سه گزینه برای پیاده‌سازی این الگو مورد بررسی قرار گرفتند:

۱. ربات آپو: یک ربات اجتماعی که با هدف تقویت مهارت لب‌خوانی افراد دچار نقص شنوایی در آزمایشگاه رباتیک اجتماعی دانشگاه صنعتی شریف ساخته شده است؛^[۱۳]

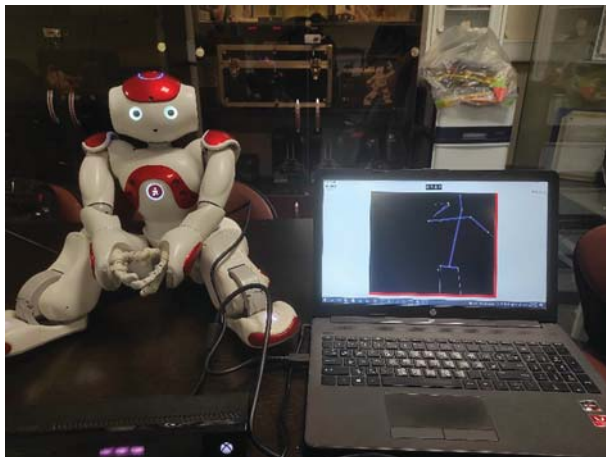
۲. ربات رسا: یکی دیگر از ساخته‌های آزمایشگاه رباتیک اجتماعی دانشگاه صنعتی شریف که به صورت ویژه در پژوهش Basiri و همکاران^[۱۴] برای پیاده‌سازی زبان اشاره‌ی فارسی مورد استفاده قرار گرفته است؛

۳. ربات ناتو: ربات ناتو یک ربات انسان‌نما و محصول شرکت آلدبارن فرانسه و هولدینگ سافت بنک رباتیکس می‌باشد. این ربات معروف در سال ۲۰۰۸ میلادی اولین بار در انتظار عمومی حضور یافت و پس از آن تاکنون در امور بسیاری از جمله دستپاری در شرکت‌ها و مراکز درمانی به منظور خوش‌آمدگویی، اطلاع‌رسانی و سرگرمی مراجعان مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۸).^[۱۵، ۱۶]

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. نحوه‌ی انتخاب هدف نگاه

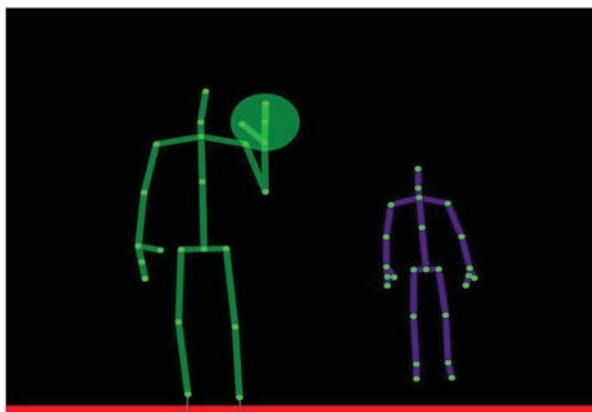
پیش از این‌که بتوان چنین الگویی را بر روی یک ربات اجتماعی پیاده‌سازی کرد، لازم است تا تعیین شود این الگو، انتخاب هدف نگاه خود را به چه نحوی انجام می‌دهد. دو روش پیشنهادی حریصانه و تصادفی وزن‌دار مطرح هستند. در روش اول، همواره المانی که دارای بیشترین امتیاز در تصویر باشد، به عنوان هدف برگزیده خواهد شد؛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



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



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



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

ربات نائو در حال تعامل (پارامترهای دست تکان دادن و اشاره کردن هم در این تعامل گنجانده شده است) با ۲ نفر حاضر در صحنه است. در ویدیوی اول ربات نائو از روش انتخاب هدف حریم‌ناهی استفاده می‌کند؛ اما در دومین ویدیو از روش تصادفی وزن‌دار 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



شکل ۸. ربات نائو در مسابقات روبوکاپ ۱۶۰۲۰۱۶.

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

۲.۳.۳. پیاده‌سازی الگو بر روی ربات نائو

ربات نائو تمام تجهیزات سخت‌افزاری برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز در این پژوهش را به‌جز اندازه‌گیری فاصله‌ی اجسام از ربات را دارد؛ بنابراین، برای برطرف کردن این کمبود از دوربین کینکت استفاده شد. شرکت سازنده‌ی ربات نائو، به‌منظور تسهیل ارسال فرامین به ربات مجموعه‌های نرم‌افزاری را ارائه نموده‌است. 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 برنامه نویسی 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 هراسکلت، قابلیت تشخیص حرکت‌های ورود به تصویر و خروج از آن، دست تکان دادن و اشاره کردن فراهم گردید. به‌منظور تشخیص صحبت کردن افراد نیز از آرایه میکروفونی سنسور کینکت استفاده شد. در نهایت با اعمال ضرابی که از خروجی الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده بود، امکان افزودن قابلیت کنترل جهت نگاه به ربات نائو 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 به‌دست آمده بر روی ربات نائو، با تنظیم یک پرسش‌نامه از ۱۰ نفر شرکت‌کننده (متفاوت از افراد شرکت‌کننده 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 مجهول).

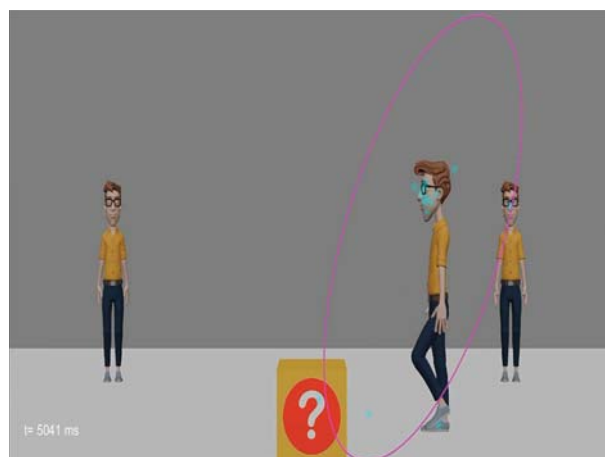
۴/۳۵	صحبت کردن	w_i
۴/۰۴	دست تکان دادن	
۴/۷۸	اشاره کردن	
۱/۴۸	ورود سریع	
۱/۹۸	ورود آهسته	
۰/۳۰	خروج سریع	
۰/۵۹	خروج آهسته	
۱/۰۵	بی حرکت ماندن	
۰	بیرون از صحنه بودن	
۱/۶۰	اشاره شدن توسط فرد نزدیک و مستقیم	
۱/۷۶	اشاره شدن توسط فرد دور و مستقیم	P
۰/۲۹	اشاره شدن توسط فرد نزدیک و زاویه بسته	
۰/۳۱	اشاره شدن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

در این تحقیق، از تعداد غنی تری از سناریوهای اجتماعی و با بهره‌گیری از روش‌های غیرخطی و پیچیده‌تری محاسبه شده‌اند.

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 مدل‌سازی 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 محرک اجتماعی بوده است.

همانطور که 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 پرسون^{۱۷} می‌توان مقدار تطبیق دو سری داده را به صورت کمی مشاهده کرد. مقدار این ضریب برای این دو سری داده 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،^[۱۱] ضرایب به دست آمده در جدول ۴ در رابطه‌ی ۱ قرار داده شد و مجدداً ضریب همبستگی پرسون محاسبه گردید که این بار عدد ۰/۶۷ 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 می‌کند؛
 ۴. حس کردم تعامل ربات در ویدیو با افراد حاضر در ویدیو مانند یک آدم واقعی بود؛
 ۵. به نظر ربات در ویدیو هم‌نشین اجتماعی خوبی است؛
 ۶. می‌توانم تصور کنم ربات در ویدیو موجودی زنده است؛
 ۷. به نظر می‌رسد ربات در ویدیو توجه خوبی به اطرافیان دارد؛
 ۸. ربات در ویدیو با هوش رفتار کرد؛
 ۹. به نظر ربات در ویدیو به اقدامات افراد حاضر در ویدیو خوب واکنش نشان داد؛
 ۱۰. به نظر 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

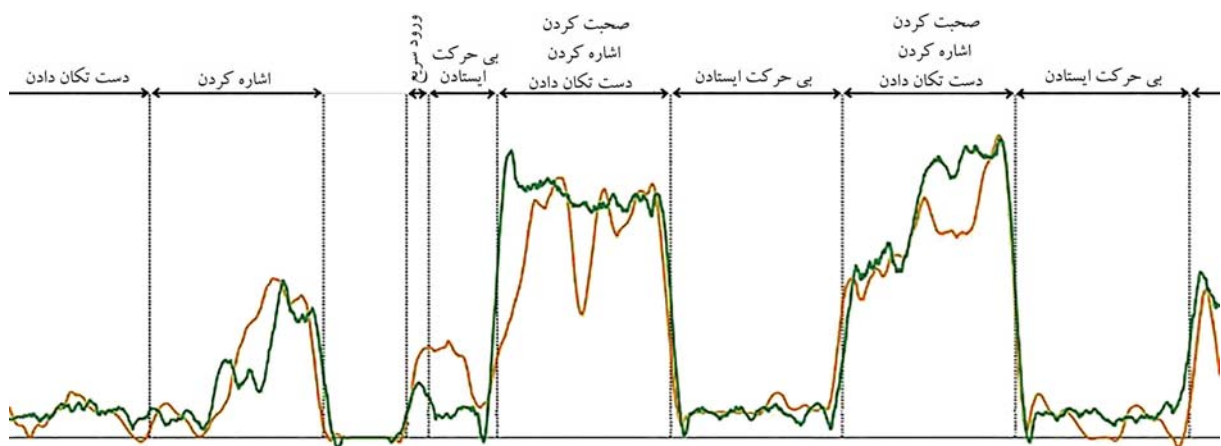
۴.۱. نمایش میانگین و کوواریانس

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

۴.۲. نتایج مدل‌سازی 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^[۱۱، ۱۳] 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	
۰/۳۱	۱/۰۵	۴	۰/۸۴	۳/۶	۱
۰/۰۱	۰/۷۱	۴/۵	۰/۹۷	۳/۵	۲
۰/۰۷	۰/۹۲	۴/۲	۱/۰۸	۳/۵	۳
۰/۰۵	۰/۹۷	۳/۵	۱/۲۰	۲/۹	۴
۰/۸۷	۱/۲۹	۲/۹	۱/۰۵	۳	۵
۰/۶۸	۱/۰۷	۲/۴	۱/۲۶	۲/۶	۶
۰/۳۶	۱/۴۵	۳/۹	۱/۱۶	۳/۳	۷
۰/۴۴	۰/۹۷	۳/۵	۱/۰۶	۳/۳	۸
۰/۴۶	۱/۳۴	۳/۷	۱/۰۶	۳/۳	۹
۰/۸۲	۱/۴۳	۳/۴	۱/۱۸	۳/۵	۱۰



شکل ۱۵. پیاده‌سازی روش انتخاب هدف حریصانه بر روی ویدیوی آزمایش.



شکل ۱۴. پیاده‌سازی روش انتخاب هدف تصادفی وزن‌دار بر روی ویدیوی آزمایش.

۳.۴. نتایج نحوه‌ی انتخاب هدف نگاه

هر دو روش انتخاب هدف مذکور بر روی 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.

۴.۴. 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 تفاوت قابل توجهی دارد و مقدار p-value برای این سوالات کمتر (و یا در نزدیکی) ۰/۰۵ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که روش تصادفی وزن‌دار در این موارد موفق عمل کرده و نتوانسته تفاوت معنادار رقم بزند. به عبارت دیگر، از نظر

شرکت‌کنندگان پرسش‌نامه، روش تصادفی وزن‌دار باعث: ۱. هماهنگی بهتر ربات 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 ویژگی‌های آزمایش و تغییر روش مدل‌سازی موجود در ادبیات موضوع، یک الگوی واقع‌گرایانه‌تر نسبت به پژوهش‌های گذشته ارائه شود. ویژگی 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 پیاده‌سازی بر روی ربات‌های اجتماعی به‌عنوان سیستم کنترل جهت نگاه مشابه انسان‌ها را دارد. با پیاده‌سازی الگوی به‌دست آمده بر روی ربات نانو و ارزیابی خروجی آن توسط پرسش‌نامه ارائه شده، اثرگذاری قابل ملاحظه‌ی الگوی پیاده شده در ۳ مورد از ۱۰ مورد پرسش‌نامه تأیید گردید.

۶. محدودیت‌ها و کارهای آینده

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

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

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 ۲۵/۴ سال و انحراف معیار شرکت‌کنندگان برابر با ۳/۳ سال است. مسن‌ترین شرکت‌کننده ۳۴ سال و جوان‌ترین شرکت‌کننده ۲۱ سال دارد. بنابراین، ممکن است نتایج این پژوهش را به افراد تمام سنین 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 کارتون) 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 گرنت اخذ شده از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف (به شماره G۹۸۰۵۱۷) و همچنین گرنت 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.

پانوشته‌ها

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

17. Pearson Correlation Coefficient

منابع (References)

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 خاتمی (دانشجوی دکتری)

علی دنیوی (دانشیار)

امیره‌وسی اباذری* (دانشیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه

محمد فتوحی (استادیار)

گروه مواد، مکانیک، مدیریت و طراحی، دانشکده مهندسی عمران و علوم زمین، دانشگاه صنعتی دلف، دلف، هلند

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوری ۴۰، شماره ۱، ص. ۱۵-۲۳، (پژوهشی)

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 زیگ-زاگ به‌منظور کاهش حساسیت نسبت به تغییر ضخامت جهت افزایش استحکام شعاعی آن ارائه می‌شود. در پایان، از روش تاگوشی 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 به‌ترتیب بیشترین تأثیر را روی انعطاف‌پذیری استنت دارند و تغییر ضخامت استنت که پارامتر تأثیرگذار در میزان استحکام شعاعی استنت است، تأثیر معناداری روی انعطاف‌پذیری این نوع استنت ندارد.

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

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

۱. مقدمه

انبساط شعاعی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، سازگاری زیستی و کنترل آسان باشند.^[۶] استنت‌ها می‌توانند از مواد مختلف ساخته شوند اما استنت‌های فلزی، به ویژه فولاد زنگ‌نزن، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی خوب، متداول‌ترین استنت‌های تجاری هستند. با این حال، استنت‌های فلزی دارای برخی از نقایص مانند تابش رادیویی کم، خوردگی، تنگی مجدد^۴ و عوارض خونریزی هستند.^[۶] تقریباً در ۳۰٪ بیماران پس از عمل جراحی تنگی مجدد اتفاق می‌افتد و با نرخ بالای مرگ و میر و همچنین هزینه‌ی بالای مراقبت‌های بهداشتی، همراه است.^[۷] یکی از اصلی‌ترین مشکلات ناشی از تنگی مجدد، آسیب عروق توسط میله‌های فلزی استنت و در نتیجه پاسخ ایمنی و التهابی توسط بدن انسان است. به‌منظور به‌حداقل رساندن مشکلات مرتبط با استنت‌های فلزی، مواد جدیدی مانند پلیمرها در حال توسعه هستند.^[۸،۹] از آنجا که استنت‌های مولتی لینک،^۵ جاذب^۶ و زیگ زاگ^۷ 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.^[۱] تصلب شرایین عروق کرونر^۱ یکی از شایع‌ترین بیماری‌های قلبی عروقی است.^[۲،۳] 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 آنژیوپلاستی، استفاده می‌شوند^[۴] و دارای ساختارهای لوله‌ای و سوراخ‌دار هستند.^[۵] آنها برای باز نگه داشتن رگ‌ها و برقراری مجدد جریان طبیعی خون، در رگ‌های خونی قرار می‌گیرند. استنت‌ها برای استفاده به‌عنوان تجهیزات پزشکی قابل کاشت، باید دارای چند ویژگی مهم مانند مقاومت مکانیکی، تابش^۳ رادیویی، انعطاف‌پذیری طولی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۲/۱۴، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۹.

استناد به این مقاله:

خاتمی، محمد، دنیوی، علی، اباذری، امیره‌وسی و فتوحی، محمد، ۱۴۰۳. بررسی انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی هندسی طرح جدید استنت پلیمری با روش المان محدود. دانشکده‌ی

مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۵-۲۳. DOI:10.24200/J40.2023.60261.1637

و پر کاربرد استنت های پلیمری می باشند، در این مطالعه هندسه این استنت ها مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی توسعه ی داربست های عروقی مبتنی بر پلیمر، به هندسه ی ساختاری جدیدی نیاز دارد، زیرا این مواد پلیمری به میزان قابل توجهی استحکام شعاعی کمتری از آلایزهای فلزی دارند.^[۱۱] به همین دلیل استنت های پلیمری دارای ضخامت بیشتری هستند که باعث کاهش انعطاف پذیری آنها می شود. یک استنت ایده آل بایستی دارای انعطاف پذیری 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 بهینه سازی هندسه استنت با استفاده از روش تاگوچی استفاده می شود و طرح جدیدی برای استنت زیگ زاگ ارائه می گردد که نسبت به طرح قبلی حساسیت کمتری به تغییر ضخامت دارد و هم زمان با افزایش ضخامت، می تواند انعطاف پذیری استنت را حفظ نماید.

۲. مروری بر منابع

استنت ها، ساختارهای زیست پزشکی لوله ای شکل هستند که برای باز کردن رگ خونی مسدود شده، مجرای تنفسی یا قسمت های مختلف دستگاه گوارش، استفاده می شوند. انعطاف پذیری استنت یکی از پارامترهای تأثیرگذار در کاشت استنت در عروق کرونری می باشد. استنت با انعطاف پذیری بالا به راحتی از عروق پر پیچ و خم عبور کرده و به محل گرفتگی می رسد.^[۱۲] استنت پس از قرارگیری در رگ باید با فرم آن منطبق گردد.^[۱۳] استنت های پلیمری زیست تخریب پذیر در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان غذا و داروی آمریکا تأیید شدند.^[۱۴] این نوع استنت ها دارای استحکام شعاعی پایین نسبت به نمونه فلزی هستند که با بهینه سازی طراحی یا افزایش ضخامت این نقیصه برطرف می شود، ولی چالش اساسی در خصوص این نوع استنت ها، پایین بودن انعطاف پذیری به دلیل ضخامت زیاد می باشد.^[۱۵] طراحی ساختاری بهینه یکی از عوامل مهم برای استنت های زیست تخریب پذیر جهت دستیابی به عملکرد مورد انتظار است.^[۱۶] پرینت سه بعدی به عنوان یک روش ساخت انعطاف پذیر، امکان ایجاد طرح های خلاقانه در زمینه استنت را فراهم کرده است.^[۱۷] وانگ و همکاران^[۱۸] پرینت سه بعدی استنت های پلیمری و تغییر شکل طولی آنها را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با بهینه سازی طراحی، می توان از تغییر شکلی طولی استنت هنگام استقرار در رگ جلوگیری کرد. لی و همکاران^[۱۹] بهینه سازی طراحی و فرایندی استنت پلیمری زیست تخریب پذیر را مورد بررسی قرار داده و با بهینه سازی چند هدفه، خواص مکانیکی استنت پلیمری را بهبود دادند.

روش المان محدود یک روش مفید در بررسی ساختار استنت ها بوده و اطلاعات زیادی در مطالعه و بهینه سازی طراحی استنت ها ارائه می کند.^[۲۰] آوزوی و همکاران^[۲۱] با استفاده از المان محدود اثر طراحی استنت به ویژه پل ها را روی انعطاف پذیری استنت مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که المان های اتصال بیشترین تأثیر را روی رفتار ساختاری استنت دارند. موری و همکاران^[۲۲] یک روش بهینه را جهت تعیین سفتی خمشی استنت ابداع کردند. آنها از تست خمش چهار نقطه ای جهت بررسی انعطاف پذیری استنت و از روش المان محدود جهت ارزیابی تأثیر ساختار استنت روی انعطاف پذیری استنت با ساختار پیوندی مختلف، استفاده کردند. لی و همکاران^[۲۳] از روش بهینه سازی جهت بهبود خواص مکانیکی استنت استفاده نموده و نشان دادند که روش بهینه سازی در مطالعه ی خواص استنت های قلبی عروقی بسیار موثر است. گروگان و همکاران^[۲۴] با استفاده از شبیه سازی تست موقعیت،^۸ خواص مکانیکی استنت های فلزی قابل تجزیه را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با تغییر

پارامترهای طراحی می توان این نوع استنت ها را با استنت های دائمی جایگزین کرد. بابل و همکاران^[۲۵] با استفاده از روش المان محدود، مقاومت شعاعی، انعطاف پذیری و مقاومت طولی استنت های پلیمری را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که این روش یک فرایند قابل اطمینان جهت ارزیابی خواص مکانیکی استنت ها است. در مطالعات قبلی، از تست های آزمایشگاهی جهت تأیید نتایج روش المان محدود استفاده شده که روشی مطمئن ولی پر هزینه می باشد. همچنین در مدل های ارائه شده پیشین، هنوز ضخامت های بهینه سازی شده مورد نیاز است.

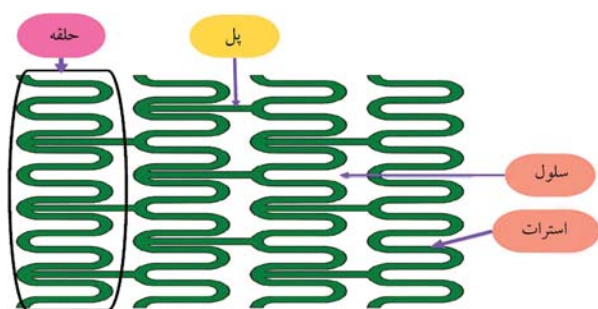
در این مقاله جهت رفع محدودیت های ذکر شده از روابط تحلیلی جهت صحت سنجی نتایج المان محدود استفاده می شود. از آنجا که بیشتر تحقیقات قبلی روی استنت های فلزی بوده و تحقیقات کمی روی بهینه سازی استنت های پلیمری انجام شده است، لزوم ایجاد یک طرح بهینه جهت افزایش هم زمان انعطاف پذیری و استحکام شعاعی استنت پلیمری بسیار احساس می شود. از اینرو در این مطالعه، سفتی و انعطاف پذیری استنت های پلیمری تجاری با استفاده از روابط تحلیلی و روش المان محدود بررسی می شود. بر اساس بررسی انجام شده، طرح جدیدی از استنت زیگ زاگ ارائه می گردد تا از نظر انعطاف پذیری، 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 استنت شامل عرض استرات، عرض پل و ضخامت استنت روی انعطاف پذیری این نوع استنت استفاده می شود.

۳. روش تحقیق

شبیه سازی کامپیوتری یک ابزار پشتیبانی ارزشمند در طی مراحل طراحی و بررسی پارامترهای مؤثر استنت است که نسبت به روش آزمایشگاهی مشابه، باعث صرفه جویی قابل توجهی در هزینه و زمان شده و جزئیات بیشتری ارائه می کند. با این وجود، پیاده سازی و اعتبارسنجی روش های حل عددی از چالش های اساسی در این زمینه محسوب می شود. استفاده از مدل های تحلیلی ساده در مراحل اولیه طراحی و توسعه ی استنت با هدف شناسایی دامنه ی مناسب برای هر پارامتر، بسیار مؤثر است. پارامترهای هندسی استنت شامل سلول،^۹ استرات،^{۱۰} پل^{۱۱} و حلقه^{۱۲} بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است. این پارامترها نقش اساسی در بهینه سازی خواص مکانیکی استنت دارند.

۴. طراحی استنت

در زمینه ی استنت های زیست تخریب پذیر، سه طرح مولتی لینک، جاذب و زیگ



شکل ۱. پارامترهای هندسی استنت.

۵. مدل تحلیلی استنت

انعطاف پذیری استنت رابطه‌ی معکوس با سفتی آن دارد. دو نوع سفتی برای استنت‌ها تعریف شده است: سفتی در مقابل تغییر شکل k_d و سفتی خمشی k_b . رابطه‌ی ۱^[۲۶] سفتی در مقابل تغییر شکل استنت را نشان می‌دهد:

$$k_d = \frac{F}{\Delta D} \quad (۱)$$

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 ۱۰٪ 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 پلی لاکتیک اسید (PLA) ۱۴ به ترتیب برابر ۰/۰۴۱، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۱۱ مگاپاسکال است.^[۱۱] 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 ۱۰٪ 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 و ΔD از رابطه ۲ و ۳ به دست می‌آیند:

$$\frac{D}{D_0} = 0.9 \quad (۲)$$

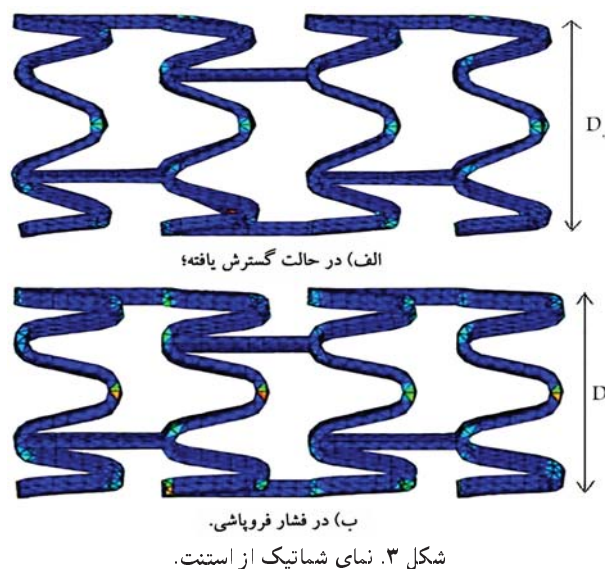
$$\Delta D = D_0 - D \quad (۳)$$

جهت محاسبه‌ی نیروی شعاعی اعمال شده به استنت F در فشار فروپاشی، از رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود.^[۲۶]

$$F = P \cdot A_{Contact} \quad (۴)$$

در این رابطه، P فشار فروپاشی و $A_{Contact}$ مساحت سطح تماس استنت با رگ می‌باشد که از رابطه‌ی ۵^[۲۶] محاسبه می‌شود:

$$A_{Contact} = A_{Struts} + A_{bridges} \quad (۵)$$

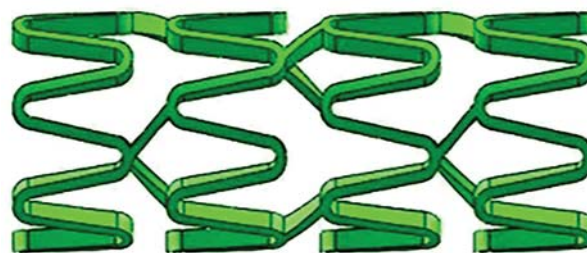


زاگ، دارای کاربرد تجاری هستند. جدول ۱ مشخصات مربوط به این استنت‌ها را نشان می‌دهد.

D_{crimp} معرف قطر خارجی استنت در حالت اولیه (پیش از گسترش) بوده که برای استنت مولتی لینک ۲/۲ میلی‌متر، جاذب ۲ میلی‌متر و زیگ زاگ ۱/۶۵ 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 ۳/۲ میلی‌متر، جاذب ۴ میلی‌متر و زیگ زاگ به ۳/۶۵ میلی‌متر می‌رسد. در این تحقیق، سه استنت مولتی لینک، جاذب و زیگ زاگ با استفاده از جدول ۱ و به طول ۵/۳۰ میلی‌متر با نرم افزار سالیدورکز^{۱۳} مدل‌سازی 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.^[۲۵]

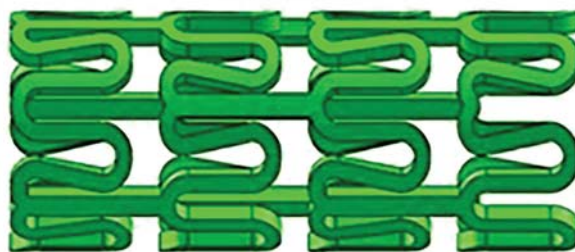
استنت	ضخامت استنت (μm)	عرض استرات (μm)	عرض پل (μm)
مولتی لینک	۱۵۶	۱۱۰	۱۱۰
جاذب	۱۵۶	۱۴۳	۲۰۰
زیگ زاگ	۱۷۰	۹۰	۸۲



الف) استنت مولتی لینک؛

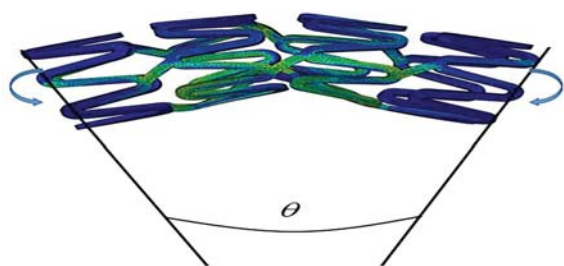


ب) استنت جاذب؛



ج) استنت زیگ زاگ.

شکل ۲. نمای شماتیک استنت‌های پلیمری در حالت اولیه.



شکل ۴. شبیه سازی المان محدود تست انعطاف پذیری استنت زیگ زاگ با طول ۵/۳۰ میلی متر، زاویه خم ۷۸/۰° و انحنا ۱۵/۰°.

جدول ۲. پارامترهای هندسی استنت و سطوح آنها.

پارامترهای هندسی استنت	سطح		
	۱	۲	۳
عرض استرات (mm)	۱/۰	۱۳/۰	۱۶/۰
عرض پل (mm)	۸/۰	۱۱/۰	۱۴/۰
ضخامت استنت (mm)	۱۷/۰	۴/۰	۲۳/۰

این روش با انجام کمترین آزمایش ها، اثر عامل های مختلف روی خروجی بررسی شده و بهترین پاسخ ارائه می شود. روش تاگوجی در طراحی آزمایش استفاده از آرایه های متعامد در کاهش تعداد آزمایش ها است. با استفاده از روش تاگوجی می توان عواملی که بیشترین تأثیر را بر کیفیت محصول دارند، با حداقل آزمایش تعیین کرد. استفاده از روش طراحی آزمایش و بهینه سازی پارامترهای هندسی استنت، در تایید کارایی استنت بسیار مؤثر است. در این مطالعه، پس از انتخاب استنت زیگ زاگ به عنوان استنت با انعطاف پذیری بالا، جهت افزایش همزمان انعطاف پذیری 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 تاگوجی و آرایه استاندارد L_9 (تعداد ۹ آزمایش) انجام گردید. در ادامه، جهت تعیین تأثیر هر کدام از فاکتورها روی انعطاف پذیری 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 استنت 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 استنت با یکدیگر می شود.

۸. نتایج

۸.۱. صحت سنجی روش

در مرجع^[۲۵] انعطاف پذیری استنت تجاری زیگ زاگ با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، جهت صحت سنجی روش المان محدود، استنت زیگ زاگ با همان مشخصات (جدول ۱) بازطراحی شده

در این رابطه، A_{struts} مساحت سطح استرات های استنت و $A_{bridges}$ مساحت سطح پل های استنت بوده که با سطح داخلی رگ در تماس می باشند (در شکل ۱ استرات و پل نمایش داده شده است). به دلیل ساختار مشبک استنت، تماس بین استنت و دیواره ی رگ، تنها در محل استرات ها و پل های استنت خواهد بود و درصدی از دیواره ی داخلی رگ با محیط بیرونی استنت در تماس است. ارمیستون و همکاران^[۲۷] نشان دادند که استنت مولتی لینک از جنس پلی لاکتیک اسید ۲۵ درصد، استنت منیزیمی جاذب ۱۰ درصد و استنت زیگ زاگ از جنس پلی لاکتیک اسید، ۲۴ درصد با دیواره رگ سطح تماس خواهند داشت. در نتیجه می توان با محاسبه مساحت سطح داخلی رگ و اعمال درصد های ذکر شده، مساحت سطح تماس هر استنت را محاسبه کرد. رابطه ی ۶ مساحت سطح داخلی رگ را نشان می دهد:^[۲۶]

$$A_{vessel} = \pi D_{vessel} L \quad (۶)$$

به طوریکه L بیانگر طول اولیه ی استنت و D_{vessel} معرف قطر رگ است. همچنین مساحت سطح تماس استنت با دیواره ی رگ که همان مساحت سطح خارجی استنت است را می توان با استفاده از نرم افزارهای طراحی مانند سالیدورکز به راحتی استخراج کرد. سفتی خمشی استنت شیب قسمت خطی (الاستیک) نمودار گشتاور - انحنا است که از نتایج شبیه سازی المان محدود استخراج می شود.^[۲۴]

۶. شبیه سازی استنت

با استفاده از شبیه سازی المان محدود می توان رفتار مکانیکی استنت های پلیمری را ارزیابی کرد. در این مقاله، جهت شبیه سازی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. جنس استنت ها از پلیمر پلی لاکتیک اسید با مدول الاستیک ۱۵۵۴ مگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۴۵ و تنش تسلیم ۴۰ مگاپاسکال است.^[۲۵] از حلگر آباکوس/استاندارد جهت آنالیز انعطاف پذیری استنت استفاده شده است. جهت مش بندی استنت از المان چهاروجهی مرتبه دوم با ۱۰ گره ($C3D10$) استفاده شده و پس از بررسی استقلال از شبکه، اندازه مش برابر ۱/۰ در نظر گرفته شده است. جهت بررسی سفتی از تست انعطاف پذیری در حالت قبل گسترش^{۱۵} و گسترش یافته استنت استفاده می شود که مقدار سفتی در هر دو حالت یکسان است.^[۲۵] در این تست به دو طرف استنت گشتاور خمشی اعمال می شود تا به اندازه زاویه θ خم شود، سپس از رابطه ۷ انحنای استنت محاسبه می شود (شکل ۴) و در ادامه نمودار گشتاور - انحنا ترسیم می شود (شکل ۵) را ببینید) که شیب این نمودار نشان دهنده ی سفتی خمشی و معکوس آن نشان دهنده ی انعطاف پذیری استنت است. هرچه شیب نمودار کمتر باشد، انعطاف پذیری استنت بیشتر و سفتی آن کمتر است. رابطه ۷^[۲۵] جهت محاسبه ی انحنای استنت κ استفاده می شود:

$$\kappa = \frac{\theta}{L} \quad (۷)$$

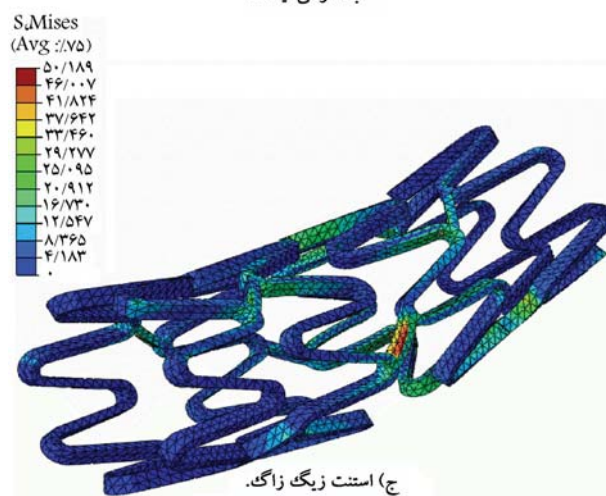
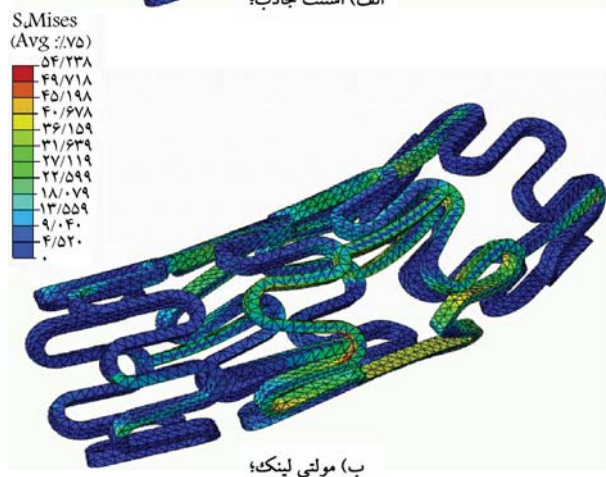
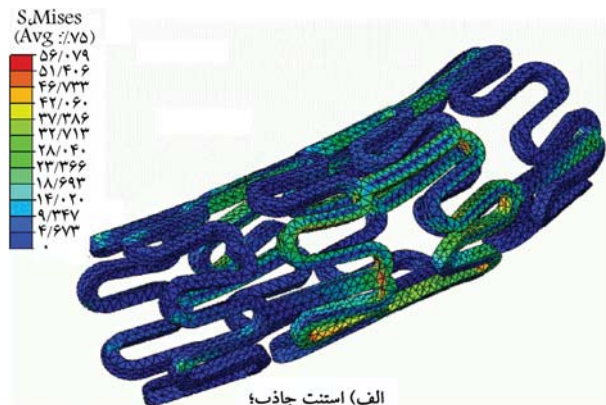
به طوریکه L بیانگر طول اولیه ی استنت، قبل از خم می باشد.

۷. بهینه سازی استنت

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

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

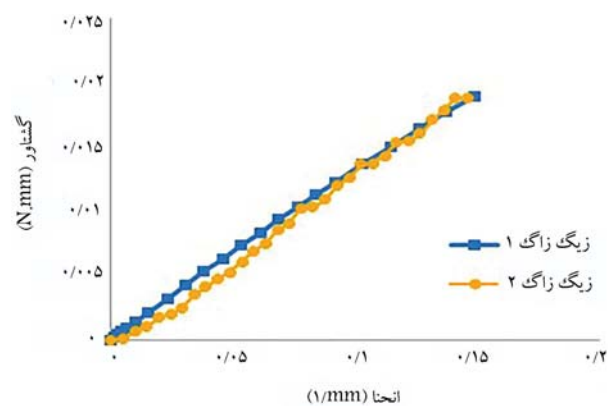
استنت	سفتی خمشی ($N.mm^{-2}$)
جاذب	۲/۲۵
مولتی لینک	۰/۸۷
زیگ‌زاگ	۰/۱۳



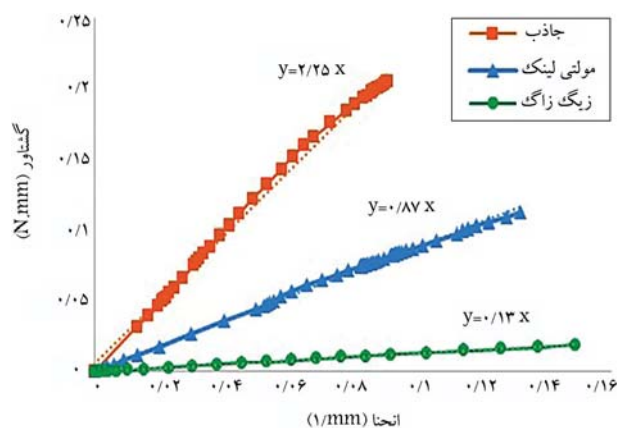
شکل ۷. توزیع تنش در اثر اعمال گشتاور خمشی با زاویه انحنای ۰/۰۵.

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 به‌کار 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 خمشی اعمالی می‌باشد. همانطور که پیشتر نیز توضیح داده شد، سفتی خمشی از شیب ناحیه‌ی خطی (الاستیک) منحنی گشتاور - انحنای بدست می‌آید و هر چه شیب نمودار کمتر باشد، انعطاف‌پذیری استنت بیشتر و سفتی آن کمتر است. با توجه به نمودار شکل ۶، زیگ‌زاگ بیشترین و برای استنت جاذب کمترین است که در مورد سفتی، این موضوع کاملاً برعکس است. در جدول ۳، نتایج محاسبه سفتی خمشی سه استنت جاذب، مولتی لینک و زیگ‌زاگ بر اساس شیب نمودارهای شکل ۶، گزارش شده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که استنت جاذب داری کمترین و استنت زیگ‌زاگ دارای بیشترین میزان انعطاف‌پذیری می‌باشند.

شکل ۷ توزیع تنش در استنت‌های جاذب، مولتی لینک و زیگ‌زاگ در اثر اعمال گشتاور خمشی را نشان می‌دهد. در زاویه انحنای ۰/۰۵ بیشترین تنش ایجاد شده در استنت جاذب، مولتی لینک و زیگ‌زاگ به‌ترتیب برابر ۵۶/۰۷، ۵۴/۲۳ و ۵۰/۱۸ مگاپاسکال است.



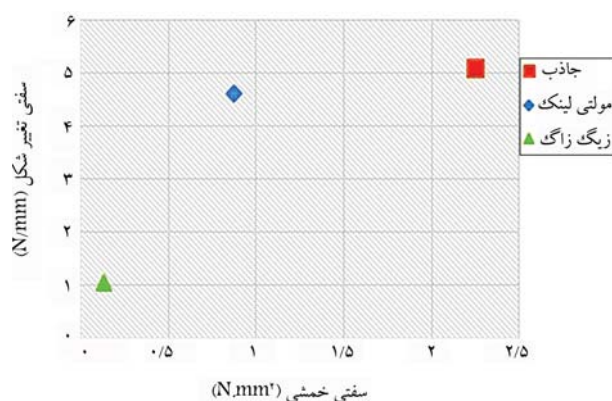
شکل ۵. مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری استنت زیگ‌زاگ طراحی شده در این مقاله (زیگ‌زاگ ۱) با نمونه‌ی مشابه آن (زیگ‌زاگ ۲). [۲۵]



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

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

استنت	P (MPa)	$A_{contact}$ (mm ²)	F (N)	ΔD (mm)	K_d (N/mm)
جاذب	۰/۰۴۱	۴۹/۸۳	۲/۰۴	۰/۴۰	۵/۱۰
مولتی لینک	۰/۰۳۵	۴۲/۴۴	۱/۴۸	۰/۳۲	۴/۶۲
زیگ زاگ	۰/۰۱۱	۳۵/۶۲	۰/۳۹	۰/۳۷	۱/۰۵



شکل ۸. مقایسه‌ی بین سفتی تغییر شکل و سفتی خمشی استنت‌های مولتی لینک، جاذب و زیگ‌زاگ.

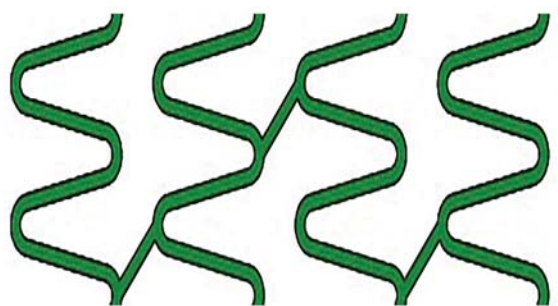
جدول ۴ سفتی تغییر شکل استنت در فشار فروپاشی را با استفاده از روابط تحلیلی ۱ تا ۴، نشان می‌دهد.

با مقایسه سفتی خمشی 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 خمشی، سفتی تغییر شکل استنت افزایش پیدا می‌کند که نشان دهنده رابطه مستقیم بین سفتی خمشی و سفتی تغییر شکل استنت است (شکل ۸).

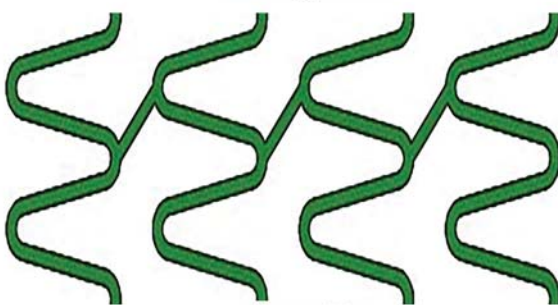
۲.۸. طرح نهایی

طراحی بهینه استنت، یکی از روش‌های مهم برای بهبود خواص مکانیکی استنت و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان یک داربست جهت رفع گرفتگی عروق کرونری قلب است. در استنت‌های پلیمری به‌منظور تأمین نیازهای طراحی، افزایش مقاومت شعاعی ضروری است. در روش‌های متداول طراحی استنت، اتصال استرات‌ها در حلقه‌های متوالی و در یک ردیف به‌صورت یک در میان انجام می‌شود. به‌دلیل نقش پل و استرات و نحوه اتصال آنها در خواص مکانیکی استنت^[۲۸] ایده اصلی این مقاله یعنی تغییر محل اتصال پل و استرات شکل گرفت. همانطور که ملاحظه شد استنت زیگ‌زاگ دارای بیشترین میزان انعطاف‌پذیری و کمترین مقدار مقاومت شعاعی در بین استنت‌های پلیمری تجاری است و به همین دلیل، این استنت به‌منظور بهینه‌سازی انتخاب شد. در این مطالعه، جهت افزایش استحکام شعاعی استنت زیگ‌زاگ، 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 زیگ‌زاگ با استفاده از روش المان محدود، نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری طرح جدید کاهش پیدا کرده ولی

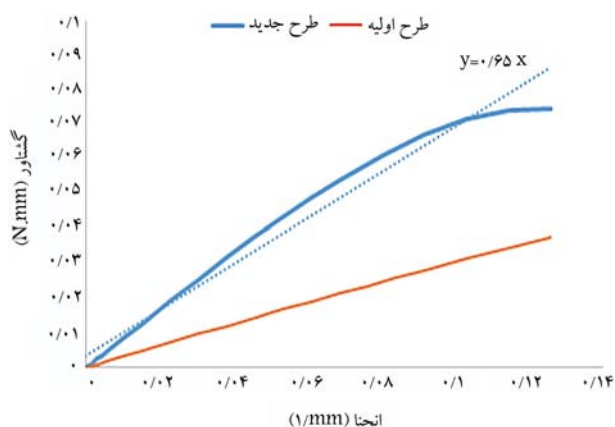


الف) طرح متداول؛



ب) طرح جدید.

شکل ۹. مقایسه دو طرح استنت زیگ‌زاگ.



شکل ۱۰. مقایسه انعطاف‌پذیری طرح جدید و اولیه استنت زیگ‌زاگ با استفاده از روش المان محدود.

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

جهت بررسی طرح جدید با کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی از نرم‌افزار مینی‌تپ 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 نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. طرح آزمایشات و نتایج گشتاور خمشی 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 - $p^{۱۶}$ استفاده می‌شود. با فرض سطح معنادار α برابر ۰/۰۵، اگر

جدول ۵. طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی و نتایج گشتاور خمشی بدست آمده از شبیه سازی.

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

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس برای انعطاف پذیری استنت ها.

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

مقدار $p < ۰/۰۵$ کوچکتر باشد نشان دهندهی 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 انعطاف پذیری استنت مؤثر بوده ولی ضخامت استنت تأثیر معناداری روی انعطاف پذیری استنت ندارد.

۹. بحث و بررسی

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

مورد نیاز جهت بازیابی جریان خون را فراهم کند. به دلیل اهمیت این موضوع، در این مطالعه، سفتی و انعطاف پذیری استنت های پلیمری تجاری مولتی لینک، جاذب و زیگ-زاگ، که ارتباط مستقیمی با خواص مکانیکی استنت داشته و پرکاربردترین هندسه های مورد استفاده هستند، با استفاده از روش های تحلیلی محاسبه و از نرم افزار آباکوس جهت شبیه سازی المان محدود و آنالیز خواص مکانیکی استنت های پلیمری تجاری استفاده شده است. مقایسه ی نتایج حاصل از شبیه سازی المان محدود و معادلات تحلیلی نشان می دهد که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از این دو روش وجود دارد. مرور مطالعات قبلی نشان می دهد که استنت های پلیمری به دلیل مدول الاستیسیته ی پایین دارای استحکام کمی نسبت به استنت های فلزی مشابه هستند.^[۲۴] البته در مقابل، انعطاف پذیری بالاتر و سایر مزایای قابل توجه استنت های پلیمری، این جنس ماده را در کانون توجه به منظور ساخت استنت ها قرار داده است. به همین منظور، در این مقاله، همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، جهت کاهش عیب عملکردی ناشی از استحکام پایین استنت پلیمری نسبت به استنت فلزی، با بهینه سازی هندسه ی استنت، هندسه ای ارائه شده که دارای انعطاف پذیری و استحکام قابل قبول است. در مطالعات پیشین^[۱۸] نیز نشان داده شده است که هندسه ی استنت تأثیر زیادی روی خواص مکانیکی آن دارد و با بهینه سازی پارامترهای هندسی شامل استرات و پل می توان استحکام استنت های پلیمری را نسبت به نمونه های مشابه فلزی، تا حدود زیادی بهبود بخشید. انعطاف پذیری طرح جدید ارائه شده برای استنت با هندسه ی زیگ-زاگ با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل واریانس انجام و مشخص شد که انعطاف پذیری این استنت نسبت به تغییر ضخامت حساس نبوده و می توان با افزایش ضخامت استنت، استحکام شعاعی آن را افزایش داد.

۱۰. نتیجه گیری و جمع بندی

این مقاله با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل واریانس، یک رویکرد جدید در طراحی استنت ها ارائه می کند که می تواند در جهت بهینه سازی طراحی استنت های پلیمری تجاری و بررسی خواص مکانیکی آنها مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از روش المان محدود و ایجاد طرح های نوآورانه، امیدهای زیادی در جایگزینی استنت های پلیمری با استنت های فلزی و رفع محدودیت های آنها ایجاد کرده است. طرح جدید ارائه شده در این مقاله برای استنت زیگ-زاگ یک نمونه از این موارد نوآورانه است که یک طراحی مقاوم بوده و حساسیت کمی به تغییر ضخامت دارد. در نتیجه می توان با افزایش ضخامت بدون کاهش انعطاف پذیری قابل توجه، استحکام شعاعی استنت را افزایش داد. هر چند این پایان مسیر نیست و با استفاده از طرح های خلاقانه می توان بیش از پیش از ظرفیت استنت های پلیمری با طراحی بهینه ی هندسه ی آنها استفاده کرد.

پانویس ها

1. Coronary Arteries
2. Stent

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

8. Bench Testing
9. Cell
10. Strut
11. Bridge
12. Ring
13. Solidworks
14. Poly Lactic Acid
15. Pre-expanded
16. P-Value

منابع (References)

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 bioresorbable 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 خنک‌کاری جداره آبی یک دیفیوزر شبیه‌ساز ارتفاع بالا

نعمت‌اله فولادی (استادیار)

پژوهشکده‌ی سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

محمد فراهانی* (استادیار)

میلاد مهدیان دولت‌آبادی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوبی ۴۰، شماره ۱، ص. ۳۷-۲۵، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، الگوریتم طراحی سیستم خنک‌کاری برای دفع شارهای حرارتی بالا از دیواره‌های دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء توسعه یافته است. در این الگوریتم، دبی سیال خنک‌کننده، ارتفاع کانال و طول کانال خنک‌کاری طوری تعیین می‌شود که با فراهم‌سازی شرایط دمایی بدنه و حفظ سهولت پیاده‌سازی طرح، افت فشار کل نیز در بازه مطلوب قرار گیرد. از روش شبیه‌سازی عددی برای یافتن تقریب‌های مناسب انتقال حرارت و ارزیابی طراحی استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقریب‌های تجربی میر و کندا به‌ترتیب برای تخمین عدد ناسلت (حداکثر ۴ درصد خطا) و ضریب اصطکاک (حداکثر ۱/۱ درصد خطا) در شرایط مسئله حاضر مناسب هستند. در ادامه، قابلیت بالای الگوریتم با ارائه نتایج طراحی با توزیع شارهای حرارتی نشان داده شده است. به‌طوری‌که برای یک شار حرارتی بحرانی (۲/۵ مگاوات بر متر مربع)، یک سیستم خنک‌کاری دوکاناله با دبی و ارتفاع کانال متفاوت طراحی شده است.

واژگان کلیدی: خنک‌کاری چند کاناله، دیفیوزر فلزی، روش جداره آبی، شار حرارتی بالا.

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

۱. مقدمه

برای تست زمینی نازل‌های طول بلند (با نسبت انبساط بالا) که برای ایجاد نیروی پیشران در شرایط جوی رقیق طراحی شده‌اند، اکثر مواقع از تجهیزات تست ارتفاع بالا استفاده می‌شود. در یک شبیه‌ساز ارتفاع بالا، محیط اطراف موتور و نازل توسط یک محفظه تست (محفظه خلاء) و یک لوله گاز - دینامیکی (دیفیوزر) طوبلی که قطر آن در محل نازل اندکی بزرگ‌تر از قطر خروجی نازل است، از محیط اتمسفر جدا می‌شود (شکل ۱). در این سیستم، یک گپ حلقوی برای محفظه تست در صفحه

خروجی نازل شکل می‌گیرد که می‌تواند محل عبور جریان از محفظه به دیفیوزر و برعکس باشد. در این سیستم، دیفیوزر طوری طراحی می‌شود که جریان گازهای احتراقی در قسمت عمده آن مافوق صوت باشد. با مافوق صوت شدن جریان گازها در دیفیوزر و انبساط گازهای خروجی از نازل در ورودی آن، گازهای موجود در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۳۱، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۹.

استناد به این مقاله:

فولادی، نعمت‌اله، فراهانی، محمد، و مهدیان دولت‌آبادی، میلاد، ۱۴۰۳. الگوریتم طراحی و بررسی عددی سیستم خنک‌کاری جداره آبی یک دیفیوزر شبیه‌ساز ارتفاع بالا. دانشکده‌ی

مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۳۷-۲۵. DOI:10.24200/J40.2023.61692.1668

۲. تعریف مسئله و پارامترهای حاکم

در حالت کلی برای دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء، تبادل انتقال حرارت در سه محیط گاز داغ، فلز با ضخامت t و سیال خنک‌کننده با ارتفاع h صورت می‌پذیرد که شماتیک قسمتی از دیواره دیفیوزر 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:

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

که در معادله ۱ h_w ضریب انتقال 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:

$$\Delta P_c = \frac{f}{4} \frac{L}{D_h} \rho \bar{v}^2 \quad (2)$$

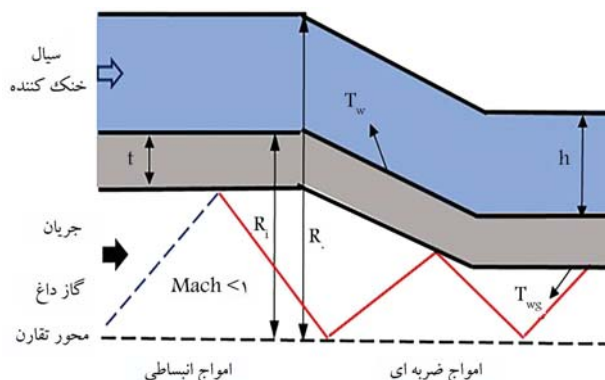
سه پارامتر مهم در طراحی حاضر وجود دارد که عبارت‌اند از: دبی جرمی سیال خنک‌کننده (\dot{m})، ارتفاع کانال خنک‌کاری (h) و طول کانال خنک‌کاری. از معادلات حاکم بر مسئله می‌توان روابط زیر را استخراج کرد.^[۱۵]

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

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

در معادله ۴، α توان عدد رینولدز در رابطه تجربی h_w استفاده شده می‌باشد که بطور معمول برابر عدد ۰/۸ 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 \dot{m} و ΔP_c با \dot{m} 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

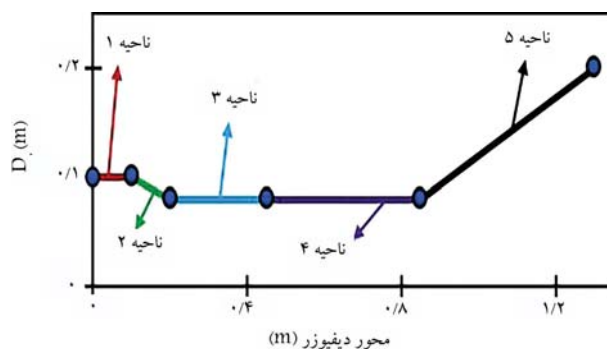


شکل ۲. طرح شماتیک دیواره دیفیوزر و کانال خنک‌کاری با نسبت قطر $a = \frac{D_1}{D_c} = \frac{R_1}{R_c}$.

طراحی و ساخت سیستم خنک‌کاری دیفیوزر استند 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 کشورهایی در حال توسعه در صنعت فضایی مانند ایران، علاوه بر نیاز بالا به اکتساب این نوع فناوری‌ها، تجربیات کافی در این زمینه‌ها وجود ندارد. همچنین، مطابق با دانش نویسندگان، در خصوص نحوه طراحی سیستم خنک‌کاری جداره آبی دیفیوزر شبیه‌ساز ارتفاع بالا در تست موتور سوخت جامد، تا کنون تحقیقی منتشر نشده است. در تست موتورهای سوخت جامد، جریان گازهای احتراقی حاوی مذاب اکسید آلومینیوم با دمای بالا و مومستوم بالا به سطح داخلی دیفیوزر برخورد می‌کند و در صورت بالا رفتن دمای سطح و کاهش استحکام فلز در این ناحیه، سایش حرارتی شدیدی در ورودی دیفیوزر رخ می‌دهد.^[۷] با توجه به شار حرارتی بالا و سطوح 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 دیفیوزر که منجر به پیچیدگی در اجرای تست می‌شود. علاوه بر این، روابط تجربی و نیمه تجربی مورد استفاده در طراحی برای تخمین ضرایب انتقال حرارت همرفت در هندسه‌های بزرگ و شار حرارتی بالا به خصوص برای یک جریان حلقوی با خطا مواجه هستند. بنابراین، برای اطمینان به این گونه طراحی‌ها، نیاز به تست‌های آزمایشگاهی و یا بررسی با روش شبیه‌سازی عددی صحت‌سنجی 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 دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء پرداخته شده است. در این راستا، یک الگوریتم طراحی سیستم خنک‌کاری جدید به روش جداره آبی توسعه داده می‌شود. 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 کمک 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 شبکه 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.



شکل ۳. تقسیم‌بندی نواحی مختلف دیفیوزر.

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

با علم بر این‌که در صورت خنک‌کاری، داغ‌ترین سطح، سطح سمت گاز داغ است (T_{wg})، می‌توان یک مقدار مجاز (T_{wa}) برای این پارامتر در نظر گرفت که بهتر است این مقدار مجاز با توجه به دمای سرویس کاری فولاد ضدزنگ انتخاب شود (که مقدار بالای 90° کلین است). بنابراین، بهتر است با حاشیه اطمینان مناسب، دمای مجاز (T_{wa}) را برابر 75° کلین در نظر گرفت و اجازه داد در محدوده 10° 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 خطا جستجو می‌شود. در این بررسی، نقاط کنترل، دمای انتهای هر ناحیه است. این نقاط کنترل در حین طراحی بررسی می‌شوند تا با افزایش یا کاهش دبی جرمی، شرایط دمایی برآورده شوند. حال اگر دبی جرمی به دست آمده بیش‌تر از دبی جرمی بیشینه شود، در این صورت یک ناحیه کم می‌شود و طراحی مجدداً برای تعداد کمتری ناحیه به دنبال یک کانال مناسب می‌گردد. زمانی‌که شرط دمایی با فرض $\dot{m} < \dot{m}_{max}$ برآورده شود، افت فشار کل جریان (ΔP_o) محاسبه می‌شود. اگر $\Delta P_o < \Delta P_{o,max}$ باشد، کانال برای آن تعداد ناحیه نهایی می‌شود. اما اگر $\Delta P_o > \Delta P_{o,max}$ باشد، تلاش می‌شود که با افزایش پارامتر h ، ΔP_o کاهش یابد. اگر در این پروسه، $h > h_{max}$ باشد و کماکان $\Delta P_o > \Delta P_{o,max}$ باشد، در این صورت نیز می‌بایست تعداد نواحی کمتر شود و الگوریتم مجدداً 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.

گام ۱. پارامترهای کنترلی، ناحیه‌ای و مشخصات سیال خنک‌کاری در دمای محیط ($T_i = 300^\circ K$) به‌عنوان 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 به‌عنوان ورودی به کد داده می‌شود؛

گام ۴. پارامترهای هندسی دیفیوزر به‌عنوان ورودی به کد محاسباتی داده می‌شود. L معرف طول کل دیفیوزر می‌باشد که این مقدار از مجموع طول هر ناحیه (lr) به‌دست 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 ($h = h_1$) سپس، می‌توان سطح مقطع عبور جریان را به کمک معادله ۵ محاسبه کرد؛

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

گام ۶. یک مقدار اولیه برای \dot{m} در نظر گرفته می‌شود. می‌توان به کمک آن سرعت متوسط ($\bar{v}(x)$) را در مقاطع مختلف از رابطه پیوستگی به‌دست 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 پاستگی انرژی در طول داکت حلقوی استفاده کرده و با انتگرال‌گیری از آن، دمای بالک به‌صورت زیر به دست می‌آید؛

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

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

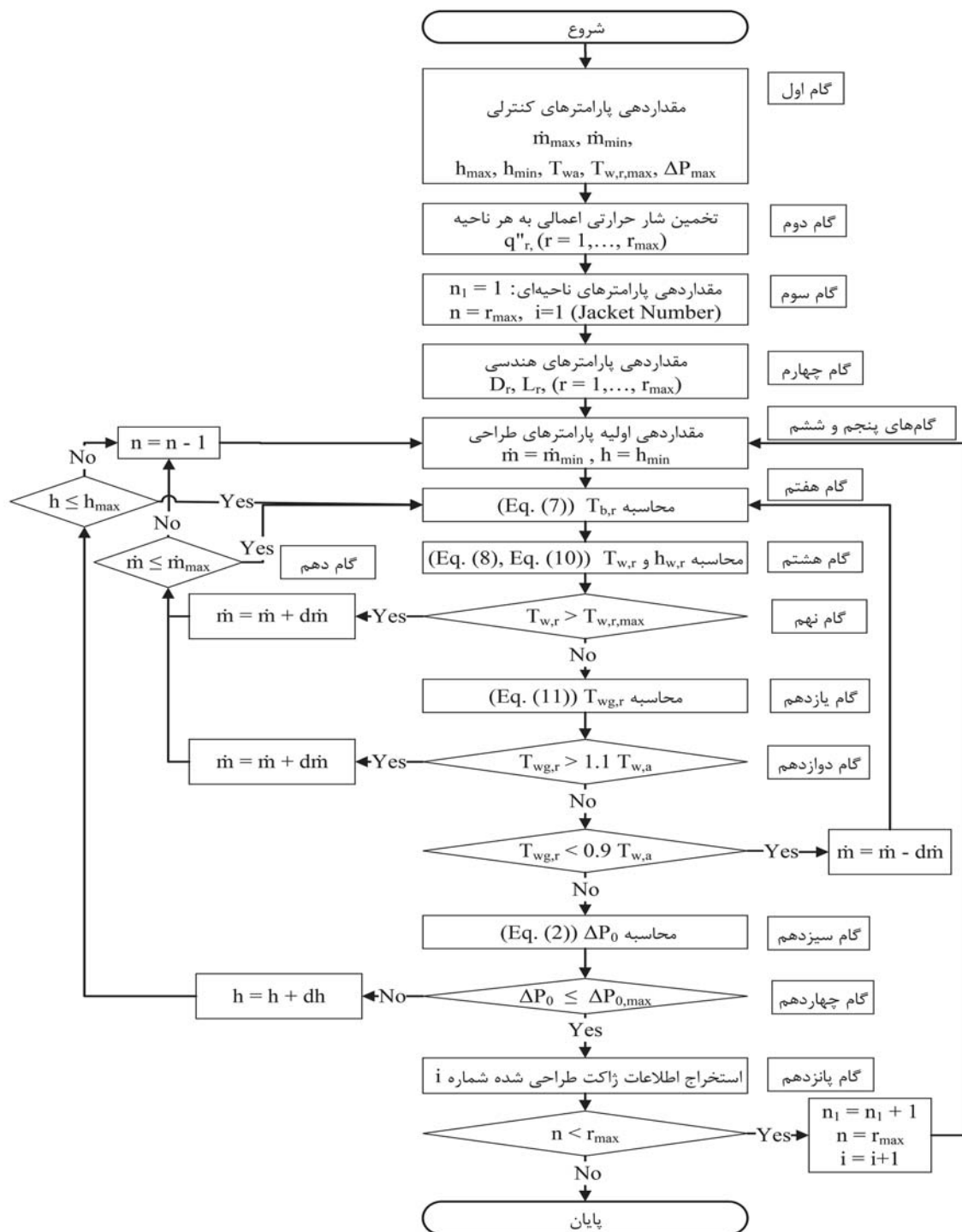
$$q''(x) = h_w (T_w(x) - T_b(x)) \quad (8)$$

$$h_w = \frac{k}{D_h} Nu_{D_h}$$

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 ۴. فلوچارت طراحی سیستم خنک‌کاری جداره آبی.

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

که در آن D_h قطر هیدرولیکی کانال 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.

$$T_w(x) = T_b(x) + \frac{q''(x)}{\left(\frac{k}{r_h}\right) \times Nu_{D_h}} \Rightarrow T_w(x) = T_i + \frac{q''(x)}{\left(\frac{k}{r_h}\right) \times Nu_{D_h}} + \frac{1}{\dot{m} C_P} \int_0^x q''(x) \times \pi \times D_o(x) dx \quad (10)$$

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

مرجع	رابطه تقریب عدد ناسلت
دیرکر و میر [۱۶]	$Nu_{Dh} = C_s Re_{Dh}^P Pr^{1/2} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{1/4}$ $C_s = \frac{0.02 \times a^{-1/86}}{0.062a^{-2} - 0.67a^{-1} + A}$ $A = \frac{0.225}{a} - 0.157$ $P = 0.13 e^{\frac{-0.67}{a}}$
سوامی و همکاران [۱۷]	$Nu_{Dh} = \frac{0.27}{(1 + \frac{1}{a})^{0.7}} \times Re^{0.8} Pr^{1/2} B$ $B = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{1/4}$
دیوتس و بولتر [۱۸]	$Nu_{Dh} = 0.23 Re_{Dh}^{0.8} Pr^n$ $n = 0.4 \text{ heating}$ $n = 0.3 \text{ cooling}$
ویگند [۱۹]	$Nu_{Dh} = 0.23 a^{-0.45} Re_{Dh}^{0.8} Pr^n B$
گنیلینسکی [۲۰]	$Nu_{Dh} = \frac{\frac{f}{h} Re_{Dh} Pr}{\phi + 1.27 \sqrt{\frac{f}{h} (Pr^{2/3} - 1)}} C$ $C = \left[1 + \left(\frac{D_{hx}}{L_{hx}} \right)^{(2/3)} \right] F_{ann} K$ $\phi = 0.7 + \frac{0.4}{Re_{Dh}} - \frac{0.67}{1 + 0.67 Pr}$ $K = \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4}; F_{ann} = 0.75 \times a^{-0.17}$ $f = (0.8 \log(Re^*) - 0.5)^{-2}$ $Re^* = Re_{Dh} \frac{(1+a^2) \ln(a) + (1-a^2)}{(1-a)^2 \ln(a)}$

گام ۱۰. در صورت افزایش دبی جرمی در گام نهم، با هر بار افزایش دبی جرمی باید شرط مقبولیت \dot{m} را بررسی کرد. در صورت برآورده شدن شرط $\dot{m} < \dot{m}_{max}$ ، از گام هفتم و در غیر این صورت بعد از کاهش دادن ناحیه $(n = n - 1)$ ، محاسبات از گام ششم ادامه می‌یابد؛

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؛

$$q''(x) = \frac{k_{st}}{t} (T_{wg}(x) - T_w(x)) \Rightarrow T_{wg}(x) = T_w(x) + \frac{q''(x) \times t}{k_{st}} \quad (11)$$

گام ۱۲. شرط مقبولیت T_{wg} بررسی می‌شود. شرط مقبولیت T_{wg} به این صورت است که دمای T_{wg} باید در محدوده ۱۰ 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 ۱۰ عمل می‌شود)؛

گام ۱۳. افت فشار کل درون کانال خنک‌کاری با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود. برای محاسبه ضریب اصطکاک موجود در معادله ۲، از روابط تجربی یا نیمه تجربی ارائه شده برای مقاطع حلقوی و هم‌مرکز مطابق جدول ۲ استفاده می‌شود؛

گام ۱۴. شرط مقبولیت افت فشار کل بررسی می‌شود. اگر ΔP_0 و (دبی جرمی) فاکتور هزینه پمپ را برآورد کند $(\Delta P_0 < \Delta P_{0,max})$ ، گام ۱۵ اجرا می‌شود.

جدول ۲. تقریب‌های محاسبه ضریب اصطکاک برای مقاطع حلقوی و هم‌مرکز.

مرجع	رابطه تقریب ضریب اصطکاک
جانز و لونگ [۲۱]	$f = (2 \log(Re^* \sqrt{f}) - 0.8)^{-2}$ $Re^* = Re_{Dh} E$ $E = \frac{(1+a^2) \ln(a) + (1-a^2)}{(1-a)^2 \ln(a)}$
باهاتی و شاه [۲۲]	$f = (1 + 0.925a) \times B$ $B = (0.86859 \ln(F))^{-2}$ $F = \left(\frac{Re_{Dh}}{1.962 \ln(Re_{Dh}) - 3.815} \right)$
کندا و همکاران [۲۳]	$\frac{f}{h} = \left(0.61 + \frac{1}{0.236} \ln \left(\frac{Re_{Dh}}{\sqrt{\frac{h}{f}}} \right) - G \right)^{-2}$ $G = \frac{0.55}{Re_{Dh} \sqrt{\frac{f}{h}}}$
گنیلینسکی [۲۰]	$f = (0.8 \log(Re^*) - 0.5)^{-2}$
بلازیوس [۲۴]	$f = 0.3164 Re_{Dh}^{-0.25}$

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 \dot{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 $h > h_{max}$ باشد، تعداد نواحی کانال کمتر می‌شود و محاسبات از گام پنجم تکرار می‌گردد؛

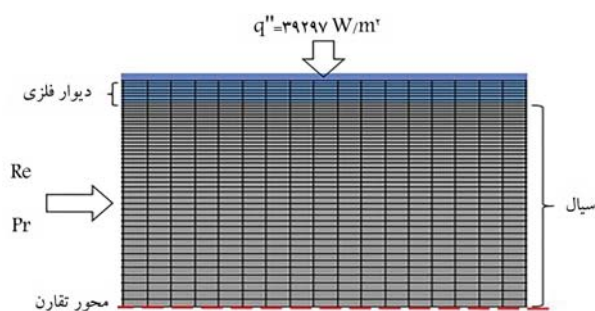
گام ۱۵. اگر تعداد نواحی (n) که داکت برای آن طراحی شده است، برابر تعداد ناحیه پیشینه r_{max} باشد، به معنی اتمام طراحی است. اما چنانچه پارامتر n کم‌تر از r_{max} باشد، به این معنی است که داکت طراحی شده همچنان ناحیه یا نواحی آخری را پوشش نمی‌دهد. بنابراین، اطلاعات داکت طراحی شده، ذخیره‌سازی شده و برای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

۴. روش شبیه‌سازی عددی

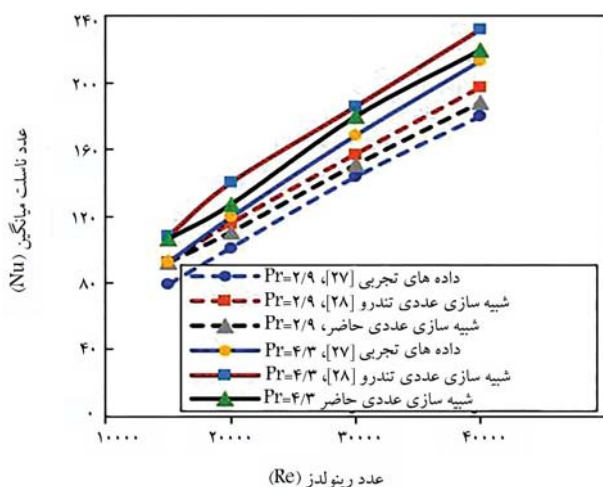
در سیستم خنک‌کاری جداره آبی، از داکت‌های حلقوی هم‌مرکز به عنوان کانال خنک‌کاری استفاده می‌شود. همچنین، برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک درون داکت‌های حلقوی هم‌مرکز، تقریب‌های تجربی و نیمه تجربی متفاوتی ارائه شده است که هر یک از این تقریب‌ها برای داکت‌هایی با نسبت قطر مشخص و جریان‌هایی با عدد رینولدز مشخص معرفی شده‌اند. در مسئله حاضر، قطر دیفیوزر نسبت به ارتفاع کانال نسبتاً بزرگ است. در حالی که در بیش تر تقریب‌های ارائه شده، ارتفاع مجرای عبور 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 شبیه‌سازی عددی، بهترین تقریب‌ها را جهت استفاده در کد محاسباتی استفاده کرد. در این پژوهش، کد محاسباتی در بستر نرم‌افزار متلب^۴ نسخه R2018a^[۲۵] توسعه

جدول ۳. بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی.

موقعیت طولی (m)	۱۴۷۲۱۹	۳۰۸۷۸۴	۱۲۲۸۵۹۱
فشار کل	۲/۲۵	۶۹۸۳/۳۰	۷۳۶۰/۹۰
(متوسط سطحی)	۳/۵۰	۵۰۷۸/۳۶	۵۳۴۵/۶۴
(Pa)	۴/۷۵	۳۳۱۱/۴۰	۳۳۳۶/۸۵
دمای بالک	۲/۲۵	۳۱۳/۱۳	۳۱۳/۱۳
(K)	۳/۵	۳۱۴/۹۶	۳۱۴/۹۶
	۴/۷۵	۳۱۶/۷۹	۳۱۶/۷۹



شکل ۵. تصویری از شبکه محاسباتی ایجاد شده با تعداد ۳۰۸۷۸۴ گره.



شکل ۶. میانگین عدد ناسلت در اعداد رینولدز متفاوت.

با مدل آشفتگی $k - \varepsilon - \text{Realizable}$ و Enhanced wall treatment (که 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، به‌مراتب به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. به‌طوری‌که برای محاسبه عدد ناسلت متوسط و مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی نشان می‌دهد که

داده شده و از نرم افزار انسیس ورکبنچ^۵ نسخه ۲۰۱۹ R۱ [۲۶] برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. هندسه کانال خنک‌کاری که از کد محاسباتی به‌دست آمده است، در نرم افزار انسیس جئومتري^۶ مدل‌سازی شده و به کمک نرم‌افزار انسیس مشینگ^۷ یک شبکه با سازمان بر روی آن ایجاد می‌شود. سپس، به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت^۸ با استفاده از حلگر فشار مینا به‌صورت دوبعدی متقارن محوری، تحلیل عددی صورت می‌گیرد. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل $k - \varepsilon - \text{Realizable}$ استفاده می‌شود. برای جلوگیری از خطاهای کاربری و سایر خطاهای ناشی از عدم انتخاب صحیح حلگرها، انتخاب شرایط مرزی، انتخاب مدل توربولانسی، ایجاد شبکه محاسباتی مناسب و غیره، مطالعه اعتبارسنجی با مراجع تجربی و همچنین مطالعه استقلال حل از شبکه عددی ضرورت دارد که در بخش بعدی ارائه شده است.

در شبیه‌سازی عددی از فرضیات جریان پایا، تقارن محوری، سراسر توربولانت، جریان تک فاز با ثابت بودن ویژگی‌های دمایی سیال خنک‌کننده استفاده شده است. همچنین، از انتقال حرارت تشعشعی صرف‌نظر شده و دیواره بیرونی سیستم خنک‌کاری آدیاباتیک 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. اعتبارسنجی و بررسی استقلال حل از شبکه

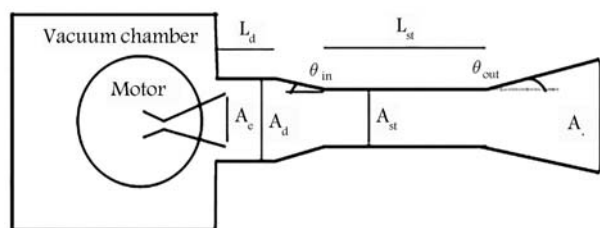
اعتبارسنجی روش حل عددی پژوهش حاضر با داده‌های تجربی مرجع [۲۷] انجام می‌شود. در این مرجع، ویسته و همکاران در یک مطالعه تجربی به بررسی انتقال حرارت درون یک لوله با سطح مقطع دایره‌ای به طول شش متر، قطر داخلی ۱۸ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر پرداخته‌اند. در پژوهش آنها، سیال عامل، اتیل‌گلیکول - آب بوده است.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

۱. یک ناحیه بدون شار حرارتی با طول ۲/۱۶ متر برای تضمین شرایط به‌طور کامل توسعه یافته؛

۲. یک ناحیه با شار حرارتی ثابت ۳۹۲۹۷ وات بر متر مربع با طول ۲/۷ متر؛

۳. یک ناحیه بدون شار حرارتی با طول ۱/۱۴ متر که به‌عنوان خروجی عمل می‌کند. اگرچه طول لوله شش متر است، اما انتقال حرارت و مقدار عدد ناسلت فقط در ناحیه ۲ بررسی می‌شود. همچنین، مقدار ضریب اصطکاک و افت فشار در یک ناحیه به طول ۵/۲ متر در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از ابتدای لوله اندازه‌گیری می‌شوند. در این مطالعه، میانگین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در جریان‌هایی با اعداد رینولدز و پراتل متفاوت بررسی شده است. در سال ۲۰۱۸، تندرو و همکاران در یک مطالعه عددی، پژوهش ویسته و همکاران را با روش شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۸].

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 Y ، برای قسمت پوسته فلزی هفت المان و برای قسمت سیال ۴۰ المان با ضریب رشد ۱/۰۳ 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 ۱/۲۵ میلی‌متر و پارامتر Y^+ از نرم افزار انسیس فلوئنت در حدود پنج گزارش شده است. قابل ذکر است که مطابق توصیه مراجع،



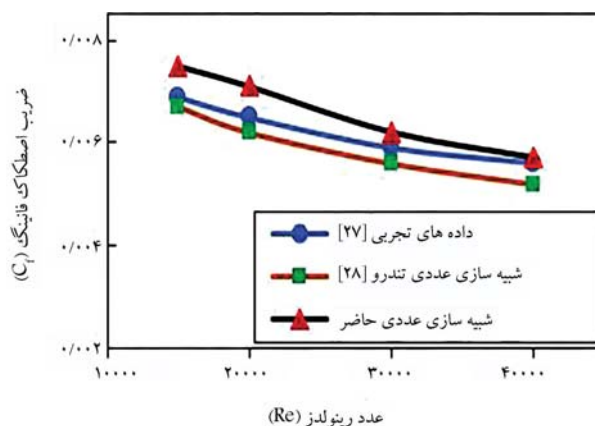
شکل ۸. طرح شماتیک از یک دیفیوزر گلگاه ثانویه [۳۰]

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}

ناسلت که در جدول ۱ گزارش شدند، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی کانال خنک‌کاری مقایسه می‌شود. در این پژوهش، جریان سیال در کانال خنک‌کاری به صورت متقارن محوری با حل گر فشار مینا و با مدل توربولانسی $k - \epsilon - Realizable$ در نرم‌افزار انسیس فلونت فلونت شبیه‌سازی می‌شود. در تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، در ورودی جریان، شرط مرزی دبی جرمی ورودی، 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 آدیاباتیک اعمال شده است. ابتدا تقریب‌های تجربی و نیمه‌تجربی مناسب با هندسه مذکور که برای عدد ناسلت ارائه شده‌اند، بررسی می‌شوند. ارتفاع کانال خنک‌کاری و دبی جرمی جریان برای تمامی حالت‌ها یکسان و به ترتیب برابر ۴/۲ میلی‌متر و ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. برای شبیه‌سازی هندسه مذکور در نرم‌افزار انسیس فلونت، یک شبکه سازمان دهی شده با تعداد ۶۲۵۰۰۷۰ المان ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در شبکه محاسباتی مذکور، فاصله اولین گره تا دیواره بالایی ۰/۲۳ میلی‌متر و پارامتر Y^+ در نرم‌افزار فلونت 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 ۲/۵ مگاوات بر متر مربع، به ناحیه‌های ۳ و ۴ شار حرارتی ۲ مگاوات بر متر مربع و به ناحیه ۵ شار حرارتی ۱/۵ مگاوات بر متر مربع اعمال می‌شود.

شکل ۹، توزیع دمای فلز در سمت سیال خنک‌کننده را در طول دیفیوزر برای تقریب‌های مختلف عدد ناسلت نشان می‌دهد. نحوه تغییرات دما در نواحی مختلف دیفیوزر بیشتر تحت تأثیر تغییرات هندسی، شار حرارتی، سرعت جریان در کانال و دمای بالک است که در مثال‌های بعدی با جزئیات بیشتر مورد تشریح قرار می‌گیرد. با توجه به شکل مزبور، روند تغییرات دمای فلز در سمت سیال خنک‌کننده در طول دیفیوزر در همه تقریب‌ها با روند به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی یکسان است. با توجه به نتایج به‌دست 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 ورودی کانال، در سایر قسمت‌های دیفیوزر نتایج تقریب میر و شبیه‌سازی عددی هم‌خوانی قابل قبولی دارند. لازم به ذکر است که دلیل اختلاف قابل توجه نتایج تجربی با عددی در بخش کوچک ناحیه ورودی کانال، به



شکل ۷. ضریب اصطکاک فانیگ در اعداد رینولدز متفاوت.

بیشینه درصد خطا در اعداد رینولدز ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ زیر ۱۰ درصد است.

شکل ۷ مقایسه‌ای میان ضریب اصطکاک فانیگ که از داده‌های تجربی و داده‌های عددی تندر 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 تندر نزدیک است و دارای دقت قابل قبولی می‌باشد. در محاسبه ضریب اصطکاک فانیگ، بیشینه خطای نتایج شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با داده‌های تجربی برابر ۸/۴ درصد است. با توجه به نمودار شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده دارای دقت خوبی است.

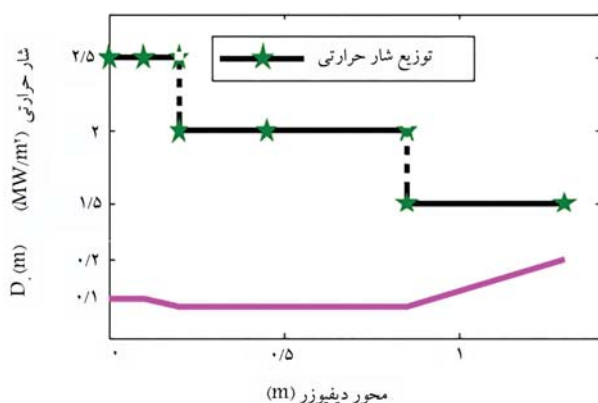
۵. نتایج

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 ناسلت و ضریب اصطکاک، توزیع دمای به دست آمده بر روی دیواره دیفیوزر و افت فشار درون کانال خنک‌کاری در تقریب‌های مختلف با 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 کاناله و دو کاناله شده است، ارائه شده و عملکرد الگوریتم طراحی و دقت نتایج به‌دست آمده مورد بحث قرار گرفته است.

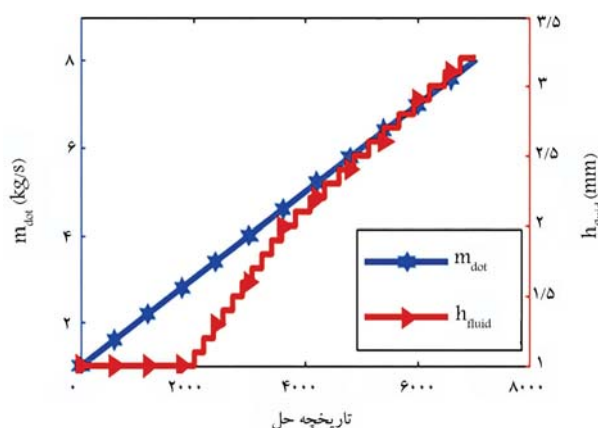
۱.۵. انتخاب تقریب‌های مناسب با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی

شکل ۸ شماتیک 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 گلگاه ۱۱ میلی‌متر می‌باشد، طراحی شده است. پارامترهای هندسی دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء طراحی شده مطابق با پارامترهای شکل ۸ در جدول ۴ گزارش شده است.

در ابتدا نتایج دمایی به دست آمده از تقریب‌های مختلف برای محاسبه عدد



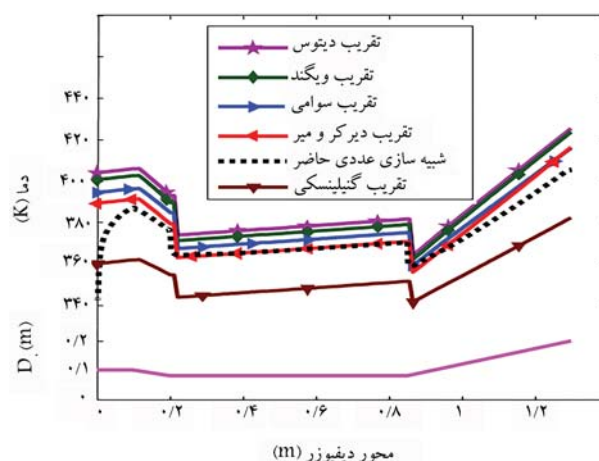
شکل ۱۰. توزیع شار حرارتی اعمالی به دیواره دیفیوزر.



شکل ۱۱. تاریخچه طراحی سیستم خنک‌کاری 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 بررسی‌های انجام شده در مراجع^[۳۱،۷] در شرایط کارکرد دائم و پایدار دیفیوزر، با روش تجربی و روش شبیه‌سازی عددی تخمین زده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر ارتفاع کانال یک و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به مشخصات پمپ سیال خنک‌کننده 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 میلی‌متر (ارتفاع کانال) شروع شده است. در این جستجو تا دبی جرمی سه کیلوگرم بر ثانیه، مقدار ارتفاع ثابت بوده و تغییری نکرده است. به عبارت دیگر، در ارتفاع کانال برابر یک میلی‌متر و دبی جرمی پایین‌تر 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 علی‌رغم فراهم‌سازی قیود دمایی در این دبی‌ها، 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 نمی‌شوند و لازم است مجدداً دبی جرمی افزایش یابد. این روند افزایش مقادیر هر



شکل ۹. توزیع دمای فلز سمت سیال خنک‌کننده.

جدول ۵. افت فشار کل درون کانال خنک‌کاری.

نوع تقریب	افت فشار درون کانال خنک‌کاری [%]	درصد خطا در مقایسه با شبیه‌سازی عددی [%]
شبیه‌سازی عددی	۱۸/۹۳	-
تقریب جانز	۲۰/۰۰	۵/۴۰
تقریب باهاتی و شاه	۲۰/۰۲	۵/۴۹
تقریب کندا	۱۸/۷۲	۱/۰۶
تقریب گنیلینسکی	۱۹/۷۸	۴/۳۵
تقریب بلازیوس	۱۸/۴۹	۲/۳۲

تفاوت الگوی جریان در شبیه‌سازی عددی نسبت به فرضیات تقریب‌های تجربی باز می‌گردد. در شبیه‌سازی عددی، الگوی جریان ورودی شبیه‌سازی شده است، درحالی‌که تقریب‌های تجربی برای جریان‌های توسعه یافته ارائه شده‌اند. 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 نتایج شبیه‌سازی عددی می‌توان دریافت که تقریب میر با بیشینه درصد خطا ۳/۸۱ درصد، نزدیک‌ترین پاسخ را به نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه می‌کند.

جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی عددی را با نتایج تقریب‌های مختلف برای محاسبه افت فشار درون کانال خنک‌کاری مقایسه می‌کند. لازم به ذکر است که در این پژوهش، فشار کاری سیال خنک‌کننده، پنج بار در نظر گرفته شده است. از نتایج جدول ۵ واضح است که نتایج به دست آمده با تقریب کندا، نزدیک‌ترین نتیجه را به شبیه‌سازی عددی با ۱/۰۶ درصد خطا دارد. بنابراین، در کد محاسباتی برای تقریب عدد ناسلت از تقریب میر و برای تقریب ضریب اصطکاک از تقریب کندا استفاده می‌شود.

۲.۵. طراحی سیستم خنک‌کاری جداره آبی با توزیع شار حرارتی

با مشخص شدن تقریب‌های تجربی مناسب برای استفاده در الگوریتم طراحی (تقریب میر برای محاسبه عدد ناسلت و تقریب کندا برای محاسبه ضریب اصطکاک)، سیستم خنک‌کاری مناسب برای دیفیوزر (شکل ۸ و جدول ۴) با فرض شار حرارتی توزیعی

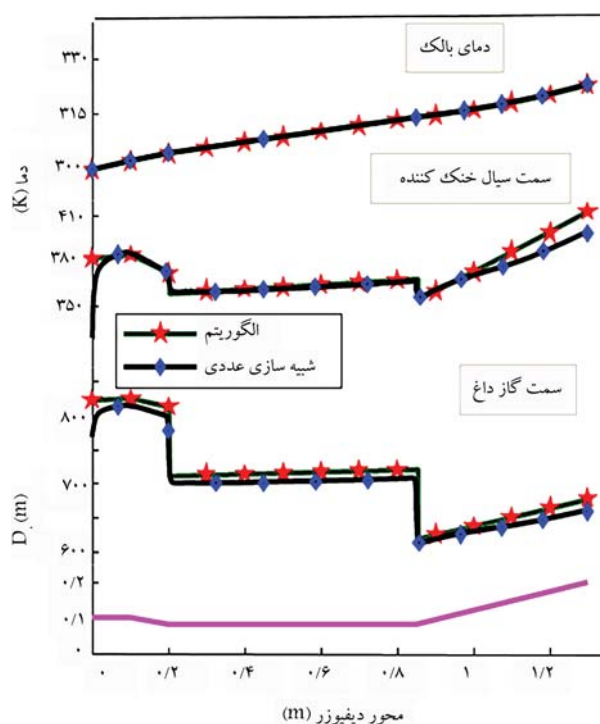
حرارتی (به علت شیب منفی همگرایی دیفیوزر) و افزایش سرعت جریان (به علت کوچک تر شدن مقطع حلقوی عبور جریان) دمای دیواره در این ناحیه در طول دیفیوزر کاهش می‌یابد. افت شدید دمای دیواره در ورود به ناحیه ۳، به دلیل تغییر در شار حرارتی از ۲/۵ به ۲ مگاوات بر متر مربع است. در طول ناحیه ۳ و ۴ که دارای شار حرارتی، 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 ۲ به ۱/۵ 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، شبیه‌سازی عددی جریان در کانال طراحی شده در این مثال انجام شده و نتایج دمایی آن شکل ۱۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای انجام شبیه‌سازی عددی هندسه مذکور، از یک شبکه محاسباتی با تعداد 780000 المان استفاده شده و پارامتر Y^+ از نرم افزار فلوئنت حدود پنج گزارش شده است. مطابق شکل، با صرف نظر از ناحیه ورودی کانال، بیشینه درصد خطا میان نتایج دمایی حاصل از کد محاسباتی با نتایج شبیه‌سازی عددی، مربوط به انتهای ناحیه ۵ می‌باشد که برای دمای فلز سمت خنک‌کننده خطا برابر $3/65$ درصد و برای دمای فلز سمت گاز داغ برابر $2/86$ درصد می‌باشد. همچنین، افت فشار کل در کانال خنک‌کاری که از شبیه‌سازی عددی به دست آمده است، برابر $27/93$ درصد می‌باشد. بنابراین، افت فشار حاصل از کد محاسباتی در مقایسه با شبیه‌سازی عددی دارای $3/49$ درصد خطا است.

۳.۵. طراحی سیستم خنک‌کاری جداره‌آبی با شار حرارتی بحرانی

در این طراحی، برای تمامی نواحی، شار حرارتی $2/5$ مگاوات بر متر مربع اعمال می‌شود. این مقدار شار حرارتی با توجه به نتایج مرجع^[۷] مقدار بحرانی برای این سیستم شبیه‌ساز خلاء می‌باشد. همچنین، در شرایط گذرای 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 منظور، بسته به نوع مسئله، ممکن است طراحی سیستم خنک‌کاری بر مبنای بار حرارتی بحرانی در نظر گرفته شود. در این طراحی نیز همانند طراحی قبلی، با توجه به محدودیت پمپ سیال خنک‌کننده موجود، بیشینه دبی جرمی برای هر کانال 10° کیلوگرم بر ثانیه و افت فشار کل قابل 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 میلی‌متر (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 میلی‌متر و دبی جرمی پایین‌تر از $5/8$ کیلوگرم بر ثانیه، شرایط دمایی مطابق الگوریتم برآورده نشده است. مطابق شکل، در دبی جرمی بالاتر از این مقدار، علی‌رغم 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 برآورده‌سازی شرایط دمایی، دبی جرمی نیز افزایش می‌یابد. این روند افزایش مقادیر هر دو پارامتر تا حداکثر مقدار دبی جرمی یعنی 10° کیلوگرم بر ثانیه ادامه یافته



شکل ۱۲. توزیع دما در طول کانال خنک‌کاری.

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

در پایان فرایند طراحی، یک سیستم خنک‌کاری تک کاناله با ارتفاع $3/2$ میلی‌متر و دبی جرمی جریان $8/25^\circ$ کیلوگرم بر ثانیه طراحی شده است. مطابق الگوریتم طراحی، اولویت طراحی در گام اول تک‌کانال بودن سیستم خنک‌کاری 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 دیواره‌ها بوده است. در گام آخر، کمینه ارتفاع کانال به شرط فراهم‌سازی افت فشار کل در حد قابل قبول بوده است. نتایج دمایی و نتایج افت فشار درون کانال خنک‌کاری در ادامه ارائه شده است.

شکل ۱۲ نتایج دمایی به دست آمده برای دمای بالک سیال خنک‌کننده، دمای فلز سمت سیال خنک‌کننده و دمای فلز سمت گاز داغ را نشان می‌دهد. مطابق شکل، بیشینه مقدار دمای فلز سمت سیال خنک‌کننده و سمت گاز داغ به ترتیب از 425 کلوین و 900 کلوین پایین‌تر است و افت فشار کل در کانال خنک‌کاری $28/94$ درصد به دست آمده است. بنابراین، کانال طراحی شده الزامات دمایی و افت فشار کل را برای فشار کاری پنج بار برآورد کرده است.

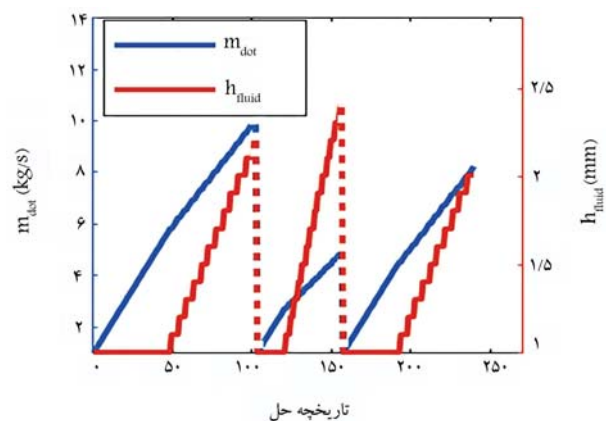
در رابطه با نحوه تغییرات مشخصی دمای بالک و دمای دیواره‌ها، قابل ذکر است که با توجه به ماهیت انتقالی دمای بالک، واضح است که مقدار آن در یک کانال ثابت، پیوسته افزایشی است و با تغییرات محلی شار حرارتی و یا تغییرات محلی سطح دیفیوزر، تغییرات کمی در شیب آن ایجاد شده است. اما دمای دیواره‌ها کمیتی محلی است و تغییرات آن وابستگی به نسبت شدیدی با تغییر در شار حرارتی، پارامتر هندسی (قطر دیفیوزر)، سرعت جریان و دمای بالک دارد؛ به‌طوری‌که مطابق شکل ۱۲، در ناحیه ورودی دیفیوزر (ناحیه ۱ در شکل ۳)، دمای سیال خنک‌کننده به دلیل افزایش دمای بالک با افزایش ملایمی روبه‌رو بوده است و در طول ناحیه ۲، علی‌رغم ثابت بودن شار حرارتی و دبی جرمی، به دلیل کاهش سطح تبادل

دمایی دیواره‌ها همانند مسئله قبل است؛ با این تفاوت که در این مسئله شار حرارتی در کلیه سطوح دیفیوزر ثابت بوده است. بنابراین، تغییرات دمایی دیواره‌ها در نتیجه تغییر در سطح مقطع عبور جریان (تغییر در سرعت یا ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی) و تغییر در سطح دیفیوزر (سطح تبادل حرارتی) و تغییرات دمای بالک رخ داده است. همان‌طور که در شکل واضح است، شرایط دمایی در این سیستم خنک‌کاری برآورد شده است. همچنین، افت فشار کانال اول (برای چهار ناحیه ابتدایی) برابر ۲۳/۱۱ درصد و کانال دوم (برای ناحیه پنجم) برابر ۲۵/۳۶ 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.

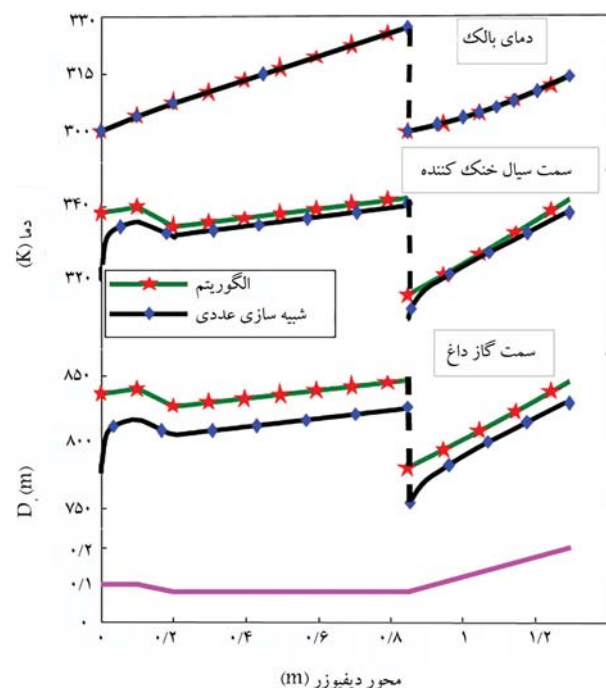
به منظور ارزیابی طراحی انجام شده، شبیه‌سازی عددی جریان در کانال‌های طراحی شده در این مثال انجام شده و نتایج مربوط به توزیع دمای بالک، دمای دیواره سمت سیال خنک‌کننده و سمت گاز داغ در شکل ۱۴ آورده شده است. لازم به ذکر است که برای انجام شبیه‌سازی عددی کانال اول از شبکه‌ای با 280000 المان و برای کانال دوم 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 کانال‌ها، بیشینه درصد خطا میان نتایج حاصل از کد محاسباتی با نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به انتهای ناحیه ۱ می‌باشد که برای دمای فلز سمت سیال خنک‌کننده خطا برابر $2/61$ درصد و برای دمای فلز سمت گاز داغ برابر $3/42$ درصد می‌باشد. افت فشار کل که از شبیه‌سازی عددی به دست آمده است، برای کانال اول $22/14$ درصد و برای کانال دوم $24/97$ درصد می‌باشد. بنابراین، افت فشار حاصل از کد محاسباتی در مقایسه با شبیه‌سازی عددی برای کانال اول و دوم به ترتیب دارای $4/19$ درصد و $1/54$ درصد خطا می‌باشد.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک الگوریتم جدید برای طراحی سیستم خنک‌کاری دیفیوزر به روش جداره آبی برای شار حرارتی بالا و سطوح بزرگ ارائه شد. مطابق با این الگوریتم، یک کد محاسباتی برای طراحی کانال خنک‌کاری دیفیوزر شبیه‌ساز خلاء توسعه داده شد. الگوریتم مزبور بدین صورت عمل می‌کند که با در نظر گرفتن توزیع شار حرارتی و سایر الزامات، پارامترهای دبی جرمی، ارتفاع کانال و طول کانال خنک‌کاری را با روش سعی و خطا به نحوی محاسبه می‌کند که دمای دیواره دیفیوزر از مقدار مجاز و قابل تحمل بدنه فلزی تجاوز نکرده و افت فشار کل در حد قابل قبول باشد. در این تحقیق از روابط تجربی و نیمه تجربی موجود در مراجع برای تخمین ضرایب انتقال حرارت همرفت و افت فشار در مقاطع حلقوی هم‌محور استفاده شد. با توجه به بازه‌های محدود هندسی و شار حرارتی و یا عدد رینولدز این روابط، وجود خطا در محاسبات حاضر اجتناب ناپذیر است. بنابراین، از روش شبیه‌سازی عددی جریان برای انتخاب روابط تجربی و نیمه تجربی 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 کانال خنک‌کاری را دارد. به این صورت که اگر در محدوده‌های تعیین شده برای پارامترهای دبی جرمی و ارتفاع کانال



شکل ۱۳. تاریخچه طراحی سیستم خنک‌کاری دو کاناله.



شکل ۱۴. توزیع دما در طول کانال خنک‌کاری.

است. با توجه به این‌که در این حالت همچنان شرط افت فشار کل برآورده نشده است، به ناچار 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 کانال را به دست آورده است که این مقدار برابر $4/9$ کیلوگرم بر ثانیه و $2/4$ میلی‌متر بوده است. در ادامه، یک کانال جداگانه برای ناحیه ۵ طراحی شده است. روند تغییرات دبی جرمی و ارتفاع کانال مشابه با تغییرات آنها در طراحی کانال خنک‌کاری اول بوده است و پارامترهای ارتفاع کانال برابر دو میلی‌متر و دبی جرمی جریان برابر $8/2$ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شده است.

شکل ۱۴ توزیع دمای بالک سیال خنک‌کننده، دمای فلز سمت سیال خنک‌کننده و دمای سمت گاز داغ را نشان می‌دهد. در این طراحی به دلیل دو کاناله بودن سیستم خنک‌کاری در ورودی ناحیه ۴، شرط دمایی مقدار دهی اولیه شده است. بنابراین، دمای بالک در این ورودی برابر 300° کلون است. تغییرات دمای بالک و تغییرات

خنک‌کاری نتوان یک کانال خنک‌کاری طراحی کرد، الگوریتم در یک حلقه تکرار برای تعداد نواحی کمتر، کانال خنک‌کاری طراحی می‌کند تا جایی که برای تمامی نواحی، سیستم خنک‌کاری طراحی شده باشد. در بخش نتایج این تحقیق، دو نمونه طراحی سیستم خنک‌کاری با الگوریتم حاضر ارائه شد. در مسئله اول، توزیع شار حرارتی متفاوت روی نواحی مختلف دیفیوزر در نظر گرفته شده بود و یک سیستم خنک‌کاری 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 خنک‌کاری 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 خنک‌کاری تک کاناله وجود نداشته و سیستم خنک‌کاری دو کاناله طراحی شده است. در نهایت، تحلیل‌های دمایی و افت فشار در کل سیستم مورد بررسی قرار گرفت و صحت طراحی‌ها با شبیه‌سازی عددی مورد تایید قرار گرفت.

فهرست علائم

• علائم لاتین

A : سطح مقطع، m^2 ؛

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه $J/kg.K$ ؛

D_h : قطر هیدرولیکی m ؛

h : ارتفاع کانال m ؛

h_w : ضریب انتقال حرارت همرفت $W/m^2.K$ ؛

K_{st} : ضریب انتقال حرارت رسانش جداره $W/m.K$ ؛

M : عدد ماخ؛

Nu : عدد ناسلت؛

P_r : عدد پرانتل؛

r : نواحی دیفیوزر؛

t : ضخامت دیواره m .

• علائم یونانی

ΔP : افت فشار کل %؛

ε : زبری سطح m ؛

μ : لزجت دینامیکی $Pa.s$ ؛

\bar{v} : سرعت متوسط m/s ؛

ρ : چگالی kg/m^3 ؛

a : نسبت قطر حلقوی؛

D : قطر m ؛

f : ضریب اصطکاک داری؛

h_g : ضریب انتقال حرارت همرفت سیال گاز داغ $W/m^2.K$ ؛

K : ضریب انتقال حرارت رسانش $W/m.K$ ؛

L : طول کانال m ؛

\dot{m} : دبی جرمی جریان kg/s ؛

P : فشار Pa ؛

q : شار حرارتی W/m^2 ؛

Re : عدد رینولدز؛

T : دما K .

• زیرنویس‌ها

ad : آدیاباتیک؛

b : بالک؛

g : گاز داغ؛

w : سمت سیال خنک‌کننده؛

wg : سمت گاز داغ.

پانویس‌ها

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 Khosroanjom, 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/10.1177/09544110019840970>.
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/JSSTA.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 شبیه سازی درشت دانه دینامیک مولکولی

مهران واعظی (دانشجوی دکتری)

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف

حسین نجات پیشکناری* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

محمدرضا اجتهادی (استاد)

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوره ۴۰، شماره ۱، ص. ۳۹-۴۶، (پژوهشی)

استفاده از مدل درشت دانه در شبیه سازی دینامیک مولکولی امکان بررسی نانوساختارها را با صرف زمان و هزینه کمتر فراهم می سازد. در پژوهش حاضر، مدل درشت دانه ای برای توصیف چیدمان سطحی نانوخودروها ارائه می گردد. در این مدل، فرض می شود که در برهمکنش بین نانوخودروها، برهمکنش بین چرخ ها نقش عمده را ایفا می کند. آنالیز انرژی پتانسیل بین دو نانوخودرو، پیکربندی تعادلی نانوخودروها را توصیف می کند. با شبیه سازی خوشه ای که شامل دو نانوخودرو در دماهای مختلف از ۲۰۰ تا ۶۰۰ کلوین است، پایداری حرارتی پیکربندی های تعادلی مورد آزمایش قرار می گیرند. در دمای کلوین ۲۰۰، پیکربندی های تعادلی نانوخودروها پایدار باقیمانده و در دمای ۴۰۰ کلوین نانوخودروها می توانند از یک پیکربندی تعادلی به پیکربندی دیگر تغییر وضعیت دهند. این در شرایطی است که در دمای ۶۰۰ کلوین و بالاتر، انرژی حرارتی منتقل شده به دو نانوخودرو باعث جدایی آنها می شود. در گام بعد، چیدمان سطحی خوشه هایی شامل چهار و هشت نانوخودرو بررسی می گردد. پیش بینی های به دست آمده از مدل درشت دانه، مطابق با نتایج مطالعات قبلی، پیرامون مدل تمام - اتم خوشه های شامل نانوخودروهاست.

واژگان کلیدی: شبیه سازی دینامیک مولکولی، مدل درشت دانه، نانوخودرو، ماشین های مولکولی، خودسامانی روی سطح.

mehran.vaezi@sharif.edu
nejat@sharif.edu
ejtehadi@sharif.edu

۱. مقدمه

یکی از روش های دقیق ساخت نانومواد با ابعاد کوچک، ساخت با رویکرد پایین به بالا است،^[۱] که در آن نانومواد از طریق خودسامانی^۱ پیش سازه های مولکولی به دست می آیند.^[۲] به منظور مونتاژ موفقیت آمیز نانوساختار مورد نظر از طریق روش ساخت پایین به بالا، ابتدا ویژگی های مولکول های پیش سازه که در طی فرایند خودآرایی به یکدیگر متصل می شوند، باید شناسایی شوند.^[۳] در حال حاضر، ارتباط بین ساختار مولکول های پیش سازه و نتیجه فرایند خودآرایی توجه بسیاری از پژوهش ها را به خود جلب کرده است.^[۴-۷]

از حوزه هایی که به منظور ساخت نانومواد با دیدگاه پایین به بالا مورد توجه قرار گرفته است، طراحی و سنتز ماشین های مولکولی حرکت کننده روی سطح می باشد.

که به نام «نانوخودروها» شناخته می شوند.^[۸] این ماشین های مولکولی که از نظر ظاهر شبیه به ماشین های مرسوم هستند، از اجزایی نظیر چرخ، شاسی و محور تشکیل می شوند.^[۹] این ساختارها پتانسیل جابه جایی سطحی نانومواد را دارند^[۱۰] و با این هدف مورد ارزیابی قرار می گیرند که با انتقال هدفمند مواد روی سطح بتوانند نانوساختارهایی با ابعاد کوچک، شکل دهند. از طرفی، این ماشین های مولکولی به عنوان واحدهای ساختاری مواد بزرگ تر می توانند خود یک ساختار خود - مونتاژ مورد نیاز را به وجود بیاورند.^[۱۱] به این دلیل، بررسی نحوه ی حرکت و برهمکنش بین نانوخودروها و نحوه ی اتصال آنها در شرایطی که بیش از یک نانوخودرو روی سطح باشد، حائز اهمیت است.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۲۱، پذیرش ۱۴۰۲/۱/۳۰.

استناد به این مقاله:

واعظی، مهران، نجات پیشکناری، حسین و اجتهادی، محمدرضا، ۱۴۰۳. ارزیابی چیدمان سطحی خودروهای مولکولی به کمک شبیه سازی درشت دانه دینامیک مولکولی. دانشکده مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۳۹-۴۶. DOI:10.24200/J40.2023.61727.1669

مولکولی به نام «نانوتراک» و «نانوکار» 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 نانوخودروها تبدیل می‌کند. در مطالعات بعدی، از ساختارهای دیگری نظیر پی - کربورین،^[۱۷] ادمتین^[۱۴] و ترکیبات آلی - فلزی^[۱۸] به عنوان چرخ‌های نانوخودرو استفاده شده است. به لحاظ آزمایشگاهی، جابجایی این نانوماشین‌ها روی سطح معمولاً از طریق میدان الکتریکی ناشی از میکروسکوپ تونلی روبشی^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 سطح دوبعدی مانند گرافن^[۲۲] و نیتريدیور^[۲۳] این نتیجه حاصل می‌شود که در دمای یکسان نانوخودروها روی این سطح نسبت به سطح فلزی، ضریب انتشار و جابجایی بیشتری را تجربه می‌کنند. دسته دیگری از مطالعات، روی هدایت هدمند حرکت نانوخودروها روی سطح انجام گرفته است. نعمتی و همکارانش^[۲۴-۲۶] به کمک روش دینامیک مولکولی حرکت جهت‌دار نانوخودرو را تحت شرایط مختلفی گزارش کرده‌اند. از جمله شرایطی که باعث حرکت جهت‌دار نانوخودروها می‌شود استفاده از پله‌های اتمی در سطح،^[۲۷] سطوح ترکیبی،^[۲۴] ایجاد گرا دیان دمایی^[۲۵] و گرا دیان کرنش^[۲۸] در سطح می‌باشد. علاوه بر روش‌های مبتنی بر دست‌کاری سطح، حرکت جهت‌دار سطحی در نوعی نانوخودرو با شش چرخ نیز گزارش شده است.^[۱۷]

در برخی از پژوهش‌های آزمایشگاهی، خودآرایی مولکولی نانوخودروها روی سطح مورد توجه قرار گرفته است. در یکی از این مطالعات، نوعی ماشین مولکولی ساخته شده که از دو قسمت مکمل تشکیل می‌گردد که به کمک پیوند هیدروژنی و با در مدلی دیگر با برهمکنش فلز - لیگاند به یکدیگر متصل می‌شوند.^[۱۱،۲] استفاده از این برهمکنش‌های ناپیوندی به دلیل جهت‌پذیری، فضایی مناسب برای ساخت نانوخودروها مورد توجه هستند. در ادامه، با ایجاد دو عامل برقرارکننده‌ی پیوند هیدروژنی در واحد ساختاری این نانوخودروها، زنجیره خود مونتاژ تولید می‌شود، که این زنجیره «نانوقطار» نامیده شده است.^[۲۹] 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 نانوخودروها روی سطح مواجه هستیم.^[۱۹] شناخت برهمکنش ناپیوندی بین نانوخودروها و چیدمان سطحی آنها، می‌تواند در طراحی نانوساختارهای سطحی مفید واقع شود.

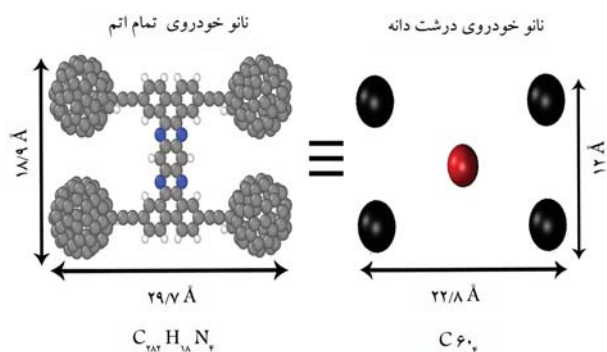
روش متداولی که در بررسی حرکت سطحی مولکولی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تمام - اتم است.^[۳۰-۳۲] استفاده از این روش که در آن غالباً از میدان نیروی مکانیک مولکولی^۳ استفاده می‌شود، نیازمند صرف وقت و هزینه قابل توجهی می‌باشد. در پژوهش حاضر، به منظور افزایش سرعت محاسبات جهت تعیین آرایش سطحی نانوخودروها و نیز امکان بررسی آرایش سطحی نانوخودروهای دیگر، اقدام به طراحی مدل درشت‌دانه‌ای برای شبیه‌سازی ماشین‌های مولکولی بر پایه فولرین شده است. در ابتدا، برهمکنش سطحی دو نانوخودرو و پیکربندی‌های تعادلی آنها توسط مدل درشت‌دانه‌ای به دست می‌آید. با تغییر دمای شبیه‌سازی، پایداری حرارتی این پیکربندی‌های تعادلی در دماهای مختلف ارزیابی

می‌شود. پیش‌بینی‌های حاصل از مدل درشت‌دانه‌ای با نتایج مطالعات قبلی که روی مدل تمام - اتم نانوخودروها انجام شده مقایسه می‌گردد. در نهایت، امکان استفاده از این مدل برای سیستم‌های بزرگ‌تر شامل چهار و هشت نانوخودرو به طور جداگانه بررسی می‌شود.

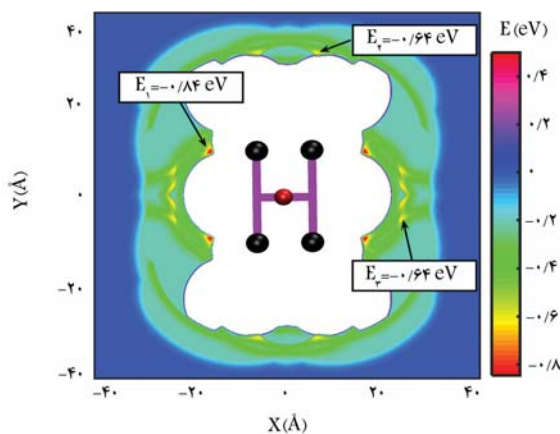
۲. روش‌های محاسباتی

در مدل درشت‌دانه‌ای ارائه شده، فرض می‌شود که نانوخودروها بیشترین برهمکنش را از طریق چرخ‌ها با یکدیگر دارند. از این رو مطابق شکل ۱، چهار ذره متناظر با چهار چرخ نانوخودرو در نظر گرفته می‌شوند. از آنجایی که در نانوخودروها، چرخ‌ها به کمک پیوندهای شیمیایی به یکدیگر مقید شده‌اند، در مدل درشت‌دانه‌ای نیز چرخ‌ها با بخش‌های پیوندی و خمش زاویه‌ای هارمونیک با ضریب سختی زیاد (به ترتیب $100000 \text{ eV}/\text{\AA}^2$ و $100000 \text{ eV}/\text{rad}^2$) به یکدیگر متصل می‌شوند، تا در حین شبیه‌سازی ساختارهای صلبی وجود داشته باشد. همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم، پیوندهایی که طول نانوخودرو مستطیلی شکل را مشخص می‌کنند، فاصله تعادلی $22/8 \text{\AA}$ دارند و پیوندهایی که عرض نانوخودرو را مشخص می‌کنند دارای طول تعادلی $12/0 \text{\AA}$ می‌باشند. مقادیری که برای طول تعادلی پیوند بین ذرات (چرخ‌ها) در نظر گرفته شده است، معادل فاصله مرکز جرم چرخ‌های نانوخودرو در مدل تمام - اتم می‌باشد.^[۲۲] زاویه‌های تعادلی در جملات خمش زاویه‌ای نیز برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شده، تا ذرات مشابه چرخ‌های نانوخودرو روی رئوس یک مستطیل قرار گیرند. لازم به ذکر است که جرم ذرات، معادل جرم 60 اتم کربن (جرم فولرین) در نظر گرفته شده است.

برای تعریف برهمکنش بین ذرات چرخ در مدل درشت‌دانه، ابتدا انرژی برهمکنش بین دو فولرین برحسب فاصله بین مرکز جرم آنها محاسبه شد. بدین منظور، با ثابت نگه داشتن یک فولرین و جابجایی یک بعدی فولرین دیگر، انرژی برهمکنش بین دو مولکول از طریق محاسبه مجموع انرژی پتانسیل بین اتم‌های آنها به دست می‌آید. برهمکنش بین اتم‌های دو فولرین توسط تابع انرژی پتانسیل لئارد - جونز ۱۲-۶ 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 برحسب فاصله مرکز جرم آنها به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با استفاده از تابع مورس، یک منحنی بر انرژی برهمکنش دو فولرین برآزش کرده و این‌گونه برهمکنش بین دو فولرین در شکل ۲، توسط تابع پتانسیل مورس با شعاع قطع 20 آنگستروم تعریف می‌گردد.



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

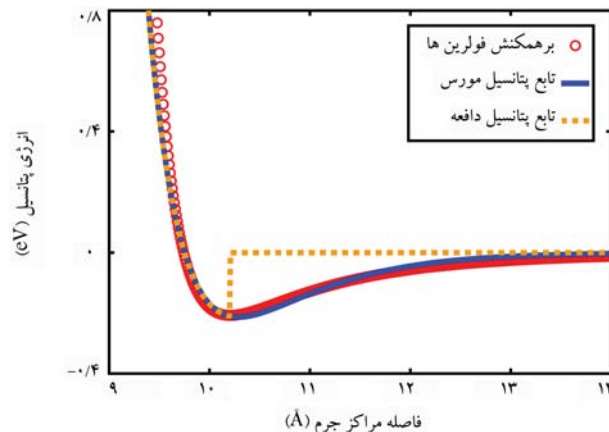


شکل ۳. کمترین انرژی پتانسیل بین دو نانوخودرو درحالی که، نانوخودرو مرکز در مبدأ مختصات قرارگرفته و نانوخودرو محیطی در اطراف آن به نقاط مختلف جابجا شده و نسبت به آن در زوایای مختلف قرار می گیرد.

نانوخودروی دیگر، مکان های مختلف در اطراف نانوخودروی مرکزی را جابجا می کند. در هر نقطه در اطراف نانوخودروی مرکزی، نانوخودروی دوم حول محور عمود بر سطح ۹۰ درجه می چرخد و در هر موقعیت انرژی پتانسیل بین دو نانوخودرو محاسبه می گردد. برای هر نقطه در اطراف نانوخودروی مرکزی، کمترین انرژی پتانسیل بین دو نانوخودرو که از چرخش نانوخودروی محیطی به دست آمده ثبت می گردد. به این طریق، ما در فواصل مختلف دو نانوخودرو، کمترین انرژی پتانسیل برهمکنش دو نانوخودرو را به ازای پیکربندی های متفاوت (زاویه های نسبی مختلف دو نانوخودرو) به دست می آوریم. لازم به ذکر است که انرژی برهمکنش بین دو نانوخودرو از طریق پتانسیل مورس و پتانسیل دافعه معرفی شده، در شکل ۲ محاسبه می شود. نانوخودروی محیطی با گام های ۱ و ۰٫۰۱ انگستروم در اطراف نانوخودروی مرکزی جابجا می شود و در هر نقطه با گام های ۱ درجه می چرخد. علت چرخش ۹۰ درجه ای نانوخودروی محیطی در هر نقطه، تقارن موجود در ساختار نانوخودرو (تقارن D_{2h}) می باشد.

شکل ۳، کمترین انرژی پتانسیل بین دو نانوخودرو در فواصل مختلف مرکز جرم در پیکربندی های متفاوت را نشان می دهد. طبق این شکل، با توجه به تقارن موجود در نانوخودرو تقریباً سه نوع نقطه کمیته موضعی وجود دارد. انرژی برهمکنش بین دو نانوخودرو در این حالات تعادلی، معادل -0.84 ، -0.64 و -0.64 الکترونولت است. براساس شکل ۳، در حالات تعادلی ۱ و ۲، که به ترتیب دارای انرژی پتانسیل -0.84 و -0.64 الکترونولت هستند، مرکز جرم نانوخودروی محیطی در نقاط $(9/5 \text{ \AA}, 16/0 \text{ \AA})$ و $(6/6 \text{ \AA}, 31/3 \text{ \AA})$ می باشد. در این حالات کمیته انرژی، محورهای دو نانوخودرو با یکدیگر موازی می باشد. از طرفی در حالت تعادلی سوم، مرکز جرم نانوخودروی محیطی در نقطه ای $(1/4 \text{ \AA}, 24/2 \text{ \AA})$ و قرار داشته که در این حالت راستای محور دو نانوخودرو عمود بر یکدیگر می باشد.

به منظور نمایش بهتر پیکربندی های تعادلی دو نانوخودرو، موقعیت نسبی آنها در سه حالت تعادلی نام برده شده، در شکل ۴ به نمایش درآمدند. براساس مدل درشت دانه ارائه شده برای نانوخودروها، پیکربندی شماره ۱ پایدارترین پیکربندی تعادلی دو نانوخودرو می باشد. با توجه به انرژی پیکربندی های شماره ۲ و ۳ (-0.64 eV) ، این ساختارها از پایداری یکسانی برخوردارند. در پژوهشی که اخیراً روی مدل تمام - اتم نانوخودروها انجام دادیم،^[۳۹] سه حالت تعادلی برای سیستم دو نانوخودرو یافت شد. طبق این تحقیق، موقعیت نسبی دو نانوخودرو در حالات تعادلی مشابه پیکربندی های تعادلی به دست آمده از حالت درشت دانه می باشند. از طرفی،



شکل ۴. انرژی برهمکنش دو مولکول فولرین برحسب فاصله مرکز جرم آنها.

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

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

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، تابع مورس استفاده شده برای تعریف پتانسیل بین دو مولکول و تابع پتانسیل جهت ایجاد دافعه در مرکز نانوخودرو نیز برحسب فاصله ذرات رسم شده اند. مشکلی که در شبیه سازی نانوخودرو چهار ذره ای با آن مواجه هستیم، در هم فرو رفتن نانوخودروهاست. مطابق نمایش تمام - اتم نانوخودرو (شکل ۱)، فواصل بین چرخ ها توسط شاسی اشغال شده است و چرخ های نانوخودروی دیگر نمی توانند در این فواصل قرار گیرند. اما هنگام استفاده از مدل درشت دانه با چهار ذره، چرخ های یک نانوخودرو درون بخش داخلی نانوخودروی مقابل قرار می گیرند که در حالت طبیعی این مکان با شاسی نانوخودرو اشغال شده است.

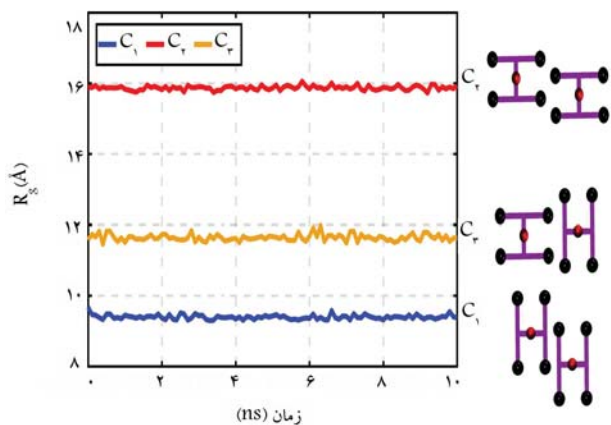
به منظور حل این مشکل، یک ذره به جرم شاسی در مرکز نانوخودرو تعبیه می شود (ذره قرمز رنگ در شکل ۱). تفاوت این ذره با چرخ ها در این است که این ذره صرفاً برهمکنش دافعه با ذراتی که به آن نزدیک می شوند برقرار می کند. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، انرژی پتانسیل برهمکنش سایر چرخ ها با این ذره مرکزی درواقع همان تابع پتانسیل مورس است که در آن شعاع قطع به نحوی انتخاب شده که صرفاً به نیروی دافعه اجازه اثر می دهد و مانع از پیکربندی نامطلوب دو نانوخودرو می شود.

در مدل ارائه شده، به منظور افزایش سرعت شبیه سازی ها زیرلایه ای در نظر نمی گیریم و مسئله در دو بعد حل می شود. از ترموستات نوز - هوور^[۳۷،۳۶] برای ایجاد دمای ثابت در شبیه سازی استفاده شده است. شبیه سازی ها به کمک نرم افزار لمپس^[۳۸] پیاده سازی شده است که از روش انتگرال گیری ورله سرعتی برای حل معادلات حرکت استفاده می گردد. برای شبیه سازی مدل درشت دانه ای نانوخودروها از گام زمانی ۱ فمتوثانیه استفاده می گردد.

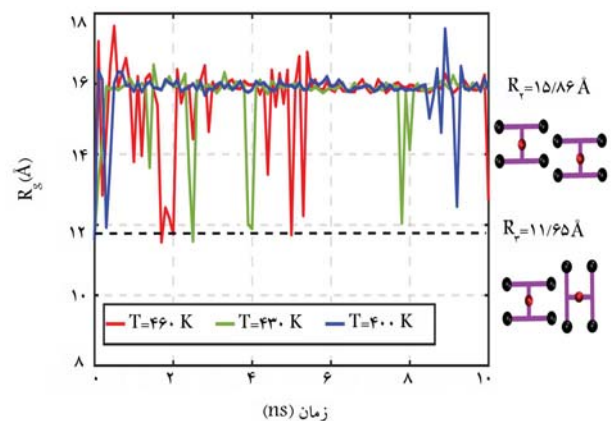
۳. بحث و نتایج

۳.۱. انرژی پتانسیل برهمکنش دو نانوخودرو

به منظور درک موقعیت تعادلی دو نانوخودرو، آنالیز انرژی پتانسیل انجام شد. در این آنالیز، با استفاده از مدل درشت دانه، یک نانوخودرو در مبدأ مختصات قرار می گیرد.



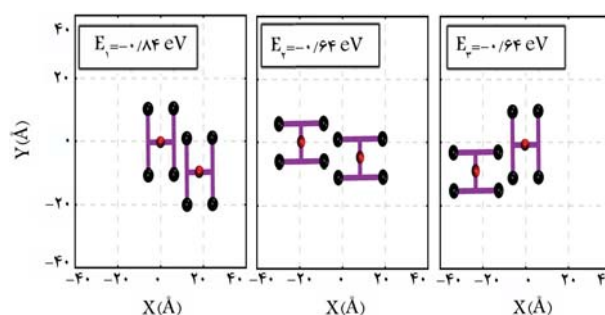
شکل ۵. شعاع ژیراسیون مربوط به پیکربندی‌های تعادلی شماره ۱، ۲ و ۳ در حین شبیه‌سازی در دمای ۲۰۰ کلوین.



شکل ۶. شعاع ژیراسیون مربوط به خوشه دوتایی نانوخودرو در دماهای ۴۰۰، ۴۳۰ و ۴۶۰ کلوین برحسب زمان شبیه‌سازی.

شماره ۱، ۲ و ۳ قرار داده شده‌اند، پیکربندی خود را تا پایان شبیه‌سازی (۱۰ نانوثانیه) حفظ می‌کنند. از طرفی، پایداری حرارتی وضعیت‌های تعادلی در این دما، با مطالعات قبلی پیرامون پایداری پیکربندی‌های تعادلی نانوخودروهای تمام - اتم سازگاری دارد.^[۳۹]

در گام بعدی، پیکربندی‌های تعادلی دو نانوخودرو را در دماهای ۴۰۰، ۴۳۰ و ۴۶۰ کلوین مورد آزمایش قرار می‌دهیم. شکل ۶، شعاع ژیراسیون دو نانوخودرو را در دماهای مذکور و در طول ۱۰ نانوثانیه شبیه‌سازی نشان می‌دهد. طبق این شکل، شعاع ژیراسیون متناظر با پیکربندی تعادلی شماره ۲، در حین شبیه‌سازی مقادیر کمتری پیدا می‌کند که به معنای تغییر وضعیت نسبی نانوخودروها در طول شبیه‌سازی می‌باشد. همان‌طور که در تغییرات شعاع ژیراسیون خوشه دوتایی نانوخودرو مشخص است، دو نانوخودرو در بازه‌های زمانی مشخصی مقدار شعاع ژیراسیون ($11/65 \text{ \AA}$) متناظر با پیکربندی شماره ۳ را پیدا می‌کنند. در واقع در بازه‌های زمانی کوتاهی وضعیت نسبی از پیکربندی تعادلی شماره ۲ به پیکربندی تعادلی شماره ۳ تغییر می‌کند. با افزایش دما به ۴۶۰ کلوین، بسامد تغییر وضعیت نسبی نانوخودروها افزایش می‌یابد، زیرا در این دما با افزایش انرژی گرمایی، دو نانوخودرو این توانایی را پیدا می‌کنند تا مطابق با شکل ۳، از نقاط کمینه انرژی پتانسیل خارج شده و وضعیت‌های تعادلی با انرژی متفاوتی را تجربه کنند. تغییر وضعیت نسبی نانوخودروها و تبدیل پیکربندی‌های تعادلی به یکدیگر در بررسی‌های تمام - اتم



شکل ۴. موقعیت نسبی دو نانوخودرو در پیکربندی‌های متناظر با کمینه انرژی پتانسیل.

انرژی حالات تعادلی در مدل تمام - اتم، کمی با آنچه از مدل درشت‌دانه به دست می‌آید، متفاوت است. تفاوت مقادیر انرژی در مدل درشت‌دانه و تمام - اتم مربوط به در نظر گرفتن ذره مرکزی در نانوخودرو درشت‌دانه شده است. به‌طور خلاصه، مدل درشت‌دانه ارائه شده برای نانوخودرو موقعیت نسبی تعادلی دو نانوخودرو را درست پیش‌بینی کرده، اما مقدار انرژی حالات تعادلی را کمی متفاوت تخمین می‌زند.

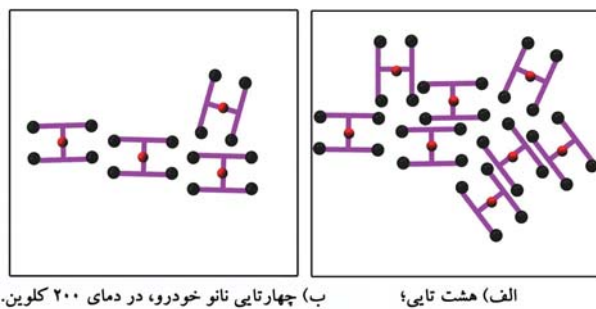
۲.۳. پایداری حرارتی پیکربندی‌های تعادلی

طبق آنچه در بررسی مدل تمام - اتم نانوخودروها مشخص شده است،^[۳۹] با توجه به اینکه پیکربندی‌های تعادلی متناظر با نقاط کمینه موضعی انرژی پتانسیل هستند، در اثر افزایش دما نانوخودروها می‌توانند از یک حالت تعادلی (یک کمینه انرژی موضعی)، خارج شده و پیکربندی تعادلی دیگری را پیدا کنند. با توجه به پژوهش ذکر شده، دو نانوخودرو در دمای ۲۰۰ کلوین و پایین‌تر پیکربندی تعادلی خود را حفظ می‌کنند. در دمای ۴۰۰ کلوین، تغییر پیکربندی‌های تعادلی به یکدیگر گزارش شده و در دماهای بالا (۶۰۰ کلوین و بیشتر)، با توجه به انرژی حرارتی زیاد، جدایش دو نانوخودرو از یکدیگر مشاهده می‌گردد.^[۷]

به‌منظور بررسی صحت مدل درشت‌دانه در تخمین پایداری حرارتی پیکربندی‌های تعادلی، دو نانوخودرو درشت‌دانه در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کلوین مورد بررسی قرار گرفتند. کمیتی که برای بررسی پایداری حرارتی ساختارهای تعادلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، شعاع ژیراسیون مربوط به خوشه دوتایی نانوخودرو است که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

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

در رابطه‌ی اخیر، $\mathbf{r}(i)$ به ترتیب مختصات مرکز جرم خوشه و مختصات مرکز جرم نانوخودروهای درون خوشه می‌باشند. همچنین، N تعداد نانوخودروهای موجود در خوشه است که در این حالت برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۵، در دمای ۲۰۰ کلوین هر یک از پیکربندی‌های تعادلی از خود شعاع ژیراسیون منحصر به فردی را نشان می‌دهند. در پیکربندی شماره ۱، با توجه به اینکه ذرات در فاصله نزدیک‌تری نسبت به مرکز جرم خوشه قرار می‌گیرند، شعاع ژیراسیون نسبت به سایر پیکربندی‌ها کمتر است ($R_g = 9/39 \text{ \AA}$). در پیکربندی‌های تعادلی شماره ۲ و ۳، شعاع ژیراسیون به - ترتیب مقادیر متوسط $15/86 \text{ \AA}$ و $11/65 \text{ \AA}$ را دارد. با توجه به ثابت بودن مقادیر شعاع ژیراسیون در شبیه‌سازی با پیکربندی‌های تعادلی مختلف در دمای ۲۰۰ کلوین، این نتیجه به دست می‌آید که این پیکربندی‌ها در این دما پایدار هستند. نانوخودروهایی که در ابتدا در وضعیت‌های نسبی تعادلی



شکل ۸. ساختارهای نهایی به دست آمده از شبیه سازی خوشه های الف و ب در دمای ۲۰۰ کلوین.

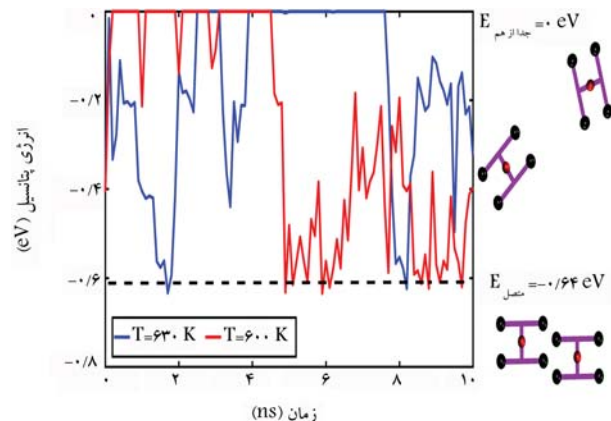
نانو خودرو به دست آمد. در شکل ۸، ساختار نهایی نانو خودروها پس از ۲۰ نانوثانیه مشاهده می شود.

مطابق با شکل ۸، در اکثر موارد وضعیت نسبی هر زوج نانو خودرو مجاور، مشابه اتصالات تعادلی به دست آمده در قسمت های قبل می باشد. در شکل ۸ ب، ملاحظه می شود که سه نانو خودروها در پیکربندی تعادلی شماره ۲ قرار دارند و نانو خودروی چهارم پیکربندی شماره ۳ را با نانو خودروی همسایه، تجربه می کند. با دقت در نانو خودروهای موجود در همسایگی همدیگر در خوشه هشت تایی، می توان نتیجه گرفت که وضعیت نسبی نانو خودروهای مشابه در اغلب حالات، وضعیت پیکربندی های تعادلی است که در خوشه دوتایی مشاهده شد. لازم به ذکر است که وجود پیکربندی های تعادلی مربوط به خوشه دوتایی در خوشه های بزرگ تر نانو خودرو مطابق با نتایج مدل تمام - اتم می باشد.

از محدودیت های مطالعه رفتار نانو خودروها به روش تمام - اتم زمان بر بودن اجرای محاسبات می باشد. روش درشت دانه حاضر، با هدف کاهش هزینه محاسباتی و به منظور بررسی چیدمان سطحی نانو خودروها ارائه گردیده است. همان طور که در بخش ۱-۳ و ۲-۳ این مطالعه ملاحظه گردید، روش ارائه شده، پیکربندی های تعادلی را در اتصال دو نانو خودرو و پایداری حرارتی آنها را به درستی پیش بینی می کند. با افزایش تعداد نانو خودروها به چهار و هشت نانو خودرو در یک خوشه، اگرچه پیکربندی های تعادلی مشاهده شده (پیکربندی های شماره ۱، ۲ و ۳)، در مدل درشت دانه خوشه ها، مطابق با پیکربندی های تعادلی به دست آمده از مدل تمام - اتم است، ولی روش درشت دانه پیش بینی دقیقی در مورد تعداد هر نوع پیکربندی ارائه نمی دهد. به عنوان مثال، در شکل ۸ - الف که نتیجه شبیه سازی هشت نانو خودروی درشت دانه نشان داده شده است، یک زوج نانو خودرو در پیکربندی تعادلی شماره ۲ قرار گرفته اند. در حالی که در مدل تمام - اتم این خوشه، نتیجه شبیه سازی دو زوج نانو خودرو را در پیکربندی تعادلی شماره ۲ نشان می دهد.^[۳۹] بنابراین، مدل درشت دانه حاضر در بررسی نوع اتصال نانو خودروها در خوشه های مولکولی و پایداری حرارتی آنها قابل استفاده بوده و برای پیش بینی دقیق تعداد گونه های مختلف اتصال، استفاده از مدل تمام - اتم توصیه می شود.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از روش دینامیک مولکولی، مدل درشت دانه جهت بررسی چیدمان سطحی ماشین های مولکولی ارائه شد. در مدل ارائه شده، برهمکنش نانو خودروهای بر پایه فولرین بیشتر از طریق چرخ ها در نظر گرفته می شود. در



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

خودروهای مولکولی در دمای ۴۰۰ کلوین نیز گزارش شده است^[۳۹] که این صحت مدل درشت دانه را تأیید می کند.

همان طور که در قسمت قبل مشاهده شد، پیکربندی های تعادلی پایداری حرارتی خود را در دمای کلوین و بالاتر از دست می دهند. با این وجود، در این دما دو نانو خودرو، درون یک خوشه قرار دارند و جاذبه واندروالسی بین نانو خودروها مانع جدایش آنها می شود.

با افزایش دما به بازه ۶۰۰ کلوین و بیشتر، طبق پژوهش های اخیر پیرامون حرکات سطحی نانو خودروهای تمام - اتم و ساختارهای مشابه^[۴۰،۴۱] انرژی حرارتی بالا این امکان را فراهم می کند تا مولکول ها بر جاذبه واندروالسی بین خود غلبه کنند و از یکدیگر جدا شوند. شکل ۷، انرژی پتانسیل بین مولکولی را برای خوشه ای شامل دو نانو خودرو در دماهای ۶۰۰ و ۶۳۰ کلوین نشان می دهد. براساس تغییرات انرژی پتانسیل، دو نانو خودرو در دمای ۶۰۰ کلوین در بازه زمانی قابل توجهی سطح انرژی صفر پیدا می کنند که این به معنای جدا شدن دو مولکول از یکدیگر است. با افزایش دما به ۶۳۰ کلوین در بازه زمانی طولانی تری سطح انرژی پتانسیل صفر و انرژی گرمایی ذرات در این دما باعث و جذب مولکول ها از یکدیگر می شود. لازم به ذکر است که افت مجدد مقدار انرژی پتانسیل از مقدار صفر به مقادیر کمتر به معنای برخورد و اتصال مجدد نانو خودروها روی سطح است.

در برخی زمان ها، سطح انرژی به مقدار انرژی متناظر با پیکربندی های تعادلی ۲ و ۳ می رسد و در این بازه های محدود زمانی دو نانو خودرو در این موقعیت های تعادلی قرار می گیرند. برخورد مجدد نانو خودروها به یکدیگر پس از جدایش، بستگی به ابعاد جعبه شبیه سازی دارد. اگر شبیه سازی 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.

۳.۳. آرایش سطحی خوشه های بزرگ تر نانو خودرو

پس از بررسی آرایش سطحی دو نانو خودرو در دماهای مختلف، ساختارهای دوبعدی خوشه های نانو خودروی که شامل ۴ و ۸ خودرو می باشند، مورد بررسی قرار می گیرد. از آنجا که در دمای ۲۰۰ کلوین، وضعیت تعادلی نانو خودروها به لحاظ حرارتی پایدار هستند، خوشه های مذکور در این دما، به مدت ۲۰ نانوثانیه شبیه سازی می شوند. از طرفی مطابق با نتایج مطالعات اخیر، در خوشه های بزرگ تر نانو خودروها، اتصالات بین هر زوج نانو خودرو مشابه پیکربندی های تعادلی است که در بررسی خوشه دوتایی

تعادلی، مقدار ثابتی را در طول شبیه سازی نشان داد که این به معنای پایداری حرارتی پیکربندی ها در این دما می باشد. 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 تغییر پیکربندی دو نانوخودرو افزایش یافت. در نتیجه، در بازه دمایی اطراف ۴۰۰ کلوین، نانوخودروها انرژی لازم را برای اینکه از یک نقطه با انرژی پتانسیل کمینه به نقطه دیگر (از یک پیکربندی تعادلی به پیکربندی دیگر) تغییر وضعیت دهند، به دست آوردند.

در بازه دمایی بالاتر (۶۰۰ کلوین و بیشتر)، انرژی حرارتی منتقل 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 درشت دانه خوشه دوتایی نانوخودرو در دماهای نام برده (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کلوین)، با مطالعه مدل تمام - اتم خوشه شامل دو نانوخودرو سازگاری دارد. با شبیه سازی خوشه های بزرگ تر که شامل ۴ و ۸ نانوخودرو می باشند، 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 نانوخودروی مجاور با پیکربندی های تعادلی دیده شده در سیستم دو نانوخودرو مشابه می باشد که این مورد در تحقیقات مدل تمام - اتم نانوخودروها نیز مشاهده شده است. مدل درشت دانه ارائه شده برای بررسی چیدمان سطحی نانوخودروها، پیکربندی تعادلی زوج نانوخودروها و پایداری حرارتی آنها را به درستی پیش بینی می کند. مدل درشت دانه مزبور که با فرض غالب بودن سهم برهمکنش چرخ ها در برهمکنش بین دو نانوخودرو ایجاد شده است، برای سایر نانوخودروها، به ویژه نانوخودروهای بر پایه فولرین قابل توسعه است که این روش از نظر هزینه و زمان، روشی کاملاً مقرون به - صرفه می باشد.

ساختار درشت دانه نانوخودروها، چهار ذره به عنوان چرخ های فولرینی نانوخودرو و یک ذره مرکزی به عنوان شاسی انتخاب می شوند. ذرات تشکیل دهنده نانوخودرو، توسط باندهایی با ضریب سختی بالا به یکدیگر متصل می شوند تا مشابه مدل تمام - اتم، در حین شبیه سازی نانوخودرو صلب باشد. به کمک تابع انرژی پتانسیل مورس، برهمکنش واندروالسی موجود بین چرخ های نانوخودروها تعریف می شوند و با در نظر گرفتن بخش دافعه ای تابع پتانسیل برای ذره مرکزی، از برهمکنش نامطلوب نانوخودروها جلوگیری می شود.

برای تعیین پیکربندی های 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 منتقل 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 جهت گیری های نسبی مختلف دو نانوخودرو، کمترین سطح انرژی پتانسیل، ثبت گردید. با توجه به تغییرات سطح انرژی پتانسیل که به ازای فواصل مختلف و جهت گیری های متفاوت دو نانوخودرو به دست آمد، سه نقطه با کمترین انرژی پتانسیل ملاحظه شد. در این نقاط کمینه انرژی پتانسیل که متناظر با پیکربندی های تعادلی دو نانوخودرو هستند، انرژی برهمکنش بین مولکولی برابر ۰/۸۴، -۰/۶۴ و -۰/۶۴ الکترون ولت شد. وضعیت نسبی دو نانوخودرو در پیکربندی های تعادلی، مطابق با نتایج به دست آمده از بررسی مدل تمام - اتم سیستم دو نانوخودرو می باشد.

با مطالعه شعاع ژیراسیون و سطح انرژی پتانسیل مربوط به برهمکنش بین دو نانوخودرو، پایداری حرارتی پیکربندی های تعادلی در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ 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/ja105542j>.
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.jpcc.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., Benziger, 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., Claytor, 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/nn800798a>.
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 dipyrindones. *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 آشفته‌گی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به‌روش اویلری - لاگرانژی

عطیه فرخ (دانشجوی کارشناسی ارشد)

میراعلم مهدی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوره ۴۰، شماره ۱، ص. ۴۷-۶۰، (پژوهشی)

در این مقاله، جریان آشفته هوا شامل، نانوذرات مس در جریان پشت پله با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌روش اویلری - لاگرانژی شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی به دوصورت دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای CFX و FLUENT انجام و نتایج به‌دست آمده با یکدیگر و با نتایج تجربی گزارش شده در مطالعات پیشین به‌عنوان مثال مطالعه گریفزو مقایسه می‌گردد. در مدل‌سازی از کوپل دوراهه بین سیال پیوسته هوا و فازگسسته نانوذرات استفاده و اثرات نیروهای برای ساکن، گرادیان فشار و اثرات آشفته‌گی بر روی نانوذرات لحاظ می‌شود. نتایج عددی حاصل از مدل‌های اویلری - لاگرانژی و مدل تک‌فاز در حالت‌های پایا و گذرا نیز با یکدیگر مقایسه می‌گردد. مطابق نتایج حاصل، ماکزیمم خطا در روش تک‌فاز برابر با ۲۵ درصد و در روش اویلری - لاگرانژی برابر ۱۹ درصد است. در ادامه، اثرات مدل آشفته‌گی بر حرکت ذرات و برحسب قطرهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۵، 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 آشفته‌گی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حرکت ذرات پشت پله را دارند. ذراتی که دارای عدد استوکس کوچکتر از ۱/۲ (معادل قطر ۳۵ میکرومتر در این مطالعه) باشند، حضور گردابه را حس کرده و وارد گردابه می‌شوند. از بین مدل‌های آشفته‌گی کمترین خطا برای مدل SST برابر با ۶/۲۵ بیشترین خطا برای مدل $K\epsilon$ استاندارد برابر با ۱۸/۷۵ می‌باشد.

واژگان کلیدی: نانوسیال، مدل آشفته‌گی، روش اویلری-لاگرانژی، جریان پشت پله، فلوئنت، سی اف - ایکس.

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

۱. مقدمه

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

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

جریان‌های شامل ذرات پراکنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند انتقال پنوماتیک، جداسازی ذرات از سیال پایه یافت می‌شوند.^[۱] به‌منظور 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 ۱۴۰۱/۱۱/۲، اصلاحیه ۱۴۰۲/۲/۹، پذیرش ۱۴۰۲/۳/۹.

استناد به این مقاله:

فرخ، عطیه و مهدی، میراعلم، ۱۴۰۳. بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفته‌گی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به‌روش اویلری - لاگرانژی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۴۷-۶۰. DOI:10.24200/J40.2023.61626.1665

رویکرد اویلری - اویلری (E-E) و مدل مسیر لاگرانژی^[۴] 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. پیاده‌سازی 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 به‌درستی ویژگی‌های خاصی را که شامل اثرات زمان هستند، پوشش دهد.^[۵] در رویکرد E-L، ذرات به‌عنوان اجسام مجزا در چارچوب مرجع لاگرانژی در نظر گرفته می‌شوند و حرکت یک ذره منفرد در حین حرکت در میدان جریان، دنبال می‌شود. به‌دلیل مشکل در تحمیل اثر آشفتگی فاز سیال بر حرکت و واکنش ذرات، این رویکرد قادر است در بررسی نیروهای مختلفی از جمله نیروی پسا، نیروی برخورد و نیروی جاذبه و غیره را که بر ذرات وارد می‌کنند، رفتار گسسته ذرات و اثرات زمان ذرات را در نظر بگیرد. بنابراین، هر دو روش دارای مزایایی 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 ردیابی حرکت ذرات اتخاذ شده است.

شبیه‌سازی عددی فاز پیوسته با محاسبه میانگین آماری خواص جریان که در آن ویژگی‌های مکانی - زمانی ساختارگردابی آشفته با میانگین زمانی فیلتر می‌شوند تا معادلات جریان متوسط به‌دست آید. این روش، به روش میانگین ناویر استوکس رینولدز معروف است.^[۶] 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)،^[۷] مدل‌های جریان جدا شده تصادفی (SSF)،^[۸] مدل‌های پراکندگی همبسته با زمان^[۹] و مدل‌های انتشار تابع چگالی احتمال (PDF)^[۱۰] می‌باشند. با این وجود، در این مدل‌ها، تأثیر گرداب‌ها بر ذرات صرفاً بر اساس قوانین تجربی است که به بهبود یا تأیید از طریق آگاهی از تأثیر واقعی گرداب‌ها بر حرکت ذرات نیاز دارد.

پیشرفت در تکنیک‌های کامپیوتری، پیش‌بینی جریان سیال را به‌کمک شبیه‌سازی گرداب‌ها ممکن نموده‌است 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)،^[۱۱] مدل تجزیه متعامد مناسب (POD)،^[۱۲] شبیه‌سازی گردابی بزرگ^[۱۳] (LES) و شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)،^[۱۴] روش‌های رایج برای شبیه‌سازی سیال هستند. روش VD صرفاً برای نمایش دو بعدی مناسب است. مدل‌های POD نمی‌توانند به‌طور کمی، ساختارگردابی حل شده را برای مجموعه‌ای عمومی از شرایط مرزی و اولیه تعیین کنند. ساختارهای گردابی به‌طور کامل بدون هیچ‌گونه مدل‌سازی آشفتگی تجربی در DNS حل می‌شوند. با این‌وجود، این روش تنها برای جریان‌های ساده با اعداد رینولدز پایین به‌دلیل حجم زیاد محاسبات مناسب است. یک فیلتر فضایی پایین‌گذر در LES به معادلات ناویر 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،^[۱۵] رفتار یک جریان گاز ذره رقیق را بر روی یک جریان پشت

پله توسط یک مدل ردیابی ذرات لاگرانژی و یک مدل اویلری - اویلری، مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که مدل $k - \epsilon$ و مدل $k - \epsilon$ ارائه شده توسط شیه و همکاران،^[۱۶] نتایج بهتری نسبت به مدل استاندارد $k - \epsilon$ دارد. مدل اویلری در مقایسه با نتایج تجربی، نتایج بسیار دقیق‌تری نسبت به مدل لاگرانژی ارائه کرد. شبیه‌سازی عددی دوبعدی و جریان آشفته دوفازی بر روی یک جریان پشت پله در مطالعه یوان انجام شده است.^[۱۷] 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^[۱۸-۲۱] یافت. مطابق با مطالعه مهدوی،^[۲۲] 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 ۳ بعدی استفاده کرد. هنگامی که از روش DPM استفاده می‌شود، با وجود افت فشار نمی‌توان از نیروی گرانش صرف‌نظر کرد. این روش برای کسر حجمی کمتر از ۳ 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 به‌دلیل وقوع پدیده‌هایی مثل خوشه‌بندی و رسوب روش ضعیفی محسوب می‌شود. کومار و پیورانیک^[۲۳] پیشنهاد کردند برای جریان آشفته نانوسیال (به‌همراه انتقال حرارت همرفتی) تا درصد حجمی ۵٪ این روش قابل اعتماد و برای درصد حجمی‌های بالاتر از مدل تک‌فاز استفاده می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش در اندازه نانوذرات، عددناسلت کاهش می‌یابد و هنگامی که در جریان آشفته از روش DPM استفاده می‌شود، نیروی درگ و گرانش دو نیروی غالب هستند. همچنین، کومار در مطالعاتی، هندسه مورد نظر را کمی پیچیده‌تر کرده و به‌بررسی 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. مگنتی و همکاران^[۲۴] معتقد بودند که هندسه U شکل پیچیده‌ترین نوع هندسه است و بررسی‌های خود را روی میکروکانال‌های موازی انجام دادند و برای مدل‌سازی هندسه‌های مذکور، استفاده از مدل دوفاز غیرهمگن را معتبرتر دانسته و پیشنهاد کردند. نتیجه به‌دست 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 گرادیان فشار یا تنش برشی منجر به تغییرات غیربدیهی در غلظت ذرات می‌شود. مانع مثلی شکل، هندسه‌ی دیگری بود که رشیدی و همکاران^[۲۵] جریان نانوسیال اطراف آن را شبیه‌سازی کردند و بیان کردند که فرض توزیع یکنواخت ذرات در مدل‌سازی تک‌فاز 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 می‌یابد. کاهش قطر نانوذرات منجر به افزایش پتانسیل انتقال گرمای همرفت طبیعی می‌شود. کامبیزوفایی و احمدالبوجمال^[۲۶] با بررسی سه مدل تک‌فاز، گسسته و مخلوط برای دو حالت خواص ثابت و متغیر با دما نشان دادند که خواص متغیر با دما، بهبود در انتقال حرارت بالاتر و عددناسلت را برای نانوسیالات نشان می‌دهد و حداکثر انحراف بین تک‌فاز و DPM را ۵/۹٪ گزارش کردند و همچنین، اعلام نمودند که روش مخلوط هنگامی که خواص متغیر با دما در نظر گرفته شود، نتایج درستی ارائه نمی‌دهد. ورود نانوذرات به سیال باعث افت فشار و افزایش تنش برشی دیواره و افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت در سیال پایه می‌شود. رفتار نانوذرات مخصوصاً میزان رسوب‌گذاری در زوایای مختلف یک لوله از افقی تا عمود بررسی دیگری بود که توسط مهدوی و همکاران^[۲۷] با

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

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

معادله انرژی:

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

که در آن V ، P ، T و به ترتیب معرف بردار سرعت، فشار، دما و زمان هستند. علاوه بر این، ρ ، 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 ترم چشمه تکانه و انرژی ذرات با سیال می‌باشند. این دو ترم به صورت زیر بیان می‌شوند: [۳۲]

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

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

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

معادلات فاز گسسته

معادله تعادل نیرو برای یک ذره معلقی در سیال، برای محاسبه مسیر ذرات استفاده می‌شود. نیروهای برهمکنش 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 نانو ذرات بسیار کم است، مخصوصاً در این مورد که قطر ذرات برابر با 10^6 نانومتر می‌باشد. برای ذرات با قطر بزرگتر از پنجاه نانومتر، نیروی گرانش ممکن است تأثیر کمی داشته باشد. بنابراین، در محاسبات از این نیرو صرف نظر می‌گردد. معادله حرکت یک فاز ذره به صورت زیر است: [۳۵]

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

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

که در آن زیر نویس‌های 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 کانینگهام استفاده شده است. بنابراین: [۳۴]

$$F_D = \frac{18\mu f}{d^2 \rho_p C_c} \quad (8)$$

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

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} [1.257 + 0.4e^{-(1.1d/2\lambda)}] \quad (9)$$

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

$$f_{th} = \frac{2\epsilon \mu^2 C_s}{\rho_f \rho_p d_p^2 (1 + 2C_m Kn)} \times \frac{(k_f / k_p + C_t + Kn)}{(1 + 2k_f / k_p + 2C_t Kn)} \times \frac{\nabla T}{T} \quad (10)$$

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

سعید و الدلیمی [۲۸] رویکرد تک فاز و چهار مجموعه مختلف از خواص ترموفیزیکی را برای مطالعه جریان آرام یک نانوسیال در یک لوله یکنواخت گرم شده به کار بردند. به طوریکه، مشخص شد که هر دو مدل وابسته به دما و مستقل از دما، خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها می‌توانند به درستی رفتار نانوسیال‌ها را در طول جریان آرام شبیه سازی کنند. اوریه و همکاران [۲۹] جریان‌های آرام و آشفته سه بعدی نانوسیال را در یک لوله یکنواخت گرم شده با استفاده از 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 دوفازی برای توصیف رفتار نانوسیال نیست. تاسکسن و همکاران [۳۰] تأثیر هندسه کانال (دایره، مربع، مثلث و مستطیل) را بر رفتار ترموهیدرولیکی نانوسیال در طول جریان آرام مورد مطالعه قرار دادند. 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. ییلدیز و آکتوک [۳۱] از یک رویکرد تک فاز برای مطالعه جریان آشفته سه بعدی یک نانوسیال در داخل یک لوله یکنواخت گرم شده استفاده کردند. مدل استاندارد تلاطم $k - \epsilon$ 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 نانوسیالات 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 دوبعدی و سه بعدی به کمک دو نرم افزار فلوئنت و CFX شبیه سازی شده و نتایج آن اعتبار سنجی گردید.

۲. مدل سازی ریاضی مساله

۱.۲. معادلات حاکم

معادلات فاز پیوسته

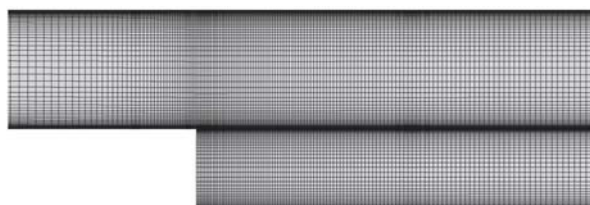
معادله پیوستگی

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]

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

معادله مومنتوم

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



شکل ۲. شبکه بندی.

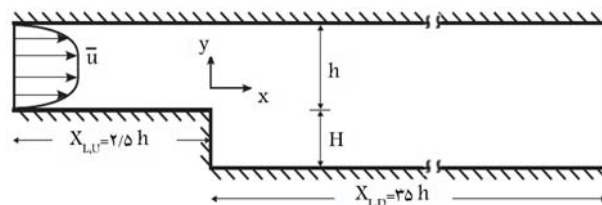
جدول ۲. استقلال از شبکه.

تعداد سلول	طول گردابه میلیمتر	درصد تغییرات
۱۷۲۵۲	۰/۲۵	۰/۵۴
۳۲۱۴۷	۰/۳۶	۰/۲۴
۷۸۲۹۰	۰/۴۱	

جدول ۳. خواص مواد و شرط مرزی.

خواص مواد	مقدار	واحد
فاز گسسته	چگالی	kg/m^3
	قطر ذره	μm
	نیج جرمی جریان ذره	kg/s
فاز پیوسته	سرعت تزریق	m/s
شرط مرزی ورودی	ویسکوزیته	m^2/s
	$U_{x,0}$	m/s
	\bar{u}_{avg}	m/s
	k	m^2/s^2
	ω	$1/s$
شرط مرزی خروجی	\bar{p}	pa
شرط مرزی دیواره	\bar{u}	m/s

است. همان‌طور که 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 فلوئنت با هدف مطالعه و بررسی رفتار ذرات در جریان آشفته و تأثیر ذرات در آشفتنی جریان و بالعکس انجام شده است. اطلاعات فاز گسسته (مس) و پیوسته (هوا) در جدول ۳ آمده است. جریان هوا با پروفیل سرعت هاینر بولیک تانژانت با مقدار میانگین ۹/۳۳ متر بر ثانیه وارد شده است و شرط مرزی خروجی فشار، صفر پاسکال است. شبیه‌سازی عددی انجام شده به روش حجم محدود به‌دو صورت پایا و گذرا در نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۲۰۲۱ انجام شده است. در شبیه‌سازی گذرا مقدار گام زمانی $10^{-2} \times 2.5$ ثانیه است. مسئله به‌صورت دوراوه و با استفاده از مدل آشفتنی $SST - \omega$ مدل‌سازی شده است. فشار و سرعت به‌یکدیگر کوپل شده و از مدل استاندارد برای فشار و مرتبه دوم برای مومنتوم و انرژی جنبشی آشفتنی استفاده شده است. از بین نیروهای موجود



شکل ۱. هندسه مدل.

جدول ۱. مشخصات ابعادی هندسه مدل.

مشخصات پله	مشخصات کانال
ارتفاع پله H	ارتفاع کانال h
۲۶/۷ mm	۴۰ mm
w/H	پهنای کانال w
۱ : ۱۷	۴۵۷ mm
	h/H
	۵ : ۳

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 به‌صورت $C_t = 2/18$ ، $C_m = 1/14$ و $C_s = 1/17$ تعریف می‌شوند. در معادله (۷)، نیروی براونی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

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

$$S_c = \frac{216 v K_B T}{\pi^2 \rho_f d_p^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^2 C_c} \quad (12)$$

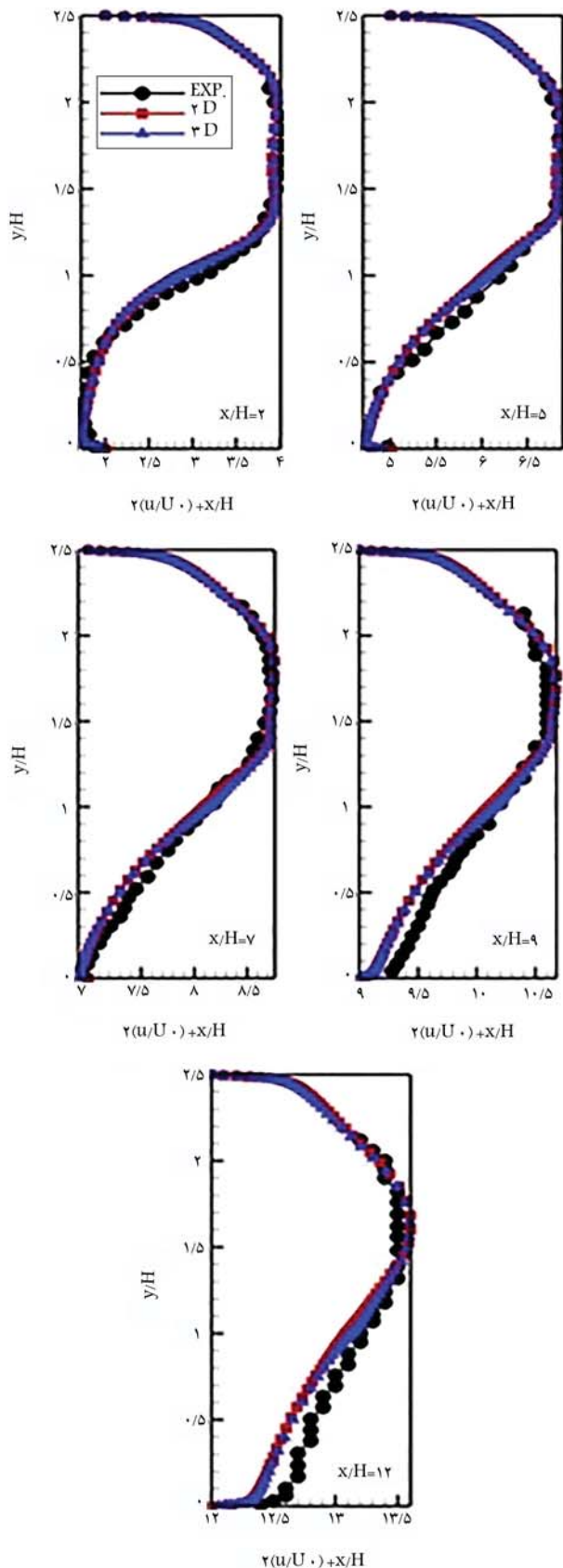
مطابق با فرمول $K_B v$ ، T به ترتیب دمای مطلق سیال، ویسکوزیته سینماتیکی و ثابت بولتزمن بوده و برابر با $(1.38 \times 10^{-23} J K^{-1})$ می‌باشد.

۲.۲. مدل‌سازی و شرایط مرزی

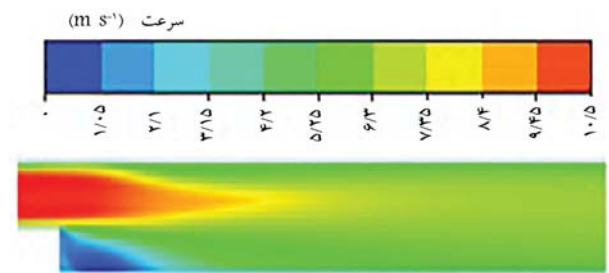
در این پژوهش، رفتار سیال شامل، نانو ذره روی مدل جریان پشت پله با هندسه‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده، بررسی و با مشخصات ابعادی ارائه شده در جدول ۱ بیان شده است.

مدل‌سازی ۷ میدان، به‌صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده و شبکه‌بندی آن به‌صورت با سازمان مستطیلی انتخاب شده است. شبکه در نزدیک دیواره‌ها به‌منظور بهبود کیفیت بررسی و حساسیت مطالعه تغییرات رفتار جریان در نزدیکی دیواره ریزتر و کوچک شده است. ۳۱۷۰۰ المان و ۳۲۱۴۷ گره دارد. با افزایش تعداد سلول و ریزتر کردن اندازه المان‌ها تغییری در نتیجه شبیه‌سازی مشاهده نشده است، بنابراین نتیجه حاصل مستقل از اندازه مش است. در حالت سه بعدی پهنای کانال ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و برای شبکه بندی این پهنای، یک بار آن را به‌صورت یک قسمت و حالت دوم به‌صورت ده قسمت شبکه بندی 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 شبکه‌بندی، سه‌شبکه 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 ۵. توزیع سرعت در راستای x .

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

$$u = -1/9z^{10} + 2z^9 + 4/7z^8 - 4/8z^7 - 4/3z^6 + 4/1z^5 + 1/6z^4 - 1/4z^3 - 1/5z^2 + 0/3z^1 + 10/5 \quad (13)$$

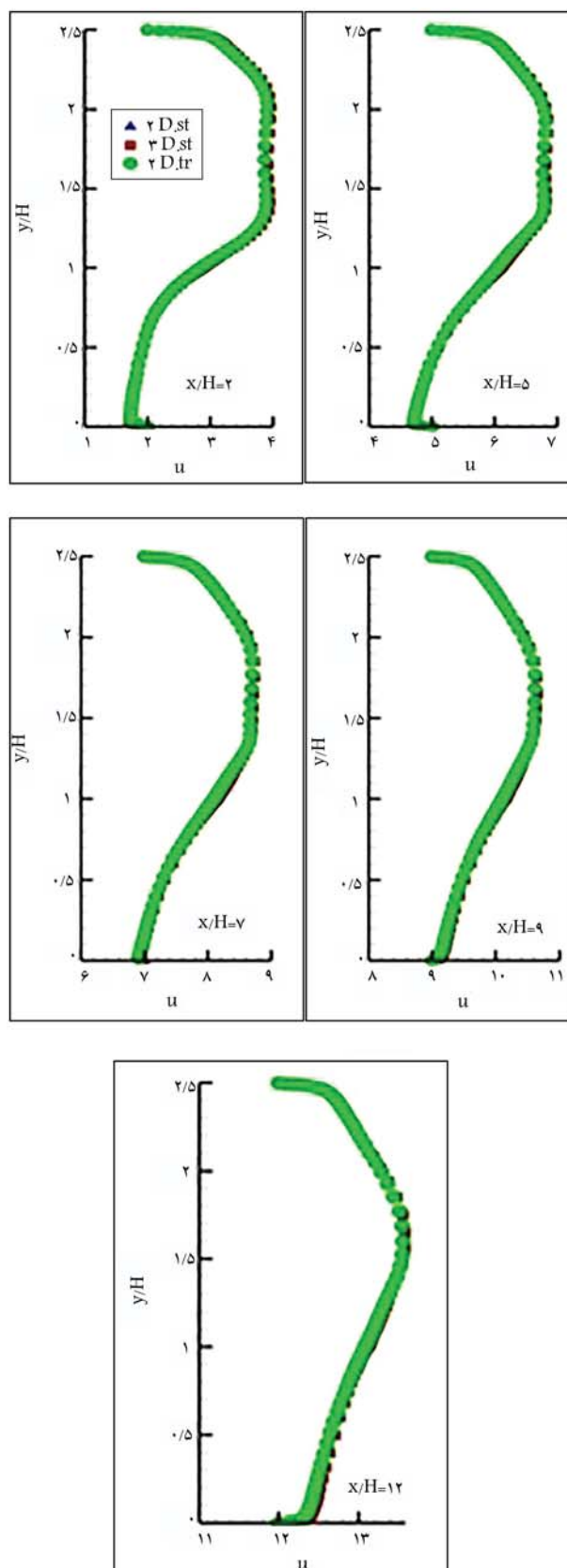
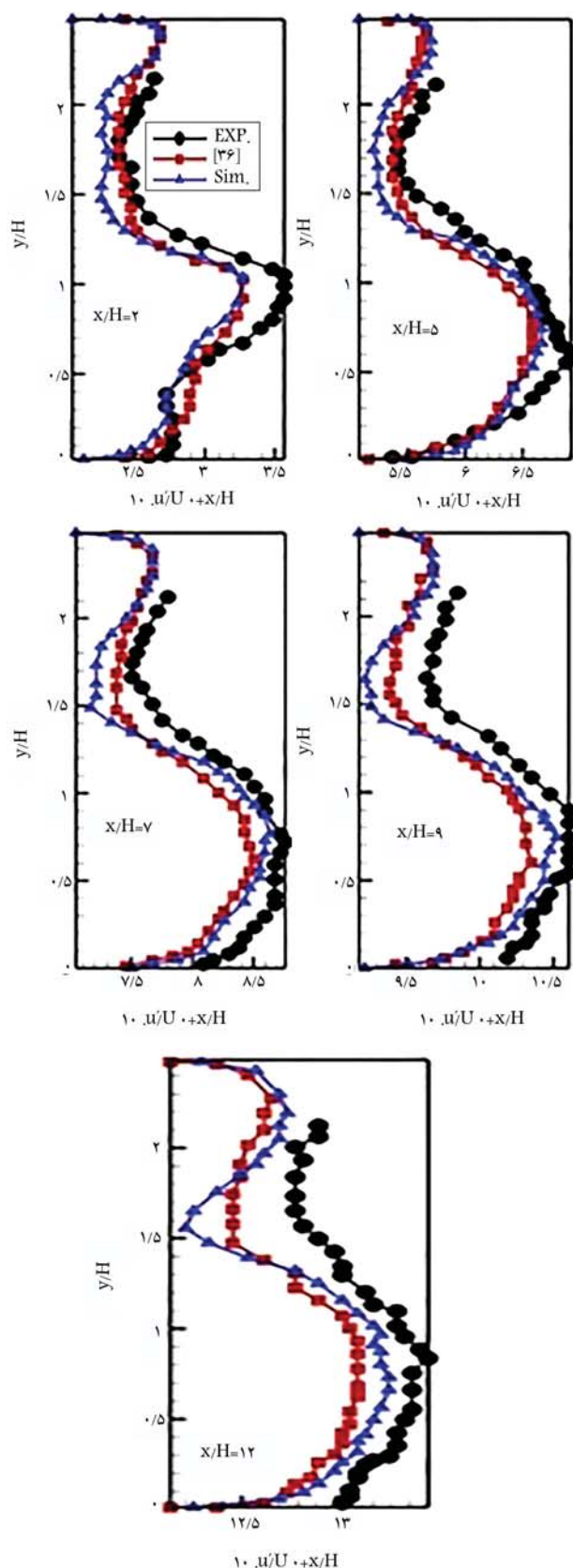
$$z = x - 0/045/0/14 \quad (14)$$

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 دوبعدی و سه بعدی با مقادیر تجربی در ۵ مقطع $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ در طول کانال انجام گرفته است. نتایج، نشان می دهد که اختلاف نتایج دوبعدی (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 پایینی مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می شود که با افزایش فاصله مقدار خطا بیشتر می شود. بیشترین خطا در خط پنجم یعنی $x/H = 12$ نزدیک دیواره پایین برابر با 19% درصد است. بنابراین، می توان برای مدلسازی مساله جهت 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 مقرون 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 دوبعدی 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 دوبعدی و سه بعدی دیده نمی شود و نتایج حاصل از آنها کاملاً بر هم منطبق هستند.



شکل ۶. مقایسه مقدار سرعت آشفتگی حاصل از شبیه‌سازی و مقدار تجربی و مقاله گریفزو و همکاران. [۳۶]

شکل ۵. مقایسه مقدار سرعت آشفتگی در پنج مقطع کانال $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ در دو حالت پایا و گذرا برای دو مدل گسسته و پیوسته.

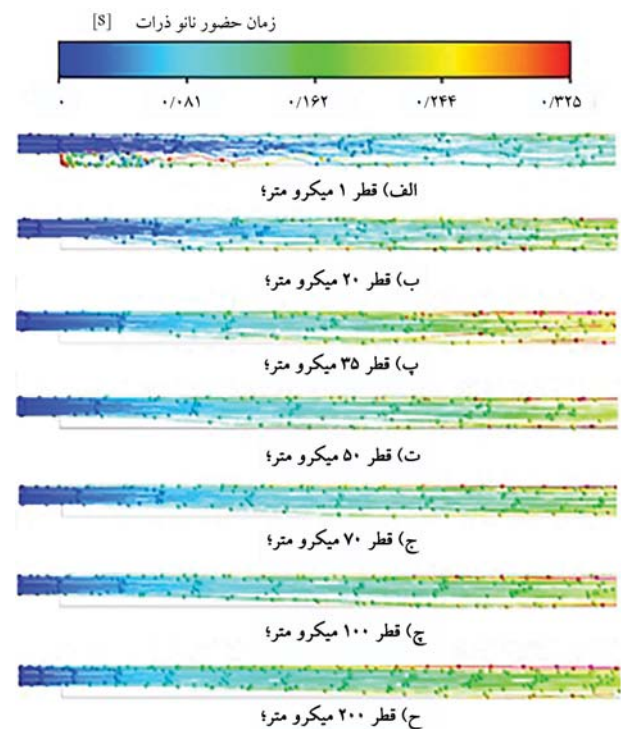
در شکل ۶، مقایسه‌ای بین سرعت آشفته‌گی جریان شبیه‌سازی و مقدار به دست آمده از نتیجه مقاله گریفزو و همکاران^[۳۶] و مقدار تجربی در مقطع ۵ از کانال با مختصات $\{2, 5, 7, 9, 12\}$ $x/H =$ صورت گرفته است. برای مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ سرعت آشفته‌گی از رابطه زیر به دست آمده است:

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

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نتیجه ارائه شده در مقاله دارد و با درصد خطای ماکزیمم ۱۹ درصد در نمودار پنجم در نیمه بالایی کانال 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 پایا انتخابی مناسب برای شبیه‌سازی این مساله است و در ادامه با استفاده از این نتایج به بررسی رفتار ذرات در قطرهای مختلف ۱، ۲۰، ۳۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومتر داخل جریان آشفته با رینولدز ۱۸۶۰۰ 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 کانال را طی کرده و سپس به طور تدریجی پخش شده به طوریکه، کانال را با تراکم تقریباً یکدستی ترک نموده‌اند. در میانه کانال ذرات کمتری نزدیک دیواره بالا و پایینی حضور دارند. از شکل ۷ - ب مشاهده می‌شود برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر از میزان همگرایی اکثریت ذرات کاسته شده و ذرات بیشتر در نیمه بالایی کانال حضور دارند به طوریکه



شکل ۷. مسیر حرکت ذرات به ازای قطرهای مختلف.

تراکم ذرات نزدیک دیواره بالایی بیشتر است، کانال را ترک می‌کنند. برای ذرات با قطر ۳۵ شکل (شکل ۷ - پ) اکثر ذرات مسیرشان را تا نصف طول کانال در نیمه بالایی کانال و در دو فاصله از دیواره طی می‌کنند و بعد از آن کم‌کم پخش شده و مانند ذرات با قطر ۲۰ با تراکم تقریباً یکسان از کانال خارج می‌شوند. برای ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر (شکل ۷ - ت) ذرات در نقطه‌ی نزدیک ۴۰ درصد طول کانال، از ورودی به دیواره پایینی برخورد کرده و در ادامه اکثریت ذرات از مرکز کانال 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 به طور قابل توجهی خالی از ذره است و به همین صورت هم از کانال خارج می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۷ - ج مشاهده می‌شود، ذرات با قطر ۷۰ میکرومتر در نیمه کانال شکل ۷ - ج با دیواره پایینی کانال برخورد کرده و در ادامه دچار انحراف شده و سپس از انتهای کانال خارج می‌شوند.

شکل ۷ - چ 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 کانال جریان دارند و بعد از طی شدن ۷۵ درصد از طول کانال، ذرات در عرض کانال پخش می‌شوند و با تراکم یکسان از انتهای کانال 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 کانال را در انتها ترک می‌کنند. جهت بهتر نشان دادن نتایج حاصل از تأثیر اندازه قطر ذرات بر مسیر حرکت، محل برخورد ذرات بر حسب درصد طول کانال 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 آشفته‌گی، 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 کولموگروف 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 ریلکسشن دینامیکی ذرات معیاری از پاسخگویی یک ذره به میدان جریان سیال است و τ_f بیانگر مقیاس زمانی سیال، معیاری از زمان موجود برای برهم‌کنش گردابی ذره می‌باشد. نقش اصلی عدد استوکس در تعیین اثرات تلاطم بر حرکت ذره در بررسی کرو و همکارانش اشاره شده است.^[۳۷]

جدول ۴. مقدار عدد استوکس برحسب قطر ذرات.

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

جدول ۵. مقدار عدد استوکس برحسب قطر ذرات.

ذره	مس
چگالی	۸۸۰۰
قطر (میکرومتر)	۱۰۰ ۷۰ ۵۰ ۳۵ ۲۰ ۱
عدد استوکس	۱۳/۰۲ ۵/۲ ۳/۷ ۱/۲ ۰/۷ ۰/۰۰۲۱

باتوجه به آزمایش فسلر و ایتون^[۲۸] مقیاس زمانی سیال را می‌توان با رابطه ۱۶ نشان داد:

$$\tau_f = \frac{\Delta H_s}{U_s} \quad (۱۷)$$

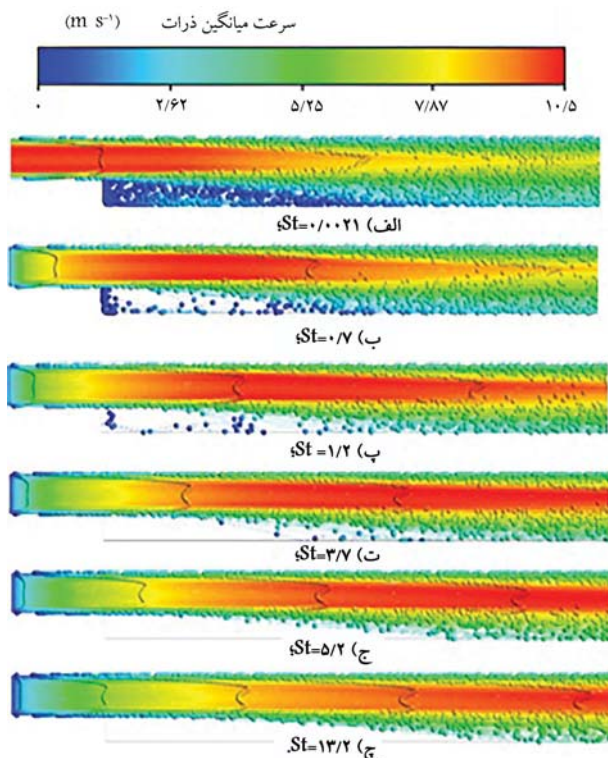
به‌طوریکه براساس یک فرکانس تقریبی عبوری از گردابه بزرگ در لایه برشی جدا شده است. زمان ریلکشن دینامیکی ذرات اصلاح شده توسط فسلر و ایتون به شرح زیر است:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu \left(1 + 0.15 Re_p^{0.687}\right)} \quad (۱۸)$$

در این رابطه Re_p عدد رینولدز میانگین ذرات است که براساس یافته‌های تجربی فسلر و ایتون با میانگین سرعت لغزش فرضی $1/2$ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. اگر $St < 1$ باشد، زمان ریلکشن ذرات بسیار کمتر از زمان مشخصه مرتبط با میدان جریان است. بنابراین، ذرات زمان کافی برای پاسخ به تغییرات سرعت سیال را دارند. 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 نمی‌گیرد.

کره‌های مسی با قطرهای ۱، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ میکرومتر به‌ترتیب برای شبیه‌سازی ذرات با عدد استوکس‌های مختلف همان‌طور که در جدول ۵ فهرست شده است، انتخاب شده‌اند. هر مجموعه‌ای از کره‌های هم‌اندازه، زمانی وارد جریان می‌شود که نتیجه شبیه‌سازی فاز گاز هم‌گرا شده باشد. سرعت اولیه ذرات برابر با سرعت سیال محلی تنظیم شده است و اطمینان حاصل می‌شود که ذرات در تعادل دینامیکی با جریان گاز هستند.

شکل ۸، مسیر حرکت ذرات نانو در اعداد استوکس مختلف را در میدان جریان نشان می‌دهد. حضور ذره با قطر ۱ میکرومتر در جریان با عدد استوکس ۰/۰۰۲۱۱ که بسیار کوچکتر از ۱ است در شکل ۸ - الف آمده است. ذره کاملاً خود را با تغییرات سرعت جریان منطبق کرده و بنابراین، می‌توان شاهد حضور زیادی از ذرات در گردابه پشت پله باشیم. با افزایش قطر ذره به ۲۰ میکرومتر عدد استوکس ۰/۷۰۴ می‌شود که عددی بسیار نزدیک به ۱ است. مطابق شکل ۸ - ب ذرات کمتری گردابه پشت پله را احساس کرده و همراه جریان سیال پایه می‌شوند. این ذرات برای قطر ۳۵ میکرومتر بسیار کاهش یافته و ذراتی هم که گردابه را احساس می‌کنند از مرز آن عبور کرده و به داخل آن کشیده نمی‌شوند و مطابق شکل ۸ - پ اکثر ذرات با این قطر از کنار گردابه عبور کرده‌اند بدون این که حضور آن را احساس کنند و به تغییرات سیال پایه، پاسخ دهند. برای ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر شکل ۸ - ت عدد استوکس ۳/۷ است و برای قطر بیشتر از ۱، 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 ۷۰ و ۱۰۰ (شکل ۸ - ج و شکل ۸ - ج) ذرات با افزایش قطر



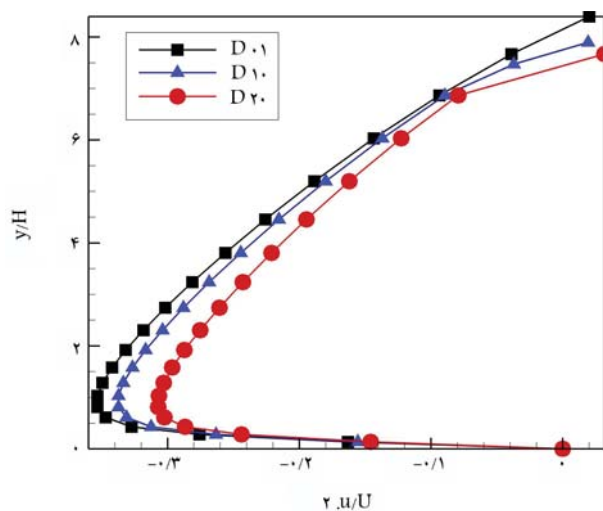
شکل ۸. حضور ذره با قطرهای مختلف در گردابه پشت پله.

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

به‌عنوان نتیجه کلی، ذرات با عدد استوکس بسیار کوچک ($St < 1$) به شدت توسط ساختار گردابی فاز گاز کنترل می‌شوند و از نزدیک گردابه‌های گاز را دنبال می‌کنند. چنین ذراتی را نمی‌توان متمرکز کرد. ذرات با مقیاس زمانی مشابه مقیاس زمانی سیال ($St \sim 1$) توسط یک گرداب چرخیده می‌شوند و در امتداد ناحیه محیطی گرداب متمرکز می‌شوند. ذرات با عدد استوکس بزرگ ($St > 1$) در حفظ حرکت خود پایدارتر هستند. آنها نمی‌توانند به حرکت گردابی در مقیاس زمانی سیال موجود پاسخ دهند و همچنین متمرکز نخواهند شد.

در شکل ۹، مقایسه‌ای برای سرعت آشفتگی نانو ذرات در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی با نتایج تجربی و نتایج حاصل از مطالعه یو کین فونگ^[۲۹] در پنج مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ انجام گرفته است. وی در مطالعه خود برای به‌دست آوردن سرعت آشفتگی یک حجم کنترل در نظر گرفته و برای آن فرمولی نوشته است. در حالت دوبعدی اختلاف بسیاری در مطالعه فونگ دیده می‌شود و داده‌ها به نسبت نتایج سه‌بعدی از پراکندگی بیشتری برخوردار هستند که باعث خطای بالای آن شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، نتایج سه‌بعدی در اکثر نقاط بیشتر از نتایج دوبعدی به داده‌های تجربی نزدیک می‌باشد. با این وجود، بیشینه خطای نتایج دوبعدی شبیه‌سازی از نتایج دوبعدی فونگ، بسیار کمتر است و نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی می‌باشد. بنابراین، برای بررسی رفتار ذره و بررسی سرعت آشفتگی مدل‌سازی سه‌بعدی دارای دقت بالاتری است.

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، ذرات با قطر کمتر از ۲۰ - میکرومتر، گردابه پشت پله را به‌طور محسوس و با تأثیرپذیری بیشتری نسبت به ذرات با قطر بزرگتر احساس می‌کنند. در شکل ۱۰ مقدار سرعت منفی پشت پله برای سه قطر ۱، ۱۰، ۲۰ میکرومتر در مختصات $x/H = \{2\}$ در گردابه قرار گرفته است، مقایسه شده است.



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

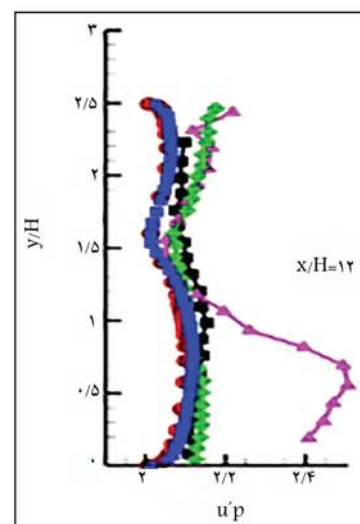
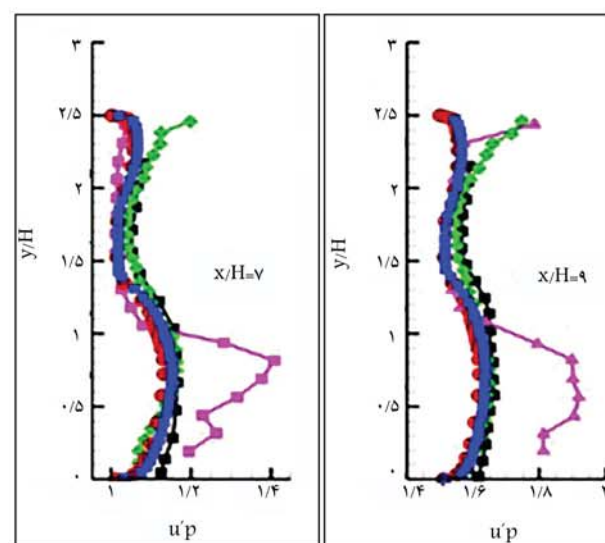
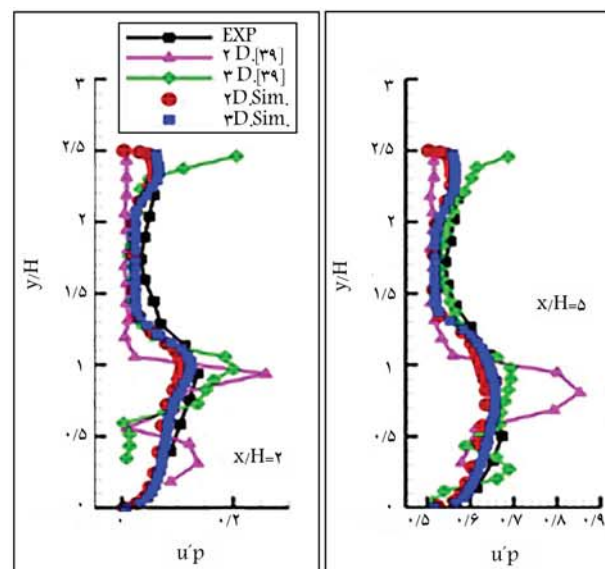
همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، ذرات سبکتر با ارتفاع بیشتری نسبت به دیواره پایینی کانال، شروع به برگشت کرده و سرعت برگشت بیشتری دارند. به‌طوری‌که به‌ترتیب ذرات با قطرهای ۱، ۱۰ و ۲۰ میکرومتر بیشترین فاصله بازگشت را دارند. از نظر اندازه سرعت بازگشت، ذره با قطر ۱ میکرومتر (با مقدار بیش از ۰/۳۵) دارای بیشترین مقدار و بعد از آن ذرات با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میکرومتر با مقدار کمتر از ۰/۳۵ و بیشتر از ۰/۳ به‌ترتیب مقادیر بعدی را به‌خود اختصاص داده‌اند.

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

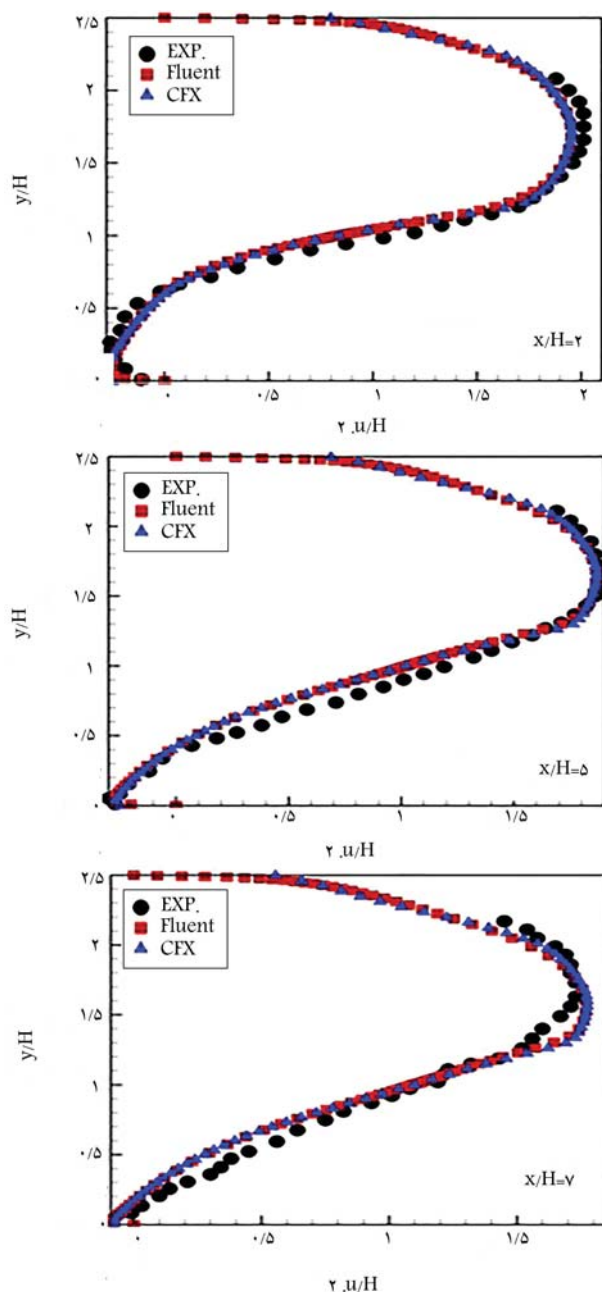
۳.۳. شبیه‌سازی مساله جریان پشت پله با نرم‌افزار CFX

در ادامه، جهت شبیه‌سازی نوسان در جریان آشفتگی 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 فلوئنت استفاده شده است. هندسه دوبعدی می‌باشد و حل با روش حجم محدود و رویکرد اویلری - لاگرانژی به‌صورت دوراها انجام شده است. حل به‌صورت پایا بوده و برای ورود هندسه دوبعدی به نرم‌افزار CFX که فقط هندسه‌های سه بعدی را حل می‌کند، از گزینه تقارن استفاده شده است. به‌این ترتیب، نرم‌افزار به‌طور خودکار هندسه دوبعدی را به هندسه سه بعدی با عمق بسیار کوچکی تبدیل می‌کند که تأثیر چندانی روی نتیجه حل ندارد. همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تطابق خوب و قابل قبولی در شبیه‌سازی دوفازی با رویکرد اویلری - لاگرانژی با نتایج تجربی و توسط فلوئنت و CFX وجود دارد. از این جهت می‌توان از مزایای سرعت همگرایی و حل نرم افزار CFX مخصوصا در مسائل پایا استفاده کرد.

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



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



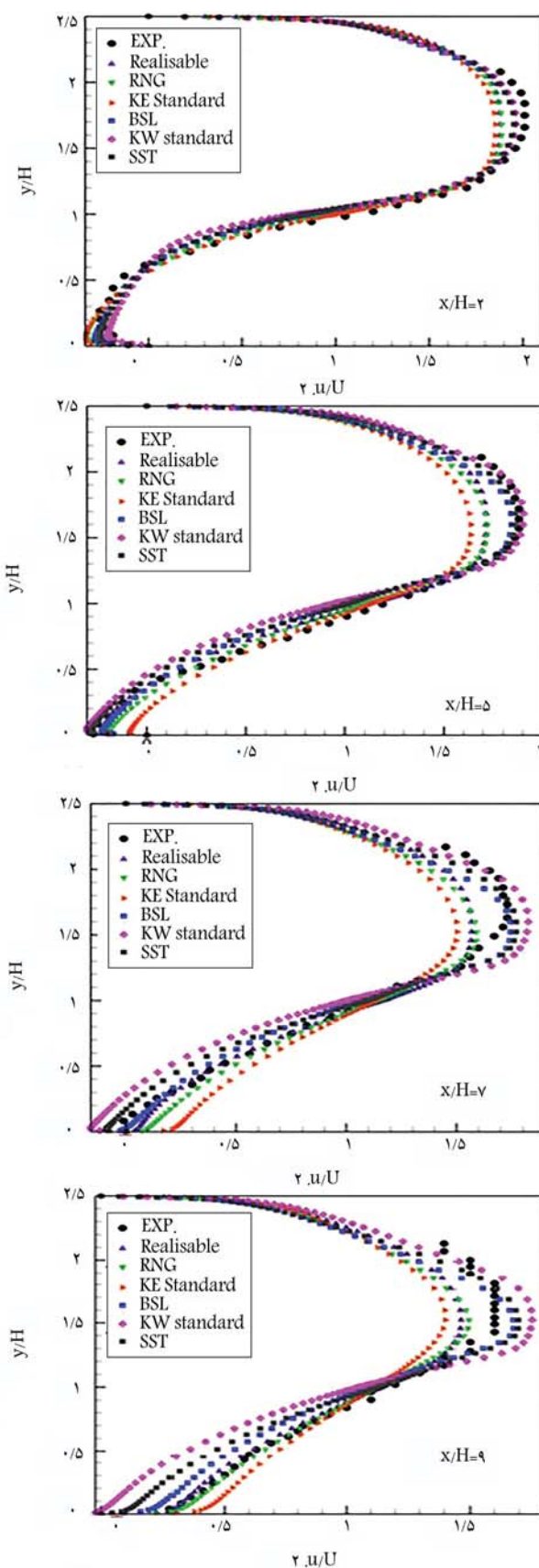
شکل ۱۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو نرم‌افزار فلونت و افزار فلونت و CFX در چهار مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7\}$ برحسب سرعت جریان.

جدول ۶. ریشه میانگین مجذور خطا برای شکل ۱۳.

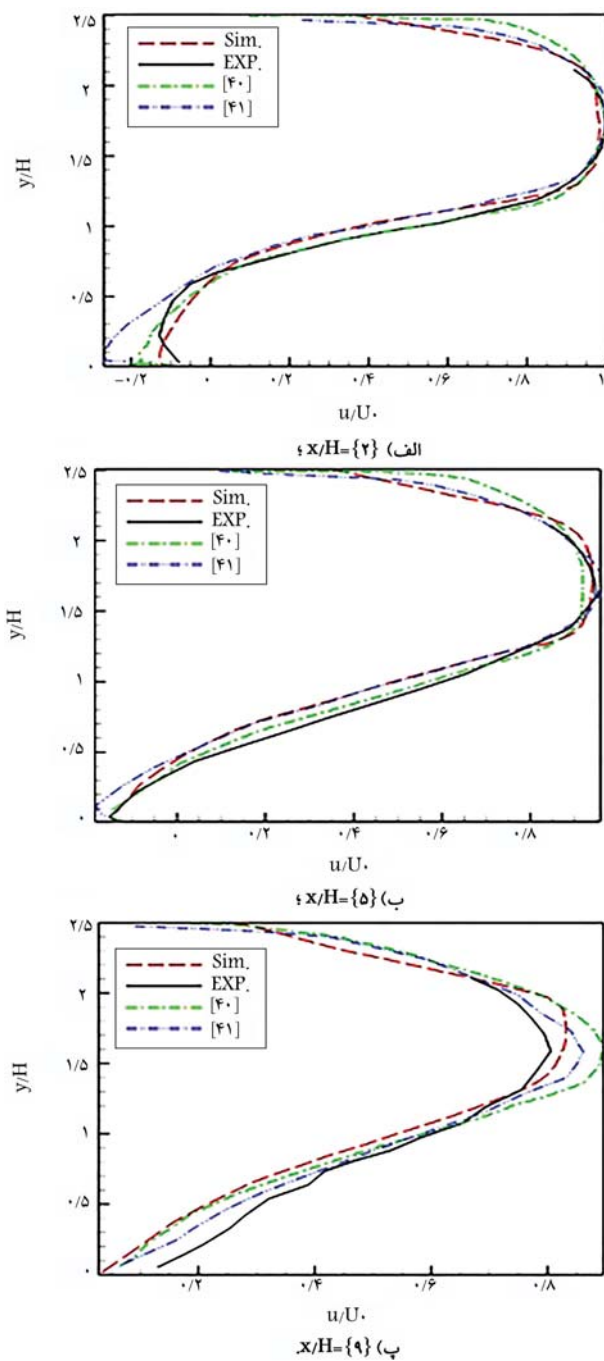
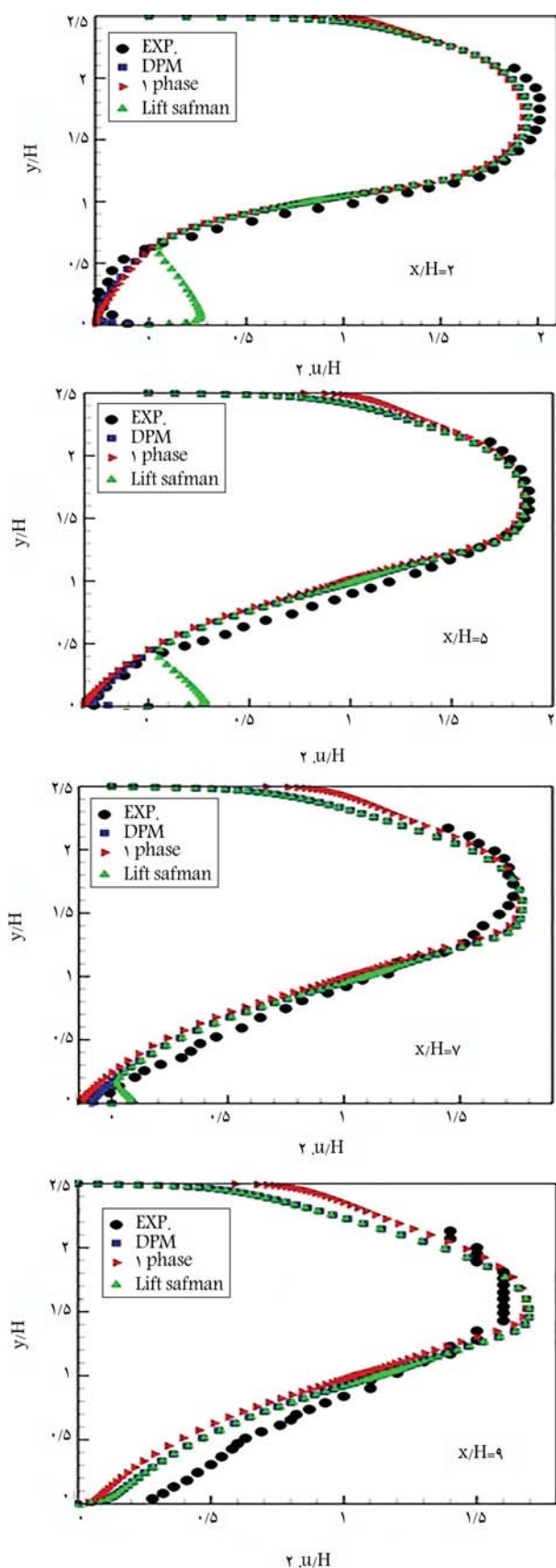
داده	$x/H = \{2\}$	$x/H = \{5\}$	$x/H = \{9\}$
شبیه‌سازی	۰/۰۶۵۰۸۳	۰/۰۵۰۵۷۴	۰/۰۵۷۹۲۶
نوبیل و رانوت ^[۴۰]	۰/۰۳۵۹۹	۰/۰۵۰۰۹۹	۰/۰۳۷۲۸۷
چان و همکاران ^[۴۱]	۰/۰۸۶۶۷۶	۰/۰۳۹۳۹۴	۰/۰۶۲۳۲۸

نمودار سرعت در راستای x در سه مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 9\}$ نشان داده شده است. در این نمودار می‌توان نتیجه مطالعه فیلر را به‌عنوان نتیجه تجربی و نتیجه مطالعه‌ی چان و همکاران^[۴۱] را نیز مشاهده کرد.

در جدول ۶، می‌توان ریشه میانگین مجذور خطا را برای داده‌های شکل ۱۳



شکل ۱۱. مقایسه مدل‌های آشفتگی در چهار مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9\}$ برحسب سرعت جریان.



شکل ۱۳. پروفیل سرعت در راستای x .

مشاهده کرد. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود میانگین خطا برای شبیه‌سازی در سه مختصات یاد شده برابر با 0.57% می‌باشد. این مقدار میانگین خطا برای داده‌های نوییل و رانوت، چان و همکاران به ترتیب برابر است با 0.41% و 0.627% از بین این سه خطا، کمترین خطا مربوط به نوییل 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 گسسته و پیوسته به صورت جداگانه حل می‌شود و در نهایت فاز گسسته توسط ترم چشمه به فاز پیوسته ربط داده می‌شود. این روش حل، مستلزم محاسبات و هزینه زمانی

شکل ۱۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو نرم‌افزار فلوئنت افزار فلوئنت و CFX در چهار مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9\}$ برحسب سرعت جریان.

بیشتری می‌باشد. اما در روش تک فاز یک سیال، پیوسته با خواص موثر جدید که تابع خواص سیال و نانو ذره و درصد حجمی می‌باشد تعریف شده و معادلات تنها برای یک سیال تک فاز حل می‌گردد. اگر چه این روش در محاسبات و زمان به صرفه می‌باشد اما، دقت در ارزی این صرفه جویی کم شده و درصد خطا بالا می‌رود. در این مسئله برای رویکرد DPM ماکزیمم خطای سرعت ۱۹ درصد بوده و برای روش تک فاز این مقدار خطا به ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. در حل DPM نیروهای مگرادیان فشار، جرم مجازی و درگ فعال می‌باشد. زمانی که نیروی ساکن را وارد حل نموده، مشاهده می‌شود نمودار سرعت در بخش گردابه دچار خطای زیادی شده و از روند تجربی فاصله می‌گیرد. برای محاسبه رویکرد تک فاز چگالی موثر نانوسیال، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

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

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

۴. نتیجه گیری

برای شبیه سازی جریان نانوسیال در هندسه پشت پله و به منظور بهترین انتخاب و بررسی رفتار نانو ذرات 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 اولبری - لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفت. رینولدز جریان مورد مطالعه ۱۸۶۰۰ است. تأثیر قطر ذره و عدد استوکس روی مسیر حرکت ذره در جریان آشفته نیز بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی 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 ۳۵ میکرومتر، نانو ذرات 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 پراکندگی بررسی گردید که مطابق با نتایج حاصل، برای ذرات با استوکس پایین نانو ذرات با پراکندگی بیشتر و به صورت پخش از کانال خارج می‌شود. با افزایش عدد استوکس و سنگین تر شدن ذرات میزان پراکندگی 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 ۱، فرصت کافی برای پاسخ به تغییرات جریان را دارند و از این جهت وارد گردابه ها 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 ۱ باشند تا وارد گردابه ها در جریان آشفته شوند و امکان مطالعه و بررسی رفتارشان وجود داشته باشد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی دو بعدی و سه بعدی با نتایج تجربی، نتایج حاصل از شبیه سازی سه بعدی با خطای بسیار کم تطبیق بالایی با نتایج تجربی دارند. نتایج حاصل از مدل $K\omega$ SST نشان می‌دهد که این مدل با کمترین درصد خطا بهترین مدل و بعد از آن مدل $K\omega$ BSL برای شبیه سازی آشفتگی جریان نانوسیال پیشنهاد می‌شود. مطابق با نتایج به دست آمده، استفاده از نیروی برای ساکن توصیه نمی‌شود و استفاده از این نیرو سبب ایجاد خطا در پیش بینی مقادیر در ناحیه گردابه می‌شود.

فهرست علائم

φ : کسر حجمی ذره؛
ρ : چگالی (kg/m^3)؛
ρ_{eff} : چگالی موثر نانوسیال (kg/m^3)؛
ρ_p : چگالی فاز دوم (ذره) (kg/m^3)؛
ρ_f : چگالی فاز اول (سیال) (kg/m^3)؛
ρ_{nf} : چگالی نانوسیال (kg/m^3)؛
τ : تنش برشی (N/m^2)؛
TD : نسبت قطر ذرات؛
τ_p : زمان ریلکشن دینامیکی ذرات؛
τ_f : مقیاس زمانی سیال؛
μ : ویسکوزیته دینامیکی ($kg/m \cdot s$)؛
μ_f : ویسکوزیته دینامیکی سیال ($kg/m \cdot s$)؛
μ_{nf} : ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ($kg/m \cdot s$)؛
λ : مسیر آزاد میانگین سیال (m)؛
ζ : اعداد تصادفی گاوسی مستقل 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 کالینگهام؛
C_p : ظرفیت گرمایی ($J/kg \cdot K$)؛
C_{pbf} : ظرفیت گرمایی سیال پایه ($J/kg \cdot K$)؛
C_{pf} : ظرفیت گرمایی نانو ذرات ($J/kg \cdot K$)؛
C_{pnf} : ظرفیت گرمایی نانوسیال ($J/kg \cdot K$)؛
d_f : قطر ذرات سیال (m)؛
d_p : قطر ذره (m)؛
e : عدد نیر؛
f_B : نیروی براونی (N)؛
F_D : نیروی پسا (N)؛
f_{th} : نیروی ترموفورز (N)؛
h : ارتفاع کانال (m)؛
H : ارتفاع پله (m)؛
u_B : سرعت براونی نانو ذرات (m/s^2)؛
u' : سرعت آشفتگی در راستای x (m/s^2)؛
Re_p : عدد رینولدز بر اساس سرعت نسبی و قطر ذره؛
K : انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2)؛
K_B : ثابت بولتزمن؛
K_{eff} : هدایت حرارتی موثر برای نانوسیال ($W/m \cdot K$)؛
k_f : رسانایی حرارتی سیال ($W/m \cdot K$)؛
k_p : رسانایی حرارتی ذره ($W/m \cdot K$)؛
Kn : عدد ناسن؛
l_{BF} : طول آزاد (m)؛
m_p : جرم ذره (kg)؛

t : زمان (s)؛
 \bar{V} : بردار سرعت (m/s^2)؛
 V_f : سرعت سیال (m/s^2)؛
 V_p : سرعت ذره (m/s^2)؛
 v' : سرعت آشفتگی در راستای y (m/s^2)؛
 w : پهنای کانال (m)؛
 w' : سرعت آشفتگی در راستای (m/s^2)؛
 X_p : مکان ذره (m)؛

np : تعداد ذرات درون یک حجم سلول؛
 P : فشار (p)؛
 st : عدد استوکس؛
 S_h : نرم چشمه انرژی ذرات؛
 S_v : نرم چشمه تکانه ذرات؛
 S_e : شدت طیفی نیروی براونی؛
 T : دما (k)؛
 T_p : دمای ذره (k)؛

پانویسها

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., Hirokawa, Y. and Jotaki, T., 1978. Particle diffusion in a duct laden jet. *Aiche Journal*, 24, pp.509-519.
9. Berlemont, A., Desjonqueres, 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.

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. Nanofluids Particle 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.org/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 چندموضوعی یک ماهواره بر بازگشت‌پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان

مطهره مجیبی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محسن فتحی جگرکندی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوری ۴۰، شماره ۱، ص. ۶۱-۷۳، (پژوهشی)

در این پژوهش، مسئله بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک ماهواره بر انعطاف‌پذیر بازگشت‌پذیر فرمول‌بندی شده است. هدف ارائه یک ساختار طراحی مناسب به‌منظور 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 آیرولاستیک به‌عنوان نوآوری از مدل تیر برنولی - اویلر و اصل دالامبر در تحلیل سازه برای مدل استاتیکی استفاده شده است. ساختار تحلیلی قابلیت اطمینان سری و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب به علت 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 گرادیان پایه را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: آیرولاستیک، بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی، تقریب قابلیت اطمینان، طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان، ماهواره بر انعطاف‌پذیر، ماهواره بر بازگشت‌پذیر به جو، مدل‌سازی عدم قطعیت.

motahareh.mojibi@alum.sharif.edu
fathi@sharif.edu

۱. مقدمه

با توجه به رونق‌های پیشرفته در زمینه کنترل و هدایت از سویی و نگاه رقابتی از سوی دیگر از طریق ایجاد طرح‌هایی با هزینه کمتر، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری عملیاتی بیشتر، به تنهایی برتری مفهوم «قابل استفاده مجدد» را به‌خوبی نشان می‌دهد. در واقع، استفاده مجدد از پرتابگرها در سامانه‌های کم‌هزینه عملاً اجتناب‌ناپذیر است. به همین دلیل، پرتابگرهای قابل استفاده مجدد، مفهوم امیدوارکننده‌ای برای الزامات جدید هستند.^[۱]

در حالت کلی، در طراحی یکپارچه 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. به‌منظور 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 ۱۴۰۱/۱۱/۵، اصلاحیه ۱۴۰۲/۴/۹، پذیرش ۱۴۰۲/۴/۲۵.

استاد به این مقاله:

مجیبی، مطهره، و فتحی جگرکندی، محسن، ۱۴۰۳. بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک ماهواره بر بازگشت‌پذیر انعطاف‌پذیر تحت عدم قطعیت مبتنی بر قابلیت اطمینان. مهندسی

مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۶۱-۷۴. DOI:10.24200/J40.2023.61713.1667

به معنی زیرسیستم‌های متفاوت مانند طراحی سازه، طراحی سیستم پیشران 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 چندموضوعی بر پایه خودکار نمودن^۱ فرایند طراحی را فراهم نمود. رویکرد بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی^۲ با ساختار مناسب در تکنیک، مدل‌سازی و ارزیابی سیستم با لحاظ کردن تأثیر متقابل روابط موضوعی، موجب بهبود مشکل زمان و هزینه در طراحی سیستم‌های پیچیده می‌شود. ساختارهای بهینه‌سازی چندموضوعی مبتنی بر قابلیت اطمینان به‌عنوان یکی از بهینه‌ترین ساختارهای طراحی سیستم‌های مدرن از منظر 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 ماهواره‌بر در مسیر بازگشت به اتمسفر با در نظرگیری اثرات انعطاف‌پذیری است. در تمامی کارهای گذشته در زمینه طراحی بهینه مسیر بازگشت به اتمسفر به روش کنترل بهینه، مسئله بالا به تنهایی تحت عنوان موضوع مسیر مدنظر بود. در این پژوهش با وارد کردن اثرات انعطاف‌پذیری به معادلات دینامیکی، موضوع سازه در کنار موضوع مسیر به‌منظور 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 انعطاف‌پذیر انجام شده است. به همین منظور، نوآوری دیگر این پژوهش، حضور قیود سازه به‌منظور حفظ ایمنی بدنه انعطاف‌پذیر مانند تنش، کماتش، حرارت جذب شده عایق و پایداری استاتیکی از طریق بهینه‌سازی ضخامت پوسته و عایق در طی پرواز مافوق صوت است. در طراحی نامعین حضور عدم قطعیت‌های جدید و مرتبط به انعطاف‌پذیری مانند عدم قطعیت در فرکانس طبیعی مود خمشی اول و ضریب میرایی سازه در کنار عدم قطعیت‌های بحرانی در مسیر بازگشت به جو مانند عدم قطعیت در سرعت اولیه، ضریب برآ و ضریب عایق مدل‌سازی شده‌اند.

به این ترتیب، در پژوهش حاضر ابتدا به فرمول‌بندی 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 چندموضوعی مبتنی بر قابلیت اطمینان متوالی تشریح می‌گردد. با مدل‌سازی موضوعات طراحی، محدودیت‌ها و الزامات مسئله طراحی به‌ویژه قیود مربوط به بازگشت‌پذیری و انعطاف‌پذیری ماهواره‌بر تعیین می‌گردد. در نهایت، مسئله طراحی نامعین فرمول‌بندی 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 ایمنی و خرابی استفاده می‌شود. در این رویکرد، طراح با اعمال ضریب بزرگ‌تر از یک در بارهای وارد شده سعی در ایجاد شرایط سخت‌گیرانه و یا با اعمال ضریب 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 و یا احتمال شکست برای ضرایب دست پایین گردد. همچنین، محدود شدن فضای طراحی توسط ضرایب ایمنی - خرابی در مسائل بزرگ با تعداد قیود بالا، از

معایب دیگر این رویکرد است. در 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 ریسک طراحی و امکان مقاوم‌سازی و اندازه‌گیری قابلیت اطمینان طرح است.

۱.۲. مسئله بهینه‌سازی طراحی نامعین مبتنی بر قابلیت اطمینان

طراحی نامعین به‌منظور پوشش نواقص طراحی سنتی در برخورد با عدم قطعیت‌ها توسعه پیدا کرده است. در این رویکرد، عدم قطعیت‌های 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 (مقاوم 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 عدم قطعیت‌دار تحت عنوان متغیر اتفاقی، تعریف و اطلاعات آماری مورد نیاز برای توصیف ریاضی آنها به‌طور معمول توسط نمونه‌برداری به‌دست 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 مد 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 $g_i(x) = 0$ (مرز شکست در قید) تا مبدأ مختصات بیانگر محتمل‌ترین نقطه شکست و یا به‌طور اصطلاح، شاخص قابلیت اطمینان β است. در نتیجه، مسئله استاندارد RBDO با استفاده از روابط ۱ و ۲ فرمول‌بندی می‌شود. این مسئله شامل یک حلقه بهینه‌سازی اصلی به‌منظور بهینه‌سازی تابع عملکرد و برآورده کردن قیود معین مطابق رابطه ۱ و یک حلقه تقریب قابلیت اطمینان مطابق رابطه ۲ به‌منظور تبدیل قید سخت به قید نرم خواهد بود. u در این رابطه بردار متغیرهای قید در فضای گوسی استاندارد است.^[۴]

$$\min f(d, X, P)$$

$$S.T :$$

$$\beta_j(d, X, P) \geq \beta_{tj} \quad j = 1, 2, \dots, N_R \quad (1)$$

$$G_k^s(d, P) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, N_S$$

$$\beta = \min \sqrt{uu^T} \quad (2)$$

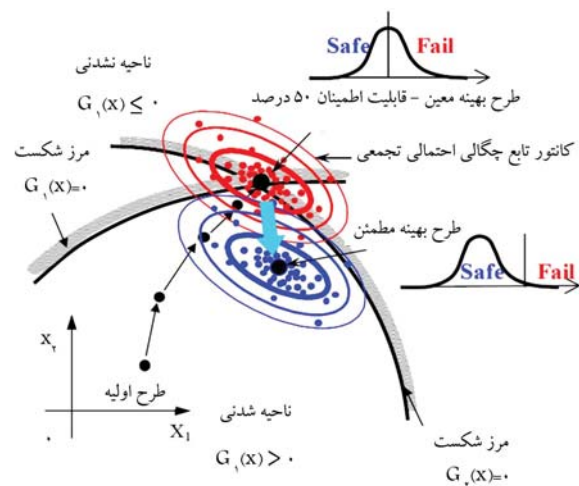
$$S.T : G(u) = 0$$

در رابطه فوق، d, X و P به‌ترتیب پارامترهای طراحی، متغیرهای معین و متغیرهای عدم قطعیت‌دار مسئله هستند. G_k^s قید معین k ام و β_j شاخص قابلیت اطمینان قید سخت j ام را نشان می‌دهد که از حلقه تخمین قابلیت اطمینان در هر تکرار به‌دست 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 بخاطر ایجاد تکنیکی 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 کارایی محاسباتی یک

چند موضوعی را به امکان پذیری چند موضوعی،^۷ امکان پذیری تک موضوعی^۸ و همه در یک زمان^۹ تقسیم کردند و این سه روش را روش های 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 اتکا به تحلیل موضوعی، به دنبال پاسخ بهینه کلی مسئله در سطح سیستم است. در این حالت روابط بین موضوعی توسط 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 مدنظر استفاده می شوند. در نهایت از قیود تساوی به منظور همگرایی متغیرهای تخمین زده شده و مقادیر متناظر آن استفاده می شود.^[۹] این روش ها عملاً برای مسائل متوسط و بزرگ صنعتی غیر قابل هستند.

در همان سال ۱۹۹۴، ساییسکی و بالینک میان ساختارهای ارائه شده توسط کرمر و ساختارهایی که از چندین الگوریتم بهینه سازی در سطح موضوعات استفاده می کنند اصطلاحاً چندسطحی نامیده می شوند تمایز قائل شدند.^[۱۰] در این روش ها، علاوه بر بهینه سازی مستقل موضوعات، بهینه سازی سطح سیستم در راستای همگرایی بین موضوعات و محاسبه متغیرهای مشترک عمل می کند. بهینه سازی مشارکتی^{۱۰} در سال ۱۹۹۷ توسط براون و کروو به عنوان اولین ساختار دو سطحی معرفی شد.^[۱۱] در این روش، بهینه ساز در سطح سیستم تنها در راستای همگرایی متغیرهای تخمین زده شده و مقدار اصلی متناظر آن عمل می کند. ساختار بهینه سازی زیرسیستم همزمان^{۱۱} نیز توسط ووژک و همکارانش مطرح شد.^[۱۲] در این ساختار، تحلیل چند موضوعی و تحلیل حساسیت به طور همزمان با ایجاد یک مدل تقریبی، به زیرسیستم ها اجازه می دهد تا با برآورد تأثیر متغیرهای موضوعات دیگر بر زیرسیستم مدنظر، 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 ی بعد خواهد بود.^[۱۳] حضور همزمان تحلیل سیستمی و تحلیل حساسیت موجب افزایش هزینه محاسباتی در این روش می شود و در نهایت، سیستم یکپارچه دو سطحی^{۱۲} ۱۹۹۸ توسط ساییسکی 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 تقرب قابلیت اطمینان با مسئله بهینه سازی چند موضوعی، یک حلقه درونی به مسئله طراحی اضافه می شود. این موضوع کارایی MDO را به خصوص در مسائل متوسط و بزرگ تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می دهد. کوخ و همکارانش^[۱۸] دو و چن^[۱۹] و سوژ و همکارانش^[۲۰] با استفاده از ساختار موازی و با استفاده از نمونه برداری مونت کارلو^{۱۳} توسط ساختار AAO برای اولین بار مسئله MDO مبتنی بر قابلیت اطمینان^{۱۴} را فرمول بندی کردند.^[۲۱] سوژ در پژوهش دیگری از روش مدل سطح پاسخ به علت کاهش هزینه محاسباتی نسبت به روش های نمونه برداری برای تقرب قابلیت اطمینان استفاده کرد. آگوال و همکارانش^[۲۲] جون و همکارانش^[۲۳] و ون و همکارانش^[۲۴] با حذف تحلیل موضوعی از طریق رویکرد تحلیل و طراحی همزمان،^{۱۵} یک ساختار دو حلقه ای و تک سطحی که در آن ارزیابی قابلیت اطمینان در حلقه داخلی با تقرب مرتبه اول



شکل ۱. مفهوم هندسی جابجایی قیود در فاصله MPP.^[۷]

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 جابجای کردن تابع هدف و قید سرعت همگرایی و مقاومت به خصوص در مسائل غیرخطی به شدت افزایش می یابد.

$$\min G_i(u) \quad (3)$$

$$S.T \parallel u \parallel = \beta_i$$

۲.۲. ساختارهای مسئله RBDO

در حل مسائل RBDO، دو حلقه بهینه سازی اصلی و تخمین قابلیت اطمینان همزمان 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، قیود احتمالی در مسئله بهینه سازی اصلی مورد 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 تعداد قیود 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 توسط دو و چن مطرح شد.^[۷] در این رویکرد، مسئله بهینه سازی به صورت معین حل شده و پس از آن برای متغیرهای بهینه ارزیابی قابلیت اطمینان انجام می شود. سپس، در تکرار بعد، متغیرهای عدم قطعیت دار به اندازه MPP حلقه قبل جابجایی می شوند و این فرایند تا زمانی که قیود در محدوده قابل قبول قرار گیرند، ادامه می یابد. در واقع، به جای اینکه به اندازه MPP از قیود سخت فاصله گرفته شود، قیود سخت به اندازه MPP مطابق شکل ۱ جابجایی می شوند. به این روش اصطلاحاً بهینه سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سری^۶ گفته می شود.

۳. بهینه سازی طراحی چند موضوعی مبتنی بر قابلیت اطمینان

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

۱.۳. بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی تحت ساختار تحلیل قابلیت اطمینان سلسله‌مراتبی

نحوه بهره‌گیری و اعمال عدم قطعیت در مسائل UMDO می‌تواند به شدت همگرایی کل مسئله را تحت تأثیر قرار دهد. این موضوع به دلیل انتشار عدم قطعیت در موضوعات و تأثیر آن در تحلیل چندموضوعی و تحلیل قابلیت اطمینان است. ساختار RBMDO مشابه RBDO به دو دسته موازی و متوالی تقسیم می‌شود. ساختارهای موازی به دلیل عدم کارایی حتی در مسائل متوسط عملاً استفاده نمی‌شوند. ساختار مسئله طراحی SMRA به حلقه‌های سلسله‌مراتبی بهینه‌ساز اصلی و تحلیل قابلیت اطمینان تقسیم می‌شود. برای یک سیستم n موضوعی، فرایند این مسئله شامل مراحل زیر است ۱. حل مسئله MDO به صورت معین. در حلقه اول مسئله MDO به صورت معین حل شده و از حلقه دوم بر اساس اطلاعات حلقه قبل مسئله MDO مطابق رابطه ۴ فرمول بندی می‌شود.

$$\min_{(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, p_i^M, y_i^M)} f(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, p_i^M, y_i^M)$$

S.T :

$$G^i(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M - s_s^{(i)}, \mu_{x_i}^M - s_i^{(i)}, y_i^{MPP(i)}, p_i^{MPP(i)})^{k-1} \leq 0$$

$$g^i(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, y_i^M, p_i^M) \leq 0$$

$$y_i^M = y_i(d_s, d_i, \mu_{x_s}^M, \mu_{x_i}^M, y_{ji}^M)$$

$$s_s^{(i)} = \mu_{x_s}^{M(i)k-1} - x_s^{MPP(i)k-1}$$

$$s_i^{(i)} = \mu_{x_i}^{M(i)k-1} - x_i^{MPP(i)k-1}$$

(۴)

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

۲. تحلیل قابلیت اطمینان در مختصات بهینه. برای پارامترهای احتمالی $u_p^{(i)}$ متغیرهای احتمالی $u_s^{(i)}$ و $u_i^{(i)}$ و متغیر حالت $y_i^{(i)}$ در فضای گوسی استاندارد برای قید احتمالی i ام مطابق رابطه ۵ انجام می‌شود. معادلات حالت یا قیود تساوی مطابق ساختار MDO مد نظر تنظیم می‌شوند.

$$\max_{(u_s^{(i)}, u_i^{(i)}, u_p^{(i)})} G^i(d_s, d_i, u_s^{(i)}, u_i^{(i)}, u_p^{(i)}, y_i^{(i)})$$

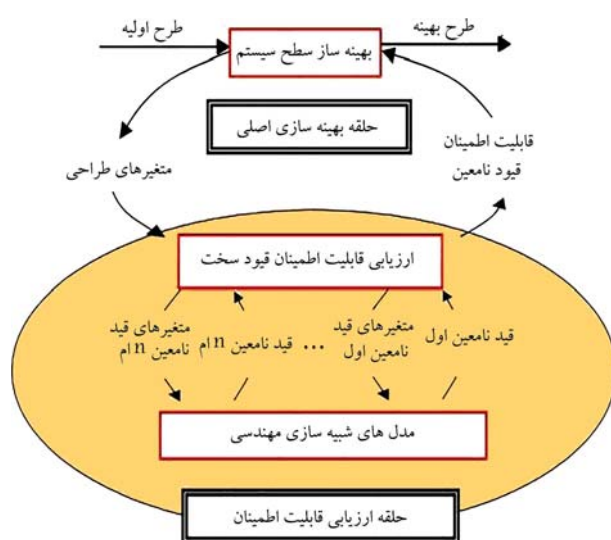
S.T :

$$\|u_s^{(i)}, u_i^{(i)}, u_p^{(i)}\| = \beta_t$$

$$y_i^{(i)} = y_i(d_s, d_i, (\mu_{x_s}^M + u_s^{(i)} \sigma_s), (\mu_{x_i}^M + u_i^{(i)} \sigma_i), y_{ji}^{(i)})$$

(۵)

۳. ارزیابی معیارهای همگرایی. به ازای هر کدام از بهینه‌ساز و تحلیل‌های قابلیت اطمینان قیود احتمالی، معیار همگرایی وجود دارد. در صورت عدم همگرایی، مقادیر اولیه حلقه جدید برابر با مقدار بهینه حلقه قبل، پارامترهای احتمالی برابر با MPP حلقه قبل و بردار جابه‌جایی متغیرهای احتمالی از مقدار بهینه و خروجی حلقه تحلیل قابلیت اطمینان حلقه قبل به دست می‌آیند.

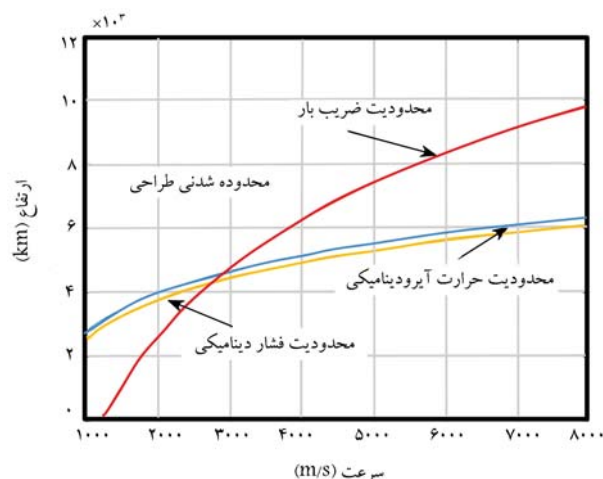


شکل ۲. حلقه ارزیابی قابلیت اطمینان در مسئله MDO. [۲۶]

کرش - کان - تاکر ۱۶ محاسبه می‌گشت را توسعه دادند. به علت افزایش متغیرهای کمکی و قیود مسئله، روش‌های توسعه یافته بر اساس KKT به نسبت کارآمد نبودند و در مسائل بزرگ با تعداد قیود بالا به دلیل افزایش خطای تقریب دقت مناسبی نداشتند. [۲۵]

استراتژی دیگر در حل موثر RBMDO، تفکیک حلقه‌های مسئله طراحی است. ایده این روش بر اساس قرارگیری حلقه‌های متوالی MDO معین و تحلیل قابلیت اطمینان چندموضوعی ۱۷ تحت عنوان ارزیابی قابلیت اطمینان چندموضوعی سلسله‌مراتبی ۱۸ مشابه ساختار SORA برای مسائل تک موضوعی مشابه ساختار شکل ۲ گرفت.

ساختار MRA در کارایی RBMDO نقش بسیار کلیدی ایفا می‌کند. به عبارت دیگر، مقدار زیادی از محاسبات در مسائل RBMDO مربوط به تحلیل چندموضوعی و تحلیل قابلیت اطمینان چندموضوعی از طریق ارزیابی‌های مکرر می‌شود. الکساندروف و لوتیس به منظور افزایش کارایی RBMDO، رویکرد تقریبی RIA را با ساختار چندموضوعی IDF ادغام کردند. [۲۷] هرچند در این روش تحلیل قابلیت اطمینان به صورت موازی در مسئله قرار می‌گرفت، اما حفظ روابط میان موضوعی توسط متغیرهای کمکی در این ساختار نسبت به وجود حلقه تحلیل موضوعی در ساختار MDF، به عملکرد بهتر حلقه تحلیل قابلیت اطمینان کمک کرد. پادماناها 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. [۲] دو 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 ناکارآمدی 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 منظر زمان و هزینه محاسباتی عملکرد بسیار بهینه‌تری داشت. [۳۰-۳۲]



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

قیود مسیر به طور متداول 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 آیرودینامیکی مشابه شکل ۳، دمای ایستایی، شتاب عرضی/کنترلی، انحراف سطوح کنترلی، پسا و ... می‌شوند.

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

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

$$Q_s = 9.95306 \times 10^{-5} \sqrt{\rho V^{3.7}} \quad (15)$$

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

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

به منظور محاسبه حداقل زاویه حمله مجاز در هر لحظه، چگالی با ارتفاع مورد نیاز برای قرار گرفتن جسم در شرایط حداکثر حرارت آیرودینامیکی مجاز و حداکثر فشار دینامیکی مجاز در سرعت مد نظر 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 متناظر 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.

$$\rho_{Q_s \max} = (Q_{s \max} / 9.95306 \times 10^{-5} V^{3.7})^2 \quad (16)$$

$$\rho_{q_\infty \max} = q_{\infty \max} / (0.5 \times V^2)$$

$$\frac{q_\infty}{\rho g} \sqrt{C_L^2(\alpha_{cr}, M) + C_D^2(\alpha_{cr}, M)} - nT_{\max} = 0 \quad (17)$$

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

در تقریب یک تابع مانند منحنی زاویه حمله، درون‌یابی چندجمله‌ای در صفرهای چندجمله‌ای متعامد چبیشف می‌تواند میزان حداکثر خطا را در فواصل درون‌یابی به حداقل رساند. در واقع، درون‌یابی چندجمله‌ای چبیشف یک تقریب بهینه تابع خواهد بود. [۲۴] منحنی زاویه حمله کنترلی توسط چندجمله‌ای چبیشف مطابق رابطه ۱۹

۴. مدل‌سازی موضوعات ماهواره‌بر

۴.۱. موضوع مسیر

در این پژوهش، معادلات سه درجه آزادی حرکت در دستگاه مسیر و یک درجه آزادی الاستیک (مود خمشی اول) در راستای محور Z در دستگاه بدنی مطابق ۶ مد نظر است. نیروها و ممان آیرودینامیکی، کنترلی و پیشران در دستگاه بدنی مطابق ۷ و بسط خطی زاویه حمله در طول جسم مطابق ۸ خواهد بود. از ترم‌های غیرخطی مختصات تعمیم‌یافته به علت کوچک بودن صرف نظر شده است. معادلات برای مرکز جرم تغییر شکل نیافته توسعه داده شدند. [۳۲]

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{m} (F_x^B \cos \alpha + F_z^B \sin \alpha - mg \sin \gamma) \\ \dot{\gamma} &= \frac{1}{V m} (-F_x^B \sin \alpha + F_z^B \cos \alpha - mg \cos \gamma) + \frac{V \cos \gamma}{r} \\ \dot{q} &= \frac{1}{I_y} M_y \\ \dot{\alpha} &= q - \dot{\gamma} \\ \dot{\xi}_1 &= -2\mu_1 \omega_{n_1} \dot{\xi}_1 - 2p \dot{\eta}_1 - (\omega_{n_1}^2 - p^2 - q^2) \xi_1 \\ &+ \frac{1}{M_1} \int_L F_z^B(x) \varphi_1(x) dx \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_x^B &= F_{Tx} + F_{Ax} + F_{Cx} \\ F_z^B &= F_{Tx} \xi_1 \varphi'_1(x_T) + F_{Ax} \xi_1 \varphi'_1(x_D) + F_{Cz} \\ &- qs \left(\int_L c_{l\alpha}(\alpha, M, x) \alpha(x, t) dx + \sum_{k=1}^m c_{l\alpha}(\alpha, M, x_{w_k}) \alpha(x_{w_k}, t) \right) \\ M_y &= -x_T F_{Tx} \xi_1 \varphi'_1(x_T) + F_{Tx} \xi_1 \varphi_1(x_T) \\ &+ F_{Ax} \xi_1 \varphi_1(x_D) \\ &- qs \left(\int_L x c_{l\alpha}(\alpha, M, x) \alpha(x, t) \varphi_1(x) dx + \sum_{k=1}^m x_{w_k} c_{l\alpha}(\alpha, M, x_{w_k}) \alpha(x_{w_k}, t) \right. \\ &\left. \varphi_1(x_{w_k}) \right) + M_{Cz} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \alpha(x, t) &= \alpha_c(t) - \delta_z(x, t) + \frac{1}{u} \delta_z(x, t) - \frac{qx}{u} \\ &= \alpha_c(t) - \varphi'_1(x) \xi_1(t) + \frac{1}{u} \varphi_1(x) \dot{\xi}_1(t) - \frac{qx}{u} \end{aligned} \quad (8)$$

۴.۱.۴. 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 بلز ۱۹ فرمول‌بندی می‌گردد. مسئله بلز به دنبال یافتن مقادیر متغیرهای حالت $x \in \mathbb{R}^n$ و $u \in \mathbb{R}^n$ کنترلی در طول مسیر به گونه‌ای است که تابع هدف بلز مطابق رابطه ۹ حداقل گردد. 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 ۱۰، قیود 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 خمشی برای هر مقطع از مایه‌ها بر به دست خواهد آمد.

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

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

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

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 خمشی و فشاری بحرانی در یک استوانه جدار نازک از روابط ۲۵ و ۲۶ محاسبه می‌شوند.^[۲۵]

$$\sigma_{cr_p} = 0.765 E \frac{t}{r} \left(1 - 0.731 \left(1 - e^{\frac{1}{16} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right) \right) [Mpa] \quad (25)$$

$$\sigma_{cr_b} = 0.765 E \frac{t}{r} \left(1 - 0.901 \left(1 - e^{\frac{1}{16} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right) \right) [Mpa] \quad (26)$$

به منظور حفظ سلامت سازه و عدم بروز کمانش بدون نیاز به تقویت‌کننده ضریب 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 پایدار و افزایش برد موجب افزایش زمان پرواز و در نتیجه افزایش بار حرارتی جذب‌شده توسط سیستم عایق می‌گردد. از سوی دیگر، سرعت مافوق صوت جسم بازگشت‌پذیر موجب بروز موج‌های صوتی پی‌درپی 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 جذب‌شده توسط عایق در یک بازه زمانی مشخص از طریق معادله ۲۸ به دست می‌آید. ضریب هدایت عایق $C_{conductivity}$ تابعی از دما است.

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

۵. شبیه‌سازی

۱.۵. صحنه‌سنجی

سه چهارچوب اصلی یک سطحی با دوساختار تخمین قابلیت اطمینان چندموضوعی موازی و سری مطابق مرجع^[۲۶] به منظور صحنه‌سنجی فرمول‌بندی 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 امین تابع پایه چندجمله‌ای چیشیف مرتبه N_α و $\eta_k^{N_\alpha}$ ضریب متناظر آن خواهد بود. τ متغیر اصلی چندجمله‌ای و در بازه $[-1, 1]$ به صورت تابعی از سرعت مطابق رابطه ۲۰ تعریف می‌گردد. بردار ضرایب $X = [\eta_1^{N_\alpha} \ \eta_2^{N_\alpha} \ \dots \ \eta_{N_\alpha}^{N_\alpha}] \in [0, 1]$ بیانگر بردار متغیرهای طراحی هستند. با تعیین این بردار، منحنی زاویه کنترلی مشخص و انتگرال‌گیری عددی معادلات حالت صورت می‌گیرد.^[۱]

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

$$\alpha(V) = (1 - \eta(\tau)) \alpha_{\min}(V) + \eta(\tau) \alpha_{\max} \quad (20)$$

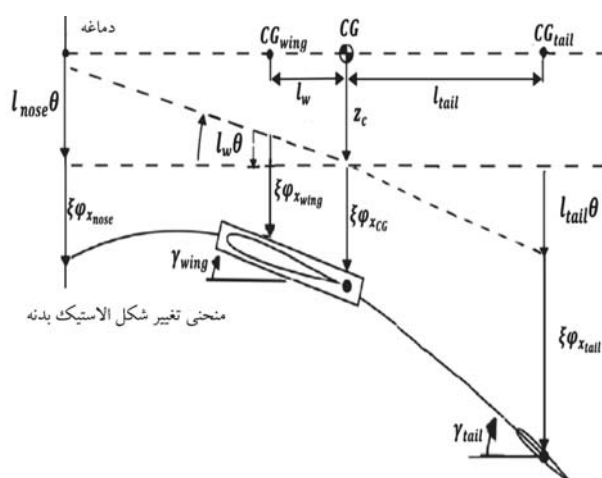
$$\tau = 2 \frac{V(t) - V_i}{V_f - V_i} - 1$$

۲.۴. موضوع سازه

ارزیابی تنش: پس از تعیین بارهای وارد بر مایه‌ها و مشخص شدن شرایط بحرانی به عنوان نقطه طراحی، تنش و کمانش پوسته دو معیار اصلی برای تعیین ضخامت خواهند بود. در تحلیل استاتیکی، بدنه مایه‌ها بر به مقاطع کوچک تقسیم‌بندی شده و توزیع جرم، توزیع ضرایب آیرودینامیکی، مرکز فشار و مرکز جرم متناظر با هر قسمت در طول مایه‌ها بر، با توجه به شرایط پروازی محاسبه می‌شود. مقدار زاویه حمله در مرکز آیرودینامیکی هر قسمت از بدنه 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 خطی در طول بدنه نیاز به محاسبه موقعیت هر قسمت نسبت به مرکز جرم می‌باشد. این مقدار مطابق شکل ۴ از رابطه ۲۱ محاسبه و نیرو و ممان اینرسی در طول جسم از رابطه ۲۲ به دست می‌آیند. با این عمل، مایه‌ها بر به یک تیر دوسر آزاد تحت نیرو و ممان اینرسی و آیرودینامیکی تبدیل می‌شود.^[۲۵]

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

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

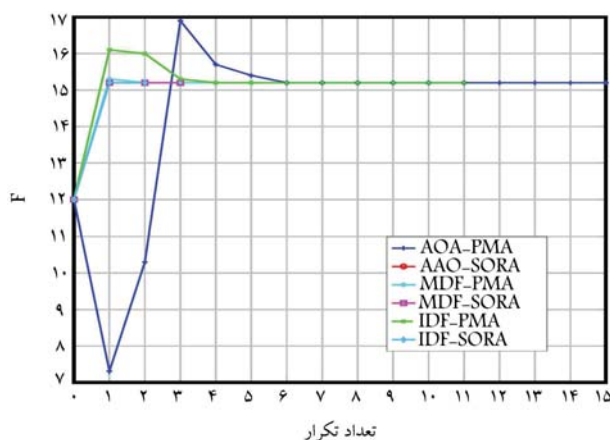


شکل ۴. جابه‌جایی قسمت‌های مختلف مایه‌ها بر انعطاف‌پذیر.

$$\begin{aligned}
 \min_d \quad & \int_{t_f}^t Q_s(t)dt + \lambda_1(G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7) + \lambda_2(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5) \\
 & m_{dry} + \lambda_3(G_8 + G_9 + G_{10} + G_{11}) + \lambda_4(C_6 + C_7 + C_8 + C_9 + C_{10} + C_{11-111} + C_{112} + C_{113} + C_{114}) \\
 \text{S.T:} \quad & G_1 : 9.953 \times 10^{-5} \sqrt{\rho V(\mu_{V_1})} r^{r_v} \leq Q_{max} \\
 & G_2 : \frac{1}{r} \rho V(\mu_{V_2})^r \leq q_{\infty max} \\
 & G_3 : \frac{1}{r_{mg}} \rho s V(\mu_{V_3})^r \sqrt{(\mu_{c_{z_{rigid}}} - S_{c_{z_{rigid}}})^2 + C_D^2(Mach(\mu_{V_3}), \alpha(\mu_{V_3}))} \leq n_{max} \\
 & G_4 : |V(t_f, \mu_{V_4}) - V_f| \leq \delta V_f \\
 & G_5 : |\gamma(t_f, \mu_{V_5}) - \gamma_f| \leq \delta \gamma_f \\
 & G_6 : |z(t_f, \mu_{V_6}) - z_f| \leq \delta z_f \\
 & G_7 : |\alpha(t_f, \mu_{V_7}) - \alpha_f| \leq \delta \alpha_f \\
 & G_8 : \sigma_{axial total}(\mu_{c_{z_{flex}}} - S_{c_{z_{flex}}}, \xi(\omega_n(\mu_{E_1}), \mu_{c_s}, \mu_{c_{z_{flex}}} - S_{c_{z_{flex}}})) \leq \frac{S_y}{n_{SF}} \\
 & G_9 : C_{buckle}(\mu_{E_2}) \geq C_{buckle min} \\
 & G_{10} : \frac{x_{CP}(\mu_{V_8}) - x_{CG}}{L} \geq SS_{M} \\
 & G_{11} : Q_{conductiveTPS}(\mu_{c_{TPS}} - S_{c_{TPS}}) \leq Q_{allowable} \\
 & C_k : c_k - d_{[y-111]} = 0, d_i^L \leq d_i \leq d_i^U, k = [1 \quad 2 \quad \dots \quad 114], i = [1 \quad 2 \quad \dots \quad 121]
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

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

ساختار RBMDO	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_5	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 جستجو MPP	g_1^+	۹۶۵	۸	۵۳۰	۸	۱۲۵
	g_2^+	۹۶۵	۸	۵۳۰	۸	۱۲۵
زمان اجرا (ثانیه)	۴۳,۸۱۵۶	۳,۰۲۰	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 سلسله مراتبی تخمین قابلیت اطمینان چندموضوعی 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 حلقه درونی تحلیل موضوعی، چهارچوب مناسب‌تری برای مسئله طراحی مد نظر بوده و ساختار سلسله مراتبی با توجه به تعداد فراخوانی بسیار پایین‌تر برای تخمین قابلیت اطمینان برای مسئله طراحی با تعداد قیود غیرخطی عملکرد بهینه‌تری خواهد داشت.

۲.۵. فرمول‌بندی مسئله طراحی

پس از مدل‌سازی موضوعات، جریان اطلاعات و داده‌ها میان موضوعات از طریق

جدول ۲. متغیرهای طراحی مرکزی.

متغیرهای طراحی اصلی	علامت	واحد	بازه تغییرات
ضخامت پوسته	t_{str}	m	$[0/0005 \ 0/015]$
ضخامت عایق	t_{TPS}	m	$[0/05 \ 0/12]$
ضرایب چند جمله‌ای چبیشف	$d_{chebyshev} \ i = 1, 2, 3, 4, 5$	-	$[0 \ 1]$

جدول ۳. متغیرهای طراحی فرعی.

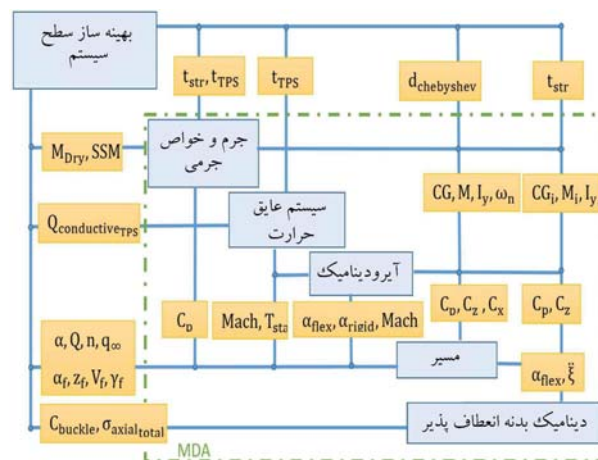
متغیرهای طراحی فرعی	علامت	واحد	بازه تغییرات
جرم تخمینی	m'	kg	$[1,510^4 \times 910^4]$
جرم تعمیم‌یافته تخمینی	M'_i	kg	$[10^5 \ 510^4 \times]$
مان دوم سطح تخمینی حول محور y	I'_y	$kg.m^2$	$[10^6 \times 710^6]$
فرکانس طبیعی تخمینی مود اول خمشی	ω'_n	Hz	$[16/8 \ 16/9]$
مرکز جرم تخمینی	x'_{CG}	m	$[18 \ 27]$
ماخ تخمینی در بار آیرودینامیکی ماکزیم	$Mach'_{n_{max}}$	-	$[8 \ 11]$
فشار دینامیکی تخمینی در بار آیرودینامیکی ماکزیم	$q'_{\infty n_{max}}$	Pa	$[450 \ 30000]$
شتاب مختصات تعمیم‌یافته تخمینی در بار آیرودینامیکی ماکزیم	$\xi'_{n_{max}}$	m/s^2	$[-5 \ 5]$
زاویه حمله بال دلتا در بار آیرودینامیکی ماکزیم	$\alpha'_{Delta-Wing n_{max}}$	degree	$[0 \ 27]$
زاویه حمله فین در بار آیرودینامیکی ماکزیم	$\alpha'_{Vertical-Fin n_{max}}$	degree	$[0 \ 27]$
بردار زاویه حمله بدنه در بار آیرودینامیکی ماکزیم	$\alpha'_{Flexible-Body n_{max}}$	degree	$[0 \ 27]$
مرکز فشار مینیمم تخمینی	$x'_{CP_{max}}$	m	$[32 \ 35]$
دمای استاتیکی تخمینی در نقطه ماکزیم حرارت جذب شده توسط عایق	$\theta'_{staticTPS_{max}}$	$^{\circ}C$	$[1000 \ 4600]$
ثابت تخمینی در نقطه ماکزیم حرارت جذب شده توسط عایق	$t'_{TPS_{max}}$	s	$[90 \ 300]$

متغیرهای موضوعی
سازه به‌مسیر

متغیرهای موضوعی
مسیر به سازه

و قیود تساوی به‌منظور همگرایی بین موضوعات به مسئله اعمال شده‌اند. متغیرها و پارامترهای طراحی شامل متغیرها و پارامترهای طراحی مطابق جدول ۲ و متغیرها و پارامترهای تخمینی مطابق جدول ۳ خواهند بود. متغیرها و پارامترهای تخمینی در واقع تخمین مقدار متناظر خروجی موضوعات دیگر و ورودی موضوع مدنظر هستند. در فاز بازگشت به اتمسفر، متغیرهایی مانند زاویه حمله و ارتفاع و پارامترهایی 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. در اینجا، متغیر ضریب برآ و پارامتر سرعت اولیه به‌عنوان منابع عدم قطعیت در موضوع مسیر انتخاب شدند. در موضوع سازه نیز خواص مربوط به مواد از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت شناختی و موضوعات مربوط به فرایند ساخت اغلب از نوع شانسی هستند. در این پژوهش، پارامترهای ضریب میرایی سازه و مدول یانگ و همچنین متغیر ضریب هدایت عایق (تابع دما) به‌عنوان پارامترهای عدم قطعیت‌دار شناختی سازه با توزیع نرمال انتخاب شده‌اند.

در مسئله طراحی مد نظر، متغیرهای عدم قطعیت‌دار بردارهایی به‌طول گام‌های زمانی شبیه‌سازی هستند. به همین جهت، متغیر موضوعی مانند ضریب برآ (خروجی آیرودینامیک و ورودی مسیر و سازه) به‌صورت یک ماتریس با تعداد ردیف کل گام‌های زمانی و تعداد ستون به اندازه تعداد قسمت‌بندی‌های بدنه انعطاف‌پذیر خواهد بود. در این حالت، ارزیابی قابلیت اطمینان برای متغیر عدم قطعیت‌دار در تعداد مشخصی نقطه در طول مسیر انجام شده و پس از ایجاد بردار جابه‌جایی، ضریب برآ و ضریب هدایت عایق در طول بهینه‌سازی در زمان‌های مختلف از طریق میان‌بایی به‌دست می‌آید. حلقه تحلیل قابلیت اطمینان برای ۱۱ قید عدم قطعیت‌دار شامل ۱۱ مسئله



شکل ۶. ماتریس طراحی ماهواره بر انعطاف‌پذیر.

ماتریس طراحی مشابه شکل ۶ به‌دست می‌آید. در ساختار طراحی یک سطحی IDF، متغیرهای کمکی در جهت تخمین داده‌های جریانی میان موضوعات عمل می‌کنند و به شکل قیود تساوی در بهینه‌ساز با مقدار متناظر خود برابر خواهند شد. در نهایت، فرمول‌بندی مسئله IDF مبتنی بر قابلیت اطمینان با ساختار سلسله‌مراتبی 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، λ_1 و λ_2 به‌ترتیب ضرایب جریمه قیود برای دو موضوع مسیر و سازه هستند. قیود نامساوی قیود مسئله طراحی

جدول ۴. نتایج مسئله بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی ماهواره بر.

تابع عملکرد	سازه	بازه متغیر/پارامتر	واحد	مقدار بهینه		
				RBMDO-NSGA-II	DMDO-NSGA-II	DMDO-PS
تابع عملکرد	سازه	-	Kg	۱۰۹۰۱۵،۱۱۱	۱۳۳۰۵۶،۷۱۹۶	$\times 1,55 \cdot 11 \cdot 10^5$
				۵۰۵۷۰۳،۹۰۳۶	۳۴۷۱۴۴،۴۲۲۳	$\times 2,2891 \cdot 10^5$
متغیر/پارامتر طراحی اصلی	ضرایب چندجمله‌ای چبیشف	[۰ ۱]	-	۰،۷۳۶۰۳	۰،۷۷۱۱	۰،۸۸۴۴
				۰،۱۹۰۹۲	۰،۱۳۶۰۴	۰،۰۰۰۱
				۰،۷۸۱۳۶	۰،۷۴۷۳۶	۰،۹۹۹۹
				۰،۲۴۲۲۶	۰،۲۰۲۷۶	۰،۰۳۷۴
				۰،۳۷۴۴۶	۰،۳۶۷۳۱	۰،۹۶۴۹۴
				۰،۰۰۷۹۳۹۳	۰،۰۱۱۳۶	۰،۰۱۲۰
تعداد تکرار حلقه اصلی	تعداد فراخوانی تابع هدف	-	-	۴	۹	۶
				۱۳۸۰	۳۱۰	۱۲۱۰

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

$$\min_{(u_{c_s}, u_E^{(i)}, u_{C_{z_{flex}}})} \frac{S_y}{n_{SF}} - \sigma_{axial_{total}} \left(\begin{array}{c} \mu_{C_{z_{flex}}} + u_{C_{z_{flex}}} \sigma_{C_{z_{flex}}}, \\ \xi \left(\begin{array}{c} \mu_{c_s} + u_{c_s} \sigma_{c_s}, \mu_{C_{z_{flex}}} \\ u_{C_{z_{flex}}} \sigma_{C_{z_{flex}}}, \\ \omega_n (\mu_E + u_E^{(i)} \sigma_E) \end{array} \right) \end{array} \right)$$

$$S.T : \sqrt{u_{C_{z_{flex}}}^T + u_{c_s}^T + u_E^{(i)T}} = \beta \quad (40)$$

۶. نتایج

بهینه‌سازی مسئله طراحی توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب^{۲۲} انجام شده است. نتایج با مسئله معین و الگوریتم گرادیان پایه Patternsearch مقایسه شده است. با مقایسه مسئله معین با دو الگوریتم گرادیان - پایه و ژنتیک کاهش محسوس هزینه محاسباتی در تعداد فراخوانی تابع هدف در الگوریتم ژنتیک 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 گرادیان پایه در موضوع سازه در شکل ۸ در رسیدن به پاسخ بهینه سراسری مشهود است. به همین دلیل، در بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده با چندین اکستریم 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. درواقع، طرح ارائه شده توانسته در توزیع احتمالی تعریف شده برای پارامترها و متغیرهای عدم قطعیت‌دار سازه، مختصات قابلیت اطمینان مد نظر را بدون صرف هزینه بیشتری به‌دست آورد. یکی از مهم‌ترین عدم قطعیت‌های مسئله طراحی مسیر، سرعت اولیه است. به‌ازای هر قید وابسته به سرعت (شکل ۹)، نمودار سرعت با سرعت اولیه

بهینه‌سازی با ساختار IDF خواهد بود:

$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} -Q(\mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i}) + Q_{\max} \quad (30)$$

$$S.T : u_{V_i}^{(i)} = \beta$$

$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} -q_{\infty}(\mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i}) + q_{\infty \max} \quad (31)$$

$$S.T : u_{V_i}^{(i)} = \beta$$

$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} -|V(t_f, \mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i}) - V_f| + \delta_{V_f} \quad (32)$$

$$S.T : u_{V_i}^{(i)} = \beta$$

$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} -|\gamma(t_f, \mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i}) - \gamma_f| + \delta_{\gamma_f} \quad (33)$$

$$S.T : u_{V_i}^{(i)} = \beta$$

$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} -|z(t_f, \mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i}) - z_f| + \delta_{z_f} \quad (34)$$

$$S.T : u_{V_i}^{(i)} = \beta$$

$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} -|\alpha(t_f, \mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i}) - \alpha_f| + \delta_{\alpha_f} \quad (35)$$

$$S.T : u_{V_i}^{(i)} = \beta$$

$$\min_{(u_{C_{TPS}})} Q_{allowable} - Q_{TPS}(\mu_{C_{TPS}} + u_{C_{TPS}} \sigma_{C_{TPS}}) \quad (36)$$

$$S.T : u_{C_{TPS}} = \beta$$

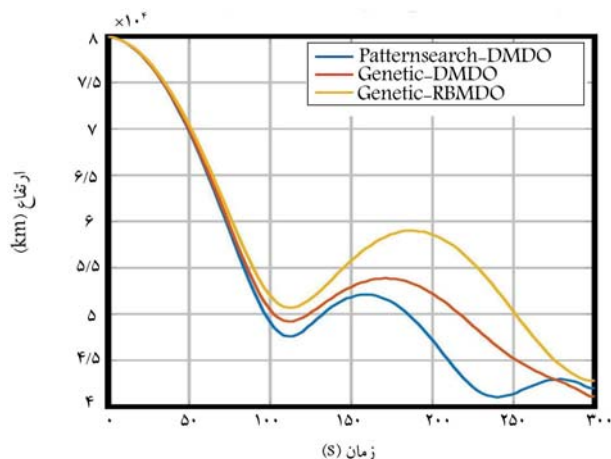
$$\min_{(u_{V_i}^{(i)}, u_{C_{z_{rigid}}})} n_{load} - n_{load} \left(\begin{array}{c} \mu_{C_{z_{rigid}}} + u_{C_{z_{rigid}}} \sigma_{C_{z_{rigid}}}, \\ \mu_{V_i} + u_{V_i}^{(i)} \sigma_{V_i} \end{array} \right)$$

$$S.T : \sqrt{u_{C_{z_{rigid}}}^T + u_{V_i}^{(i)T}} = \beta \quad (37)$$

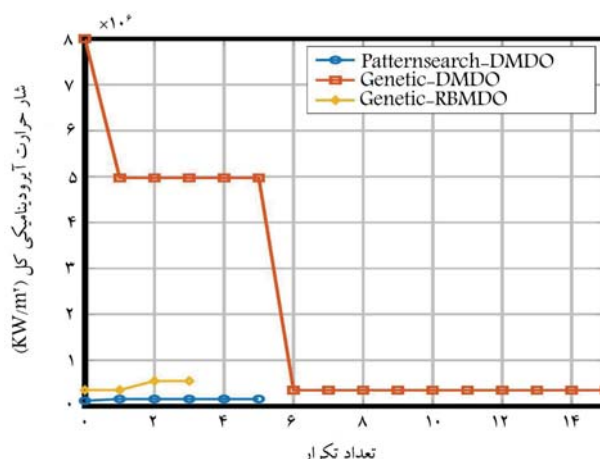
$$\min_{(u_E^{(i)})} -C_{buckle} + R_{buckle} \left(\begin{array}{c} \mu_E + u_E^{(i)} \sigma_E, \sigma_{bending} \\ \sigma_{axial}, t_{TPS_{opt}} \end{array} \right) \quad (38)$$

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

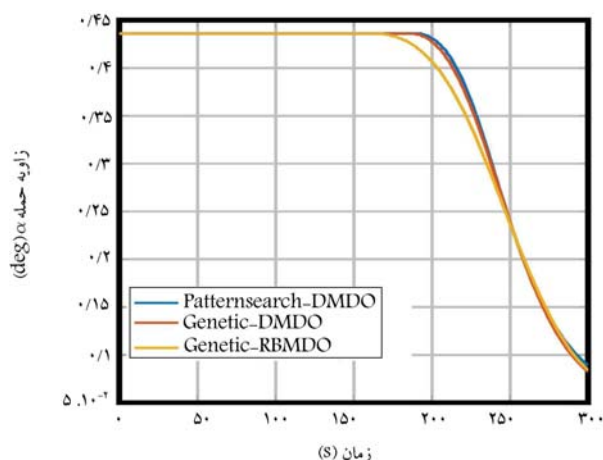
$$\min_{(u_{V_i}^{(i)})} \frac{x_{CP}(\mu_{V_i}^{(\lambda)}) - x_{CG}}{L} - SSM$$



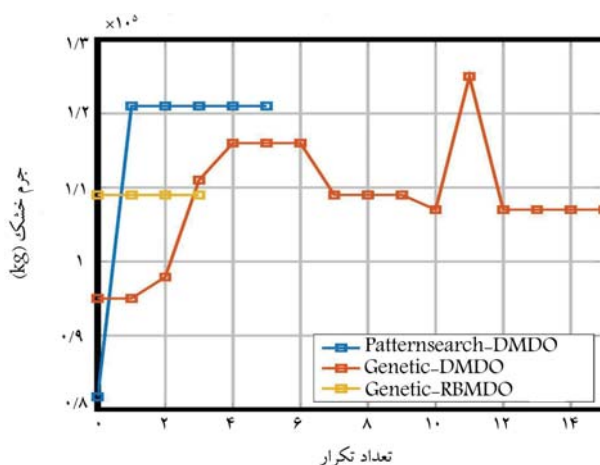
شکل ۱۰. نمودار مسیر بازگشت ماهواره‌بر.



شکل ۷. نمودار همگرایی نرخ حرارت آیرودینامیکی کل.



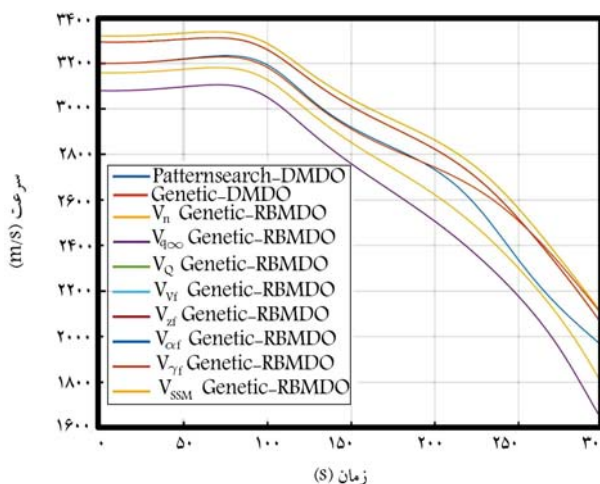
شکل ۱۱. نمودار زاویه حمله در مرکز جرم ماهواره‌بر.



شکل ۸. نمودار همگرایی جرم خشک.

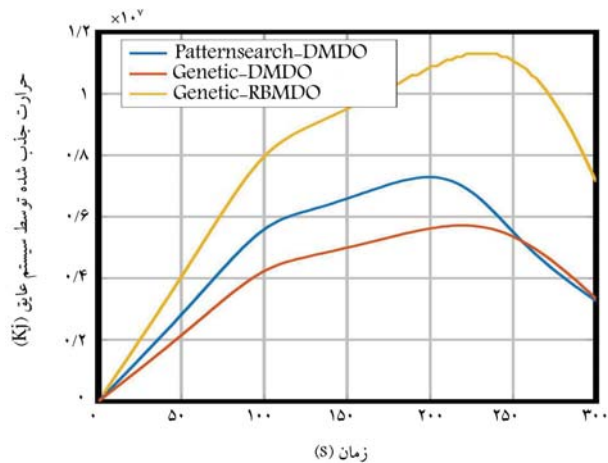
افزایش جرم کل پرتاب می‌گردد. همانطور که در نمودار ارتفاع شکل ۱۰ مشخص شده است، با کاهش ارتفاع برای ارضای قیود فشار دینامیکی، ضریب بار و حرارت آیرودینامیکی با وجود عدم قطعیت در سرعت، پیک ارتفاع مشاهده شده است. در نمودار زاویه حمله شکل ۱۱ نیز تطابق بالای مسئله معین و نامعین عدم وجود عدم قطعیت را در پارامترهای 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 آیرودینامیکی (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 آیرودینامیکی بر هم منطبق هستند. اما ضریب بار علاوه بر ارتفاع و سرعت به برآ (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 مینیم‌سازی 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 ماهواره‌بر نوسانات ناشی از اعطاف‌پذیری با وجود مدل‌سازی عدم قطعیت در پارامترهای مرتبط، قابل مقاوم‌سازی بوده و مشکلات مربوط به ناپایداری استاتیکی و یا دینامیکی در سازه

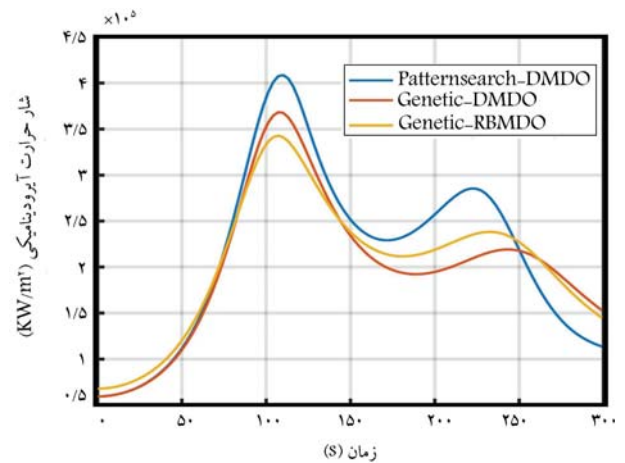


شکل ۹. نمودار سرعت ماهواره‌بر در طول مسیر بازگشت.

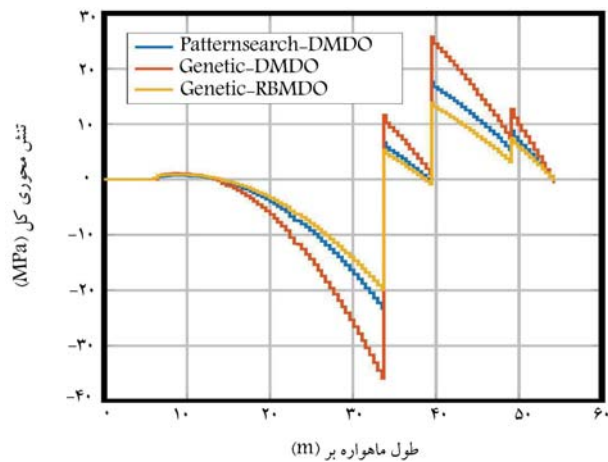
متفاوت به‌منظور دستیابی به قابلیت اطمینان معین شده برای قید، وجود خواهد داشت. کاهش زیاد سرعت اولیه ورود به جو در بعضی قیود به معنی مصرف سوخت بیشتر برای کاهش سرعت ماهواره‌بر قبل از رسیدن به ارتفاع ۸۰ کیلومتری است. این شرایط منجر به ایجاد هزینه بالا برای سیستم پيشران چه از نظر سوخت و چه از نظر



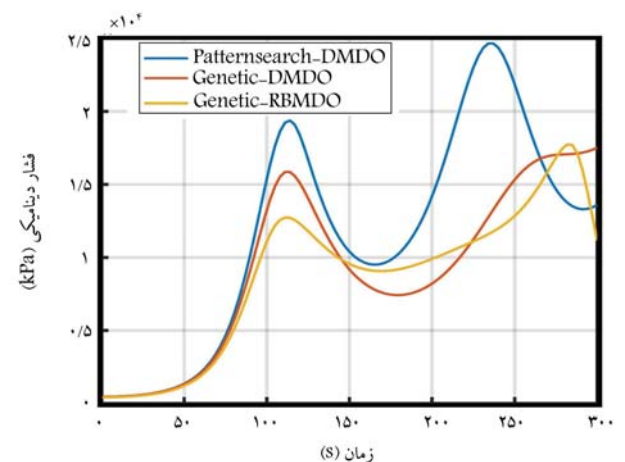
شکل ۱۵. نمودار حرارت جذب شده از طریق هدایت توسط عایق.



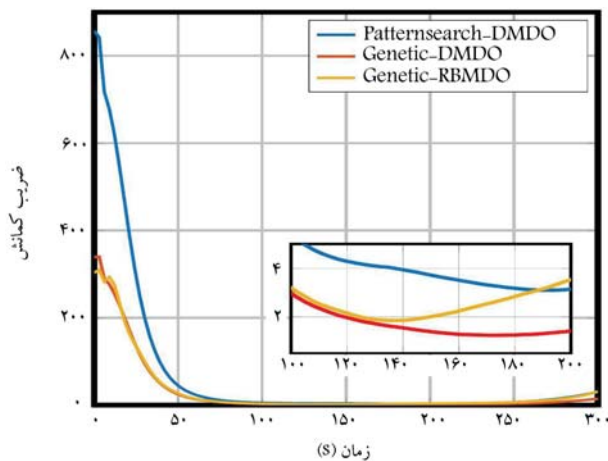
شکل ۱۲. نمودار حرارت آیرودینامیکی در طول مسیر بازگشت ماهواره بر.



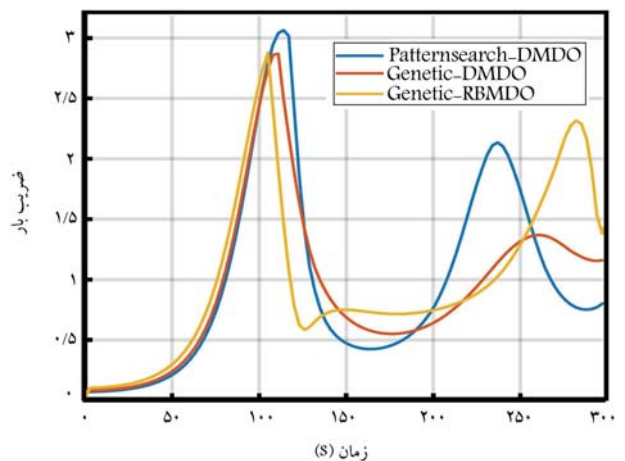
شکل ۱۶. نمودار تنش در حداکثر فشار دینامیکی در طول ماهواره بر.



شکل ۱۳. نمودار فشار دینامیکی در طول مسیر بازگشت ماهواره بر.



شکل ۱۷. نمودار ضریب کماتش محوری کل در طول مسیر بازگشت.

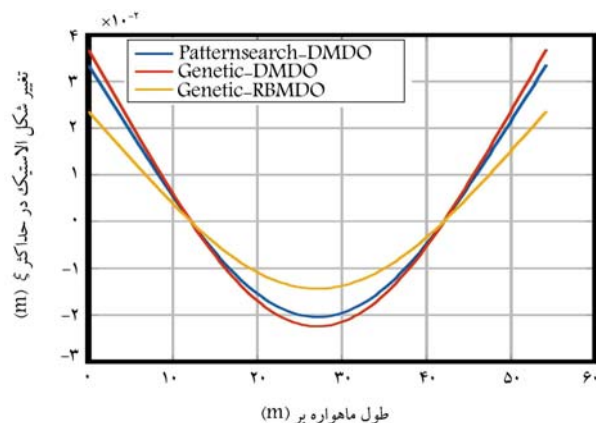


شکل ۱۴. نمودار ضریب بار در طول مسیر بازگشت ماهواره بر.

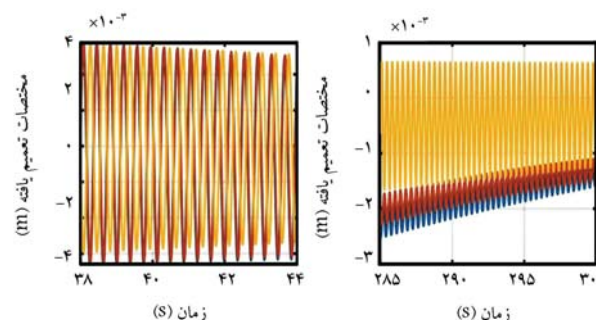
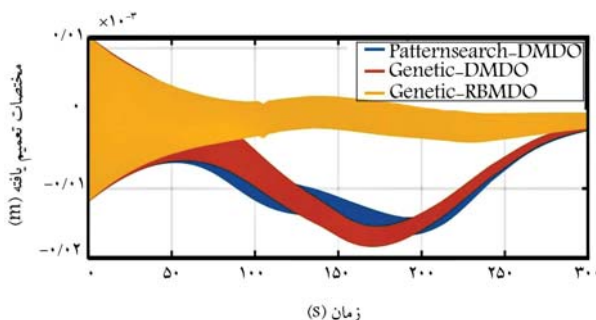
در نمودار تنش و کماتش مشهود است. افزایش عدم قطعیت در پارامتر مدول یانگ در قید کماتش و تنش و یا ضریب میرایی سازه و ضریب برآ انعطاف پذیر در قید تنش، مشکلات همگرایی در بازه تعریف شده برای ضخامت پوسته (متغیر طراحی) را به دنبال خواهد داشت. در مورد خواص انعطاف پذیری در مسئله طراحی، مدول یانگ از طریق فرکانس

و دینامیک بدنه انعطاف پذیر وجود نداشته است. موضوع مهم در این نتیجه گیری، 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 نتیجه گیری کلی در این زمینه می تواند فاقد دقت کافی باشد. همچنین، در نمودار شکل های ۱۶ و ۱۷ عدم نیاز به هزینه ساخت بیشتر در طراحی نامعین

x_i : متغیر طراحی موضوع i ام؛
 y_{ij} : متغیر موضوعی خروجی موضوع j ام و ورودی موضوع i ام؛
 q : نرخ زاویه پیچ ماهواره بر؛
 p : نرخ زاویه رول ماهواره بر؛
 α_0 : زاویه حمله صلب؛
 ξ_1 : مختصات تعمیم‌یافته در راستای محور z ؛
 ω_{n1} : فرکانس طبیعی مود خمشی اول؛
 η_1 : مختصات تعمیم‌یافته در راستای محور y ؛
 m : جرم ماهواره بر؛
 M_1 : جرم تعمیم‌یافته ماهواره بر؛
 φ_1 : شکل مود خمشی اول در راستای محور z ؛
 M : ماک؛
 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 آیرودینامیکی؛
 F_C : نیروی کنترلی؛
 M_C : ممان کنترلی حول محور y ؛
 CI_α : مشتق استاتیکی ضریب برآ؛
 δ_z : تغییر شکل الاستیک در راستای محور z ؛
 $Q_{S_{max}}$: حداکثر نرخ حرارت آیرودینامیکی مجاز؛
 $\rho Q_{s_{max}}$: چگالی متناظر با حداکثر نرخ حرارت آیرودینامیکی مجاز؛
 $q_{\infty \max}$: حداکثر فشار دینامیکی مجاز؛
 $\rho q_{\infty \max}$: چگالی متناظر با حداکثر فشار دینامیکی مجاز؛
 $\sigma_{bending}$: 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 ماهواره بر؛
 c : بیشترین فاصله از مرکز مقطع ماهواره بر؛
 σ_{crp} : کماتش فشاری بحرانی؛
 σ_{crb} : کماتش خمشی بحرانی؛
 C_{buckle} : ضریب کماتش کل؛
 t_{TPS} : ضخامت عایق؛
 $C_{conductivity}$: ضریب هدایت عایق؛
 \dot{q}_c : نرخ گرمای هدایت داخل عایق در هر لحظه؛
 $Q_{conductiveTPS}$: شار حرارت کل از نوع هدایت در عایق.



شکل ۱۸. نمودار تغییر شکل الاستیک در ماکزیمم مختصات تعمیم‌یافته.



شکل ۱۹. نمودار مختصات تعمیم‌یافته.

طبیعی و ضریب میرایی سازه بر متغیر مختصات تعمیم‌یافته و در نتیجه بر تغییر شکل الاستیک ماهواره بر انعطاف‌پذیر مطابق شکل ۱۸ اثر گذار 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 علائم

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

پانوشته‌ها

1. Automation

2. Multidisciplinary Design Optimization (MDO)
3. Most Probable Point (MPP)
4. Reliability Index Approach (RIA)
5. Performance Measure Approach (PMA)

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)
10. Balling, R. J. and Sobieszczanski-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 Chrette, 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. Sobieszczanski-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).

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 propland 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>.

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.res.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 Mahadevan, 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. Aeroservoelastic modeling and analysis of supersonic agile flight vehicle at high angle of attack, Diss. Amirkabir University of Technology [In Persian].
34. Sushnigdha, 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 radar 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

مهدی مجاهدی* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مجیدرضا آیت‌اللهی (استاد)

محمد مجاهدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوری ۴۰، شماره ۱، ص. ۷۵-۸۴، (پژوهشی)

در این مقاله، ناپایداری و کمانش ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی در میکروورق‌های متخلخل تحت میدان الکترواستاتیک از طریق تئوری کوپل تنش 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 کمانش حاصل از نمودارهای روش گالرکین مقایسه و درصد خطای این روش بررسی می‌گردد. در بخش نتایج، تفاوت تئوری‌های کلاسیک و غیرکلاسیک مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای نظریه غیرکلاسیک و نسبت تخلخل بر جابجایی، 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 برحسب تغییرات نسبت تخلخل به دست می‌آید.

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

۱. مقدمه

ورق‌ها، عضو بسیار مهمی از سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیک رایج در حسگرها و عملگرها هستند که در این مجموعه‌ها، به عنوان المان اصلی انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری و انجام عملی خاص مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.^[۱] مواد متخلخل، ترکیبی 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 پیشرفته 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 ۱۴۰۱/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۲/۲۰، پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۳.

استناد به این مقاله:

مجاهدی، مهدی، آیت‌اللهی، مجیدرضا، و مجاهدی، 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)، صص. ۷۵-۸۴. DOI:10.24200/J40.2023.61768.1673

تنش‌های نرمال و برشی وابسته به زمان را که توسط بار دینامیکی القاء می‌شود، محاسبه نمودند. آنها از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه بالا (با در نظر حرکات کوپل شده) در به دست آوردن معادله حرکت بهره‌گرفته و اثرات تداخل را در پاسخ دینامیک مطالعه کردند. در پژوهش سعید و همکاران،^[۱۸] ارتعاشات آزاد میکروتیر ساندویچی با هسته متخلخل و ورق‌های تقویت شده نانو لوله کربنی مدرج تابعی روی بستر وینکلر - پاسترناک بررسی گردیده است. آنها تیر را تحت بار حرارتی در نظر گرفته و مولفه‌های جابجایی را براساس تئوری تغییر شکل برشی سینوسی بیان نمودند. اثرات مقیاس با توجه به تئوری کوپل تنش اصلاحی لحاظ گردیده است. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش تداخل فرکانس کاهش می‌یابد.

در گذشته به منظور تحلیل و شبیه‌سازی سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیک از دو روش دینامیک مولکولی و روش مکانیک محیط پیوسته استفاده می‌شد. روش دینامیک مولکولی معمولاً نیاز به زمان محاسبات 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 شبیه‌سازی رفتار مکانیکی میکرو/نانو سازه‌ها انجام شده است. نظریه‌های گرا دیان کرنش، کوپل تنش و همچنین کوپل تنش اصلاحی از جمله تئوری‌های معتبری می‌باشند که در سالیان گذشته برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی سازه‌های میکرو مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این بین نظریه کوپل تنش اصلاحی به دلیل دقت نسبتاً مناسب و سادگی اعمال در مدل‌سازی با اقبال بیشتری مواجه گردیده است.^[۱۲-۱۸] در این تئوری، انرژی کرنشی به صورت تابعی از تانسور انحنا و تانسور کرنش آمده است. در تئوری کوپل تنش 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 جابه‌جایی و تنش را در همسایگی یک نقطه بیان می‌کند. در فرمول کوپل تنش اصلاحی، از روابط تعادلی نیروها و گشتاور نیروها استفاده می‌شود.^[۱۹]

فورجان 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 کلون - ویت شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم غیرکلاسیک و شرایط مرزی میکرو صفحه حلقوی وابسته به اندازه با افزودن گرا دیان چرخش متقارن و تانسورهای تنش مرتبه بالاتر به انرژی کرنش به دست می‌آیند. معادلات حاکم غیرکلاسیک، با استفاده از روش مربعات دیفرانسیل تعمیم یافته برای شرایط مرزی مختلف حل می‌شوند. آنها نشان دادند که افزایش پارامتر ویسکوالاستیک نمی‌تواند تغییری در فرکانس دیسک ایجاد کند.

آرشید و همکاران^[۲۱] ارتعاش آزاد و کماتش مکانیکی یک میکروتیر سه لایه را که تحت بار مغناطیسی لورنتس در بستر ویسکوالاستیک قرار گرفته است، را با استفاده از تئوری کوپل تنش اصلاحی بررسی نمودند. اثر محیط حرارتی بر خواص مکانیکی در نظر گرفته شده، و 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 کماتشی بحرانی با افزایش زاویه باز شدن مرکزی کاهش یافته و افزایش ضریب، تداخل، مقادیر ذکر شده را کاهش داده است.

در پژوهش زندکریمی و همکاران،^[۲۲] کماتش حرارتی و رفتار پس‌کمانش وابسته به اندازه یک میکروصفحه مدور تابعی مدرج تحت میدان افزایش دمای یکنواخت و شرایط مرزی گیردار بررسی شده است. معادلات تعادل و شرایط مرزی براساس تئوری کوپل تنش اصلاحی، نظریه صفحه کلاسیک و ترم غیرخطی فون کارمان به دست

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

شاهرخی و همکاران^[۲۳] یک تابع گرین برای تحلیل خمشی میکرو صفحات تحت یک بار نامتقارن پیشنهاد دادند و با در نظر گرفتن اثر مقیاس طول، از نظریه کوپل تنش اصلاحی استفاده کردند. معادله تعادلی وابسته به ابعاد میکروصفحه دایره‌ای تحت بار غیرمحوری با استفاده از حداقل اصل انرژی پتانسیل کل به دست آمده و نشان داده شده است، که مقیاس طولی تأثیر معنی‌داری بر خمش میکرو صفحات دارد. سیمسک و همکاران^[۲۴] خمش استاتیکی و ارتعاش اجباری یک میکرو صفحه مدرج تابعی حامل بار متحرک را براساس نظریه صفحه میندین 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 تداخل و هندسه تداخل، پارامتر مقیاس طول و سرعت بار متحرک بر پاسخ‌های دینامیکی بررسی شده است.

براتی و شاهوردی^[۲۵] رفتار ارتعاشی نانو صفحات سیلیکونینانو کریستالی دولایه را که بر روی پایه وینکلر پسترنک 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 همپلتون در چارچوب مدل صفحه‌ای دومتغیره بهبود یافته 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 برشی مرتبه اول و تئوری کوپل تنش اصلاحی برای دستیابی به معادلات حاکم استفاده کردند. شریفی نسب و مجاهدی^[۲۷] پاسخ دینامیکی و ارتعاشات غیرخطی یک میکرو رزوناتور حاوی یک میکروپل با جرم گواه واقع در وسط را بر مبنای تئوری کوپل تنش اصلاحی بررسی نمودند. جرم گواه میکرو رزوناتور توسط میدان الکترواستاتیکی به گونه‌ای تحریک می‌شود که با اعمال یک ولتاژ مستقیم موقعیت تعادل خاصی پیدا می‌کند و سپس تحت ولتاژ متناوب به لرزش در می‌آید. با اتخاذ تئوری کوپل تنش اصلاح شده و در نظر گرفتن تحریک الکترواستاتیکی، معادله دینامیکی حرکت با استفاده از اصل همپلتون 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 میکروورق‌های نازک، مائو و همکاران^[۲۸] یک المان ورق مثلثی سه گره‌ای ناسازگار را با استفاده از اصل لاگرانژ - دالامبر به دست آوردند. مسیبی و همکاران^[۲۹] انتشار موج را در میکروورق‌های ساندویچی ویسکوالاستیک توسط نظریه زیگزاگ اصلاح شده و تئوری کوپل تنش اصلاحی بررسی نمودند. سازه متشکل از هسته کامپوزیتی تقویت شده گرافیتی و لایه‌های پیزوالکتریک به عنوان حسگر و محرک 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 ویسکوالاستیک سازه با مدل کلون - ویت شبیه‌سازی شده است. شیائوم و همکاران^[۳۰] راه‌حلی عددی برای پایداری و یافتن فرکانس نانو صفحه مستطیلی ساخته شده از مواد الکتریکی انجام داده‌اند. برای مدل‌سازی عوامل وابسته به اندازه سیستم‌های نانو الکترومکانیکی پیزوالکتریک، نظریه کوپل تنش اصلاحی با یک پارامتر مقیاس طول و یک عامل غیرموضعی ارائه شده است. در این پژوهش،

تعیین می‌گردد. در تئوری کوپل تنش اصلاحی که اولین بار توسط یانگ معرفی شده، انرژی کرنش، تابعی از هر دو تانسور کرنش مربوط به تانسور تنش و انحنا مربوط به تانسور کوپل تنش است؛ بنابراین، انرژی کرنش U_s برای یک میکروورق الاستیک خطی با حجم V به صورت زیر نوشته می‌شود: [۲۱]

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

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

در رابطه ۲، ε_{ij} تانسور کرنش، σ_{ij} تانسور تنش، χ_{ij} تانسور متقارن انحنا و m_{ij} تانسور عرضی تنش کوپل بوده و طبق دسته روابط زیر محاسبه می‌شوند: [۲۲]

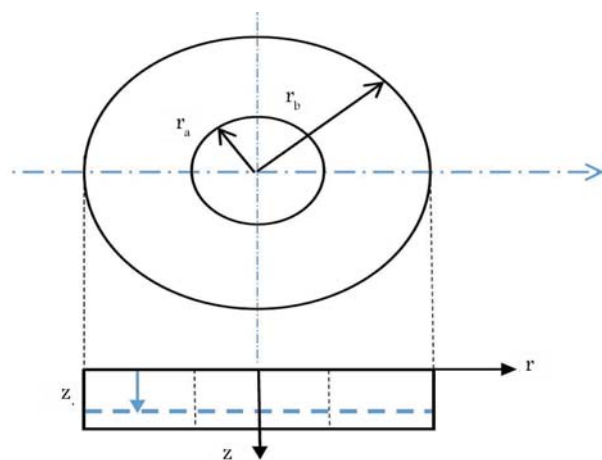
$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{V} (u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \\ \chi_{ij} &= \frac{1}{V} (\theta_{i,j} + \theta_{j,i}) \\ m_{ij} &= 2\mu l^2 \chi_{ij} \\ \theta &= \frac{1}{V} \text{curl}(\vec{u})_i \end{aligned}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

که u بردار جابه‌جایی، δ_{ij} دلتای کرونکر، l پارامتر مقیاس طول، θ بردار چرخش و λ 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 الاستیسیته با توجه به پارامتر تخلخل تغییر می‌کند. در شکل ۲، یک ورق متخلخل را که دارای 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 مدل‌سازی سیستم مختصات استوانه‌ای (z, θ, r) همان‌طور که نشان داده شده است اتخاذ می‌شود.

با توجه به تقارن محوری در هندسه، بارگذاری و قیود تکیه گاهی، 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 مد غالب است، در پاسخ اثر می‌گذارند. بنابراین می‌توان از اثر مدهای نامتقارن صرف‌نظر نمود و پاسخ مسئله را با توجه به فرضیات متقارن محوری به دست آورد.



شکل ۲. میکرو ورق متخلخل.

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 ثابت، در مدل‌سازی و تعیین معادلات حاکم لحاظ می‌گردد. در محاسبه تغییر شکل ورق و تنش‌های آن، با توجه به ابعاد سازه، از تئوری کوپل تنش اصلاحی که مورد توجه گسترده محققان در سال‌های اخیر بوده است، استفاده می‌شود. در مدل‌سازی، 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، کماتش مورد توجه قرار گرفته و بار کماتش در حضور میدان الکترواستاتیک (اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی) محاسبه می‌شود.

۲. مدل‌سازی و حل مسئله

۲.۱. معادلات حاکم بر مسئله

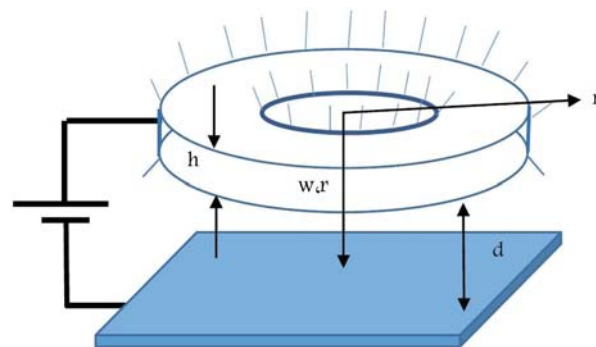
ورق به صورت توخالی با شعاع داخلی r_a و شعاع خارجی r_b در نظر گرفته می‌شود که از دو طرف گیردار است و تحت خیز $w(r, \theta)$ قرار دارد. برای تعیین پاسخ، تحلیل ناپایداری و کماتش، ابتدا معادلات با استفاده از روش‌های انرژی، تعیین می‌شود. در شکل ۱ نمایی از یک میکرو ورق تحت میدان الکترواستاتیک نشان داده شده 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: [۶]

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

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

در این بخش، معادلات دیفرانسیل حرکت از طریق تئوری کوپل تنش اصلاحی



شکل ۱. میکرو ورق تحت میدان الکترواستاتیک.

در مدل حاضر، به دلیل نازک بودن ورق، از نظریه ورق کلاسیک استفاده می‌شود، این نظریه گسترش یافته تئوری تیر اویلر برنولی برای ورق می‌باشد. بنابراین، طبق ورق کلاسیک، میدان جابجایی برای مسئله متقارن محوری را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} u_r(r) &= -(z - z_0) \frac{dw(r)}{dr}, \\ u_\theta(r) &= 0, u_z(r) = w(r) \end{aligned} \quad (5)$$

$w(r)$ جابجایی عرضی یک نقطه دلخواه است. با توجه به میدان جابجایی تعریف شده توسط معادله ۵، اجرای کرنش و تانسور انحنای متقارن را می‌توان با استفاده از روابط ۶ به دست آورد.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= (z - z_0) \varepsilon_{rr}^1 = -(z - z_0) \frac{d^2 w}{dr^2}, \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= (z - z_0) \varepsilon_{\theta\theta}^1 = -\frac{(z - z_0)}{r} \frac{dw}{dr}, \\ \varepsilon_{zz} &= \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{\theta z} = \varepsilon_{r\theta} = 0 \\ \chi_{r\theta} &= \chi_{\theta r} = \frac{1}{r} \left(-\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right), \\ \chi_{rr} &= \chi_{\theta\theta} = \chi_{zz} = \chi_{rz} = \chi_{\theta z} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

حال اجرای تنش کلاسیک و مرتبه بالاتر آن را می‌توان از طریق رابطه زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{rr} + \nu \varepsilon_{\theta\theta}) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\nu \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta}) \\ m_{r\theta} &= m_{\theta r} = 2\mu l^2 \chi \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$z_0 = \frac{\int_0^h E(z) z dz}{\int_0^h E(z) dz} \quad (8)$$

در ادامه، ممان‌های خمشی و ممان حاصل از کوپل تنش از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} M_{rr} &= \int_0^h \sigma_{rr} (z - z_0) dz \\ M_{\theta\theta} &= \int_0^h \sigma_{\theta\theta} (z - z_0) dz \\ \bar{M}_{r\theta} &= \int_0^h m_{r\theta} dz \end{aligned} \quad (9)$$

با جایگزینی تنش‌ها و کرنش‌ها با میدان جابجایی مطابق با رابطه ۶، روابط ۱۰ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} M_{rr} &= \left[-D_{11} \frac{d^2 w}{dr^2} - \frac{D_{12}}{r} \frac{dw}{dr} \right] \\ M_{\theta\theta} &= \left[-D_{12} \frac{d^2 w}{dr^2} - \frac{D_{11}}{r} \frac{dw}{dr} \right] \\ \bar{M}_{r\theta} &= D_m \left(-\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} D_{11} &= \int_0^h \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) (z - z_0)^2 dz \\ D_{12} &= \int_0^h \left(\frac{E\nu}{1-\nu^2} \right) (z - z_0)^2 dz \\ D_m &= \int_0^h G l^2 dz \end{aligned} \quad (11)$$

با توجه به مقادیر به دست آمده تنش‌ها و کرنش‌های کلاسیک و مرتبه بالاتر، می‌توان انرژی کرنشی را با توجه به جبر تانسوری به دست آورد:

$$U = \int_V \frac{1}{2} [(\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + m_{ij} \chi_{ij})] dV \quad (12)$$

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

بنابراین، مطابق با رابطه فوق و تفکیک انتگرال‌های وارد بر سطح و ضخامت، تغییرات انرژی پتانسیل محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_A \int_0^h [\sigma_{rr} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{rr}^1] \\ &+ \sigma_{\theta\theta} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{\theta\theta}^1] + \sigma_{zz} (\delta \varepsilon_{zz}) \\ &+ 2m_{r\theta} (\delta \chi_{r\theta})] dz r dr d\theta \end{aligned} \quad (13)$$

با در نظر گرفتن تقارن محوری، تغییرات انرژی پتانسیل کرنشی از طریق رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \delta U &= 2\pi \int_0^h [\sigma_{rr} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{rr}^1] \\ &+ \sigma_{\theta\theta} [(z - z_0) \delta \varepsilon_{\theta\theta}^1] + \sigma_{zz} (\delta \varepsilon_{zz}) \\ &+ 2m_{r\theta} (\delta \chi_{r\theta})] dz r dr \end{aligned} \quad (14)$$

و با در نظر گرفتن بار گسترده شعاعی تکیه‌گاهی $P(r)$ و بار گسترده عرضی الکترواستاتیک $q(r, \theta)$ و تقارن محوری، کار مجازی از طریق رابطه ۱۵ تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} \delta W &= 2\pi \int_0^h [-P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right) \delta \left(\frac{dw}{dr} \right) \\ &+ q(r, \theta) \delta w] r dr \end{aligned} \quad (15)$$

به طوریکه δw تغییرات خیز را نشان می‌دهد. با ساده‌سازی و استفاده از ممان‌های خمشی، انرژی کرنشی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^h [M_{rr} \delta \varepsilon_{rr}^1 + \frac{1}{r} M_{\theta\theta} \delta \varepsilon_{\theta\theta}^1 \\ &+ 2\bar{M}_{r\theta} \delta \chi_{r\theta}] dr \end{aligned} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن تغییرات کرنش و انحنای جابجایی عرضی، رابطه ۱۷ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^h \left[M_{rr} \delta \left(-\frac{d^2 w}{dr^2} \right) + \frac{1}{r} M_{\theta\theta} \right. \\ &\times \delta \left(-\frac{d^2 w}{dr^2} \right) + \bar{M}_{r\theta} \delta \left(-\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \left. \right] dr \end{aligned} \quad (17)$$

با ساده‌سازی و جایگزینی ممان‌های رابطه ۱۰ و لحاظ نمودن تقارن محوری در روابط ۱۵ و ۱۷، روابط زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \delta U &= 2\pi \left\{ -r M_{rr} \delta \left(\frac{dw}{dr} \right) \Big|_r + \frac{d(r M_{rr})}{dr} \delta w \Big|_r - M_{\theta\theta} \delta w \Big|_r \right. \\ &- r \bar{M}_{r\theta} \delta \left(\frac{dw}{dr} \right) \Big|_r + \frac{d(r \bar{M}_{r\theta})}{dr} \delta w \Big|_r + \\ &\bar{M}_{r\theta} \delta w \Big|_r + \int_0^h \left[-\frac{d^2 (r M_{rr})}{dr^2} + \frac{d(M_{\theta\theta})}{dr} \right. \\ &\left. \left. - \frac{d^2 (r \bar{M}_{r\theta})}{dr^2} - \frac{d(\bar{M}_{r\theta})}{dr} \right] \delta w dr \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \delta W &= 2\pi \left\{ -r P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right) \delta w \Big|_r \right. \\ &2\pi \int_0^h \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r P(r) \left(\frac{dw}{dr} \right)) \right. \\ &\left. + q(r) \right] \delta w r dr \end{aligned} \quad (19)$$

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

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

به منظور استفاده از رابطه فوق، ابتدا برای $\{a\}^1$ به عنوان حدس اول مقداری در نظر گرفته می‌شود و مطابق با رابطه ۲۶، بردار $\{F\}^1$ تعیین شده و طبق رابطه مذکور، مقدار $\{a\}^2$ تعیین می‌شود. این روند ادامه پیدا کرده تا بردار $\{a\}^m$ 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 کماتش، شیب منحنی جابجایی برحسب مقادیر a بسیار بزرگ می‌گردد^[۲۳] و این انتظار وجود دارد که پس از تکنیک 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 $\frac{d\eta}{da} = 0$ ($\eta = \hat{V}^2$) برقرار است. بنابراین، با فرایند مشتق‌گیری از معادلات و حل آنها می‌توان بار کماتش 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 ۳، به بررسی نتایج مستخرج از مدل‌سازی و حل پرداخته می‌شود.

در جدول ۱، مشخصات میکرو ورق ذکر گردیده است. بر همین مبنا جابجایی و پایداری مجموعه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل ۳ بر درصد تخلخل ۱۰، همگرایی بیشینه جابجایی، برحسب بار گسترده تکیه‌گاهی در یک ولتاژی بعد مشخص، $\hat{V} = 7$ برای تئوری کلاسیک بررسی گردیده است. با افزایش تدریجی بار، بیشینه جابجایی افزایش یافته تا این‌که در بار کماتش، شیب 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 ۴، برای مقادیر بی بعد $\hat{V} = 7$ ، $\hat{P} = -2$ و پارامتر بی بعد مقیاس طول $\hat{L} = 0.2$ و درصد تخلخل مورد اشاره، نمودار جابجایی برحسب موقعیت با استفاده از روش تحلیلی با در نظر گرفتن تقریب‌های مختلف برای تئوری کوپل تنش اصلاحی ترسیم شده است. در این نمودار و نمودارهای بیشینه جابجایی برحسب

جدول ۱. مشخصات ورق.

r_a	r_b	h	\hat{L}	E	ν
۰/۵	۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۱۵۰ (Gpa)	۰/۳۳

با استفاده از اصل کمینه‌سازی انرژی پتانسیل و جایگزینی گشتاورهای کلاسیک و غیرکلاسیک از رابطه ۱۰، معادله حرکت استاتیکی و شرایط مرزی به دست می‌آید:

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

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 بار گسترده عرضی با توجه به بار الکترواستاتیکی اعمال شده به ورق توسط رابطه ۲۲، تعیین می‌شود:

$$q(r) = -\frac{\varepsilon_0 V_d^2}{2(d-w)^2} \quad (22)$$

در رابطه فوق ε_0 ثابت گذردهی الکتریکی و V_d اختلاف پتانسیل مستقیم اعمالی بین ورق و الکتروود زیرین می‌باشد.

چنانچه در رابطه ۲۰، ضرایب مربوط به اثرات کوپل تنش و بار شعاعی اعمالی حذف گردد، همان معادله تغییر شکل استاتیکی ورق کلاسیک در میدان الکترواستاتیک به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} D_{11} \left[\frac{d^4 w}{dr^4} + \frac{1}{r} \frac{d^3 w}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} \right] \\ - \frac{\varepsilon_0 V_d^2}{2(d-w)^2} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

۲.۲. معادلات حاکم بر مسئله

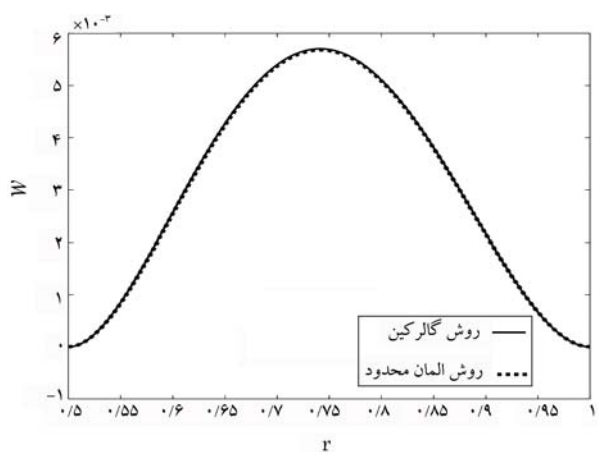
حال با در نظر گرفتن بار محوری تکیه‌گاهی و براساس معادلات به دست آمده، تغییر شکل ورق دایره‌ای در میدان الکترواستاتیک بر مبنای تئوری کوپل تنش اصلاحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا با استفاده از توابع تقریب، پاسخ ورق به صورت ترکیبی از توابع تقریب نوشته می‌شود:

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

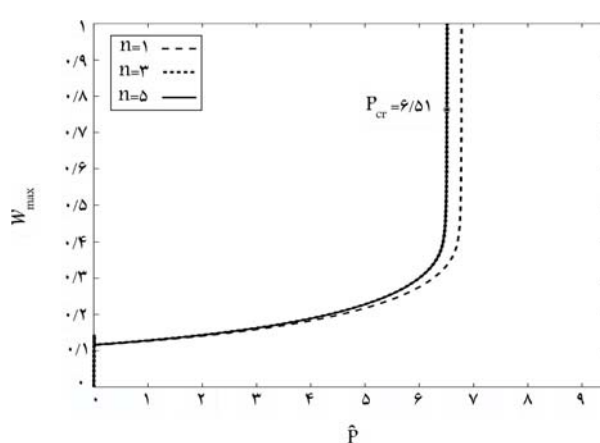
به طوریکه $\phi_i(r)$ توابع تقریبی هستند که شرایط مرزی را ارضا می‌نمایند. با توجه به تقارن محوری، از توابع شکل مود تیر دو سر درگیر که شرایط مرزی را ارضا می‌نمایند، استفاده می‌شود. که a_i ثابت مجهول ضریب هر تابع می‌باشد که با تعیین آنها، میزان جابجایی ورق در ولتاژهای مختلف محاسبه می‌گردد.

با جایگزینی رابطه ۲۴ در معادله دیفرانسیل تعادل رابطه ۲۰ و ضرب تابع وزنی و انتگرال‌گیری 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 ۲۵ بیان می‌شود:

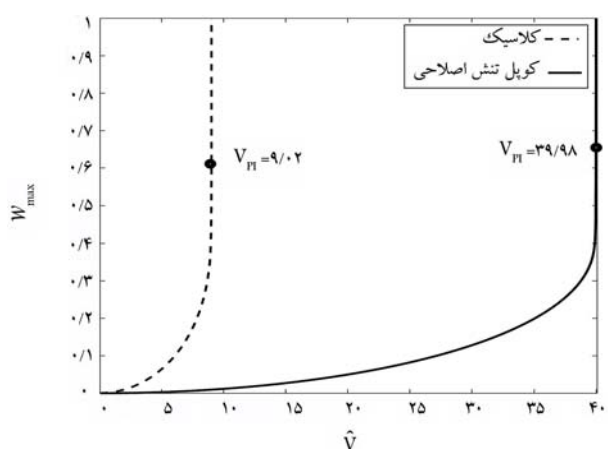
$$\begin{aligned} [K] \{a\} &= \{F(a_1, a_2, \dots)\} \\ K_{ij} &= \frac{1}{Eh^2} (D_{11} + D_m) \\ &\times \int_r \left[\frac{d^2 \phi_i}{d\hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{d^2 \phi_i}{d\hat{r}^2} - \frac{1}{\hat{r}^2} \frac{d^2 \phi_i}{d\hat{r}^2} \right. \\ &\left. + \frac{1}{\hat{r}^2} \frac{d\phi_i}{d\hat{r}}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



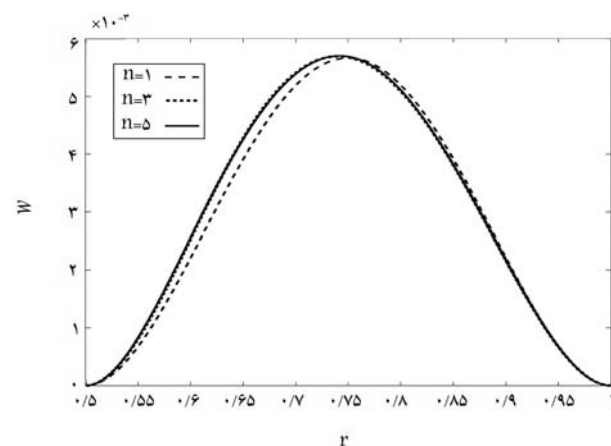
شکل ۶. همگرایی بیشینه جابجایی برحسب بار شعاعی تکیه‌گاهی برای تئوری کوپل تنش اصلاحی.



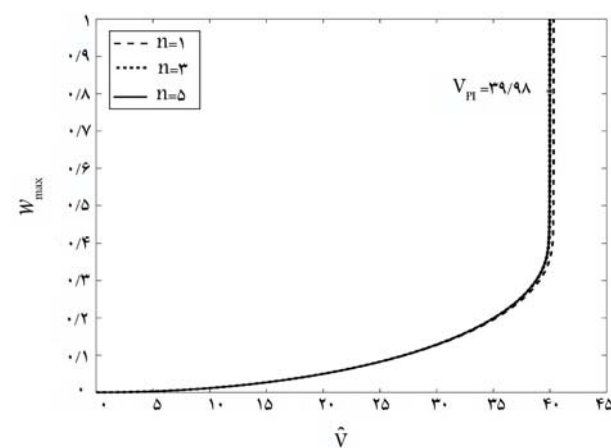
شکل ۳. همگرایی بیشینه جابجایی برحسب ولتاژ بی بعد برای تئوری کلاسیک.



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



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



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

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

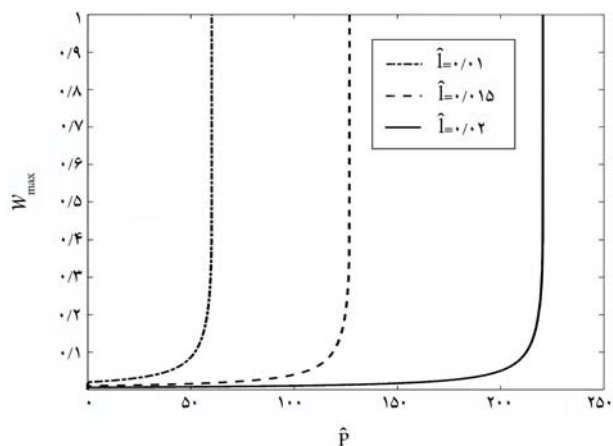
در شکل ۶ نتایج دو روش تحلیلی و المان محدود با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از روش تحلیلی بر مبنای روش گالرکین و با در نظر گرفتن 10° تابع تقریب نتایج به دست آمده و در روش المان محدود از 50° المان برای محاسبات بهره گرفته شده است. در محاسبات صورت گرفته، میزان ولتاژ و بار بی بعد $\bar{V} = 7, \bar{P} = -2$ و برای تئوری کوپل تنش اصلاحی میزان پارامتر مقیاس طول بی بعد برابر با $\hat{l} = 0.2^\circ$ در نظر گرفته شده است. نتایج در محدوده ناپایداری محاسبه گردیده است و یک تطابق بسیار خوب در نمودار جابجایی برحسب موقعیت (حتی در محدوده قله) در دو روش ملاحظه می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن 10° تابع تقریب در روش تحلیلی و 50° المان در روش المان محدود، امکان پیش‌بینی دقیقی از تغییر شکل سازه و بررسی دقیق ناپایداری کششی و کماتش 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 پرداخته می‌شود. در نمودار شکل ۷، بیشینه جابجایی برحسب 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

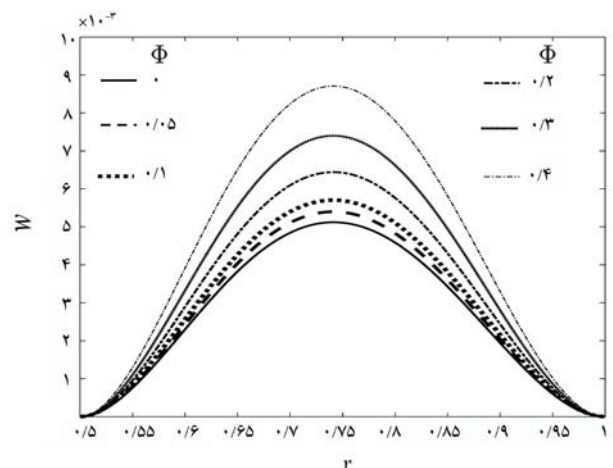
ولتاژ در شکل ۵ نیز ملاحظه می‌شود که در نظر گرفتن پنج تابع تقریب، می‌تواند منجر به همگرایی شود. به گونه‌ای که در بیشینه جابجایی‌های به دست آمده با استفاده از سه تابع تقریب و پنج تابع تقریب تفاوتی مشاهده نمی‌شود. همچنین، شکل مذکور نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، بیشینه جابجایی و شیب آن افزایش یافته تا 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. بار کماتش و ولتاژ ناپایداری کششی برای مقادیر مختلف پارامتر مقیاس طول بی بعد در تئوری کوپل تنش اصلاحی.

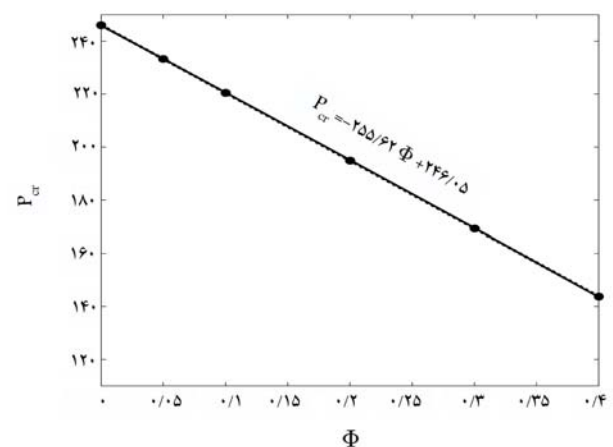
$\bar{l} = 0/02$		$\bar{l} = 0/015$		$\bar{l} = 0/01$		
همگرا	یک مود	همگرا	یک مود	همگرا	یک مود	
۲۲۰/۶	۲۲۸/۸	۱۲۷	۱۳۱/۶۲	۶۰/۱	۶۲/۲	P_{cr}
۳۹/۹۸	۴۰/۱۳	۳۰/۵۹	۳۰/۶۷۹	۲۱/۵	۲۱/۵	V_{PI}



شکل ۸. بیشینه جابجایی برحسب بار شعاعی در تئوری کوپل تنش اصلاحی برای مقادیر مختلف پارامتر مقیاس طول بی بعد.



شکل ۹. جابجایی برحسب موقعیت شعاعی در تئوری کوپل تنش اصلاحی برای مقادیر مختلف پارامتر نسبت تخلخل.



شکل ۱۰. بار کماتش برحسب میزان نسبت تخلخل.

سختی کوچکتر در تئوری کلاسیک می باشد که منجر به محاسبه جابجایی بزرگتر در این تئوری گردیده است. در این نمودار، تئوری کوپل تنش اصلاحی در مقایسه با تئوری کلاسیک، محدوده پایداری و ولتاژ ناپایداری بزرگتری را پیش بینی می نماید. به گونه ای که ولتاژ ناپایداری کششی در تئوری کوپل تنش اصلاحی $\hat{V}_{PI} = 39/97$ و در تئوری کلاسیک $\hat{V}_{PI} = 9/02$ می شود. بنابراین این مشاهدات، در مقیاس میکرو لزوم استفاده از تئوری کوپل تنش اصلاحی به جای تئوری کلاسیک را بر جسته می نماید. زیرا تئوری کلاسیک منجر به پیش بینی سختی و محدوده پایداری کوچکتر و جابجایی بزرگتر از مقدار واقعی می شود.

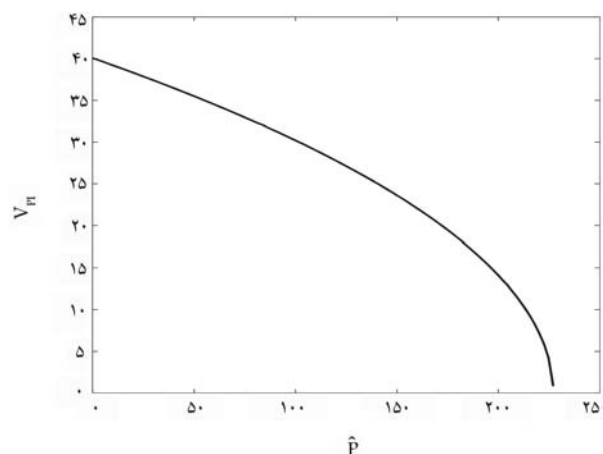
در ادامه با در نظر گرفتن پارامترهای $\hat{V} = 7$, $\hat{P} = -2$ ، محاسبات مربوط به تعیین جابجایی و بررسی پایداری برای مقادیر مختلف پارامتر بی بعد مقیاس طول انجام می پذیرد. این پارامتر بی بعد با ابعاد شعاعی نسبت عکس داشته و نقش اساسی و انحصاری در تأثیر تئوری کوپل تنش اصلاحی بر نتایج دارد و اگر این پارامتر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

در ادامه تأثیر تخلخل در بار کماتش و ولتاژ ناپایداری بررسی می شود. نتایج این بخش برای پارامتر مقیاس طول بی بعد $\bar{l} = 0/02$ و میزان ولتاژ و بار شعاعی بی بعد $\hat{V} = 7$, $\hat{P} = -2$ برای مقادیر مختلف درصد تخلخل استخراج گردیده است. در شکل ۹ تغییرات جابجایی بر حسب موقعیت برای نسبت های مختلف تخلخل و در شکل ۱۰ تغییرات بار کماتش بر حسب نسبت تخلخل محاسبه شده است. به دلیل کاهش سختی سازه، با افزایش نسبت تخلخل، میزان جابجایی افزایش می یابد و کاهش محدوده پایداری و بار کماتش رخ می دهد.

مطابق با جدول ۳، تغییرات بار کماتش بر حسب نسبت تخلخل به صورت خطی است و از رابطه $\hat{P}_{cr} = -255/662\Phi + 246/05$ تبعیت می کند. لازم به ذکر

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

Φ	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۰/۴
P_{cr}	۲۳۳/۲۳۵	۲۲۰/۵۷	۱۹۵/۱۲۵	۱۴۳/۵۶
V_{PI}	۴۱/۰۸	۳۹/۹۷۵	۳۷/۶۶	۳۲/۴۵۵



شکل ۱۱. ولتاژ ناپایداری بی بعد برحسب بار بی بعد.

است که منحنی بارکمانش برحسب نسبت تخلخل در مقایسه با رابطه ولتاژ ناپایداری نسبت تخلخل، به نمودار خطی نزدیک تر است. اما رابطه ولتاژ ناپایداری بر حسب نسبت تخلخل نیز با تقریب مناسبی از رابطه $\bar{V}_{PI} = -24/17\Phi + 42/312$ (با توجه به درون یابی انجام شده) پیروی می نماید.

در نمودار شکل ۱۱، ولتاژ ناپایداری کششی برحسب بار فشاری تکیه گاهی بی بعد محاسبه گردیده است. همان گونه که نتایج نشان می دهد، با افزایش بار تکیه گاهی، ولتاژ ناپایداری کششی کاهش می یابد. در محدوده ابتدای نمودار مشاهده می شود که ارتباط کاهش بین ولتاژ ناپایداری کششی و بار به صورت خطی است و به صورت یک توأخت با افزایش بار، ولتاژ ناپایداری کاهش پیدا می کند. اما از یک محدوده ای به بعد شیب این نمودار افزایش ناگهانی داشته تا در یک بار مشخص این شیب

بسیار بزرگ شده و ولتاژ ناپایداری کششی بسیار کوچک می شود. این بار یک بار بحرانی است. ملاحظه می گردد که در این بار بحرانی، برای ولتاژهای بسیار کوچک نیز ناپایداری رخ می دهد که این رویداد همان پدیده کمانش می باشد.

۴. نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، با استفاده از تئوری کوپل تنش اصلاحی، رفتار استاتیکی، ناپایداری و کمانش در میکروورق های 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 می دهد و همچنین، یک تطابق بسیار خوب بین دو روش گالرکین و المان محدود مشاهده می شود.

نتایج همگرا شده (چند تابع تقریب) نسبت به نتایج روش مشتق گیری در ولتاژ ناپایداری کششی، مطابقتی با خطای کمتر از یک درصد برای ولتاژ ناپایداری و زیر چهار درصد برای کمانش دارد. مقایسه بین نتایج تئوری های کلاسیک و کوپل تنش اصلاحی نشان می دهد که تئوری کلاسیک در مقایسه با تئوری کوپل تنش اصلاحی، جابجایی بزرگ تری پیش بینی می کند که این اختلاف به دلیل پیش بینی سختی کوچک تر در تئوری کلاسیک است که منجر به بزرگ تر شدن جابجایی، کاهش محدوده ناپایداری و بارکمانش در این تئوری گردیده است. در ادامه، اثر تخلخل بر رفتار ورق مورد بررسی قرار گرفته است ملاحظه می گردد که با افزایش تخلخل جابجایی بزرگتر شده و ناحیه پایداری، ولتاژ ناپایداری و بارکمانش کاهش می یابد. همچنین تغییرات ولتاژ ناپایداری و بارکمانش برحسب نسبت تخلخل به صورت یک توأخت است، تغییرات ولتاژ برحسب نسبت تخلخل تقریباً به صورت شبه خطی و تغییرات بارکمانش برحسب نسبت تخلخل به صورت خطی می باشد که رابطه خطی آن نیز به دست آمده است. تغییرات ولتاژ ناپایداری کششی برحسب بار فشاری تکیه گاهی بی بعد نشان می دهد که با افزایش بار تکیه گاهی، ولتاژ ناپایداری کششی ابتدا به صورت خطی و یک توأخت کاهش می یابد. مطابق با نتایج حاصل، از یک محدوده ای به بعد، شیب این نمودار، افزایش ناگهانی داشته تا در یک بار مشخص، شیب مذکور بسیار بزرگ شده و ولتاژ ناپایداری کششی، بسیار کوچک می شود. این بار مشخص همان بار بحرانی کمانش است.

منابع (References)

- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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/cryst12050732>.
- Liu, Z., Yang, C., Gao, W., Wu, D. and Li, G., 2019. Nonlinear 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>.
- 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. Şimşek, 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 microplates 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 نانوسیالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی

فاطمه مرادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مرتضی خیاط* (استادیار)

محمدحسن نوبختی (استادیار)

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

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوری ۴۰، شماره ۱، ص. ۸۵-۹۶، (پژوهشی)

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تجربی مشخصه‌های انتقال حرارت نانوسیالات پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی با چینش سری و موازی می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی سیال پایه روغن حاوی نانوذرات فلزی و غیرفلزی TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی $1/5^\circ$ و $1/10^\circ$ درصد در سه دبی مختلف $1/5^\circ$ ، $1/10^\circ$ و $1/15^\circ$ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ورودی 40° ، 45° ، 50° و 55° درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده افزایش عدد ناسلت سیال پایه تا $41/8$ درصد در چینش سری و کاهش دمای سطح در چینش سری نسبت به موازی می‌باشد. همچنین، نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $1/10^\circ$ درصد به ترتیب بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت را تا $56/7$ و $52/7$ درصد در چینش موازی و $45/8$ و 42 درصد در چینش سری نسبت به سیال پایه داشته‌اند. در نهایت، افت فشار مقطع تست در چینش سری $82/1$ درصد بیشتر از چینش موازی ثبت گردید.

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

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

۱. مقدمه

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 نرخ گرمایی بالا وجود دارد که به علت تولید حرارت زیاد هنگام کار توسط این قطعات ایجاد می‌شود. گرم شدن قطعات سبب پایین آمدن توان و بازده دستگاه، خرابی و از کار افتادگی آن می‌گردد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین مسائل در صنعت، دفع این گرما از دستگاه‌ها می‌باشد که به کارکرد مناسب دستگاه در دمای پایین و مطلوب کمک می‌کند. برگاز و همکاران روش‌های بهبود انتقال حرارت را به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم کردند.^[۱] 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 علت هزینه‌های سنگین و

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 به‌سزایی در بهبود عملکرد قطعات گرمازا دارد. از دیگر ویژگی‌های آن می‌توان به فشرده‌سازی و افزایش نسبت سطح به حجم، کارایی بالای گرمایی و وزن کم اشاره کرد. 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 تاكرمن و پیس مطرح شد.^[۲] 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 79°W/cm^2 شار حرارتی را

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۲/۴، اصلاحیه ۱۴۰۲/۸/۷، پذیرش ۱۴۰۲/۸/۷.

استناد به این مقاله:

مرادی، فاطمه، خیاط، مرتضی و نوبختی، محمدحسن. ۱۴۰۳. مطالعه تجربی اثر نانوسیالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۸۵-۹۶. DOI:10.24200/J40.2023.62014.1676

جذب کنند. گایکواد و نالواد در مطالعه‌ای تجربی به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت آب درون میکروکانال‌های مستقیم و موجی پرداختند.^[۳] تمامی آزمایشات در محدوده رینولدزهای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ صورت گرفت. نتایج پژوهش آنها نشان داد که میکروکانال موجی افزایش چشم‌گیری در میزان انتقال حرارت نسبت به میکروکانال مستقیم داشته است. آنها همچنین گزارش کردند که افزایش ۵۸ الی ۸۸ درصدی انتقال حرارت درون میکروکانال 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 منیفلود میکروکانالی ساخته شده به وسیله پرینت سه بعدی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که چاه گرمایی مذکور قابلیت دفع شار گرمایی تا 240 W/cm^2 نرخ جریان جرمی 395 gr/min را دارا می‌باشد و تنها $1/7$ کیلوپاسکال افت فشار ایجاد می‌کند.^[۴] اسپیزچینو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار ترموهیدرودینامیکی یک میکروکانال مارپیچی با سطح مقطع مربعی و یک میکروکانال موجی سینوسی پرداختند و نتایج آزمایشات خود را با یک میکروکانال موازی مستقیم مقایسه نمودند.^[۵] محدوده رینولدز مورد بررسی آنها $50-150$ و در رژیم جریان آرام بود. نتایج نشان داد عملکرد حرارتی میکروکانال موجی سینوسی بهتر از مدل مارپیچی و عملکرد مدل مارپیچی بهتر از گونه موازی مستقیم بوده است. زنگ و همکاران طی یک آزمایش تجربی به بهینه‌سازی عملکرد حرارتی - هیدرولیکی میدل‌های میکروکانالی زیگزاگی با استفاده از هندسه نامتقارن پرداختند.^[۶] در این پژوهش، میکروکانالی با کانال‌های زیگزاگی نامتقارن به همراه دیواره‌های سرد و گرم بررسی گردید و سیال عامل مورد استفاده آب بود. در مقایسه با بخش سرد، قطر هیدرولیکی کانال‌های بخش گرم، بزرگ‌تر طراحی شدند که این امر منجر به افزایش سطح انتقال حرارت گردید و عملکرد حرارتی میکروکانال با ساختارهای نامتقارن و متقارن مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که میکروکانال نامتقارن از نظر حجم، وزن و اثربخشی سطح نسبت به میکروکانال متقارن بهتر است و هرچه دمای کاری بالاتر باشد، این برتری افزایش می‌یابد.

پنگ و همکاران طی یک مطالعه تجربی به بررسی عملکرد حرارتی میکروکانال مارپیچی - زیگزاگی پرداختند. سیال عامل مورد استفاده آنها آب دیونیزه بود.^[۷] نتایج نشان داد میکروکانال مارپیچی - زیگزاگی در مقایسه با میکروکانال ساده عملکرد حرارتی بهتری دارد. ژو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی عملکرد حرارتی - هیدرولیکی میکروکانال زیگزاگی با هندسه متقارن پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که به دلیل ساختار صفحه یکسان، انتقال حرارت سمت سرد و گرم میدل حرارتی میکروکانالی یکسان است.^[۸] دای و همکاران در یک مطالعه تجربی به بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و انتقال حرارت آب از طریق میکروکانال موج‌دار و زیگزاگ شکل برای محدوده رینولدز $50-90$ پرداختند.^[۹] نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش انتقال حرارت قابل توجهی در کانال‌های موج‌دار و زیگزاگ در مقایسه با کانال مستقیم حاصل می‌شود، اما موجب تشدید افت فشار نیز خواهد شد. در پی مطالعات اولیه بر روی میکروکانال‌ها، برخی از محققین در تلاش بوده‌اند تا با استفاده از نانوسیالات انتقال حرارت را بهبود بخشند. از کاربردهای نانوسیالات می‌توان به استفاده از آنها در سرمایش (رادیاتور خودرو، مبدل‌های صنعتی، راکتورهای هسته‌ای، قطعات الکترونیکی، پره‌های توربین)، گرمایش (فرایند خشک کردن)، انرژی‌های تجدیدپذیر (کلکتورهای خورشیدی، آبگرمکن و پل‌های خورشیدی)، پزشکی (رساندن دارو به نقطه خاصی از بدن و درمان سرطان) و ... اشاره کرد.^[۱۰] پس از پیدایش نانوذرات، محققین بسیاری به بررسی عملکرد حرارتی آنها درون میکروکانال‌ها با درصد‌های حجمی متفاوت، سیالات پایه‌ی گوناگون و میکروکانال‌هایی با هندسه‌های متفاوت پرداختند.

بلاجی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت چاه حرارتی میکروکانال با نانوسیالات پایه گرافن محلول در آب پرداختند.^[۱۱] آنها اثر غلظت و دبی جرمی را بر پارامترهایی مانند ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افت دما، عدد ناسلت و افت فشار بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوسیالات پایه گرافن دمای چاه حرارتی را تا 10°C کاهش و ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت را به ترتیب 71 و 60 درصد افزایش می‌دهد. این نتایج همراه با افزایش افت فشار به میزان 12 درصد نسبت به آزمایشات سیال پایه می‌باشد. دینگ و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه آب TiO_2 در داخل میکروکانال پرداختند. نتایج نشان داد در غلظت حجمی 1 درصد نانوسیال، عدد ناسلت به میزان 19 الی 41 درصد افزایش یافته است.^[۱۲] همچنین، تنها 8 درصد افت فشار در پی استفاده از نانوسیال مشاهده شده است. لی و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه آب آلومینا با غلظت حجمی $1/5$ الی $5/5$ درصد درون میکروکانال مارپیچی پرداختند.^[۱۳] محدوده رینولدز مورد بررسی آنها $1000-124$ بود. نتایج نشان داد که عدد ناسلت نانوسیالات $1/66-1/12$ برابر سیال پایه بود که بیانگر مناسب‌تر بودن انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیال پایه است. همچنین، بهترین عملکرد حرارتی متعلق به نانوسیال با غلظت حجمی $4/5$ درصد بوده است. الشایچی و همکاران طی یک مطالعه تجربی به ارزیابی اثربخشی انتقال حرارت نانوسیال الماس - آب درون میکروکانال پرداختند. نانوسیالات به روش دو مرحله‌ای و در 6 کسر حجمی مختلف تهیه شدند.^[۱۴] میزان هدایت حرارتی سیال پایه با افزودن نانوذر الماس 25 درصد افزایش داشته است. همچنین، نتایج نشان داد که نانوسیال الماس منجر به افزایش انتقال حرارت تا 30 درصد در بیشترین غلظت حجمی می‌گردد. سیمسک و همکاران در پژوهشی تجربی به بررسی متغیرهای انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیال آب - نانوسیم نقره داخل میکروکانال مستطیلی پرداختند.^[۱۵] محدوده عدد رینولدز مورد بررسی آنها $71-20$ بود. نتایج این بررسی بر روی سه میکروکانال با سطوح مقطع مختلف نشان داد که انتقال حرارت نانوسیال در مقایسه با سیال پایه به میزان 56 درصد افزایش یافته است. باورزو و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب - سیلیکا و آب - آلومینا در داخل میکروکانال پرداختند.^[۱۶] نتایج بیانگر افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه حتی در غلظت‌های حجمی پایین بود. همچنین نتایج آنها نشان داد که افزایش عدد رینولدز در میکروکانال سبب بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی می‌گردد. سرافراز و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی متغیرهای افت فشار، ضریب اصطکاک، انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در جریان نانوسیال آب - نقره با غلظت‌های حجمی $1/5$ ، $5/5$ و $10/5$ درصد داخل میکروکانال مستطیلی پرداختند.^[۱۷] نتایج نشان داد که انتقال حرارت میکروکانال با استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه افزایش یافته و همینطور افزایش کمی در میزان افت فشار، ضریب اصطکاک و مقاومت گرمایی رخ می‌دهد. با افزایش دبی جریان در میکروکانال و افزایش غلظت حجمی نانوسیال، افزایش در میزان انتقال حرارت و افت فشار مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین میزان انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در بیشترین غلظت حجمی اتفاق می‌افتد.

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 (بدون نانوذرات) با سیال پایه آب و اتیلان

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

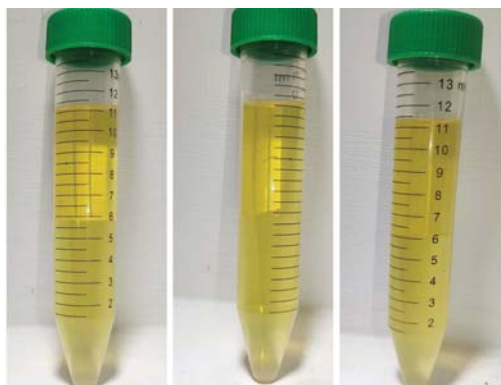
$$m = \frac{\rho_{nf} \times V_{nf} \times (\varphi \times 10^{-2})}{(1 - \varphi \times 10^{-2})} \quad (1)$$

در ادامه، از همزن مغناطیسی به مدت دو ساعت (جهت توزیع ذرات درون سیال پایه)، دستگاه پراب اولتراسونیک به مدت دو ساعت (جهت از بین بردن کلوخه‌های احتمالی) و در نهایت از حمام اولتراسونیک به مدت دو ساعت (جهت همگن و پایداری آن، عکس‌برداری 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، نانوسیالات SiO_2 پس از ۳۰ روز همچنان از پایداری مناسبی برخوردار بوده‌اند اما نانوسیال TiO_2 به مقدار کم شروع به ته‌نشینی کرده‌اند.

جهت بررسی ابعاد ذرات و همچنین پایداری نانوسیالات، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری، تصاویر TEM از نانوسیالات با غلظت حجمی ۰/۵ درصد در مقیاس ۱۰۰ 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
۳/۹۷۶	۶/۳۴۸	۰/۵
۷/۹۵۷	۱۲/۷۰۲	۰/۱



شکل ۱. پایداری نانوسیال SiO_2 در بازه‌های زمانی متفاوت.



شکل ۲. پایداری نانوسیال TiO_2 در بازه‌های زمانی متفاوت.

گلیکول یا استفاده از نانوسیال 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

۲.۱. بیان مسئله

در پژوهش حاضر به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی پرداخته شده است. به منظور بررسی مجرای عملکرد هر کدام از میکروکانال‌ها و همچنین سهولت در ترسیم نمودارهای آنها، دو میکروکانال به صورت ۱ و ۲ نام‌گذاری گردیده‌اند. سیال پایه روغن هیدرولیک ۶۸ حاوی نانوذرات اکسید فلزی و غیرفلزی TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰/۵ و ۰/۱ درصد درون میکروکانال‌های موجی با آرایش سری و موازی مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایشات در سه دبی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌اند. آزمایشات در حالت جریان دائم، تراکم‌ناپذیر و شار حرارتی ثابت انجام گردیدند. ناحیه مورد مطالعه، ناحیه 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 نانوسیال

اولین گام مهم در این مطالعه، آماده‌سازی نانوسیال می‌باشد. تهیه‌ی یک نانوسیال پایدار شده در انتقال حرارت نانوسیالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نانوسیالات 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 نانوسیال می‌بایست جرم نانوذره‌ی مورد نیاز (با توجه به غلظت حجمی آن در سیال پایه) توسط رابطه ۱ محاسبه و به کمک ترازوی دیجیتال

جدول ۱. مشخصات روغن H68 در 40°C .

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

جدول ۲. مشخصات نانوذرات SiO_2 و TiO_2 .

SiO_2	TiO_2	نوع نانوذره
۲۶۵۰	۴۲۳۰	چگالی (kg/m^3)
۱/۵	۸/۴	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
۷۳۰	۶۹۲	ظرفیت گرمایی ویژه (J/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.

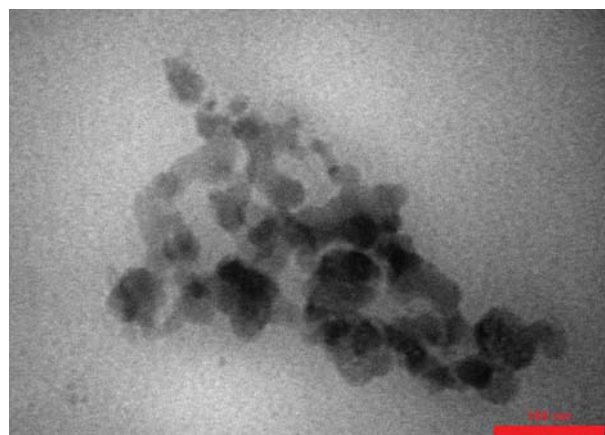
۳.۲. دستگاه آزمایشگاه

دستگاه آزمایش پژوهش حاضر شامل سه بخش اصلی سیستم نگهداری و انتقال سیال (پمپاژ)، تجهیزات آزمایشگاهی و چاه گرمایی 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 آهنی به حجم ۵ لیتر و پمپ دنده‌ای 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 هواگیری اتومات جهت از بین بردن حباب‌های احتمالی موجود در سیکل، سنسورهای $\text{PT } 100^\circ$ جهت قرائت دمای سطح، سیال ورودی به میکروکانال و خروجی از آن، کنترلر دما جهت نمایش و کنترل دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و کنتاکتور به منظور تنظیم و ثابت نگه داشتن دما بر روی مقدار مشخص می‌باشد.

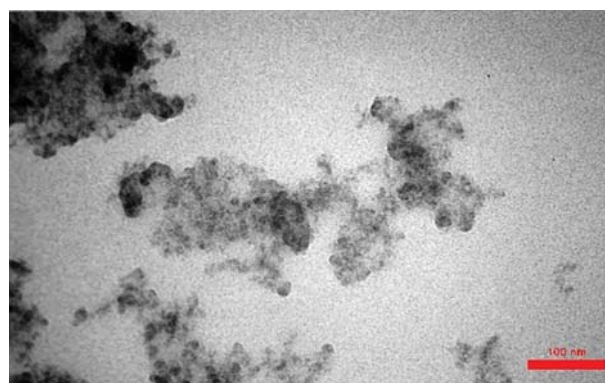
چاه گرمایی پژوهش حاضر که در شکل ۸ نشان داده شده است، شامل بلوک زیرین، بلوک فوقانی، میکروکانال مسی، المنت گرمایی و سنسورهای $\text{PT } 100^\circ$ جهت قرائت دمای سطح میکروکانال می‌باشد. بلوک زیرین از جنس استیل ضدزنگ در ابعاد می‌باشد. $75 \times 95 \text{ mm}^2$ به منظور مشاهده‌ی جریان سیال درون کانال‌ها، بلوک فوقانی از جنس پلکسی گلاس شفاف انتخاب شده است. جهت اطمینان از جریان یافتن سیال درون تمامی کانال‌ها، دو ورودی در طرفین بلوک و جهت تخلیه سیال نیز دو خروجی تعبیه شده است. همچنین جهت حصول اطمینان بیشتر از

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 نانوسیالات نیز از پایداری مناسبی برخوردار هستند.

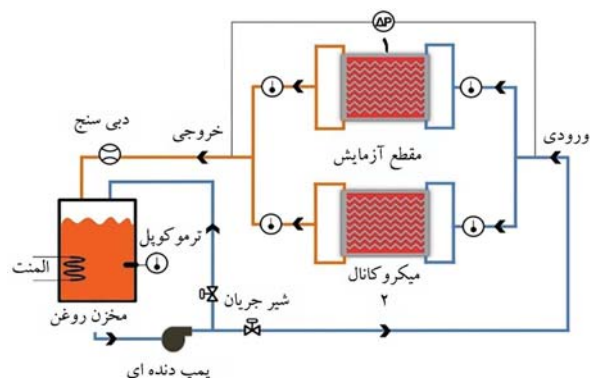
در تحقیق حاضر به منظور بررسی مورفولوژی سطح، تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح میکروکانال پس از انجام آزمایش صورت پذیرفته و به عنوان نمونه تصویر SEM نانوسیال TiO_2 با غلظت حجمی $1/1^\circ$ درصد در شکل ۵ نشان داده شده است. این تصویر پس از گذشت ۴۵ روز



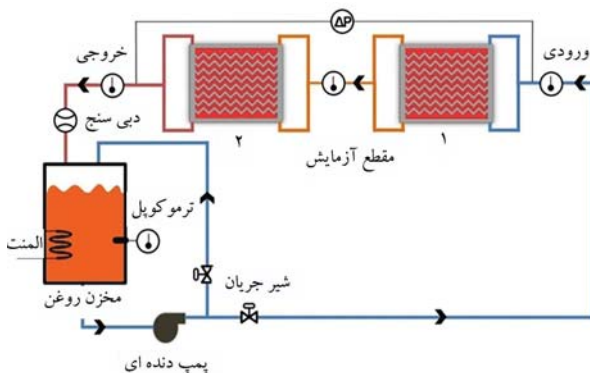
شکل ۳. تصویر TEM نمونه SiO_2 .



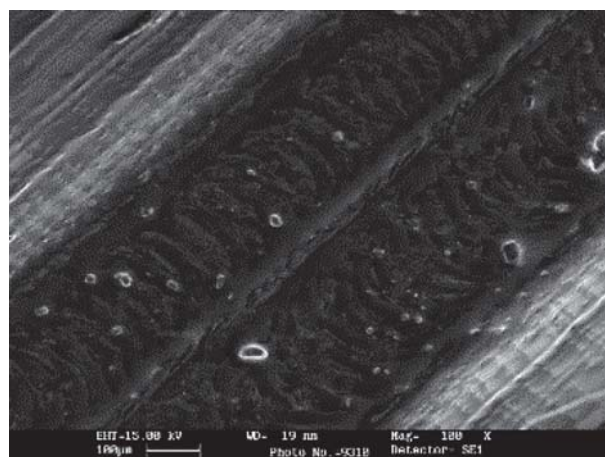
شکل ۴. تصویر SEM نمونه TiO_2 .



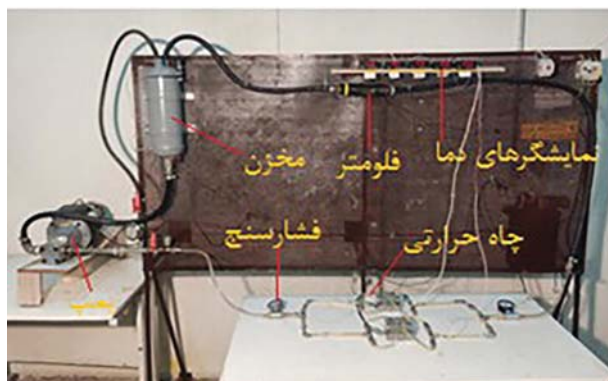
شکل ۶. شماتیک مدار آزمایش در آرایش موازی.



شکل ۷. شماتیک مدار آزمایش در آرایش سری.



شکل ۵. تصویر SEM کانال به همراه نانوذرات TiO_2 $1/1^\circ$ 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 می‌گردند. 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 نانوسیالات 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 نانوسیال به ترتیب از روابط ۴، ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند.

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

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

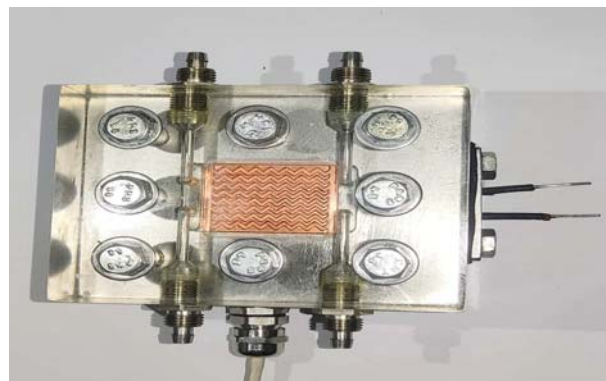
$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D_H}{K_{nf}} \quad (6)$$

در رابطه ۴، T_s دمای سطح میکروکانال است که توسط سنسورهای PT۱۰۰ 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، بنابراین به‌عنوان 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 بلوک در نظر گرفته شده است.

به‌طور 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 23×28 mm^۲ می‌باشد که با استفاده از دستگاه فرز پانتوگراف و با دقت ۱/۰ میلی‌متر ساخته شده است. تصویر میکروکانال پژوهش حاضر در شکل ۹ نشان داده شده است.

۴.۲. روش انجام آزمایش‌ها

پیش از شروع آزمایش، به‌منظور 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 پمپ، سیال به مدت یک ساعت در سیکل جریان می‌یابد 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 سیال رخ ندهد. پس از رسیدن به حالت پایا، دبی جریان سیال به کمک فلومتر و با استفاده از شیر بای‌پس تنظیم می‌گردد. جهت تنظیم دمای سیال ورودی به کمک کنترلر دما و کنتاکتور، دمای سیال بر روی مقدار مورد نظر 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 دایمر تنظیم می‌گردد و تا پایان انجام آزمایشات

۲.۳. عدد ناسلت حالت سری

در شکل های ۱۳ و ۱۴ تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در آرایش سری میکروکانال ها نشان داده شده است.

نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی 0.1° 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 داشته اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی 0.5° درصد نیز در افزایش انتقال حرارت موثر بوده اند، 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 نانوذرات بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.

۳.۳. مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش سری و موازی

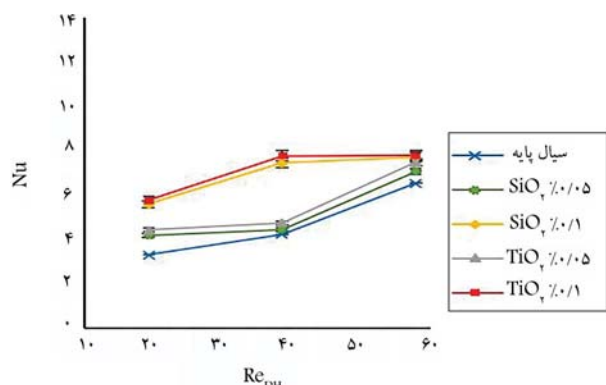
به منظور مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش موازی و سری میکروکانال ها، مقادیر عدد ناسلت این دو چیدمان برای چهار دمای ورودی 40° ، 45° و 50° درجه سانتی گراد در عدد رینولدز مشترک $19/29$ حالت سری و موازی و برای دو بلوک ۱ و ۲ در جدول ۴ ارائه شده است.

همان طور که مشاهده می شود، 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

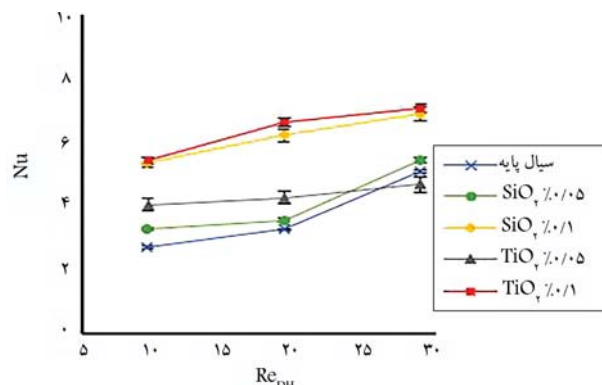
حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال ها به ترتیب برای بلوک ۱ و بلوک ۲ نشان داده شده است. این تغییرات برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 در غلظت های حجمی 0.5° و 0.1° درصد در سه دبی مختلف 0.5 ، 1 و 1.5 لیتر بر دقیقه گزارش شده است.

در شکل های ۱۱ و ۱۲، با افزایش مقدار عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش یافته است. به عبارتی دیگر، با توجه به رابطه عدد رینولدز ($Re = \frac{\rho Q}{\pi D v}$) و همچنین دبی حجمی ($Q = VA$) می توان دریافت که با افزایش میزان نرخ جریان و همچنین افزایش سرعت جریان، انتقال حرارت بهبود می یابد.

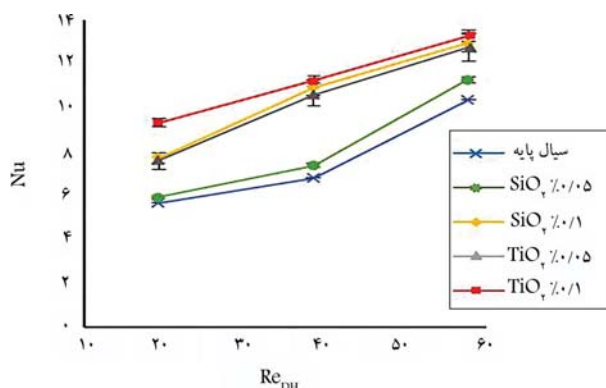
همان گونه که مشاهده می شود، نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی 0.1° درصد در تمامی رینولدزها بیشترین میزان انتقال حرارت را به خود اختصاص داده اند. با این وجود، نانوذره TiO_2 با فاصله در صدر این نمودار قابل مشاهده است که علت آن بالاتر بودن میزان ضریب هدایت حرارتی این ذرات نسبت به ذرات SiO_2 می باشد. به عبارتی دیگر، نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی 0.1° 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 داشته اند. استفاده از نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی 0.5° درصد نیز در افزایش انتقال حرارت موثر بوده است، به طوری که به ترتیب به میزان $48/6$ و $22/5$ 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 نانوذرات بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.



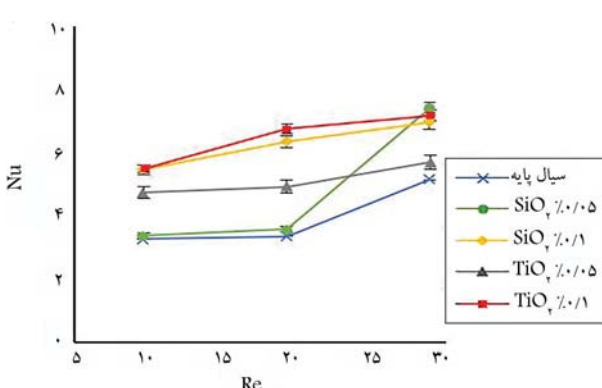
شکل ۱۳. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 40°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال ها.



شکل ۱۱. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 40°C برای بلوک ۱ در آرایش موازی میکروکانال ها.



شکل ۱۴. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 40°C برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال ها.



شکل ۱۲. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 40°C برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال ها.

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

عدد ناسلت سیال پایه					
آرایش موازی		آرایش سری		عدد	دمای ورودی
بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۱	بلوک ۲	رینولدز	(°C)
۳/۲۷	۳/۳۳	۳/۲۹	۵/۶۷	۱۹/۲۹	۴۰
۳/۵۷	۳/۷۲	۳/۵۹	۶/۴۰	۱۹/۲۹	۴۵
۳/۶۴	۴/۰۸	۳/۶۶	۶/۶۹	۱۹/۲۹	۵۰
۴/۰۶	۵/۵۱	۴/۱۱	۷/۱۲	۱۹/۲۹	۵۵

دمای سطح گشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۵٪ 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 چینش سری میکروکانال‌ها نسبت به موازی است.

۴.۳. دمای سطح حالت موازی

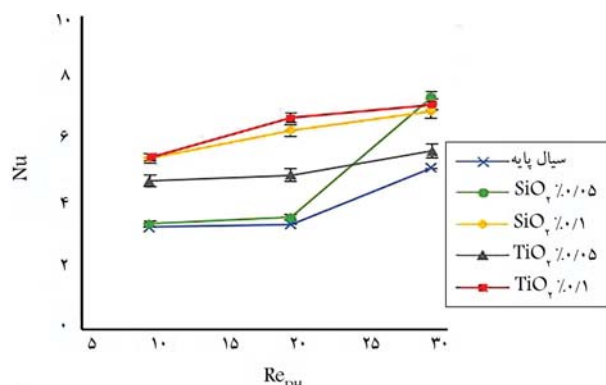
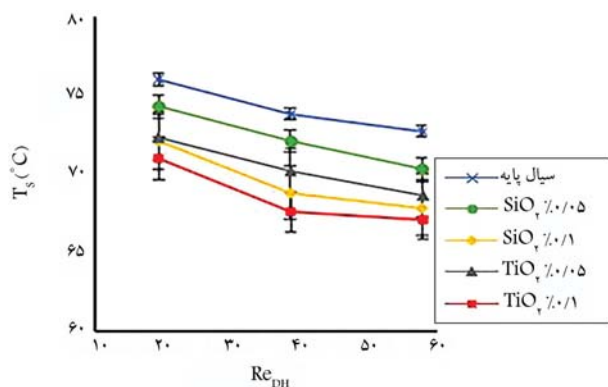
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و ۲ نشان داده شده است.

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 دبی جریان، دمای سطح کاهش می‌یابد. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۱٪ 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

۵.۳. دمای سطح حالت سری

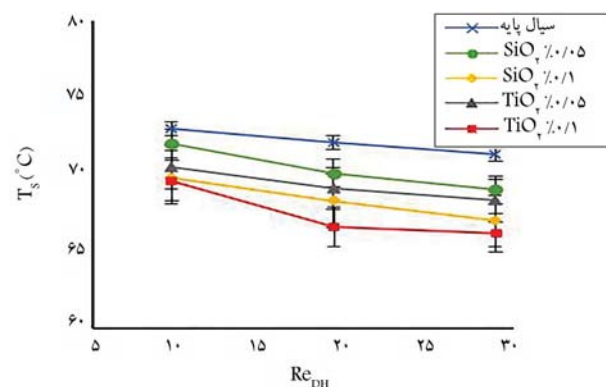
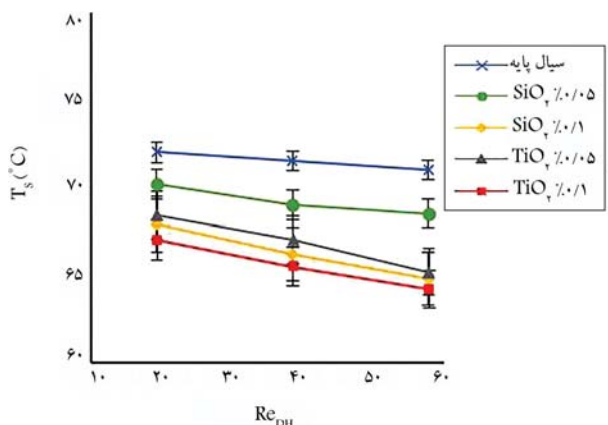
در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش سری میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و ۲ گزارش شده است.

نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۱٪ به ترتیب ۸/۷۴ و ۶/۲ درصد در بلوک ۱ و ۹/۵ و ۸/۵ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش دمای



شکل ۱۷. تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

شکل ۱۵. تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.



شکل ۱۸. تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

شکل ۱۶. تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.

سطح گشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی 0.5° نیز به میزان $6/7$ و $4/5$ درصد در بلوک ۱ و $7/5$ و $3/6$ درصد در بلوک ۲ در کاهش دما موثر بوده‌اند.

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

۶.۳. صحت‌سنجی داده‌های هیدرودینامیکی

به‌منظور صحت‌سنجی داده‌های آزمایش، مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده در این پژوهش با داده‌های به‌دست آمده از معادله داریسی - ویسباخ مطابق رابطه ۷ مقایسه و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

پارک و پانچ، ضریب اصطکاک جریان آرام توسعه‌یافته درون میکروکانال را از رابطه ۸ محاسبه نموده‌اند که در آن G از رابطه ۹ به دست می‌آید.^[۱۸]

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

$$fRe = 4.7 + 19.64G \quad (8)$$

$$G = \frac{\alpha^2 + 1}{(\alpha + 1)^2} \quad (9)$$

در رابطه ۹، α نسبت ارتفاع به عرض میکروکانال می‌باشد.

جدول ۵ 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 ۶ مقایسه میزان افت فشار سیال پایه در آرایش سری و موازی میکروکانال‌ها در دمای $40^\circ C$ آورده شده است.

همان‌طور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان، میزان افت

جدول ۵. مقایسه افت فشار تجربی و تئوری مقطع آزمایش.

درصد	افت فشار تئوری	افت فشار تجربی	عدد
خطا (%)	(bar)	(bar)	رینولدز
۱۴/۱	۱/۳۴	۱/۱۵	۱۹/۲۹
۱۲/۳	۲/۷۶	۲/۴۲	۳۸/۵۸
۱۲/۵	۳/۶۶	۳/۲۰	۵۷/۸۷

جدول ۶. مقایسه افت فشار سیال پایه در آرایش سری و موازی میکروکانال‌ها.

افت فشار سیال پایه (bar)		
سیال پایه		دبی
موازی	سری	(lit/min)
۰/۲	۱/۱۵	۰/۵
۰/۶	۲/۴۲	۱
۱	۳/۲۰	۱/۵

فشار در مسیر جریان نیز افزایش می‌یابد. براساس این داده‌ها، افت فشار چینش سری میکروکانال‌ها بین $7/7\%$ تا $82/1\%$ بیشتر از چینش 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 نانوسیال، افزایش افت فشار به مقدار کم در درصد حجمی بالای نانوسیالات نیز رخ می‌دهد که این پدیده از دیگر ویژگی‌های قابل ذکر نانوسیالات یعنی بهبود انتقال حرارت به همراه مقدار کمی افت فشار می‌باشد.

۸.۳. صحت‌سنجی داده‌های حرارتی

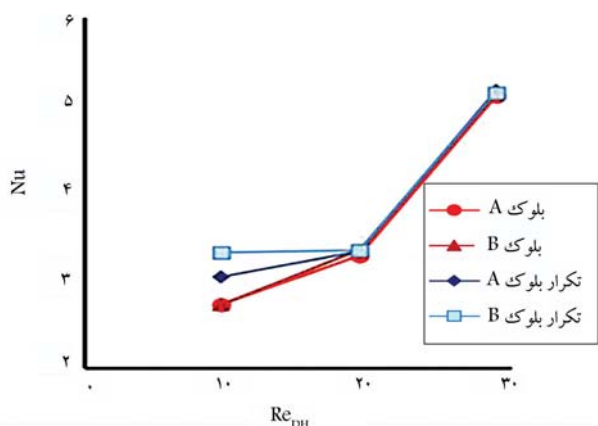
در پژوهش حاضر، پس از اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر المنت توسط مولتی‌متر، نرخ گرمای منتقل شده از المنت به هرکانال به کمک رابطه $\dot{Q} = V \times I$ محاسبه گردیده است که برابر با $1/73 \text{ J/s}$ می‌باشد. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

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

در جدول ۷ به‌منظور صحت‌سنجی داده‌های انتقال حرارت، مقادیر ΔT قرائت شده در آزمایش با مقادیر ΔT محاسبه شده به کمک رابطه ۱۰ مقایسه گردیده است. این اختلاف دما برای سیال پایه در آرایش سری و برای بلوک ۱ 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 به‌علت تقارن و ایجاد گرادیان دمای صفر، عایق در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که در واقعیت اندکی تبادل حرارتی دارند و این علت اختلاف دمای تئوریک و تجربی می‌باشد. از طرفی، با توجه به به‌طور کامل عایق نبودن بلوک زیرین، بخشی از حرارت تولید شده توسط المنت صرف گرمایش بلوک و بخشی به‌صورت اتلاف حرارتی به محیط نیز منتقل می‌گردد.

به‌منظور بررسی دقت داده‌های اندازه‌گیری شده، آزمون تکرارپذیری برای کلیه آزمایش‌های پژوهش حاضر در دو هفته متوالی صورت گرفته است که به‌عنوان نمونه، نمودار تکرارپذیری آزمایشات سیال پایه برای آرایش موازی میکروکانال‌ها در دمای $40^\circ C$ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حداکثر میزان خطا ۱۱ درصد بوده است که تنها در دبی پایین و شروع انجام آزمایشات رخ داده است.



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

جدول ۷. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال بلوک ۱.

اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال ($^{\circ}C$).					
دمای ورودی ($^{\circ}C$)		دبی ۵/ $^{\circ}$ (lit/min)		دبی ۱/ $^{\circ}$ (lit/min)	
		تجربی	تئوری	تجربی	تئوری
۴۰		۰/۳	۰/۹۱	۰/۲	۰/۴۵
۴۵		۰/۳	۰/۹۱	۰/۲	۰/۴۵
۵۰		۰/۳	۰/۹۱	۰/۲	۰/۴۵
۵۵		۰/۳	۰/۹۱	۰/۲	۰/۴۵

جدول ۸. عدم قطعیت تجهیزات پژوهش حاضر.

نوع تجهیز	عدم قطعیت
سنسور $10^{\circ}C$ PT	$\pm 0.1^{\circ}C$
مانومتر	± 0.1 bar
فلومتر	$\pm 2.5\%$
ماشین کاری	± 1 mm
کولیس (قطر کانال)	± 0.2 mm

جدول ۹. عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده در پژوهش حاضر.

مقدار خطا	کمیت
$\pm 6.7\%$	عدد رینولدز
$\pm 8.2\%$	عدد ناسلت
$\pm 4.5\%$	شار حرارتی

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 و ۱/۵ لیتر بر دقیقه برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۵/۰ و ۱/۰ 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 دو مکانیزم میکروکانال و نانوسیالات به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۵/۰ و ۱/۰ درصد محلول در روغن هیدرولیک ۶۸ به عنوان سیال عامل انتخاب شدند. همچنین، تمامی آزمایش‌ها در سه دبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌اند.

در زیر به نتایج به دست 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 ۵/۰ و ۱/۰ درصد به سیال پایه

۹.۳. آنالیز خطای داده‌ها

به‌طور کلی دو نوع خطا 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 به‌طور کامل حذف نمی‌شود. در تحقیق حاضر سعی شده است تا تمامی خطاهای اندازه‌گیری به حداقل برسند تا داده‌های حاصل از آزمایش‌ها قابل استناد باشند. همچنین، به منظور محاسبه عدم قطعیت و خطاها، از روش موافات بهره گرفته شده است.^[۱۹]

۱.۹.۳. 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 دبی‌سنج در تنظیم دبی که به منظور اطمینان از دقت آن، دبی‌سنج کالیبره گردید؛
- شرایط محیطی آزمایشگاه که به منظور اطمینان از دقت نتایج، آزمایشات در دو هفته‌ی متفاوت جهت بررسی آزمون تکرارپذیری انجام شده است؛
- خطای مانومتر در نمایش دقیق فشار؛
- غلظت حجمی نانوسیال (هنگام ساخت نانوسیال، پس از وزن کردن جرم نانوذره، عاملی که ممکن است ایجاد خطا کند، چسبیدن 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.

۲.۹.۳. خطای محاسبات

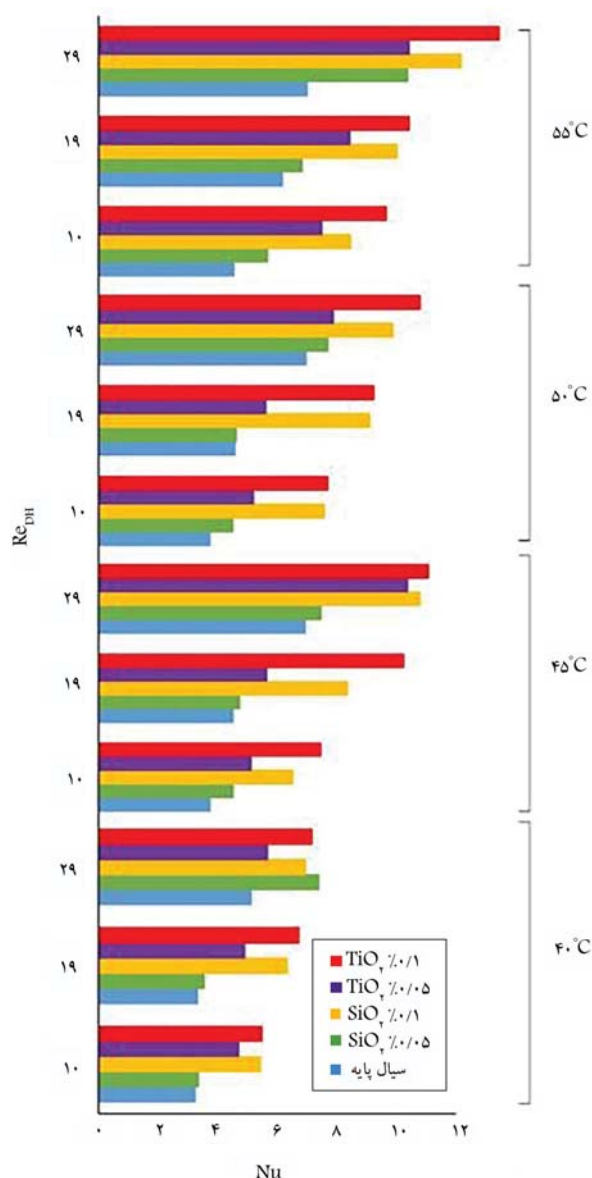
با استفاده از تئوری روش موافات، از روابط ۱۱ الی ۱۴ به ترتیب عدم قطعیت عدد رینولدز، عدد ناسلت، شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محاسبه شده است:

$$U_{Re} = \left[\left(\frac{VD}{\mu} U_p \right)^2 + \left(\frac{\rho D}{\mu} U_v \right)^2 + \left(\frac{\rho V}{\mu} U_D \right)^2 + \left(\frac{\rho VD}{\mu^2} U_{\mu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{h}{k} U_D \right)^2 + \left(\frac{D}{K} U_h \right)^2 + \left(-\frac{hD}{k^2} U_k \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$U_{q''} = \left[(\dot{m} C_p U_{\Delta T})^2 + (\dot{m} \Delta T U_{C_p})^2 + (C_p \Delta T U_{\dot{m}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$U_h = [q'' U_{\Delta T}]^{\frac{1}{2}} + (\Delta T U_{q''})^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

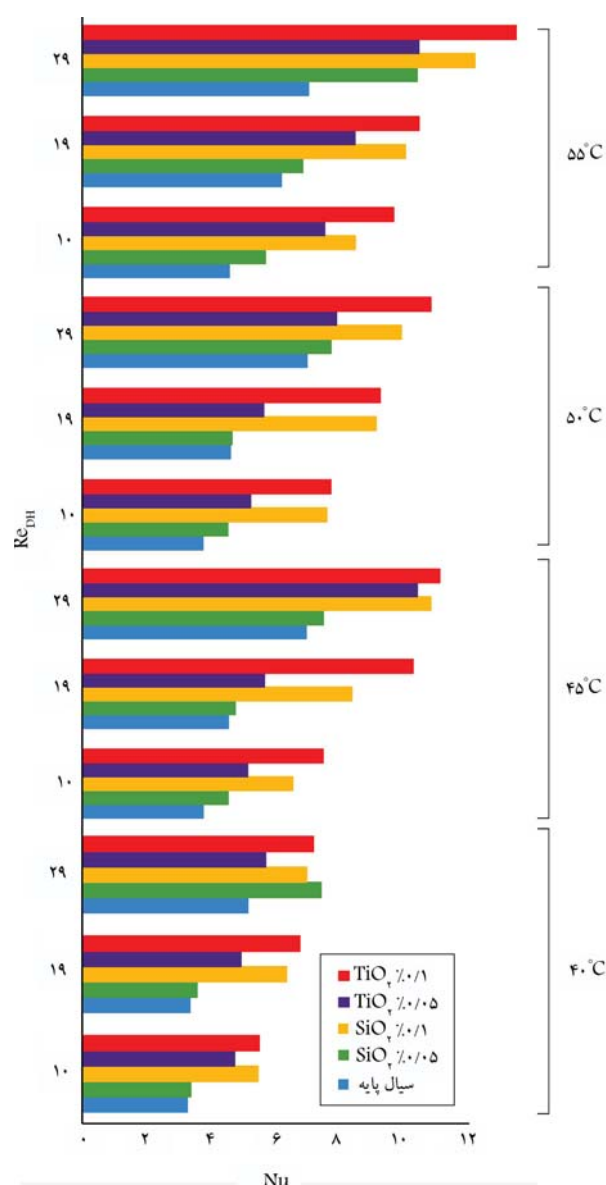


شکل ۲۱. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در تمامی دماهای مورد آزمایش برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.

علت این موضوع، بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی TiO_2 نسبت به SiO_2 می‌باشد؛

۷. چپش سری میکروکانال‌ها به دو دلیل نسبت به چپش موازی برتری دارد؛ اول: عدد ناسلت سیال پایه در حالت سری تا $41/8$ 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 چپش موازی نسبت به چپش سری اشاره کرد، زیرا در چپش موازی، جریان سیال عبوری میان دو میکروکانال تقسیم شده و نصف چپش سری میکروکانال‌ها می‌باشد؛

۸. چپش سری با وجود عملکرد مناسب‌تر حرارتی نسبت به موازی، به علت افزایش میزان افت فشار تا $82/11$ 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 بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها.

به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا $48/3$ و 56 درصد در آرایش موازی و تا $45/8$ و 45 درصد در آرایش سری شده است؛

۳. افزودن نانوذره SiO_2 با غلظت‌های حجمی 0.5% و 1% درصد به سیال پایه به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا $32/3$ و $52/7$ درصد در آرایش موازی و تا $36/9$ و 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 میزان 9% درصد نیز مشاهده می‌شود؛

۶. نانوذره TiO_2 با غلظت حجمی 1% تا $21/1$ درصد، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانوذره SiO_2 با غلظت حجمی 1% درصد نشان داده است که

فهرست علائم

• علائم انگلیسی

- q : شار حرارتی ($\frac{w}{m^2}$)؛
- T_S : دمای سطح ($^{\circ}C$)؛
- T_{in} : دمای ورودی ($^{\circ}C$)؛
- T_{out} : دمای خروجی ($^{\circ}C$)؛
- \dot{Q} : نرخ انتقال گرما (J/s)؛
- C_p : ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ($J/kg.K$)؛
- h : ضریب انتقال حرارت جابه جایی ($w/m^2.k$)؛
- P : فشار (bar)؛
- k : ضریب هدایت حرارتی ($w/m.K$)؛
- A_{HS} : سطح مقطع (m^2)؛
- D_H : قطر هیدرولیکی (m)؛
- \bar{V} : سرعت متوسط (m/s)؛
- f : ضریب اصطکاک.

• علائم یونانی

- ρ : چگالی (kg/m^3)؛
- μ : ویسکوزیته دینامیکی ($N.s/m^2$)؛
- V : ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)؛
- φ : درصد حجمی.

• اندیس

- nf : نانو سیال.

• مخفف ها

- Re : عدد رینولدز؛
- Nu : عدد ناسلت؛
- TEM : میکروسکوپ الکترونی عبوری؛
- SEM : میکروسکوپ الکترونی روبشی.

پانویس

1. Microchannel Heat Sink

منابع (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 the thermal-hydraulic performance of zigzag-type microchannel heat exchangers using asymmetric geometry. *Applied Thermal Engineering*, 217, p.119216. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119216>.
7. Peng, Y., Li, Z., Li, S., Cao, B., Wu, X. and Zhao, X., 2021. The experimental study of the heat transfer performance of a zigzag-serpentine microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 163, p.106831. <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>.
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 فون نوین، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوری ۴۰، شماره ۱، ص. ۹۷-۱۱۰، (پژوهشی)

در این پژوهش، برای اولین بار یک حلگر حجم محدود کوپل، برای حل عددی همزمان معادلات جریان سیال تراکم‌ناپذیر دوفازی در اعداد رینولدز پایین و معادله موقعیت سطح فاصل بین دوفاز با اعمال شروط مرزی روی سطح فاصل در بستر فوم - اکستند توسعه می‌یابد. جریان‌های مورد مطالعه برای جابه‌جایی سطح و شبکه به صورت آرام، در محدوده اعداد رینولدز کمتر از 10^3 در نظر گرفته می‌شود. این حلگر، مبتنی بر الگوریتم تعقیب سطح فاصل می‌باشد که به کمک ترفند سلول با ضخامت صفر، پیاده‌سازی می‌شود. مزیت اصلی این حلگر در این است که تمامی معادلات حاکم بر هر دوفاز به وسیله 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 مجرا و روی پله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و میرایی امواج ایجاد شده روی سطح فاصل و نحوه تغییر متغیرهای جریان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج به دست 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.

aer.b.cheraghi@ut.ac.ir
vakilipour@ut.ac.ir

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^۴ در این دسته بندی قرار می‌گیرد.^[۱] در مقابل، روش‌های مبتنی بر دنبال کردن سطح یا محاسبه‌ی دقیق سطح فاصل می‌باشند که به روش‌های IT^۵ معروفند.^[۲] 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 تغییر مقادیر خواص جریان، موقعیت جدید سطح را پیدا می‌کنند. یافتن موقعیت جدید سطح، نیازمند حرکت سطح و مطابقت شبکه داخلی با آن است، به همین دلیل، این روش‌ها در کنار الگوریتم‌های جابه‌جایی شبکه معنا می‌یابند. روش‌های مختلفی بر پایه دو رویکرد اشاره شده، توسعه داده شده‌اند، به عنوان مثال می‌توان به روش MAC^[۶]،

با توجه به کاربردهای چشمگیر جریان‌های دوفاز چند فازی، شبیه‌سازی این جریان‌ها، همواره یکی از زمینه‌های جذاب تحقیقاتی و صنعتی می‌باشد. به عنوان مثال در صنایع دریایی، نفت و گاز، هوافضا، 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 مطرح 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 ۱۴۰۲/۲/۱۰، اصلاحیه ۱۴۰۲/۶/۶، پذیرش ۱۴۰۲/۶/۲۷.

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، ۴۰(۱)، صص. ۹۷-۱۱۰. 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 نرخ مناسب همگرایی است.

موزافریجا و پریک^[۷] روش جابه جایی دومرحله ای سطح را با موفقیت برای مسائل سطح آزاد پیاده سازی نمودند. هاجستین و ولیامز^[۸] یک روش ضمنی دوبعدی برای محاسبه کشش سطحی ارائه داده و این الگوریتم ضمنی را برای شبیه سازی جریان حباب مورد استفاده قرار دادند. اوشی و همکاران^[۹] نیز یک الگوریتم ضمنی سه بعدی برای حل مسائل سطح آزاد ناپایا با روش MAC توسعه دادند و حلی با پایداری بیشتر حاصل شد. دنر و واجم^[۱۰] یک بستر کویل را برای روش VOF چه در حالت گسسته سازی ضمنی و چه صریح، پیشنهاد دادند که در نهایت منجر به افزایش اندازه گام زمانی شد. آپسلی و هو^[۱۱] 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^[۱۲] یک مدل حجم محدود ضمنی و دوبعدی را برای شبیه سازی جریان های امواج سطحی براساس روش تصویر کردن^۹ توسعه داده اند.

اصلی ترین تلاش ها جهت حل کاملاً کویل، به صورت ضمنی و همزمان جریان های دوفازی را می توان، پژوهش وکیلی پور و همکاران^[۴] دانست که به صورت دوبعدی صورت گرفته است. در این پژوهش، جریان سطح سیال و جریان دوفازی به کمک یک الگوریتم جدید با شروط سطح فاصل کویل شده اند و جابجایی 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 غیرکویل یا کویل جزئی برای حل معادلات جریان سیال و شروط سطح فاصل بوده است. در بستر فوم - اکستند نیز حلگر پیش فرض inter Track Foam با استفاده از الگوریتم شناخته شده PIMPLE^{۱۰} به حل هیدرودینامیکی سیال می پردازد. در حالی که معادلات و شروط روی سطح فاصل را به صورت کاملاً مجزا و با یک تاخیر زمانی نسبت به جریان سیال دوفاز، 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 جابجایی سطح فاصل نیز، الگوریتم دو مرحله ای معروف موزافریجا و پریک^[۷] می باشد. در مطالعه حاضر، اعمال کوپلینگ جریان و شروط 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 ترفند سلول با ضخامت صفر، منجر به ایجاد حلگری جدید با قابلیت حل جریان های دوفازی برای اعداد رینولدز کم گردیده است. در این حلگر، معادلات هر دو فاز سیال شامل معادلات مومنوم و جرم به همراه معادلات و شروط سطح فاصل میان دو فاز که شامل معادلات دینامیکی، برابری سرعت و شروط فشاری هستند، به صورت همزمان و کویل 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 شروط مرزی سطح فاصل مشابه با الگوریتم وکیلی پور و همکاران^[۴] 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 مجرا و جریان روی پله مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در این کار، اولین مرحله بعد از کوپلینگ معادلات، یعنی مرحله جابه جایی شبکه که 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

تایید الگوریتم کویل میان جریان هر دوفاز با سطح فاصل است که می تواند به صورت عملیاتی در کدهای متن باز حجم محدود، اعمال گردد. ترفند سلول سطح فاصل با ضخامت صفر نیز به منظور ایجاد نقطه محاسباتی فعال بر روی مرز پیاده سازی شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در این ترفند، با فشردن سازی یک ردیف سلول مجاور سطح فاصل در هر طرف، عملاً این ردیف از سلول های محاسباتی مرزی برای هر کدام از دامنه های سیال دو طرف سطح، نقش سلول مرزی محاسباتی را ایفا می کند. کاهش ضخامت تا مقادیر بسیار ناچیز در کنار اصلاح مقادیر روی سطح مشترک با سلول داخل میدان، منجر به حذف اثر فاصله این سلول ها و در واقع رسیدن به یک سطح فاصل تیز شده است. در این مقاله، تمامی معادلات روی سطح فاصل شامل محاسبات ماتریس تنش برشی یا عبارت های مربوط به گرادینان ها به صورت متمایز از توابع پیش فرض فوم - اکستند محاسبه و در دستگاه ماتریس نهایی سرهم بندی^{۱۵} گردیده اند. حرکت سطح فاصل نیز به کمک اعمال معادله سینماتیکی و الگوریتم ارائه شده توسط وکیلی پور و همکاران^[۴] انجام گرفته است ولی به راحتی با توجه به ساختار بستر فوم - اکستند، می تواند با الگوریتم های دیگر همچون الگوریتم موزافریجا و پریک^[۷] نیز عملیاتی شود.

۲. مدل سازی ریاضی

۱.۲. معادلات حاکم بر فازها

معادلات حاکم بر دو فاز سیال در دوطرف سطح فاصل عبارت است از معادلات پیوستگی و مومنوم که به صورت زیر ارائه شده است:^[۴،۳]

$$\oint_S \rho \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \, dS = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{d}{dt} \oint_V \rho \mathbf{u} \, dV + \oint_S \mathbf{n} (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \, dS = - \oint_S \nabla p \, dV + \oint_S \mathbf{n} \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \, dS \quad (۲)$$

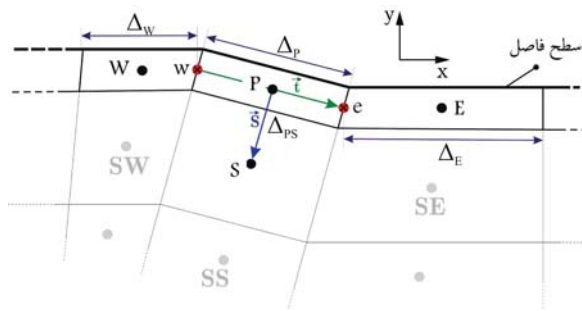
که در آن \mathbf{n} بردار یکه عمود بر سطح S و به سمت بیرون با شکل مولفه ای $(n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k})$ می باشد. ρ ، μ به ترتیب بردار سرعت، فشار دینامیکی، چگالی و لزجت سیال می باشند که ضرایب لزجت و چگالی به صورت ثابت در نظر گرفته شده اند.

۲.۲. معادلات و شرایط حاکم بر سطح فاصل

شکل ۱ یک سطح فاصل سه بعدی به همراه راستاهای 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 شروط 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 شروط مرزی را برای هر دو بخش جریان سیال کامل می کنند. معادلات حاکم بر سطح فاصل از شروطی استخراج می شوند که عبارتند از:^[۷،۴]

- شروط تعادل نیرویی در سه راستای 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 سه بعدی (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 مرزی و سلول‌های همسایه آن، مطابق با شکل ۲، ابتدا گرادینان 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 گرادینان برای سه جهت مختصاتی مورد نظر به دست می‌آیند که جزئیات بسط یافته عبارات اصلی معادله دینامیکی و گرادینان‌ها در پیوست ارائه شده است. طرح‌های^{۱۷} عددی مرسوم نیز جهت محاسبه گرادینان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲.۲.۲. معادله حرکت سطح فاصل

معادله حرکت سطح فاصل تضمین‌کننده‌ی شرط بقای حجم سیال محصور در سطح فاصل و حرکت ذرات هر دو فاز سیال بایکدیگر روی آن می‌باشد. در حالتی که، تبادل جرم بین دو فاز در سطح فاصل وجود نداشته باشد، این معادله برابری مولفه‌های سرعت عمودی سیال و سطح فاصل را در نقطه تماس، به شکل زیر بیان می‌کند:^[۴]

$$(\rho A u_n - \rho \dot{\Omega})_{interface} = 0 \quad (13)$$

به طوریکه A و $\dot{\Omega}$ ، به ترتیب معرف مساحت سطح فاصل و مقدار حجم جاروب شده توسط هریک از وجوه تشکیل دهنده سطح فاصل می‌باشد. وکیلی پور و همکاران^[۴] یک رهیافت نوین برای محاسبه جابه‌جایی سطح فاصل را مبتنی بر شیب و طول سطح کنترلی سلول مجاور سطح فاصل، توسعه دادند.

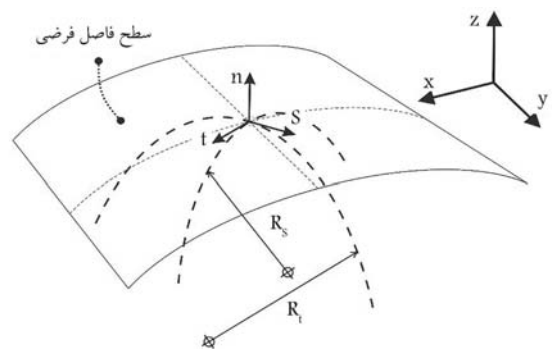
۳.۲.۲. معادله برابری سرعت در سطح فاصل

همانطور که 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:^[۴]

$$u_{iL} \cdot n = u_{iG} \cdot n \quad (14)$$

$$u_{iL} \cdot t = u_{iG} \cdot t \quad (15)$$

$$u_{iL} \cdot s = u_{iG} \cdot s \quad (16)$$



شکل ۱. سطح فاصل سه بعدی به همراه راستاهای عمودی و مماسی.

- شروط بقای جرم و انرژی گذرکننده از سطح فاصل که در نبود تبدلات جرم و انرژی، این شروط 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 نیرویی 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 راستا ارائه می‌شود:^[۴]

$$n \cdot T_{iL} \cdot n - \sigma K - p_{iL} = n \cdot T_{iG} \cdot n - p_{iG} \quad (3)$$

$$n \cdot T_{iL} \cdot t = n \cdot T_{iG} \cdot t \quad (4)$$

$$n \cdot T_{iL} \cdot s = n \cdot T_{iG} \cdot s \quad (5)$$

در روابط بالا، σ ، T و K به ترتیب تانسور تنش کل، کشش سطحی و انحنای سطح فاصل می‌باشند. همچنین، بردارهای t و s نشان دهنده راستاهای مماسی طولی و عرضی بوده و بانویس‌های iL و iG نیز به ترتیب مشخص‌کننده بخش‌های مایع و گاز هستند. تانسور تنش کل (T) را می‌توان در جریان‌های تراکم‌ناپذیر و براساس فرض استوکس، با استفاده از تانسور نرخ کرنش (D) و میدان سرعت سیال به صورت زیر محاسبه کرد:^[۴]

$$T = 2\mu D = \mu [\nabla \otimes u + (\nabla \otimes u)^T] \quad (6)$$

در رابطه ۶، عملگر \otimes نشان دهنده ضرب خارجی^{۱۶} می‌باشد. در دستگاه مختصات کارتزینی، تانسور تنش کل، با استفاده از گرادینان‌های سرعت در قالب تنش‌های برشی و عمودی (τ) و فشار ترمودینامیکی (p) به صورت زیر نشان داده می‌شود:^[۴]

$$T = \begin{bmatrix} \tau_{xx} - p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} - p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} - p \end{bmatrix} \quad (7)$$

مولفه‌های تنش‌های برشی، τ ، با روابط زیر به وسیله گرادینان‌های سرعت محاسبه می‌شود:^[۴]

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

۴.۲.۲. 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: [۳]

$$\nabla p_i \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (۱۷)$$

به طوری که در حالت مرتبه اول و دوم، به عنوان شرط گرادینان صفر شناخته می شود، و در بستر فوم - اکستند معادل با zeroGradient است که در اینجا با توجه به محاسبه گرادینانها به صورت مجزا، از شروط پیش فرض استفاده نشده و به صورت مرتبه دوم پسر اعمال شده است.

۳. اعمال معادلات و فرایند حل در محیط فوم - اکستند

معادلات حاکم بر میدان جریان و سطح فاصل تماماً با توابع موجود در فوم - اکستند نسخه ۵ توسعه یافته و گسسته 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 - اکستند توسعه داده شده اند. همچنین تعدادی از توابع و ساختارهای موجود در حلگر inter Track Foam در فوم - اکستند نیز به کار رفته که بخش فرایندی آنها در شکل ۳ با رنگ آبی نشان داده شده است.

در ادامه، عملکرد بخش های شماره گذاری شده در شکل ۳ به صورت مختصر ارائه می شود.

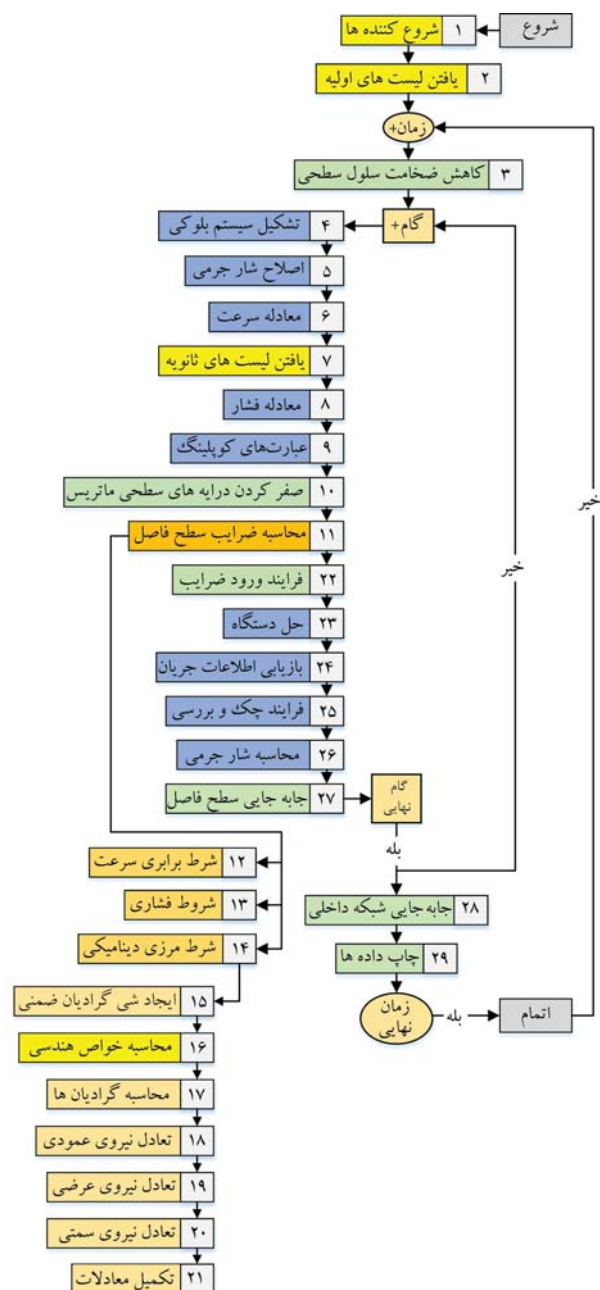
بخش ۱: کلیه فرایندهای مربوط به ایجاد فهرست ها و دیگر مخازن خالی داده های اصلی که در حین اجرا مورد استفاده قرار می گیرند، در این بخش صورت می گیرد. بخش ۲: جستجو و بستن انواع فهرست های مورد نیاز در ادامه ی برنامه در این بخش انجام می گیرد. در واقع، خروجی این بخش شامل مجموعه ای از مخازن داده است که عموماً به صورت آدرس یا اندیس و به منظور استفاده در حلقه های محاسباتی بر روی سلول ها یا هر مشخصه مورد نیاز دیگر از سطح فاصل گردآوری شده اند.

عملکرد بخش های شماره گذاری شده در شکل ۳ به صورت جزئی در ادامه تشریح شده اند.

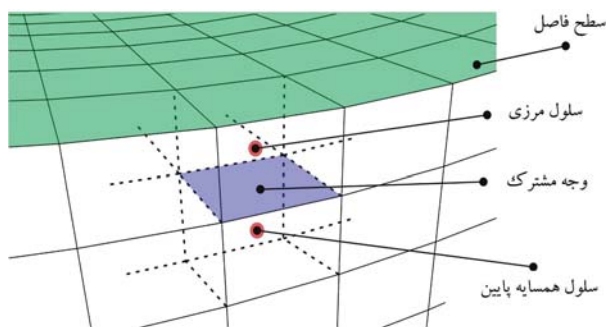
بخش ۳: پیاده سازی ترفند سلول های محاسباتی مرزی با ضخامت نزدیک به صفر در این بخش انجام شده است. کاهش ضخامت سلول ها به کمک تابع movePoints از کلاس پایه fvMesh صورت گرفته است. به منظور اعمال صحیح این ایده، نیاز به اصلاح ضرایب ری و چاو (PWIM) [۱۸، ۱۵، ۱۴] مربوط به سلول های سطح فاصل است. این اصلاح منجر به محاسبه صحیح مقادیر روی وجه میان سلول سطح فاصل و نزدیکترین سلول داخل میدان به آن می گردد (شکل ۴) که عملاً اثر ضخامت سلول نازک شده، حذف می شود.

بخش ۴: این بخش مربوط به ایجاد سیستم بلوکی با در نظر گرفتن تعداد متغیر می باشد. [۱۹-۱۶] تمامی فرایندهای سرهم بندی ضرایب، در دستگاه ماتریسی نهایی به کمک توابعی است که با کلاس های این بخش، همچون fvBlockMatrix، هماهنگ شده اند؛

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 (ALE) [۱۹] را بر عهده دارد. تابع اصلی مورد استفاده در این مرحله، (fv::meshPhi) می باشد که عمل



شکل ۳. نمودار مربوط به بخش های اصلی حلگر توسعه داده شده.



شکل ۴. شکل شماتیک سلول سطح فاصل، سلول داخل دامنه و وجه مشترک.

همانطور که پیشتر اشاره شد، تابع پیش فرض فوم - اکستند که در این مرحله مورد استفاده قرار گرفته و وظیفه جابه‌جایی شبکه را برعهده دارد، تابع (movePoints) از کلاس fvMesh می‌باشد؛

بخش ۲۸: جابه‌جایی نقاط داخل میدان متناسب با شروط مرزی داده شده و همچنین جابه‌جایی اعمال شده برای سطح سیال، در این مرحله انجام شده است. الگوریتم جابه‌جایی شبکه داخلی به دو صورت کلی حل معادله لاپلاس برای تمامی نقاط و یا جابه‌جایی براساس نسبت فاصله اولیه می‌باشد. در مسائل جریان لایه‌ای، جابه‌جایی یکنواخت شبکه هزینه محاسباتی کمتری دارد؛

بخش ۲۹: در پایان، عملیات مربوط به چاپ یا استخراج داده‌های مورد نیاز، جهت پس پردازش صورت گرفته است.

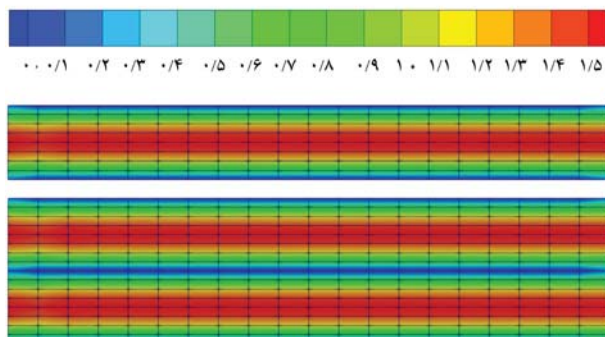
۴. نتایج

در ابتدا به منظور اعتبارسنجی حلگر جریانی، مقایسه‌ای میان نتایج مراجع وکیلی‌پور و همکاران، سنجل و سیمبالا^[۲۰] و گارتلینگ^[۲۱] با نتایج حاصل از حلگر توسعه داده شده ارائه شده است. همچنین، پیش از بررسی جریان دوفازی در حالت کوپل شده، ابتدا یک ارزیابی در حالتی که هر دوفاز به صورت غیرکوپل هستند، انجام شده است. به عبارتی، فاز بالا و پایین کاملاً مستقل از یکدیگر بوده‌اند که در این حالت گویا دوجریان تک‌فاز به یکدیگر متصل شده‌اند. این حالت در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

پس از این بررسی اولیه در حالت‌های مختلف از شبکه و زوایای مختلف دامنه (که به منظور اختصار ذکر نشده‌اند)، بررسی مربوط به فعال شدن شروط مرزی روی سطح فاصل و همچنین فعال شدن معادله سینماتیک جهت حرکت سطح مورد ارزیابی قرار گرفته است. توجه شود که در کلیه مراحل، خواص هر دوفاز به صورت کاملاً یکسان مقداردهی شده‌اند، اما می‌توان در مطالعات آینده، خواص متفاوت را در کنار فعال‌سازی عبارت مربوط به کشش سطحی و انحنای سطح مورد ارزیابی قرار داد.

نمونه‌های مورد بررسی به منظور ارزیابی جابه‌جایی سطح و شروط روی سطح شامل چندین نمونه آزمون جریان درون مجرا با سطح فاصل اولیه در وسط و به صورت کاملاً افقی، جریان درون مجرا با سطح فاصل اولیه در وسط و نیمه افقی - نیمه زاویه دار، جریان درون مجرا 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 می‌باشد. اعداد رینولدز

سرعت (m/s)



شکل ۵. میدان جریان در حالتی که دوفاز کاملاً مستقل از یکدیگر هستند، بالا (جریان درون مجرای تک‌فاز و پایین) جریان درون مجرا در حالت دوفاز ولی غیرکوپل.

محاسبه سرعت نسبی شبکه را برعهده دارد؛

بخش ۶: ایجاد معادله مومنتوم به همراه محاسبات ماتریس ضرایب و فرایند داخل‌سازی در دستگاه بلوکی در این بخش صورت گرفته است. عبارت فشاری معادله مومنتوم در بخش ۹ وارد شده است؛

بخش ۷: این بخش جهت پرکردن و ساختن مخازن داده‌ای مورد نیاز 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 مربوط 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 ۱۰: صفر کردن درایه‌های مربوط به سلول‌های سطح فاصل به منظور آماده سازی جهت اعمال شروط روی سطح نیز در این مرحله انجام می‌گردد؛

بخش ۱۱: این بخش که از مهم‌ترین بخش‌های فرایند پیاده‌سازی می‌باشد، در واقع وظیفه محاسبه ضرایب مناسب سلول‌های سطح فاصل را با توجه به معادلات و شرایط حاکم بر سطح برعهده دارد. مراحل داخلی این بخش، در ادامه تشریح می‌شود؛
بخش ۱۲: شرط برابری سرعت در دوطرف سطح فاصل که می‌تواند مشابه با شرط عدم لغزش دیواره ولی به طور همزمان و برای دوطرف سطح دو سیال قلمداد شود، در این بخش اعمال شده است. در حالتی که انتقال جرم از سطح وجود نداشته باشد، این شرط حاکم خواهد 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 گرادین صفر به صورت مرتبه اول و مرتبه دوم اعمال شده است؛

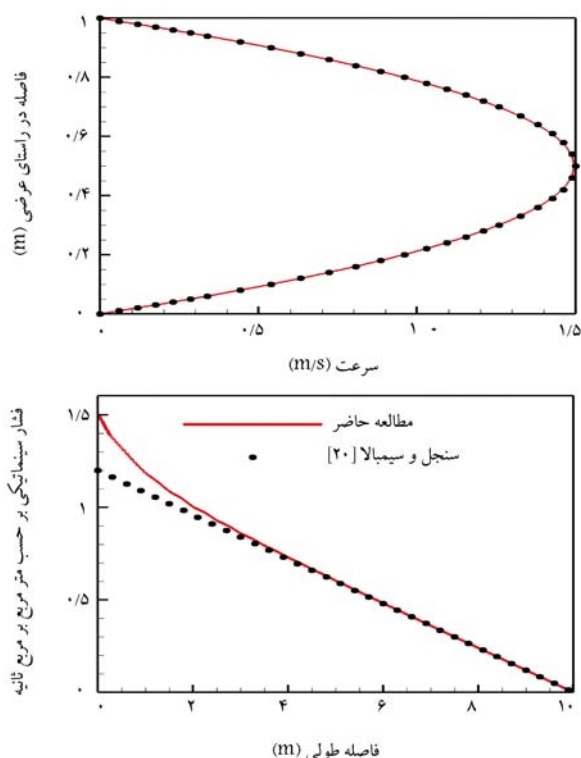
بخش ۱۴ تا ۲۱: شرط مرزی دینامیکی و یا همان تعادل نیرویی در این بخش پیاده‌سازی شده است. در ابتدا در بخش ۱۵ یک شی ۲۰ از کلاس گرادین ایجاد شده است. این عمل، مستلزم تغییر کلاس پیش فرض فوم - اکستند جهت دریافت متغیر سرعت است. سپس، در مرحله ۱۶ مشخصات هندسی که بایستی در هر تکرار محاسبه و به‌روزرسانی شوند، محاسبه و دریافت شده‌اند. در مرحله ۱۷، با توجه به الگوریتم مورد نظرمان برای محاسبه گرادین و همچنین فواصل و خواص هندسی بخش ۱۶، کار محاسبه عبارت گرادین انجام شده است. پس از آن در مراحل ۱۸ تا ۲۰، براساس محاسبات گرادینی انجام شده، در مرحله ۱۷، شروط تعادل نیرویی در هر سه جهت عمودی، مماسی و در راستای عمق دامنه پیاده‌سازی شده است. در پایان، عبارت‌های مربوط 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 بلوکی، در این مرحله صورت گرفته است؛

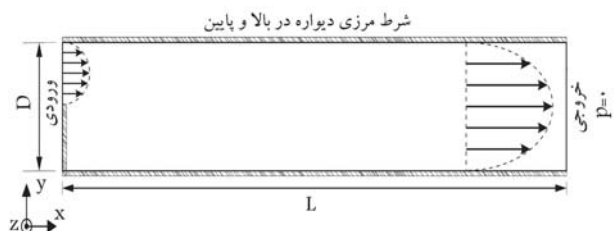
بخش ۲۳ تا ۲۵: در این بخش‌ها، حل دستگاه بلوکی و استخراج باقیمانده‌ها و بررسی شروط و معیارهای همگرایی یا دیگر کنترل‌ها را عهده‌دار انجام می‌شود. همچنین، بازدریافت نتایج حاصل از حل، به صورت تفکیک شده برای متغیرهای تعریف شده در دستگاه بلوکی (در اینجا سرعت و فشار)، در این بخش‌ها صورت گرفته است؛

بخش ۲۶: محاسبه سرعت جرمی به منظور استفاده در معادله مومنتوم با توجه به فرمولاسیون روش ری و چاو انجام شده است؛

بخش ۲۷: اعمال الگوریتم جابه‌جایی سطح فاصل در این مرحله صورت گرفته است.



شکل ۸. مقایسه میان پروفیل سرعت توسعه یافته و شیب فشار با حل تحلیلی.



شکل ۹. دامنه، شروط مرزی و شبکه مورد استفاده جهت حل جریان پله.

لوله مطابق با مرجع^[۲۰] به کمک روابط زیر قابل محاسبه است:

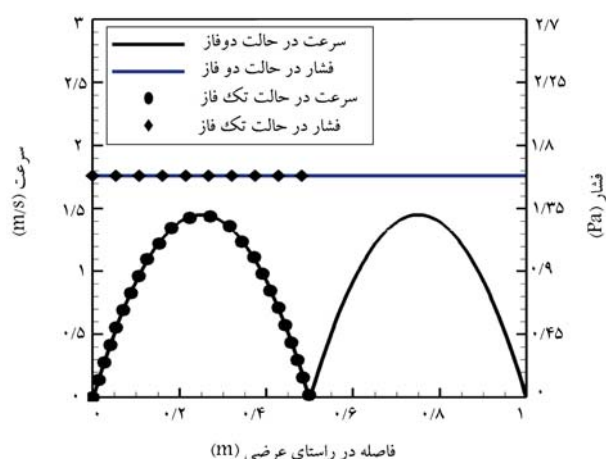
$$u(y) = 1.5 u_{in} \left(1 - \frac{y^2}{(D/2)^2} \right) \quad (19)$$

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{3\mu}{(D/2)^2} u_{in} \quad (20)$$

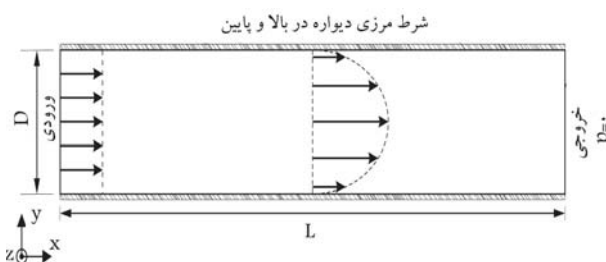
همانطور که مشاهده می شود، رابطه ارائه شده یک سهمی با حداکثر مقدار ۱/۵ برابر سرعت ورودی است. مقایسه نتایج حاصل از حلگر توسعه داده شده با رابطه بالا، نشان از تطابق کامل میان نتایج می دهد.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، مطابقت مناسبی میان شیب 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 ۸۰۰ نیز با کارهای وکیلی پور و همکاران^[۴] و گارتلینگ^[۲۱] مورد مقایسه قرار گرفته است. طول دامنه ۳۰ و عرض آن ۱ است. سرعت در ورودی به صورت سهموی و با مقدار حداکثر ۱/۵ اعمال و هندسه و همچنین شروط مرزی مورد استفاده به صورت شکل ۹ ارائه شده است. همچنین، شبکه مکانی مطابق با مرجع^[۴] به اندازه ۱۸ سلول در راستای طولی



شکل ۶. سرعت و فشار در فاصله طولی ۴/۶۲۵.



شکل ۷. دامنه، شروط مرزی و شبکه مورد استفاده جهت حل جریان درون مجرا.

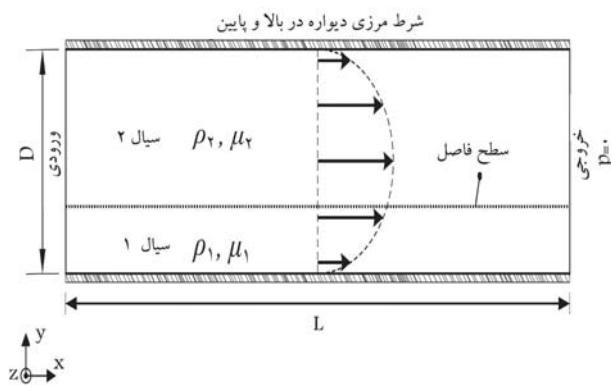
بررسی شده برای جریان مجرا ۱۰۰ و برای جریان پله ۱۰ می باشد. همچنین طول دامنه ۱۰ مورد استفاده قرار گرفته است و مقیاس طولی معیار جهت محاسبه عدد رینولدز نیز عرض دامنه در نظر گرفته شده است. در ابتدا نیز به منظور بررسی اندازه کلی دامنه حل و کیفیت شبکه، دامنه هایی با نسبت طول به عرض ۵، ۱۰ و ۲۰ و کیفیت شبکه مختلف (در هر دو راستا) مقایسه شده اند. 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.

$$RD(\phi) = \left| \frac{\phi_k - \phi_{k-1}}{\phi_{k-1}} \right| \times 100 \quad (18)$$

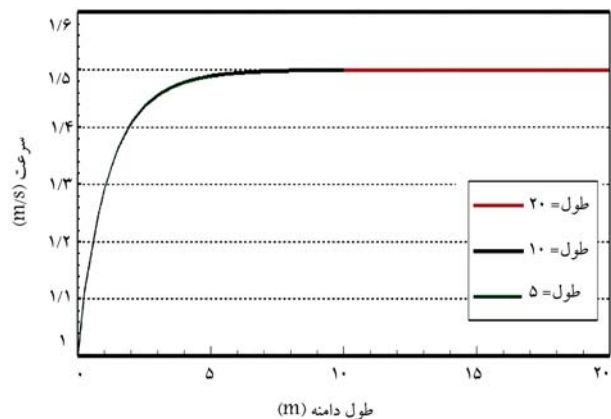
در این رابطه، ϕ و k به ترتیب مقدار کمیت مورد مطالعه و اندیس تکرار می باشند.

۱.۴. اعتبارسنجی حل جریان

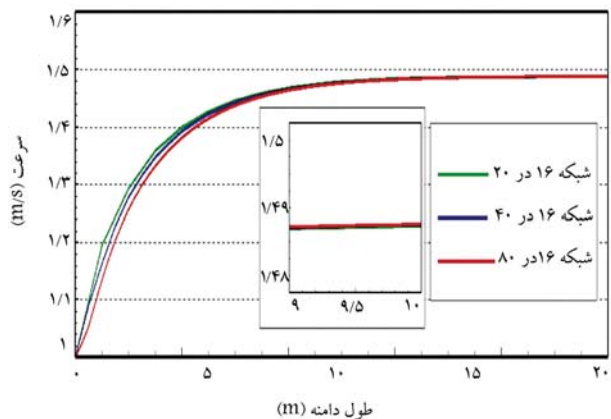
به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل جریان و بررسی دقت حلگر، توابع مربوط به جابه جایی شبکه را غیرفعال نموده و حل جریان درون مجرا برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ با روابط ارائه شده تحلیلی در مرجع^[۲۰] مورد مقایسه قرار گرفته است. جریان درون مجرا یکی از پایه ای ترین جریان ها است که می تواند جهت ارزیابی عملکرد حلگرهای جریان های دوفازی مورد استفاده قرار گیرد. این جریان به کمک هندسه مجرا با یک ورودی و یک خروجی به همراه دیواره های جانبی قابل دریافت می باشد. هندسه و شروط مرزی مورد استفاده در شکل ۷ نمایش داده شده است. پروفیل سرعت و شیب فشار در راستای طولی برای جریان توسعه یافته درون



شکل ۱۱. دامنه، شروط مرزی و شبکه مورد استفاده جهت حل جریان درون مجرا با رویکرد جریان دوفازی.



شکل ۱۲. نتایج حل جریان درون مجرا برای سه دامنه با طول مختلف.

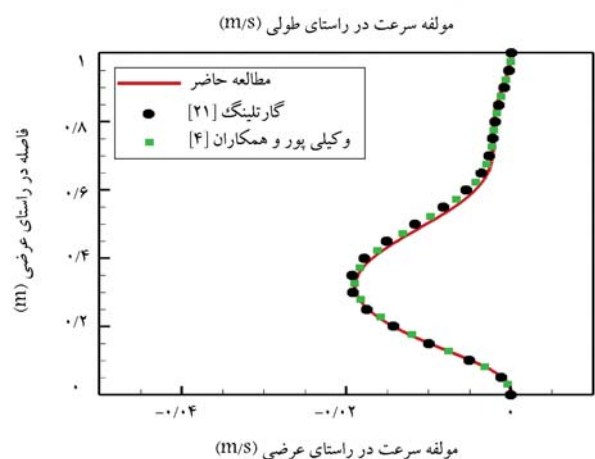
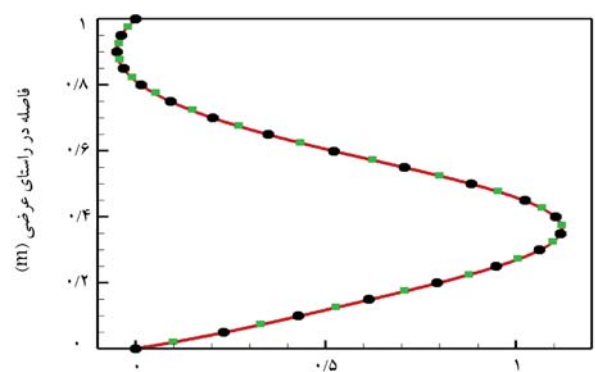


شکل ۱۳. نتایج حل جریان درون مجرا برای سه کیفیت مختلف شبکه در راستای طولی.

به عرض ۵، ۱۰ و ۲۰ در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، افزایش طول بیش از ۵، صرفاً 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 شبکه‌ها با تعداد سلول ۲۰، ۴۰ و ۸۰ در راستای طولی و ۱۶، ۳۲ و ۶۴ برای راستای عرضی نیز در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

مشاهده می‌شود که تعداد شبکه در راستای عرضی اثر چشمگیرتری در دقت



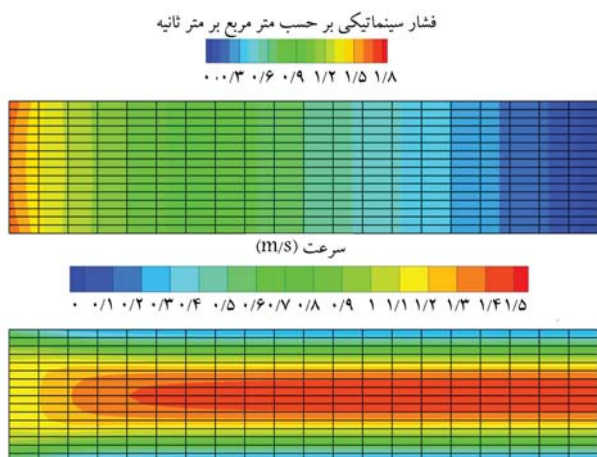
شکل ۱۰. مقایسه میان پروفیل سرعت در راستای طولی و عرضی در مقطع طولی به فاصله ۷ متر از ورودی.

و ۸۰ سلول در راستای عرضی انتخاب شده است. شکل ۱۰ مقایسه میان نتایج پروفیل‌های سرعت در مقطع به فاصله ۷ متر از ورودی را نمایش می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مطابقت خوبی میان نتایج محاسبه شده با نتایج ارائه شده در مراجع [۲۱] دیده می‌شود. در ادامه، با فعال‌سازی توابع مربوط به جابه‌جایی سطح فاصل، عملکرد این توابع و رفتار سطح برای مسائل جریان درون مجرا و جریان پله، با رویکرد جریان‌های دوفازی بررسی می‌گردد.

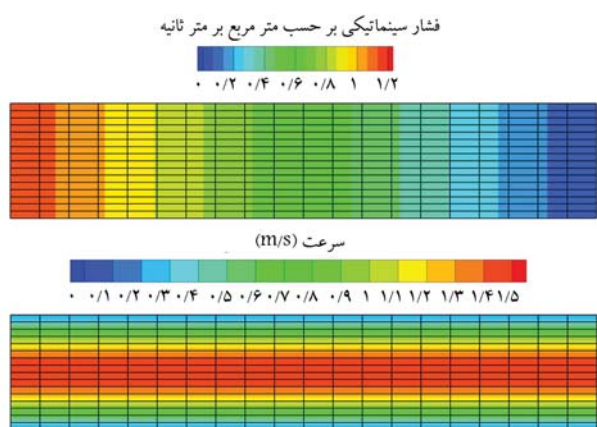
۲.۴. جریان درون مجرا

هندسه و شروط مرزی مورد استفاده جهت حل جریان درون مجرا، مطابق با شکل ۱۱ ارائه شده است.

در این بخش، تحلیل جریان درون مجرا با رویکرد جریان دوفازی صورت می‌گیرد. در این مرحله، توابع مربوط به جابه‌جایی سطح فاصل، فعال شده‌اند. شبکه مکانی مورد استفاده در مجرا، ۱۶ در ۲۰ به ترتیب در راستای عرض و طول دامنه می‌باشد. شرط مرزی سرعت در ورودی مجرا به دو صورت سرعت ثابت با بزرگی ۱ و همچنین پروفایل سهموی سرعت با حداکثر مقدار ۱/۵ اعمال شده است. در خروجی نیز شرط مرزی سرعت به صورت گرادیان صفر و همچنین، شروط مرزی فشار در ورود و خروج به ترتیب گرادیان صفر و مقدار ثابت صفر اعمال گردیده است. شروط مرزی دیواره‌های بالا و پایین نیز شرط عدم لغزش می‌باشند. در رابطه با شروط 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 مجرا در حالت های سطح فاصل افقی و ورودی با سرعت یکنواخت برای عدد رینولدز ۱۰۰.



شکل ۱۷. سرعت و فشار برای جریان درون مجرا در حالت های سطح فاصل افقی و ورودی با سرعت سهموی برای عدد رینولدز ۱۰۰.

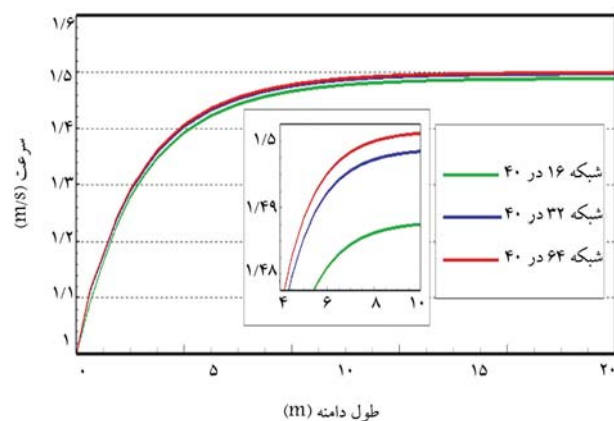
و صرفاً جریان تا حل نهایی خود پیش رفته است. البته در اعداد رینولدز بالا امکان ایجاد امواج موقتی کوچک و سپس میرایی آنها وجود دارد. نتیجه چنین حلی برای عدد رینولدز ۱۰۰ در شکل های ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است.

همچنین از منظر دقت محاسبات، حل نهایی جریان در جریان دوفازی با سطح فاصل در میانه میدان در مقایسه با جریان کاملاً تک فاز 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.

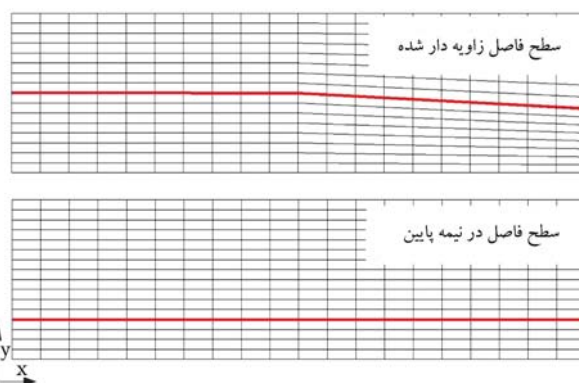
در شرایطی که، سطح فاصل در نیمه پایین یا نیمه بالای دامنه قرار گرفته باشد و سرعت ورودی به صورت یکنواخت تنظیم شود، جریان دو طرف سطح فاصل، سطح فاصل را به نحوی جابجا می کند که دبی ورودی هر طرف به سمت دبی حالت توسعه یافته یا همان سرعت سهموی در خروجی برسد. در واقع تمایل حرکت سطح فاصل به سمتی است که در دو طرف 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 زاویه دهی 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 مجرا برای سه کیفیت مختلف شبکه در راستای عرضی.

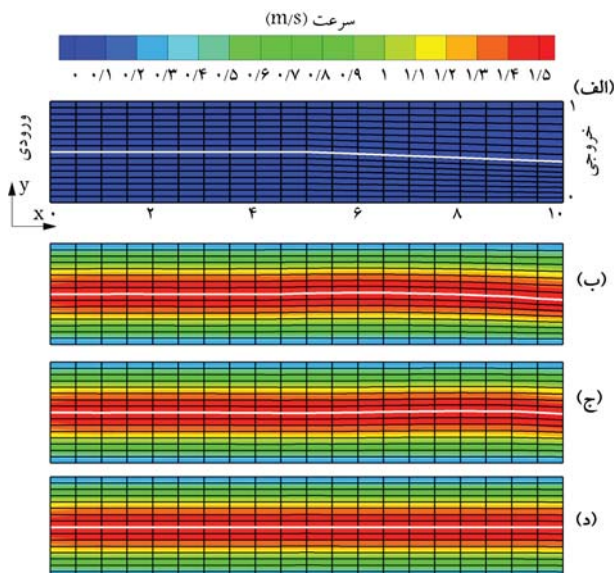


شکل ۱۵. دو آرایش سطح فاصل جهت بررسی عملکرد معادلات و جابه جایی سطح.

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 مجرا، شبکه با نسبت طول به عرض ۱۰ و تعداد سلول ۱۶ در ۲۰ برای دو راستای عرضی و طولی انتخاب شده است.

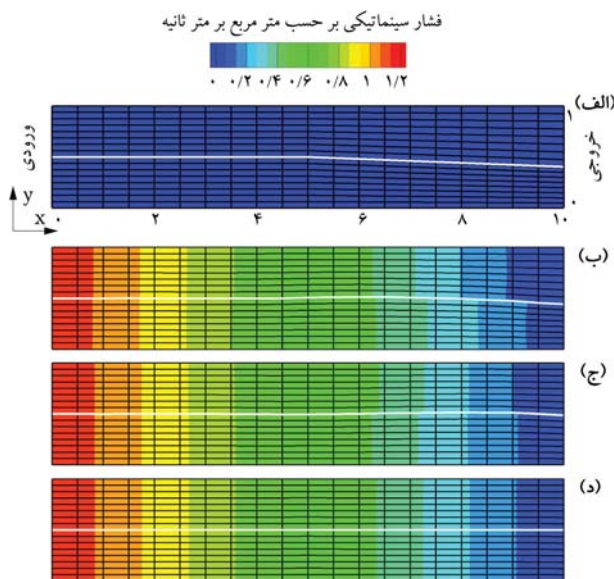
جهت ارزیابی صحت عملکرد معادلات و توابع مربوط به جابه جایی سطح فاصل و شبکه، سه حالت اولیه اصلی برای سطح فاصل در نظر گرفته شده است. ساده ترین حالت قرارگیری سطح فاصل به صورت کاملاً افقی و در میانه عرض مجرا می باشد. در این حالت انتظار می رود شبکه جابه جایی نداشته باشد. حالت دوم که در واقع به عنوان اولین قدم در جابه 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 پایای مجرا، در صورتی که سرعت ورودی به صورت کاملاً توسعه یافته یا به صورت سرعت یکنواخت داده شود، سطح فاصل افقی جابه 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 تثبیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۰. حرکت سطح در حالت سطح فاصل زاویه دهی شده به همراه کانتورهای سرعت در عدد رینولدز ۱۰۰.

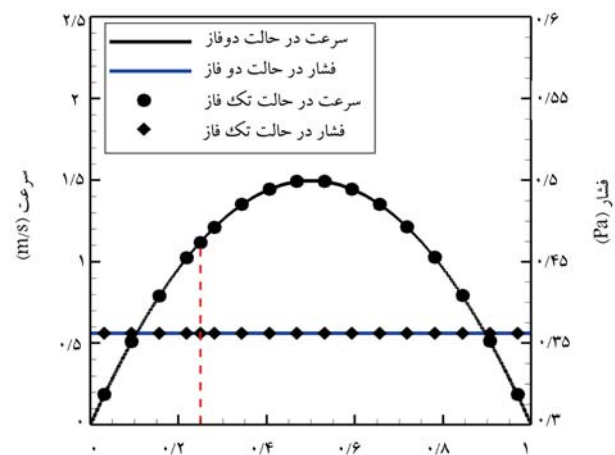


(الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
(ب) شکل گیری موج اولیه و شروع حرکت سطح فاصل؛
(ج) نوسان و خروج امواج بعدی؛
(د) خروج کامل امواج و تثبیت موقعیت سطح فاصل.

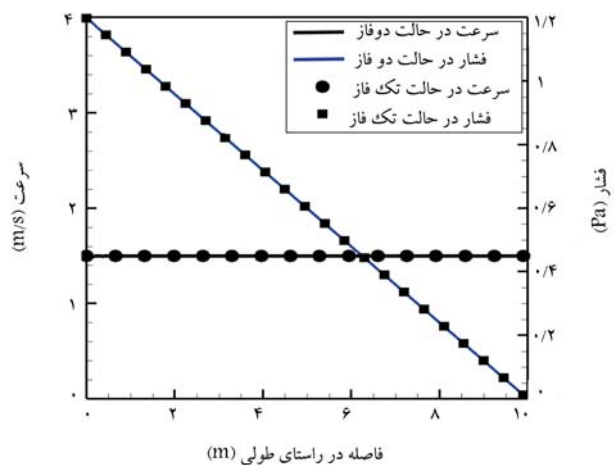
شکل ۲۱. حرکت سطح در حالت سطح فاصل زاویه دهی شده به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱۰۰.

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. در واقع این رفتار می تواند یکی از عوامل محدودکننده حل در جریان های با عدد رینولدز بالا باشد و برای کنترل آن نیاز به ابزارهایی همچون مدیریت شبکه های 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.

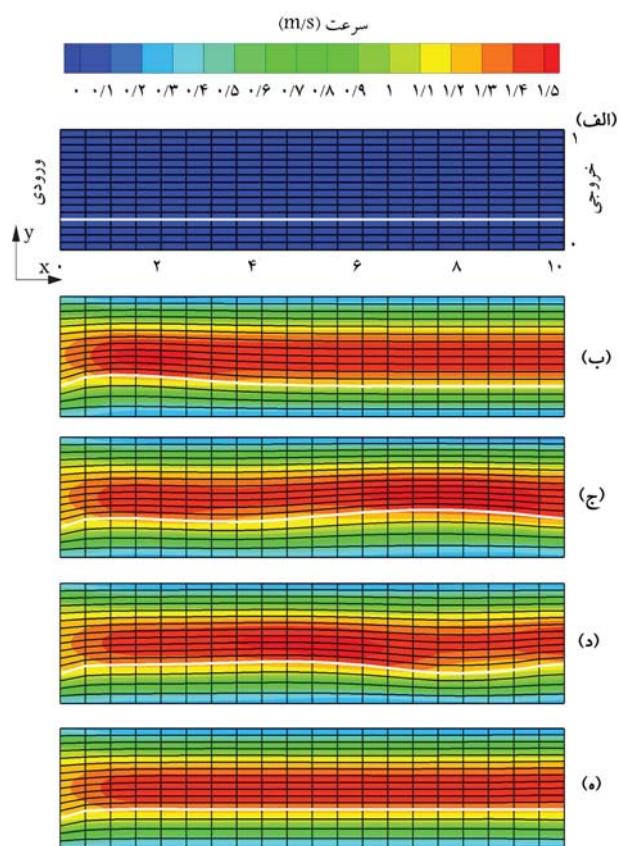
جریان یکنواخت اعمال نمود و در هر دو حالت وجود تقارن هندسی و فیزیکی در بخش نزدیک به ورودی سبب سادگی و پایداری بیشتر حل می گردد. تصاویر مربوط به حرکت سطح و جابه جایی نقاط شبکه به همراه سرعت و فشار در شکل های ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده اند.

همان طور که مشاهده می شود، سطح موقعیت نهایی را به خوبی یافته است و امواج نیز به تدریج میرا شده اند. امواج شکل گرفته، حرکتی نسبتاً یکنواخت داشته و بدون افزایش شدت و دامنه تا رسیدن به حالت نهایی، پیش رفته اند.

۲.۲.۴. سطح فاصل در یک نیمه افقی

دومین حالت جابه جایی سطح، حالتی است که سطح فاصل با فاصله از خط میانی مجرا و به صورت افقی موقعیت دهی اولیه شده است. با اعمال شرط سرعت یکنواخت در ورود، انتظار می رود 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 جابه جایی سطح فاصل برای این حالت در شکل های ۲۲ و ۲۳ ارائه شده است.

در این حالت با پیش روی حل، امواج به تدریج در بخش ورودی میرا شده اند و شکل نهایی را به سطح داده اند، درحالی که امواج بخش پایین دست جریان دامنه بزرگتر و فرکانس کمتری را به خود گرفته اند. به عبارت دیگر، امواج از ورود به سمت خروج، سبب هم افزایی بر یکدیگر شده اند و تا زمان خارج شدن همه یا بخش تحریک



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع موج شدن سطح فاصل؛
ج و د) توسعه موج اولیه تا خروج کامل آن؛
د) خروج کامل امواج و تثبیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۴. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱.

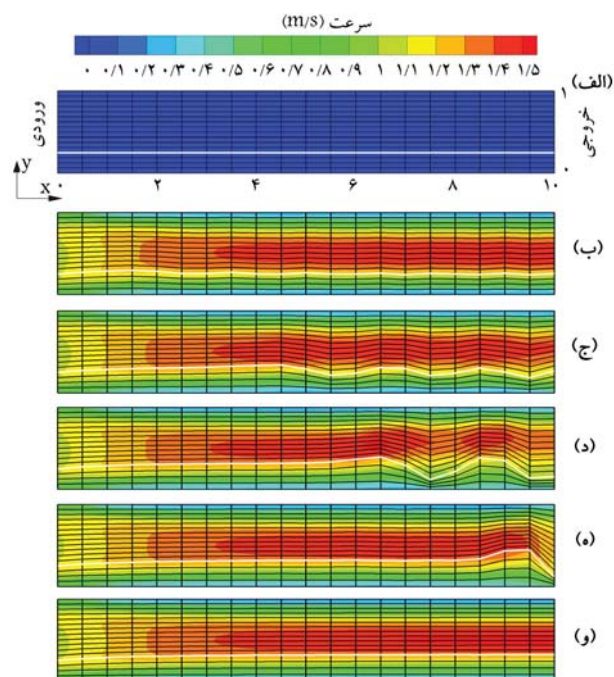
تقلیل دهنده ها^{۲۲} و میراکننده های مصنوعی وجود دارد. حرکت امواج برای عدد رینولدز ۱ در شکل های ۲۴ و ۲۵ نمایش داده شده است.

حرکت ملایم تر امواج از ورود تا خروج و همین طور روند میرایی امواج ابتدایی، به وضوح قابل مشاهده می باشد. در تمام نمونه های مورد بررسی بالا، تمایل سطح فاصل به حرکت و قرارگیری در موقعیتی است که بتواند به تعادل نیرویی برسد. به عبارت دیگر، درموردی که سطح نهایی به صورت افقی است، تعادل نیرویی به معنای برابر شدن فشار دوطرف نیز می باشد. در حالتی که سطح به موقعیت نهایی خود نرسیده باشد، حرکت سطح به سمتی است که فشار کمتری دارد. شاید این تعبیری ملموس تر باشد که ناحیه با فشار بیشتر، سطح را به سمت ناحیه با فشار کمتر سوق می دهد.

۳.۴. جریان بر روی پله

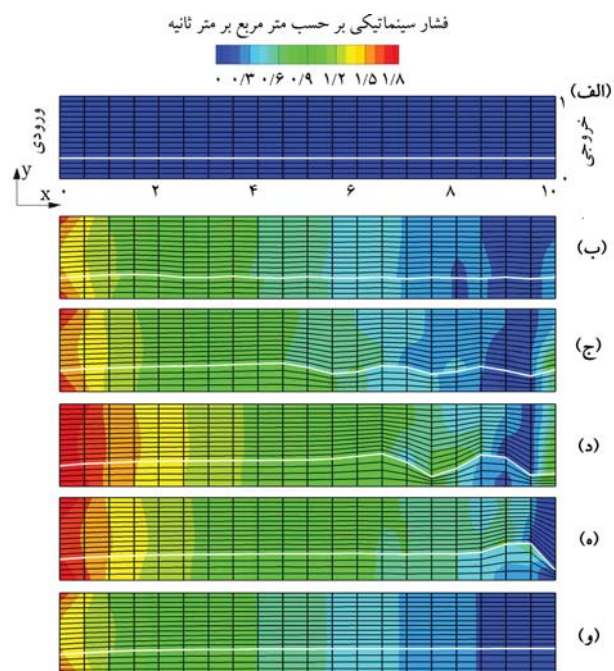
جریان بر روی پله نیز می تواند به عنوان یک نمونه مناسب جهت بررسی عملکرد حرکت سطح فاصل و همچنین رفتار نوسانات شکل گیرنده تا رسیدن به پاسخ پایا مورد توجه قرارگیرد. دامنه و شرایط مرزی برای جریان روی پله در شکل ۲۶ نمایش داده شده است.

شبکه برای جریان روی پله، ۴۰ در ۱۰۰ به ترتیب، در راستای عرض و طول



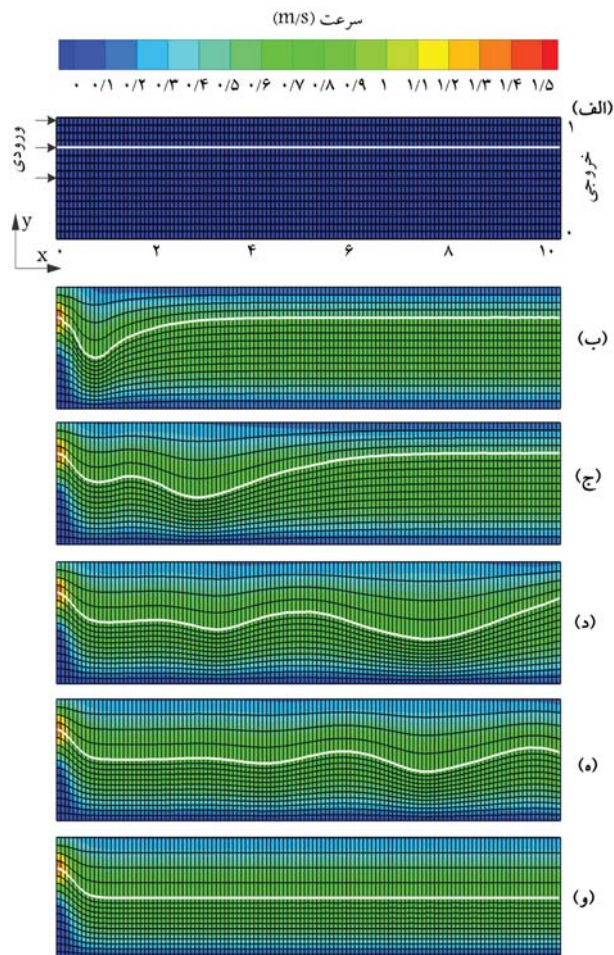
الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع موج شدن سطح فاصل؛
ج تا ه) توسعه موج اولیه تا خروج کامل آن؛
د) خروج کامل امواج و تثبیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۲. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای سرعت در عدد رینولدز ۱۰۰.



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع موج شدن سطح فاصل؛
ج تا ه) توسعه موج اولیه تا خروج کامل آن؛
د) خروج کامل امواج و تثبیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۳. حرکت سطح در حالت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱۰۰.

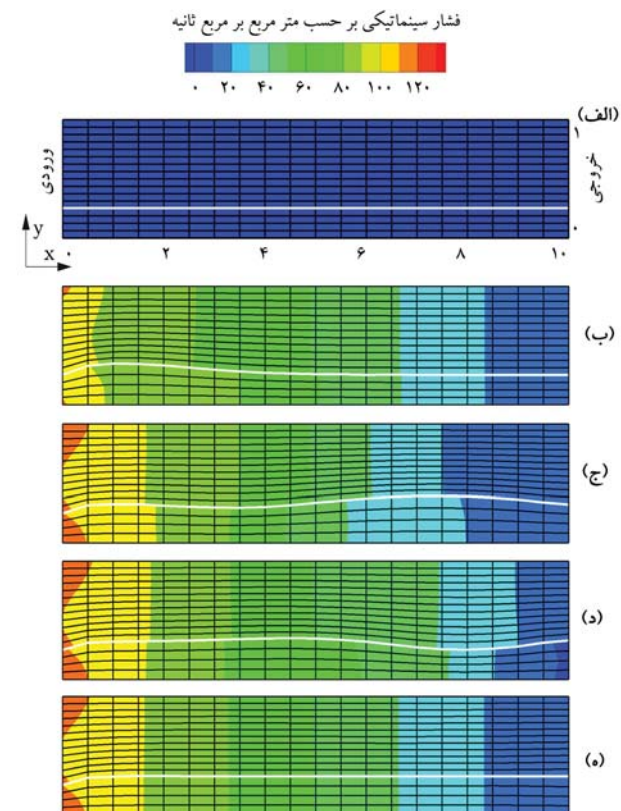


الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) تورفتگی سطح فاصل و شکل گیری موج اول؛
ج) توسعه موج اولیه و تشکیل موج ثانویه؛
د و ه) حرکت امواج تا خروج کامل از دامنه؛
و) تثبیت کامل موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۷. حرکت سطح فاصل در جریان بر روی پله به همراه کانتورهای سرعت در عدد رینولدز ۱۰.

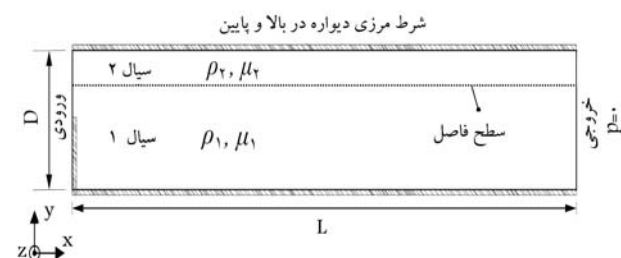
ایده آل و نهایی خود قرارداد، اما دیگر نقاط سطح سیال با شکل‌گیری جریان، شروع به تغییر شکل می‌نمایند. مراحل حرکت سطح سیال و رفتار امواج شکل گرفته تا رسیدن به حل نهایی پایا به صورت شکل‌های ۲۷ و ۲۸ ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، پس از ورود جریان به ناحیه 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 ابزارهای کنترل شدت موج همچون ضرایب تقلیل و 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. در اینجا نیز حرکت سطح با مشاهده توزیع فشار تاحد زیادی قابل توجیه می‌باشد، به نحوی که سطح به سمت ناحیه با فشار پایین متمایل شده و تا رسیدن به تعادل نیرویی نهایی، این حرکت رفت و برگشتی سطح ادامه داشته است.



الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
ب) شکل گیری امواج اولیه و شروع موج شدن سطح فاصل؛
ج و د) توسعه موج اولیه تا خروج کامل آن؛
د) خروج کامل امواج و تثبیت موقعیت سطح فاصل.

شکل ۲۸. حرکت سطح فاصل در نیمه پایین مجرا به همراه کانتورهای فشار در عدد رینولدز ۱۰.

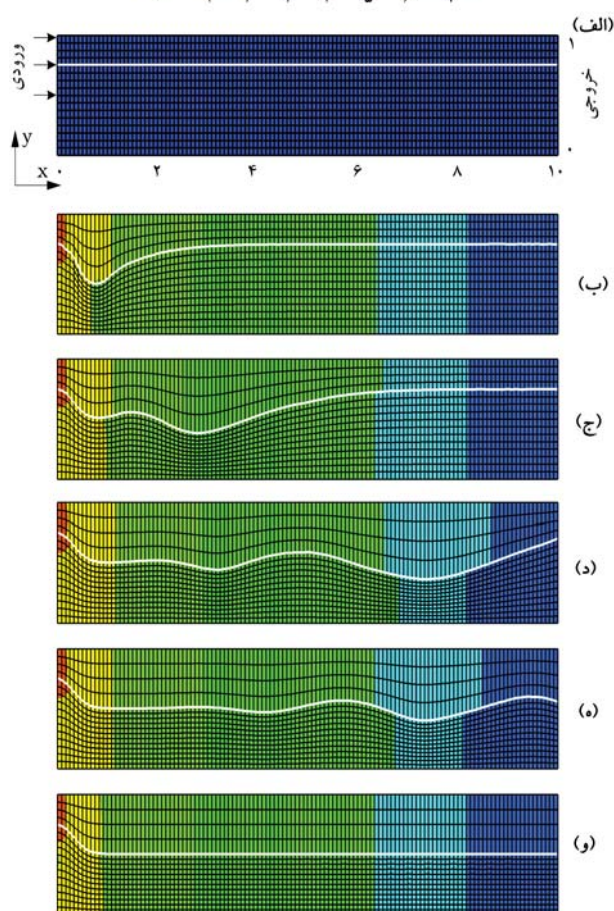


شکل ۲۹. دامنه حل، شرایط مرزی و شبکه برای حل جریان بر روی پله.

می‌باشد. در جریان بر روی پله، سیال پس از ورود به صورت توسعه یافته به میدان حل، با عبور از یک پله، با فضایی واگراتر نسبت به ورودی مواجه می‌شود. این فضا در کنار تمایل سیال، جهت حرکت روبه جلو، سبب شکل‌گیری گردابه در ناحیه پله یا در پایین دست جریان می‌گردد که بسته به عدد رینولدز و دیگر مشخصات جریان می‌تواند هم از جهت اندازه و هم از نظر تعداد، توسعه یابد. در این بررسی، به دلیل عدم وجود شرایط با اعداد رینولدز بالا، صرفاً عدد رینولدز ۱۰ مورد ارزیابی قرار گرفته است. هرچند اعداد رینولدز بالاتر نیز می‌تواند به عنوان زمینه تحقیقاتی جذابی در آینده مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به موقعیت اولیه سطح فاصل و همچنین جریان ورودی توسعه یافته، انتظار می‌رود که نقطه اتصال سطح و ورودی بدون تغییر بماند. چرا که در موقعیت

فشار سینماتیکی بر حسب متر مربع بر متر ثانیه



(الف) سطح فاصل در حالت اولیه؛
(ب) تورفتگی 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) تثبیت 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 بخش های حلگر و نحوه اعمال معادلات جریان و شروط سطح فاصل به منظور رسیدن به حل همزمان معادلات و شروط مرزی سطح فاصل در بستر فوم - اکستند تشریح گردید. حلگر ایجاد شده برای جریان های با عدد رینولدز پایین، با موفقیت آزموده شد. نمونه های آزمون جریان درون مجرا و جریان روی پله، با موقعیت های اولیه مختلف برای سطح فاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. برخی از نتایج حاصل از این پژوهش به به شرح زیر است:

- ترند سلول با ضخامت ناچیز می تواند به منظور اعمال شروط مرزی سطح فاصل و به منظور ایجاد سلول های فعال در دستگاه معادلات وارد شوند. این سلول ها عملاً به عنوان سلول های محاسباتی مرزی و ضمنی، مورد استفاده قرار گرفته اند؛

- ترند 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 دیدگاه ها وجود ندارد و به راحتی با رویکرد حجم محدود مطابقت دارد؛
- روند ارائه شده در بستر فوم - اکستند، قابلیت کار با کلاس ها و ابزارهای جابه جایی شبکه با روش های مختلف را دارد؛
- در صورت بهره بردن از قابلیت های موجود در بستر فوم - اکستند و در اختیار گرفتن کلاس ها و اوپراتورهای گرادینتی، قابلیت حل موازی نیز به خوبی حفظ می گردد؛
- در حل جریان های دوفازی با اعداد رینولدز پایین، امواج شکل گرفته، می تواند 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، به نحوی که با خروج یا میرایی این موج اول، عملاً سطح فاصل موقعیت خود را پیدا کرده و به سمت تثبیت شدن پیش رفته است؛
- فرایند انجام شده در واقع، گام ابتدایی و شروع برای رسیدن به یک حلگر، برای انواع رژیم جریان ها و در مراحل آینده با خواص متفاوت در هریک از دوفاز، به همراه در نظر گرفتن مباحث دمایی و انتقال جرم می باشد.

فهرست علائم

- T:** تانسور تنش؛
D: تانسور نرخ 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 : مولفه های بردار یکه عمود؛
 S_x, S_y, S_z : مولفه های بردار اول یکه مماس؛
 t_x, t_y, t_z : مولفه های بردار دوم یکه مماس؛
u: بردار سرعت سیال (m/s)؛
 u, v, w : مولفه های 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_{ij} : مولفه های تنش برشی؛
 σ : کشش سطحی (kg/s^2)؛
 ϕ : هر متغیری از جریان؛
 \vec{L}, \vec{G} : 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. Rhie & 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/flid.523>.
12. Ahmadi, A., Badii, 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/flid.1414>.
13. Holzmann, T., 2016. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®. Loebe, Germany: Holzmann CFD. <https://Holzmann-cfd.de>.
14. Rhie, 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. Ashrafizadeh, 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/flid.1650110704>.

سه بخش اصلی از معادلات دینامیکی در ادامه ارائه شده‌اند. [۴]

$$\begin{aligned} \mathbf{n.T.n} = \forall \mu \left(n_x n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y n_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z n_x \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x n_y \frac{\partial v}{\partial x} + n_y n_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_z n_y \frac{\partial v}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x n_z \frac{\partial w}{\partial x} + n_y n_z \frac{\partial w}{\partial y} + n_z n_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n.T.t} = \mu \left(n_x t_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x t_y \frac{\partial u}{\partial y} + n_x t_z \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ \left. + n_y t_x \frac{\partial v}{\partial x} + n_y t_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_y t_z \frac{\partial v}{\partial z} \right. \\ \left. + n_z t_x \frac{\partial w}{\partial x} + n_z t_y \frac{\partial w}{\partial y} + n_z t_z \frac{\partial w}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x t_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y t_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z t_x \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x t_y \frac{\partial v}{\partial x} + n_y t_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_z t_y \frac{\partial v}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x t_z \frac{\partial w}{\partial x} + n_y t_z \frac{\partial w}{\partial y} + n_z t_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n.T.s} = \mu \left(n_x s_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x s_y \frac{\partial u}{\partial y} + n_x s_z \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ \left. + n_y s_x \frac{\partial v}{\partial x} + n_y s_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_y s_z \frac{\partial v}{\partial z} \right. \\ \left. + n_z s_x \frac{\partial w}{\partial x} + n_z s_y \frac{\partial w}{\partial y} + n_z s_z \frac{\partial w}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x s_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y s_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z s_x \frac{\partial u}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x s_y \frac{\partial v}{\partial x} + n_y s_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_z s_y \frac{\partial v}{\partial z} \right. \\ \left. + n_x s_z \frac{\partial w}{\partial x} + n_y s_z \frac{\partial w}{\partial y} + n_z s_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

سه مولفه گرادینان برای سه جهت دستگاه مختصات به صورت زیر حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial y}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. - \frac{\partial \phi}{\partial t_x} \left(\frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial \phi}{\partial t_x} \left(\frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t_x} \right) \right) \\ \left/ \left(\frac{\partial x}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial y}{\partial t_x} \right) \right. \right. \\ \left. - \frac{\partial y}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial z}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial y}{\partial t_x} - \frac{\partial y}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial y} = \left(- \frac{\partial \phi}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial \phi}{\partial t_x} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial \phi}{\partial t_x} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right) \\ \left/ \left(\frac{\partial x}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial y}{\partial t_x} \right) \right. \right. \\ \left. - \frac{\partial y}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial z}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial y}{\partial t_x} - \frac{\partial y}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial z} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial y}{\partial t_x} - \frac{\partial y}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. - \frac{\partial \phi}{\partial t_x} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t_x} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial \phi}{\partial t_x} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t_x} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right) \\ \left/ \left(\frac{\partial x}{\partial s} \left(\frac{\partial y}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial y}{\partial t_x} \right) \right. \right. \\ \left. - \frac{\partial y}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial z}{\partial t_x} - \frac{\partial z}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial z}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial t_x} \frac{\partial y}{\partial t_x} - \frac{\partial y}{\partial t_y} \frac{\partial x}{\partial t_x} \right) \right) \end{aligned} \quad (26)$$

ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان

سام سهام (کارشناس ارشد)

سعید کریمیان علی آبادی* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دربی ۴۰، شماره ۱، ص. ۱۱۱-۱۱۸، (پژوهشی)

در این تحقیق، دو نوع توربین محور عمودی از منظر آیرودینامیکی 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 برابری هستند. این مشخصات متناسب با شرایط اقلیمی شهر زاهدان و توزیع سرعت باد میانگین در این منطقه لحاظ شده است. برای ارزیابی آیرودینامیکی 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 روتور 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 دلار نوع H - شکل بسیار است و این موضوع موجب کاربردی‌تر شدن توربین V-شکل در مقیاس شهری و کوچک می‌شود.

واژگان کلیدی: ارزیابی اقتصادی، توربین بادی محور عمودی، عملکرد آیرودینامیکی.

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 موقعیت جغرافیایی ایران در ناحیه کم‌فشار 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 می‌باشند.^[۴۳] این قسمت‌ها شامل بخش اعظمی از جنوب شرقی ایران است که به‌طور کلی بادخیز تلقی می‌شود. اولین تجربه ایران در نصب توربین‌های بادی با هدف تولید برق به سال ۱۹۹۴ برمی‌گردد. در آن زمان،

مصرف 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 همین رو، بسیاری از کشورها سعی دارند تا وابستگی خود را به سوخت‌های فسیلی کاهش دهند و انرژی مورد نیاز خود را به واسطه انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی باد و خورشید تأمین کنند. این نوع از انرژی که انرژی سبز 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 تقسیم‌بندی می‌شوند که به‌طور معمول توربین‌های محور افقی نسبت به نوع محور عمودی توان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۳/۲، اصلاحیه ۱۴۰۲/۴/۲۰، پذیرش ۱۴۰۲/۵/۲۲.

استناد به این مقاله:

سهام، سام و کریمیان علی‌آبادی، سعید، ۱۴۰۳. ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان. مهندسی مکانیک شریف،

۴۰(۱)، صص. ۱۱۸-۱۱۱. DOI:10.24200/J40.2023.62309.1680

دو مزرعه توربین بادی با توان ۵۰۰ کیلووات در منجیل و رودبار، واقع در استان گیلان احداث گردید که انرژی سالیانه آن به بیش از ۱/۸ میلیون کیلووات ساعت رسید.^[۴] دومین 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 ۵۵۰ کیلوواتی و یک توربین ۵۰۰ کیلوواتی است.^[۵] از دیگر نقاط ایران که از توربین‌های بادی بهره می‌برند، می‌توان به بینالود در خراسان و لوتاک در سیستان و بلوچستان اشاره کرد.

قریشی و رحیمی به بررسی جزئیات انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و همچنین به ائتلاف انرژی در برخی از صنایع پرداختند و پیشنهاداتی برای بهبود این مشکل ارائه دادند.^[۶] علمدیری و همکاران به بررسی پتانسیل انرژی بادی در ایران پرداختند. آنها سرعت باد را در سال ۲۰۰۷ و در ارتفاع‌های 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 هوایی ایران تخمین زدند.^[۷] مصطفی پورامکان سنجی بهره‌برداری از انرژی باد در منطقه یزد ایران را بررسی کرد. او سرعت باد را به صورت ماهانه و سالیانه در ارتفاع‌های مختلف در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ در ۱۱ ایستگاه هواشناسی مورد ارزیابی قرار داد. طبق تحقیقات او، سرعت باد میانگین سالیانه در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی کمتر از ۴/۵ متر بر ثانیه بوده که برای نصب توربین‌های بادی (به‌خصوص توربین‌های بزرگ) نامناسب است.^[۸] 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 انرژی بادی به نسبت بهتری برای نصب توربین‌های بادی کوچک است.^[۹] موسوی و همکاران به مقایسه روش‌های موجود برای تولید برق با توربین بادی در ایران پرداختند و بیان کردند که نیروگاه‌های متکی به انرژی 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 انرژی‌های پاک از جمله توربین بادی، یکی از رویکردهای مناسب برای کشور است.^[۱۰] با توجه به اهمیت انرژی باد و مزایای آن، بسیاری از محققان به بررسی پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلف ایران و جهان پرداختند که می‌توان به شهرهایی مانند یزد، تهران^[۱۱] و منجیل^[۱۲] در ایران و کشورهای ترکیه،^[۱۳] یونان،^[۱۴] آلمان،^[۱۵] ایتالیا،^[۱۶] بحرین،^[۱۷] عربستان^[۱۸] و پاکستان^[۱۹] اشاره کرد. بنابراین، با توجه به آمارهای ذکر شده، واضح است که به‌طور کلی کشور ایران با وجود برخی مناطق مناسب از نظر انرژی باد، نسبت به سایر کشورها در مقام پایین‌تری قرار گرفته است که این مسئله به تنهایی 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 آبرودینامیکی دو نوع توربین محور عمودی H - شکل و V - شکل متناسب با شرایط جوی و سرعت‌های 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 فراوانی 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

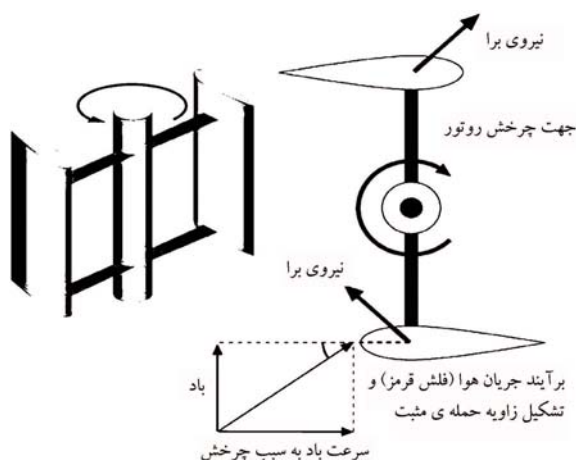
ایجاد تفاوت میان دو توربین می‌شود، استفاده از پره‌های زاویه‌دار در نوع V - شکل است. در نهایت، پس از بررسی عملکردی و فنی توربین‌ها، هزینه‌های اجرای طرح و تخمینی از ارزیابی اقتصادی مربوط به هر یک از آنها ارائه شده است.

۲. معرفی اجزاء و عملکرد توربین محور عمودی

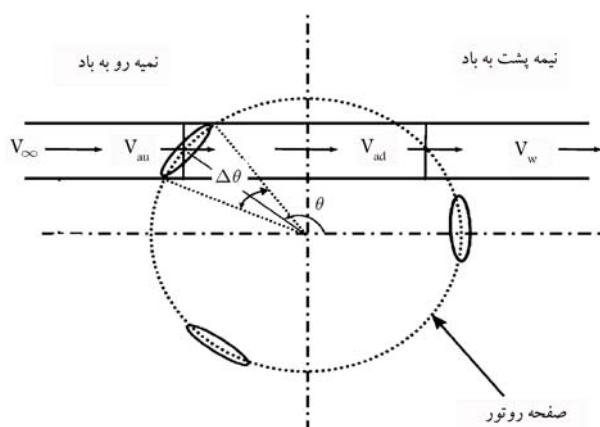
همانطور که در بخش پیشین بیان شد، توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را به کمک پره‌ها دریافت کرده و با دوران روتور این انرژی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و به شفت نگه‌دارنده پره‌ها منتقل می‌کنند. انتهای دیگر این شفت در جعبه دنده قرار دارد و در آن سرعت دوران شفت افزایش یافته و در نهایت وارد ژنراتور می‌شود. این توضیح کوتاه، اساس کار توربین‌های بادی است. اما نحوه دریافت انرژی باد توسط پره‌ها بنا به نوع توربین متفاوت است. برخی از توربین‌ها مانند نوع ساوینوس براساس نیروی پسا و برخی بر اساس نیروی برآ عمل می‌کنند. اما در توربین‌های داریوس (مشابه توربینی که در این تحقیق استفاده شده است) از نیروی برآ بهره گرفته شده است و پره‌ها مشابه شکل ۱، به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا مقدار پسا در مقابل جریان کم بوده و از طرف دیگر مقدار برآی تولید شده توسط پره‌ها بیشتر باشد. این نیروی برآ که ناشی از اختلاف فشار میان سطوح پرفشار و کم‌فشار پره است، به‌طور 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، به‌طور معمول ژنراتور و جعبه‌دنده در قسمت پایینی برج (نزدیک زمین) نصب می‌شود؛
- **پره‌های توربین:** پره‌های توربین واسط تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی بوده و از آنجا که تولید انرژی خروجی وابستگی به‌نسبت زیادی به پره‌های توربین دارد، بنابراین از نظر آبرودینامیکی جزو قسمت‌های اصلی و مهم به‌شمار می‌رود. این قسمت نیاز به طراحی دقیق و مناسبی دارد، چرا که دارای رابطه مستقیمی با تولید نیرو و به چرخش درآوردن روتور است؛
- **جعبه دنده و ژنراتور:** جعبه‌دنده باعث افزایش سرعت دورانی محور خروجی از



شکل ۱. نحوه عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس (براساس نیروی برآ).^[۲۲]



شکل ۳. مسیر جریان در روش دی ام اس تی. [۲۳]

نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد) نشان می‌دهد. به‌طور 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_d و a_u است. این ضرایب که نشان‌دهنده میزان تأثیر پره بر جریان عبوری از روتور است، توسط روش سعی و خطا و با کمک روابط مومنتوم در دو صفحه مجزا از هم (برای دو نیمه روتور) به‌دست می‌آیند.

$$V_{\infty} > V_{au} > V_e > V_{ad} > V_w \quad (1)$$

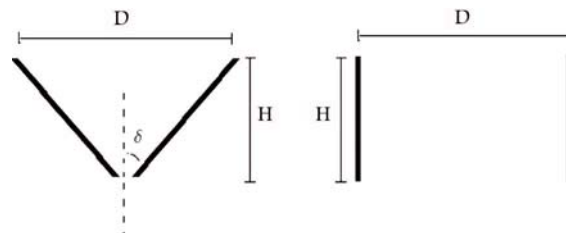
$$V_{au} = a_u V_{\infty} \quad (2)$$

$$V_e = V_{\infty} (2a_u - 1) \quad (3)$$

$$V_{ad} = a_d V_e \quad (4)$$

در روابط فوق، پارامترهای V_{ad} و V_{au} 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_d و a_u نیز به ترتیب ضریب القایی محوری 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 ضریب 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 آنجا که در محاسبات آیرودینامیک برای دستیابی به نیروهای برآ و پسا، مبنای محاسبات 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 آنجا که پره‌های توربین دارای طول محدودی هستند، بنابراین مقداری از جریان در نوک پره از سطح پرفشار پره به سطح کم‌فشار 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.

مشخصه	H - type	V - type
نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۳ عدد	۳ عدد
طول وتر پره	۳/۰ متر	۳/۰ متر
قطر روتور	۶ متر	۶ متر
طول پره	۶ متر	۶ متر
ارتفاع روتور	۶ متر	۴/۲۵ متر
زاویه دلتا	۰	۴۵
سرعت چرخش روتور	۵۰ دور بر دقیقه	۵۰ دور بر دقیقه

جعبه‌دنده شده که موجب انتقال سرعت به نسبت پایین روتور به سرعت مناسب برای ژنراتور می‌شود. در نهایت، محور خروجی از جعبه‌دنده با ژنراتور در ارتباط بوده و توسط ژنراتور انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

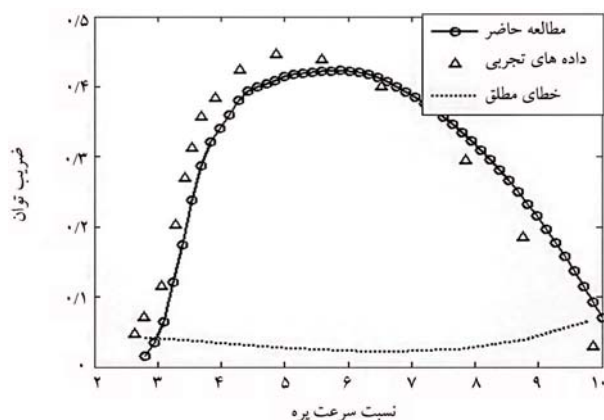
همانطور که گفته شد، در این تحقیق از دو نوع توربین استفاده شده است؛ نوع اول استفاده از پره‌های مستقیم (H - شکل) و نوع دوم روتور با پره‌های زاویه‌دار است که به آن توربین V - شکل می‌گویند. شماتیک توربین‌ها در شکل ۲ و مشخصات ابعادی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای مقایسه دو توربین با شرایط هندسی مشابه، از نسبت طول پره به قطر روتور یکسان (نسبت منطری یکسان) استفاده شده است. برای این منظور، در حالت H - شکل، قطر روتور ۶ متر در نظر گرفته شده است و براساس این قطر، ارتفاع روتور در توربین V - شکل معادل ۴/۲۵ متر خواهد بود. در شماتیک شکل ۲ نیز مشخص است که با ثابت نگه داشتن قطر روتور H - شکل از قسمت بالایی 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 و 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 آزیموت ($\Delta\theta$)^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 مبنا.

نوع ایرفول	ناکا ۱۵°
تعداد پره	۲ عدد
وتر پره	۱۵m / °
ارتفاع پره	۵/۱m
قطر روتور	۵m
سرعت چرخش	۱۶۲/۵rpm



شکل ۵. اعتبارسنجی مدل دی ام اس تی با داده‌های تجربی. [۲۶]

نیمه روتور به صورت جداگانه تکرار می‌شود.

$$f = \frac{Bc}{\lambda \pi r} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(C_n \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} - C_t \frac{\sin \theta}{|\cos \theta| \cos \delta} \right) \left(\frac{W}{V_a} \right)^2 d\theta \quad (13)$$

$$a_{new} = \pi / (f + \pi) \quad (14)$$

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، Q گشتاور پره متناسب با هر زاویه آزمون، \bar{Q} گشتاور میانگین روتور، $C_{\bar{Q}}$ ضریب گشتاور میانگین، λ نسبت سرعت پره و A مساحت جاروب شده توسط روتور توربین است.

$$Q(\theta) = r.F_T(\theta) \quad (15)$$

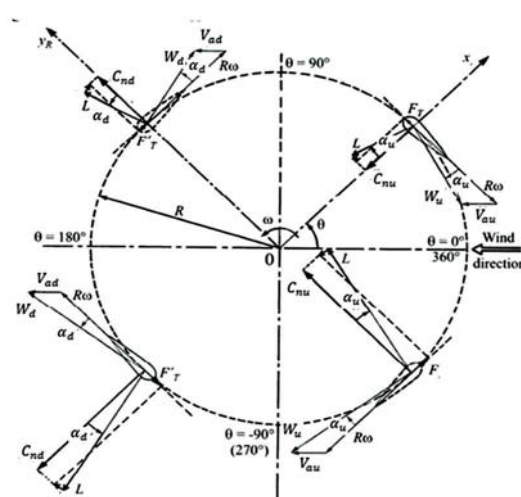
$$\bar{Q} = \frac{N}{\pi} \int Q d\theta \quad (16)$$

$$C_{\bar{Q}} = \frac{\bar{Q}}{\sqrt{1/2} \cdot \rho A R V_{\infty}^2} \quad (17)$$

$$C_P = \lambda \cdot C_{\bar{Q}} \quad (18)$$

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 سندی^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 گردابه‌هایی تحت عنوان گردابه‌های نوک پره^۴ و به دنبال آن جریان فروزش^۵ و تغییر زاویه سرعت نسبی جریان و در نهایت کاهش زاویه حمله موثر در این نواحی ایجاد شود که نتیجه آن، کاهش عملکرد آیرودینامیکی 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 القایی ناشی از افت جریان از نوک پره است که از طریق روابط پرانتل به دست می‌آید. [۲۵]

$$V_n = V_a \cos \theta \cos \delta \quad (5)$$

$$V_t = r\omega - V_a \sin \theta \quad (6)$$

$$W = \sqrt{(V_n)^2 - (V_t)^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \sin^{-1} (V_n / W) \quad (8)$$

در گام بعد می‌توان ضرایب نیروی برآ و پسا و به دنبال آن با تغییر دستگاه مختصات، 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 پره، 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.

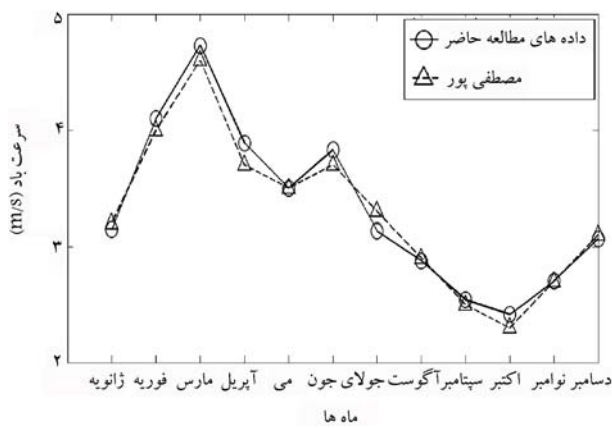
$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (9)$$

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (10)$$

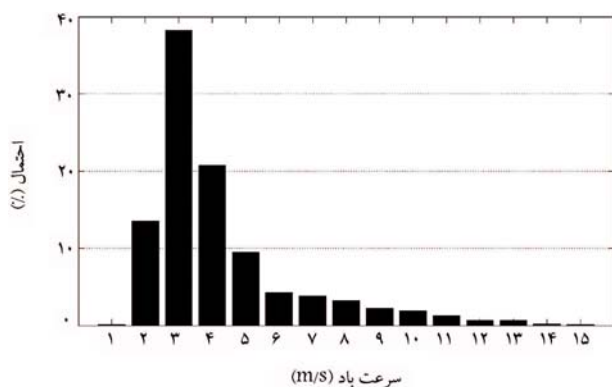
$$F_N(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_n \rho c \Delta h W^2 \right) \quad (11)$$

$$F_T(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_t \rho c \Delta h W^2 \right) \quad (12)$$

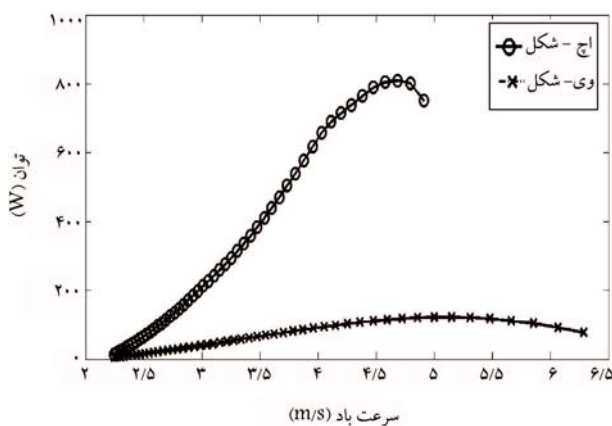
با محاسبه ضرایب نیروی عمودی و مماسی و با کمک روابط ۱۳ و ۱۴ می‌توان مقدار ضریب القایی جدید را به دست آورد. میزان همگرایی مدل ۱/۰۰۰۰° در نظر گرفته شده است. با محاسبه ضریب القایی جدید، سرعت نسبی جریان، زاویه حمله و ضرایب نیروهای مماسی و عمودی مجدداً محاسبه می‌شوند و این حلقه تا زمانی که به همگرایی مناسب برسد، برای هر المان از پره، هر زاویه آزمون و برای هر دو



شکل ۵. اعتبارسنجی پروفیل سرعت باد با مرجع [۲۸]



شکل ۶. احتمال رخداد سرعت های باد مختلف در طول سال (زاهدان).



شکل ۷. منحنی توان توربین.

توانی در حدود ۸۱۰ و ۱۲۰ وات در سرعت بادهای ۴/۶ و ۴/۸ متر بر ثانیه حاصل کنند.

آنچه که از شکل ۸ استنباط می شود، کاهش ۸۵ درصدی توان توربین V - شکل نسبت به نوع H - شکل است. این موضوع ناشی از دو دلیل اصلی می باشد که عبارتند از: کاهش گشتاور خروجی از توربین به دلیل نزدیک تر شدن المان های پره به محور توربین و همچنین کاهش مساحت موثر روتور 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 ۳۷ درصد نسبت به حالت H - شکل

پره ۷ و محور قائم نشان دهنده ضریب توان توربین است. مشاهده می شود 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 ۵) 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 داده های تجربی را می توان 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 ۶۰۰ هزار نفر و مساحتی به میزان ۷۸ کیلومتر مربع است. این شهر در ناحیه بادخیز قرار گرفته است که در طول سال در معرض بادهای قدرتمند فصلی در جهات مختلف قرار می گیرد. از معروف ترین آن ها می توان به بادهای ۱۲۰ روزه اشاره کرد. روش محاسبه سرعت باد برای هر ماه (به صورت جداگانه) از میانگین گیری سرعت باد ماهانه در سه سال متوالی ۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰ و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین به دست آمده است. می توان پروفیل سرعت باد برای شهر زاهدان را مطابق روشی که ذکر شد، در شکل ۶ مشاهده کرد. همچنین، منبع داده های مورد استفاده با اطلاعات مرجع ۲۷ مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. پروفیل سرعت این شهر مبنای ارزیابی توربین مورد نظر است. با توجه به نمودار این شکل، مشاهده می شود که سرعت میانگین در طول سال برابر $3/77 \text{ m/s}$ می باشد و بیشینه و کمینه سرعت متوسط باد به ترتیب در حدود $4/87 \text{ m/s}$ و $2/9 \text{ m/s}$ بر ثانیه است و در ماه های فوریه و اکتبر رخ می دهد. مطابق شکل ۷، با توزیع احتمال سرعت باد استنباط می شود که احتمال رخداد سرعت باد در بازه ۳ الی ۴ متر بر ثانیه به ترتیب در حدود ۳۸ و ۲۱ درصد است که از بیشترین احتمال برخوردار است.

در ادامه، با توجه به رابطه ۱۹ و ۲۰ می توان 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 ۲۰ پس از محاسبه توان باد، می توان با در نظر گرفتن یک سال (معادل ۸۷۶۰ ساعت)، بیشینه انرژی باد منطقه را محاسبه کرد. بنابراین، با توجه به توزیع سرعت باد زاهدان و این روابط می توان و انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود 98 W/m^2 و 855 kWh/m^2 تخمین زد.

$$P \sum_{n=1}^{15} \frac{1}{V} \rho V_n^3 \cdot p \quad (19)$$

$$E = P_t 8760 \quad (20)$$

۶. نتایج

با توجه به توزیع سرعت باد و احتمال رخداد آن در شهر زاهدان، مشاهده می شود که بیشترین پتانسیل انرژی باد در محدوده سرعت ۳ الی ۴ متر بر ثانیه رخ می دهد. با رسم منحنی توان توربین های مورد نظر، نمودارهای شکل ۸ حاصل می شود. مشاهده می شود که توربین های H - شکل و V - شکل به ترتیب توانسته اند بیشینه

جدول ۳. ارزیابی عملکرد توربین H - شکل و V - شکل.

نوع توربین	بیشینه توان (W)	گشتاور منفی (N.m)	انرژی تولیدی سالیانه (KWh)	بیشینه ضریب توان
H - شکل	۸۱۰	۱۳۵	۲۴۵۰	۰/۴۵
V - شکل	۱۲۰	۱۵	۴۵۰	۰/۲۸

۷. تخمین هزینه تولید توان

به کمک ارزیابی اقتصادی می‌توان هزینه‌های تولید انرژی و میزان سرمایه‌گذاری لازم را تخمین زد. هدف از ارزیابی اقتصادی، مقایسه مالی طرح‌های مختلف و اطمینان از به‌صرفه 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 سرویس و تعمیر و نگهداری تقسیم می‌شود. در رابطه ۲۱، C_I بیانگر هزینه اولیه توربین و C_{OM} هزینه‌های جاری پروژه بوده که به‌صورت 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 نرخ تورم I و برای n سال به‌صورت رابطه ۲۲ بیان کرد. در نهایت، با توجه به تولید انرژی سالیانه (AEP) برای هر توربین، می‌توان میزان هزینه لازم برای تولید هر کیلووات ساعت انرژی را به کمک رابطه ۲۳ نیز محاسبه کرد.

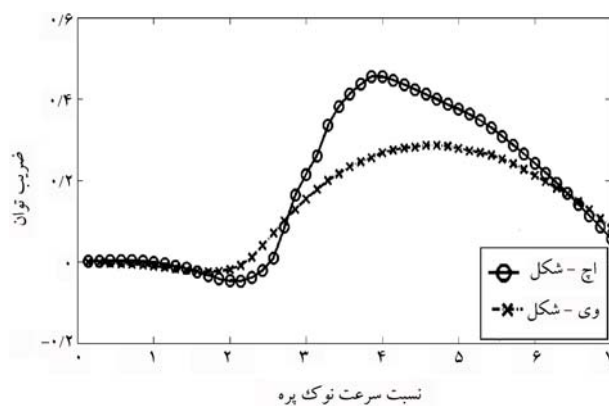
$$NPV = \frac{C_I}{n} \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (22)$$

$$C = \frac{NPV}{AEP} \quad (23)$$

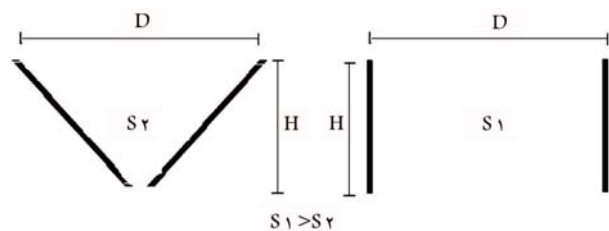
همچنین، فرض‌های زیر با توجه به مرجع [۲۸] در متغیرهای ذکر شده در روابط فوق دخیل است:

- هزینه اولیه توربین ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات در نظر گرفته شده است؛
- هزینه‌های جاری از قبیل سرویس، تعمیر و نگهداری معادل ۴۰ 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؛
- نرخ تورم معادل ۳۵ درصد در نظر گرفته شده است؛
- عمر مفید توربین ۲۰ سال در نظر گرفته شده است.

بنابراین، با در نظر گرفتن مقادیر فوق و استفاده از میزان تولید انرژی سالیانه (جدول ۳) و جایگذاری آن‌ها در روابط ۲۱ الی ۲۳، می‌توان تخمینی از هزینه تولید انرژی به‌واسطه توربین بادی محور عمودی برای نوع H - شکل و V - شکل به‌دست آورد. این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. از آنجا که توان تولید شده توسط توربین H - شکل بیشتر است، بنابراین نیازمند ژنراتور بزرگ‌تر و ادوات کنترلی گران‌تری بوده و از همین رو، هزینه اولیه آن بیشتر از نوع وی-شکل است. همین موضوع در



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 به‌ترتیب معادل ۳۶ متر مربع و ۱۳ 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، درحالی‌که 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 ۱۰ وات می‌باشد که نسبت به نوع H - شکل (حدود ۷۰ وات) کمتر است؛ این بدان معناست که با زاویه‌دار کردن پره‌ها (با زاویه ۴۵ درجه) مقدار توان منفی هفت برابر کوچک‌تر می‌شود. همچنین، انتظار می‌رود که با افزایش زاویه مخروطی (δ)، از این گشتاور منفی کاسته شود. در توربین‌های H - شکل نیز به‌منظور کاهش این گشتاور نامطلوب در هنگام راه‌اندازی از روش‌هایی از جمله موتور راه‌انداز، پره‌های جی - شکل، ترکیب روتورهای داریوس و ساوینوس 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 ۲۴۵۰ کیلووات ساعت می‌باشد، درحالی‌که این مقدار برای نوع V - شکل در حدود ۴۵۰ 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 و برای توربین V - شکل ۱۰ دلار تعیین کرد.

۸. نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی آماری سرعت باد در سه سال اخیر (۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰) 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 81° وات را در سرعت باد $4/6$ متر بر ثانیه و 12° وات را در سرعت باد $4/8$ متر 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 $45^\circ/0$ بوده و این در حالی است که ضریب توان توربین وی-شکل حدود $28^\circ/0$ است.

اگرچه توربین H - شکل از نظر تولید توان و بازدهی آیرودینامیکی دارای اولویت است، اما توربین V - شکل به دلیل گشتاور منفی کمتر در لحظه راه اندازی دارای ارجحیت می باشد که این موضوع به خصوص در توربین های کوچک و در مقیاس شهری که دارای تجهیزات کنترلی پیشرفته نیستند، نکته مهمی تلقی می شود. از نظر اقتصادی نیز هزینه های مربوط به توربین H - شکل به دلیل توان بالاتر و نیاز به تجهیزات بزرگتر و گران تر، بیشتر از نوع V - شکل است. هزینه خالص انرژی به طور متوسط برای نوع H - شکل ۶۶ دلار بوده که این مقدار تقریباً هفت برابر نوع V - شکل است.

بنابراین، می توان مزایا و معایب استفاده از توربین H - شکل و V - شکل را در موارد زیر خلاصه کرد:

- توان و ضریب توان توربین H - شکل به ترتیب 81° وات و $45^\circ/0$ می باشد، درحالی که این مقادیر برای نوع V - شکل 12° وات و $28^\circ/0$ است؛
 - توربین V - شکل در هنگام راه اندازی اولیه دارای توان منفی در حدود 10° 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 مقیاس 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.

پانویس 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 Shahrbabak 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-Varnamkhashi, 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 Abarghoeei, 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. Fyrippis, 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 sitting 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. Paraschivoiu, 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 شصت و پنج با ضخامت متفاوت

جلال الدین صدر* (دانشجوی دکتری)

سیدحجت هاشمی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

علی‌اکبر مجیدی جیرندهی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام‌نور

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دربی ۴۰، شماری ۱، ص. ۱۱۹-۱۲۷، (پادداشت شریف)

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 شروع و انرژی رشد ترک در فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه ضربه‌ی 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 ۱/۲۶ 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.

واژگان کلیدی: انرژی رشد ترک، انرژی شروع ترک، انرژی شکست، فولاد API X۶۵، 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 دانشگاه‌هایی مانند دانشگاه پوهانگ کره جنوبی، دانشگاه آخن آلمان، مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا و ... به منظور برآورد خواص مکانیکی فولادهای استفاده شده در صنعت نفت و گاز به سمت استفاده از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده مانند X۶۵، X۷۰، X۸۰، X۱۰۰ و X۱۲۰ حرکت کرده‌اند.

در دهه ۷۰ میلادی، به دلیل نگرانی از شکست خطوط انتقال نفت و گاز مدرن پرفشار، مبحثی 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 محرک 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 و یا هواپیماها، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها که به ترتیب در معرض نیروهای آبرودینامیکی و هیدرودینامیکی (به‌خصوص 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 کردند. آزمون ضربه شارپی یکی از این آزمایش‌ها است. این آزمون کیفی است و تنها 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: ۱۴۰۲/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۲/۷/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۶.

استناد به این مقاله:

صدر، جلال‌الدین، هاشمی، سیدحجت، و مجیدی جیرندهی، علی‌اکبر، ۱۴۰۳. تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه شارپی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شصت و پنج با ضخامت متفاوت. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۱۹-۱۲۷. DOI:10.24200/J40.2023.62502.1686.

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:^[۲]

$$CV_{(r/r)} = \sqrt{2} \times 10^2 \cdot \sigma_h^2(Rt)^{1/2} \quad (۱)$$

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 فولادهایی با چقرمگی بالا (بالتر 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 گسترده ای برای اصلاح مدل مذکور انجام دادند.^[۲] هاشمی برای فولاد API X۶۵ نسبت انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک را به عنوان ضریب تصحیح معرفی کرد و از آن برای تخمین انرژی شکست شارپی فولاد پایه، فلز جوش و فلز ناحیه متأثر از حرارت^۷ استفاده کرد.^[۴] وی، همچنین برای سه فولاد API X۷۰، API X۸۰ و API X۱۰۰ ضرایب تصحیحی را به دست آورد.^[۵-۱۰]

انرژی شکست مواد نرم که به هنگام شکست دچار تغییر شکل پلاستیک می شوند، تنها در سطح مقطع مصرف نمی شود (محل تماس چکش با قطعه و اصطکاک نمونه با سندان). 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 ابعاد نمونه انجام شده است.

در مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا، لوکان و همکاران در پژوهشی انرژی شکست، نمودارهای دمای انتقال شکست نرم به ترد و ظاهر شکست برشی^۸ را برای فولادهای X۵۲، X۶۵، X۷۰ و X۱۰۰ گزارش کردند.^[۱۱] 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، ۱/۲ و 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 نرخ 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 نرخ 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 حاصل 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

همکاران نیز با استفاده از ضربه شارپی مجهز شده ۴۵۰ ژول، نمودارهای نیرو - جابه جایی 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 (KI) هستند. علاوه بر این، اثر زاویه شیار و شعاع نوک 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.^[۱۹-۲۰]

همانگونه که در بالا اشاره شد، تعداد پژوهش هایی که از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده جهت بررسی 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 (KId و JId) و در نتیجه ارزیابی اثرات دما و نرخ 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 API X۶۵ 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 ضریب اصلاح به ازای تغییر ضخامت محاسبه و گزارش شده است.

۲. ماده و روش انجام آزمایش

۲.۱. 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 ۸۹/۰٪ 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 حداکثر تنش تسلیم را برای 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 مقادیر مشخص شده آنها در موسسه بین المللی نفت آمریکا آورده شده است.

این فولاد با دو ریزساختار فریت - پرفیتی یا فریت سوزنی - باینیتی 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



شکل ۲. نمای کلی از دستگاه ضربه شاریپی مجهز شده سنتام مدل SIT-400.



شکل ۳. یک دسته از نمونه‌های شاریپی بعد از شکسته شدن در نیترژن مایع (اعداد ضخامت‌های نمونه شاریپی هستند).

برابر با ۳۲/۱ کیلوگرم می‌باشد. زاویه‌ای که چکش از آن رها می‌شود برابر با ۱۵۰/۱ درجه می‌باشد. سرعت در لحظه برخورد برابر با ۵/۲۶ متر بر ثانیه است. شعاع نوک چکش مطابق با استاندارد ASTM E۲۳^[۲۷] برابر با ۸ میلی‌متر است.

۳. نتایج تجربی

۳.۱. طرح آزمایش

مطابق با استاندارد ASTM E۲۳ و یا ASTM A۳۷۰، نمونه استاندارد شاریپی دارای سطح مقطع مربعی شکل به ابعاد ۱۰ × ۱۰ 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.^[۲۸، ۲۹] اما در این تحقیق تعداد ۷ دسته از نمونه شاریپی با ضخامت‌های ۴ الی ۱۰ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۳). برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، از هر دسته ۳ عدد نمونه شاریپی در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش، نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر نمونه استخراج شد. از نمودار میانگین در هر دسته برای گزارش نیروهای ویژه و میزان انرژی جذب شده و تعیین اثر تغییر ضخامت بر انرژی شکست استفاده شد. برای گزارش نیروی تسلیم، مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM ۲۲۹۸-۱۳ و ۲۰۰۰: BS EN ISO ۱۴۵۵۶ عمل شده است.^[۳۰، ۳۱] با مراجعه به شکل ۵ قسمت ب دیده می‌شود یک منحنی، که معمولاً چند جمله‌ای می‌باشد، در قسمت بالایی نمودار نیرو-جابجایی عبور داده شده است. محل برخورد این منحنی با

جدول ۱. مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی.

عنصر	درصد وزنی	API ۵L X۶۵
آهن (Fe)	پایه	-
کربن معادل (CE)	۰/۳۴	حداکثر ۰/۴۳
کربن (C)	۰/۰۷۲	حداکثر ۰/۲۲
منگنز (Mn)	۱/۴۵	حداکثر ۱/۴۵
فسفر (P)	۰/۰۰۸	حداکثر ۰/۰۲۵
سولفور (S)	۰/۰۰۲	حداکثر ۰/۰۰۶
تیتانیوم (Ti)	۰/۱۵	-
سیلیکون (Si)	۰/۲۰۱	-
نیوبیوم (Nb)	۰/۴۷	-
کرم (Cr)	۰/۱۷۴	-
مولیبدن (Mo)	۰/۲۴	-
وانادیوم (V)	۰/۰۵	-
نیکل (Ni)	۰/۰۰۹	-
مس (Cu)	۰/۰۰۸	-
آلومینیوم (Al)	۰/۲۳	-

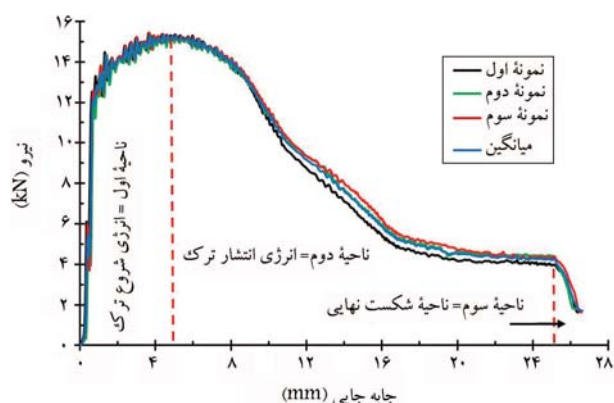


شکل ۱. ریزساختار فلز پایه فولاد API X۶۵.^[۲۵]

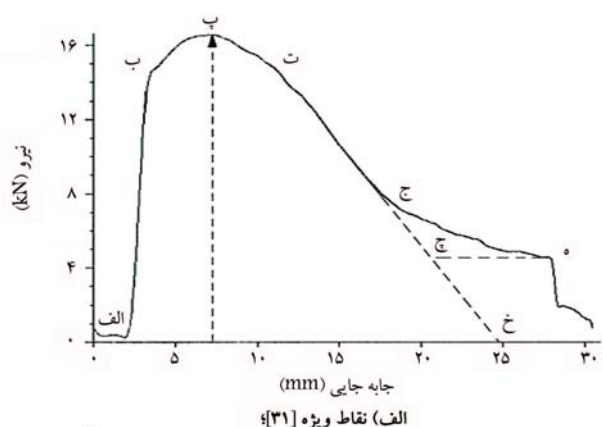
انتقال نفت و گاز ارجحیت دارد. ترکیب ویژگی‌های مذکور اجازه می‌دهد این نوع فولاد در ساخت لوله‌های با قطر زیاد برای انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر کاربرد داشته باشد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، ریزساختار فلز پایه در این فولاد بسیار ریزدانه است (میانگین اندازه دانه حدود ۳ الی ۷ میکرون).^[۲۴] فریت سوزنی، ساختاری بسیار مناسب جهت افزایش چقرمگی ناحیه جوش می‌باشد. به دلیل ماهیت درهم قفل‌شوندگی^{۱۲} ساختار فریت سوزنی به همراه دانه‌بندی ریز آن، مقاومت در برابر رشد ترک ترقی^{۱۳} افزایش می‌یابد. هاشمی و همکاران میکروساختار فلز پایه^{۱۴} فلز جوش^{۱۵} و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)^{۱۶} این فولاد را مطالعه کردند.^[۲۵، ۲۶]

۲.۲. دستگاه شاریپی مجهز شده

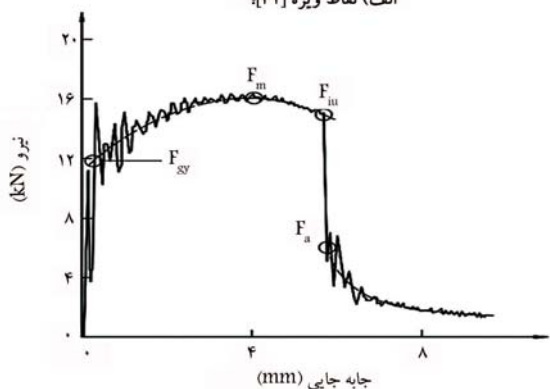
برای انجام آزمایش از دستگاه شارپ SIT ۴۵۰ سنتام استفاده شده است (شکل ۲). مزیت این دستگاه نسبت به دیگر دستگاه‌های این شرکت توانایی ثبت و گزارش داده‌های نیرو بر حسب جابه‌جایی است. علاوه بر این، به دلیل داشتن بدنه‌ای که به صورت یکپارچه ریخته‌گری شده است، صلبیت و دقت دستگاه به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. این دستگاه مجهز به چکش C شکل است و وزن آن



شکل ۴. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های استاندارد شاریپی.



الف) نقاط ویژه [۳۱]



ب) نیروهای ویژه [۳۰]

شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی.

با گوشه‌های چکش با شعاع ۸ میلی‌متر (استاندارد ASTM E۲۳) است. نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که این پرش در نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از دستگاه ضربه شاریپی که شعاع چکش آن مطابق با استاندارد ۲ - ISO ۱۴۸ [۲۳]، ۲ میلی‌متر است، دیده نمی‌شود. [۲۴-۲۷] نوک این چکش به صورت یک منحنی ساده و بدون گوشه است. نمونه شاریپی در این قسمت از نمودار همچنان بر روی چکش قرار دارد اما در حال پرتاب شدن به بیرون از دستگاه شاریپی 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 بروز رفتار یکسان نمونه‌ها نسبت به یکدیگر در برابر نیرو به هنگامی که ماده وارد حالت پلاستیک شده است، باشد. به همین

قسمتی از نمودار نیرو - جابه‌جایی که در آن رفتار میان نیرو و جابه‌جایی متناسب است (بعد از قله دوم نوسانات) به عنوان نیروی تسلیم تعریف می‌شود. نیروی بیشینه نیز بیشترین نیرو حاصل شده از ضربه در منحنی نیرو - جابه‌جایی است. نکته قابل توجه این است که با کم شدن ضخامت نمونه شاریپی عملاً چکش در محل مرکز ضربه ۱۷ به نمونه شاریپی ضربه وارد نمی‌کند. بنابراین، هر قدر ضخامت نمونه شاریپی کاهش یابد، خطای دستگاه شاریپی در گزارش انرژی شکست افزایش می‌یابد. محل مرکز ضربه ۵ میلی‌متر بالاتر از سطحی است که نمونه استاندارد شاریپی بر روی آن قرار داده می‌شود تا از طرف چکش به آن ضربه وارد شود. به همین دلیل، برای این که بتوان نمونه‌های شاریپی با ضخامت ۴ الی ۹ میلی‌متر را به گونه‌ای بر روی سندان قرار داد که مرکز ارتفاع نمونه دقیقاً منطبق با مرکز ضربه قرار گیرد، نمونه‌هایی با شکلی کاملاً مشابه با نمونه شاریپی اما از جنس اسید پلی‌لاکتیک یا پلی‌لاکتاید ۱۸ با استفاده از پرینتر سه بعدی ساخته شد و در زمان آزمایش در زیر نمونه‌ها به عنوان زیرکاری قرار داده شد. ضخامت‌های ۵/۰ الی ۳ میلی‌متر با گام ۵/۰ به ترتیب برای ضخامت‌های ۹ الی ۴ میلی‌متر ساخته شد. اما از آنجایی که این نمونه‌ها می‌توانند موجب افزایش انرژی شکست شوند، شیار با عمق ۹/۷ میلی‌متر و با شعاع صفر در آن‌ها ایجاد شد تا مقاومت آنها به کمترین حد امکان برسد.

۲.۳. تفسیر نمودار شاریپی

نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه استاندارد شاریپی فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه شاریپی 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، نمودار به دست آمده از نوع F می‌باشد. [۲۰] این نمودار دارای نقاط ویژه‌ای 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 می‌شود. در مواد با تردی کمتر، نمودار در نقطه ت دچار یک افت ناگهانی مشابه شکل ۵ قسمت ب می‌شود و نیرو به صورت جابه‌جایی - ثابت و به صورت عمودی تا نقطه ج که به نیروی توقف ترک ۱۹ معروف است، افت یا سقوط ناگهانی می‌کند.

اما همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، این قسمت از نمودار نه دارای شیب ثابت و نه دارای افت ناگهانی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت فولادی که دارای چنین نموداری است (شکل ۴)، از چقرمگی بالا و دمای انتقال شکست نرم به ترد بسیار پایین برخوردار است. این موارد هر دو از ویژگی‌های بارز فولاد API X۶۵ است. نکته دیگری که از نوع نمودار می‌توان به آن رسید این است که عدم وجود شیب مذکور بیان‌کننده آن است که فولاد در برابر رشد ترک ناپایدار بسیار مقاوم است. هرچند که در برخی از پژوهش‌های صورت‌گرفته اذعان شده است که نمونه شاریپی برای ایجاد یک حالت شکست پایدار بسیار کوچک است. [۲۲] همچنین، با این نوع نمودار می‌توان 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 شاریپی وابسته است. بنابراین، دستگاه شاریپی مجهز شده این امکان را به محقق می‌دهد تا با استخراج نمودار نیرو - جابه‌جایی مقاومت ماده را در برابر رشد ترک ناپایدار در برابر نیروهای ضربه‌ای برآورد کند.

همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، در انتهای منحنی نیرو - جابه‌جایی یک پرش ایجاد شده است. دلیل این پرش احتمالاً به دلیل اثر برهم‌کنش نمونه شاریپی

جدول ۲. مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی.

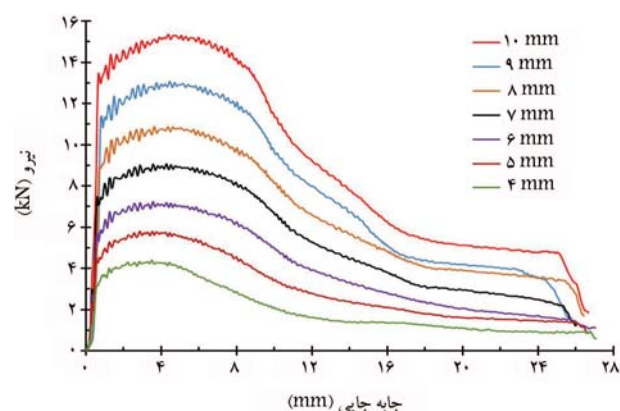
شماره گروه نمونه‌ها	ضخامت نمونه (میلی‌متر)	نیروی تسلیم F_{gy} (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه F_{max} (کیلو نیوتن)	تنش تسلیم (MPa)	F_y/F_{max}	انرژی (ژول)				
						انرژی کلی شکست از صفحه مدرج دستگاه	انرژی کلی شکست از مدار کرنش‌سنج E_{sg}	درصد اختلاف نسبت به صفحه مدرج دستگاه	نسبت انرژی	نسبت انرژی
						E_d	E_{sg}		E_i	E_p
									E_i/E_{sg}	E_p/E_{sg}
۱	۴	۳/۱۳	۴/۳۹	۳۴۲	۰/۷۱	۶۲	۵۹	۵	۱۲	۴۷
۲	۵	۴/۱۳	۵/۷۲	۳۶۱	۰/۷۲	۹۱	۸۳	۹	۱۶	۶۷
۳	۶	۵/۴۵	۷/۱۴	۳۹۶	۰/۷۶	۱۲۶	۱۱۸	۶	۲۴	۹۴
۴	۷	۶/۹۲	۸/۹۵	۴۳۱	۰/۷۷	۱۶۳	۱۵۱	۷	۳۱	۱۲۰
۵	۸	۸/۷۹	۱۰/۷۵	۴۷۹	۰/۸۲	۱۸۱	۱۸۳	-۱	۳۷	۱۴۶
۶	۹	۱۰/۷۳	۱۲/۹۶	۵۲۱	۰/۸۳	۲۲۰	۲۲۲	۱	۴۷	۱۷۴
۷	۱۰	۱۲/۸۰	۱۵/۲۲	۵۵۹	۰/۸۴	۲۵۵	۲۶۰	-۲	۶۴	۱۹۶
میانگین										
									۰/۲۱	۰/۷۹

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 به‌دست آمده از مدار کرنش‌سنج، اختلاف میان این دو انرژی، انرژی شروع ترک و انرژی رشد ترک، 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 آن برابر با ۶۲ ژول برای ضخامت ۴ میلی‌متر به‌دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار نیروی تسلیم به ترتیب برابر با ۳ و ۱۳ کیلو نیوتن حاصل شد. مقادیر متناظر برای نیروی بیشینه نیز به ترتیب برابر با ۴ و ۱۵ کیلو نیوتن به دست آمد. برای محاسبه تنش تسلیم نیاز به ضریب قید C_{gy} است که به نوع چکش (۲ یا ۸ میلی‌متری) و شعاع نوک شیار نمونه شارپی بستگی دارد. [۱۳] از آنجا که در این تحقیق نمونه‌های با شیار V شکل توسط دستگاه شارپی مجهز شده با چکش ۸ میلی‌متر (مطابق با استاندارد ASTM E۲۳) آزمایش شده‌اند، ضریب مذکور برابر با ۱/۳۳۶ 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.

$$\sigma_{gy} = \frac{3/732 F_{gy} W}{C_{gy} B(W - a)^2} \quad (2)$$

در رابطه ۲، W عرض نمونه شارپی، a عمق شیار، B ضخامت نمونه شارپی، F_{gy} نیروی تسلیم و C_{gy} ضریب 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 موضوع اذعان داشت که تغییر تنش تسلیم با تغییر ضخامت به صورت خطی است. در جدول ۲ نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کلی شکست و نسبت انرژی رشد ترک 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 متفاوت و با دقت‌های متفاوت برای توصیف رفتار مواد زمانی که وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند، ارائه شده است. از جمله این معیارها که بسیار پرکاربرد است می‌توان به معیار گرسون - تیورگارد - نیدلمن 2° اشاره کرد. شاهسونی، محیط‌زاده و هاشمی با استفاده از این معیار به شبیه‌سازی آزمایش ضربه شارپی پرداختند و ضرایب مدل مذکور را استخراج نمودند. [۳۸، ۱۶] شایان ذکر است که در دو مرجع مذکور از دو دستگاه شارپی متفاوت استفاده شد.

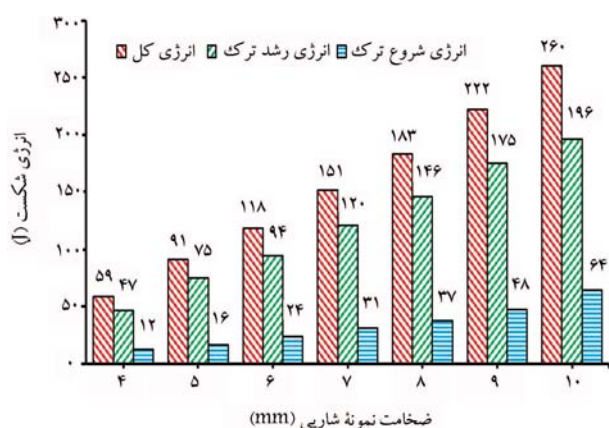
جهت اطمینان از دقت اطلاعات به‌دست آمده از کرنش‌سنج باید به منطق بودن قسمت الاستیک ماده برای هر سه نمونه استناد نمود. در شکل ۴ دیده می‌شود که هر سه نمودار از سه نمونه استاندارد شارپی در قسمت مذکور از انطباق بسیار خوبی برخوردار هستند. علاوه بر این، در قسمت تغییر شکل پلاستیک و قسمت نرم‌شوندگی بعد از آن (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.

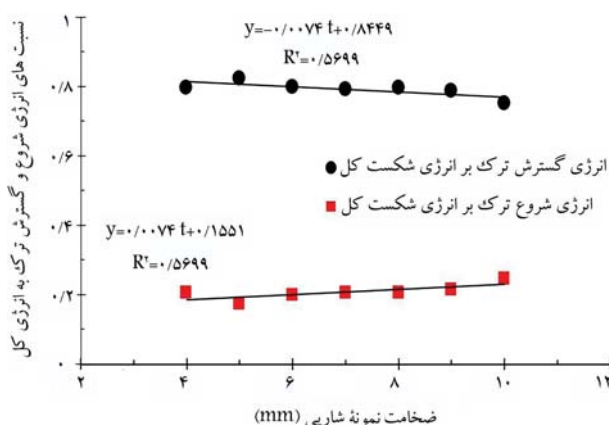
انرژی کل حاصل از اطلاعات کرنش سنج است. t ضخامت، E_i انرژی شروع ترک و E_p انرژی رشد ترک است. برای مقایسه بهتر تغییرات انرژی های بیان شده نسبت به تغییرات ضخامت، یک نمودار ستونی در شکل ۸ آورده شده است.

در شکل ۹ تغییرات نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل شکست و نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل شکست در برابر تغییرات ضخامت ترسیم و یک برازش خطی انجام شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، تا ضخامت ۹ میلی متر نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل روند افزایشی آرامی دارد. به همین ترتیب، در رابطه با نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل نیز روند کاهشی آرام دیده می شود. اما در ضخامت ۱۰ میلی متر یک پرش ۵ درصدی در هر دو انرژی دیده می شود. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت باعث می شود که انرژی شروع ترک سهم بیشتری را برای رشد ترک تقاضا کند تا بتواند قیود (مواد) جابوی ترک را تسلیم کرده و ناحیه پلاستیک را در آن نقطه ایجاد نماید.

این موضوع، همانطور که قبلاً برای ضرایب اصلاح نیز بیان شد، نظریه وابسته بودن انرژی و ضرایب اصلاح به انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه ای به کرنش صفحه ای و اندازه ناحیه پلاستیک را تقویت می کند، ثابت می کند. از این نمودار چنین استنباط می شود که در ضخامت های کمتر از ۴ میلی متر، تمامی انرژی صرف رشد ترک می شود. علت این امر این است که با نازک تر شدن نمونه ماده کمتری در برابر نوک ترک برای جذب انرژی تغییر شکل پلاستیک موجود است. به همین دلیل،



شکل ۸. تغییرات انرژی شروع، رشد و کل ترک در برابر تغییرات ضخامت.



شکل ۹. تغییرات نسبت انرژی شروع و رشد ترک به انرژی کل شکست در برابر تغییرات ضخامت.

انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک که به عنوان ضریب اصلاح معرفی می شود، برای تمامی ضخامت ها آورده شده است. همان گونه که قبلاً بیان شد، از این مقادیر برای پیش بینی شروع شکست در لوله های انتقال انرژی با چقرمگی بالا که با دستگاه ضربه شاری مرسوم آزمایش می شوند، استفاده می شود.

با توجه به مقادیر حاصل شده دیده می شود که ضرایب تصحیح تا ضخامت ۹ میلی متر میان مقادیر ۱/۲۵ الی ۱/۲۷ تغییر می کند. به محض آن که ضخامت به ۱۰ میلی متر می رسد، مقدار مذکور به ۱/۳۰ ارتقا می یابد. علت این امر را می توان به انتقال از حالت تنش صفحه ای به کرنش صفحه ای نسبت داد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که ضرایب اصلاح به حالت بارگذاری و متعاقباً به اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک بستگی دارند.

مقدار ضریب اصلاح به دست آمده در این تحقیق برای ضخامت ۱۰ میلی متر با مقدار به دست آمده در مرجع [۴] برابر می باشد. میانگین حاصل نیز برابر با ۱/۲۶ است.

برای توصیف رفتار ماده، تغییرات انرژی در برابر تغییرات ضخامت در شکل ۷ ترسیم شد. همان گونه که از شکل ۷ و نتایج ارائه شده در جدول ۲ قابل مشاهده است، نتایج ارائه شده توسط صفحه مدرج دستگاه با نتایج حاصل از مساحت زیر منحنی نیرو - جابه جایی اختلاف بسیار کمی دارد. بیشترین و کمترین اختلاف به ترتیب برابر با ۶ و ۱ درصد می باشد. بنابراین، می توان رفتار ماده را به ازای تغییر ضخامت با یک رابطه ریاضی که از برازش منحنی بر داده های حاصل شده از صفحه مدرج دستگاه به دست آمده است، توصیف نمود.

در شکل ۷، علاوه بر نتایج دایال دستگاه و کرنش سنج، انرژی 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 انرژی دایال با صفحه مدرج دستگاه، انرژی کرنش سنج، انرژی شروع و رشد ترک به ترتیب در روابط ۳ الی ۶ آورده شده است:

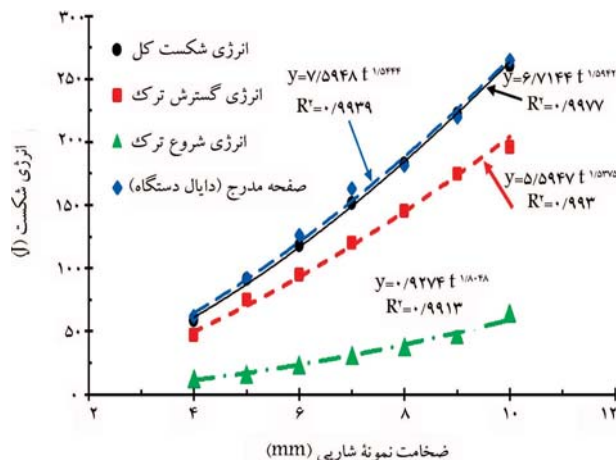
$$E_D = 7/5948 t^{1/5222} \quad (3)$$

$$E_{SG} = 6/7114 t^{1/592} \quad (4)$$

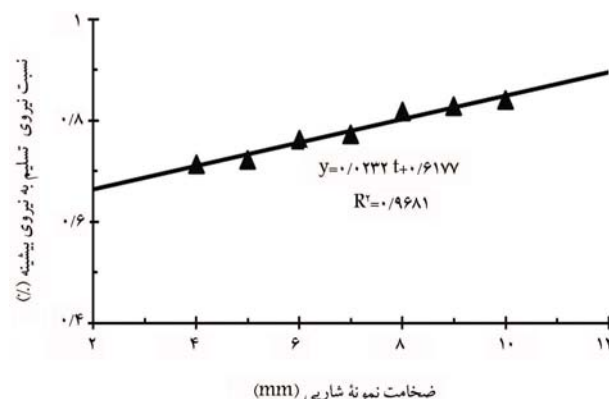
$$E_i = 0/9274 t^{1/5222} \quad (5)$$

$$E_p = 5/9247 t^{1/5272} \quad (6)$$

در روابط بالا، E_D و E_{SG} به ترتیب انرژی کل صفحه مدرج دستگاه شاری و



شکل ۷. تغییرات انرژی در برابر تغییرات ضخامت.



شکل ۱۰. تغییرات نسبت نیروی تسلیم به نیروی کشش 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 کشش 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 کارسختی فولاد با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰ این نسبت با یک رابطه خطی که از دقت بسیار خوبی برخوردار است، برازش شده است.

با بررسی نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نهایی، مشخص شد که می‌توان آنها را نیز با یک تابع نمایی توصیف نمود. این دو نیرو به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$F_y = 0.3447 t^{1/558} \quad (7)$$

$$F_{max} = 0.6432 t^{1/3617} \quad (8)$$

نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که معمولاً در پژوهش‌های تجربی منابع و درصد خطا بیان می‌شود. محیط‌زاده و هاشمی در پژوهشی علاوه بر مطالعه اثر تغییرات تکانه بر انرژی شکست شاری به بررسی میزان خطای روابط ارائه شده (انرژی شکست در برابر انرژی برخورد و سرعت برخورد) در آزمون ضربه شاری پرداخته‌اند.^[۳۸] حداکثر میزان خطا بسیار کم و حدود ۴/۲ درصد گزارش شد. همچنین، برین به بررسی منابع خطا و تحلیل آماری انرژی ضربه شاری ۲۰۰ لوله فولادی API X65 با هندسه و ترکیب شیمیایی یکسان برای سه منطقه فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت پرداخت.^[۳۹] 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.

مسئله متغیرهای بسیار زیادی مانند ابعاد و هندسه نمونه و چکش، سرعت اولیه، ساخت نمونه‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری، وضعیت سندان و قرارگیری نمونه بر روی آن در نتایج دخیل هستند، اما در حالت کلی خطای ناشی از این آزمون بسیار کم است. بنابراین، برای دریافت اطلاعات بیشتر در مورد منابع و درصد خطا در آزمون ضربه شاری می‌توان به دو مرجع مذکور مراجعه کرد.

۴. نتیجه‌گیری

تعیین نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نیروی کشش، انرژی شروع و رشد ترک و

انرژی کل شکست فولاد API X65 به‌طور مستقیم و تجربی از دستگاه شاری مجهز شده و تعیین ضرایب اصلاح جهت پیش‌بینی شروع شکست از اهداف این تحقیق بود.

نتایج این پژوهش را می‌توان به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

۱. با استفاده از نتایج آزمایش شاری مجهز شده نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای ضخامت‌های متفاوت و محاسبه نیروهای ویژه و انرژی‌های مذکور مطابق جدول ۲ محاسبه شد؛

۲. به‌دلیل 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 شاری با دقت بالا ارائه شد؛

۴. با بررسی ضرایب اصلاح مشخص شد که این ضرایب به حالت بارگذاری (تنش 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. ظرفیت دستگاه ضربه شاری برای نمونه‌هایی با انرژی کمتر از ۲۵۰ 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 دربر 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 شاری است (۱۰ میلی‌متر) اشاره کرد. بنابراین، دیگر نیازی به صرف هزینه برای ساخت نمونه و آزمایش ضربه شاری نمی‌باشد.

فهرست علائم

- J : انرژی شکست نمونه شاری با ضخامت ۲/۳ ضخامت نمونه استاندارد ($C_V(2/3)$)؛
 R : شعاع لوله mm ؛
 t : ضخامت لوله mm ؛
 σ_h : تنش محیطی MPa ؛
 F_{gy} : نیروی تسلیم kN ؛
 F_{max} : نیروی کشش 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 .

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.

پانوشتها

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/JFSFM.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 Darwish, 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 Rahnema, 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 Mechacnis*, 10(1), pp.77-91. [In Persian]. <https://doi.org/10.22044/JFSFM.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 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 Abele, 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 دوتونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه ها الزاماً فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله <http://journal.sharif.ir> به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسئول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، 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، نظیر مقدمه، عناوین 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 ضخامت کادر Apx و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 یا پسوند JPG یا Tif امکان پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه های لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (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 منابع مورد استفاده، شماره بندی (از شماره یک و به طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه ای (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. "Forecasting 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 preformation of circular plat with four sided pyramidally - 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 مجله علمی و پژوهشی

شریف

مجله علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه های پژوهش های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلائی سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه مجموعه ای مفید است. چاپ مقالات در مجله شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه های علمی و فنی بوده و در مجله دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه ای دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته 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)

jaleleddin.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 NANOFLUID 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 (nanofluid). A nanofluid 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 nanofluid 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 nanofluids 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 nanofluids 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 nanofluid, 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 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.

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

**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.

NANOPARTICLES IN THE TURBULENT FLOW BEHIND THE BACKWARD STEP BY EULERIAN-LAGRANGIAN METHOD

A. Farrokh

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 FLU-ENT 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- ϵ and standard and SST k- ω models are considered for the modeling of turbulent flow. The results show that SST k- ω 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 ϵ 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. Ejtehad

ejtehad@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)

artaheeri@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

The logo of Sharif University of Technology, featuring the word "Sharif" in a bold, stylized, black font.

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](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 Dowlatabadi
- 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**
MA. Mojahedi, M.R. Ayatollahi and MO. Mojahedi
- 85 **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
- 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**