دوره‌ی ۳۹
شماره‌ی ۲
دوفصلنامه
پاییز
۱۴۰۲

۲

مهندسی مکانیک

شریف

مقالات پژوهشی:

- بررسی اثر آلیاژ حافظ شکل بر کمانش و پس‌کمانش پانل کامپوزیتی در جریان مافوق صوت با گرمایش حرارتی
  ذبیح الله ذبیحی، مرتضی دردل و علیرضا فتحی
- طراحی و مقایسه بازتاباننده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر عملکرد ماژول خورشیدی
  میرمصطفی اسود، مفید گرجی و آرش مهدوی
- طراحی هوشمند مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته توسط الگوریتم ژنتیک و پردازش تصویر
  بهادر ابول پور، راستین حکمت‌خواه و امیر بابک انصاری
- مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی قطعات مخروطی
  صادق فرجی، یاسر رستمیان و علی اصغر شمسی سربند
- طراحی روتور و مطالعه عملکرد یک سیستم جاذب انرژی باد هوایی در بستر شبیه‌ساز دینامیک پرواز
  مهدی احمدی و سعید کریمیان علی‌آبادی
- موقعیت‌یابی و کنترل کپسول آندوسکوپی با فرض معادلات استوکس
  پوریا صادقی بروجنی، حسین نجات پیش‌کناری، حامد مرادی و غلامرضا وثوقی
- شبیه‌سازی عددی برداشت انرژی از یک صفحه انعطاف‌پذیر پشت یک سیلندر با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان
  مهناز پورمؤمنی فیروزآبادی، علی طیبی و یونس شکاری
- فرآوری لوله‌های نازک منیزیمی با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) با هندسه ذوزنقه‌یی
  محسن کامران ماسوله و احمد عاصم‌پور
- کنترل بازخورد مرزی برای ردیابی مسیر اجسام صلب در حضور تلاطم سیال کم‌عمق
  میثم جوکار، حسن سالاریه و حسین نجات پیش‌کناری
- شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل تئوری جریان نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانس
  سیدامیرحسین زمزمیان، سهیل رضازاده مفردنیا، محمدرضا پازوکی و محمد پازوکی

مهندسی مکانیک شریف
Mechanical Engineering SHARIF
۲

Mechanical Engineering

Sharif

Volume 39
Number 2
Semiannually
Fall
2023

2

ISSN 2676-4725

ARTICLES:

- Investigation of the Effect of Shape Memory Alloy on Buckling and Post-Buckling of Composite Panels in Supersonic Flow with Thermal Heating
  Z. Zabihi, M. Dardel and A.R. Fathi
- Design and Comparison of Combined, Parabolic, and Flat Plate Reflectors on the Performance of a Solar Module
  M. Asvad, M. Gorji and A. Mahdavi
- The Smart Design of Heat Exchangers with Expanded Surfaces by Genetic Algorithm and Image Processing
  B. Abolpour, R. Hekmatkhah and A.B. Ansari
- Experimental Study of Multi-Point Incremental Forming for Conical Parts
  S. Faraji, Y. Rostamian and A.A. Shamsi-Sarband
- Rotor Design and Performance Study of an Airborne Wind Energy System with Flight Dynamics Simulator
  M. Ahmadi and S. Karimian Aliabadi
- Localization and Control of an Endoscopic Capsule Using Stokes Flow Equations
  P. Sadeghi Boroujeni, H. Nejat Pishkenari, H. Moradi and Gh.Vossoughi
- Numerical Simulation of Energy Harvesting from a Flexible Plate Behind a Cylinder Using Flow-Induced Vibrations
  M. Poormomeni Firoozabadi, A. Tayebi and Y. Shekari
- Processing of Thin Magnesium Tubes by Tubular Channel Angular Pressing (TCAP) Process with Trapezoidal Geometry
  M. Kamran Masouleh and A. Assempour
- Boundary Feedback Trajectory Tracking Control of Rigid Bodies with Interior Shallow-Water Sloshing
  M. Jokar, H. Salarieh and H. Nejat Pishkenari
- Simulation and Theoretical Analysis of the Nanofluid-Based Oil Transformers for Improving the Cooling Performance of the Transformer
  S.A.H. Zamzamian, S. Rezazade Mofradnia, M.R. Pazouki and M. Pazouki

به نام خدا

مهندسی مکانیک

شریف

دوره‌ی ۳۹
شماره‌ی ۲
پاییز
۱۴۰۲

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف
مدیر مسئول: دکتر علی‌اکبر صالحی
مدیرنشریه: دکتر رضا نقدآبادی
سردبیر: دکتر مهرداد تقی‌زاده منظری
سردبیرهیات‌تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

مدیر داخلی: پوران خیرمندی
مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف‌خان

ویرایش: گروه ویراستاری ویراگر
حروف‌چینی: ساناز نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی
صفحه‌آرایی: غزل احمدی میرقائد
امور اجرایی: شیما آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

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

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵
دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
تلفن: ۶۶۱۶۴۰۹۳-۶۶۰۰۵۴۱۹
نمابر: 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

هیأت تحریریه

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 الستی
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 محمودمهرداد شکریه
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 رجب‌زاده
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 سیدمحمدباقر ملائک
دانشکده مهندسی هوافضا، 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 راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

هیأت مشاوران

دکتر ولی‌الله پناهی‌زاده
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه شهید رجایی

دکتر علی حکاکی‌فرد
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حمیدرضا حیدری
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه ملایر

دکتر یعقوب دادگر اصل
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه فنی و حرفه‌یی

دکتر سمیه داوودآبادی فراهانی
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی اراک

دکتر سعید زینالی هریس
دانشکده‌ی مهندسی شیمی ـ دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر فرهاد صادق مغانلو
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر مرتضی طایفی
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا ـ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر علی‌اکبر عالم رجبی
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علیرضا فتوحی فیروزآباد
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه یزد

دکتر فمیدا فلاح رجب‌زاده
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر نعمت‌اله فولادی
پژوهشگاه فضایی ایران

دکتر علی کریم‌زاده
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه فسا

دکتر جعفر کیقبادی
دانشکده مهندسی مکانیک ـ دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر مهدی مجاهدی
دانشکده‌ی فنی مهندسی گلپایگان ـ دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر سید محمدباقر ملائک
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر رامین مشک‌آبادی
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر محمود مهرگان
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی شاهرود

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

۳ **بررسی اثر آلیاژ حافظ شکل بر کمانش و پس‌کمانش پانل کامپوزیتی در جریان مافوق صوت با گرمایش حرارتی**
ذبیح الله ذبیحی، مرتضی دردل و علیرضا فتحی

۱۳ **طراحی و مقایسه بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر عملکرد ماژول خورشیدی**
میرمصطفی اسود، مفید گرجی و آرش مهدوی

۲۵ **طراحی هوشمند مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته توسط الگوریتم ژنتیک و پردازش تصویر**
بهادر ابول پور، رامتین حکمت‌خواه و امیر بابک انصاری

۳۷ **مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی قطعات مخروطی**
صادق فرجی، یاسر رستمیان و علی اصغر شمسی سربند

۴۵ **طراحی روتور و مطالعه عملکرد یک سیستم جاذب انرژی باد هوایی در بستر شبیه‌ساز دینامیک پرواز**
مهدی احمدی و سعید کریمیان علی‌آبادی

۵۷ **موقعیت‌یابی و کنترل کپسول آندوسکوپی با فرض معادلات استوکس**
پوریا صادقی بروجنی، حسین نجات پیش‌کناری، حامد مرادی و غلامرضا وثوقی

۶۵ **شبیه‌سازی عددی برداشت انرژی از یک صفحه انعطاف‌پذیر پشت یک سیلندر با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان**
مهناز پورمؤمنی فیروزآبادی، علی طیبی و یونس شکاری

۷۵ **فرآوری لوله‌های نازک منیزیمی با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) با هندسه ذوزنقه‌یی**
محسن کامران ماسوله و احمد عاصم‌پور

۸۳ **کنترل بازخورد مرزی برای ردیابی مسیر اجسام صلب در حضور تلاطم سیال کم‌عمق**
میثم جوکار، حسن سالاریه و حسین نجات پیش‌کناری

۹۳ **شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل تئوری جریان نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانس**
سیدامیرحسین زمزمیان، سهیل رضازاده مفردنیا، محمدرضا پازوکی و محمد پازوکی

ضمائم:

۱۱۴ **چکیده مقالات به انگلیسی**

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۳-۱۱، (پژوهشی)

Original Article

بررسی اثر آلیاژ حافظ شکل بر کمانش و پس‌کمانش پانل کامپوزیتی در جریان مافوق صوت با گرمایش حرارتی

ذبیح الله ذبیحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
مرتضی دردل* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
علیرضا فتحی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

در کار حاضر، اثر آلیاژهای هوشمند حافظ شکل بر کمانش و پس‌کمانش حرارتی پانل کامپوزیتی مونوکلینیک و تک‌جهته مورد بررسی قرار می‌گیرد. فشار آیرودینامیکی وارد شده بر سیستم با استفاده از روش تئوری پیستون مدلسازی و همچنین اثر گرمایش حرارتی برای جریان‌های مافوق صوت از روش دمای مرجع تخمین زده می‌شود. رفتار پانل به صورت غیرخطی، با تغییر شکل‌های بزرگ و بر اساس تئوری فون‌کارمن مدل‌سازی می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد آلیاژ حافظ‌شکل می‌تواند دمای بحرانی کمانش حرارتی را افزایش دهد. در این مقاله، تاثیر چینش لایه‌های کامپوزیتی در بالا بردن دمای کمانش حرارتی نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد به واسطه‌ی استفاده از آلیاژ حافظ شکل، مقدار خیز پس‌کمانش حرارتی تا حدود زیادی کاسته می‌شود و در اختلاف دماهای بالاتر، میزان کاهش خیز پانل، افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: کمانش حرارتی، پس کمانش، تئوری لایه‌یی کامل، تئوری گرمایش حرارتی، آلیاژ حافظ شکل، کامپوزیت.

zabiha.zabih@yahoo.com
dardel@nit.ac.ir
a.fathi@um.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به پیشرفت روزافزون علم و فناوری و نیاز به افزایش سرعت عملکردی و ساختاری در حمل و نقل هوایی، اهمیت علم آیرواستاتیک روز به روز بیشتر احساس می‌شود. استفاده از سرعت‌های بالا همواره با چالش‌های خود همراه خواهد بود، از جمله پدیده‌هایی مانند واگرایی[۱]، فلاتر[۲] و پس‌کمانش که در هواپیماها و فضاپیماها مشاهده می‌شوند. روش‌های مختلفی برای کنترل این پدیده‌ها وجود دارد، یکی از آنها استفاده از کنترل غیرفعال این خصوصیات با استفاده از مواد هوشمند و باکاربرد چندگانه است. برای دستیابی به چنین هدفی، می‌توان از مواد سبک وزن چند منظوره باکارایی بیشتر، به جای سیستم‌های چند جزئی و چند ماده‌یی استفاده کرد. آلیاژ حافظ شکل از این دست مواد هستند. آلیاژ حافظ شکل[۳] از جمله موادی هستند که با افزایش سفتی ساختار، میزان کمانش حرارتی را به مقدار قابل قبولی افزایش داده‌اند. کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های بسیار مفیدی که دارند، از جمله لایه‌چینی اختیاری، وزن سبک و استحکام بالا، جزو موادی هستند که در تمامی صنایع کاربرد دارند. با توجه به قابلیت‌های لایه‌چینی مختلف در ساخت کامپوزیت‌ها، ضروری است که علاوه بر بررسی میزان جابجایی‌های کلی که از تئوری تک لایه معادل[۴] محاسبه می‌شوند، میزان جابجایی‌های درون صفحه‌یی نیز که با استفاده از تئوری لایه‌یی کامل[۵] قابل تحلیل هستند، مورد بررسی قرار گیرد.

داول[۱] و می[۲] مسائل فلاتر پانل غیرخطی را با استفاده از روش گالرکین مورد مطالعه و انشقاق و چندشاخگی رفتارهای دینامیکی پیچیده غیرخطی، کمانش، حرکت تناوبی و همچنین نوسانات هارمونیک ساده سیستم را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، فضای پارامتری که در آن فلاتر رخ می‌دهد نیز تعیین نمودند. مطالعات ارزشمند انجام شده در مورد فلاتر پانل غیرخطی توسط می[۳] پژوهش قابل ملاحظه‌یی است. در حضور اثرات حرارتی، مطالعات[۴و۵] نشان می‌دهد که اثرات حرارتی نقش مهمی در رفتارهای ایستا و دینامیکی پانل ایفا می‌کنند.[۶] در مطالعات بسیاری که اثر حرارتی را مورد نظر قرار داده‌اند، اغلب از معادلات تنش ـ کرنش و نظریه پیستون مرتبه اول شبه ـ ایستا بهره گرفته شده است[۷-۹]. ونترس و داول[۷]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۳، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۷.

استناد به این مقاله:
ذبیحی، ذبیح الله، دردل، مرتضی، و فتحی، علیرضا، ۱۴۰۲. بررسی اثر آلیاژ حافظ شکل بر کمانش و پس کمانش پانل کامپوزیتی در جریان مافوق صوت با گرمایش حرارتی. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۳-۱۱. DOI:10.24200/J40.2022.59615.1630

رفتار فلاتر صفحات گیردار را که در معرض بارهای فشار عرضی یا انبساط حرارتی یکنواخت کمانش می‌کنند، مورد مطالعه قرار دادند. ژو و می[۸] با مطالعه‌ی المان محدود پانل با دمای دلخواه در جریان مافوق صوت به نتیجه رسیدند که تحلیل تنش حرارتی برای فلاتر پانل غیرخطی ضروری است. همچنین نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که روش حوزه فرکانس در پیش‌بینی حرکات تناوبی و آشفته ناتوان است. در زمینه رفتار آیروترموالاستیک پانل با تنش برشی در جریان مافوق صوت، پورتاک دوست و فاضل‌زاده[۱۰] با استفاده از روش اندرکنش سیال ـ حرارت ـ سازه به تحقیق پرداختند. همچنین، هان و لی[۱۱] صفحات کامپوزیتی را با محرک‌های پیزوالکتریک مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که محرک‌های توزیع شده می‌توانند به طور موثر رفتارهای دینامیکی و عملکرد صفحات کامپوزیت را کنترل کنند. راجرز و رابرت شاو[۱۲] ایده جاسازی محرک‌های آلیاژ حافظ شکل در یک لایه کامپوزیتی را معرفی کردند. هوو همکاران[۱۳] نتایج تجربی و عددی آزمایش‌های پس‌کمانش حرارتی را برای صفحات همسانگرد و کامپوزیت‌های مختلف با و بدون سیم‌های آلیاژ حافظ شکل ارائه نمودند و نشان دادند که نوارهای آلیاژ حافظ شکل می‌توانند تغییر شکل در اثر کمانش در پانل‌های همسانگرد و کامپوزیتی را کاهش دهند. لی و لی[۱۴] اثر سیم‌های آلیاژ حافظ شکل را بر ویژگی‌های کمانش و پس‌کمانش ناشی از بارهای خارجی و حرارتی، با استفاده از کد آباکوس، بررسی کردند. توفیق و همکاران[۱۵] یک صفحه از آلیاژ حافظ شکل را برای به تأخیر انداختن کمانش حرارتی، کاهش پس‌کمانش و افزایش فشار دینامیکی در پانل‌ها و فلاتر مورد مطالعه قرار دادند. ژانگ و شنگ[۱۶] پایداری و ارتعاشات غیرخطی یک پانل کامپوزیت چند لایه ترکیبی با سیم‌های آلیاژ حافظ شکل را با استفاده از روش گالرکین تحت بارگذاری حرارتی و فشار آیرودینامیک یکنواخت مورد بررسی قرار دادند. کبیر و طاووسی تهرانی[۱۷] راه حلی با فرم بسته برای کمانش و پس‌کمانش صفحات کامپوزیت ترکیبی تقویت شده با سیم‌های آلیاژ حافظ شکل تحت بارگذاری مکانیکی، حرارتی و ترمومکانیکی ارائه کردند. آنها از روش گالرکین برای بدست آوردن انحراف پس‌کمانش و بار کمانش بحرانی استفاده کردند. بیات و اختراعی‌طوسی[۱۸] از رویکرد لایه‌یی برای تحلیل کمانش حرارتی و پس‌کمانش صفحات کامپوزیتی حاوی لایه‌های مختلف سیم‌های آلیاژ حافظ شکل تحت توزیع دمایی یکنواخت استفاده نمودند. روش لایه‌یی در صفحات کامپوزیت ضخیم نسبت به روش‌های دیگر مناسب‌تر است. سپس، آنها رفتار کمانش حرارتی و پس‌کمانش تیرهای کامپوزیتی تقویت شده با سیم‌های آلیاژ حافظ شکل را تحت توزیع دمای غیریکنواخت بررسی کردند. بیات و اختیاری‌طوسی[۱۹] پس‌کمانش حرارتی پوسته‌های استوانه‌یی درجه‌بندی عملکردی تقویت شده با آلیاژ حافظ شکل در معرض گرمایش یکنواخت و غیریکنواخت که توسط میرزاوند و پورمحمد[۲۰] ارائه شده بود را مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، آنها برای حل معادله انتقال حرارت غیرخطی از روش تفاضل محدود استفاده نمودند و در ادامه، منحنی پس‌کمانش با استفاده از روش گالرکین به دست آوردند. شن و همکاران[۲۱] ارتعاشات تیر درجه‌بندی عملکردی و همچنین پس‌کمانش حرارتی را بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر با استفاده از تکنیک اغتشاش دو مرحله‌یی بررسی کردند. همچنین، اکوز و سیوالک[۲۲] تجزیه و تحلیل کمانش و خمش میکروتیرهای درجه‌بندی عملکردی را با استفاده از ضرایب اصلاح برشی بر اساس تئوری گرادیان کرنش اصلاح شده انجام دادند.

در ادامه مطالعات ارائه شده، میزان تاثیر گرمایش حرارتی در کمانش حرارتی صفحات کامپوزیتی در سرعت‌های مافوق صوت، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، دمای کمانش حرارتی در سرعت‌های مافوق صوت، در حضور و بدون حضور آلیاژ حافظ شکل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. میزان تاثیر آلیاژ حافظ شکل و همچنین لایه‌چینی‌های مختلف صفحات کامپوزیتی، برای میزان پس‌کمانش در سرعت‌های مافوق صوت نیز نشان داده می‌شود. روابط حرارتی با استفاده از تئوری دمای مرجع که تقریب واقعی‌تری را ارائه می‌دهد، استخراج می‌شود. در استخراج معادلات حاکم بر رفتار سیستم، از تئوری لایه‌یی کل استفاده می‌گردد، تا اثرات درون لایه‌یی صفحات کامپوزیتی با دقت بالاتری مورد مطالعه قرار گیرد. در ادامه مدلسازی پانل با استفاده از روابط تئوری فون کارمن، روابط تنش ـ کرنشی پانل بررسی شده و در ادامه روابط حاکم بر سیستم و معادلات حرکت استخراج می‌شود. پس از استخراج روابط حاکم، روش حل مورد بحث قرار گرفته و در پایان، به بحث و بررسی نتایج پرداخته می شود که شامل کمانش، پس‌کمانش و تاثیر دیگر خصوصیات ساختار بر کمانش و پس‌کمانش را شامل می‌باشد.

۲. مدلسازی و تعیین روابط حاکم بر حرکت

در این بخش، مدلسازی و روابط حاکم بر مساله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا باید روابط ساختاری حاکم بر رفتار کامپوزیت تعیین شود. پانل کامپوزیتی مورد مطالعه از نوع مونوکلینیک و تک‌جهته انتخاب شده است (شکل ۱). شرایط مرزی پانل مورد مطالعه از نوع لولا ـ لولا می‌باشد. در شکل ۱، a و b به ترتیب معرف طول و عرض پانل و b_s بیانگر پهنای آلیاژ حافظ شکل است. رابطه تنش ـ کرنش برای هر لایه صفحات، با رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود که در آن σ_{ij} معرف تنش، σ_{ij} بیانگر کرنش عمودی، γ_{ij} نشانگر کرنش برشی، α_{ij} معرف ضریب انتقال حرارتی و $\bar{c}_{ij}$ بیانگر سفتی ساختار هستند.[۲۳]

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{C_{11}} & \overline{C_{12}} & \overline{C_{13}} & 0 & 0 & \overline{C_{16}} \\ \overline{C_{21}} & \overline{C_{22}} & \overline{C_{23}} & 0 & 0 & \overline{C_{26}} \\ \overline{C_{31}} & \overline{C_{32}} & \overline{C_{33}} & 0 & 0 & \overline{C_{36}} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{C_{44}} & \overline{C_{45}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{C_{54}} & \overline{C_{55}} & 0 \\ \overline{C_{61}} & \overline{C_{62}} & \overline{C_{63}} & 0 & 0 & \overline{C_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} - \alpha_{xx}\Delta T \\ \varepsilon_{yy} - \alpha_{yy}\Delta T \\ \varepsilon_{zz} - \alpha_{zz}\Delta T \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xy} - 2\alpha_{xx}\Delta T \end{Bmatrix} \quad (1)$$

شکل ۱. پانل کامپوزیتی سه لایه با شرایط مرزی لولا ـ لولا تحت نیروی آیرودینامیکی با جایگذاری آلیاژ حافظ‌شکل در زاویه °۹۰.

برای تئوری لایه‌یی کامل ارائه شده توسط ردی[۲۳]، باید دو رابطه تئوری لایه‌یی جزئی و تئوری تک صفحه‌یی با هم ترکیب شوند. در ابتدا تئوری لایه‌یی جزئی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این تئوری، از بسط لایه‌یی برای جابجایی مولفه‌های درون صفحه‌یی استفاده شده و در جابجایی‌های عرضی از آن صرف‌نظر شده است. در تئوری لایه‌یی کامل، اثرات برشی عرضی و اثرات نرمال عرضی لایه به طور گسسته لحاظ می‌شوند. در تئوری لایه‌یی جزئی، میدان‌های جابجایی در kامین لایه به صورت زیر می‌باشند:[۲۳]

$$u_k^{LWT}(x,y,z,t)=\sum_{I=1}^{N}U_I(x,y,t)\,\Phi^{\mathrm{I}}(\mathrm{z}) \tag{۲}$$

$$v_k^{LWT}(x,y,z,t)=\sum_{I=1}^{N}V_I(x,y,t)\,\Phi^{\mathrm{I}}(\mathrm{z}) \tag{۳}$$

$$w_k^{LWT}(x,y,z,t)=\sum_{I=1}^{N}W_I(x,y,t)\,\Phi^{\mathrm{I}}(\mathrm{z}) \tag{۴}$$

u_k^{LWT}، v_k^{LWT} و w_k^{LWT} که به ترتیب بیانگر میدان جابجایی در تئوری لایه‌یی در لایه kام و در راستاهای طول، عرض و ارتفاع در صفحه مستطیلی می‌باشند. U_1، V_1 معرف توابع فرضی برای جابجایی های درون صفحه‌یی و W_1 تابع فرضی برای جابجایی عرضی است. N براساس تابع چندجمله‌یی بر حسب ضخامت بیان می‌شود. در تعریف خطی این تابع، N برابر با تعداد نقاط ابتدا و انتهای هر صفحه، مانند شکل ۲ است. در شکل ۲، Φ^I توابع درونیاب بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:[۲۳]

$$\phi_{(z)}^{1}=\psi_1^{(1)}(z)\qquad z_1\le z\le z_2$$

$$\phi_{(z)}^{i}=\begin{cases}\psi_2^{(I-1)}(z) & ,z_{I-1}\le z\le z_I\\ \psi_1^{(I)}(z) & z_I\le z\le z_{I+1}\end{cases}$$

$$\phi_{(z)}^{(N)}=\psi_2^{(Ne)}(z)\qquad z_{N-1}\le z\le z_N \tag{۵}$$

که در آن $0\le\bar{z}\le h_k$، $\psi_2^{(k)}=\frac{\bar{z}}{h_k}$ و $\psi_1^{(k)}=1-\frac{\bar{z}}{h_k}$ می‌باشند. کرنش‌های غیرخطی فون ـ کارمن در میدان جابجایی تئوری لایه‌یی به صورت زیر تعریف می‌شود:[۲۳]

$$\{\varepsilon\}^{LWT}=\sum_{I=1}^{N}\varepsilon^{0\mathrm{LWT}}\varphi^I+\sum_{I=1}^{M}\varepsilon^{1\mathrm{LWT}}\frac{d\varphi_I}{\partial z}$$

$$\varepsilon^{0\mathrm{LWT}}=\left\{\ \frac{\partial U_I}{\partial x}\quad\frac{\partial V_I}{\partial y}\quad 0\quad\frac{\partial W_I}{\partial y}\quad\frac{\partial W_I}{\partial x}\quad\frac{\partial V_I}{\partial x}+\frac{\partial U_I}{\partial y}\ \right\} \tag{۶}$$

$$\varepsilon^{1\mathrm{LWT}}=\left\{0\quad 0\quad W^I\quad V_I\quad U_I\quad 0\right\}^T \tag{۷}$$

که در آن $\varepsilon^{0\mathrm{LWT}}$ معرف کرنش‌های کششی و $\varepsilon^{1\mathrm{LWT}}$ بیانگر کرنش‌هایی بر اثر انحنای صفحه در تئوری لایه‌یی جزئی می‌باشند.

در تئوری تک‌صفحه‌یی کلاسیک، میدان جابجایی به صورت زیر تعریف می‌شود:[۲۳]

$$u^{ESL}(x,y,z,t)=u_0(x,y,t)-z\frac{\partial w_0}{\partial x} \tag{۸}$$

$$v^{ESL}(x,y,z,t)=v_0(x,y,t)-z\frac{\partial w_0}{\partial y} \tag{۹}$$

$$w^{ESL}(x,y,z,t)=w_0(x,y,t) \tag{۱۰}$$

شکل ۲. میدان جابجایی در تئوری لایه‌یی جزئی خطی برای لایه Iام اثر آن بر دیگر لایه‌ها.

بطوریکه $u^{ESL}, v^{ESL}, w^{ESL}$ به ترتیب بیانگر میدان‌های طولی، عرضی و ارتفاعی جابجایی در تئوری کلاسیک بوده و u_0, v_0, w_0 جملات جابجایی در راستاهای x, y برحسب مولفه زمان می‌باشند. همچنین، کرنش‌های غیرخطی فون ـ کارمن در تئوری کلاسیک، به صورت زیر است:[۲۳]

$$\{\varepsilon\}^{ESL}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zz}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\gamma_{xy}\end{Bmatrix}=\left[\varepsilon^0\right]+z\left[\varepsilon^1\right] \tag{۱۱}$$

که در آن ε^1 و ε^0 به صورت زیر می‌باشند:[۲۳]

$$\left\{\varepsilon^1\right\}=\left\{-\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\quad -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\quad 0\quad 0\quad 0\quad -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\right\}^T \tag{۱۲}$$

$$\left\{\varepsilon^0\right\}=\left\{\ \frac{\partial u_0}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2\quad \frac{\partial v_0}{\partial y}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial y}\right)^2\quad 0\quad 0\quad 0\quad \frac{\partial u_0}{\partial y}+\frac{\partial v_0}{\partial x}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial w_0}{\partial y}\ \right\}^T \tag{۱۳}$$

میدان جابجایی کل برابر مجموع میدان‌های جابه‌جایی تئوری لایه‌یی جزئی با میدان جابجایی کلاسیک است. لذا داریم:[۲۳]

$$u_i(x,y,z)=u_i^{ESL}(x,y,z)+u_i^{LWT}(x,y,z) \tag{۱۴}$$

$$v_i(x,y,z)=v_i^{ESL}(x,y,z)+v_i^{LWT}(x,y,z) \tag{۱۵}$$

$$w_i(x,y,z)=w_i^{ESL}(x,y,z)+w_i^{LWT}(x,y,z) \tag{۱۶}$$

که در آن u_i, v_i, w_i میدان‌های جابجایی کل بر اساس تئوری لایه‌یی کامل بوده و ρ^k چگالی پانل در لایه kام می‌باشد. بر اساس تئوری پیستون و با محاسبه اختلاف فشار بالایی و زیرین صفحات و با صرف نظر از جملات غیرخطی، نیروی آیرودینامیکی وارده به پانل از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:[۲۴]

$$\Delta P_a=-2\frac{\rho_\infty U_\infty}{M_\infty}\left[\left(\frac{\partial w_i}{\partial t}+U_\infty\frac{\partial w_i}{\partial x}\right)\right] \tag{۱۷}$$

$$F_{Aero}=\int\int_A\Delta P_a w_i\,dxdy \tag{۱۸}$$

P_a برابر فشار آیرودینامیکی وارده به پانل، ρ_∞ برابر چگالی هوا، U_∞ برابر سرعت نسبی هوا به پانل، M_∞ برابر ماخ هوا و F_{Aero} برابر نیروی آیرودینامیکی وارده بر پانل در اثر اختلاف فشار ایجاد شده می‌باشد. با در نظرگرفتن ضرایب بی‌بعد Λ و μ_{aero} برای فشار آیرودینامیکی داریم:[۲۴]

$$\mu_{aero} = \frac{\rho_\infty h}{\rho_p a M_\infty} \tag{۱۹}$$

$$\Lambda = \frac{\rho_\infty}{\rho_p}\frac{M_\infty V s^2}{\omega_0^2}\frac{a}{h} \tag{۲۰}$$

$$(\Lambda\mu_{aero})^{\frac{1}{2}} = \frac{\rho_\infty}{\rho_p}\frac{Vs}{\omega_0} \tag{۲۱}$$

که در آن V_s بیانگر سرعت سیال، ω_0 فرکانس طبیعی سیستم و ρ_p چگالی صفحه می‌باشد. نسبت ضریب جرمی هوا به ورق را برابر $\varsigma = \frac{\rho_\infty c r}{\rho_p h}$ در نظرگرفته و داریم:

$$\frac{\varsigma}{M_\infty} = 0/01 \tag{۲۲}$$

برای پیش‌بینی اصطکاک بین پانل و هوای محیط از مدلسازی دمای مرجع[۶] استفاده شده است.[۲۵] این مدل، در ابتدا توسط روبسین و جانسون[۲۶] طرح و سپس توسط اکرت[۲۷] اصلاح شد تا شامل آنتالپی مرجع باشد:

$$\frac{T^*}{T_e} = 1 + 0/032 M_e^2 + 0.58\left(\frac{T_w}{T_e} - 1\right) \tag{۲۳}$$

بطوری‌که T^* بیانگر دمای مرجع، T_e معرف دمای لبه پانل، M_e نشانگر عدد ماخ در لبه و T_w برابر دمای دیواره می‌باشد. در صفحات مسطح $T_e = T_\infty$ و $M_e = M_\infty$ و $T_w = T_{aw}$ دمای دیواره برابر است با:

$$r = \frac{h_{aw} - h_e}{h_0 - h_e} = \frac{T_{aw} - T_e}{T_0 - T_e} \tag{۲۴}$$

بطوری‌که h_{aw} بیانگر آنتالپی آدیاباتیک، h_e معادل آنتالپی لبه پانل، h_0 معرف آنتالپی اولیه پانل و همچنین T_{aw} نشانگر دمای آدیاباتیک پانل T_0 برابر دمای اولیه می‌باشد. مقدار r برابر $r = \sqrt{P_r}$ می‌باشد که P_r عدد پرانتل برابر ۰/۷۱۵ در نظر گرفته شده است.[۲۵] سیم آلیاژ حافظ شکل بر اساس تئوری تیر اویلر - برنولی[۷] شبیه‌سازی شده است. در مدل ارائه شده توسط لاگوداس، با فرض سخت‌شوندگی چندجمله‌یی[۲۷]، معادلات انتقال فاز به صورت زیر خواهد بود:

- در محدوده آستنیت:

$$\varepsilon^A = S^A\sigma + \alpha^A(T - T_0) \tag{۲۵}$$

- در محدوده مارتنزیت:

$$\varepsilon^M = S^M\sigma + \alpha^M(T - T_0) \tag{۲۶}$$

که در آن، S^i نشانگر پارامتر انطباقی و برابر معکوس تنسور سفتی است، α^i معرف ضریب انتقال حرارت و i در این معادلات نمایانگر M و A می‌باشد که به ترتیب فازهای مارتنزیت و آستنیت را نشان می‌دهند. برای لحاظ مودن اثر سخت شوندگی، چندجمله‌یی ارائه شده توسط بوید و لاگوداس[۲۷] مورد استفاده قرار می گیرد:

$$Y = \frac{1}{4}\rho\Delta s_0\left(M_s + M_f - A_f - A_s\right) \tag{۲۷}$$

$$b^A = -\Delta s_0\left(A_f - A_s\right) \tag{۲۸}$$

$$b^M = -\Delta s_0\left(M_s - M_f\right) \tag{۲۹}$$

$$\mu_1 = \frac{1}{2}\rho\Delta s_0\left(M_s + A_f\right) - \rho\Delta u_0 \tag{۳۰}$$

$$\mu_2 = \frac{1}{4}\rho\Delta s_0\left(A_s - A_f - M_f + M_s\right) \tag{۳۱}$$

بطوریکه Δu_0 معرف اختلاف انرژی درونی بین فاز آستنیت و مارتنزیت است. در یک مسیر با بار ثابت (تنش ثابت)، در ابتدا باید مقدار کرنش را برحسب تغییرات دمایی محاسبه کرد. Δs_0 بیانگر مقدار آنتروپی اولیه آلیاژ می‌باشد. M_s^σ، M_f^σ، A_s^σ، A_s^σ، به ترتیب معرف دمای شروع و پایان مارتنزیت و دمای شروع و پایان آستنیت می‌باشند. برای محاسبه M_s^σ، M_f^σ، A_s^σ، A_s^σ، داریم:

$$\frac{1}{2}\Delta S\sigma^2 + \sigma H_M + \rho\Delta s_0\left(M_s^\sigma - M_s\right) = 0 \tag{۳۲}$$

$$\frac{1}{2}\Delta S\sigma^2 + \sigma H_M + \rho\Delta s_0\left(M_f^\sigma - M_f\right) - \rho b^M = 0 \tag{۳۳}$$

$$\frac{1}{2}\Delta S\sigma^2 + \sigma H_M + \rho\Delta s_0\left(A_f^\sigma - A_f\right) - \rho b^A = 0 \tag{۳۴}$$

$$\frac{1}{2}\Delta S\sigma^2 + \sigma H_M + \rho\Delta s_0\left(A_s^\sigma - A_s\right) = 0 \tag{۳۵}$$

بطوریکه H_M بیانگر حداکثر تنش، $\Delta S = S^M - S^A$ است. به منظور بی‌بعدسازی معادلات زمان، پارامترهای مربوطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{u}_{ij} = \frac{u_{ij}}{H}, \bar{v}_{kl} = \frac{v_{kl}}{H}, \bar{w}_{mn} = \frac{w_{mn}}{H},$$
$$\bar{q}_{ij} = \frac{q_{ij}}{H}, r_{kl} = \frac{r_{kl}}{H}, \bar{s}_{mn} = \frac{s_{mn}}{H}$$

همچنین، اعداد بی‌بعد آیرودینامیکی از قبل در روابط ۲۱ و ۲۲ آمده است. رابطه لاگرانژ برای کمانش استاتیکی و صفر در نظرگرفتن انرژی جنبشی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$-\frac{\partial U}{\partial p_i} = \frac{\partial W_f}{\partial p_i} = Q_i,$$
$$p_i = (u_{ij}, v_{kl}, w_{mn}, q_{ij}, r_{kl}, s_{mn}) \tag{۳۶}$$

بطوریکه U معرف انرژی الاستیک و همچنین p_i نشانگر مدهای فرضی انتخاب شده در راستاهای u, v, w برای دو روش تئوری لایه‌یی و تئوری کلاسیک می‌باشند. مدهای فرضی انتخاب شده در راستاهای u, v به صورت میله و در راستای w به صورت تیر در نظر گرفته شده است:

$$u_0^{esl}(x,y,t) = \sum_i\sum_j q_{ij}(t)\,\chi_i^e(x)\,\vartheta_j^e(y) \tag{۳۷}$$

$$v_0^{esl}(x,y,t) = \sum_k\sum_l r_{kl}(t)\,\gamma_k^e(x)\,\theta_l^e(y) \tag{۳۸}$$

$$w_0^{esl}(x,y,t) = \sum_m\sum_n s_{mn}(t)\,\phi_m^e(x)\,\psi_n^e(y) \tag{۳۹}$$

$$u_0^{lwt}(x,y,t) = \sum_i\sum_j u_{ij}(t)\,\chi_i^L(x)\,\vartheta_j^L(y) \tag{۴۰}$$

$$v_0^{lwt}(x,y,t) = \sum_k\sum_l v_{kl}(t)\,\gamma_k^L(x)\,\theta_l^L(y) \tag{۴۱}$$

$$w_0^{lwt}(x,y,t) = \sum_m\sum_n w_{mn}(t)\,\phi_m^L(x)\,\psi_n^L(y) \tag{۴۲}$$

که پاسخ‌های فرضی انتخاب شده در روابط اخیر برابرند با:

$$\chi_i^e, \gamma_k^e, \chi_i^L, \gamma_k^L(x) = C_1\cos(\omega x) + C_2\sin(\omega x) \quad (۴۳)$$

$$\vartheta_j^e(y), \theta_l^e(y), \vartheta_j^L(y), \theta_l^L(y) = C_1\cos(\omega y) + C_2\sin(\omega y) \quad (۴۴)$$

$$\phi_m^e, \phi_m^L(x) = B_1\cosh(\beta x) + B_2\sinh(\beta x) + B_3\cos(\beta x) + B_4\sin(\beta x) \quad (۴۵)$$

$$\psi_n^e, \psi_n^L(y) = B_1\cosh(\beta y) + B_2\sinh(\beta y) + B_3\cos(\beta y) + B_4\sin(\beta y) \quad (۴۶)$$

معادلات کل حاکم بر پانل مستطیلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\left([K]_P + [K]_S\right)\left[\overline{p_i}\right] + [NL]_P + [NL]_S = [FT]_P + [FT]_S + [FS] \quad (۴۷)$$

بطوریکه در آن $[K]$ معرف ماتریس سفتی، $[NL]$ بیانگر ماتریس غیرخطی سیستم، $[FT]$ معادل نیروی گرمایی وارد شده بر پانل و $[FS]$ برابر با نیروی وارد شده بر اثر تغییر فاز سیم آلیاژ حافظ شکل می‌باشند. همچنین، زیرنویس‌های P، S و $Aero$ به ترتیب بیانگر پانل، سیم آلیاژ حافظ شکل و آیرودینامیک می‌باشند.

۳. نتایج عددی

در ادامه، نتایج عددی حاصل از مدلسازی انجام شده در بخش ۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. در جداول ۱ و ۲ مولفه‌های ساختاری استفاده شده در صفحات کامپوزیتی و همچنین سیم آلیاژ حافظ شکل به کار رفته در مدلسازی گزارش شده است. از آنجایی که در سرعت‌های مافوق صوت، میزان گرمایش حرارتی بالا می‌رود، سیم آلیاژ حافظ شکل، به صورت مارتنزیت جایگذاری می‌شود تا بعد از افزایش دما، سیم با انتقال فاز از مارتنزیت به آستنیت نیروی فشاری به سیستم وارد نماید. در تمامی مسائل، عدد پرانتل برابر ۰/۷۱۵ و ضریب جرمی هوا به ورق برابر ۰/۰۱ در نظر گفته شده است. همچنین مقدار دمای اولیه هوا ۳۰۰ درجه کلوین می‌باشد. در اثر حرارت ایجاد شده در ماخ‌های بالا، پانل کامپوزیتی دچار کمانش حرارتی می‌شود. این ختلاف دما را با ΔT_{cr} نشان می‌دهند. کمانش حرارتی در جابجایی عرضی $\overline{w}$ اتفاق می‌افتد. زیرا در اثر اختلاف دما، انبساط یا انقباض برای حرکات درون صفحهای ایجاد می‌شود. در رابطه ۴۷، معادلات حرکت برای هر سه جهت حرکتی بیان شده‌اند. با حفظ جملات خطی برای جابجایی عرضی $\overline{w}$، ΔT_{cr} از حل مساله مقدار ویژه زیر بدست می‌آید:

$$\left[K_w^w - \Delta T_{cr} K_w^T\right]\{\overline{w}\} = 0 \quad (۴۸)$$

با اضافه کردن آلیاژ حافظ شکل به این پانل، می‌توان اثرات بهبود این آلیاژ را بر کمانش پانل بررسی کرد. مقدار کمانش حرارتی بر صفحات مستطیلی شکل بر اثر تغییر نسبت ابعاد (نسبت طول به عرض a/b) پانل مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین، با تغییر زاویه چینش صفحات، مقادیر مختلف کمانش حرارتی به صورت جداگانه نوشته شده است.

برای اعتبار سنجی روابط، در ابتدا فرکانس‌های طبیعی سیستم برای حالت (۰/۹۰/۹۰/۰) با فرکانس‌های طبیعی ارائه شده در مرجع[۲۳] مقایسه شده است.

جدول ۱. مشخصات صفحه کامپوزیتی.[۲۳]

۲۹/۴	$E_1(GPa)$
۱۵/۲	$E_2, E_3(GPa)$
۶/۰۶	$G_1(GPa)$
۳/۰۳	$G_2, G_3(GPa)$
۰/۳۲	v_{12}, v_{23}, v_{13}
$7/5 \times 10^6$	a_{11}
18×10^6	a_{22}, a_{33}
۴۵	$H(mm)$
۱۳۳۰	$\rho_p\left(kg/m^3\right)$
۳۰۰	$T_0\ aero$

جدول ۲. مشخصات آلیاژ حافظ شکل.[۲۷]

۲۲۶	$M_s\,(^\circ K)$
۱۹۴	$M_f\,(^\circ K)$
۲۴۱	$A_S\,(^\circ K)$
۲۷۰	$A_F\,(^\circ K)$
22×10^6	$\alpha_{Aus}\alpha_{Mar}$
۳۲/۵	E_{Aus} (Gpa)
۲۳	E_{Mar} (Gpa)
$11/55 \times 10^4$	$\rho\Delta s_0$
۵۱۰۰	$\rho_{sma}\left(kg/m^3\right)$

جدول ۳. فرکانس طبیعی برای لایه‌چینی (۰/۹۰/۹۰/۰).

شماره فرکانس	مرجع[۲۳]	کار حاضر	درصد خطا
۱	۹۸۹/۳	۹۸۹/۲	۰/۰۱۴۶
۲	۲/۳۳۴۴	۲/۲۷۸۲	۲/۴۰۴۱
۳	۲/۷۳۴۴	۲/۵۹۲۵	۵/۱۹۲۶
۴	۳/۹۵۷۴	۳/۹۵۵۱	۰/۰۵۸۴
۵	۴/۶۳۸۹	۴/۶۳۵۵	۰/۰۷۳
۶	۵/۶۸۶۴	۵/۶۸۲۳	۰/۰۷۳
۷	۶/۱۵۸۰	۶/۱۵۲۲	۰/۰۹۴۹
۸	۶/۸۳۴۴	۶/۸۲۷۹	۰/۰۹۴۹
۹	۸/۹۰۴۲	۸/۸۹۲۶	۰/۱۳۱۳

همچنین، مقادیر فرکانس طبیعی با محاسبه خطا برای صفحه کامپوزیتی با لایه‌چینی قرینه (۰/۹۰/۹۰/۰)، در جدول ۳ نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی کمانش حرارتی، مقدار کمانش حرارتی برای دو حالت لایه‌چینی کامپوزیتی ([۰/۰/۰/۰] و [۱۵/۱۵ − /۱۵ − /۱۵]) الف) پژوهش حاضر و ب) پژوهش صورت گرفته توسط لچانگ شیائو[۲۸] مقایسه شد. شکل ۳ به خوبی نشان می‌دهد که میزان خطا در کمانش حرارتی برای این دو حالت بسیار کم بوده و تقریبا با هم برابر هستند.

شکل ۴، کمانش حرارتی برای لایه‌چینی‌های مختلف با چینش (۰/۹۰/۰/۹۰)، (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵ − /۴۵) و (۳۰/۶۰) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در نسبت ابعادی پایین ($b > a$)، بالاترین دمای کمانش حرارتی به ترتیب مربوط به (۴۵ − /۴۵)، (۳۰/۶۰)، (۰/۹۰/۰/۹۰) و (۰/۹۰/۹۰/۰) است. اما در ادامه، با افزایش معمولی نسبت ابعادی ($a > b$)، بالاترین دمای کمانش حرارتی به ترتیب مربوط به (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵ − /۴۵)، (۳۰/۶۰) و (۰/۹۰/۰/۹۰) می‌باشد.

شکل ۳. مقایسه کمانش حرارتی (الف) پژوهش حاضر (ب) مرجع[۲۸]

شکل ۴. کمانش حرارتی برای صفحات کامپوزیتی با چیدمان (۹۰/۰/۹۰/۰)، (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵/ – ۴۵)، (۳۰/۶۰).

شکل ۴ نشان می‌دهد که در نسبت‌های ابعادی کوچک، زاویه فیبرهای کامپوزیتی در کمانش حرارتی پانل تحت تنش حرارتی، تأثیر بیشتری نسبت به قرینگی ساختار دارد. همچنین، در نسبت‌های ابعادی بزرگ، قرینگی چینش تأثیر بیشتری نسبت به دیگر مولفه‌ها در افزایش دمای کمانش حرارتی ایفا می‌کند. شکل ۴الف، نمودار کمانش حرارتی برای پانل کامپوزیتی ۴ لایه‌یی با لایه چینی (۹۰/۰/۹۰/۰) را بر حسب تغییرات نسبت به ابعاد پانل نشان می‌دهد. نقاط مربعی شکل در شکل ۴ ب، ج و د نشانگر پانل کامپوزیتی بدون آلیاژ حافظ شکل و نقاط دایره‌یی‌شکل، نمایشگر پانل کامپوزیتی با جایگذاری آلیاژ حافظ‌شکل در زاویه °۹۰ و با عرض از مبدا مرکز پانل می‌باشند (شکل۱). به‌طور مشابه، برای شکل‌های ۵ ب، ج و د، به

الف) چینش (۹۰/۰/۹۰/۰)؛

ب) چینش (۰/۹۰/۰/۹۰)؛

ج) (۴۵/-۴۵)؛

د) چینش (۳۰/۶۰).

شکل ۵. کمانش حرارتی برای چینش (۹۰/۰/۹۰/۰)، (۰/۹۰/۹۰/۰)، – /۴۵) (۴۵، (۳۰/۶۰).

شکل ۶. میزان پس کمانش حرارتی برای صفحات کامپوزیتی با چیدمان.

ترتیب لایه‌چینی صفحات کامپوزیتی (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵ – /۴۵) و (۶۰/۳۰) را نشان می‌دهند. شکل‌های ۵ الف، ب، ج و د نشان دهنده تاثیر آلیاژ حافظ شکل در بالا بردن دمای کمانش حرارتی می‌باشد. با بالا رفتن نسبت اندازه طول پانل کامپوزیتی نسبت به عرض پانل، تاثیرات آلیاژ حافظ شکل کمتر خواهد شد. دلیل این رخداد، جایگذاری آلیاژ حافظ شکل، در زاویه °۹۰ درجه می‌باشد. برای محاسبه پس‌کمانش حرارتی در دماهای بالاتر از دمای بحرانی کمانش، باید معادله حرارتی مربوطه را حل کرد. در واقع، پس‌کمانش، میزان جابه‌جایی یک نقطه مشخص از پانل در دماهای بعد از دمای بحرانی کمانش حرارتی را نشان می‌دهد که از حل معادله ۴۷، برای اختلاف دمای بالاتر از دمای کمانش بدست می‌آید.

شکل ۶، میزان پس‌کمانش حرارتی برای صفحات با چینش‌های ذکر شده در قسمت کمانش حرارتی برای مرکز پانل را نشان می‌دهد. در این بررسی، نسبت ابعاد پانل مورد مطالعه برابر با ۱ می‌باشد. نمادهای مربع، ستاره، مثلث و دایره به ترتیب بیانگر چیدمان (۰/۹۰/۰/۹۰)، (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵ – /۴۵) و (۶۰/۳۰) می‌باشند. همانطور که از نمودار شکل ۵ مشخص است، میزان خیز صفحه در اثر بار حرارتی تا دمای زیر دمای بحرانی، صفر می‌باشد. اما با افزایش دما و عبور از دمای بحرانی، خیز تیر در اثر بار حرارتی افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شکل ۴، می‌توان نتیجه گرفت که نمودار رسم شده در شکل ۶، در ترتیب وقوع پس‌کمانش در دمای شروع کمانش حرارتی مقدار درستی را نشان می‌دهد. نمودارهای الف، ب، ج و د در شکل۷، مقادیر پس‌کمانش حرارتی برای چینش‌های (۰/۹۰/۰/۹۰)، (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵ – /۴۵) و (۶۰/۳۰) با و بدون جایگذاری سیم آلیاژ حافظ شکل با زاویه ۹۰ درجه، در این صفحات را نشان می‌دهد.

با توجه به این نمودارها، می‌توان میزان پس‌کمانش حرارتی در حضور و یا عدم حضور سیم آلیاژ حافظ شکل در صفحات کامپوزیتی را مشاهده کرد. این نمودارها نشان می‌دهند که خیز صفحه در اثر بار حرارتی حاصل از آیرودینامیک سیستم به دلیل جایگذاری سیم آلیاژ حافظ شکل کاهش یافته و توانسته خیز صفحه را تا دماهای بالاتری صفر نگه دارد. همچنین، این نمودارها بیانگر این مطلب هستند که سیم آلیاژ حافظ شکل درکاهش شیب تغییرات پس کمانش نسبت به دما تاثیر قابل توجهی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات تنش حرارتی درکمانش و پس کمانش حراتی در پانل کامپوزیتی

الف) چینش (۰/۹۰/۰/۹۰)؛

ب) چینش (۰/۹۰/۹۰/۰)؛

ج) چینش (۶۰/۳۰)؛

د) چینش (۴۵/-۴۵).

شکل ۷. میزان پس کمانش حرارتی برای پانل کامپوزیتی با و بدون سیم آلیاژ حافظ شکل.

مستطیلی شکل با شرایط مرزی لولا ـ لولا و میزان اثر آلیاژ حفظ شکل در کنترل این دو پدیده مورد بررسی قرار گرفت. اثرات گرمایشی با استفاده از روش دمای مرجع تخمین زده شد. سیم آلیاژ حافظ شکل در حالت مارتنزیتی جایگذاری شد تا بعد از تغییر فاز به آستنتیت، نیروی فشاری جهت کنترل نیروهای گرمایشی و آیرودینامیکی به پانل وارد شود. معادلات حاکم بر سیستم، از طریق روش تئوری لایه‌یی استخراج گردید تا بتواند تاثیرات جابجایی‌های درون صفحه‌یی را بهتر نشان دهد. همچنین، میزان تاثیر لایه‌چینی‌های مختلف صفحات کامپوزیتی در کمانش و همچنین پس کمانش مورد مطالعه قرارگرفت. به منظور بررسی کمانش حرارتی، تاثیر لایه‌چینی‌های مختلف (اثرات قرینگی و زاویه چینش صفحات کامپوزیتی) بررسی گردید. طبق نتایج بدست آمده، لایه‌چینی صفحات (۰/۹۰/۹۰/۰)، (۴۵ – /۴۵)، (۶۰/۳۰)و (۰/۹۰/۰/۹۰) بیشترین تاثیر در بالا بردن دمای بحرانی کمانش حرارتی در نسبت های ابعادی (a/b) برابر و یا بیشتر از یک را دارد و نشان دهنده‌ی تاثیر بیشتر قرینگی چینش‌ها نسبت به زاویه‌ی چینش‌ها می‌باشد. از نمودارهای پس‌کمانش برای تأثیر آلیاژ حافظ‌شکل، می‌توان استنتاج کرد که جایگذاری این آلیاژ در پانل کامپوزیتی، علاوه بر افزایش دمای کمانش، تأثیر بیشتری در کنترل جابه‌جایی پس‌کمانشی دارد.

پانوشت‌ها

1. Divergence
2. Flutter
3. Shape Memory Alloy (SMA)
4. Equivalent Single Layer (ESL)
5. Full Layerwise Theory
6. Reference Temperature
7. Euler Bernoulli

منابع (References)

1. Dowell, E., 1970. Panel flutter-A review of the aeroelastic stability of plates and shells. *AIAA Journal*, *8*(3), pp.385-399. https://doi.org/10.2514/3.5680.
2. SHORE, C., Mei, C. and GRAY, C. E., 1991. Finite element method for large-amplitude two-dimensional panel flutter at hypersonic speeds. *AIAA journal*, *29*(2), pp.290-298. https://doi.org/10.2514/3.10576.
3. Mei, C., Abdel-Motagaly, K. and Chen, R., 1999. Review of nonlinear panel flutter at supersonic and hypersonic speeds. *Applied Mechanics Reviews*, *52*(10), pp.321-332. https://doi.org/10.1115/1.3098919.
4. Abbas, L.K., Rui, X., Marzocca, P., Abdalla, M. and De Breuker, R., 2011. A parametric study on supersonic/hypersonic flutter behavior of aero-thermo-elastic geometrically imperfect curved skin panel. *Acta Mechanica*, *22*(1-2), pp.41-57. https://doi.org/10.1007/s00707-011-0525-8.
5. Librescu, L., Marzocca, P. and Silva, W. A., 2004. Linear/nonlinear supersonic panel flutter in a high temperature field. *Journal of Aircraft*, *41*(4), pp.918-924. http://dx.doi.org/10.2514/1.679.
6. Gee, D. and Sipcic, S., 1999. Coupled thermal model for nonlinear panel flutter. *AIAA journal*, *37*(5), pp.642-650. https://doi.org/10.2514/2.765.
7. Dowell, E. and Ventres, C., 1970. Comparison of theory and experiment for nonlinear flutter of loaded plates. *AIAA Journal*, *8*(11), pp.2022-2030. https://doi.org/10.2514/3.6041.
8. Xue, D.Y. and Mei, C., 1993. Finite element nonlinear panel flutter with arbitrary temperatures in supersonic flow. *AIAA journal*, *31*(1), pp.154-162. https://doi.org/10.2514/3.11332.
9. Zhou, R., Xue, D. Y. and Mei, C., 1994. A finite element time domain-Modal formulation for nonlinear flutter of composite panels at elevated temperatures. *Proc. AIAA-1424, Hilton Head, SC, United States: AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.* https://doi.org/10.2514/3.12250.
10. Pourtakdoust, S. and Fazelzadeh, S., 2005. Nonlinear AeroThermoelastic behavior of skin panel with wall shear stress effect. *Journal of Thermal Stresses*, *28*(2), pp.147-169. https://doi.org/10.1080/014957390523714.
11. Han J.H. and Lee, I., 1998. Analysis of composite plate with piezoelectric actuators for vibration control using layerwise displacement theory. *Composites B*, *29*, pp.621-32. https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00027-4.
12. Rogers, C.A. and Robertshaw, H.H., 1988. Shape memory alloy reinforced composites Engineering Science Preprints 25 Society of Engineering Science, Inc. ESP25.8027
13. Ho, M.T., Chen, R.R. and Chu, L.C., 1997. Experimental study for thermal post-buckling of isotropic and composite panels with embedded shape memory alloy Proc. *SPIE Int. Soc. Opt. Eng*, *3041*, pp.901-11. DOI:10.1117/12.27 5716.
14. Lee, H.J. and Lee, J.J., 2000. A numerical analysis of the buckling and post buckling behavior of laminated composite shell with embedded shape memory alloy wire actuators, *Smart Mater. Struct*, *9*, pp. 780-7. DOI: 10.1088/0964-1726/9/6/307.
15. Tawfik M.T., Ro, J.J. and Mei, C., 2002. Thermal post-buckling and aeroelastic behavior of shape memory alloy reinforced plates Smart Mater. *Struct*, *11*, pp.297-307. DOI: 10.1088/0964-1726/11/2/313.
16. Zhang, Z. and Sheng, P., 2016. Research on stability and nonlinear vibration of shape memory alloy hybrid laminated composite panel under aerodynamic and thermal loads. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *27*(20), pp.2851-2861. https://doi.org/10.1177/1045389X16642300.

17. Kabir, M.Z. and Tavousi Tehrani, B., 2017. Closed-form solution for thermal, mechanical, and thermo-mechanical buckling and post-buckling of SMA composite plates. *Composite Structures*, *168*, pp.535-548. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.046.

18. Bayat, Y. and EkhteraeiToussi, H. 2017. Exact solution of thermal buckling and post buckling of composite and SMA hybrid composite beam by layerwise theory. *Aerospace Science and Technology*, *67*. pp.484-494. http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2017.04.029.

19. Bayat, Y. and Ekhteraei Toussi, H. 2020. Analytical layerwise solution of nonlinear thermal instability of SMA hybrid composite beam under nonuniform temperature condition. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *27*(19), pp.1673-1686. https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1524950.

20. Mirzavand, B. and Pourmohammad, H., 2019. Post-buckling analysis of non-uniformly heated functionally graded cylindrical shells enhanced by shape memory alloys using classical lamination theory. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *30*(16), pp.2421-2435. https://doi.org/10.1177/1045389X19861794.

21. Shen, H.S., Xiang, Y. and Fan, Y. 2019. Nonlinear vibration of thermally postbuckled FG-GRC laminated beams resting on elastic foundations. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, *19*(06). 1950051. https://doi.org/10.1142/S0219455419500512.

22. Akgoz, B. and Civalek, O., 2016. Bending analysis of embedded carbon nanotubes resting on an elastic foundation using strain gradient theory. *Acta Astronautica*, *119*, pp.1-12. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.021.

23. Reddy, J.N., 2003. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*. Second Edition (2nd ed).

24. Kevin, A. McHugh. and Maxim, Freydin., 2020. Flutter and Limit Cycle Oscillations of Cantilevered Plate in Supersonic Flow. *AIAA Journal*. DOI: 10.2514/1.C035992.

25. Anderson, John David., (2019). Hypersonic and high-temperature gas dynamics *AIAA Journal*, https://doi.org/10.2514/4.861956.

26. Rubesin, M.W. and Johnson, H.A., 1949. Acritical review of skin-friction and heat-transfer solutions of the laminar boundary layer of a flat plate. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, *71*(4), pp.383-388. https://doi.org/10.1115/1.4017082.

27. book] D.C. Lagoudas., 2008. *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, Springer Science+ Business Media*, LLC, New York USA. DOI:10.1007/978-0-387-47685-8.

28. Shiau, L.C., Kuo, S.Y. and Chen, C.Y., 2010. Thermal buckling behavior of composite laminated plates. *Composite Structures*, *92*(2), pp.508-514. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.035.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۱۳-۲۴، (پژوهشی)

Original Article

طراحی و مقایسه بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر عملکرد ماژول خورشیدی

میرمصطفی اسود (کارشناسی ارشد)
مفید گرجی* (استاد)
آرش مهدوی (کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

انرژی خورشیدی را می‌توان با استفاده از ماژول‌های خورشیدی به الکتریسیته تبدیل کرد. استفاده از بازتابنده سبب افزایش تابش انرژی خورشیدی بر روی سطح ماژول می‌شود. در این مقاله، تأثیر انواع بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر دما و بازده ماژول به‌صورت دو بعدی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد دمای ماژول خورشیدی ادغام شده با بازتابنده صفحه تختی با شیب ۸۵ درجه نسبت به افق به ۳۶۰/۸۲ درجه کلوین و دمای ماژول ادغام شده با بازتابنده سهموی به ۳۷۱/۱۱ درجه کلوین می‌رسد. در مقابل، دمای ماژول با بازتابنده‌یی با شیب ۵° درجه برای هر دو حالت سهموی و صفحه تخت به ۳۴۵/۹۴ و ۳۴۶ درجه کلوین می‌رسد. با افزایش زاویه در بازتابنده‌های صفحه تخت و سهموی، دمای ماژول افزایش یافت و بازتابنده‌های سهموی در زاویه‌های شیب بالاتر، دمای بالاتر و توان تولیدی بالاتری نسبت به بازتابنده‌های صفحه تخت دارند. همچنین، دمای ماژول با استفاده از ۶ نوع بازتابنده ترکیبی نیز ارزیابی و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، ماژول خورشیدی، بازتابنده، دمای ماژول، بازده.

mostafaasvad75@gmail.com
gorji@nit.ac.ir
arashmahdavi93@gmail.com

۱. مقدمه

با افزایش نیاز بشر به انرژی، تولید انرژی الکتریکی بسیار حائز اهمیت است. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی می‌تواند به حل مشکل آلودگی‌های زیست محیطی کمک کند. انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از این منابع تجدیدپذیر، دارای پتانسیل بسیار بالا برای تأمین انرژی است. ماژول‌های خورشیدی به‌عنوان وسیله‌یی برای بهره‌برداری از این انرژی، بسیار موثر هستند. این ماژول‌ها بدون صدا و بدون داشتن قطعه متحرکی کار می‌کنند. به همین دلیل، استفاده از این تکنولوژی‌ها امروزه توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده است.[۱]

استفاده از بازتابنده‌ها شدت تابش انرژی خورشید را افزایش می‌دهد و تعداد سلول‌های خورشیدی مورد نیاز برای تولید توان مشخص را کاهش می‌دهد.[۲-۴] در یک مطالعه انجام شده توسط مالیک و چندل،[۵] مشخص شد که میانگین افزایش توان تولیدی در سیستم‌های فتوولتائیک با استفاده از بازتابنده‌های آینه‌یی در تابستان به نسبت ۱۹/۸۴-۱۰ درصد و در زمستان به نسبت ۱۳/۲۳-۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

در مطالعه دیگری انجام شده توسط سانگانی و سولانکی،[۶] یک سیستم متمرکز فتوولتائیک به شکل V طراحی و ساخته شد. این سیستم توان خروجی را در مقایسه با سیستم بدون بازتابنده به نسبت ۴۴ درصد افزایش داد. در تجزیه و تحلیلی که هوانگ و سان[۷] انجام دادند، مشخص شد که استفاده از بازتابنده با نسبت تمرکز $2x$ توان خروجی را ۲۴/۵ درصد افزایش می‌دهد و با ترکیب ردیاب یک محوره با قابلیت تنظیم در سه موقعیت، تولید برق به اندازه ۵۶ درصد افزایش می‌یابد. هلنا و همکاران،[۸] در مطالعه‌یی در زمینه بهینه‌سازی هندسه بازتابنده برای سیستم‌های فتوولتائیک مناسب نمای ساختمان، به این نتیجه رسیدند که استفاده از بازتابنده‌میزان تولید برق را تا ۷۲ درصد نسبت به یک ماژول بدون بازتابنده‌افزایش می‌دهد. ناراسیمان و سلوارسان،[۹] یک سیستم متمرکزکننده با بازتابنده آینه‌یی را طراحی کردند و مشاهده شد که حداکثر توان خروجی برای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲۷.

استناد به این مقاله:
اسود، میرمصطفی، گرجی، مفید، و مهدوی، آرش، ۱۴۰۲. طراحی و مقایسه بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر عملکرد ماژول خورشیدی. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۳-۲۴. DOI:10.24200/J40.2022.60438.1642

نسبت تمرکز $1x$ و $2x$ به ۹ و ۱۰/۵ وات و درصد بهبود توان برای نسبت تمرکز $1x$ و $2x$ به‌ترتیب ۲۲/۳ و ۴۵/۸ درصد نسبت به ماژول مرجع است. محمد منصور و همکاران،[۱۰] تأثیر بازتابنده بر روی ماژول فتوولتائیک را بررسی کردند و نتایج حاصل نشان می‌دهد که استخراج انرژی حدود ۳۰ درصد بیشتر از سیستم فتوولتائیک مرجع می‌باشد. همچنین، یک نیروگاه صنعتی ۵ مگاواتی که در حال حاضر در حال فعالیت است، مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که اگر این نیروگاه فتوولتائیک به سیستم بازتابنده مجهز شود، انتظار می‌رود توان تولیدی روزانه نیروگاه ۵ مگاواتی از ۳/۴۱ به حدود ۴/۴۳ کیلووات ساعت افزایش یابد. در پژوهشی دیگر، کریستین و همکاران[۱۱] تأثیر طول آینه‌ها بر کارایی و عملکرد سیستم فتوولتائیک متمرکز را بررسی کردند که نتایج حاصل، افزایش سالانه تولید برق از ۸/۵ درصد به ۲۸/۷ درصد در هنگام تغییر طول بازتابنده از $L_R = L_{PV}/2$ به $L_R = 2 \times L_{PV}$ را نشان می‌دهد. نتیجه شبیه‌سازی در پژوهش صورت گرفته توسط مونیکا و همکاران[۱۲] نشان داد که استفاده از بازتابنده، دمای ماژول فتوولتائیک را ۳۰ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط جریان هوای آرام و در شرایط جریان هوای آشفته ۱۰ الی ۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. اگرچه طول عمر ماژول فتوولتائیک با ادغام بازتابنده در شرایط جریان باد مطلوب از ۲۵ سال به ۲۱ سال کاهش یافت، با این حال افزایش توان الکتریکی تولید شده بر تلفات طول عمر غلبه می‌کند.

رانگا و همکاران،[۱۳] سه نوع سیستم فتوولتائیک ((ACPC(۱/۵۳x)، $CPC(1/46x)$ و $(V-trough(1/40x)$ را برای ساختمان‌ها بررسی کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بازتابنده سهموی ترکیبی نامتقارن (ACPC)، بالاترین توان خروجی را در مقایسه با پیکربندی‌های دیگر تولید می‌کند. بازده الکتریکی ACPC، ۴۲/۲ درصد بالاتر از یک ماژول غیرمتمرکز در زاویه برخورد ۱۰ درجه می‌باشد و دوره بازپرداخت ACPC، ۹/۷ سال و ماژول معمولی ۱۶ سال پیش‌بینی شد. همچنین، حفظ دمای سلول در ۲۵ درجه سانتی‌گراد از طریق خنک‌سازی فعال، توان تولید شده توسط ACPC را تا ۳۱ درصد افزایش داد. اوستاگلو و همکاران[۱۴] یک پیکربندی جدید از سیستم بازتابنده فتوولتائیک با عنوان Compound Hyperbolic Concentrator- Trumpet(CHCT) را با بازتابنده‌های CPC و V شکل مقایسه کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که راندمان الکتریکی ماژول خورشیدی با استفاده از CPC، V-troughو CHC-Trumpet به ترتیب ۱۸/۴۴، ۱۸/۵۱ و ۱۸/۵۹ درصد بوده و توان خروجی CHCT-PVT حدود ۴۲/۹ درصد بیشتر از CPC-PVT و حدود ۵۸/۹۷ درصد بیشتر از سیستم‌های VT-PVT درواحد سطح بازتابنده می‌باشد. کوستیک و همکاران،[۱۵] تأثیرات بازتابنده ساخته شده از ورق آلومینیوم و فویل آلومینیوم بر کلکتور PVT را بررسی کردند و مشخص شد که در موقعیت بهینه، بازتابنده‌ها نسبت تمرکز روزانه برای بازتابنده ساخته شده از ورق آلومینیومی ۱/۴۴ برابر و برای بازتابنده ساخته شده از فویل آلومینیومی ۱/۶۶ برابر ارزیابی شد. کل انرژی حرارتی و الکتریکی روزانه تولید شده توسط کلکتور PVT با بازتابنده‌های ساخته شده از ورق آلومینیومی در موقعیت بهینه به ترتیب ۳۹ و ۸/۶ درصد بیشتر از کلکتور PVT بدون بازتابنده بود. بهروز ضیاپور و همکاران،[۱۶] اثرات ادغام بازتابنده‌ها بر عملکرد یک سیستم PVT را مورد بررسی قرار دادند و مقادیر ۱۱۳۸ وات (با استفاده از دو بازتابنده) و ۷۸۸ وات (بدون بازتابنده) به دست آمد. در قسمتی از تحقیق میچال و همکاران[۱۷] برروی کلکتورهای CPC-PVT مشخص شد که دمای کلکتور با دو بازتابنده و بدون خنک‌کاری و با پوشش شیشه ۹۸/۱۶ درجه سانتی‌گراد، با خنک‌کاری ۵۸/۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای ماژول مرجع ۶۶/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میلاد محسن زاده و رضا حسینی[۱۸] در مطالعه خود بر روی یک سیستم PVT که مجهز به بازتابنده بود مشاهده کردند که با افزودن بازتابنده، میانگین افزایش تشعشع خورشیدی به ۲۲ درصد می‌رسد و استفاده از خنک‌کننده باعث کاهش دمای سلول و بهبود عملکرد سیستم فتوولتائیک می‌شود.

کیو و همکاران،[۱۹] سه نوع بازتابنده چندخطی (پلی لاین)، سهموی و صفحه تخت را برای کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی بررسی کردند. مطابق با نتایج حاصل، افزایش تابش انرژی خورشیدی بر روی کلکتورها هنگام استفاده از بازتابنده‌های چندخطی، سهموی و صفحه تخت در سردترین سه ماه سال به ترتیب ۴۰/۳، ۲۷/۷ و ۱۹/۸ درصد می‌باشد. همچنین، در سردترین سه ماه سال، بازتابنده چند خطی همیشه بیشترین تابش انرژی خورشیدی را در میان دیگر بازتابنده‌ها به خود اختصاص می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از بازتابنده‌هزینه کمی داشته و شدت تشعشع خورشید را بالا می‌برد. در همین راستا، برای مکان‌هایی که امکان نصب تعداد بیشتر ماژول فتوولتائیک را ندارد و یا موقعیت‌های جغرافیایی که شدت تابش خورشید کم است، استفاده از بازتابنده‌ها می‌تواند مفید باشد. با توجه به مطالعاتی که تا کنون انجام گرفته است، پژوهشی که چند مدل بازتابنده که طول یکسان داشته باشند را با هم مقایسه کند، انجام نشده است. مطالعات صورت گرفته بر اساس تغییر طول بازتابنده و یا مواردی جزئی تر می‌باشد. در این پژوهش، سعی شده است تا با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲، یک مطالعه‌ی کامل و دو بعدی برای انواع بازتابنده ترکیبی (ترکیبی از زوایا با بازتابنده صفحه تخت)، پارابولیک و صفحه تخت صورت پذیرد.

۲. تعریف مسأله

سه مدل بازتابنده صفحه تخت، سهموی و ترکیبی برای ادغام با ماژول فتوولتائیک به‌صورت دوبعدی در نظر گرفته شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد ماژول فتوولتائیک مورد استفاده در طراحی بازتابنده، ۴۸۰ × ۶۰۰ میلیمتر مربع می‌باشد و دمای ماژول توسط شبیه‌سازی‌های دو بعدی توسط نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲ به‌دست آمد.

۱.۲. طراحی بازتابنده

با استفاده از تجهیزات ردیابی خورشیدی در محیط واقعی می‌توان شرایطی ایجاد کرد که بردار تابش خورشیدی همواره بر سطح پنل عمود باشد. در این مطالعه، فرض بر این است که تابش خورشید همواره عمود بر سطح ماژول می‌باشد.

ابعاد بازتابنده صفحه تخت بر اساس شکل ۲ و معادله ۱ به‌دست می‌آید:

$$L_{\text{Reflector}} = \frac{\text{Sin}(2\alpha - 90)}{\text{Sin}(90 - \alpha)}.L_{\text{PV}} = \frac{-\text{Cos}(2\alpha)}{\text{Cos}(\alpha)}.L_{\text{PV}} \qquad (1)$$

ابعاد بازتابنده سهموی بر اساس معادلات ۲ تا ۴ که طول بازتابنده با طول بازتابنده صفحه تخت با زاویه شیب مشخص برابر بود، برای مقایسه با بازتابنده صفحه تخت به‌دست می‌آید:

$$r(x) = x\hat{i} + y(x)\hat{j} \qquad (2)$$

$$y(x) = \frac{x^2}{600} - 150 \qquad (3)$$

شکل ۱. (الف) بازتابنده صفحه تخت، (ب) بازتابنده سهموی، (ج) بازتابنده ترکیبی.

جدول ۱. وابستگی به مش.

تعداد المان‌ها	۶۰s	۳۰۰s	۶۰۰s	۱۲۰۰s	۲۴۰۰s	۳۶۰۰s
۳۵۷۱	۳۰۷/۸۵۸۹	۳۳۲/۵۶۹	۳۴۶/۰۷۶۳	۳۵۲/۷۸۶۳	۳۵۳/۷۱۸۸	۳۵۳/۷۴۸۱
۱۱۰۵۷	۳۰۷/۸۵۵۵	۳۳۲/۵۴۹۱	۳۴۶/۰۴۷	۳۵۲/۷۵۳۳	۳۵۳/۶۸۴۱	۳۵۳/۷۱۸۶
۲۰۵۹۰	۳۰۷/۸۵۱۴	۳۳۲/۵۳۷۹	۳۴۶/۰۳۴۴	۳۵۲/۷۳۸۲	۳۵۳/۶۶۹	۳۵۳/۷۰۹۴
۳۳۹۱۷	۳۰۷/۸۴۹۸	۳۳۲/۵۳۲۷	۳۴۶/۰۲۵۵	۳۵۲/۷۲۷۲	۳۵۳/۶۶۰۴	۳۵۳/۷۰۶۸
۵۲۵۹۳	۳۰۷/۸۴۲۵	۳۳۲/۵۱۵۱	۳۴۶/۰۰۸۵	۳۵۲/۷۱۲۳	۳۵۳/۶۵۲۴	۳۵۳/۷۰۴۸

شکل ۲. شماتیک لایه‌های ماژول خورشیدی و زاویه برخورد تشعشع خورشیدی بر اساس زاویه انحراف بازتابنده.

$$L_{\text{reflector}} = \int_{300}^{x} \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}\, dt \qquad (۴)$$

ابعاد بازتابنده ترکیبی برای مقایسه با بازتابنده سهموی و صفحه تخت با استفاده از معادله ۱ طراحی شد. طول بازتابنده‌های ترکیبی با طول یک بازتابنده سهموی و بازتابنده صفحه تخت با زاویه شیب ۸۰ درجه برابر است. شکل ۳ انواع بازتابنده‌های ترکیبی در این پژوهش را نشان می‌دهد:

نسبت تمرکز توسط معادله ۵[۱۸] بیان می‌شود:

$$C = \frac{G_{tot}}{G_{net}} \qquad (۵)$$

در معادله بالا، G_{tot} و G_{net} به‌ترتیب میزان تشعشع ورودی به سطح ماژول هنگام استفاده از بازتابنده و میزان تشعشع ورودی به سطح ماژول بدون بازتابنده می‌باشد.

۲.۲. شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی تشعشع در نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲ از مدل DO استفاده شده است. از آنجا که این روش به یک محیط مادی نیاز دارد، همان‌طورکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مابین سطح ماژول و بازتابنده‌ها یک محیط به‌عنوان هوا تعریف شده است. شرایط مرزی برای حل این مساله به شرح زیر می‌باشند:

- انتقال حرارت جابجایی در جلو و پشت ماژول وجود دارد؛
- سطح پشت بازتابنده‌ها عایق می‌باشد؛
- تشعشع خورشیدی به‌صورت عمود بر روی ماژول خورشیدی وارد می‌شود؛
- تشعشع خورشیدی کاملا به‌صورت مستقیم در نظرگرفته شد و تشعشع دیفیوز صفر فرض می‌شود؛
- سطح بازتابنده‌ها کاملا صیقلی و با بازتاب ۱۰۰ درصد در نظرگرفته می‌شود؛
- دمای اولیه تمام اجزای ماژول ۲۹۸/۱۵ درجه کلوین فرض می‌شود.

۳.۲. استقلال از شبکه

در جدول ۱، وابستگی دمای سطح ماژول خورشیدی به تعداد مش نشان داده شده است: یکای دماهای به دست آمده در جدول ۲ بر حسب کلوین می‌باشد. در این مطالعه، به‌علت افزایش دقت و کاهش محاسبات تعداد مش برابر با ۳۳۹۱۷ انتخاب شده است.

برای انجام شبیه‌سازی، خواص فیزیکی و اپتیکی مواد باید در تنظیمات نرم‌افزار وارد شوند. جدول ۲ خواص مواد مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

شکل ۳. بازتابنده‌های ترکیبی (نمونه ۱ تا ۶).

جدول ۲. خواص فیزیکی و اپتیکی مواد مورد استفاده در لایه‌های ماژول خورشیدی.[۲۰و۲۱]

ماده	خواص حرارتی	ضخامت mm	ضریب			
			جذب	بازتاب	عبور	شکست
Glass	$\rho = ۳۰۰۰[kg/m^۳]$ $C_p = ۵۰۰[J/(kgK)]$ $k = ۲[W/(mK)]$	۲/۳	۰۴/۰	۰۴/۰	۹۲/۰	۵۲۶/۱
EVA	$\rho = ۹۶۰[kg/m^۳]$ $C_p = ۲۰۷۰[J/(kgK)]$ $k = ۰/۳۵[W/(mK)]$	۵/۰	۰۸/۰	۰۲/۰	۹/۰	۴۵/۱
Cell	$\rho = ۲۳۳۰[kg/m^۳]$ $C_p = ۶۷۷[J/(kgK)]$ $k = ۱۴۸[W/(mK)]$	۲/۰	۹/۰	۰۸/۰	۰۲/۰	۶۹/۳
Tedlar	$\rho = ۱۲۰۰[kg/m^۳]$ $C_p = ۱۲۵۰[J/(kgK)]$ $k = ۰/۲[kg/(mK)]$	۳/۰	۱۳/۰	۸۶/۰	۰۱۲/۰	۴۵/۱

ضریب جذب برای لایه‌های ماژول خورشیدی توسط معادله ۶ به‌دست می‌آمد:[۲۲]

$$a = \frac{1}{d}\ln\left[\frac{(1-r)^2}{2\tau} + \sqrt{r^2 + \frac{(1-r)^4}{4\tau^2}}\right] \quad (6)$$

در این معادله d، r و τ به ترتیب ضخامت، ضریب بازتاب و ضریب عبور هر یک از لایه‌ها می‌باشند.

۴.۲. بازده ماژول فتوولتائیک

معادله‌ی انتقال حرارت در داخل لایه‌های ماژول خورشیدی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho_i C_{Pi} T_i)}{\partial t} = \nabla.(k_i \nabla T_i) - \gamma \dot{e}_{elec} + S_h \quad (7)$$

اندیس i مختص لایه‌های ماژول خورشیدی است. کمیت γ برای لایه مربوط به سلول خورشیدی می‌باشد که برای لایه‌ی سلول، مقدار ۱ و برای بقیه لایه‌ها صفر قرار داده می‌شود. بازده ماژول فتوولتائیک از طریق معادله ۸ به‌دست می‌آید:[۲۳]

$$\eta_{PV} = \eta_{ref}\left(1 - \beta_{ref}(T_{cell} - T_{ref}) + 0/085 \ln\left(\frac{I_{solar}}{I_{ref}}\right)\right) \quad (8)$$

در معادله ۸، I_{solar}، η_{ref}، β_{ref}، T_{ref}، I_{ref} به ترتیب شدت تشعشع وارد شده به سیستم، بازده الکتریکی مرجع سلول خورشیدی در دمای ۲۹۸/۱۵ درجه کلوین، ضریب دمای مرجع (۰/۰۰۴۶)، دمای‌مرجع (۲۹۸/۱۵ درجه کلوین) و شدت تشعشع در حالت مرجع می‌باشند.

الکتریسیته تولیدی توسط ماژول خورشیدی از معادله ۹ به‌دست می‌آید:

$$\dot{e}_{elec} = \frac{E_{elec}}{V_{cell}} = \frac{(a_{cell}\tau_{glass} I_{solar})\eta_{PV}}{d_{cell}} \quad (9)$$

در این معادله، a_{cell}، τ_{glass} و d_{cell} به‌ترتیب ضریب جذب لایه سلول خورشیدی، ضریب عبور شیشه و ضخامت لایه سلول خورشیدی می‌باشند.

برای حل معادلات تشعشع از مدل DO استفاده شده است. معادلات تشعشع با معادلات انرژی به‌طورهم‌زمان حل می‌شود که در معادله ۱۰ نشان داده شده است:[۲۴]

$$\nabla.(I(\vec{r},\vec{s})\vec{s}) + (a+\sigma_s)I(\vec{r},\vec{s}) = an^2\frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s})\phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega' \quad (10)$$

در رابطه بالا، $\vec{s}'$ و σ_s به ترتیب بردار جهت پراکندگی و ضریب پراکندگی می‌باشند. a، n، ϕ و Ω' به‌ترتیب ضریب جذب، ضریب شکست، تابع حالت و زاویه فضایی (سه بعدی) می‌باشند. سورس ترم را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$S_h = -\nabla.q^R = \nabla.\int_0^{+\infty} q_v^R dv \quad (11)$$

که در رابطه بالا، q_v^R شار تابشی طیفی عبوری از سطح با بردار عمود واحد "$\vec{n}$" به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_v^R = \vec{q}_v^R.\vec{n} = \int_{4\pi} I_v \vec{n}.\vec{s} d\Omega \quad (12)$$

۳. نتایج

۱.۳. نتایج صحت سنجی

برای صحت‌سنجی روش مورد نظر برای شبیه‌سازی، پژوهش میلاد محسن زاده و رضا حسینی[۱۸] به‌عنوان یک مطالعه تجربی انتخاب شده است. هندسه ماژول خورشیدی مورد استفاده در مطالعه‌ی آنها همراه با بازتابنده مربوطه در محیط نرم‌افزار طراحی و مش بندی گردید. شبیه‌سازی در حالت ناپایا انجام شده و مقدار میانگین دما برای سطح شیشه ماژول در هر مرحله زمانی به‌دست آمده است.

برای حل معادلات تشعشع، از مدل DO استفاده شد که همزمان با معادلات انرژی حل شدند. خواص مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی به‌صورت کامل در تنظیمات نرم‌افزار وارد و UDF مربوط به تولید برق برای لایه سلول خورشیدی اعمال شده است. شرایط مرزی عایق برای پشت ماژول خورشیدی، سطح پشت بازتابنده‌ها و دیواره‌های کناری لایه‌های ماژول خورشیدی اعمال و از ضریب جذب هوا صرف‌نظر گردیده است. برای حل معادلات انرژی از روش Second Order Upwind و برای معادلات DO از روش First Order Upwind استفاده شده است.

برای اعمال شرایط مرزی این مسأله، معادله تشعشع ورودی که تابعی از زمان است و در شکل ۴ نشان داده شده، از درون مقاله استخراج و این معادله در شرایط مرزی دیوار بالایی (Insolation Wall) که ترکیبی از تشعشع و انتقال حرارت جابجایی بود اعمال گردیده است.

دمای آسمان برای شرط مرزی ترکیبی (mixed) دیوار بالا توسط معادله ۱۳ که تابعی از دمای محیط می‌باشد، به‌دست می‌آید:[۲۵]

$$T_{sky} = 0/0522 T_{amb}^{1/5} \quad (13)$$

به‌علاوه، ضریب انتقال حرارت جابجایی کلی که باید بر روی سطح شیشه به ماژول اعمال شود، از معادله ۱۴ به‌دست آمد.[۲۶] همچنین، معادله ۱۵ نشان دهنده ضریب انتقال حرارتی است که بر اساس روش حلی که در آن بهره برده شده، تغییر می‌کند و به نسبت تغییر مساحت دیوار بالا نسبت به دیوار پایین تغییر می‌کند:

$$h_{convection} = 3/3 \times v_{wind} + 6/5 \quad (14)$$

$$h_{insolation_wall} = \frac{A_{PV}}{A_{insolation_wall}} \times h_{convection} \quad (15)$$

شکل ۴. نمودار شدت تشعشع خورشیدی روزانه وارده به پنل از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ بعد از ظهر بدون بازتابنده و همراه با بازتابنده.[۱۸]

در معادله ۱۴، سرعت باد و دمای محیط از طریق سایت هواشناسی به‌دست آمده و در معادله قرار داده شده است. مطابق با جدول ۳، برای اعمال ضریب انتقال حرارت جابجایی به دیوار بالا از معادله ۱۵ استفاده شده است.

تمام لایه‌های ماژول خورشیدی به‌غیر از لایه تدلار نیمه شفاف در نظرگرفته شده است، زیرا نور خورشید باید از طریق آنها عبورکند و این لایه‌ها با یکدیگرکوپل شده و انتقال حرارت هدایت در بین آنها وجود داشته باشد. لایه تدلار غیر شفاف در نظر گرفته شده و بر سطح بیرونی آن شرط مرزی عایق اعمال شده است.

سیال هوا با ضریب انتقال حرارت رسانش بسیار بالا و ضریب شکست نور یک، فضای بین ماژول خورشیدی و بازتابنده‌ها تا دیوار بالا را اشغال کرده تا دمای سطح ماژول را به دیوار بالا هدایت کند، در حالی که در تابش نور خورشید نیز تأثیری نداشته باشد.

ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده لایه‌های ماژول خورشیدی در تمامی لایه‌ها به‌درستی انتخاب شده است و تمامی لایه‌ها در شبیه‌سازی تشعشع تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین، UDF مورد استفاده برای تولید الکتریسیته در لایه مربوط به سلول اعمال گردیده است.

اعتبارسنجی روش مورد استفاده در شبیه‌سازی در پژوهش تجربی[۱۸] انجام شده و نمودار دما بر حسب زمان به‌دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵، اختلاف نتیجه‌ی شبیه‌سازی دوبعدی با نتیجه‌ی تجربی حداکثر ۳/۸۶ درصد بوده و نشان‌دهنده قابل قبول بودن نتایج شبیه‌سازی پژوهش حال حاضر است.

جدول ۳. دما و سرعت باد در بازه زمانی ۹ صبح تا ۱۶ بعد از ظهر برای مطالعه محسن زاده و حسینی.[۱۸]

ساعت	سرعت باد (km/h)	زمان شروع (s)	دمای محیط (K)
۹	۴	۰	۲۹۸/۱۵
۱۰	۴	۳۶۰۰	۳۰۱/۱۵
۱۱	۴	۷۲۰۰	۳۰۴/۱۵
۱۲	۴	۱۰۸۰۰	۳۰۷/۱۵
۱۳	۴	۱۴۴۰۰	۳۰۷/۱۵
۱۴	۴	۱۸۰۰۰	۳۰۷/۱۵
۱۵	۶	۲۱۶۰۰	۳۰۸/۱۵
۱۶	۸	۲۵۲۰۰	۳۰۹/۱۵

شکل ۵. مقایسه دمای سطح پنل خورشیدی در شبیه‌سازی دوبعدی با نتیجه مطالعه تجربی.

۲.۳. نتایج شبیه‌سازی CFD

شدت تشعشع برای همه‌ی موارد شبیه‌سازی برابر با ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده و دمای محیط برابر با ۲۹۸/۱۵ درجه کلوین فرض شده است. همچنین، دمای آسمان با استفاده از رابطه ۱۲ به‌دست آمده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای پشت ماژول به‌میزان ۵ وات بر مترمربع کلوین، برای دیوار بالایی هندسه نسبت به افزایش طول دیوار بالا مطابق با رابطه ۱۵ کاهش یافته و مقدار آن در شرایط مرزی وارد شده است. همچنین، دیواره‌های کناری لایه‌های ماژول خورشیدی و دیوار پشت بازتابنده‌ها عایق در نظرگرفته شده‌اند.

۱.۲.۳. تأثیر هندسه‌ی بازتابنده در عملکرد ماژول خورشیدی

دمای ماژول خورشیدی در شرایط عدم وجود بازتابنده خنک‌کننده به ۳۳۹/۶۴ درجه کلوین و بازده این ماژول به ۱۱/۰۸ درصد رسید. همچنین، تأثیرات ادغام سه نوع بازتابنده صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر دمای کاری ماژول خورشیدی بررسی شد.

در شبیه‌سازی دو بعدی که در حالت ناپایا انجام گرفت، دمای سطح ماژول برای دو مدل بازتابنده با طول بازتابنده برابر بررسی شد. شکل‌های ۶ تا ۱۰ مقایسه بین بازتابنده صفحه تخت و سهموی را نشان می‌دهند:

دمای سطح ماژول هنگام استفاده از بازتابنده سهموی نسبت به بازتابنده صفحه تخت برای زوایای ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۸۵ درجه به ترتیب ۰/۰۷، ۱/۵، ۴/۰۴، ۶/۱۶ و ۱۱/۷۴ درصد ارزیابی افزایش داشته است. در نمودارهای بالا که دمای سطح ماژول را نسبت به زمان نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که با گذشت زمان دمای ماژول افزایش می‌یابد. در همین راستا، اگر فرایند خنک‌کاری در هر یک از موارد فوق انجام شود و دمای کاری ماژول کاهش یابد، می‌توان از حداکثر توان خروجی ماژول بهره‌مند شد. مطابق با شکل‌های ۶ و ۷، در زوایای شیب پایین، بازتابنده سهموی و صفحه تخت اختلاف چندانی در دمای کارکرد ندارند. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه شیب، دمای کاری ماژول با بازتابنده سهموی بالاتر از دمای ماژول با بازتابنده صفحه تخت است که این امر نشان دهنده اثر نسبت تمرکز بازتابنده سهموی به صفحه تخت می‌باشد.

شکل ۶. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۵۰ درجه.

شکل ۷. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۶۰ درجه.

شکل ۸. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۷۰ درجه.

شکل ۹. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۸۰ درجه.

جدول ۴ توان تولیدی ماژول فتوولتائیک با ادغام بازتابنده‌های صفحه تخت و سهموی را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۴، علیرغم کاهش بازده هنگام بالا رفتن شیب بازتابنده، توان تولیدی با افزایش شیب بازتابنده افزایش می‌یابد. همچنین، روند افزایش توان خروجی در بازتابنده‌های صفحه تخت نزولی می‌باشد. به‌این معنی که

شکل ۱۰. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۸۵ درجه.

شکل ۱۱. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی در مقایسه با بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۸۰ درجه.

با افزایش شیب بازتابنده، اختلاف توان تولیدی نسبت به دو بازتابنده قبلی کمتر می‌شود. اما در مورد توان خروجی بازتابنده‌های سهموی، روند افزایش توان تولیدی به‌صورت صعودی است، یعنی با افزایش شیب، اختلاف توان تولیدی نسبت به دو بازتابنده قبلی بیشتر می‌شود. این نتیجه نیز به این دلیل است که نسبت تمرکز در بازتابنده‌های سهموی نسبت به بازتابنده‌های صفحه تخت بیشتر است.

بازتابنده‌های ترکیبی نیز در حالت ناپایا شبیه‌سازی و عملکرد آنها بررسی شد. مقایسه بازتابنده‌های ترکیبی با بازتابنده صفحه تخت و سهموی ۸۰ درجه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که افزایش دمای سطح ماژول هنگام استفاده از بازتابنده ترکیبی نسبت به بازتابنده صفحه تخت ۸۰ درجه از نوع ۱ تا ۶ به ترتیب به ۱/۱۶، ۲/۴۸، ۲/۸۲، ۳/۵۵، ۵/۱۵ و ۷/۱۴ درصد رسیده و افزایش دمای سطح ماژول برای بازتابنده ترکیبی نوع ۶ نسبت به بازتابنده سهموی ۸۰ درجه، ۰/۹۲ درصد ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دمای ماژول خورشیدی با بازتابنده ترکیبی در هر صورت از بازتابنده صفحه تخت بهتر می‌باشد. تنها بازتابنده ترکیبی نوع ۶ می‌تواند گزینه بهتری از بازتابنده سهموی ۸۰ درجه باشد، زیرا نسبت تمرکز بالاتری دارد و در کاربردهایی که هزینه ساخت بازتابنده سهموی بیشتر باشد می‌توان از بازتابنده ترکیبی استفاده کرد.

جدول ۴. توان تولیدی ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های صفحه تخت و سهموی.

بازتابنده	طول ماژول (mm)	طول بازتابنده (mm)	توان تولیدی $S(W)$
۵۰ – flat	۶۰۰	۱۶۲/۰۸۹	۲۹/۹
۶۰ – flat	۶۰۰	۶۰۰	۴۰/۳
۷۰ – flat	۶۰۰	۱۳۴۳/۸۶	۴۸/۵۵
۸۰ – flat	۶۰۰	۳۲۴۶/۸۸	۵۲/۵۷
۸۵ – flat	۶۰۰	۶۷۷۹/۶۴	۵۴/۰۷
۵۰ – parabolic	۶۰۰	۱۶۲/۰۸۹	۲۹/۹۴
۶۰ – parabolic	۶۰۰	۶۰۰	۴۱/۴۳
۷۰ – parabolic	۶۰۰	۱۳۴۳/۸۶	۵۴/۷۶
۸۰ – parabolic	۶۰۰	۳۲۴۶/۸۸	۷۵/۳۲
۸۵ – parabolic	۶۰۰	۶۷۷۹/۶۴	۹۸/۵۷

شکل ۱۲. بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی در مقایسه با بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۸۰ درجه.

بازده ماژول خورشیدی در هنگام استفاده از بازتابنده ترکیبی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

توان تولیدی ماژول فتوولتائیک را هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی در جدول ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد بازتابنده‌ها با زاویه‌های بیشتر (از نمونه ۱ تا نمونه ۶)، برخلاف بازده که روند نزولی دارد، توان تولیدی با افزایش زاویه‌های ترکیبی و افزایش نسبت تمرکز روند صعودی دارد و توان تولیدی بازتابنده نوع ۶ از تمام بازتابنده‌های ترکیبی بیشتر است.

دمای ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی برای نمونه‌های ۱ تا ۶ به ترتیب به ۳۶۲/۰۲، ۳۶۳/۱۷، ۳۶۳/۴۸، ۳۶۴/۱۲، ۳۶۵/۵۲ و ۳۶۷/۲۶ کلوین رسید. مشخص می‌شود که بازتابنده ترکیبی نوع ۶ به دلیل داشتن بالاترین دما، کمترین بازده را دارد، اما بازده آن با بازده بازتابنده سهموی ۸۰ درجه تقریبا برابر شد و می‌توان از این نوع بازتابنده به جای بازتابنده سهموی با هزینه ساخت بالاتر استفاده کرد.

۲.۲.۳. تأثیر زاویه (طول بازتابنده) در عملکرد ماژول خورشیدی

با افزایش زاویه (طول) بازتابنده بر اساس معادله ۱ و افزایش شدت تابش خورشیدی بر اثر افزایش نسبت تمرکز، دمای سطح ماژول افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ مقایسه دمای ماژول هنگام ادغام بازتابنده‌های صفحه تخت از زاویه ۵۰ تا ۸۵ درجه را

شکل ۱۳. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های صفحه تخت از ۵۰ تا ۸۵ درجه.

شکل ۱۴. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های سهموی از ۵۰ تا ۸۵ درجه.

نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیز مقایسه دمای ماژول هنگام ادغام بازتابنده‌های سهموی از زاویه ۵۰ تا ۸۵ درجه را نشان می‌دهد.

طبق نتایج درج شده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، افزایش دمای سطح ماژول هنگام استفاده از بازتابنده صفحه تخت ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۸۵ درجه نسبت به ماژول

جدول ۵. توان تولیدی ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی.

نمونه	طول ماژول (mm)	a	طول بازتابنده (mm)	طول مجموع بازتابنده‌ها (mm)	توان تولیدی (w)
۱	۶۰۰	۵۰ ۸۰	۱۶۲/۰۸۹ ۳۰۸۴/۷۹	۸۸/۳۲۴۶	۱۱/۵۶
۲	۶۰۰	۶۰ ۸۰	۶۰۰ ۲۶۴۶/۸۸	۸۸/۳۲۴۶	۶۵/۶۱
۳	۶۰۰	۷۰ ۸۰	۱۳۴۳/۸۶ ۱۹۰۳/۰۲	۸۸/۳۲۴۶	۰۱/۶۳
۴	۶۰۰	۵۰ ۶۵ ۸۰	۱۶۲/۰۸۹ ۸۴۵/۹۸ ۲۲۳۸/۸۱	۸۸/۳۲۴۶	۶۶/۶۵
۵	۶۰۰	۵۰ ۶۰ ۷۰ ۸۰	۱۶۲/۰۸۹ ۴۸۹/۱۲ ۱۰۹۵/۵۲ ۱۵۰۰/۱۴	۸۸/۳۲۴۶	۲۸/۷۱
۶	۶۰۰	۵۰ ۵۵ ۶۰ ۶۵ ۷۰ ۷۵ ۸۰	۱۶۲/۰۸۹ ۲۱۶/۴۸ ۳۰۶/۱۴ ۴۶۵/۶۴ ۷۸۰/۹ ۱۳۱۵/۶۳ ۰	۸۸/۳۲۴۶	۵۲/۷۹

شکل ۱۵. بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های صفحه تخت از ۵۰ تا ۸۵ درجه.

شکل ۱۶. بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های سهموی از ۵۰ تا ۸۵ درجه.

خورشیدی بدون بازتابنده به ترتیب ۹/۴۷، ۲۱/۲، ۲۵/۵، ۳۲/۱۱ و ۳۱/۸۴ درصد و هنگام استفاده از بازتابنده‌های سهموی به‌ترتیب ۹/۵۵، ۲۳/۰۲، ۳۰/۵۷، ۴۰/۲۵ و ۴۷/۳۳ درصد ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد برای طول بازتابنده‌های بالا، استفاده از بازتابنده سهموی مناسب‌تر از بازتابنده صفحه تخت می‌باشد که با وجود دمای بالا توان بیشتری نیز تولید می‌کنند.

نتایج مربوط به بازده ماژول خورشیدی برای دو نوع بازتابنده سهموی و صفحه تخت در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده صفحه تخت و سهموی از زاویه ۵۰ تا ۸۵ درجه کاهش می‌یابد، زیرا بازده ماژول خورشیدی برحسب دمای ماژول تغییر می‌کند. با توجه به دمای بالای ماژول، بازتابنده سهموی ۸۵ درجه کمترین بازده را دارد و نشان دهنده آن است که در مواردی که بازده ماژول مطرح باشد، بازتابنده سهموی گزینه مناسبی نمی‌باشد. بازتابنده‌های صفحه تخت به دلیل دمای پایین‌تر ماژول نسبت به بازتابنده‌های سهموی در درجات بالا، گزینه مناسبی با بازده بالاتر می‌باشند و مشکلات طراحی و هزینه ساخت پایین‌تری دارند.

۴. نتیجه‌گیری

پس از انجام صحت‌سنجی و تأیید روش مورد استفاده در نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲، ماژول خورشیدی همراه با انواع بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی طراحی و به‌صورت دوبعدی شبیه‌سازی شد که نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- افزایش دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی ۸۵ درجه نسبت به بازتابنده صفحه تخت ۸۵ درجه، ۱۱/۷۴ درصد ارزیابی شد که نشان داد در زاویه بازتابنده بالای ۷۰ درجه در طول برابر از آنجا که نسبت تمرکز بالاتری دارد و توان تولیدی آن نیز بیشتر است، استفاده از بازتابنده سهموی مناسب‌تر است، اما برای مواردی که افزایش طول بازتابنده سبب تلفات انرژی بیشتری شود، استفاده از بازتابنده صفحه تخت به دلیل هزینه ساخت پایین و نسبت تمرکز تقریبا برابر با بازتابنده سهموی در زاویه‌های پایین ۷۰ درجه گزینه مناسب‌تری است؛
- افزایش دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده ترکیبی نوع ۶ نسبت به بازتابنده صفحه تخت ۸۰ درجه و بازتابنده سهموی ۸۰ درجه به ترتیب ۷/۱۴ و ۰/۹۲ درصد ارزیابی شد. نتایج نشان داد هرچقدر تعداد آینه‌ها با زاویه‌های ترکیبی بیشتر باشد، عملکرد بهتری در ماژول مشاهده می‌شود و برای مواردی که هزینه ساخت بازتابنده سهموی بالا است، بازتابنده ترکیبی گزینه مناسبی برای استفاده می‌باشد.

فهرست علائم

G_{tot}: شدت تشعشع ورودی به سطح ماژول با بازتابنده (Wm^{-2})؛
G_{net}: شدت تشعشع ورودی به سطح ماژول بدون بازتابنده (Wm^{-2})؛
A: مساحت سطح (m^2)؛
C_p: ظرفیت گرمایی ویژه $(Jkg^{-1}K^{-1})$؛
k: ضریب انتقال حرارت هدایتی $(Wm^{-1}K^{-1})$؛
d: ضخامت (mm)؛
T: دما (K)؛
h: ضریب انتقال حرارت جابجایی $(Wm^{-2}K^{-1})$؛
I_{solar}: شدت تابش خورشیدی (Wm^{-2})؛
I_{ref}: شدت تابش مرجع (Wm^{-2})؛
$\dot{e}_{elec}$: نرخ توان الکتریکی تولیدی (Wm^{-3})؛
E_{elec}: توان الکتریکی تولیدی (W)؛
V_{cell}: حجم سلول (m^3)؛
n: ضریب شکست ـ؛
C: نسبت تمرکز ـ؛
r: ضریب بازتاب ـ؛
L: طول (mm).

- **اختصارها**

PV: Photovoltaic؛
PVT: Photovoltaic Thermal؛
CPC: Compound Parabolic Concentrator؛
CPV: Concentrating Photovoltaic؛
$ACPC$: Asymmetric Compound Parabolic Concentrator؛
DO: Discrete Ordinates؛
$CHCT$: Compound Hyperbolic Concentrator-Trumpet؛
$VT-PVT$: V-trough Photovoltaic Thermal؛
UDF: User Defined Function؛
CFD: Computational Fluid Dynamics؛
EVA: Ethylene-Vinyl Acetate.

- **زیرنویس‌ها**

ref: reference؛
$elec$: electricity؛
amb: ambient؛

- **حروف یونانی**

α: زاویه انحراف بازتابنده از ماژول خورشیدی؛
τ: ضریب عبور؛
η: بازده؛
ϕ: معادله حالت؛
Ω': زاویه فضایی؛
σ_s: ضریب پراکندگی؛
a: ضریب جذب طیفی (m^{-1})؛
ρ: چگالی (kgm^{-3})؛
β: ضریب انبساط دمایی (K^{-1}).

منابع (References)

1. Kalogirou, S.A., 2018. *Introduction to Renewable Energy Powered Desalination*. In Renewable Energy Powered Desalination Handbook, Butterworth-Heinemann. pp.3-46.
2. Baccoli, R., Kumar, A., Frattolillo, A., Mastino, C., Ghiani, A. and Gatto, G., 2021. Enhancing energy produc-

tion in a PV collector-reflector system supervised by an optimization model: Experimental analysis and validation. *Energy Conversion and Management*, *229*. 113774. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113774.

3. Baccoli, R., Frattolillo, A., Mastino, C., Curreli, S. and Ghiani, E., 2018. A comprehensive optimization model for flat solar collector coupled with a flat booster bottom reflector based on an exact finite length simulation model. *Energy Conversion and Management*, *164*, pp.482-507. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.091.

4. Lu, W., Wu, Y. and Eames, P., 2018. Design and development of a building façade integrated asymmetric compound parabolic photovoltaic concentrator (BFI-ACP-PV). *Applied Energy*, *220*, pp.325-336. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.071.

5. Malik, P. and Chandel, S.S., 2020. Performance enhancement of multi-crystalline silicon photovoltaic modules using mirror reflectors under western himalayan climatic conditions. *Renewable Energy*, *154*, pp.966-975. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.048.

6. Sangani, C.S. and Solanki, C.S., 2007. Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *91*(6), pp.453-459. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.10.012.

7. Huang, B.J. and Sun. F.S., 2007. Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector. *Energy Conversion and Management*, *48*(4), pp.1273-1280. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.09.020.

8. Gajbert, H., Hall, M. and Karlsson, B., 2007. Optimisation of reflector and module geometries for stationary, low-concentrating, façade-integrated photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *91*(19), pp.1788-1799. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.06.007.

9. Narasimman, K. and Selvarasan, I., 2016. Design construction and analysis of solar ridge concentrator photovoltaic (PV) system to improve battery charging performance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *127*, pp.187-192. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.024.

10. Simon, S.P., Kumar, K.A., Sundareswaran, K., Nayak, P.S.R. and Padhy, N.P., 2020. Impact and economic assessment on solar PV mirroring system-A feasibility report. *Energy Conversion and Management*, *203*, 112222. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112222.

11. Nour, C. A., Migan-Dubois, A., Badosa, J., Bourdin, V., Marchand, C. and Akiki, T., 2020. Geometrical optimization for a photovoltaic installation equipped with flat reflectors based on plane of array estimations. *EPJ Photovoltaics*, *11*(1), pp.14. DOI:10.1051/epjpv/2019010.

12. Agrawal, M., Kumar, A. and Chowdhury, A., 2021. A detailed simulation-based study on the effect of mirror integration on PV Module (s) with analysis of different wind flow scheme. *Solar Energy*, *222*, pp.129-144. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.028.

13. Parupudi, R.V., Singh, H. and Kolokotroni, M., 2020. Low concentrating photovoltaics (LCPV) for buildings and their performance analyses. *Applied Energy*, *279*, 115839. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115839.

14. Ustaoglu, A., Ozbey, U. and Torlakli, H., 2020. Numerical investigation of concentrating photovoltaic/thermal (CPV/T) system using compound hyperbolic-trumpet, V-trough and compound parabolic concentrators. *Renewable Energy*, *152*, pp.1192-1208. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.094.

15. Kostic, L.T., Pavlovic, T.M. and Pavlovic, Z.T., 2010. Influence of reflectance from flat aluminum concentrators on energy efficiency of PV/Thermal collector. *Applied Energy*, *87*(2), pp.410-416.

16. Ziapour, B.M., Palideh, V. and Mokhtari, F., 2016. Performance improvement of the finned passive PVT system using reflectors like removable insulation covers. *Applied Thermal Engineering*, *94*, pp.341-349. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.143.

17. Michael, J. J., Iqbal, S. M., Iniyan, S. and Goic, R., 2018. Enhanced electrical performance in a solar photovoltaic module using V-trough concentrators. *Energy*, *148*, pp.605-613. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.101.

18. Mohsenzadeh, M. and Hosseini, R., 2015. A photovoltaic/thermal system with a combination of a booster diffuse reflector and vacuum tube for generation of electricity and hot water production. *Renewable Energy*, *78*, pp.245-252. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.010.

19. Qiu, G., Ma, Y., Song, W. and Cai, W., 2021. Comparative study on solar flat-plate collectors coupled with three types of reflectors not requiring solar tracking for space heating. *Renewable Energy*, *169*, pp.104-116. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.134.

20. Duan, J., 2021. A novel heat sink for cooling concentrator photovoltaic system using PCM-porous system. *Applied Thermal Engineering*, *186*, 116522. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116522.

21. Maadi, S.R., Khatibi, M., Ebrahimnia-Bajestan, E. and Wood, D., 2019. Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module-Combining CFD approach and two-band radiation DO model. *Energy Conversion and Management*, *198*, 111781. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111781.

22. Hassanien, A.S. and Akl, A.A., 2016. Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films. *Superlattices and Microstructures*, *89*, pp.153-169. http://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.10.044.

23. Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Reddy, K.S. and Mallick, T.K., 2019. Optimization of fins fitted phase change material equipped solar photo-

voltaic under various working circumstances. *Energy Conversion and Management*, *180*, pp.1185-1195. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.105.

24. Maadi, S.R., Khatibi, M., Ebrahimnia-Bajestan, E. and Wood, D., 2019. Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module-Combining CFD approach and two-band radiation DO model. *Energy Conversion and Management*, *198*, 111781. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111781.

25. Emam, M. and Ahmed, M., 2018. Cooling concentrator photovoltaic systems using various configurations of phase-change material heat sinks. *Energy Conversion and Management*, *158*, pp.298-314. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.077.

26. Liu, Y., Chen, Y., Wang, D., Liu, J., Luo, X., Wang, Y., Liu, H. and Liu, J., 2021. Experimental and numerical analyses of parameter optimization of photovoltaic cooling system. *Energy*, *215*, 119159. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119159.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۲۵-۳۵، (پژوهشی)

Original Article

طراحی هوشمند مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته توسط الگوریتم ژنتیک و پردازش تصویر

بهادر ابول‌پور* **(دانشیار)**
دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان

رامتین حکمت‌خواه (کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

امیربابک انصاری (استادیار)
دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال برای بسیاری از انواع مبدل‌های حرارتی، اساس طراحی، ساخت و بهینه‌سازی این تجهیزات می‌باشد. استفاده از سطوح گسترش یافته در کانال، یک روش کاربردی برای افزایش ضریب انتقال حرارت می‌باشد. در پژوهش حاضر، طراحی هوشمند یک مبدل حرارتی نانو سیال دو بعدی، به‌منظور دستیابی به شرایط عملکرد مطلوب از نظر نرخ انتقال حرارت، میزان رسوب ذرات نانو در ساختار مبدل و همچنین افت فشار سیال در طول عبور از آن، به‌روش عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی ساختار هندسی از طریق ترکیب الگوریتم ژنتیک و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای این کانال، می‌توان به افزایش ۱/۱۴ درصدی در آنتالپی نانوسیال عبوری، کاهش ۱۱/۱۲۱ درصدی در افت فشار نانوسیال در طول عبور و همچنین کاهش ۸/۴۴ درصدی در میزان رسوب نانوذرات درون کانال دست یافت. در مجموع، این بهبودها منجر به افزایش ۲۴/۸۲ درصدی در تابع برازش تعریف شده در پژوهش شده است.

واژگان کلیدی: مبدل حرارتی، نانو سیال، سطوح گسترش یافته، دینامیک سیالات محاسباتی، الگوریتم ژنتیک، پردازش تصویر.

bahadorabolpor1364@yahoo.com
ramtin.hekmatkhah@ut.ac.ir
a.b.ansari @kgut.ac.ir

۱. مقدمه

مبدل‌های حرارتی کاربردهای گسترده‌یی در سیستم‌های مختلف صنعتی دارند. هدف اصلی استفاده از این تجهیزات، انتقال حرارت بین جریان‌های مختلف سیال و اجسام جامد است. بنابراین، افزایش نرخ انتقال حرارت یک چالش مهم در این تجهیزات است. عبور سیال از میان مبدل‌های حرارتی انجام می‌شود و اجزای جامد مختلف این تجهیزات تأثیر مهمی بر سرعت انتقال حرارت دارند. از این جهت، اجزایی که مقاومت انتقال حرارت بالایی دارند، نسبت به سایر موارد، سرعت انتقال حرارت کلی در داخل مبدل را کنترل می‌کنند. با توجه به نوع کنترل‌کنندگی نرخ انتقال حرارت، مکانیسم‌های مختلفی برای کاهش مقاومت انتقال حرارت و بهبود نرخ کلی انتقال حرارت مبدل حرارتی ارائه شده‌اند.[۱و۲] استفاده از اشکال و طرح‌های مختلف بافل‌ها، روشی شناخته‌شده برای بهبود این نرخ در فرایند کنترل توسط جریان سیال است.[۱]

مبدل‌های حرارتی، انرژی حرارتی را بین جریان‌های مختلف سیال و اجسام جامد انتقال می‌دهند. یک مشکل مهندسی مهم در این تجهیزات، بهبود سرعت نرخ انتقال حرارت با افت فشار قابل قبول جریان سیال عبوری است. هر یک از فازهای گاز، مایع یا جامد این فرایند که مقاومت انتقال حرارت بالایی دارند، با توجه به مقاومت‌های انتقال حرارت دیگر فازها، نرخ انتقال حرارت کلی را در این تجهیزات کنترل می‌کنند.[۱و۲] اگر یک فاز گازی یا مایع این پدیده را کنترل کند، حداقل تنش برشی دیوار و حداکثر سرعت انتقال حرارت در همسایگی ناحیه جریان جدایی لایه مرزی رخ می‌دهد.[۳] استفاده از نانوسیال‌ها که حاوی نانوذرات معلق مانند فلزات و اکسیدها هستند، راهی برای افزایش انتقال حرارت در این مناطق است.[۴] این نانوسیالات، خواص حرارتی سیال پایه را بهبود می‌بخشند.[۵-۷] از طرف دیگر، جدایی جریان و اتصال مجدد آن ناشی از افزایش اثرات اصطکاک بین لایه‌های جریان سیال و در نتیجه افزایش افت فشار جریان، یکی از مسائل مهم موجود در این تجهیزات است.[۸-۱۲]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۲۳، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲۷.

استناد به این مقاله:
ابول‌پور، بهادر، حکمت‌خواه، رامتین، و انصاری، امیربابک، ۱۴۰۲. طراحی هوشمند مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته توسط الگوریتم ژنتیک و پردازش تصویر. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۲۵-۳۵. DOI:10.24200/J40.2022.60770.1649

اگرچه نانوسیال‌ها را می‌توان به راحتی در تجهیزات فعلی با حداقل تغییر طراحی استفاده کرد، اما ممکن است به‌تدریج بر روی سطوح رسوب کرده و یا سطوح داخلی را دچار خوردگی کند. از همین‌رو، این عامل درصد نانوذرات استفاده شده را محدود می‌کند. بنابراین، افزایش ضریب انتقال حرارت با افزودن نانوذرات، هدف مناسبی برای بررسی جداگانه نیست. مطالعه جابه‌جایی اجباری، موضوعی کاملاً مهم در بسیاری از کاربردهای تکنولوژیکی مانند خنک‌سازی قطعات الکترونیکی، سیستم‌های مبدل حرارتی، بویلرها، راکتورهای کاتالیزوری شیمیایی، کلکتورهای[1] خورشیدی، خنک‌سازی پره‌های توربین گاز و غیره است.[۱۳-۱۷]

افزایش عملکرد انتقال حرارت در مقیاس‌های ماکرو و میکرو[2] کانال‌ها نیز بسیار مهم است. استفاده از سطوح گسترش‌یافته در کانال، یک روش کاربردی برای افزایش ضریب انتقال حرارت است.[۱۸-۲۰] پیروز و همکاران، انتقال حرارت ترکیبی را در یک کانال مستطیلی بررسی کرده‌اند.[۲۱] آن‌ها گزارش داده‌اند که کاهش فاصله بین موانع باعث انحراف و شتاب جریان سیال در مجاورت آن‌ها و افزایش سرعت انتقال حرارت جابجایی در نزدیکی موانع می‌شود. بیسواس و همکاران، شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی را با استفاده از LBM برای درک اثر شناوری متقاطع بر روی جریان همرفتی ترکیبی و انتقال حرارت در یک کانال عاج‌دار مورد مطالعه قرار داده‌اند.[۲۲] آنها به این نتیجه رسیده‌اند که این انتقال حرارت از دو مکانیسم پیروی می‌کند. در مکانیسم اول، انتقال حرارت به دلیل تاخیر در شکل‌گیری لایه مرزی حرارتی در لبه جلویی دنده اتفاق می‌افتد و در مکانیسم دوم، انتقال حرارت در شرایطی که عدد رینولدز جریان بیش از یک مقدار بحرانی که ناشی از مکانیسم‌های ریزش گردابه و اختلاط می‌باشد، رخ می‌دهد.

یکی از راه‌های ابتکاری در بهبود نرخ انتقال حرارت در سیالات، تعلیق نانوذرات جامد (قطر ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه، معروف به نانوسیال است. نانوسیال پایدار و در مقایسه با ذرات معلق با ابعاد میلی‌متری یا میکرومتری که دارای معایب متعددی مانند رسوب‌گذاری، فرسایش و افزایش افت فشار کانال جریان می‌باشد و با افت فشار قابل قبول، پایداری بسیار بهتری از خود نشان می‌دهد.[۲۳و۲۴] ایزدی و همکاران، یک کد عددی برای در نظر گرفتن جریان اجباری و آرام یک نانوسیال متشکل از Al_2O_3 و آب نوشته‌اند.[۲۵] نتایج آنها نشان داد که وابستگی ضریب اصطکاک به غلظت نانوذرات رابطه معناداری دارد. انوربیگ و همکاران، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جریان جابه‌جایی آرام نانوسیال‌ها Al_2O_3 آب را در یک لوله با شرایط دمای دیواره ثابت مورد مطالعه قرار داده‌اند.[۲۶] شبیه‌سازی آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت به‌طور مشخص با افزایش غلظت ذرات نانوسیال افزایش می‌یابد.

رشیدی و همکاران، جریان جابه‌جایی اجباری آرام و انتقال حرارت نانوسیال مس ـ آب را برای یک کانال موجی شکل برای پیش‌بینی دقت مدل‌های تک فاز و دو فاز مختلف بررسی کردند.[۲۷] یانگ و لای، شبیه سازی به روش LBM را بر روی انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انجام داده‌اند.[۲۸] آنها به این نتیجه رسیدند که عملکرد انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد. سیدیک و همکاران، راندمان حرارتی را در جریان درون یک کانال با استفاده از روش LBM مطالعه کرده‌اند. در این مرجع، استفاده از فین‌ها و همچنین نانوسیال را برای افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته است.[۲۹] آنها به این نتیجه رسیدند که راندمان انتقال حرارت به شدت به عدد رینولدز و ضریب هدایت فین‌ها بستگی دارد.

محققان زیادی جریان حرارت و سیال در شکل‌های مختلف کانال‌ها، به‌صورت عددی و تجربی، مانند یک کانال دارای بافل در ناحیه ورودی، یک کانال مستطیل شکل با دو صفحه بافل نصب شده بر روی دیوارهای بالایی و پایینی، یک کانال مربعی با آرایش‌های مختلف از فین‌ها، یک لوله مبدل حرارتی با یک بافل در داخل لوله، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مجهز به محدوده‌های، کانال مستطیلی با بافل‌های توپر و سوراخ‌دار و بلوک‌های متخلخل داخل کانال صفحات موازی را مورد بررسی قرار داده‌اند.[۳۰-۳۵]

برنر و همکاران، جریان آشفته در یک کانال با چندین صفحه بافل را مورد مطالعه قرار دادند.[۳۶] نتایج آنها نشان داد که با اعداد رینولدز مختلف، تعداد بافل‌های متفاوتی برای به‌دست آوردن یک شرط مرزی تناوبی مناسب ضروری است. حبیب و همکاران، تأثیر عدد رینولدز و ارتفاع بافل بر ضریب انتقال حرارت و همچنین افت فشار یک جریان متلاطم در داخل یک مجرای مستطیلی با شار حرارتی یکنواخت در دیوارها را مورد مطالعه قرار دادند.[۳۷] آنها نواحی چرخش بزرگ و گرادیان‌های شدید سرعت را در پشت این بافل‌ها مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد رینولدز، افت فشار با سرعت بیشتری نسبت به ضریب انتقال حرارت، افزایش می‌یابد.

کائو و همکاران، انتقال حرارت و خصوصیات جریان سیال مبدل‌های حرارتی با بافل مارپیچی را با کمک تحلیل‌های عددی و تجربی بررسی کرده‌اند.[۳۸] آنها از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه استفاده کرده‌اند. متغیرهای طراحی مانند؛ تعداد لوله، ابعاد لوله و زاویه مارپیچ به عنوان متغیرهای طراحی تعریف شده‌اند. نتایج آنها نشان داد که افزایش انتقال حرارتی و کاهش سرعت محوری سیال با زاویه مارپیچ و نسبت هم‌پوشانی محوری مرتبط است. آنها مجموعه‌یی از راه حل‌های پارتو را برای بهینه‌سازی ترمودینامیکی و اقتصادی به‌دست آوردند. مقایسه روش‌های بهینه‌سازی نشان داد که روش بهینه‌سازی چند هدفه مناسب‌تر از استراتژی بهینه‌سازی تک هدفه است. هانروبیا و همکاران، طرحی مبتنی بر ابزار چند هدفه برای بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله ارائه داده‌اند.[۳۹] امکان اجرای ابزارهای هوش مصنوعی برای طراحی مبدل‌های حرارتی با هدف کاربردهای صنعتی در کار آنها بررسی شده است. مجموعه داده برای آموزش شبکه‌های عصبی توسعه یافته و در نرم افزار متلب مدل‌سازی شده است. پیکربندی بهینه مبدل حرارتی و پارامترهای طراحی (افت فشار در سمت پوسته، افت فشار در سمت لوله و نرخ انتقال حرارت) بهینه شده است. کایا و اوست، روش‌های مختلف بهینه‌سازی را مقایسه کردند.[۴۰] آنها روش جستجوی تک متغیره را برای بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی با استفاده از روش بهینه‌سازی تک هدفه، با حرکت از دو بازو در جبهه پارتو معرفی کردند. برای کاهش زمان محاسباتی، روش جستجوی تک متغیره انتخاب و از الگوریتم ژنتیک نیز در مطالعه آنها استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک مقادیر برازندگی بهتری نسبت به روش جستجوی تک متغیره ارائه کرده است. با این حال، روش جستجوی تک متغیره محدوده طراحی مناسب‌تری را در جبهه پارتو[3] ارائه کرده است. دنیش و سایجال، یک مدل عددی برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد مبدل حرارتی پوسته و لوله با بافل‌های متحرک توسعه داده‌اند.[۴۱] از الگوریتم ژنتیک برای به حداکثر رساندن سرعت انتقال حرارت و در عین حال به حداقل رساندن افت فشار نیز استفاده کرده‌اند.

چن و همکاران، آزمایش انتقال حرارت آب ـ آب را برای مقایسه هیدرودینامیک و ویژگی‌های انتقال حرارت سه مبدل حرارتی با بافل‌های سه‌لایه، دولایه و قطعه‌یی طراحی کرده‌اند.[۴۲] داده‌های تجربی نشان می‌دهد که با سرعت جریان یکسان، ضرایب انتقال حرارت پوسته‌ای مبدل حرارتی پوسته و لوله با بافل‌های سه‌لایه و دو

لایه بالاتر از ضرایب انتقال حرارت، بافل قطعه‌ای سنتی است. تاندیل و کوداکاتو، شبیه‌سازی عددی را با استفاده از روش تاگوچی[۴] برای بهینه‌سازی پوسته و لوله مبدل با بافل‌های[۵] متحرک و به حداکثر رسانیدن نرخ انتقال حرارت و به حداقل رسانیدن افت فشار است، ارائه کرده‌اند.[۴۳] در این مطالعه، نرخ انتقال حرارت محاسبه شده و افت فشار کل در سراسر پوسته با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به دست آمده است.

در پژوهش حاضر، یک مدل عددی دو بعدی برای انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری یک نانوسیال (اکسید مس ـ آب، به‌عنوان یک نمونه) در یک کانال جریان حاوی سیال آرام با ناحیه‌یی گسترش یافته، به‌منظور افزایش نرخ انتقال حرارت، توسط نرم افزار متلب[۶] توسعه داده شده است. مش[۷] محاسبه بر روی میدان جریان با روش پردازش تصویر ایجاد شده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مدل‌سازی جریان آرام حالت پایا پیاده‌سازی و از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم استفاده می‌شود. جهت اعتبارسنجی، نتایج مدل حاضر با داده‌های تجربی و عددی مراجع برای یک کانال ساده با سطوح گسترش یافته متقارن، مقایسه می‌شوند و نتایج نشان می‌دهد که در این مقایسه، تطابق خوبی وجود دارد.

در مطالعه حاضر، ادغام روش حجم محدود با الگوریتم ژنتیک[۸] و روش پردازش تصویر به‌صورت یک رویداد کاملا همگرا، منجر به توسعه یک روش نوین برای بهینه‌سازی هندسه کانال شده است که در منابع قبلی دیده نشده است. استفاده از پردازش تصویر به کاربر کمک می‌کند بدون استفاده از هرگونه نرم‌افزار اضافی و آموزش جداگانه، با در دست داشتن یک تصویر دیجیتال که امروزه با توجه به در دسترس بودن گوشی‌های هوشمند، شبکه مش مورد نظر را جهت شبیه‌سازی تولید کند. علاوه بر این، انجام محاسبات در مش تولید شده بر پایه پردازش تصویر، این امکان را فراهم می‌سازد که بهینه‌سازی ساختارهای هندسی با ایجاد تغییراتی در پیکسل‌های شکل هندسی انجام شود. این روش امکان کار بر روی شکل‌های هندسی پیچیده که قابلیت تعریف با استفاده از چند پارامتر ساده و مشخص مانند قطر، ضخامت، شعاع انحنا و غیره برای آنها موجود نیست را فراهم می‌سازد. نوآوری اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی طراحی هندسه سطوح گسترش یافته درون یک کانال با مقیاس نانو با هدف افزایش حداکثری دمای خروجی، کاهش افت فشار جریان نانوسیال عبوری و کاهش میزان رسوب گذاری مناسب ذرات نانو بر روی ناحیه گسترش یافته با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای این منظور، تابع وزنی خطی پارامترها به‌عنوان تابع هدف برای این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، طبق روش مقیاس‌بندی خطی پارتو، در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، جبهه پارتو و هندسه بهینه به‌دست آمده و سپس گرادیان سرعت، فشار و دمای جریان نانوسیال آرام عبوری از این ساختار بهینه و همچنین میزان به دام افتادن ذرات نانو در آن، ارزیابی می‌شود.

۲. معادلات حاکم و شرایط مرزی

شکل ۱ ساختار فیزیکی از طرح اولیه از کانال‌های مدل شده را جهت درک مفهوم کانال‌هایی با سطوح گسترش یافته و همچنین شرایط مرزی تعریف شده در مدل‌سازی نشان می‌دهد. یک جریان آب ـ اکسید مس (۵٪ وزنی) آرام دو بعدی (با سرعت ورودی افقی ۰/۰۰۴۵ متر بر ثانیه و دمای ورودی ۳۰۰ کلوین) به یک کانال مستطیلی گرم شده با دمای دیواره ثابت برابر با ۳۵۰ درجه کلوین وارد می‌شود. شرایط مرزی بدون لغزش ($u = ۰$، $v = ۰$ با $T = T_w$) در دیوارها و سطح

شکل ۱. شماتیکی از کانال‌های دوبعدی با سطوح گسترش یافته که مورد مدل‌سازی قرار گرفته‌اند.

گسترش یافته و فشار خروجی اتمسفریک در نظر گرفته شده است. در خروجی، گرادیان متغیرها در امتداد محور x نادیده گرفته شده است.

معادلات حاکم بر حالت پایا برای جریان سیال و حرارت که به‌طور هم‌زمان حل شده‌اند، طبق نماد انیشتین به شرح زیر نشان داده شده است:[۴۴]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = ۰ \quad (۱)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \quad (۲)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \quad (۳)$$

$$\frac{d^۲ x_p}{dt^۲} = \frac{۱۸\mu}{۱ + ۲/۵۲\lambda\rho_p d_p}\left(u - \frac{dx_p}{dt}\right) + \xi\left(\frac{۸/۲۸۶ \times ۱۰^{-۲۳}\pi\mu T d_p}{\Delta t}\right)^{۰/۵} \quad (۴)$$

$$\frac{d^۲ y_p}{dt^۲} = \frac{۱۸\mu}{۱ + ۲/۵۲\lambda\rho_p d_p}\left(v - \frac{dy_p}{dt}\right) + \xi\left(\frac{۸/۲۸۶ \times ۱۰^{-۲۳}\pi\mu T d_p}{\Delta t}\right)^{۰/۵} \quad (۵)$$

که در آن Γ، λ و ξ به ترتیب ضریب نفوذ گرمایی مولکولی، ضریب ثابت استفاده شده در ضریب تصحیح کانینگهام[۹] و عدد تصادفی گاوسی[۱۰] مستقل از واریانس واحد می‌باشند. معادلات ۴ و ۵ بیانگر اثرات مومنتوم و نیروی براونی[۱۱] بر حرکت ذره هستند.

روش حجم محدود[۱۲] برای حل این معادلات، بر اساس مفهوم گسسته‌سازی قانون ـ توانی،[۱۳] شبکه جابه‌جا شونده[۱۴] والگوریتم سیمپل[۱۵] استفاده شده است.[۴۵] ضرایب تخفیف[۱۶] برای u، v، P و T به ترتیب برابر با ۰/۳، ۰/۳، ۰/۷ و ۰/۷ در نظر گرفته شده‌اند.[۴۶] حداکثر ۵۰۰۰۰ تکرار و حداقل دقت $۱۰^{-۶}$ برای همگرایی قابل قبول متغیرهای محاسبه شده (یعنی u، v، P و T) در نظر گرفته شده است. پس از حل معادلات حاکم، میدان‌های سرعت، فشار و دما برای تمام نقاط محاسباتی تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی صورت گرفته، جهت شبیه‌سازی حرکت نانوسیال از دیدگاه اویلری[۱۷] استفاده شده است و تنها در مورد تعیین میزان رسوب نانو ذرات بر روی سطوح کانال از دیدگاه لاگرانژی[۱۸] برای مطالعه حرکت ذرات استفاده شده است. بر اساس این دیدگاه، معادله حرکت این ذرات جامد با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی و براونی، به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:[۴۷]

$$\rho = \varphi_{CuO}\rho_{CuO} + (۱ - \varphi_{CuO})\rho_{water} \quad (۶)$$

$$Cp = \frac{\varphi_{CuO}\rho_{CuO}Cp_{CuO} + (1-\varphi_{CuO})\rho_{water}Cp_{water}}{\rho} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\mu_{water}}{(1-\varphi_{CuO})^{2/5}} \quad (8)$$

$$k = k_{water}[1 + 3\varphi_{CuO}\frac{(\frac{k_{CuO}}{k_{water}} - 1)}{(\frac{k_{CuO}}{k_{water}} + 2) - \varphi_{CuO}(\frac{k_{CuO}}{k_{water}} - 1)}] \quad (9)$$

که در آن φ_{CuO} نشان‌دهنده کسر جرمی مس اکسید می‌باشد.

۳. مدل‌سازی و روش عددی

در رویکرد بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، متغیرهای مسئله (۲۰۰ پره با عرض یکسان و ارتفاع متغیر، به‌صورت متقارن در دوسمت کانال تعریف شده است که به‌عنوان سطح گسترش یافته شناخته می‌شود) ژن[19] نامیده می‌شود. ارتفاع هر یک از این پره‌ها متغیر مسئله است و هرکدام به‌عنوان یک ژن شناخته می‌شوند. ترکیبی از این ۲۰۰ ژن ها یک کروموزوم[20] (یک سطح گسترش یافته حاصل از این پره‌ها) و مجموعه‌یی از ۲۰ کروموزوم یک جمعیت می‌سازند. عرض این پره‌ها یکسان و ثابت اما ارتفاع این پره‌ها متغیر بوده و در هر کروموزم ۲۰۰ مقدار جدید برای این ۲۰۰ ژن (یعنی همین ارتفاع ۲۰۰ پره) مورد آزمون قرار می‌گیرد. پارامترهای این الگوریتم، نسل[21] (۳۵)، احتمال بقا[22] (۰/۵)، میانگین احتمال[23] (۰/۳۳)، احتمال تقاطع[24] (۰/۱۷)، احتمال جهش[25] (۱) و بزرگی جهش[26] (۰/۳)، درکد متلب نوشته شده، تعریف شده‌اند. پس از تولید مش، معادلات حاکم در این سلول‌های محاسباتی حل شده‌اند. پارامترهای هدف فرایند بهینه‌سازی چند هدفه به عملکرد مورد انتظار از مبدل حرارتی بستگی دارد (که در این مطالعه عبارتند از: ΔH، ΔP درصد رسوب نانو ذرات جامد بر روی دیواره کانال).

روش بهینه‌سازی ارائه شده در این پژوهش شامل یافتن ساختار هندسی بهینه برای سطح گسترش یافته در این جریان آرام درون کانال دوبعدی عبوردهنده نانوسیال آب ـ اکسید مس (۵٪ حجمی) است و خواص مورد نیاز این نانوسیال در مراجع به‌صورت $\varphi_{CuO} = 0/05$، $\rho_{CuO} = 6500\,kg.m^{-3}$، $k_{CuO} = 20\,w.m^{-2}.k^{-1}$ و $Cp_{CuO} = 535/6\,Jkg^{-1}.k^{-1}$ ارائه شده است.[4,48]

برای بهبود عملکرد مبدل حرارتی، توجه به اهداف مختلف بهینه‌سازی و اهمیت واحدهای مختلف آنها بسیار ضروری است. در این پژوهش، به‌عنوان یک نمونه، هر سه پارامتر (یعنی ΔH در سیال ورودی و خروجی، ΔP در سیال ورودی و خروجی و درصد رسوب نانو ذرات جامد بر روی دیواره کانال) به مقادیر مربوط به یک کانال ساده بدون هیچ ناحیه گسترش یافته تقسیم شده‌اند تا عملا مقادیری بدون بعد و هم‌وزن قابل مقایسه ایجاد شوند. برای حل این مسائل چندهدفه، مقیاس‌بندی خطی پارامترهای هدف ذکر شده با وزن‌های ثابت، به‌صورت $Fit = \sum_{i=1}^{N} w_i\psi_i$ در نظر گرفته شده است.[49-51] انتخاب این وزن‌ها (w_i)، با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف (ψ_i) و عملکرد مورد انتظار از مبدل حرارتی، به‌وضوح حل مسئله بهینه‌سازی را تغییر می‌دهد. به‌عنوان مثال، در مطالعه حاضر، ψ_1 نسبت ΔH به و ΔH کانال ساده، ψ_2 نسبت ΔP به ΔP کانال ساده و ψ_3 نسبت نانوذرات رسوب کرده به رسوب در کانال ساده‌با ضرایب وزنی $w_1 = +1$، $w_2 = -0/1$، $w_3 = -0/1$ می‌باشد. در واقع مقدار ΔH ده برابر مهم‌تر از دیگر پارامترهای هدف در نظر گرفته شده است.

با توجه به حداکثر رساندن مقدار تابع Fit، عملکرد مناسب در نظر گرفته شده برای مبدل حرارتی را به حداکثر می‌رساند. با این وجود، برای چنین مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، هیچ راه‌حل واحدی وجود ندارد که به‌طور همزمان هر تابع هدفی را بهینه کند و با توجه به این واقعیت که هیچ یک از این اهداف را نمی‌توان بدون کاهش کیفیت سایر توابع هدف، بهبود بخشید، احتمالاً تعداد بی‌شمار جواب بهینه پارتو وجود دارد.[52,53] لازم به ذکر است که این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه از دیدگاه‌های مختلف قابل بررسی است و در نتیجه اهداف حل متفاوتی دارد. بنابراین، راه حل‌های بهینه پارتو و همچنین جبهه پارتو برای این مسائل به‌دست آمده است که مجموعه راه حل‌های بهینه را با مقادیر مختلف w_i، نشان می‌دهد.

در بخش پردازش تصویر، یک تصویر دیجیتال با فرمت JPEG و با طیف رنگی از سفید تا مشکی که طیفی خاکستری را تشکیل می‌دهد، از کانال‌های دو بعدی تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک (به‌عنوان نمونه، کانال نشان داده شده در شکل ۱) به کد وارد می‌شود. جهت پردازش تصویر، هر پیکسل از عکس دیجیتالی وارد شده توسط کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب به یک کد مجزا که بیانگر طیف رنگ است، تبدیل می‌شود. حداکثر و حداقل طیف رنگ به‌ترتیب برای رنگ مشکی و رنگ سفید با کد شناسایی ۰ و ۲۵۵ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه هر پیکسل بعد از شناسایی با توجه به طیف رنگی که داراست، یک کد شناسایی مشخص پیدا می‌کند.

کنتراست[27] و روشنایی[28] به‌عنوان دو ابزار فیلتر رنگ در این پژوهش، جهت حذف تمام اختلال‌های (نویز[29]) موجود، اعمال شده است. در کد نوشته شده در این پژوهش، تمامی پیکسل‌هایی که مقدار کد شناسایی آنها بالاتر از عدد ۲۰۰ باشد، به‌عنوان پیکسلی با رنگ سفید و پایین‌تر از عدد ۲۰۰ به‌عنوان پیکسلی با رنگ مشکی در نظر گرفته می‌شود. این روش فیلتراسیون کمک می‌کند تا تصاویر با فرمت دیجیتال در مقیاس طیف خاکستری را به رنگ‌های سیاه و سفید مطلق بدون هیچ نویز و طیف رنگی تبدیل شود. این روش، مقدمه‌یی برای پردازش تصویرهای رنگی با پیکسل‌های بی‌شمار می‌باشد.

در کد نوشته شده، هر پیکسل با پیکسل‌های همسایگی خود مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. این کار کمک می‌کند تا تمایز بین میدان سیال و جسم ایجاد گردد. در نتیجه، تمامی لبه‌های سطوح گسترش یافته نسبت به میدان جریان متمایز می‌شود. پس از تشخیص لبه‌ها، سلول‌های محاسباتی جهت تولید شبکه مش مناسب به‌طور خودکار در اطراف سطوح ایجاد می‌شود. شکل ۲ نمونه‌یی از این شبکه ایجاد شده را نشان می‌دهد.

شکل ۳ فلوچارتی از روش حل مسئله را ارائه می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در ابتدا ۲۰ کروموزوم (معادل ۲۰ ساختار هندسی کانال) مختلف به‌صورت

شکل ۲. مش محاسباتی تولید شده توسط پردازش تصویر (از کانال ارائه شده در شکل ۱).

شکل ۳. فلوچارت حل مسئله.

تصادفی توسط الگوریتم ژنتیک به‌عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شود. هر کروموزوم از ۲۰۰ ژن (طول میله‌هایی که ناحیه گسترش یافته کانال را تشکیل می‌دهند) تشکیل شده است و هر ژن می‌تواند مقادیری بین ۰ تا ۸ را به خود اختصاص دهد. این ساختارهای هندسی به‌صورت تصاویر خاکستری (با مقادیر بین ۰ تا ۲۵۵ برای هر پیکسل) پردازش تصویر می‌شوند و سپس مش محاسباتی مربوط به هر ساختار تولید می‌شود. در این مرحله، لبه‌ها و گوشه‌ها تشخیص داده شده و سپس ناحیه عبور سیال به‌صورت شبکه جابه‌جا شده، مش‌بندی می‌شود. در مرحله بعد، این مش محاسباتی جهت محاسبات عددی معادلات حاکم بر هیدرودینامیک سیال عبوری و همچنین انتقال حرارت مورد استفاده قرارگرفته و پس از همگرایی پارامترهای سیالاتی

شکل ۴. همگرایی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل.

شکل ۵. اعتبار سنجی پیش‌بینی مدل و همچنین مطالعه مش با مقایسه سرعت افقی سیال عبوری در $x/L = ۰/۳$ و $Re = ۴۰$.

و حرارتی مورد نیاز به‌منظور محاسبه پارامترهای هدف مورد نظر ذخیره می‌گردند. با محاسبه ترکیبی از این پارامترها، تابع تناسب مورد نظر برای هر ساختار (کروموزوم) مشخص می‌گردد. ملاک تولید نسل بعدی توسط الگوریتم ژنتیک هستند.

۴. نتایج و بحث

در شکل ۴، مقادیر باقیمانده به‌ازای تکرار برای پارامترهای میدان جریان و به‌منظور نشان دادن میزان همگرایی، نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته، حرکت و جابه‌جایی تک ذره‌یی توسط دیدگاه لاگرانژی در امتداد کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده با نتایج عددی منتشر شده توسط محبی و همکاران[۵۴] برای یک کانال ساده مطابق شکل ۱، مقایسه شده است. شکل ۵، نتیجه این مقایسه و همچنین مطالعه اثر شبکه را در دقت شبیه‌سازی نشان می‌دهد (با اندازه مش‌های مختلف، یعنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نقطه در هر سانتی‌متر (dpc)). نتایج حاکی از تطابق نتایج حاصل از این پژوهش و مرجع[۵۴] می‌باشد. با توجه به هزینه محاسباتی کمتر، مش ۲۰dpc برای فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. وجود انحراف بین نتایج به‌دست آمده با مرجع ارائه شده در شکل ۵، مربوط به نتایج با اندازه شبکه ۱۰dpc می‌باشد که نشان دهنده پایین بودن دقت این مش در اجرا و به دست آوردن نتایج می‌باشد.

پس از اعتبارسنجی مدل دینامیک سیالات محاسباتی توسعه‌یافته، برای یک کانال ساده طبق شکل ۱ شبیه‌سازی انجام شد و نتایج شبیه‌سازی برای جریان آب ـ اکسید مس عبوری کانال در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است. جریان سیال با شرایط ورودی ثابت از سمت چپ وارد کانال می‌شود. بردارهای سرعت، خطوط هم‌فشار و کانتور دمای جریان آب ـ اکسید مس عبوری از داخل کانال بر روی سطوح گسترش یافته متقارن هم اندازه ارائه شده است. خطوط آب رنگ نشان‌دهنده خط‌های جریان و نقاط مشکی خط سیر نانو ذرات هستند. نواحی گردابه‌های ایجاد شده در بین سطوح گسترش یافته به خوبی دیده می‌شود. هر چند که این کانال نرخ انتقال حرارت قابل قبولی با افت فشار معین برای جریان آب ـ اکسید مس عبوری دارد، هدف این پژوهش، بهبود عملکرد این کانال به‌عنوان نمونه‌یی از مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش‌یافته با استفاده از ترکیبی از نانوذرات‌های رایج است. در ادامه، نتایج به‌دست آمده برای سطوح گسترش یافته بهینه شده با حالت ساده مقایسه شده است.

مطابق هدف اصلی این پژوهش که به‌دست آوردن طراحی هندسی بهینه برای کانال با سطوح گسترش یافته برای برآوردن اهداف مختلف است، این اهداف می‌توانند نرخ انتقال حرارت بالا (به‌عنوان مثال عدد Nu، و ΔT یا ΔH)، فاکتورهای افت فشار (به‌عنوان مثال ضرایب C_f یا ΔP) برای یک جریان آب عبوری با غلظت ۵٪ نانوذرات اکسیدمس اضافه شده، با توجه به رسوب‌گذاری درون کانال، باشند. در کنار پارامترهای مذکور، احتمال رسوب این ذرات بر روی دیواره کانال نیز برای به‌دست آوردن ساختار هندسی بهینه کانال با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۹ تا ۱۱ مربوط به نتایج به‌دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

شکل ۹، نمونه‌هایی از دامنه‌های جست‌وجو شده برای متغیرهای ذکر شده (یعنی ارتفاع ۲۰۰ میله متقارن در دو سمت ناحیه گسترش یافته) را برای دستیابی به ساختار بهینه سطوح توسعه یافته، بر اساس جمعیت‌های ایجاد شده توسط این الگوریتم را نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده شماره کروموزوم (در مجموع ۷۰۰ کروموزوم توسط ۳۵ نسل شامل ۲۰ کروموزوم ایجاد شده است) و محور عمودی نشان دهنده ارتفاع تعریف شده برای میله مورد نظر در یک جمعیت تولید شده خاص توسط الگوریتم ژنتیک است. همگرایی مقادیر تولید شده برای هر میله با پردازش این الگوریتم بهینه‌سازی در این شکل کاملا مشخص است. این امر نشان‌دهنده پیشرفت الگوریتم به سمت جواب بهینه ایست که دنبال می‌کند. شکل ۱۰ نیز چگونگی رسیدن تابع تناسب (Fit) تعریف شده به ماکزیمم مقدار ممکن خودش را نشان می‌دهد. در این شکل، کلیه نتایج محاسبه شده برای تمامی کروموزوم‌های بررسی شده در جمعیت‌های مختلف، مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، این الگوریتم حدودا پس از ۱۵ نسل (کروموزوم‌های شماره ۳۰۰) توانسته به مقدار بیشینه ممکن برای این تابع نزدیک گردد.

شکل ۱۱ مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای هدف ذکر شده را برای تمامی جمعیت‌های تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. همگرایی نتایج جمعیت‌های تولید شده نهایی به سمت بهترین راه حل‌های یافت شده (جبهه پارتو) در این شکل واضح است. این شکل عملکرد قابل قبول کد توسعه یافته برای الگوریتم ژنتیک در این مقاله را تایید می‌کند. جبهه پارتو یک منحنی مرزی بین مناطق امکان پذیر و غیرممکن جواب‌ها برای مقادیر اهداف تعریف شده برای این مسئله است. پاسخ‌های قرارگرفته در این مرز، راه‌حل‌های پارتو هستند. در این شکل، مرزهای پارتو به‌صورت تخمینی و بر اساس نتایج بهینه‌سازی صورت گرفته مشخص شده‌اند. این مرز، بهترین راه‌حل‌های ممکن را برای مسئله با توجه به مقادیر مختلف ممکن w_i نشان می‌دهند.

شکل ۶. خطوط جریان سیال و مسیر حرکت نانوذرات پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۲.

شکل ۷. بردارهای سرعت و خطوط هم‌فشار پیش‌بینی شده از جریان سیال توسط مدل‌برای کانال ارائه شده در شکل ۲.

شکل ۸. کانتور دمای سیال پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۲ با دمای دیواره ۳۵۰ درجه کلوین.

شکل ۱۲ نیز راه‌حل بهینه به‌دست آمده را (به‌عنوان یکی از راه حل‌های پارتو با w_i های نشان داده شده در قسمت قبل) نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که ساختاری همگرا و واگرا تکرار شونده در ناحیه گسترش یافتگی سطوح می‌تواند عملکرد مطلوبی با توجه با نوع توابع هدف و همچنین ضرایب تعریف شده

شکل ۹. نمونه‌هایی از دامنه‌های جست‌وجو شده متغیرها برای دست‌یابی به ساختار بهینه.

شکل ۱۰. حرکت الگوریتم ژنتیک به سمت ماکزیمم مقدار تابع تناسب تعریف (Fit) شده.

شکل ۱۱. مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای هدف برای تمامی جمعیت‌های تولید شده (نمای سه بعدی و سه نمای دو بعدی از جواب‌ها).

شکل ۱۲. ساختار هندسی بهینه به‌دست آمده (یکی از راه حل‌های پارتو).

شکل ۱۳. خطوط جریان سیال و مسیر حرکت نانوذرات پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۱۱.

شکل ۱۴. بردارهای سرعت و خطوط هم‌فشار پیش‌بینی شده از جریان سیال توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۱۱.

برای آن داشته باشد. شکل ۱۱ بیانگر این است که ساختار هندسی بهینه کانال در مقایسه با کانال نشان داده شده در شکل ۱، میزان افزایش ۱/۱۴ درصدی و ΔH، کاهش ۱۱/۲۱ درصدی ΔP و کاهش ۸/۴۴ درصدی میزان رسوب نانوذرات درون کانال و در مجموع موجب افزایش ۲۴/۸۲ درصدی تابع Fit تعریف شده، را موجب شده است. سایر جواب‌های پارتو به‌دست آمده در شکل ۱۱، ساختارهای هندسی بهینه متفاوتی را نشان می‌دهد که به استراتژی‌های ممکن مختلف طراح (یعنی مقادیر متفاوت w_i توجه می‌کنند.

پیش‌بینی‌های مدل برای جریان آب ـ اکسید مس عبوری از این کانال بهینه در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ ارائه شده است. بردارهای سرعت، خطوط هم فشار و کانتور دمایی جریان عبوری از این کانال در این شکل‌ها ارائه شده است. واضح است که این کانال نرخ انتقال حرارت بسیار مناسب‌تر با افت فشار و میزان رسوب ذرات نانو کمتری، در مقایسه با کانال ارائه شده در شکل ۱، برای جریان آب ـ اکسید مس عبوری دارد. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که هوش مصنوعی می‌تواند به طراحی بهینه انواع مبدل‌های حرارتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بپردازد.

در شکل ۱۳، گسترش سطوح در حالت بهینه منجر به کاهش نواحی گردابه‌ها نشان داده شده است که این امر در کاهش افت فشار و به دام انداختن نانو ذرات بسیار حائز اهمیت است و جریان در خروجی آرام‌تر خارج می‌شود. همچنین ذرات

شکل ۱۵. کانتور دمای سیال پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۱۱ با دمای دیواره ۳۵۰ درجه کلوین.

نانو در خروجی دارای توزیع وسیع‌تری در مقایسه با نتایج مشابه ارائه شده برای کانال ساده (شکل ۶) می‌باشد. دلیل این موضوع، کمتر بودن میزان به دام افتادن نانو ذرات است. مقایسه شکل ۱۴ با نتایج ارائه شده در شکل ۷ برای کانال ساده نشان می‌دهد که کانال با ساختار بهینه، دارای نواحی با سیال کم سرعت و همچنین افت فشار کمتر برای سیال عبوری می‌باشد. این دو هدف، به‌همراه میزان رسوب کمتر نانو ذرات درون کانال، پارامترهای هدفی بودند که بهینه‌سازی آنها هدف اصلی پژوهش حاضر است.

شکل ۱۵ نیز نمایشی از کانتور دمای سیال عبوری از کانال می‌باشد که افزایش دمای آن در طی عبور از این کانال به‌وضوح نمایش داده شده است. در مقایسه با شکل ۸ که همین کانتور را برای کانال با سطوح گسترش یافته ساده نشان می‌دهد، دمای سیال خروجی از این کانال با ساختار بهینه، دارای مقدار بالاتری می‌باشد، زیرا ناحیه سطح تماس سیال با دیواره به مراتب افزایش یافته است. این دمای بیشتر معادل شده با آنتالپی خروجی بیشتر در مقایسه با کانال قبل، یکی از پارامترهای هدف مورد مطالعه در این بهینه‌سازی است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل عددی دو بعدی برای انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب ـ اکسید مس در یک کانال جریان حاوی سیال آرام با سطوح گسترش یافته به‌منظور افزایش نرخ انتقال حرارت، توسط نرم افزار متلب به‌صورت کد توسعه داده شد. در این کد، شبکه محاسباتی بر روی میدان جریان با روش پردازش تصویر ایجاد شد. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مدل‌سازی جریان آرام پایا پیاده‌سازی و از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم استفاده گردید. ارتباط روش حجم محدود با الگوریتم ژنتیک و روش پردازش تصویر در این پژوهش، یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی هندسه کانال را ایجاد کرد. پیش‌بینی‌های مدل حاضر با نتایج عددی که پیشتر ارائه شده بود، صحت محاسبات را تایید نمود.

نوآوری اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی طراحی ساختاری ناحیه گسترش‌یافته درون این کانال با هدف افزایش حداکثری دمای خروجی، کاهش افت فشار جریان نانوسیال عبوری و میزان رسوب‌گذاری مناسب ذرات نانو بر روی ناحیه گسترش‌یافته با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای این منظور، تابع وزنی خطی پارامترها به‌عنوان تابع هدف برای این مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، طبق روش مقیاس‌بندی خطی

پارتو در نظر گرفته شد. در نهایت، جبهه پارتو و همچنین هندسه بهینه به‌دست آمد. سپس، میدان سرعت، فشار و دمای جریان نانوسیال آرام عبوری از این ساختار بهینه و همچنین میزان به دام افتادن ذرات نانو در آن ارزیابی شد.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که ساختار هندسی بهینه کانال در مقایسه با کانال ساده، افزایش ۱/۱۴ درصدی ΔH، کاهش ۱۱/۲۱ درصدی ΔP و کاهش ۸/۴۴ درصدی میزان رسوب نانوذرات درون کانال و در مجموع موجب افزایش ۲۴/۸۲ درصدی تابع Fit تعریف شده را موجب شده است. کانال بهینه در مقایسه با کانال قبلی، نرخ انتقال حرارت بسیار مناسب‌تر، همراه با افت فشار و میزان رسوب ذرات نانو کمتری دارد. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که الگوریتم ژنتیک می‌تواند به طراحی بهینه انواع مبدل‌های حرارتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بپردازد.

نمادها

C_p: ظرفیت حرارتی سیال $(J.kg^{-1}.k^{-1})$؛

d_p: قطر ذرات جامد (m)؛

H: ارتفاع ورودی کانال (m)؛

h: آنتالپی سیال $(kJ.kg^{-1})$؛

k: ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال $(w.m^{-2}.k^{-1})$؛

P: فشار (P_a)؛

T: دمای سیال (K)؛

T_{in}: دمای ورودی سیال (K)؛

T_w: دمای دیواره (K)؛

t: زمان (sec)؛

U_{in}: سرعت ورودی سیال $(m.s^{-1})$؛

u: سرعت سیال در جهت x $(m.s^{-1})$؛

v: سرعت سیال در جهت y $(m.s-1)$؛

μ: ویسکوزیته سیال $(Pa.s)$؛

ρ: دانسیته سیال $(kg.m^{(-3)})$؛

τ_w: تنش برشی در دیواره (Pa).

پانوشت‌ها

1. Solar Collectors
2. Macro and Micro Scales
3. Pareto Front
4. Taguchi Method
5. Baffles
6. MATLAB
7. Mesh
8. Genetic Algorithm
9. Cunnigham
10. Gaussian
11. Brownian Force
12. Finite Volume Method
13. Power-Law Grid
14. Staggered Grid
15. SIMPLE Algorithm
16. Under-Relaxation Factors
17. Eularian
18. Lagrangian
19. Gene
20. Chromosome
21. Generation
22. Survival Probability
23. Average Probability
24. Crossover Probability
25. Mutation Probability
26. Mutation Magnitude
27. Contrast
28. Brightness
29. Noise

منابع (References)

1. Holman, J.P., 2008. *Heat Transfer (Si Units) Sie*. Tata McGraw-Hill Education.
2. Bergman, T.L. and et al., 2011. *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons.
3. Nie, J.H., Chen, Y. and Hsieh, H.T., 2009. Effects of a baffle on separated convection flow adjacent to backward-facing step. *International Journal of Thermal Sciences*, *48*(3), pp.618-625. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.015.
4. Mohammed, H., Alawi, O.A. and Wahid, M., 2015. Mixed convective nanofluid flow in a channel having backward-facing step with a baffle. *Powder Technology*, *275*, pp.329-343. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.046.
5. Daungthongsuk, W. and Wongwises, S., 2007. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*(5), pp.797-817. https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.005.
6. Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: A review. *Interna-*

tional Journal of Thermal Sciences, *46*(1), pp.1-19. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010.

7. Mohammed, H.A. and et al., 2012. Buoyancy-assisted mixed convective flow over backward-facing step in a vertical duct using nanofluids. *Thermophysics and Aeromechanics*, *19*(1), pp.33-52.

8. Al-Aswadi, A. and et al., 2010. Laminar forced convection flow over a backward facing step using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *37*(8), pp.950-957. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.007.

9. Siavashi, M., Bahrami, H.R.T. and Aminian, E., 2018. Optimization of heat transfer enhancement and pumping power of a heat exchanger tube using nanofluid with gradient and multi-layered porous foams. *Applied Thermal Engineering*, *138*, pp.465-474. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.066.

10. Siavashi, M. and Iranmehr, S., 2019. Using sharp wedge-shaped porous media in front and wake regions of external nanofluid flow over a bundle of cylinders. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, https://doi.org/10.1108/HFF-10-2018-0575.

11. Mohebbi, R. and Heidari, H., 2017. Lattice Boltzmann simulation of fluid flow and heat transfer in a parallel-plate channel with transverse rectangular cavities. *International Journal of Modern Physics C*, *28*(03), p.1750042. https://doi.org/10.1142/S0129183117500425.

12. Mohebbi, R. and et al., 2018. Lattice Boltzmann method based study of the heat transfer augmentation associated with Cu/water nanofluid in a channel with surface mounted blocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *117*, pp.425-435. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.043.

13. Mohebbi, R., Nazari, M. and Kayhani, M., 2016. Comparative study of forced convection of a power-law fluid in a channel with a built-in square cylinder. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, *57*(1), pp.55-68.

14. Mohebbi, R. and Rashidi, M., 2017. Numerical simulation of natural convection heat transfer of a nanofluid in an L-shaped enclosure with a heating obstacle. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *72*, pp.70-84. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.006.

15. Nazari, M., Kayhani, M. and Mohebbi, R., 2013. Heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous block: Lattice Boltzmann method. *International Journal of Modern Physics C*, *24*(09), p.1350060. https://doi.org/10.1142/S0129183113500605.

16. Yadav, V. and et al., 2016. Numerical investigation of heat transfer in extended surface microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *93*, pp.612-622. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.023.

17. Alamyane, A.A. and Mohamad, A.A., 2010. Simulation of forced convection in a channel with extended surfaces by the Lattice Boltzmann method. *Computers & Mathematics with Applications*, *59*(7), pp.2421-2430. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.070.

18. Peterson, G. and Ortega, A., 1990. Thermal control of electronic equipment and devices. *In Advances In Heat Transfer, Elsevier*, pp.181-314. https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70028-5.

19. Incropera, F.P., 1988. Convection heat transfer in electronic equipment cooling. *J. Heat Transfer*, *110*(4b), pp.1097-1111. https://doi.org/10.1115/1.3250613.

20. Kefayati, G.R., 2015. FDLBM simulation of magnetic field effect on mixed convection in a two sided lid-driven cavity filled with non-Newtonian nanofluid. *Powder Technology*, *280*, pp.135-153. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.057.

21. Pirouz, M.M. and et al., 2011. Lattice Boltzmann simulation of conjugate heat transfer in a rectangular channel with wall-mounted obstacles. *Scientia Iranica*, *18*(2), pp.213-221. https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.03.016.

22. Biswas, S. and et al., 2015. Analysis of mixed convective heat transfer in a ribbed channel using the Lattice Boltzmann method. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, *68*(1), pp.75-98. https://doi.org/10.1080/10407782.2014.965095.

23. Kefayati, G.R., 2014. Mixed convection of non-newtonian nanofluids flows in a lid-driven enclosure with sinusoidal temperature profile using FDLBM. *Powder Technology*, *266*, pp.268-281. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.040.

24. Afifah, A., Syahrullail, S. and Sidik, N.C., 2015. Natural convection of alumina-distilled water nanofluid in cylindrical enclosure: An experimental study. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *12*(1), pp.1-10.

25. Izadi, M., Behzadmehr, A. and Shahmardan, M., 2015. Effects of inclination angle on laminar mixed convection of a nanofluid flowing through an annulus. *Chemical Engineering Communications*, *202*(12), pp.1693-702. https://doi.org/10.1080/00986445.2014.910770.

26. Beg, O.A. and et al., 2014. Comparative numerical study of single-phase and two-phase models for bio-nanofluid transport phenomena. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, *14*(01), p.1450011. http://dx.doi.org/10.1142/S0219519414500110.

27. Rashidi, M. and et al., 2014. Comparative numerical study of single and two-phase models of nanofluid heat transfer in wavy channel. *Applied Mathematics and Mechanics*, *35*(7), pp.831-848.

28. Yang, Y.T. and Lai, F.H., 2011. Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *38*(5), pp.607-614. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.010.

29. Sidik, N.A.C. and et al., 2013. Simulation of forced convection in a channel with nanofluid by the Lattice Boltzmann method. *Nanoscale Research Letters*, *8*(1), pp.1-8. https://doi.org/10.1186/1556-276x-8-178.

30. Demartini, L.C., Vielmo, H.A. and Möller, S., 2004. Numeric and experimental analysis of the turbulent flow through a channel with baffle

plates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *26*(2), pp.153-159. http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782004000200006.

31. Mokhtari, M. and et al., 2017. Numerical study of mixed convection heat transfer of various fin arrangements in a horizontal channel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *20*(3), pp.1106-1114. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.007.
32. Siddiqui, M.K., 2007. Heat transfer augmentation in a heat exchanger tube using a baffle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *28*(2), pp.318-328. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.020.
33. Mellal, M. and et al., 2017. Hydro-thermal shell-side performance evaluation of a shell and tube heat exchanger under different baffle arrangement and orientation. *International Journal of Thermal Sciences*, *121*, pp.138-149. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.011.
34. Dutta, P. and Hossain, A., 2005. Internal cooling augmentation in rectangular channel using two inclined baffles. *International Journal of Heat and fluid flow*, *26*(2), pp.223-232. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.08.001.
35. Guerroudj, N. and Kahalerras, H., 2010. Mixed convection in a channel provided with heated porous blocks of various shapes. *Energy Conversion and Management*, *51*(3), pp.505-517. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.015.
36. Berner, C., Durst, F. and DaM McEligot., 1984. Flow around baffles. *J. Heat Transfer*, *106*(4), pp.743-749. https://doi.org/10.1115/1.3246747.
37. Habib, M. A. and et al., 1994. Experimental investigation of heat transfer and flow over baffles of different heights. *J. Heat Transfer*, *116*(2), pp.363-368. https://doi.org/10.1115/1.2911408.
38. Cao, X. and et al., 2021. Performance investigation and multi-objective optimization of helical baffle heat exchangers based on thermodynamic and economic analyses. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *176*, p.121489. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121489.
39. de Andrés Honrubia, J.L. and et al., 2021. Development and application of a multi-objective tool for thermal design of heat exchangers using neural networks. *Mathematics*, *9*(10), p.1120. http://dx.doi.org/10.3390/math9101120.
40. Kaya, I. and Ust, Y., 2021. A new method to multi-objective optimization of shell and tube heat exchanger for waste heat recovery. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, pp.1-18.
41. Saijal, K.K. and Danish, T., 2021. Design optimization of a shell and tube heat exchanger with staggered baffles using neural network and genetic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *235*(22), pp.5931-5946.
42. Chen, J. and et al., 2021. Experimental investigation of shell-side performance and optimal design of shell-and-tube heat exchanger with different flower baffles. *Heat Transfer Engineering*, *42*(7), pp.613-626. https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1716485.
43. Thondiyil, D. and Kodakkattu, S.K., 2021. Optimization of a shell and tube heat exchanger with staggered baffles using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, *46* pp.9983-9988. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.092.
44. Aslan, E., Taymaz, I. and Islamoglu, Y., 2016. Finite volume simulation for convective heat transfer in wavy channels. *Heat and Mass Transfer*, *52*(3), pp.483-497. https://doi.org/10.1007/s00231-015-1571-x.
45. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Pearson Education.
46. Ansys, I., 2013. Fluent theory guide. ANSYS Inc, USA [(accessed on 27 March 2020)].
47. Abolpour, B. and et al., 2017. Simulation of in-flight reduction of the fine iron ore concentrate by hydrogen. *Chemical Product and Process Modeling*, *12*(1). https://doi.org/10.1515/cppm-2016-0021.
48. Vajjha, R.S. and Das, D.K. 2009. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *52*(21.22), pp.4675-4682. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027.
49. Hwang, C.L. and Masud, A.S.M., 2012. Multiple objective decision making-methods and applications: A state-of-the-art survey. *Springer Science & Business Media*, *164*.
50. Deb, K., 2011. *Multi-Objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*. In Multi-Objective Evolutionary Optimisation For Product Design and Manufacturing. Springer. pp.3-34.
51. Srinivas, N. and Deb, K., 1994. Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, *2*(3), pp.221-248. https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221.
52. Miettinen, K., 2012. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Springer Science & Business Media, Vol. 12.
53. Hassanzadeh, H.R. and Rouhani. M., 2010. A multi-objective gravitational search algorithm. *In 2010 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*. IEEE.
54. Mohebbi, R. and et al., 2018. Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *117*, pp.1291-1303. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.063.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۳۷-۴۴، (پژوهشی)

Original Article

مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی قطعات مخروطی

صادق فرجی* **(دانشجوی کارشناسی ارشد)**
یاسر رستمیان (دانشیار)
علی اصغر شمسی سربند (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

گسترش روش‌های نمونه‌سازی سریع در سال‌های اخیر بسیار چشمگیر بوده است. یکی از این روش‌ها، فرایند شکل‌دهی تدریجی است. در این پژوهش، فرایند شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی، توسط سه ماتریس استوانه‌یی با تک، دو و سه پله مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا، نرخ پیشروی و گام نفوذ ابزار برای شکل‌دهی نمونه‌های آلومینیومی در سه سطح بررسی شدند. در ادامه، تأثیر پارامترهای ورودی بر ارتفاع حدی نمونه‌های شکل گرفته، توزیع ضخامت، زبری سطحی و دقت هندسی نمونه‌های برش خورده طولی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل، با بهره‌گیری از ماتریس‌های چند نقطه‌یی، علی‌رغم افزایش دقت هندسی نهایی، اصطکاک نسبت به ماتریس مخروطی یکپارچه تقلیل یافت. با به‌کارگیری ماتریس دو پله، با افزایش شکل‌پذیری ورق، قطعات عمیق‌تری شکل گرفت، به‌طوری‌که ارتفاع حدی میانگین را به میزان ۱۲٪ بهبود بخشید. از جنبه دقت هندسی نیز طرح ماتریس با سه پله، بالاترین دقت هندسی و کمترین انحراف را نسبت به مسیر برنامه‌ریزی شده ایجاد کرد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی تدریجی، ماتریس پشتیبان، انحراف هندسه، توزیع ضخامت، زبری سطحی.

sadeghbizaki@gmail.com
yasser.rostamiyan@iausai.ac.ir
ali.shamsisarband@iausai.ac.ir

۱. مقدمه

در دو دهه اخیر، فرایند شکل‌دهی تدریجی در حوزه نمونه سازی‌های صنعتی مورد توجه ویژه‌یی قرار گرفته است. این فرایند، با ماهیت نمونه‌سازی سریع در ساخت محصولات ورقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه استفاده از روش‌های نمونه‌سازی سریع[1] در حال گسترش می‌باشد.[1] در دهه‌های اخیر، فرایند شکل‌دهی تدریجی توانسته در نمونه‌سازی سریع هندسه‌های فلزی پیچیده، ظرفیت بالایی را از جنبه بهره‌وری اقتصادی از خود نشان دهد.[1]

ضرورت توسعه این فرایند، به منظور حصول اطمینان از انطباق دقیق قطعات برای تولید محصولی جدید، دریافت بازخورد آن درکوتاه‌ترین زمان ممکن و همچنین افزایش بهره‌وری اقتصادی در تولید غیرانبوه است. این انتظارات اغلب با به‌کارگیری روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. فرایندهای شکل‌دهی تدریجی نوین از ایده‌ی فنی لژاک ادوارد که در سال ۱۹۶۷ میلادی مطرح شد، نشات گرفته است.[2] این فرایند به عنوان یکی از فنّاوری‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر[2] به ابزار و تجهیزات پیچیده‌یی نیاز ندارد.[3] فرایند شکل‌دهی تدریجی از نقطه نظر تماس ابزار به دوگروه کلی تک نقطه‌یی (بدون پشتیبان) و دو نقطه‌یی (با پشتیبان) دسته‌بندی می‌شود. فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌یی علی‌رغم پیچیدگی بیشتر، به دلیل بهره‌گیری از ماتریس پشتیبان، دارای دقت و مزایای بیشتری است.

طی سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر روی این فرایند انجام شده است. میرنیا و ملائی، شکل‌دهی تدریجی تک نقطه چند مرحله‌یی را برای یک مخروط ناقص آلومینیومی بررسی کردند.[4] آن‌ها با ارائه یک استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌یی جدید و بر اساس یک الگوریتم مناسب، نشان دادند که می‌توان نازک‌شدگی و زمان انجام فرایند را بهبود بخشید. همچنین، با استفاده از استراتژی طراحی شده توانستند برآمدگی کف ظرف را که یکی از محدودیت‌های این تکنیک است، کمینه نمایند. روحی و همکاران، به مطالعه تجربی و عددی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌یی گرم با گرمادهی همگن به ورق به همراه گرمایش ابزار پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش دما، شکل‌پذیری ورق افزایش خواهد داشت.[5] آن‌ها مشاهده کردند که افزایش نرخ پیشروی، حد شکل‌دهی را به مقدار کمی کاهش می‌دهد. این

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۷.

استناد به این مقاله:
فرجی، صادق، رستمیان، یاسر، و شمسی سربند، علی اصغر، ۱۴۰۲. مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی قطعات مخروطی. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۳۷-۴۴. DOI:10.24200/J40.2022.60611.1644

کاهش شکل‌پذیری در دمای بالا مشهودتر می‌باشد. بریمانی و همکاران، نمونه‌سازی سریع هندسه‌یی مشابه کانوپی‌های یکپارچه هواپیما را به کمک فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های شفاف پلی‌کربنات در مقیاس آزمایشگاهی توسط روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه بررسی کردند. براساس نتایج حاصل، با آزادسازی تنش‌های پسماند فرایندی حین حرارت‌دهی پساشکل‌دهی، برگشت فنری کاهش چشمگیری دارد.[۶] همچنین، انحراف هندسی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از $۱mm$ ایجاد شده که در محدوده مجاز پنجره فرایندی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌یی قرار دارد. کومار و همکاران، تأثیر اصطکاک ابزار و زاویه مخروط بر زبری سطحی را در فرایند شکل‌دهی تدریجی مطالعه کردند.[۷] آن‌ها گزارش کردند که مقدار Ra با افزایش قطر ابزار کاهش یافته است. ترزپیسینسکی و همکاران، آخرین پیشرفت‌ها و چالش‌های شکست در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های آلومینیومی را مورد مطالعه قرار دادند.[۸] آن‌ها طی بررسی پژوهش‌های تجربی و عددی پیشین، مسیرهای ممکن و پیش‌رو در این فرایند را شناسایی کردند.

طبق مطالعات مروری، اغلب فرایندهای شکل‌دهی دونقطه‌یی قطعات مخروطی به‌کمک ماتریس پشتیبان استوانه‌یی و مخروطی انجام شده است. در ماتریس استوانه‌یی یکپارچه به‌علت چرخش کنترل نشده‌ی قطعه کار حول محور مخروط، انحراف از هندسه نهایی گزارش شده است. در ماتریس مخروطی، به این علت که ورق از دو سمت به طور پیوسته با ابزارهای صلب در تماس است، حد شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد. در این مرجع، فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌یی قطعات مخروطی توسط ماتریس‌های استوانه‌یی دو و سه پله بررسی شده است. هدف اصلی مقاله حاضر، بهبود فرایند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌یی با مقید کردن بیشتر سطوح داخلی، کاهش احتمال چرخش کنترل نشده قطعه کار حول محور مخروط و کاهش اصطکاک تماسی به‌کمک ماتریس چند نقطه است. جهت بررسی فرایندی، پارامترهای ورودی گام عمودی و نرخ پیشروی برای طرح ماتریس‌های ذکر شده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲. مواد و روش‌ها

تمامی آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌یی با استفاده از ورق‌های آلومینیومی سری ۱۰۵۰ با درصد خلوص حداقل ۹۹٪ انجام شده است. این گرید برای مصارف با نیاز به استحکام متوسط و مقاومت به خوردگی بالا، همچون ظروف صنایع غذایی و بازتابنده[۳] لامپ‌ها، بسیار رایج است. از دیگر کاربردهای آن می‌توان به اشکال پیچیده نماهای معماری ساخته شده از آلومینیوم که اغلب تیراژی کم و هندسه شخصی‌سازی شده است، اشاره کرد. برخی از این نماها، از اجزای متقارن محور با مخروط‌های کم عمق شکل می‌گیرند. رفتار مکانیکی ورق مورد استفاده با نمودار تنش ـ کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM-A۳۷۰ در شکل ۱، نشان داده شده است.

غیر قابل عملیات حرارتی بودن از ویژگی‌های آلیاژهای سری ۱۰۰۰ است. این گرید دارای مقاومت خوبی در برابر خوردگی بوده و رسانای مناسبی برای جریان الکتریسیته است. استحکام مکانیکی آن متوسط بوده اما قابلیت ماشینکاری و شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد. در آزمایش‌ها از ورق‌های برش خورده ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی‌متر با ضخامت $۰/۵mm$ استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی ماشین فرز چهار محور ماشین‌سازی تبریز مجهز به کنترل عددی CNC مدل FP۴ME با کنترلر زیمنس ۸۰۲ انجام شده است.

شکل ۱. نمودار تنش ـ کرنش ورق آلومینیوم ۱۰۵۰.

شکل ۲. مونتاژ ماتریس پشتیبان چند نقطه‌یی در حالت مونتاژی سه پله.

شکل ۳. نمونه برش خورده در راستای نورد جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت.

در آزمایش‌های انجام شده از ابزار استوانه‌یی سرکروی با قطری معادل $۱۰mm$ و از جنس فولاد سردکار استفاده شده‌است. این ابزارها با استفاده از دستگاه تراش معمولی به طول ۱۵ سانتی‌متر ساخته شده و در برابر سایش مقاوم و استحکام مکانیکی بالایی دارند. همچنین از ماتریس‌های چند نقطه‌یی با هندسه استوانه‌یی تک، دو و سه پله به عنوان ماتریس‌های پشتیبان استفاده شده است. همان‌طورکه در شکل ۲ نشان داده شده است، جهت تسهیل فرایند ساخت، ماتریس‌ها به صورت مجزا طراحی و ساخته شده‌اند که با توجه به تعداد پله‌ها درهم مونتاژ شدند.

جهت مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌ها از بیشینه ارتفاع شکل گرفته در هر حالت تحت عنوان پارامتر ارتفاع حدی استفاده شد. به منظور مقایسه دقت هندسی، انحراف هندسی مقطع نمونه‌های برش خورده در راستای نورد ورق نسبت به مسیر برنامه‌ریزی شده ابزار توسط دستگاه پروفیل‌سنج نوری Baty R۱۴ با دقت $۰/۱mm$ اندازه‌گیری گردید. همچنین جهت بررسی توزیع ضخامت قطعات شکل گرفته، ضخامت نمونه‌ها طبق شکل ۳ در مسیری مشخص از مرکز بلنک تا وجه جانبی هرم، در جهت نورد و در نموهای $۱mm$ اندازه‌گیری شدند. مقادیر زبری قطعات برش خورده نیز

توسط دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح با پارامتر Ra به‌صورت دستی سنجیده شده و زبری سطحی در جهت عمود بر هر نقطه مورد بررسی، توسط پراب دستگاه MahrSurf PS۱ اندازه‌گیری شده است (شکل ۴).

برای بررسی دقیق تأثیر پارامترهای اصلی و تعاملی بر یکدیگر، باید از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل واریانس استفاده کرد. با توجه به تعداد آزمایش‌های زیاد مورد نیاز و کمبود بودجه در دسترس، در این پژوهش از روش سنتی استفاده شده است. طبق روش سنتی، اغلب برای بررسی هر پارامتر، سایر پارامترها را ثابت درنظر می‌گیرند. در نتیجه، برای انتخاب مقادیر ثابت هر پارامتر، آن مقداری را باید برگزید که شرایط بهتری را ایجاد کرده است. باید توجه داشت که نمی‌توان به مقدار انتخابی اعتماد کرد و باید همچون اغلب پروژه‌های بزرگ دانشگاهی و صنعتی، از روش‌های DOE استفاده نمود. در این پژوهش، با استناد به منابع[۷-۸] و انجام تست‌های اولیه از سه سرعت ۴۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ mm/min با گام‌های ۰/۵، ۰/۸ و ۱/۱ mm با سه طرح ماتریس استوانه‌ای یک، دو و سه پله استفاده گردید.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تأثیر پارامترهای فرایندی بر ارتفاع حدی

درادامه، شکل ۵ ارتفاع نمونه‌ها را درگام حرکتی ۰/۸mm و در سرعت‌های مختلف، نشان می‌دهد. مقدار عددی هر نمودار نیز بر روی محور افقی و زیر سرعت مربوطه ذکر شده است. ارتفاع حدی در هر سرعت، با میانگینی از آزمایش‌های انجام شده در سه نوع ماتریس لحاظ شد. به عنوان مثال، مقدار ارتفاع گزارش شده در سرعتی معادل ۴۰۰mm/min متعلق به میانگینی از آزمایش‌های انجام شده با گام ۰/۸mm در سه طرح ماتریس استوانه‌یی یکپارچه، استوانه‌یی دو پله و سه پله شده است.

قابل ذکر است که نمونه‌های مخروطی تا ارتفاع بیشینه، معادل ۵۶ mm شکل‌دهی شدند. به محض وقوع پارگی، عملیات متوقف و ارتفاع گزارش شد. طبق خط روند

شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری زبری سطحی.

شکل ۵. مقایسه تغییرات ارتفاع حدی برای سرعت‌های پیشروی مختلف.

برازش شده توسط معادله درجه دو، ابتدا ارتفاع حدی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در سرعت پیشروی ۷۰۰mm/min ارتفاع حدی میانگین سه نوع ماتریس اعمالی، نسبت به سرعت ۴۰۰mm/min، ۱۳۸٪ افزایش یافت. با افزایش سرعت به ۱۰۰۰mm/min، ارتفاع حدی میانگین نسبت به سرعت ۴۰۰mm/min، ۷۴٪ افزایش ولی نسبت به ۷۰۰mm/min، ۲۷٪ کاهش داشت.

افزایش نرخ پیشروی ابزار معادل، با بزرگ‌شدن نرخ کرنش وارد شده است. نرخ کرنش نیز معادل سرعت تغییرات کرنش است و ارتباط مستقیمی با سرعت خطی ابزار دارد. در منابع مختلف، حساسیت به نرخ کرنش برای آلیاژهای آلومینیوم در دمای محیط نامحسوس گزارش شده است.[۹-۱۱] درحالی‌که طبق شکل ۵، افزایش سرعت سبب بهبود شکل‌دهی تدریجی شده و ارتفاع‌های بزرگ‌تری شکل گرفته است. اگرچه این تغییرات در بیشینه سرعت اعمالی با شدت کمتری افزایش یافته است. افزایش سرعت خطی با ایجاد حرارت موضعی بیشتر منجر به بهبود شکل‌پذیری شده است. بهبود شکل‌پذیری نیز با قابلیت تحمل کرنش‌های شکست بزرگتر همراه شده و باعث افزایش ارتفاع‌های حدی شده است. اگرچه کاهش ۲۷٪ ارتفاع حدی میانگین در نرخ پیشروی بیشینه نسبت به سرعت ۷۰۰mm/min را باید با پدیده دیگری توجیه کرد. در سرعت ۱۰۰۰mm/min، افزایش حرارت موضعی باعث بزرگ شدن نمای حساسیت به نرخ کرنش شد. با افزایش ضریب حساسیت به نرخ کرنش، کرنش‌های بزرگ‌تری ایجاد شده که موجب کاهش تأثیر مثبت حرارت موضعی بر قابلیت شکل‌دهی می‌شود.[۹-۱۱] درنتیجه، اگرچه در سرعت ۱۰۰۰mm/min همچنان افزایش ارتفاع حدی میانگین نسبت به سرعت ۴۰۰mm/min مشاهده می‌شود، اما اثر منفی حساسیت به نرخ کرنش سبب افزایش چشمگیر قابلیت شکل‌دهی تدریجی نمی‌گردد. در دمای محیط، تغییرات سرعت طبق معادله بنیادی بکوفن ($\sigma = C\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$) تأثیر چندانی بر حساسیت به نرخ کرنش (m) و درنتیجه بر تنش سیلان (σ) نمی‌گذارد. درحالیکه با افزایش سرعت و ایجاد حرارت موضعی، نمای کارسختی (n) و همچنین σ کاهش می‌یابد. بنابراین، تنش سیلان کاهش یافته و جریان مواد بهبود خواهد یافت. لازم به ذکر است که در برخی موارد، با افزایش چشمگیر سرعت و دما، m نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد، به ویژه زمانی که دمای موضعی ایجاد شده به ۰/۴ دمای ذوب برسد. آنگاه، افزایش m بر کاهش n غلبه کرده و سبب افزایش تنش سیلان می‌شود.[۹-۱۱] به منظور ارزیابی گام حرکتی ابزار، ارتفاع نمونه‌ها در سرعت ۷۰۰mm/min که طبق شکل ۵، بزرگ‌ترین ارتفاع‌های حدی ایجاد شده است، با میانگینی از آزمایش‌های انجام شده در سه نوع ماتریس اندازه‌گیری شدند. در شکل ۶ ارتفاع حدی مخروط‌های شکل گرفته در سه سطح گام حرکتی مقایسه شده است.

شکل ۶. مقایسه تغییرات ارتفاع حدی برای گام‌های مختلف.

شکل ۷. مسافت طی شده بر روی سطح جانبی مخروط در طی یک گام با مقادیر مختلف.

شکل ۸. مقایسه تغییرات ارتفاع حدی برای طرح ماتریس‌های مختلف.

طبق شکل ۶ مشخص می‌شود که در بیشینه گام اعمالی، مخروط نهایی ارتفاع حدی کمتری را به خود اختصاص داده است. با افزایش گام به اندازه $۱/۱mm$ ارتفاع حدی میانگین نسبت به گام‌های $۰/۵mm$ و $۰/۸mm$ به ترتیب ۳۰٪ و ۴۳٪ کاهش یافت. برای بررسی علت تأثیرگام بر ارتفاع حدی باید به ارتفاع عمودی نموهای شکل‌دهی رجوع کرد. در شکل ۷ مسافت طی شده برای سه گام اعمالی ۰/۵، ۰/۸ و $mm۱/۱$ مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، میزان حرکت ابزار طبق مقدار هر گام می‌تواند سبب طی‌شدن مسافت‌های گوناگونی در هر تغییرگام شود. در واقع، افزایش گام معادل با افزایش عمق بار در باربرداری که سبب افزایش نیرو و کرنش‌های وارده خواهد شد، برابر می‌شود.

طبق شکل ۷، افزایش مقدار گام که در کنار ضلع عمودی مثلث برای ۳ مقدار مختلف و با پیکان به‌سمت پایین نشان داده شده، سبب بزرگ شدن مسافت حرکتی ابزار بر روی سطح مخروط در حین اعمال گام می‌گردد. در هر گام، ابزار بر روی وتر طبق شکل ۷ حرکت می‌کند. در واقع مجموع وترها در تمام گام‌ها برابر با اندازه طول یال مخروط نهایی است. سطح جانبی مخروط طبق ذات این فرایند در نموهای کوچک و تدریجی شکل‌دهی می‌گردد. با توجه به اینکه این مسافت بر روی یال و با زاویه‌یی نسبت به افق طی می‌گردد، افزایش آن برای گام‌های بزرگ‌تر، سبب وارد شدن کرنش‌های بزرگ‌تری می‌شود. مسافت طی شده بر روی یال با تغییر مقدار گام از $۰/۵mm$ به $۰/۸mm$، ۶۱٪ و با تغییر از $۰/۵mm$ به $۱/۱mm$، بیش از دو برابر افزایش می‌یابد. این افزایش مسافت، با ایجاد اصطکاک بزرگ‌تری همراه خواهد. درنتیجه کرنش‌های بزرگ‌تری نیز ایجاد شده و سبب کاهش قابلیت شکل‌دهی برای گام $۱/۱mm$ می‌گردد. درنتیجه کاهش ارتفاع حدی مخروط‌ها برای گام بیشینه با توجه به کرنش‌های بزرگ وارد شده قابل انتظار است. باید توجه داشت، ارتفاع حدی گام $۰/۸mm$ نسبت به $۰/۵mm$ نه تنها کاهش نیافته، بلکه ۲۳٪ افزایش یافت. شاید به توان علت این افزایش را ناشی از تأثیر تداخلی پارامترها و یا افزایش کارسختی و استحکام ورق دانست. برای بررسی اثر نوع ماتریس‌های ارائه شده بر ارتفاع حدی، میانگین ارتفاع‌های شکل‌دهی شده در ۹ آزمایشی که متعلق به هر ماتریس بودند، در شکل ۸ رسم شده است.

برای هر ماتریس، ارتفاع‌های شکل گرفته در ۹ آزمایشی که در سه سطح متغیر برای گام و نرخ پیشروی شکل گرفته‌اند، با میانگین ارائه شدند. طبق شکل ۸، بهبود ۱۲٪ ارتفاع حدی میانگین با بهره‌گیری از ماتریس چند نقطه‌یی دو پله است. این امر موکد ارتقای قابلیت شکل‌دهی تدریجی به کمک استفاده از ماتریس استوانه‌ای دو پله خواهد بود. در واقع، اعمال ماتریس دو پله سبب افزایش احتمال دستیابی به ارتفاع‌های حدی بزرگ‌تری می‌گردد. به عبارت دیگر، در یک مرحله از انجام فرایند می‌توان قطعات عمیق‌تری را شکل داد که سبب کاهش تعداد عملیات فرایندی لازم، برای شکل‌دهی قطعات عمیق و پیچیده می‌شود.

در استفاده از ماتریس استوانه‌یی یکپارچه، ورق به‌جز در وجه تخت بالایی، در سطوح جانبی آزاد و بدون پشتیبان است. تا زمانی که ورق از سمت ماتریس آزاد باشد، همانند فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه، احتمال انحراف هندسی ورق از مدل اصلی و ایجاد پیچش و چروکیدگی افزایش می‌یابد. پدیده پیچش در فرایند شکل‌دهی تدریجی، هندسه و شکل نهایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پدیده، به دلیل نیروهای مماسی وارد شده توسط ابزار، چرخش کنترل نشده‌ی قطعه کار حولِ تکیه‌گاه ورقگیر ایجاد شده و منجر به برش درون صفحه‌یی[۴] در قطعه‌کار می‌شود.[۱۲،۱] برش درون صفحه‌یی امکان دستیابی به قطعات عمیق را کاهش داده و سبب وقوع نازک‌شدگی و شکست زودهنگام می‌گردد. با بهره‌گیری از ماتریس دو پله‌یی امکان پیچش و چروکیدگی کاهش یافته و به افزایش ۱۲٪ ارتفاع حدی میانگین منجر شده است. اما کاهش ۳۴٪ ارتفاع حدی میانگین در حالت سه پله نسبت به استوانه یکپارچه، حاکی از تنزل قابلیت شکل‌دهی محصول نهایی است. این کاهش می‌تواند به علت تأثیر معکوس عوامل دیگری همچون افزایش سطح تماس ماتریس با ورق، افزایش نرخ اصطکاک و نیروهای بزرگ ایجاد شده در سطوحی از ورق که از دو سمت با اجسامی صلب در تماس‌اند، ایجاد شده باشد.

۲.۳. تأثیر پارامترهای فرایندی بر زبری سطحی

با توجه به اینکه برای تمامی نمونه‌های شکل گرفته در تنظیمات گوناگون، تماسی بین ابزار و سطح تخت وجه بالای صورت نگرفته است، این ناحیه تحت کمترین تغییر شکل و سایش قرار گرفته است. ابزار متحرک در ابتدای درگیری، محیط دایره بالایی را شکل داده و همزمان در حین حرکت با نفوذ عمودیِ گام به گام، به‌طور تدریجی مخروطی ناقص را شکل می‌دهد. وجه بالایی مخروط ناقص در شکل ۹ نشان داده شده است.

طبق شکل ۹، سطح قاعده بالا که به علت تغییرات فرایندی نامحسوس آیینه‌یی مانده، قابل مشاهده است. سایش و زبری سطحی در تصویر ارائه شده، برای وجوه جانبی نسبت به سطح آیینه‌ای قاعده بالایی، گواهی آشکار بر توضیحات ارائه شده است. با توجه به وقوع سایش نامحسوس در قاعده بالایی، از سطوح جانبی مخروط برای سنجش میزان زبری استفاده شد. میانگینی از چهار زبری اندازه‌گیری شده تصادفی به‌عنوان معیار زبری سطحی برای هر نمونه گزارش شد. در شکل ۱۰،

شکل ۹. مقایسه وجه تخت مخروط شکل‌دهی شده.

شکل ۱۰. مقایسه مقدار زبری سطحی برای سرعت‌های پیشروی مختلف.

شکل ۱۱. کیفیت سطحی نهایی با زبری میانگین برای گام: الف) ۰/۵، ب) ۰/۸ و ج) $1/1\mu m$.

زبری‌سنجی برای پارامتر سرعت در گام ثابت $0/8mm$ بررسی شده است. زبری در هر سرعت، با میانگینی از آزمایش‌های انجام شده در سه نوع ماتریس لحاظ گردید.

طبق شکل ۱۰، ارتفاع ناهمواری‌های سطحی با افزایش نرخ پیشروی بزرگ‌تر شده است. با افزایش پیشروی، تماس فیزیکی ابزار و ورق بیشتر می‌شود. در نتیجه اصطکاک و نیروهای شکل‌دهی نیز حادتر شده که ماحصل آن افزایش ارتعاش ابزار و بدتر شدن کیفیت ظاهری و پرداخت نهایی سطح است. به‌منظور مقایسه ناهمواری نسبتا خشن با حالت سایش بسیار کم، می‌توان نتایج ارائه شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ را با یکدیگر مقایسه کرد. نرخ پیشروی برای مقادیر حدیِ کمینه، به صفر میل کرده که در واقع متناظر با عدم تماس ابزار و ورق است. شرایطی که در سطح قاعده بالایی ایجاد شده است، معادل سرعت پیشروی صفر بوده که توانسته بالاترین پرداخت نهایی را نتیجه دهد. در ادامه، تأثیر گام بر پارامتر Ra برای نمونه‌های شکل‌دهی شده در سه گام طبق شکل ۱۱ بررسی شده است.

شکل ۱۲. مقایسه تعداد گام‌های طی شده بر روی یال مخروط در حال شکل‌دهی تدریجی.

شکل ۱۳. کیفیت سطح نمونه‌های شکل گرفته با گام $1/1mm$ در سرعت $700mm/min$ با ماتریس دو پله.

قابل ذکر است که برای انجام آزمایش‌ها از سطح میانی نرخ پیشروی با مقدار $700mm/min$ و ماتریس دو پله استفاده شده است. مطابق با انتظار، با افزایش گام نفوذ ابزار، ارتفاع میکرونی برای برجستگی‌های سطحی که سنجه‌یی برای بیان زبری سطحی است، افزایش یافت. با افزایش گام از $0/5mm$ به $0/8mm$، میزان زبری ۳۴٪ و همچنین با افزایش از گام $0/8mm$ به $1/1mm$ حدود ۵۳٪ افزایش میزان زبری حاصل شد. افزایش میزان زبری معادل کاهش کیفیت سطحی محصول نهایی خواهد بود. به‌نحوی که، به علت سایش ابزار و اصطکاک شدید، پرداخت نهایی کیفیت پایینی خواهد داشت. جهت بررسی علت افزایش زبری برای گام‌های بزرگ‌تر، می‌توان به شکل ۱۲ توجه کرد.

طبق شکل ۱۲، افزایش گام باعث می‌شود که ابزار طی نموهای بزرگ‌تری بر روی یال، شروع به شکل‌دهی قاعده بعدی کند. برای یال مشخص شده در شکل در حین شکل‌دهی تدریجی توسط گام‌های ۰/۵، ۰/۸ و $1/1mm$، به ترتیب ۸، ۴ و ۲ تغییر گام مورد نیاز بوده که به ترتیب بر روی یال مخروط، نقاط تماس برای گام‌های مختلف شماره‌گذاری شده‌است. افزایش تعداد گام به معنای کاهش کیفیت سطح نهایی است. در واقع می‌توان تأثیر افزایش گام ابزار بر کیفیت محصول شکل‌دهی شده توسط فرایند TPIF را به افزایش بار براده‌برداری در فرایند ماشینکاری تعمیم داد. با افزایش مقدار گام ابزار پس از اتمام شکل‌دهی قاعده اول، به‌منظور اعمال گام بعدی و شکل‌دهی قاعده دوم که در داخل مخروط واقع شده است، در مسافت دورتری از نقطه آغاز، به روی یال و وجوه جانبی باز می‌گردد. بنابراین، تا شکل‌دهی آخرین قاعده، ابزار همواره با نموهای بزرگ‌تری بر روی یال می‌نشیند. بزرگ‌تر شدن انقطاع مسافتی در برگشت ابزار بر روی ورق، سبب افزایش زبری و تنزل کیفیت پرداخت نهایی شده‌است. براساس شکل ۱۳، حتی با چشم غیر مسلح نیز تنزل

شکل ۱۴. مقایسه دقت هندسی مقطع برش خورده برای گام‌های مختلف.

کیفیت سطحی و پرداخت نهایی با افزایش گام برای نمونه شکل‌دهی شده توسط فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه قابل مشاهده است.

بر اساس شکل ۱۳، زبری شکل گرفته از نمای نزدیک نشان داده شده است. جهت بررسی تأثیر نوع ماتریس بر کیفیت سطحی نمونه‌های شکل‌دهی شده، زبری نمونه‌های شکل گرفته در سطح میانی پارامتر سرعت و گام معادل $700\,mm/min$ و $0/8mm$، در سه طرح ماتریس با استوانه یکپارچه، دو پله و سه پله اندازه‌گیری شدند. طبق مشاهدات، تغییر محسوسی در زبری نمونه‌های شکل گرفته در سه ماتریس ایجاد نشده است. بنابراین، طرح ماتریس‌های ارائه شده بر خروجی زبری نهایی سطحی تقریبا بی‌تأثیر هستند.

۳.۳. تأثیر پارامترهای فرایندی بر دقت هندسی

در شکل ۱۴، انحراف هندسی برای نمونه‌های برش‌خورده در راستای نورد ورق، برای گام‌های مختلف حرکتی مورد مقایسه قرارگرفته است. جهت مقایسه نتایج از ماتریس با استوانه دو پله با نرخ پیشروی $700\,mm/min$ استفاده شده است. همان‌طورکه قابل مشاهده است، عمق نمونه‌های شکل گرفته متفاوت است. در گام $1/1mm$ ارتفاع حدی بزرگ‌تری ایجاد شده است. با این وجود پروفیل برش خورده برای ارتفاع حدی هر یک از نمونه‌های شکل گرفته رسم شده است. با توجه به نتایج شکل ۱۴، افزایش گام حرکتی ابزار سبب کاهش انحراف پروفایل برش خورده نسبت به مقدار مدلی شده است که مسیر حرکتی ابزار بر مبنای آن برنامه‌ریزی شد. بهبود دقت هندسی حتی با افزایش عمق و حادتر شدن شرایط شکل‌دهی، به‌طور محسوسی بهبود پیدا کرده‌است. در گام‌های کوچک با توجه به مقدار نفوذ کم، نیروی کمتری در راستای نفوذ به وجوه جانبی وارد می‌شود. با بزرگ‌تر شدن گام، مقدار نیرو به هنگام نفوذ افزایش یافته به نحوی و سبب کاهش انحراف ورق در بین ابزار و ماتریس می‌گردد.

با افزایش عمق نفوذ، ابزار در طول بزرگ‌تری در راستای یال (30°) به مواد پیرامون نفوذ می‌کند. در نتیجه، کرنش موضعی بزرگ‌تری در هر اعمال گام به قاعده بعدی وارد می‌شود. بنابراین، نیروهای شکل‌دهی نیز افزایش یافته که از اثرات آن می‌توان به جلوگیری از انحراف ورق اشاره کرد. درحالیکه برای نیروهای کم، به ویژه برای سطوح جانبی که ورق از سمت ماتریس آزاد است، تمایل به فرار از مسیر برنامه افزایش می‌یابد. این نتایج پیشتر نیز توجه سینگ و گویال همچنین گزارش شده است.[۱۳] یکی دیگر از بحث‌های ارائه شده در توجیه رابطه مستقیم بین دقت هندسی و گام

شکل ۱۵. نمونه‌ی شکل‌دهی شده در گام $0/5mm$ با نرخ پیشروی $1000\,mm/min$ توسط ماتریس تک پله.

ابزار، ارتباط آن به پدیده برگشت‌فنری بوده است. نجف‌آبادی و همکاران، با دو برابر کردن گام عمودی ابزار، کاهش ۲۵٪ برگشت فنری را گزارش کردند.[۱۴] این بحث به شرایط این مقاله نیز قابل تعمیم می‌باشد. کاهش برگشت‌فنری معادل خواهد بود با کمتر شدن انحراف هندسه نهایی نسبت به هندسه برنامه‌ریزی شده، به‌نحوی که محصول نهایی با دقت هندسی بالاتری شکل‌دهی می‌شود.

جهت بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر دقت هندسی نیز آزمایش‌هایی در گام $0/8mm$ طی سه سرعت ۴۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ mm/min توسط ماتریس دو پله انجام شد. طبق نتایج، تغییرات نرخ پیشروی تأثیر محسوسی بر دقت هندسی نداشته و تقریبا برای هر سه سرعت، انحراف یکسانی تا ارتفاع کشش کمترین نمونه ایجاد شده است. درحالیکه پیش‌تر نتایجی متفاوتی به‌ویژه برای مشاهدات شکل‌دهی تدریجی تک نقطه گزارش شده‌است.[۱۵و۱۶] از علل تأثیر نامحسوس تغییرات نرخ پیشروی بر دقت هندسی نمونه‌های شکل‌دهی شده می‌توان به بهره‌گیری از ماتریس دو پله اشاره کرد که به‌خوبی توانسته با مقید کردن سطوح داخلی نمونه، از چرخش کنترل نشده‌ی قطعه‌کار حول محور مخروط جلوگیری کرده و از برش درون صفحه‌یی قطعه‌کار ممانعت کند.[۱۷]

از نکات حائز اهمیت می‌توان به حادث نشدن تابیدگی و چروکیدگی در تمامی نمونه‌ها اشاره کرد. درحالیکه پدیده تابیدگی هندسه نهایی در فرایند شکل‌دهی به ویژه بدون ماتریس پشتیبان، برای عمق‌های زیاد نزدیک به حد پارگی، بسیار رایج گزارش شده است.[۱۸و۱۹] در شکل ۱۵، نمونه شکل‌دهی شده توسط ماتریس دوپله نشان داده شده که تا عمیق بیشینه $56mm$ بدون ظهور چروک و تابیدگی شکل‌دهی شده‌است. از مزایای بهره‌گیری از ماتریس پشتیبان می‌توان به کاهش احتمال تابیدگی اشاره کرد که با کم کردن انحراف هندسی، سبب افزایش دقت هندسی محصول نهایی خواهد شد.

در ادامه به بررسی طرح ماتریس‌های ارائه شده بر دقت هندسی پرداخته شده‌است. بدین منظور، طبق شکل ۱۶، دقت هندسی پروفایل نهایی برای سه طرح ماتریس با هم مقایسه شده‌است. قابل ذکر است که طبق نتایج شکل‌های ۵ و ۷، مقادیر پارامترهای گام پیشروی و سرعت در شکل ۱۶ طوری انتخاب شدند که منجر به ایجاد عمیق‌ترین قطعات گردند. همچنین با توجه به انحراف ناچیز وجه تخت نمونه‌ها، فقط کانتور متعلق به سطوح جانبی اندازه‌گیری و ترسیم شدند.

همان‌طورکه در شکل ۱۶ نشان داده شده، در ماتریس دوپله، علی‌رغم حادتر شدن شرایط شکل‌دهی و حصول قطعه‌ی عمیق‌تر، انحراف کانتور برش خورده نسبت به ماتریس تک پله کاهش یافته است. در ماتریس سه پله نیز این انحراف کاهش بیشتری یافته و دقت هندسی بالاتری ایجاد شده است. افزایش تعداد پله‌های ماتریس،

شکل ۱۶. نمونه مقایسه دقت هندسی مقطع برش خورده برای طرح ماتریس‌های مختلف.

شکل ۱۷. طرح ماتریس فرایند TPIF با الف) استوانه تک پله، ب) ماتریس دو پله، ج) ماتریس سه پله و د) مخروط یکپارچه.

با افزودن قیود خطی پشتیبان در سمت ماتریس، سبب کاهش احتمال انحراف ابزار و ورق در حین شکل‌دهی می‌گردد. درواقع ابزار تمایل کمتری به ارتعاش و انحراف داشته و لذا ورق را نیز طبق برنامه شکل‌دهی می‌کند.

۴.۳. مقایسه طرح‌های ارائه شده در ماتریس

طبق نتایج گزارش شده، طرح ماتریس‌های ارائه شده ویژگی‌هایی مختلفی خواهند داشت. از مزایای ماتریس استوانه یکپارچه (تک پله) می‌توان به‌سادگی آن اشاره کرد. این سادگی سبب کاهش هزینه ساخت آن می‌گردد. اجرا و ساخت با افزایش تعداد پله‌ها، هزینه بیشتری را به همراه خواهد داشت. در شکل ۱۷، طرح‌واره سه ماتریس ارائه شده‌است. طبق نتایج حاصل ماتریس دو پله توانست با افزایش شکل‌پذیری ورق، قطعات عمیق‌تری را شکل دهد. بر اساس نتایج و از جنبه دقت هندسی، طرح ماتریس با سه پله بالاترین دقت هندسی و کمترین انحراف را نسبت به مسیر برنامه‌ریزی شده ایجاد کرد.

با بهره‌گیری از ماتریس‌های چند نقطه‌یی، علی رغم افزایش دقت هندسی ورق، اصطکاک نیز نسبت به ماتریس مخروطی یکپارچه تقلیل می‌یابد. از معایب ماتریس مخروطی یکپارچه، بوجود آمدن سطوح تماس دوطرفه خواهد بود. با توجه به اینکه ورق از دو سمت به‌طور پیوسته با ابزارهای صلب درتماس می‌باشد، این امر سبب افزایش اصطکاک و کرنش‌های وارده می‌گردد. درحالیکه ماتریس استوانه‌یی سه پله، علاوه بر کاهش انحراف هندسی محصول نهایی، چالش اصطکاک دوطرفه را حل می‌کند. برای مواردی که صرفا ایجاد نمونه فیزیکی اولیه با دقت و هزینه کم مدنظر است، می‌توان از استوانه یکپارچه بهره برد. در نتیجه با توجه به اولویت در شکل‌دهی ورق، اینکه ارتفاع کشش، دقت هندسی و یا کیفیت سطحی نهایی در اولویت بالاتری قرار داشته باشد و یا اینکه سادگی و صرفه‌جویی در هزینه ساخت در اولویت بالاتری قرار داشته باشد، می‌توان یکی از طرح ماتریس‌های استوانه‌یی یکپارچه، دو پله، سه پله و مخروطی را برگزید.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مجموعه‌ای برای انجام شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌یی بر روی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم ۱۰۵۰ طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌هایی در گام و نرخ پیشروی‌های متغیر در سه طرح ماتریس چند نقطه‌یی انجام شده که پارامترهای فرایندی مناسب با توجه به خروجی‌های توزیع ضخامت، زبری سطحی و دقت هندسی گزارش شده است. نتایج مهم حاصل از این پژوهش، به‌صورت زیر خلاصه شده‌است:

۱. با افزایش سرعت پیشروی، ارتفاع حدی میانگین سه نوع ماتریس اعمالی نسبت به سرعت $۴۰۰ mm/min$ افزایش یافت. افزایش سرعت خطی با ایجاد حرارت موضعی بیشتر، به بهبود شکل‌پذیری و افزایش ارتفاع‌های حدی منجر شد.

۲. با افزایش گام به اندازه $۱/۱mm$، ارتفاع حدی میانگین کاهش یافت. در واقع افزایش گام با افزایش عمق بار در باربرداری که سبب افزایش نیرو و کرنش‌های وارده خواهد شد معادل خواهد بود.

۳. ارتفاع حدی میانگین با بهره‌گیری از ماتریس چند نقطه‌یی دو پله، ۱۲٪ بهبود یافت. درواقع، اعمال ماتریس دو پله سبب افزایش احتمال دستیابی به ارتفاع‌های حدی بزرگ‌تری شد. در نتیجه، بهره‌گیری از این ماتریس سبب کاهش تعداد عملیات فرایندی لازم، برای شکل‌دهی قطعات عمیق و پیچیده شد.

۴. با افزایش گام نفوذ ابزار، ارتفاع میکرونی برای برجستگی‌های سطحی که سنجه‌یی برای بیان زبری سطحی است، افزایش یافت. لازم به‌ذکر است که افزایش میزان زبری ناشی از سایش ابزار و اصطکاک شدید که موجب پرداخت نهایی و کیفیت محصول پایین می‌شود معادل با کاهش کیفیت سطحی محصول نهایی است.

۵. طبق مشاهدات، تغییر محسوسی در زبری نمونه‌های شکل گرفته در سه نوع ماتریس ارائه شده ایجاد نشده است. لذا طرح ماتریس‌های ارائه شده بر خروجی زبری نهایی سطحی تقریبا بی تأثیر هستند.

۶. افزایش گام حرکتی ابزار سبب کاهش انحراف پروفایل برش خورده نسبت به مقدار مدل شد. دقت هندسی حتی با افزایش عمق و حادتر شدن شرایط شکل‌دهی، به‌طور محسوسی بهبود پیدا کرده است. تغییرات نرخ پیشروی تأثیر محسوسی بر دقت هندسی پروفیل برش خورده نداشته و تقریبا برای هر سه سرعت، انحراف یکسانی تا ارتفاع کشش کمترین نمونه ایجاد شده است.

۷. طبق نتایج ارائه شده، در ماتریس دو پله و با افزایش شکل‌پذیری ورق، قطعات عمیق‌تری شکل گرفت. درحالیکه طرح ماتریس با سه پله دقت هندسی بالاتر، انحراف کمتر و کاهش مشکلات اصطکاک دوطرفه را نتیجه داد. در نتیجه، با توجه به اهداف مدنظر در در شکل‌دهی ورق، می‌توان یکی از طرح ماتریس‌های پیشنهادی را استفاده کرد.

پانوشت‌ها

1. Rapid Prototyping
2. Flexible Forming
3. Reflector
4. In-Plane Shear

منابع (References)

1. Behera, A.K., de Sousa, R.A. Ingarao, G. and Oleksik, V., 2017. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*, *27*, pp.37-62. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.014.
2. Edward, L., 1967. Apparatus and process for incremental dieless forming. Google Patents.
3. Nimbalkar, D.H. and Nandedkar, V., 2013. Review of incremental forming of sheet metal components. *Int J Eng Res Appl*, *3*, pp.39-51.
4. Mirnia, M.J. and Mollaei Dariani, B., 2015/1393. An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet. *Modares Mechanical Engineering*, *14*, pp.262-270 [In Persian].
   http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7.
5. Roohi, H., Deilami Azodi, H. and Safari, M., 2019. Investigation on Forming Limit of Aluminum Sheet in Warm Incremental Forming Process. *Modares Mechanical Engineering*, *19*, pp.259-268.
   http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1397.19.2.16.8.
6. Barimani-Varandi, A., Nasrabadi, M.K., Ravan, B.A. and Javadi, M., 2021. Rapid prototyping of aircraft canopy based on the incremental forming process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *43*, pp.1-15.
   http://dx.doi.org/10.1007/s40430-021-02811-1.
7. Kumar, A., Singh, V., Nayak, S., Kumar, A., Tyagi, A. and Sharma, A., 2022. Impact of process variables on surface roughness in negative incremental forming process. *Materials Today: Proceedings*, *50*, pp.930-934.
   https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.324.
8. Trzepiecinski, T., Najm, S.M., Oleksik, V., Vasilca, D., Paniti, I. and Szpunar, M., 2022. Recent developments and future challenges in incremental sheet forming of aluminium and aluminium alloy sheets. *Metals*, *12*(1), 124. https://doi.org/10.3390/met12010124.
9. Naka, T., Torikai, G., Hino, R. and Yoshida, F., 2001. The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, *113*, pp.648-653.
   https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00650-1.
10. Chu, X., Leotoing, L., Guines, D. and Ragneau, E., 2014. Temperature and strain rate influence on AA5086 forming limit curves: Experimental results and discussion on the validity of the MK model. *International Journal of Mechanical Sciences*, *78*, pp.27-34.
    https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.11.002.
11. Chen, D.Y., Xu, Y., Zhang, S.H., Ma, Y., Abd El-Aty, A., Banabic, D., Pokrovsky, A.I. and Bakinovskaya, A.A., 2019. A novel method to evaluate the high strain rate formability of sheet metals under impact hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 116553.
    https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116553.
12. Durante, M., Formisano, A. and Lambiase, F., 2019. Formability of polycarbonate sheets in single-point incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *102*, pp.2049-2062.
13. Singh, R.P. and Goyal, G., 2014. FEA analysis to study the influence of various forming parameters on springback occurs in single point incremental forming. *(IJERA) ISSN: 2248-9622 National Conference on Advances in Engineering and Technology*, pp.33-37.
14. Mohammadi Najafabadi, H., Ataee, A.A. and Sharififar, M., 2014. Numerical and Experimental Investigation of Incremental Sheet Metal Forming Parameters and Multi-objective Optimization Using Neural-genetic Algorithm. *Modares Mechanical Engineering*, *14*, pp.167-174.
    http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1393.14.2.23.4.
15. Duflou, J.R., Habraken, A.M., Cao, J., Malhotra, R., Bambach, M., Adams, D., Vanhove, H., Mohammadi, A. and Jeswiet, J., 2018. Single point incremental forming: State-of-the-art and prospects. *International Journal of Material Forming*, *11*, pp.743-773.
16. Li. Y., Chen, X., Liu, Z., Sun, J., Li, F., Li, J. and Zhao, G., 2017. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *92*, pp.2439-2462.
17. Nourmohammadi, A.A. Elyasi, M. and Mirnia, M.J., 2019. Flexibility improvement in two-point incremental forming by implementing multi-point die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *102*, pp.2933-2952. DOI:10.1007/s00170-019-03307-y.
18. Ham, M. and Jeswiet, J., 2007. Forming limit curves in single point incremental forming, *CIRP Annals*, *56*, pp.277-280. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.064.
19. Jadhav, S. 2004. Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine, Shaker.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۴۵-۵۶، (پژوهشی)

Original Article

طراحی روتور و مطالعه عملکرد یک سیستم جاذب انرژی باد هوایی در بستر شبیه‌ساز دینامیک پرواز

مهدی احمدی (کارشناس‌ارشد)
سعید کریمیان علی‌آبادی * (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

سیستم‌های جاذب انرژی باد هوایی، روش نوآورانه‌یی برای بهره‌برداری بهینه از انرژی باد هستند. یکی از انواع این سیستم‌ها، پرنده‌ی مقید با کابل دارای روتور است که به‌صورت عملیاتی نیز ساخته شده است. در تحقیقات گذشته، شبیه‌سازهای مختلف برای مطالعه دینامیک روتور از ضرایب نیرو و گشتاور ثابتی استفاده می‌کردند. در این پژوهش، یک شبیه‌ساز پرواز با دینامیک لاگرانژ و الگوریتم بهبود یافته ارائه شده است تا مدل ایرودینامیکی روتورها را بهبود ببخشد. این مدل پیشنهادی، امکان تخمین دقیق‌تر توان استخراجی و طراحی بهینه پره‌روتورها را فراهم می‌کند. در پایان، با استفاده از شبیه‌ساز و مدل ایرودینامیکی جدید، روتور با پره‌های بهینه برای سیستم طراحی شده است و متوسط انرژی استخراج شده در نقطه عملکردی در فاز استخراج انرژی برای یک سیستم پرنده با طول بال ۳ متر، ۴۲ درصد بهبود یافته و به ۲ کیلووات افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: پرنده جاذب انرژی باد، شبیه ساز پرواز لاگرانژی، پرنده مقید با کابل، مدلسازی ایرودینامیکی روتور.

mahdiahmadi@modares.ac.ir
karimian@modares.ac.ir

۱. مقدمه

سیستم‌های انرژی بادی هوایی[1] به روش‌های نوینی اشاره دارند که برای استخراج انرژی در ارتفاعات بالا از وسایلی مانند بالن،[۱-۳] کایت یا گلایدرها استفاده می‌کنند و این انرژی را از طریق کابل به یک ایستگاه ثابت در زمین منتقل می‌کنند. این سیستم‌ها عمدتاً از چهار جزء اصلی تشکیل شده‌اند که عبارتند از: کابل انتقال انرژی، سیستم کنترلی، ژنراتور و پرنده. بر اساس نوع این اجزا، آنها می‌توانند به چندین دسته تقسیم‌بندی شوند. با این حال، ایده کلی تولید انرژی در تمامی این موارد را می‌توان به دو روش زیر خلاصه کرد:[۴و۵]

الف) یک یا چند کایت با چرخه پروازی اتوماتیک[۶] از طریق کابل مکانیکی، انرژی مکانیکی را به ژنراتور روی زمین منتقل می‌کنند. چرخه عملکردی این روش، شامل دو بخش تولید انرژی و بازیابی حالت اولیه برای از سرگیری تولید انرژی می‌باشد؛[۷و۸]

ب) گلایدری که دارای چندین روتور نصب شده است. این پرنده‌ها دارای سیستم‌های پرواز و فرود خودکار هستند.[۹] ابتدا، با مصرف انرژی، پرنده به ارتفاع و حالت تعادل مطلوب می‌رسد. سپس پرنده وارد مسیر پروازی خاصی می‌شود که در آن بدون صرف انرژی و به‌صورت مداوم در هوا می‌ماند و روتورهای آن وارد فاز تولید انرژی می‌شوند. انرژی تولید شده توسط روتورها، از طریق کابل الکتریکی به ایستگاهی در زمین منتقل می‌شود.[۱۰]

سیستم‌های معرفی شده دارای نقاط قوتی هستند که عبارتند از: استفاده از مواد اولیه کمتر نسبت به توربین‌های بادی دارای برج‌های نگهدارنده، کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری و امکان ورود سریع‌تر به شبکه تولید برق. همچنین، این سیستم‌ها به دلیل وجود جریان‌های باد مطلوب و ثابت در ارتفاعات، از بازده بالاتری در تولید انرژی برخوردار هستند و قادر به تأمین پایدار انرژی می‌باشند. میزان استخراج انرژی از نمونه‌های مختلف این‌گونه از سیستم‌ها، امروزه بین ۱۰۰ کیلووات تا ۱۰ مگاوات[۱۱] است و سرعت پیشرفت فنّاوری آنها نسبت به سایر روش‌ها کندتر است.[۱۲] هرچند برخی از این ایده‌ها امروزه در مراحل طراحی مفهومی هستند، اما نمونه‌هایی با ژنراتور روی پرنده ساخته شده و در حال انجام تست‌های عملیاتی برای ارزیابی پایداری در طولانی مدت هستند. به‌عنوان مثال، شرکت ماکانی پاور[2] و جابی انرژی،[3] به ترتیب نمونه‌هایی با ظرفیت ۲ و ۵ مگاواتی از این سیستم‌ها را ساخته و آزمایش‌های مربوط به پایداری در طولانی مدت را انجام داده است. سازنده‌ها اعلام کرده‌اند که

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۸.

استناد به این مقاله:
احمدی، مهدی و کریمیان علی‌آبادی، سعید، ۱۴۰۲. طراحی روتور و مطالعه عملکرد یک سیستم جاذب انرژی باد هوایی در بستر شبیه‌ساز دینامیک پرواز، مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۴۵-۵۶. DOI:10.24200/J40.2022.60848.1651

طراحی روتور به‌ویژه در مراحل طراحی اولیه از چالش‌های آیرودینامیکی رخ می‌دهد و روش‌های تحلیلی موجود کافی نیستند.[۷و۱۳]

در سال ۱۹۷۸، لوید اولین ایده‌های مرتبط با سیستم‌های جاذب انرژی هوایی دارای ژنراتور روی پرنده را مطرح کرد. او اختراعی را ثبت کرد که شامل یک کایت با مسیر پروازی دایروی در عرض باد بود و همچنین معادلات تحلیلی برای تخمین میزان حداکثر استخراج انرژی از این روش را توسعه داد.[۱۴] اکنون، پژوهش‌های بسیاری در زمینه شبیه‌سازی و طراحی سیستم‌های دارای بادبادک مقید با کابل و نحوه کنترل آنها وجود دارد.[۱۵-۱۸] برای شبیه‌سازی یک سیستم کامل، لازم است که چهار قسمت اصلی که توصیف شده، به‌صورت جداگانه مدلسازی شوند. برای مدلسازی دینامیک کابل، که در سرعت شبیه‌سازی و دقت آن نقش مهمی دارد، مدل‌های نسبتاً دقیقی وجود دارد که از سیستم جرم نقطه‌یی و اتصال آن به فنر و دمپر بهره می‌برند.[۱۹] این مدل‌ها به خوبی اثرات انعطاف‌پذیری را در نظر می‌گیرند.[۲۰] اما این روش‌ها نیازمند انتگرال‌گیری‌های عددی پیچیده و زمان‌بر هستند. در مدل‌های دیگر، اثرات انعطاف‌پذیری طولی در نظر گرفته نمی‌شوند و کابل با میله‌های صلب به‌هم وصل می‌شود و از دینامیک اویلر ـ لاگرانژ برای مدل‌سازی استفاده می‌شود.[۲۱-۲۳] این نوع مدل‌سازی‌های به‌خصوص برای سیستم‌های دارای کایت مورد استفاده قرار می‌گیرد و روابط آنها موجود و قابل استفاده هستند.[۲۴و۲۵]

برای مدل‌سازی دینامیک پرنده، اغلب از مدل دینامیکی جرم نقطه استفاده شده است.[۲۶و۲۷] عدم استفاده از مدل دینامیکی پیچیده‌تر، باعث ساده‌تر شدن تحلیل می‌گردد، اما اطلاعات کافی برای محاسبه نیروهای آیرودینامیکی را در اختیار نمی‌گذارد.[۲۸] همچنین، روشی با در نظر گرفتن چندین جرم نقطه‌یی برای دینامیک پرنده سیستم نیز استفاده شده است،[۲۰] اما در نهایت، با استفاده از سیستم جسم صلب، می‌توان به دقت مطلوب و البته با هزینه محاسباتی بیشتر دست یافت.[۲۸] با اینکه می‌توان از روشی که اثرات تغییر شکل پرنده را با در نظر گرفتن چند قسمت صلب متصل به یکدیگر مدل‌سازی می‌کند، بهره گرفت،[۲۹و۳۰] اما استفاده از این روش برای شبیه‌سازی این پژوهش، باعث افزایش زمان اجرای کد می‌شود. در زمینه طراحی شبیه‌ساز برای کل سیستم، در مرجع[۱۶] به توسعه مدلی پرداخته شده است که برای انواع مختلف این نوع سیستم‌ها قابل اعمال بوده و در آن معادلات حاکم با استفاده از روش اویلر ـ لاگرانژ استخراج شده‌اند. برای مدل‌سازی آیرودینامیکی روتور، از روش‌های با ضرایب ثابت استفاده شده است. در پژوهش‌های مشابه نیز برای مدل‌سازی آیرودینامیکی روتورها، از ضرایب ثابت برای تخمین ضریب توان و نیروهای روتور استفاده شده است.[۱۶] همچنین، در پژوهش‌های مرتبط با هندسه روتورهای مورد استفاده در این نوع سیستم‌ها، اطلاعات دقیقی موجود نمی‌باشد.

در این مقاله، یک شبیه‌ساز پرواز با دینامیک لاگرانژ برای سیستم توربین بادی هوایی با روتور روی پرنده توسعه داده شده است. این شبیه‌ساز تمامی اجزاء سیستم را شامل کابل، پرنده، سیستم کنترلی و روتور مدل‌سازی می‌کند. علاوه بر این، یک الگوریتم برای مدل‌سازی آیرودینامیکی روتورها پیشنهاد شده و با استفاده از این الگوریتم، روتور بهینه برای سیستم طراحی شده است. این بهینه‌سازی روتور منجر به بهبود عملکرد تولید انرژی سیستم می‌شود.

۲. معرفی سیستم مبنا

با توجه به شکل ۱، عملکرد سیستم این پژوهش را می‌توان در ۴ مرحله تشریح کرد:

۱. سیستم روی ایستگاه زمینی مستقر و آماده پرواز است؛

شکل ۱. مراحل عملکرد توربین باد هوایی دارای روتور روی پرنده.

شکل ۲. مثلث سرعت‌ها در محل پرنده در فاز استخراج انرژی.[۵]

۲. پرنده تا ارتفاع مطلوب بالا می‌رود و در پایین دست وزش باد قرار می‌گیرد، در این مرحله روتورها مقدار کمی انرژی مصرف می‌کنند تا برای این کار تراست تولید کنند؛

۳. سپس با تراست حاصل از روتورها، پرنده وارد چرخه دایروی بهینه تولید انرژی می‌شود و به پرواز خودکار در عرض باد می‌پردازد. در این حالت، با توجه به شکل ۲، V_k سرعت پرنده، V_w سرعت باد و سرعت آیرودینامیکی که پرنده حس می‌کند V_a است. با توجه به شکل ۲، نیروی لیفت حاصل از این سرعت برای نگه داشتن پرنده در این مسیر دایروی کافی است. به عبارتی، مجموع نیروهای حاصل بر روی پرنده با نیروی کابل T_k برابر می‌شود و پرنده به‌صورت پایدار پرواز می‌کند؛

۴. در این مرحله، جریان باد به تنهایی پرنده را در مسیر دایروی می‌چرخاند و ژنراتورهای روی بال پرنده برق تولید می‌کنند، این برق از طریق کابل به ایستگاه روی زمین منتقل می‌شود.

با توجه به شرح نحوه عملکرد این سیستم، تاکنون تمرکز اصلی در بررسی مداومت پروازی به‌صورت کیفی بوده است. اما در پژوهش‌های،[۱۶،۲۵و۲۶] علاوه بر بررسی کیفی، مداومت پروازی به‌صورت کمی نیز مورد توجه قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره شد، در مقالات مرتبط با هندسه روتورهای استفاده شده در این نوع سیستم‌ها،

اطلاعات دقیقی موجود نمی‌باشد و مدل آیرودینامیکی روتور در آنها از ضرایب ثابت برای گشتاور و نیرو روتور استفاده می‌کنند. این روش دارای دو ضعف اصلی است:

۱. با توجه به نوع عملکرد پروازی پرنده، تغییرات سرعت آن و امکان تغییر دور، مقادیر سرعت نوک بال روتورها TSR ثابت نیست و از این‌رو مدل با ضرایب ثابت دقیق نمی‌باشد؛

۲. با توجه به این‌که روتورها در مراحل عملکردی ۱ تا ۳ باید به عنوان ملخ استفاده شوند، نیاز است که گام پره آنها به اندازه β تغییر کند. در این صورت، نمی‌توان مدل با ضرایب ثابت را در این مورد لحاظ کرد.

۱.۲. هندسه سیستم

برای به‌کارگیری روش اویلر ـ لاگرانژ، در ابتدا به‌ترتیب به‌تشریح فرضیات برای مدلسازی اجزا سیستم و محورهای مختصات آنها پرداخته می‌شود. با توجه به شکل ۳، مرجع مختصات اینرسی متصل به زمین (S_E) طوری انتخاب می‌شود که سرعت باد در خلاف جهت محور X_E آن باشد. کابل سیستم به‌صورت N_R میله صلب با اتصالات ایده‌آل در نظر گرفته شده است. برای مثال، در شکل ۳ کابل با $N_R = ۳$ می‌باشد. میله‌ها نازک، هم‌شکل، با جرم و طول یکسان l_R بوده و به همین دلیل موقعیت هر یک از آنها را با دو متغیر مستقل γ و φ در مختصات اینرسی پیدا می‌شود. همچنین، از اثرات انعطاف‌پذیری طولی در میله‌ها صرف‌نظر می‌شود.

برای مدل پرنده از دینامیک جسم صلب استفاده شده است. جرم پرنده M_K بوده و مرکز دستگاه مختصات پرنده (O_K) در مرکز جرم پرنده قرارگرفته و محورهای آن نیز طبق شیوه مرسوم در مراجع دینامیک پرواز انتخاب شده‌اند.[۳۱] همچنین زوایای سطوح آیرودینامیکی پرنده با $\delta_a, \delta_r, \delta_e$ نشان داده شده‌اند.

تعداد N_G روتور بر روی بال‌های پرنده و به‌صورت متقارن با زاویه‌های ثابت $v_۱, v_۲, v_۳$ مطابق با شکل ۳ نصب شده‌اند. فاصله بین مرکز جرم روتورها (O_G) نسبت به مرکز جرم پرنده (O_K) ثابت است و روتورها از طریق یک ضریب گشتاور کنترلی بی‌بعد (ε) و متغیر موقعیت زاویه‌یی پره‌ها یعنی λ مدل شده‌اند.

پرنده توسط دو کابل کوچک با طول برابر l_B به نام سکان، از پایین بال‌ها به انتهای کابل در نقطه Q مقید می‌باشد. این سکان‌ها به دلیل کشش بالا به‌صورت میله‌های صلب و بدون جرم فرض می‌شوند. موقعیت نسبی نقطه Q نسبت به مرکز

شکل ۳. هندسه پرنده حامل دو روتور و کابل سه قسمتی.

جرم پرنده (O_K) را می‌توان با دو زاویه در مختصات پرنده مشخص کرد. زاویه δ مطابق شکل ۳، زاویه بین خط QO_K و تصویرش در صفحه $X_K O_K Z_K$ است و η زاویه تصویر QO_K و محور X_K پرنده در صفحه $X_K O_K Z_K$ می‌باشد.

۳. معادلات حاکم و روش حل

۱.۳. معادلات دینامیکی

به‌منظور قابل استفاده بودن نتایج حاصل از شبیه‌ساز برای سیستم‌های با ابعاد گوناگون، پارامترها بی‌بعد شده‌اند. با در نظر گرفتن طول کل کابل L_{TO} و شتاب گرانش g، بی‌بعدسازی انجام شده است. برای مثال، بردار موقعیت پرنده (r_K)، سرعت پرنده (v_K) و سرعت دورانی پرنده (ω_K) به‌صورت زیر بی‌بعد شده‌اند:

$$\begin{aligned} R_K &= L_{T.}\, r_K \\ V_K &= \sqrt{g L_{T.}}\, v_K \\ \Omega_K &= \sqrt{g/L_{T.}}\, \omega_K \end{aligned} \tag{۱}$$

زمان بی‌بعد (τ)، نیروهای آیرودینامیکی (F_A) و گشتاورهای آیرودینامیکی (M_A) نیز به‌ترتیب به‌صورت زیر بی‌بعد شده‌اند:

$$\begin{aligned} \tau &= \sqrt{g/L_{T.}} \\ F_A &= M_K g f_A \\ M_A &= M_K g L_{T.}\, m_A \end{aligned} \tag{۲}$$

طول هر میله کابل $l_R(\tau)$ و جرم هر میله M_R به‌ترتیب به‌صورت زیر بی‌بعد شده‌اند:

$$\begin{aligned} & l_R(\tau) = L_R(t)/L_{T.} \\ & \frac{M_R}{M_K} = \sigma_T l_R(\tau), \sigma_T = \frac{\rho_T \pi D_T^۲ L_{T.}}{۴ M_K} \end{aligned} \tag{۳}$$

پس از بی بعدسازی پارامترهای مختلف، بردار متغیرهای مستقل که دینامیک سیستم را توصیف می‌کنند، به‌صورت زیر بوده و رابطه $N_S = ۳ + ۲N_R + N_G$ اندازه آن را مشخص می‌کند:

$$\begin{aligned} q_s(\tau) = [&\gamma_۱, \ldots \gamma_{N_R}, \varphi_۱, \ldots \varphi_{N_R}, \theta, \psi, \phi, \\ &\lambda_۱, \ldots \lambda_{N_G}]^T. \end{aligned} \tag{۴}$$

بردار متغیرهای کنترلی سیستم به‌صورت زیر تعریف شده است و اندزه آن از رابطه $N_C = ۱ + ۳ + ۲N_G + ۳$ به دست می‌آید:

$$q_c(\tau) = [l_R, l_B, \delta, \eta, \xi_۱, \ldots \xi_{N_G}, \delta_a, \delta_r, \delta_e]^T \tag{۵}$$

در ادامه، ابتدا موقعیت هریک از اجزا سیستم در مختصات اینرسی تعیین می‌شود. بردارهای مکان مرکز جرم هر میله بر اساس رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$r_{Ri} = -l_R \sum_{j=۱}^{i} e_j [c\gamma_j (c\varphi_j x_E + s\varphi_j y_E) + s\gamma_j z_E] \tag{۶}$$

که در آن $(e_j = ۱, i \neq j)$ و $(e_j ۱/۲, i = j)$ است. بردار مکان پرنده نیز از جمع بردار مکان انتهای آخرین میله با فاصله QO_K که از روی شکل ۳ و روابط هندسی قابل محاسبه است. همچنین، برای روتورها نیز با جمع بردار مکان پرنده با بردار موقعیت ژنراتورها می‌توان موقعیت مرکز جرم آنها را مشخص نمود. با مشتق‌گیری از

بردارهای مکان و با استفاده از ماتریس‌های دوران R^{EK}، R^{ER} و R^{KG}، می‌توان مقادیر سرعت‌های خطی و دورانی برای تک‌تک اجزا را در مختصات اینرسی به دست آورد. به عنوان مثال، سرعت خطی پرنده در مبدا مختصات اینرسی توسط دو ماتریس S_K با اندازه $۳ \times N_S$ و C_K با اندازه $۳ \times N_C$ و سرعت دورانی آن را با ماتریس W_K با ابعاد $۳ \times N_S$ به شکل زیر قابل بیان است:

$$\begin{pmatrix} p_K \\ q_K \\ r_K \end{pmatrix} = W_K \dot{q}_s$$
$$\begin{pmatrix} u_K \\ v_K \\ w_K \end{pmatrix} = S_K \dot{q}_s + C_K \dot{q}_c \qquad (۷)$$

که در آن $\dot{q}_c$ و $\dot{q}_s$ مشتق نسبت به τ هستند. در ادامه، مقادیر انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم به‌دست آمده و پس از جایگذاری در رابطه لاگرانژ، معادلات حاکم به‌صورت زیر در می‌آیند:

$$\begin{aligned} & M_{smj}\ddot{q}_{sj} + M_{scmj}\ddot{q}_{cj} + \frac{\partial M_{smj}}{\partial q_{sk}}\dot{q}_{sk}\dot{q}_{sj} + \\ & \frac{\partial M_{scmj}}{\partial q_{sk}}\dot{q}_{sk}\dot{q}_{cj} + \frac{\partial M_{smj}}{\partial q_{ck}}\dot{q}_{ck}\dot{q}_{sj} + \frac{\partial M_{scmj}}{\partial q_{ck}}\dot{q}_{ck}\dot{q}_{cj} \\ & -\frac{۱}{۲}\left(\begin{array}{l} \frac{\partial M_{sjk}}{\partial q_{sm}}\dot{q}_{sj}\dot{q}_{sk} + ۲\frac{\partial M_{scjk}}{\partial q_{sm}}\dot{q}_{sj}\dot{q}_{ck} \\ + \frac{\partial M_{cjk}}{\partial q_{sm}}\dot{q}_{cj}\dot{q}_{ck} \end{array}\right) \\ & + \frac{\partial u}{\partial q_{sm}} = Q_m \end{aligned} \qquad (۸)$$

که در آن Q نیروهای تعمیم یافته بوده و از نیروها و گشتاورها خارجی با رابطه ۹ به‌دست می‌آید، ماتریس‌های M_s, M_{SC}, M_c با کمک ماتریس‌های S, C, W اجزای سیستم قابل بازنویسی‌اند.

$$\begin{aligned} Q_m = & \sum_{i=۱}^{N_R} f_{AR}^i \cdot \frac{\partial v_{Ri}}{\partial \dot{q}_{sm}} + f_{AK} \cdot \frac{\partial v_K}{\partial \dot{q}_{sm}} + \\ & m_K \cdot \frac{\partial \omega_K}{\partial \dot{q}_{sm}} + \sum_{i=۱}^{N_G}\left[f_{AG}^i \cdot \frac{\partial v_{Gi}}{\partial \dot{q}_{sm}} + m_G^i \cdot \frac{\partial \omega_{Gi}}{\partial \dot{q}_{sm}}\right] \end{aligned} \qquad (۹)$$

پس از به دست آمدن معادلات دینامیکی سیستم مطابق با رابطه ۱۰، برای این سیستم متغیرهای حالت به شکل $x = [q_s \;\; \dot{q}_s]$ و متغیرهای کنترلی شامل $u = [q_c \;\; \dot{q}_c \;\; \ddot{q}_c]$ تعریف می‌شوند:

$$\frac{dx}{d\tau} = f[x, u(\tau)] \qquad (۱۰)$$

و در ادامه با کمک انتگرالگیری عددی در متلب برای مدت زمان مورد نظر حل می‌شوند. جدول ۱، مربوط به مشخصات هندسی گلایدر مسئله است. مشخصات آیرودینامیکی پرنده سیستم شبیه به گلایدر موجود در مرجع[۱۶] است. شرایط اولیه برای انتگرال‌گیری در ابتدای شبیه‌سازی برای هندسه ورودی محاسبه می‌شود، این نقطه تریم حالتی است که در آن روتورها با سرعت ثابت دوران می‌کنند و گشتاور عکس‌العمل آنها بر روی پرنده با تنظیم زوایای سطوح آیرودینامیکی خنثی می‌شود تا پرنده در حالت تعادل بماند. سپس به متغیرهای حالت این نقطه، تعادل نوسانات تصادفی اضافه می‌شود و شرایط اولیه به اضافه یک سیستم کنترل مداربسته مناسب برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. برای کنترل پرنده از تغییر زوایای سطوح آیرودینامیکی پرنده $\delta_a, \delta_r, \delta_e$ استفاده شده است و پارامترهای کنترلی مربوط به سکان‌های η و δ و l_B در طول مدلسازی ثابت‌اند. از مدلسازی قسمت‌های الکتریکی روتورها صرف‌نظر شده و گشتاور کنترلی روتورها (ε) منفی خواهد بود. بدین مفهوم که روتورها

جدول ۱. مشخصات سیستم جاذب انرژی مورد مطالعه.

جرم پرنده	$۲kg$
طول بال پرنده	$۳m$
مساحت بال پرنده	$۰/۷۵m^۲$
تعداد روتور	۲
جرم هر روتور	$۰/۳kg$
شعاع روتورها	$۰/۲m$
طول کابل اصلی	$۳۰m$
طول سکان‌ها	$۳m$
ظرفیت تولید انرژی	$۲kw$

شکل ۴. مقطع پره روتور و نحوه تغییر زاویه گام پره.

در فاز تولید انرژی هستند. همچنین، این گشتاور به‌گونه‌یی طراحی شده است که سرعت زاویه‌یی روتورها را طول شبیه‌سازی ثابت نگاه می‌دارد. همچنین، از گشتاور آیرودینامیکی روی کابل‌ها صرف‌نظر شده و فقط نیروهای درگ روی آنها مدل‌سازی شده است.

۲.۳. معادلات آیرودینامیکی

در این سیستم‌ها، روتورها دارای پیچیدگی‌هایی هستند. با توجه به اینکه برای راه‌اندازی نیاز است که پرنده به ارتفاع مطلوب منتقل شود، در ابتدا روتورها در حالت موتوری و مصرف انرژی قرار دارند. شکل ۴، مقطع پره روتور را نشان می‌دهد. جهت دوران روتور سرعت خطی حاصل از دوران برابر با $r\omega$ بوده و سرعت حرکت پرنده برابر با U می‌باشد. بنابراین، سرعت نسبی باد که ایرفویل در مقطع پره احساس می‌کند برابر با سرعت آیرودینامیکی V_a است. همانند شکل ۴ (حالت ملخی)، زوایای گام پره β در عملکرد ملخی به گونه‌یی تنظیم می‌شود که به تولید تراست منجر شود. سپس در ارتفاع مناسب با تغییر زاویه گام و کاهش آن همانند شکل ۴ (حالت روتوری)، زاویه گام پره تا مقدار $\beta_۰$ ($\beta_۰ < \beta$) کاهش یافته و عملکرد به فاز تولید انرژی تغییر می‌کند.

در خصوص روتورهای به‌کار رفته در این نوع سیستم‌ها، در پژوهش‌ها از C_f, C_m ثابت برای ضرایب گشتاور و نیرو استفاده شده است.[۱۶] علامت منفی این دو ضریب بیانگر حالت موتوری بوده و علامت مثبت آنها نشان دهنده حالت ژنراتوری سیستم است. اما از آن‌جایی که این دو ضریب به مقدار سرعت نوک پره $TSR = l_{Gj}\dot{\lambda}_{Gj}/V_{Gj}^A$ وابسته هستند و کنترل آنها به زاویه گام β وابسته است، برای در نظر گرفتن این دو اثر در ابتدا با ارایه الگوریتمی مناسب که ساختار

شکل ۵. ساختار مدل آیرودینامیکی استفاده شده در این مقاله.

جدول ۲. ضرایب آیرودینامیکی روتور طراحی شده با ایرفویل ناکا ۰۰۱۲- در زاویه گام صفر.

TSR	C_f	C_m
۳	۰٫۴۹	۰٫۰۹
۴	۰٫۷۸	۰٫۱۳
۵	۰٫۷۸	۰٫۱۱
۶	۰٫۷۶	۰٫۰۸
۷	۰٫۷۳	۰٫۰۶

آن در شکل ۵ آورده شده، مدل آیرودینامیکی جدید پیشنهاد شده است. این مدل به‌صورت مستقیم به کنترلر سیستم اصلی متصل است. در هر گام زمانی کنترلر، پارامتر گشتاور کنترلی، زاویه گام و شبیه‌ساز لاگرانژی نیز سرعت دورانی و سرعت آیرودینامیکی را به الگوریتم آیرودینامیک روتور ارسال می‌کند. این الگوریتم در ابتدا مقادیر TSR, β را محاسبه و سپس با تشخیص عملکرد موتوری یا ژنراتوری به جداول پایگاه داده مربوطه مراجعه می‌کند و مقادیر مناسب ضرایب آیرودینامیکی را پس از میان‌یابی به شبیه‌ساز لاگرانژی ارسال می‌کند. پایگاه داده از پیش محاسبه شده شامل ضرایب C_f, C_m در بازه‌هایی از TSRها و زاویه گام‌های β مختلف است که برای هندسه روتور نصب شده روی سیستم توسط روش BEM محاسبه شده و همانند جدول ۲، از پیش به مدل وارد شده‌اند. در ادامه، این روش دقت مدل آیرودینامیکی و شبیه‌ساز را بالا برده، تأثیر دو پارامتر TSR، β را لحاظ می‌کند و همزمان در سرعت شبیه‌سازی نیز تأثیر زیادی ندارد.

۳.۳. طراحی روتور

با توجه به اینکه در مطالعات پیشین، هندسه روتور این سیستم‌ها به‌صورت دقیق ارایه نشده است، برای تعیین عملکرد الگوریتم آیرودینامیکی جدید، اقدام به طراحی پره برای روتورها می‌گردد. برای طراحی روتور مراحل زیر انجام شده است:

۱. ابتدا سه ایرفویل برای مقاطع پره انتخاب شده‌اند. ایرفویل $\text{clark} - \text{Y}$ به دلیل ضریب لیفت بالا، ایرفویل $\text{NACA} - ۰۰۱۲$ به دلیل تقارن و اینکه پیش‌بینی می‌شد برای عملکرد دوگانه روتور ـ ملخ مناسب باشد و ایرفویل E۱۹۳ که در توربین‌های کوچک بادی با دوربالا استفاده شده است.[۳۲]

۲. با توجه به مسیر پروازی پرنده، مقدار $TSR = ۶$ برای شرایط اسمی در طراحی روتور انتخاب شده است.

۳. بر مبنای روش طراحی BEM در مرجع،[۳۳] محاسبه توزیع وتر و پیچش پره‌ها برای هر ایرفویل انجام شده است.

۴. هندسه به دست آمده در نرم افزار کیو ـ بلید[۴] برای یک روتور دارای ۵ پره مدل شده و ضرایب آیرودینامیکی حاصل به‌عنوان پایگاه داده آیرودینامیک روتور شبیه‌ساز استفاده شده‌اند.

۴. نتایج و ارزیابی

۱.۴. اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی شبیه‌ساز، ابتدا گرادیان‌های تانسورهای $M_s, M_c, M_s c$ به‌صورت تحلیلی محاسبه شده‌اند. در ادامه، در متلب[۵] این مشتقات اعتبارسنجی شده‌اند. در قدم بعدی، در صورتی که مقادیر $N_R = ۱, \sigma \to ۰$ باشند، یعنی شبیه‌سازی کابل واحد بدون جرم با یک میله صلب، نتایج حاصل از این شبیه‌ساز با نتایج تحلیلی مرجع[۲۵] مطابق‌اند. در ادامه، با استفاده از اطلاعات سیستم موجود در مرجع[۱۶] و بررسی حالت‌های خاص، اعتبارسنجی برای شبیه‌ساز انجام شده است. برای نمونه، سناریو پرواز در نقطه تعادل سیستم توسط شبیه ساز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج متغیرهای حالت برای زوایای اویلر پرنده در شکل ۶، برای موقعیت مرکز جرم پرنده در شکل ۷ و برای کنترلرهای سطوح آیرودینامیکی در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. در ابتدا، بزرگترین خطاها از مرتبه ۰٫۰۰۱ هستند، اما پس از گذشت مدت زمان کوتاهی اختلاف بین داده‌های شبیه‌ساز این پژوهش و داده‌های مرجع به صفر میل می‌کند. علاوه بر این، با استفاده از ابزارهای گرافیکی، موقعیت پرنده و کابل در مانورهای مختلف بررسی شده‌اند و نتایج معقولی برای مسیر پروازی به دست آمده است. علت اختلاف در زمان‌های اولیه برای این دو شبیه‌ساز را می‌توان در سناریو نقطه تعادل یافت. در این سناریو، پرنده سیستم در یک نقطه ثابت است، روتورها با

شکل ۶. نمونه از اعتبارسنجی متغیرهای حالت زوایای اویلر پرنده.

شکل ۷. نمونه از اعتبارسنجی موقعیت مرکز جرم پرنده.

سرعت ثابت دوران می‌کنند و گشتاور عکس‌العمل آنها روی پرنده توسط ایلرون‌ها خنثی می‌شود. برای ادامه مطالعه در زمان صفر، یک نوسان تصادفی به سیستم داده می‌شود تا عملکرد کنترلر اعتبار سنجی شود. مشاهده می‌شود که در هر دو مدلسازی پس از گذشت زمان، این نوسانات تصادفی دمپ شده و سیستم نقطه تعادلش را حفظ می‌کند.

۲.۴. ارزیابی عملکرد روتور

مطابق الگوریتم طراحی ارایه شده در بخش ۳.۳، هندسه حاصل از این فرایند در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده و عملکرد آیرودینامیکی پرنده سیستم، روتورها در نقطه عملکردی $TSR = 6$ که مربوط به فاز استخراج انرژی است، طراحی شده‌اند. همچنین، با توجه به این‌که اولین اولویت در طراحی مربوط به فاز ژنراتوری است و فاز موتوری در اولویت دوم قرار دارد، از این رو، زاویه گام پیچش اولیه پره‌ها طوری فرض شده است که به عملکرد بهینه روتور کمک کند.

نمودارهای ضریب درگ روتورهای طراحی شده در شکل ۱۰، برای سه ایرفویل رسم شده است. با توجه به شبیه‌سازی پرواز، هرچه مقدار درگ روتورها بیشتر باشد، میزان نیروی کابل و همچنین مقدار لیفت مورد نیاز برای خنثی کردن این نیرو افزایش

شکل ۸. نمونه از اعتبارسنجی زاویه سطوح کنترلی پرنده.

شکل ۹. توزیع وتر و زاویه پیچش پره‌ها.

شکل ۱۰. ضریب درگ روی روتورها نسبت به سرعت نوک پره.

شکل ۱۱. رابطه درگ با زاویه حمله پرنده در سرعت باد مختلف.

می‌یابد. این افزایش لیفت توسط افزایش زاویه حمله پرنده تامین می‌شود و تا قبل از رسیدن بال‌های پرنده به استال، می‌تواند افزایش یابد. در صورتی‌که درگ حاصل از روتورها با حداکثر زاویه حمله مجاز جبران نشود، نیاز خواهد بود که سیستم در محیط‌هایی با سرعت باد بالاتری پرواز کند. این موضوع در شکل ۱۱، نشان داده شده است. در این شکل، یک ضریب ثابت آیرودینامیکی برای روتورهای با شعاع

مختلف در نظر گرفته شده است. هرچه شعاع روتور بیشتر باشد، درگ روی پرنده بیشتر می‌شود. در سرعت باد پایین، در صورتی که درگ بیش از اندازه باشد، پرنده به استال می‌رسد و نمی‌تواند روی مسیر دایروی بماند. در همین راستا، روتوری که ضریب درگ حداقل را دارد، از این نظر عملکرد بهتری خواهد داشت. با توجه به شکل ۱۱، ایرفویل E۱۹۳ انتخاب مناسبی است.

شکل ۱۲، نمودارهای ضریب توان روتورها را با ایرفویل‌های گوناگون نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در هر سه حالت، مقدار ضریب توان در $TSR = ۶$ و اطراف آن دارای مقادیر تقریبا برابری هستند. با توجه به اینکه الگوریتم طراحی برای این TSR به کار رفته است. این موضوع صحت الگوریتم طراحی هندسه را نشان می‌دهد.

۳.۴. بررسی ملخ

با توجه به شکل ۴، تنها با افزایش زاویه‌گام، ایرفویل در زاویه حمله منفی قرار می‌گیرد. بنابراین جهت نیروی لیفت تولیدی توسط ایرفویل عوض می‌شود و مولفه‌یی از آن در خلاف جهت باد قرار می‌گیرد و نیروی تراست تولید می‌شود.[۳۴] بنابراین، پره‌ها باید دارای قابلیت گام متغیر به لحاظ عملی باشند. برای بررسی نحوه عملکرد پره‌های طراحی شده در حالت ملخ، ابتدا گام پره روتورهای موجود در بخش ۲.۴ تغییر کرده است. هندسه جدید حاصل در نرم افزار جاواپراپ[۶] وارد شده و ضرایب تراست برای ملخ‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. در صورتی که قرار باشد به منظور کنترل پرنده در همان فاز تولید انرژی یعنی $TSR = ۶$ از روتورها تراست حاصل شود، با

شکل ۱۲. نمودار ضریب توان روتورها طراحی شده با ایرفویل‌های گوناگون.

شکل ۱۳. ضریب تراست ملخ‌های طراحی شده با مقاطع مختلف ایرفویل.

مراجعه به شکل ۱۳ و در نقطه $۱/TSR = ۱/۶ = ۰/۱۶$ مشاهده می‌شود که پره دارای ایرفویل E۱۹۳ را نمی‌توان به‌عنوان ملخ به کار برد.

شکل ۱۴، درصد بازده ملخ‌های حاصل از هندسه طراحی شده در بخش ۳.۳ را نشان می‌دهد. با توجه به این که زاویه پیچش اولیه برای حالت روتوری بهینه اعمال شده است، نمی‌توان ملخ با عملکرد بالا برای سیستم داشت. این موضوع با بررسی شکل ۱۴ قابل اثبات است. همچنین، با توجه به این شکل، پره با ایرفویل NACA۰۰۱۲ در نقطه $TSR = ۶$ دارای بیشترین بازده ملخی است.

۴.۴. بررسی عملکرد استخراج انرژی

با توجه به این‌که این نوع سیستم‌ها در فاز تولید انرژی بر روی یک مسیر دایروی پرواز می‌کنند، سرعت نسبی که روتور احساس می‌کند، بسیار به مسیر پرواز وابسته است. همچنین، دور روتورها در این نوع سیستم‌ها بالا است. با توجه به محدودیت جدایش جریان بر روی پره‌ها و عدد ماخ بر روی نوک پره‌ها، دور روتور ۶۰۰۰ rpm و سرعت $۳۰ m/s$ برای این سیستم می‌توان متصور شد. این اعداد با سیستم موجود در پژوهش[۱۶] هم‌خوانی دارد. با توجه به نمودارهای عملکردی به دست آمده از شبیه‌ساز برای ایرفویل‌های مختلف که در شکل ۱۵ تا ۱۷ ارائه شده‌اند. در مسیر پروازی کنونی و ابعاد این روتورها، دور ۲۰۰۰ rpm در هیچ یک از ایرفویل‌ها انرژی تولید نمی‌کند و دور بالا ۸۰۰۰ rpm باعث رسیدن به ماخ بحرانی در نوک پره‌ها می‌شود و نتایج این منحنی حد بالا توان استخراج شده را نشان می‌دهد. در خصوص تغییرات روند این منحنی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. افزایش انرژی استحصال شده را با توجه به رابطه توان با مجذور سرعت پرواز می‌توان توجیه نمود؛

۲. پدیده «جدایش جریان از پره»، علت عدم رشد توان از حدود سرعت $۴۰ m/s$ می‌باشد؛

۳. در فرایند جدایش، مقدار نیروی کل آیرودینامیکی کاسته شده و جهت بردار نیرو تغییر می‌کند؛

۴. دلیل ثابت ماندن تقریبی پسای روتور، جدایش موضعی جریان در برخی مقاطع پره و تغییرات امتداد نیرو می‌باشد.

در صورت تخمین انرژی با مدل ضرایب ثابت برای آیرودینامیک روتورها و مقدار $C_M = ۰/۳$، طبق مرجع،[۱۶] در نقطه عملکردی فاز تولید انرژی که در این نقطه

شکل ۱۴. بازده ملخ‌های طراحی شده برای مقاطع مختلف.

شکل ۱۵. نیروی درگ وارد بر پرنده و توان استخراج شده برای یک روتور در سیستم دارای پره با ایرفویل $\mathbf{Clark-Y}$.

شکل ۱۶. نیروی درگ وارد بر پرنده و توان استخراج شده برای یک روتور در سیستم دارای پره با ایرفویل **E۱۹۳**.

شکل ۱۷. نیروی درگ وارد بر پرنده و توان استخراج شده برای یک روتور در سیستم دارای پره با ایرفویل **NACA۰۰۱۲**.

سرعت پرواز پرنده $۳۰\,m/s$ و سرعت دورانی روتورها $۶۰۰۰\,rpm$ باشد، برای سیستم با ۲ روتور می‌توان نوشت:

$$N_G \frac{۱}{۲} C_M \rho U^۲ \pi R_G^۳ \lambda_G = ۱/۴ kw \qquad (۱۱)$$

اما در خصوص تولید انرژی با روتورهای بهینه طراحی شده، این مقدار بیش از ۲ کیلووات است و با مقایسه ایرفویل‌های به کار رفته در پره‌ها داریم:

الف) با توجه به شکل ۱۵ که عملکرد یک روتور با ایرفویل $\mathrm{Clark-Y}$ را نشان می‌دهد، در پرنده دارای دو روتور می‌توان توان $۳kw$ استخراج کرد که بیشترین توان نسبت به دو ایرفویل دیگر حاصل می‌شود. همچنین درگ حاصل از روتورها که توسط کابل و نیروی لیفت باید جبران شود $۱۲۰N$ است و باید ملاحظات لازم در خصوص خنثی نمودن درگ حاصل از روتورها بر روی پرنده انجام شوند. در این نقطه عملکرد ملخ حاصل از این ایرفویل بازده ۷۰ درصدی دارد؛

ب) با توجه به شکل ۱۶ که عملکرد یک روتور با ایرفویل E۱۹۳ را نشان می‌دهد، با این پره و سیستم دو روتور، توان حاصل برابر با $۲kw$ خواهد بود. همچنین، درگ موثر از این روتورها بر روی پرنده برابر با $۹۰N$ است که کمترین مقدار در بین دو ایرفویل دیگر می‌باشد. اما همانطورکه در بخش ۳.۴ گفته شد، ایرفویل E۱۹۳ در فاز ملخی بازده نامناسب ۶۰ درصد دارد و درصورت استفاده از آن، کنترل پرنده دچار چالش خواهد شد؛

ج) با توجه به شکل ۱۷ که عملکرد یک روتور با ایرفویل NACA۰۰۱۲ را نشان می‌دهد، سیستم با این ایرفویل دارای توان خروجی $۲/۲kw$ است. میزان درگ حاصل از روتورها بر روی پرنده نیز مقدار $۱۰۵N$ است و ملخ این ایرفویل در این نقطه عملکردی، بازده ۸۰ درصد دارد که بیشترین مقدار در بین دو ایرفویل دیگر است.

جدول ۳. مقایسه توان استخراج شده با روتورهای مختلف.

نوع روتور	توان خروجی یک روتور	بازده در حالت ملخی	بهبود نسبت به مدل ضرایب ثابت
E۱۹۳	$۱kw$	٪۶۰	٪۴۰
NACA۰۰۱۲	$۱/۱kw$	٪۸۰	٪۵۲
Clark Y	$۱/۵kw$	٪۷۰	٪۸۰

در ادامه، در جدول ۳، مقایسه بین روتورهای مختلف و روش ضرایب ثابت نشان داده شده است. این اعداد برای نقطه عملکردی $۶۰۰۰RPM$ و ۳۰ m/s ارائه شده‌اند.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، یک شبیه‌ساز پرواز برای سیستم جاذب انرژی هوایی مقید با کابل با استفاده از دینامیک لاگرانژی توسعه یافته است. این شبیه‌ساز به خوبی دینامیک پرنده، کابل و سیستم را مدل‌سازی می‌کند. در مطالعات گذشته، معمولاً از مدل‌های ساده آیرودینامیکی برای روتورها استفاده می‌شد و امکان طراحی پره و مقایسه عملکرد وجود نداشت. بنابراین، بر اساس این شبیه‌ساز، یک مدل آیرودینامیکی مناسب برای روتورها پیشنهاد شده است که دقت شبیه‌ساز نسبت به مدل‌هایی با ضرایب ثابت آیرودینامیکی بیشتر می‌شود. همچنین، با اضافه شدن این مدل جدید، امکان طراحی آیرودینامیکی پره روتور فراهم شده و عملکرد سیستم با سه ایرفویل مختلف برای پره روتورها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در خصوص نحوه به‌کارگیری آنها در طراحی اولیه سیستم‌ها و همچنین عملکرد دوگانه روتوری ـ ملخی ارائه شده است. در مطالعات آینده، می‌توان از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه ضرایب گشتاور و نیرو روتورها استفاده کرد و از نتایج آنها در پایگاه داده الگوریتم آیرودینامیکی روتور پیشنهادی این مقاله استفاده کرد. سپس، نتایج عملکردی سیستم را با نتایج BEM مقایسه نمود.

فهرست علائم

l_R: طول بی‌بعد میله صلب؛

l_B: طول بی‌بعد سکان؛

δ: زاویه طولی سکان rad؛

η: زاویه عرضی سکان rad؛

γ: زاویه خیز میله صلب rad؛

φ: زاویه عرضی میله صلب rad؛

λ: زاویه پره روتور rad؛

v: زاویه نصب روتور rad؛

Ω: سرعت زاویه‌یی rad/s؛

τ: زمان بی بعد شده؛

ε: ضریب گشتاور کنترلی روتور؛

E: زمین؛

G: ژنراتور ـ روتور؛

K: پرنده؛

R: میله صلب؛

T: کابل؛

W: باد؛

AWE: Airborne Wind Energy؛

TSR: Tip Speed Ratio؛

BEM: Blade Element Method.

پانوشت‌ها

1. Airborne Wind Energy (AWE)
2. Makani Power
3. Joby Energy
4. Q-Blade
5. Matlab
6. Java-Prop

منابع (References)

1. Saeed, M. and Kim, M.H., 2017. Aerodynamic performance analysis of an airborne wind turbine system with NREL phase IV rotor. *Energy Convers Manage (Elsevier BV)*, *134*, pp.278-289. DOI:10.1016/j.enconman.2016.12.021.
2. Saeed, M. and Kim, M.H., 2016. Airborne wind turbine shell behavior prediction under various wind conditions using strongly coupled fluid structure interaction formulation. *Energy Conversion and Management (Elsevier BV)*, *120*, pp.217-228. DOI:10.1016/j.enconman.2016.04.077.
3. Saleem, A. and Kim, M.H., 2018. Aerodynamic analysis of an airborne wind turbine with three different aerofoil-based buoyant shells using steady RANS simulations. *Energy Conversion and Management (Elsevier BV)*, *177*, pp.233-248. DOI:10.1016/j.enconman.2018.09.067.
4. Wankhade, S.P., Darokar, S.G., Dabhade, R.R., Lasankute, S.V. and Parihar, P.V.R., 2018. A Review and an Approach of Flying Electric Generators as Alternate Source of Energy, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (AI Publications)*, *5*(10), pp.173-178. DOI:10.22161/ijaers.5.10.23.
5. Cherubini, A., Papini, A.,Vertechy, R. and Fontana, M., 2015. Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier BV)*, *51*, pp.1461-1476. DOI:10.1016/j.rser.2015.07.053.

6. Dief, T.N., Fechner, U., Schmehl, R., Yoshida, S. and Rushdi, M.A., 2020. Adaptive flight path control of airborne wind energy systems. *Energies (MDPI AG)*, *13*(3), pp.1-29. DOI:10.3390/en13030667.

7. Erhard, M. and Strauch, H., 2015. Flight control of tethered kites in autonomous pumping cycles for airborne wind energy, *Control Engineering Practice (Elsevier)*, *40*, pp.13-26. DOI:10.1016/j.conengprac.2015.03.001.

8. Bauer, F., Kennel, R.M., Hackl, C.M., Campagnolo, F., Patt, M. and Schmehl, R., 2018. Drag power kite with very high lift coefficient. *Renewable Energy (Elsevier BV) 118 (November 2017)*, pp.290-305. DOI:10.1016/j.renene.2017.10.073.

9. Fagiano, L., Nguyen-Van, E., Rager, F., Schnez, S. and Ohler, C., 2017. Automatic take-Off of a tethered aircraft for airborne wind energy: control design and experimental results. *IFAC-PapersOnLine (Elsevier BV)*, *50*(1), pp.11932-11937. DOI:10.1016/j.ifacol.2017.08.1456.

10. Schmehl, R., 2018. *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research*, Springer.

11. Kheiri, M., Nasrabad, V.S. and Bourgault, F., 2019. A new perspective on the aerodynamic performance and power limit of crosswind kite systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (Elsevier BV)*, *190*, (April) pp.190-199. DOI:10.1016/j.jweia.2019.04.010

12. Watson, S., Moro, A., Reis, V., Baniotopoulos, C., Barth, S., Bartoli, G., Bauer, F., Boelman, E., Bosse, D., Cherubini, A., Croce, A., Fagiano, L., Fontana, M., Gambier, A., Gkoumas, K., Golightly, C., Latour, M.I., Jamieson, P., Kaldellis, J., Macdonald, A., Murphy, J., Muskulus, M., Petrini, F., Pigolotti, L., Rasmussen, F., Schild, P., Schmehl, R., Stavridou, N., Tande, J., Taylor, N., Telsnig, T. and Wiser, R., 2019. Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier BV), *113*, 109270. DOI:10.1016/j.rser.2019.109270.

13. Fagiano, L., Milanese, M. and Piga, D., 2010. High-altitude wind power generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE))*, *25*(1), pp.168-180. DOI:10.1109/TEC.2009.2032582.

14. Loyd, M.L., 1980. Crosswind Kite Power. *Journal of energy (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *4*(3), pp.106-111. DOI:10.2514/3.48021.

15. Terink, E.J., Breukels, J., Schmehl, R. and Ockels, W.J., 2011. Flight Dynamics and Stability of a Tethered Inflatable Kiteplane. *Journal of Aircraft (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *48*(2), pp.503-513. DOI:10.2514/1.C031108.

16. Sánchez- Arriaga, G., Pastor-Rodriguez, A., Sanjurjo-Rivo, M. and Schmehl, R., 2019. A lagrangian flight simulator for airborne wind energy systems. *Applied Mathematical Modelling (Elsevier BV)*, *69*, pp.665-684. DOI:10.1016/j.apm.2018.12.016.

17. Fechner, U., 2016. A Methodology for the Design of Kite-Power Control Systems. Ph.D. dissertation, p.289. https://doi.org/10.4233/uuid:85efaf4c-9dce-4111-bc91-7171b9da4b77.

18. Losantos, L.S. and Sánchez -Arriaga, G., 2015. Flight dynamics and stability of kites in steady and unsteady wind conditions. *Journal of Aircraft (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *52*(2), pp.660-666. DOI:10.2514/1.C032825.

19. Williams, P., 2012. A Review of Space Tether Technology. Recent Patents on Space Technology (Bentham Science Publishers Ltd), *2*(1), pp.22-36. DOI:10.2174/1877611611202010022.

20. Fechner, U., van der Vlugt, R., Schreuder, E. and Schmehl, R. 2015. Dynamic model of a pumping kite power system. *Renewable Energy (Elsevier BV)*, *83*, pp.705-716. DOI:10.1016/j.renene.2015.04.028.

21. Peláez, J., Ruiz, M., López -Rebollal, O., Lorenzini, E.C. and Cosmo, M.L., 2000. A two bar model for the dynamics and stability of electrodynamic tethers. *Advances in the Astronautical Sciences (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *105 II*(6), pp.1327-1342. DOI:10.2514/2.4992.

22. Zanon, M., Gros, S., Andersson, J. and Diehl, M., 2013. Airborne wind energy based on dual airfoils. *IEEE Transactions on Control Systems Technology (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE))*, *21*(4), pp.1215-1222. DOI:10.1109/TCST.2013.2257781.

23. Williams, P., Lansdorp, B. and Ockels, W., 2008. Nonlinear control and estimation of a tethered kite in changing wind conditions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *31*(3), pp.793-798. DOI:10.2514/1.31604.

24. Sánchez- Arriaga, G., Garcia- -Villalba, M. and Schmehl, R., 2017. Modeling and dynamics of a two-line kite. *Applied Mathematical Modelling (Elsevier BV)*, *47*, pp.473-486. DOI:10.1016/j.apm.2017.03.030.

25. Alonso-Pardo, J. and Sánchez-Arriaga, G., 2015. Kite model with bridle control for wind-power generation, *Journal of Aircraft (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *52*(3), pp.917-923. DOI:10.2514/1.C033283.

26. Fagiano, L., Zgraggen, A.U., Morari, M. and Khammash, M. 2014. Automatic crosswind flight of tethered wings for airborne wind energy: Modeling, control design, and experimental results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE))*, *22*(4), pp. 1433-1447. DOI:10.1109/TCST.2013.2279592.

27. fer, A., Houska, B. and Diehl, M. 2007. Nonlinear MPC of Ilzh kites under varying wind conditions for a new class of large-scale wind power generators. *International Journal of Robust and Nonlinear Control (Wiley)*, *17*(17), pp.1590-1599. DOI:10.1002/rnc.1210.

28. Pastor-Rodriguez, A., Sanchez-Arriaga, G. and Sanjurjo-Rivo, M., 2017. Modeling and stability analysis of tethered kites at high altitudes. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *40*(8), pp.1892-1901. DOI:10.2514/1.G002550.

29. Argatov, I., Rautakorpi, P. and Silvennoinen, R., 2011. Apparent wind load effects on the tether of a kite

power generator. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (Elsevier)*, *99*(10), pp.1079-1088. DOI:10.1016/j.jweia.2011.07.010.

30. Groot, S.G.C.D., Breukels, J., Schmehl, R. and Ockels, W.J., 2011. Modeling kite flight dynamics using a multibody reduction approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))*, *34*(6), pp.1671-1682. DOI:10.2514/1.52686..

31. Cook, M.V., 2013. *Flight Dynamics Principles*. Elsevier. *145*, DOI:10.1016/C2010-0-65889-5.

32. Song, Q. and Lubitz, W.D., 2013. BEM simulation and performance analysis of a small wind turbine rotor. *Wind Engineering (SAGE Publications)*, *37*(4), pp.381-399. DOI:10.1260/0309-524X.37.4.381.

33. Hansen, M., 2008. *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd Edition. Earthscan Publications Ltd, pp.2-3.

34. Calzada, J.M., Treuren, K.W.V., Bontempo, R., Cardone, M., Manna, M. and Vorraro, G., 2019. Designing Small Propellers for Optimum Efficiency. *Energy Procedia (American Institute of Aeronautics and Astronautics)*, *45*(27), DOI:10.2514/6.2015-2267.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۵۷-۶۳، (پژوهشی)

Original Article

موقعیت‌یابی و کنترل کپسول آندوسکوپی با فرض معادلات استوکس

پوریا صادقی بروجنی (دکتری)
حسین نجات پیش‌کناری * (دانشیار)
حامد مرادی (دانشیار)
غلامرضا وثوقی (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

امروزه، استفاده از ربات‌های مغناطیسی کوچک برای درمان امراض مختلف بسیار رایج است. آندوسکوپی کپسولی یک روش غیر تهاجمی برای بازرسی سیستم گوارش است. تعیین موقعیت و جهت‌گیری کپسول و همچنین کنترل حرکت آن به پزشک معالج می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد و نقش مهمی در تشخیص بیماری‌ها ایفا کند. این پژوهش، یک روش برای تخمین موقعیت و جهت‌گیری یک کپسول مغناطیسی و همچنین کنترل آن در محیط سیال ارائه می‌دهد. در رویکرد پیشنهادی، فرض می‌شود که کپسول قرار گرفته در معده از یک حرکت با سرعت پایین برخوردار است. بنابراین، معادلات حرکت به‌صورت استوکس در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه، معادلات حرکت یک کپسول، استخراج و مکان کپسول با استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی و با کمک اندازه‌گیری حسگرهای مغناطیسی خارجی، تعیین می‌شود. همچنین، روشی برای کنترل و موقعیت‌یابی همزمان این کپسول ارائه شده است. عملکرد روش‌های پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: موقعیت‌یابی، میدان مغناطیسی، فیلتر کالمن، آندوسکوپی کپسولی، کنترل.

sadeghi_pouria@mech.sharif.edu
nejat@sharif.edu
hamedmoradi@sharif.edu
vossough@sharif.edu

۱. مقدمه

کپسول آندوسکوپی بی‌سیم، یک نوآوری قابل توجه در قرن حاضر است که به‌منظور تشخیص اختلالات دستگاه گوارش با حداقل درد برای بیماران توسعه یافته است. این فنّاوری باعث تسهیل فرایند بازرسی سیستم گوارشی می‌شود و از خطرات مرتبط با آندوسکوپی معمولی جلوگیری می‌کند.[۱] تعیین دقیق موقعیت و قرارگیری این کپسول می‌تواند به پزشکان کمک کند تا محل ضایعات در دستگاه گوارش را به طور دقیق تشخیص دهند. علاوه بر این، پس از تعیین موقعیت دقیق، این کپسول می‌تواند به‌عنوان ورودی برای سیستم‌های کنترلی مورد استفاده قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای موقعیت‌یابی این کپسول‌ها معرفی شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به روش‌های مغناطیسی، الکترومغناطیسی، موقعیت‌یابی ویدئویی و دیگر روش‌های موقعیت‌یابی دسته‌بندی نمود.[۲]

روش‌های الکترومغناطیسی بیشتر بر اساس جهت و زمان رسیدن امواج الکترومغناطیسی عمل می‌کنند.[۳و۴] این دسته از روش‌های موقعیت‌یابی، که بر اساس قدرت و جهت‌گیری امواج الکترومغناطیسی بازگشتی از کپسول عمل می‌کنند، به الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز نیاز دارند.[۵] تضعیف سیگنال و انتخاب باند فرکانسی مناسب از میان چالش‌های مهم برای محققان در زمینه روش‌های الکترومغناطیسی می‌باشد.[۶و۷]

از آنجا که سیگنال‌های مغناطیسی در هنگام عبور از بدن دچار تضعیف نمی‌شوند، فرایند موقعیت‌یابی مغناطیسی تحت تأثیر بافت داخلی انسان قرار نمی‌گیرد.[۸] در همین راستا، در دهه‌های گذشته، بسیاری از محققان روش‌های مغناطیسی مختلفی را برای موقعیت‌یابی و کنترل کپسول آندوسکوپی پیشنهاد کرده‌اند. دو رویکرد اصلی برای موقعیت‌یابی مغناطیسی معرفی شده است. در روش اول، حسگرهای مغناطیسی درون کپسول قرار می‌گیرند و تعیین موقعیت، بر اساس اندازه‌گیری این حسگرها از منابع مغناطیسی خارجی انجام می‌شود.[۹و۱۰] در روش دیگر، یک آهنربای دائمی درون کپسول جاسازی شده و حسگرهای مغناطیسی در خارج از بدن بیمار قرار

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۱۹، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱.

استناد به این مقاله:
صادقی بروجنی، پوریا، نجات پیش‌کناری، حسین، مرادی، حامد، و وثوقی، غلامرضا، ۱۴۰۲. موقعیت‌یابی و کنترل کپسول آندوسکوپی با فرض معادلات استوکس. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۵۷-۶۳. DOI:10.24200/J40.2023.61340.1657

می‌گیرند تا میدان‌های مغناطیسی را اندازه‌گیری کنند.[۱۱و۱۲] چائو هو، مدل‌های مختلف ریاضی و الگوریتم‌های کمینه‌سازی را برای موقعیت‌یابی ۵ بعدی کپسول، با یک آهنربای دائمی کوچک مقایسه کرد و دریافت که روش لونبرگ ـ مارکوارت بیشترین سرعت را برای یافتن راه‌حل فراهم می‌کند و همچنین دقت بالاتری دارد.[۱۳] یکی از چالش برانگیزترین مشکلات در روش موقعیت‌یابی مغناطیسی، همزمانی سیستم‌های تحریک و موقعیت‌یابی به دلیل تداخل دو میدان مغناطیسی اعمال شده است.[۱۴] در مرجع،[۱۵] یک الگوریتم جدید برای به حداقل رساندن اثر میدان الکترومغناطیسی خارجی در فرایند موقعیت‌یابی معرفی شده است. در میان تمام روش‌هایی که در این بخش مورد بحث قرار گرفت، روش‌های موقعیت‌یابی مغناطیسی به دلیل خطای کم موقعیت‌یابی و سهولت در اجرای عملی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، تحقیقات زیادی در این زمینه برای کاهش خطاها مورد نیاز است.

نوآوری اصلی پژوهش حاضر، کنترل و موقعیت‌یابی همزمان حرکت کپسول مغناطیسی بر اساس در نظر گرفتن دوره وظیفه (duty cycle) برای اعمال میدان مغناطیسی تحریک و بدون اشباع حسگرهای مغناطیسی است. در این پژوهش، ابتدا به مدل‌سازی حرکت کپسول آندوسکوپی در معده با فرض معادلات استوکس پرداخته می‌شود. در ادامه، روشی برای موقعیت‌یابی و کنترل کپسول بر اساس این مدل ارائه می‌گردد. در انتها، با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های معرفی شده، عملکرد کپسول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مدل‌سازی حرکت کپسول

مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی اولین گام در فرایند کنترل و موقعیت‌یابی است و مدل مبنا محسوب می‌شود. در مدل‌سازی سیستم، تلاش می‌شود تا یک مدل ریاضی مناسب برای توصیف عملکرد آن سیستم به‌دست آید. با توجه به اینکه پیش از عملیات آندوسکوپی از بیمار درخواست می‌شود که به‌مدت تقریباً ۸ ساعت به‌غیر از آب هیچ‌چیز دیگری مصرف نکند، محیط معده در حین آندوسکوپی صرفاً پر از آب می‌باشد و هیچ جسم جامدی در معده موجود نیست. کپسول‌های آندوسکوپی نیز دارای شکلی شبیه یک بیضی‌گون هستند که در صورتی که مگنت داخل آنها به کار رفته باشد، دارای وزنی بین ۴ تا ۸ گرم می‌باشند. در نتیجه، حرکت کپسول‌های آندوسکوپی داخل معده در حین فرایند آندوسکوپی را می‌توان با تقریب خوبی، با حرکت یک جسم مغناطیسی بیضی‌گون در یک ظرف حاوی سیال دچار اغتشاش، مدل‌سازی کرد. البته باید در نظر داشت که زمانی که کپسول به دیواره معده نزدیک می‌شود، اعتبار این مدل کاهش می‌یابد. به همین دلیل، در این قسمت به مدل‌سازی حرکت یک ذره مغناطیسی بیضی‌گون در محیط سیال پرداخته می‌شود و از این مدل، در قسمت‌های بعد برای موقعیت‌یابی و کنترل استفاده خواهد شد.

به علت سرعت بسیار پایین حرکت کپسول‌های آندوسکوپی در معده، فرض می‌شود که شتاب حرکت کپسول تقریباً صفر است. به عبارت دیگر، به دلیل شرایط دینامیکی سیال با عدد رینولدز پایین، معادلات ناویر ـ استوکس به معادلات استوکس تبدیل می‌شوند. بنابراین، برآیند نیروها و گشتاورهای وارد بر ذره مساوی صفر خواهد شد. همچنین، فرض می‌شود که نیروی وزن و نیروی بویانسی نیز همدیگر را خنثی کنند. بنابراین معادلات حرکت به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\vec{f}_c + \vec{f}_d = 0 \qquad (۱)$$

$$\vec{\tau}_c + \vec{\tau}_d = 0 \qquad (۲)$$

که در آن اندیس c و d به ترتیب نشان‌دهنده نیرو و گشتاور ناشی از کویل‌ها و مقاوم (drag) می‌باشد.

نیرو و گشتاور مقاوم، به شکل هندسی ذره و سرعت حرکت بستگی دارد. از آنجایی که سرعت حرکت ذره در حدود سانتیمتر بر ثانیه بوده و قطر آن نیز تقریبا یک سانتیمتر است، عدد رینولدز در حدود ۱ خواهد بود و در این حالت می‌توان با تقریب خوبی معادلات حاکم را از حالت نویر ـ استوکس به معادلات استوکس تبدیل کرد. در این شرایط نیرو و گشتاوری که از سیال به‌ذره وارد می‌شود، بر اساس روابط زیر محاسبه قابل محاسبه هستند:

$$\begin{aligned} \vec{f}_d &= M_{fd}\vec{v} \\ \vec{\tau}_d &= M_{\tau d}\vec{\omega} \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن M_{fd} و $M_{\tau d}$ ماتریس‌هایی وابسته به شکل هندسی ذره متحرک می‌باشند و نیرو و گشتاور مقاوم را به سرعت خطی و زاویه‌یی مرتبط می‌کنند. این ماتریس‌ها برای یک ذره کروی به قطر d به‌صورت زیر در می‌آید:[۱۶]

$$\begin{aligned} M_{fd} &= -3\mu\pi d I_3 \\ M_{\tau d} &= -\mu\pi d^3 I_3 \end{aligned} \qquad (۴)$$

که در آن منظوراز I_3 ماتریس همانی سه در سه است.

از آنجایی که شکل هندسی کپسول‌های آندوسکوپی بیضی‌گون می‌باشد، ماتریس‌های M_{fd} و $M_{\tau d}$ در آنها به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:[۱۷]

$$\begin{aligned}
M_{fd} &= -\mu\pi d \begin{bmatrix} k_{\hat{x}\hat{x}} & 0 & 0 \\ 0 & k_{\hat{y}\hat{y}} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\hat{z}\hat{z}} \end{bmatrix} \\
k_{\hat{x}\hat{x}} &= k_{\hat{y}\hat{y}} = \frac{16\left(\beta^2-1\right)}{\left[(2\beta^2-3)\ln(\beta+\sqrt{\beta^2-1})\right]+\beta} \\
k_{\hat{z}\hat{z}} &= \frac{8\left(\beta^2-1\right)}{\left[(2\beta^2-1)\ln(\beta+\sqrt{\beta^2-1})\right]-\beta} \\
M_{\tau d} &= -\mu\pi d^3 \begin{bmatrix} T_{\hat{x}\hat{x}} & 0 & 0 \\ 0 & T_{\hat{y}\hat{y}} & 0 \\ 0 & 0 & T_{\hat{z}\hat{z}} \end{bmatrix}
\end{aligned} \qquad (۵)$$

$$\begin{aligned}
T_{\hat{x}\hat{x}} &= T_{\hat{y}\hat{y}} = \frac{2\beta\left(\beta^2+1\right)}{3\left(\beta_0+\beta^2\gamma_0\right)}; T_{\hat{z}\hat{z}} = \frac{2\beta}{3\beta_0} \\
\beta_0 &= \frac{\beta^2}{\beta^2-1} + \frac{\beta}{2(\beta^2-1)^{1/5}}\ln\left(\frac{\beta-\sqrt{\beta^2-1}}{\beta+\sqrt{\beta^2-1}}\right) \\
\gamma_0 &= -\frac{2}{\beta^2-1} - \frac{\beta}{(\beta^2-1)^{1/5}}\ln\left(\frac{\beta-\sqrt{\beta^2-1}}{\beta+\sqrt{\beta^2-1}}\right)
\end{aligned} \qquad (۶)$$

در روابط بالا، β برابر با نسبت طول به قطر بیضی‌گون است. در شکل ۱، محورهای اصلی بیضی‌گون نمایش داده شده است که معادلات ۵ و ۶ بر اساس آن بیان شده‌اند.

اگر در معادلات ۵ و ۶، β به سمت ۱ میل داده شود، دقیقا رابطه ۴ حاصل خواهد شد.

شکل ۱. محورهای اصلی بیضی‌گون.

شکل ۲. نحوه تعریف زوایای چرخش اویلر.

۳. موقعیت‌یابی ذره مغناطیسی

موقعیت و وضعیت یک ذره مغناطیسی بیضی‌گون در فضا به وسیله شش پارامتر $(x, y, z, \psi, \theta, \varphi)$ تعیین می‌شود. سه پارامتر اول، مشخص‌کننده موقعیت مرکز جرم ذره در فضا بوده و سه پارامتر دوم، زاویه اویلر جهت‌گیری ذره را مشخص می‌کنند. زاویه ψ چرخش حول محور z، زاویه θ چرخش حول محور Y_1 و زاویه φ چرخش حول محور Z_2 می‌باشد. این زوایا در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

حال، بردار حالت را به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{X} = [\ x \quad y \quad z \quad \psi \quad \theta \quad \varphi\ ]^T \tag{۷}$$

در حالتی که از زوایای اویلر مشخص شده در شکل ۲ استفاده شود، رابطه بین مشتق زوایا و فرکانس طبیعی حرکت به‌صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\vec{\omega} = \dot{\psi}\vec{K} + \dot{\theta}\vec{J}_1 + \dot{\varphi}\vec{K}_2$$

$$K = K_1, J_1 = J_2, K_2 = K_3 \Rightarrow \vec{\omega} = \dot{\psi}\vec{K}_1 + \dot{\theta}\vec{J}_2 + \dot{\varphi}\vec{K}_3$$

$$\left.\begin{array}{c} K_1 = K_2\cos\theta - J_2\sin\theta \\ J_2 = I_3\sin\varphi + J_3\cos\varphi \\ I_2 = I_3\cos\varphi - J_3\sin\varphi \end{array}\right\} \Rightarrow \vec{\omega} = \begin{bmatrix} -\sin\theta\cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ \sin\theta\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ \cos\varphi & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\cos\varphi}{\sin\theta} & \frac{\sin\varphi}{\sin\theta} & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ \cos\varphi\cot\theta & -\sin\varphi\cot\theta & 1 \end{bmatrix}}_{W} \vec{\omega} \tag{۸}$$

با ترکیب کردن روابط ۱ تا ۳ و ۸، روابط مربوط به سرعت خطی و زاویه‌یی به دست آمده و از طریق آن‌ها مشتق بردار حالت حاصل می‌شود:

$$\dot{\vec{X}} = \left\{-M_{fd}^{-1} f_{mag}; -W M_{\tau d}^{-1} \tau_{mag}\right\} \tag{۹}$$

مقادیری که حسگرهای مغناطیسی نشان می‌دهند، به قدرت مغناطش ذرات مغناطیسی اطراف آنها و همچنین فاصله‌ی میدان‌های مغناطیسی از آنها بستگی دارد. حال از آنجایی که حسگرهای مغناطیسی در موقعیت‌های از قبل مشخص شده قرار داده می‌شوند، بنابراین فاصله آن‌ها نسبت به میدان مغناطیسی خارجی ثابت و مشخص است. در نتیجه، برای به دست آوردن تأثیر میدان ناشی از کپسول مغناطیسی، کافی است میدانی که توسط میدان خارجی ایجاد می‌شود، از میدانی که حسگرها نشان می‌دهند، کسر شود. میدان مغناطیسی ناشی از یک مغناطیس دائم با قدرت m_c که در فاصله p از یک حسگر مغناطیسی قرارگرفته است، به‌صورت زیر است:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi\|p\|^5}\left(3\vec{p}\vec{p}^T - 3I_2\|p\|^2\right) \times \vec{m}_c \tag{۱۰}$$

که در آن $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ضریب گذردهی مغناطیسی خلاء می‌باشد. در نتیجه، مقادیری که حسگرها نشان می‌دهند تابعی از موقعیت و وضعیت کپسول مغناطیس می‌باشد.

از بحث‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت که معادلات حرکت و اندازه‌گیری این سیستم را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= f\left(\vec{X}, I\right) \\ \vec{z} &= h\left(\vec{X}, I\right) \end{aligned} \tag{۱۱}$$

که در آن توابع f و h به ترتیب از روابط ۹ و ۱۰ به‌دست می‌آیند. معادله ۱۱ در حالت ایده‌آل می‌باشد، ولی با نگاه واقع‌بینانه‌تر، در حرکت کپسول در محیط، اغتشاشاتی وجود دارد که می‌توان آن اغتشاشات را به‌صورت یک نویز سفید در معادله حرکت ذره آورد. از طرفی، از آنجایی که همواره در حسگرها نویز وجود دارد، لذا می‌بایست در معادله مربوط به اندازه‌گیری نیز یک نویز اضافه کرد تا معادلات به واقعیت نزدیک‌تر شود. در نتیجه فرم اصلاح شده معادله ۱۱ به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= f\left(\vec{X}, I\right) + g\left(\vec{X}\right)\vec{w} \\ \vec{z} &= h\left(\vec{X}, I\right) + \vec{v} \end{aligned} \tag{۱۲}$$

که در آن $\vec{w}$ و $\vec{v}$ نویزهای سفیدی با ماتریس‌های کواریانس مشخص هستند که با توجه به شرایط حرکت تعیین می‌شوند و همچنین تابع $g(\vec{X})$ تابعی از بردار حالت می‌باشد که با توجه به نوع اغتشاش، می‌تواند تعیین گردد.

حال با استفاده از روابط مربوط به فیلتر کالمن توسعه یافته، به تخمین بردار حالت سیستم پرداخته می‌شود. تخمین اولیه به گونه‌یی انتخاب می‌شود که موقعیت مرکز جرم چند سانتیمتر با موقعیت اصلی تفاوت داشته باشد و در زوایا چند ده درجه با وضعیت اولیه واقعی کپسول متفاوت باشد. همچنین، اغتشاش w به گونه‌یی انتخاب می‌شود که بزرگی آن در حدود یک هزارم میزان $f(\vec{X})$ باشد. به‌طور مشابه، بزرگی $\vec{v}$ یک هزارم $h(\vec{X})$ در نظر گرفته می‌شود.

۴. کنترل حرکت ذره مغناطیسی

به‌منظور کنترل حرکت ذره مغناطیسی، از دو گام استفاده می‌شود. در ابتدا بر اساس موقعیت و جهت‌گیری فعلی ذره و همچنین موقعیت و جهت‌گیری مطلوب، نیرو و گشتاور مورد نیاز که آن حرکت را برای ما ایجاد می‌کند، یافته می‌شود و سپس در گام دوم بر اساس نیرو و گشتاور محاسبه شده، به محاسبه جریان‌های عبوری از کویل‌ها که نیرو و گشتاور مغناطیسی را ایجاد می‌کنند، پرداخته می‌شود. نحوه پیدا کردن ورودی‌های کنترلی به‌صورت شماتیک، در شکل ۳ ارائه شده است.

۱.۴. یافتن نیرو و گشتاور مغناطیسی لازم

برای یافتن نیرو و گشتاور لازم، فرض می‌شود که کپسول در موقعیت $[x, y, z, \psi, \theta, \varphi]$ قرار دارد و موقعیت و وضعیت مطلوب مد نظر $[x_d, y_d, z_d, \psi_d, \theta_d, \varphi_d]$ می‌باشد. بنابراین، سرعت خطی و سرعت زاویه‌یی که ذره را به سمت نقطه مقصد هدایت می‌کند، به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\vec{v}_{des} = \alpha \left(\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) \tag{۱۳}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}_{des} = \beta \left(\begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix}_{des} - \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} \right)$$

$$\vec{\omega}_{des} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\cos\varphi \sin\theta & \sin\varphi & ۰ \\ \sin\varphi \sin\theta & \cos\varphi & ۰ \\ \cos\theta & ۰ & ۱ \end{bmatrix}}_{W^{-۱}} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}_{des} \tag{۱۴}$$

که در آن α و β ضرایبی هستند که به وسیله آن‌ها می‌توان اندازه سرعت‌ها را کنترل کرد. حال، طبق رابطه ۳ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} f_{des} &= M_{fd} \vec{v}_{des} \\ \tau_{des} &= M_{\tau d} \vec{\omega}_{des} \end{aligned} \tag{۱۵}$$

و به این صورت، نیرو و گشتاوری که در هر نقطه باعث رانده شدن کپسول به سمت موقعیت و وضعیت مطلوب می‌شود، به دست می‌آید.

اثبات پایداری:

برای اثبات پایداری، با جایگزینی کنترلرهای موقعیت و جهت‌گیری در معادلات دینامیک سیستم، معادله دینامیک سیستم مدار بسته به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{\vec{X}} = \dot{\vec{X}}_{des} + \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & ۰ \\ ۰ & \beta \end{bmatrix}}_{K} (\vec{X}_{des} - \vec{X}) \tag{۱۶}$$

شکل ۳. نحوه یافتن ورودی کنترلی.

بردار خطا به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{e} = (\vec{X} - \vec{X}_{des}) \tag{۱۷}$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\dot{\vec{e}} + K\vec{e} = ۰ \tag{۱۸}$$

از آنجایی که α و β ماتریس‌های مثبت معین هستند، ماتریس K نیز مثبت معین خواهد بود و با توجه به رابطه ۱۸، بردار خطا به سمت صفر میل خواهد کرد و لذا پایداری کنترلر اثبات می‌گردد.

نکته ۱: در خصوص هندسه‌یی مانند کپسول، از آنجایی که نسبت به محور اصلی خود متقارن است، نیازی به کنترل زاویه φ نمی‌باشد و به منظور کنترل وضعیت کپسول صرفاً از دو زاویه ψ و θ استفاده می‌گردد؛

نکته ۲: همان‌گونه که از رابطه ۸ مشخص است، زمانی که از زوایای اویلر استفاده می‌شود، امکان تکینگی وجود دارد. بنابراین، در این مقاله برای جلوگیری از تکینگی، در شبیه‌سازی‌ها سعی شده است زوایا به صفر درجه نزدیک نشوند. به منظور جلوگیری از تکینگی در حالت کلی می‌توان از کواترنیون‌ها به جای زوایای اویلر استفاده نمود.[۱۸]

۲.۴. یافتن جریان های عبوری از کویل‌ها

در این مرحله، ابتدا باید میدان مغناطیسی و گرادیان میدانی که هر کدام از کویل‌ها در اطراف خود ایجاد می‌کنند، محاسبه شوند. سپس بر اساس این میدان و گرادیان میدان، نیرو و گشتاوری که توسط آن میدان و گرادیان ایجاد می‌شوند، به دست می‌آید. اگر از روش عکس‌العملی استفاده شود، به‌طوری که نیرو و گشتاور مورد نیاز معلوم باشد، در ابتدا می‌توان میدان مغناطیسی را که برای ایجاد این نیرو و گشتاور مورد نیاز است، محاسبه نمود. سپس با توجه به این میدان، جریان‌هایی که در کویل‌ها نیاز هستند را در نقطه‌کار محاسبه کرد. رابطه میان میدان و گرادیان میدان مغناطیسی و جریان‌های عبوری از کویل‌ها به ویژگی‌های سیم‌پیچ‌ها و نحوه قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر وابسته است. در شکل ۴، نیز نحوه محاسبه جریان‌های عبوری از کویل‌ها نشان داده شده است.

۳.۴. استفاده از duty cycle

در بخش‌های قبلی توضیح داده شد که برای موقعیت‌یابی نیاز است میدان مغناطیسی

شکل ۴. نحوه یافتن جریان های عبوری از کویل‌ها.

شکل ۵. نحوه عملکرد duty cycle.

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی.

	مقادیر		
	اولیه واقعی	اولیه تخمین	مطلوب
x	۰	۴۰ میلیمتر	۳۰ میلیمتر
y	۰	۴۰ میلیمتر	۴۰ میلیمتر
z	۰	۴۰ میلیمتر	۵۰ میلیمتر
ψ	۶۰ درجه	۳۰ درجه	۴۵ درجه
θ	۴۵ درجه	۶۰ درجه	۳۰ درجه

ناشی از کپسول اندازه‌گیری شود. این میدان در مقایسه با میدان مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچ‌های خارجی، بسیار کوچکتر است. بنابراین، اگر در زمانی که میدان مغناطیسی خارجی روشن است و تحریک خارجی در سیستم وجود دارد، از داده حسگرها استفاده شود، خطای کار افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، به منظور بالاتر بردن دقت موقعیت‌یابی از duty cycle استفاده می‌شود. به‌طوری‌که، در زمانی که از میدان خارجی به‌منظور کنترل حرکت استفاده می‌گردد، داده‌های حسگر در نظر گرفته نمی‌شود و در بازه‌های زمانی مشخص، میدان خارجی را خاموش کرده و صرفا میدان ناشی از ذره مغناطیسی اندازه‌گیری می‌گردد و به وسیله آن موقعیت‌یابی انجام می‌شود. نحوه عملکرد duty cycle در شکل ۵ نشان داده شده است.

۵. شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی روش پیشنهادی، به شبیه‌سازی حرکت یک ذره مغناطیسی بیضی‌گون پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی، یک ذره در نظر گرفته می‌شود که ۱۵ درصد حجم آن را یک ذره مغناطیسی از جنس NdFeB با مغناطش $5e5A/m$ اشغال کرده است. طول کلی جسم برابر ۲۶ میلی‌متر و قطر آن ۱۱ میلی‌متر می‌باشد. کپسول داخل یک ظرف پر از آب قرار دارد که اطراف آن ۸ کویل مغناطیسی تعبیه شده است. چیدمان کویل‌ها به این صورت است که چهار کویل با زاویه ۴۵ درجه در زیر ظرف قرار دارد و چهار کویل روی وجه‌های کناری مکعب قرار داده شده‌اند. این چیدمان از پروژه OctoMag الگوبرداری شده است.[۱۹] ۱۶ حسگر مغناطیسی سه جهته نیز در بالای مکعب قرار داده شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

برای این شبیه‌سازی، ۴۰ duty cycle درصد در نظر گرفته شده است. به این

شکل ۶. موقعیت کپسول.

معنی که در ۴۰ درصد از زمان، از حسگرها داده‌ای دریافت نمی‌شود و عملیات کنترل انجام می‌گردد و در ۶۰ درصد باقیمانده، از داده‌های حسگرها به منظور تخمین موقعیت استفاده می‌شود و کویل‌های مغناطیسی خاموش می‌گردند.

به منظور تخمین بردار حالت سیستم از فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) استفاده شده است.

در شکل ۶ و ۷ نمودارهای مربوط به موقعیت‌یابی و کنترل ذره مغناطیسی آورده شده است. همچنین، شکل ۸ نیرو و گشتاور کنترلی را نشان می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا حرکت کپسول آندوسکوپی با حرکت یک ذره بیضی‌گون مغناطیسی در محیط سیال مشابه‌سازی شده و سپس مدلی از حرکت این ذره در سیال با فرض معادلات استوکس استخراج گردید. در ادامه، یک روش مکان‌یابی مدل‌مبنا برای کپسول مغناطیسی با استفاده از آرایه‌یی خارجی از

شکل ۷. جهت‌گیری کپسول.

شکل ۸. نیرو و گشتاور کنترلی.

جدول ۲. خطای روش‌های موقعیت‌یابی و کنترل.

خطای تخمین موقعیت	۰/۷ میلی‌متر
خطای تخمین جهت‌گیری	۲/۴ درجه
خطای کنترل موقعیت	۰/۹ میلی‌متر
خطای کنترل جهت‌گیری	۲/۷ درجه

حسگرهای مغناطیسی و فیلتر کالمن ارائه گردید. در این روش، برای تخمین موقعیت و وضعیت ذره، اغتشاش سیستم و نویز حسگرها نیز در نظر گرفته شد. در ادامه، روشی برای کنترل و موقعیت‌یابی همزمان این ذره مغناطیسی ارائه گردید. نتایج شبیه‌سازی‌های عملکرد مناسب سیستم موقعیت‌یابی و کنترل را نشان می‌دهد. خلاصه‌یی از عملکرد سیستم‌های موقعیت‌یابی در جدول ۲ آمده است. به منظور محاسبه خطا، از خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) [1] استفاده شده است.

پانوشت

1. Root Mean Sqaure Error

منابع (References)

1. Ciuti, G., Menciassi, A. and Dario, P., 2011. Capsule endoscopy: From current achievements to open challenges. *IEEE Reviews In Biomedical Engineering*, *4*, pp.59-72. https://doi.org/10.1109/rbme.2011.2171182.
2. Mateen, H. and et al., 2017. Localization of wireless capsule endoscope: A systematic review. *IEEE Sensors Journal*, *17*(5), pp.1197-1206. https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2645945.
3. Goh, S.T., Zekavat, S.A.R. and Pahlavan, K., 2014. DOA-based endoscopy capsule localization and orientation estimation via unscented Kalman filter. *IEEE Sensors Journal*, *14*(11), pp.3819-3829. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2342720.
4. Nafchi, A.R., Goh, S.T. and Zekavat, S.A.R., 2014. Circular arrays and inertial measurement unit for DOA/TOA/TDOA-based endoscopy capsule localization: Performance and complexity investigation. *IEEE Sensors Journal*, *14*(11), pp.3791-3799. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2331244.
5. Guo, X., Wang, C. and Yan, R., 2011. An electromagnetic localization method for medical micro-devices based on adaptive particle swarm optimization with neighborhood search. *Measurement*, *44*(5), pp.852-858. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.022.
6. Barbi, M. and et al., 2019. Analysis of the localization error for capsule endoscopy applications at uwb frequencies. in 2019 13th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT). IEEE
7. Bianchi, F. and et al., 2019. Localization strategies for robotic endoscopic capsules: A review. *Expert Review of Medical Devices*, *16*(5), pp.381-403. https://doi.org/10.1080/17434440.2019.1608182.
8. Hu, C. and et al., 2010. A cubic 3-axis magnetic sensor array for wirelessly tracking magnet position and orientation. *IEEE Sensors Journal*, *10*(5), pp.903-913. https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2035711.
9. Popek, K.M., Mahoney, A.W. and Abbott, J.J., 2013. Localization method for a magnetic capsule endoscope propelled by a rotating magnetic dipole field. *In Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on*. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631343.
10. Di Natali, C., Beccani, M. and Valdastri, P., 2013. Real-time pose detection for magnetic medical devices. *IEEE Transactions on Magnetics*, *49*(7), pp.3524-3527. https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2240899.
11. Yim, S. and Sitti, M., 2013. 3-D localization method for a magnetically actuated soft capsule endoscope and its applications. *IEEE Transactions on Robotics*, *29*(5), pp.1139-1151. https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2266754.
12. Pham, D.M. and Aziz, S.M., 2014. A real-time localization system for an endoscopic capsule using magnetic sensors. *Sensors*, *14*(11), pp.20910-20929. https://doi.org/10.3390%2Fs141120910.
13. Hu, C., Meng, M.Q.H. and Mandal, M., 2005. Efficient magnetic localization and orientation technique for capsule endoscopy. *International Journal of Information Acquisition*, *2*(01), pp.23-36. https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545490.
14. Wang, X. and Meng, M.Q., 2011. Perspective of active capsule endoscope: actuation and localisation. *International Journal of Mechatronics and Automation*, *1*(1), pp.38-45. https://doi.org/10.1504/IJMA.2011.039154.
15. Son, D., Yim, S. and Sitti, M., 2016. A 5-D localization method for a magnetically manipulated untethered robot using a 2-D array of Hall-effect sensors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *21*(2), pp.708-716. https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2488361.
16. Happel, J. and Brenner, H., 1983. Low reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate medi. Martinuis Nijhoff.
17. Fan, F.G. and Ahmadi, G., 1995. A sublayer model for wall deposition of ellipsoidal particles in turbulent streams. *Journal of Aerosol Science*, *26*(5), pp.813-840. https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00021-4.
18. Boroujeni, P.S. and et al., 2021. Model-aided real-time localization and parameter identification of a magnetic endoscopic capsule using extended kalman filter. *IEEE Sensors Journal*. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3071432.
19. Kummer, M.P. and et al., 2010. OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, *26*(6), pp.1006-1017. https://doi.org/10.1109/TRO.2010.2073030.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۶۵-۷۴، (پژوهشی)

Original Article

شبیه‌سازی عددی برداشت انرژی از یک صفحه انعطاف‌پذیر پشت یک سیلندر با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان

مهناز پورمؤمنی فیروزآبادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
علی طیبی * (استادیار)
یونس شکاری (استادیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

شبیه‌سازی و بررسی برداشت انرژی از یک صفحه‌ی پیزوالکتریک که بر روی یک تیر الاستیک تعبیه شده و در پشت سیلندر قرار گرفته از طریق ارتعاشات ناشی از جریان، موضوع مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. در ابتدا نتایج جریان اطراف یک سیلندر ساکن در رینولدز ۲۰۰ با مراجع موجود در پیشینه‌ی پژوهش، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. سپس، با قرار دادن یک تیر الاستیک و پیزوالکتریک در پشت سیلندر، جریان اطراف سیلندر و اندرکنش بین سازه‌ها و سیال بررسی شده است. در همین راستا، فرایند یافتن بهینه‌ترین حالت برداشت انرژی برای مکان قرارگیری تیر الاستیک، طول تیر و نقطه‌ی گیردار تیر الاستیک در هندسه‌های مختلف انجام می‌شود. نتیجه بررسی‌های انجام شده، حالت بهینه‌یی با طول تیر الاستیک $2D$ فاصله‌ی قرارگیری تیر از پشت سیلندر $2/5D$ و حالتی که تیر از سمت راست ثابت شده باشد است که در آنها D قطر سیلندر می‌باشد. در این مسئله، تأثیر حضور تیر بر روی کاهش ضرایب لیفت و درگ و تاثیر آن بر مقدار ولتاژ برداشت شده از لایه‌ی پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: برداشت انرژی، پیزوالکتریک، ارتعاش ناشی از جریان، صفحه انعطاف‌پذیر.

poormomenimahnaz@gmail.com
tayebi@yu.ac.ir
shekari@yu.ac.ir

۱. مقدمه

از زمان‌های گذشته، جامعه‌ی انسانی از انرژی باد و جریان آب برای فعالیت‌های متعددی مانند آسیاب‌ها و پمپ‌های آبی استفاده می‌کرده است. اخیراً این انرژی‌ها را برای تولید برق نیز به‌کار می‌گیرند. یکی از معایب توربین‌های سنتی و آسیاب‌های آبی، نیاز آن‌ها به سیال با انرژی بالا است. به عنوان مثال در توربین‌های آبی، نیروی محرکه‌ی بالایی برای استفاده از توربین مورد نیاز است. از مزایای این سیستم‌ها این است که پدیده‌های هیدرولیکی مانند آبشار، به‌طور طبیعی رخ می‌دهند و در دسترس هستند. در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای توسعه‌ی دانش انجام شده و فناوری‌های جدیدی در زمینه‌ی استخراج انرژی ناشی از جریان معرفی شده است.[۱] یکی از فناوری‌های بالقوه‌یی که ممکن است در آینده نزدیک جایگزین باتری شود، برداشت انرژی[۱] است. این فناوری از منابع طبیعی برای تولید انرژی الکتریکی مفید و بر اساس رویکردهای متداول انتقال انرژی، استفاده می‌کند.[۲] فرایند استخراج انرژی از محیط اطراف حسگرها و تبدیل آن به فرم قابل استفاده، یعنی انرژی الکتریکی، برداشت انرژی نامیده می‌شود. تولید برق یکی از مسائل مهمی است که با گذشت زمان و کمبود منابع تجدیدناپذیر می‌بایست مورد توجه جدی قرارگیرد و بهتر است با بهره‌گیری از دستاوردهای نوین بشر برای تولید این منبع مهم و ضروری تلاش فراوان صورت بگیرد. مطالعه‌ی پیشینه‌ی پژوهش نشان داده است که برداشت انرژی از یک استوانه که در معرض ارتعاش ناشی از جریان قرار می‌گیرد، در زمینه‌های گسترده‌یی استفاده می‌شود. بنابراین، بررسی این موضوع در صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است.

در سال‌های اخیر، سوزاندن نفت، زغال‌سنگ و دیگر سوخت‌های فسیلی، منجر به ایجاد مشکلات زیست‌محیطی شده است و از سوی دیگر سوخت‌های فسیلی رو به اتمام است. در نتیجه، مسئله‌ی برداشت انرژی پاک و تجدیدپذیر از محیط زیست

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۸.

استناد به این مقاله:
پورمؤمنی فیروزآبادی، مهناز، طیبی، علی، و شکاری، یونس. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی عددی برداشت انرژی از یک صفحه انعطاف‌پذیر پشت یک سیلندر با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۶۵-۷۴. DOI:10.24200/J40.2023.60966.1653

به عنوان یک کانون تحقیقاتی مهم باقی‌مانده است.[۳] محققان همواره به دنبال ایده‌هایی برای برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر بوده‌اند. یکی از این منابع که در دسترس قرار دارد، انرژی ناشی از جریان سیالات مانند جریان باد، آب و غیره است. ارتعاشات القا شده توسط جریان (FIV)[۲] پدیده‌یی است که در آن یک جسم با جریان سیال اطراف خود تأثیر متقابل دارد. لرزش ناشی از جریان معمولاً به عنوان پدیده‌یی منفی شناخته می‌شود، زیرا در بسیاری از موارد ارتعاشات ناخواسته باعث کاهش طول عمر و آسیب سازه‌یی می‌شود. اما در حال حاضر این پدیده به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر از انرژی سیال در نظر گرفته می‌شود. زیرا انرژی حاصل از این ارتعاشات را می‌توان از طریق برهم‌کنش بین جریان سیال با برداشت‌کننده‌های انرژی در شرایط مختلف جریان طبیعی برداشت نمود.[۴] این پدیده را می‌توان در بسیاری از موارد مشاهده نمود. از جمله در لوله‌ی مبدل‌های حرارتی، سازه‌های دریایی، پل‌ها، خطوط انتقال برق، ساختمان‌های مرتفع و غیره. فروپاشی پل تاکوما در سال ۱۹۴۰ میلادی و برج‌های خنک‌کن فری بریج[۳] در سال ۱۹۶۵، نمونه‌های مشهوری از اثرات ارتعاشات خود القایی ناشی از جریان گردابه‌ها بر سازه‌های مهندسی است.[۵] مکانیزم پیزوالکتریک، یکی از رایج‌ترین و بهترین تکنیک‌های تحقیق در زمینه برداشت‌کننده‌های انرژی مکانیکی است. اما دایره محدود انتخاب مواد و تکنیک‌های پیچیده‌ی ساخت، هنوز هم یکی از چالش‌های مهم برای دستگاه‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک محسوب می‌شود.[۶] مواد پیزوالکتریک به طورگسترده‌یی درکاربردهای ارتعاشی استفاده می‌شوند. عامل ارتعاشی، از طریق اعمال نیرو، مواد پیزوالکتریک را تغییر داده و به آن شکل خمشی که بار الکتریکی ایجاد می‌کند، می‌دهد. نحوه‌ی کار پیزوالکتریک با استفاده از مدل ملکولی در شکل ۱ نشان داده شده است. در قسمت a ملکول‌ها در حالت تغییر نیافته قرار دارند. اما زمانی که نیروی خارجی f_k اعمال می‌شود، تعادل مجموعه به‌هم می‌ریزد و منجر به ایجاد یک دوقطبی می‌شود. در قسمت c، هرکدام از دو قطبی‌های کوچک سبب ایجاد یک دوقطبی بزرگ می‌شود که این پدیده در مواد به عنوان پیزوالکتریک شناخته می‌شود.

یکی از روش‌های نوین تأمین انرژی سیستم‌های الکتریکی کم مصرف مورد استفاده در دریا، استفاده از انرژی مکانیکی امواج است. در این روش، با استفاده از مبدل پیزوالکتریک، انرژی ناشی از امواج دریا به الکتریسیته تبدیل می‌شود. مزیت این روش عدم نیاز به تعویض یا شارژ باتری سیستم مورد نظر است. تانوی[۴] و همکاران، در سال ۲۰۱۰ از آرایه‌های کریستال پیزوالکتریک در پیاده‌روها و مناطق پرترافیکی نظیر بزرگراه‌ها برای تولید انرژی قابل نگهداری در باتری‌ها و خازن‌های

شکل ۱. نحوه عملکرد ماده‌ی پیزوالکتریک.[۷]

قابل شارژ استفاده کردند.[۸] وانگ وکو[۵]، در سال ۲۰۱۰ نخستین مدل‌های چندگانه را در رابطه با برداشت انرژی پیزوالکتریک در مکانیزم‌های ارتعاشی پیشنهاد کردند و ثابت شد که سیستم آن‌ها می‌تواند قدرت لحظه‌یی ۰/۲ میکرووات را در ۲۶ هرتز تولید کند.[۹] لالارت[۶] و همکاران، در سال ۲۰۱۱ روشی برای برداشت انرژی الکترواستاتیک پیشنهاد کردند که از پیکربندی دولایه مواد با ضریب گذردهی بالا و پایین استفاده می‌کرد.[۱۰] با توجه به تغییر گذردهی الکتریکی، نسبت ظرفیت الکتریکی ماده دولایه در مقایسه با ماده یک لایه نسبتاً گسترده‌تر است و باعث افزایش بهره‌وری می‌شود. بوزلاتا و همکاران، در سال ۲۰۱۸ یک دستگاه جدید پیزوالکتریک برای جمع‌آوری انرژی باد و سیستم تبدیل نیرو را مطالعه کردند.[۱۱] این دستگاه قابل حمل، اقتصادی، با نصب آسان و بدون تماس بود که لایه‌های پیزوالکتریک کشسان را به آهن‌رباهای دائمی اعمال می‌کرد. علائی و همکاران، در سال ۲۰۲۰ یک رویکرد تحلیلی و دو مدل عددی برای مطالعه دستگاه برداشت انرژی برای تولید انرژی الکتریکی طراحی کردند.[۱۲] این دستگاه با استفاده از انرژی باد به یک تیر، یک سرگیردار نوسانی، متصل به یک لایه پیزوالکتریک برای تولید انرژی الکتریکی، خروجی را برداشت می‌کند. رویکرد تحلیلی و اولین مدل عددی، پدیده برهم‌کنش سیال ـ سازه را در عملکرد برداشت انرژی در نظر می‌گیرد. برهم‌کنش سازه ـ سیال (FSI)[۷]، پدیده اثر متقابل برخی از سازه‌های متحرک یا تغییر شکل دهنده با یک جریان سیال داخلی یا محیط اطراف آن است.[۱۳] برهم‌کنش‌های سیال ـ سازه می‌تواند پایدار یا نوسانی باشد. در برهم‌کنش‌های نوسانی، کرنش القا شده در سازه‌ی جامد باعث حرکت و تغییر شکل آن می‌شود که به نظر می‌رسد منبعی که باعث ایجاد کرنش شده است به‌صورت میرا می‌باشد و سازه دوباره به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. این پدیده در طراحی بسیاری از سیستم‌های مهندسی اهمیتی اساسی دارد. به عنوان مثال، هواپیماها، فضاپیماها، موتورها و پل‌ها. عدم در نظرگرفتن برهم‌کنش‌های نوسانی، به‌ویژه در ساختارهای متشکل از مواد مستعد خستگی می‌تواند فاجعه‌بار باشد. FSI نیز در مخازن متحرک حاوی سیالات رخ می‌دهد، جایی که نوسانات سیال به دلیل حرکت مخزن، مقادیر قابل توجهی از نیروها و گشتاورهای مستمر را به سازه‌ی مخزن تحمیل می‌کند که بر روی پایداری سیستم حمل و نقل مخزن به‌طور نامطلوبی تأثیر می‌گذارد.[۱۴]

شیاوژن[۸] و همکاران، در سال ۲۰۲۰ یک سیستم مبدل پیزوالکتریک برداشت انرژی جنبشی از امواج دریا را پیشنهاد داده‌اند.[۱۵] سیستم مورد نظر آن‌ها شامل یک محفظه‌ی هوا، یک جسم بلاف و یک قطعه پیزوالکتریک بود که حداکثر ولتاژ خروجی ۶/۱۱ ولت تولید می‌کرد. نانو[۹] و همکاران، در سال ۲۰۲۱ برداشت انرژی پیزوالکتریک در ارتعاشات محیطی و منابع طبیعی را مطالعه کردند و با بهره‌گیری از سازه‌ی انعطاف‌پذیر ساده‌یی افزایش نیروی الکتریکی خروجی را بررسی کردند.[۱۶] لی و همکاران، در سال ۲۰۲۲ مکانیزم‌های برداشت انرژی از امواج را بررسی کردند و با قابلیت برداشت انرژی پیزوالکتریکی، ولتاژ خروجی و توان تولید شده را با ابعاد هندسی مختلف بهبود بخشیدند.[۱۷] ژانگ و همکاران، در سال ۲۰۲۲ برداشت‌کننده‌ی انرژی را از ماشین‌های دوار با ورق پیزوالکتریک بررسی کردند و توانستند ۲۵ ولت انرژی برداشت کنند.[۱۸]

در این پژوهش، یک سیستم برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک که بر اساس ارتعاش ناشی از جریان کار می‌کند، برای برق‌رسانی به حسگرهای کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی بیشتر بر روی برداشت انرژی ارتعاشات ناشی از هوا روی تیر یک‌سر گیردار تمرکز داشته و حالت بهینه مشخصات هندسی قرارگیری تیر و طول تیر مورد توجه قرار نگرفته است. درحالیکه در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان یک سیال فرضی (در رینولدز مشخص) بر روی یک

تیرکشسان پیزوالکتریک که در نقطه‌یی خاص ثابت شده است، شرایط متفاوت تیر برای بهینه‌سازی برداشت انرژی بررسی می‌گردد. برای تبدیل انرژی جریان آب به برق، سیستم تولید انرژی پیزوالکتریک بر اساس جریان اطراف یک جسم بلاف[10] مورد بررسی قرارگرفته است. برای شبیه‌سازی میدان سیال از یک کانال استفاده شده است. یک استوانه در بالادست جریان به عنوان جسم بلاف قرار دارد. یک صفحه‌ی پیزوالکتریک در امتداد خط مرکزی روبروی جریان قرارگرفته و وظیفه برداشت انرژی را به عهده دارد.

۲. روش عددی

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار کامسول[11] انجام شده است. نرم‌افزار کامسول، یک نرم‌افزار تجاری المان محدود[12] است که برای رسیدگی به طیف وسیعی از پدیده‌های فیزیکی و معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE)[13] طراحی شده است. این نرم‌افزار قابلیت کوپل یک مسئله چند فیزیکی و یا چند PDEs را برای کاربران فراهم کرده است. همچنین، تقریبا از تمامی نسخه‌ها (ویندوز، مک، لینوکس و یونیکس) پشتیبانی می‌کند. در این پژوهش، معادلات مسئله به صورت ترکیبی از معادلات اثرات جریان روی سیال ـ سازه و برداشت ولتاژ از لایه پیزوالکتریک مورد بررسی قرارگرفته است.

۱.۲. تئوری سیستم و معادلات حاکم

در یک عدد رینولدز معین، گردابه‌ها از دو طرف استوانه به طور متناوب ریزش کرده و با عنوان خیابان گردابه‌ی کارمن[14] به طور متناوب شروع به چرخش می‌کنند. فشار متناوبی که از طریق گردابه‌های ناشی از جریان تولید شده‌اند، باعث تغییر شکل در تیر می‌شود. بر اساس اثر مستقیم پیزوالکتریک، تغییر شکل لایه‌ی PVDF منجر به تولید برق می‌شود. در نهایت، انرژی الکتریکی تولید شده قبل از عرضه به دستگاه‌های الکترونیکی، معمولاً ذخیره می‌شود. انرژی سیال به‌وسیله‌ی برهم‌کنش‌های متقابل میان میدان سیال، کشش میله و میدان الکتریکی که توسط مواد PVDF تولیده شده است، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

۱.۱.۲. سیستم هم‌بسته‌ی هیدرو ـ الاستیسیته

در سیستم هم‌بسته‌ی هیدرو ـ الاستیسیته، میدان سیال و ساختار کشسانی تیر بر روی یکدیگر اثر می‌کنند. با توجه به گردابه‌های متحرک تولید شده، انرژی جنبشی سیال به فشار متناوب تبدیل شده و به تیر اعمال می‌شود. از طرفی، تغییر کشسانی تیر بر روی جریان سیال در نزدیکی آن تأثیر می‌گذارد. در مطالعات صورت گرفته، مبدل پیزوالکتریک به عنوان تیر یک‌سرگیردار مورد مطالعه قرارگرفته است، اما در این تحقیق به عنوان یک الاستومر در نظرگرفته می‌شود که از نقاط مختلف پین شده و امکان تغییر شکل را دارد. معادلات حاکم بر این سیستم هم‌بسته‌ی جامد ـ مایع به صورت زیر می‌باشد:

$$\mathbf{F}_{Flu} + \nabla.\left[-P\mathbf{I} + \mu\left(\nabla v + (\nabla v)^T\right)\right] = \rho\frac{\partial v}{\partial t} + \rho\left(v.\nabla\right)v \quad (۱)$$

$$\rho\nabla.v = ۰ \quad (۲)$$

$$\rho_{ela}\frac{\partial^۲ u}{\partial t^۲} - \nabla.\sigma = \mathbf{F}_v \quad (۳)$$

در معادله‌های فوق، $\boldsymbol{F}_{flu}$ نیروی جرمی سیال، $\boldsymbol{p}$ فشار میدان، $\boldsymbol{v}$ بردار سرعت، μ لزجت دینامیکی و ρ چگالی سیال است. از طرفی، میله‌ی پیزوالکتریک که ساختار الاستومری دارد، تحت فشار هیدرودینامیکی دچار تغییر شکل می‌شود که $\boldsymbol{u}$ بردار جابجایی، ρ_{ela} چگالیِ تیر، $\boldsymbol{F}_v$ نیروی حجمی و σ تنش است. برهم‌کنش هیدروالاستیسیته بر روی مرز بین سیال و سازه متمرکز است. سرعت سیال $\boldsymbol{v}$ و جابجایی سازه $\boldsymbol{u}$ با سرعت مرز با یکدیگر مرتبط هستند که در معادله شماره ۴ نشان داده شده است. تنش که توسط چرخش سیال مستقیماً بر سطح تیر اعمال می‌شود، از معادله ۵ و ۶ به‌دست می‌آید:

$$v = v_{bou} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (۴)$$

$$\sigma.\mathbf{n} = \tau.\mathbf{n} \quad (۵)$$

$$\tau = -P\mathbf{I} + \mu\left(\nabla v + (\nabla v)^T\right) \quad (۶)$$

خواص سیال (سرعت و فشار) از طریق معادله‌های ۱ و ۲ و جابجایی تیر از طریق معادله ۳ بدست می‌آید. باید توجه داشت که این معادله‌ها، یک دستگاه معادلات همبسته هستند. بدین ترتیب که نیروهای اعمال شده بر سطح تیر که باعث خیز آن می‌شوند، از طریق حل سیال بدست می‌آیند (معادله‌های ۱، ۲، ۵ و ۶). از طرفی، خیز تیر باعث جابجایی سیال می‌شود که از طریق معادله ۴ بر سیال اعمال می‌شود. بدین ترتیب تاثیر دو طرفه سیال و جامد از طریق مرز بین سیال و جامد بر یکدیگر اعمال می‌گردد. بدین صورت، انرژی جنبشی سیال به انرژی مکانیکی تیر تبدیل می‌شود. تیر به خاطر تنش‌های متناوب نوسان خواهد کرد. در همین حال، تغییر شکل تیر، توزیع جریان را نیز تغییر می‌دهد.

۲.۱.۲. سیستم هم‌بسته‌ی الکترو ـ مکانیک

استفاده از یک لایه مواد PVDF و یک لایه مواد کشسان برای تولید تیر پیزوالکتریک مناسب هستند. تمام سازه‌ی ایجاد شده به عنوان یک تیرکشسان و پیزوالکتریک در نظرگرفته می‌شود. معادلات حاکم بر این سیستم الکترومکانیک به شرح زیر است:

$$\rho_{ela}\frac{\partial^۲ u}{\partial t^۲} - \nabla.\left(\mathbf{K}.\mathbf{F}^T\right) = \mathbf{F}_v \quad (۷)$$

$$\sigma = \sigma_{ad} + C^E\varepsilon - e^E\varepsilon \quad (۸)$$

$$\mathbf{D_P} = \mathbf{D_r} + \mathbf{e}\varepsilon + \varepsilon_\mathbf{r}\mathbf{E} \quad (۹)$$

که معادله‌ی شماره ۷، معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت تیرالاستومتر را بیان می‌کند. $\boldsymbol{F}$ گرادیان تغییر شکل است که معادل $\boldsymbol{I} + \boldsymbol{\nabla u}$ می‌باشد، $\boldsymbol{K}$ برابر با $\boldsymbol{JF}^{(-۱)}.\boldsymbol{\sigma}.(\boldsymbol{F}^{-۱})^T$ است که $J = det\boldsymbol{F}$ به عنوان لایه‌ی پیزوالکتریک است و تنش $\boldsymbol{\sigma}$ توسط کرنش ε و میدان الکتریکی $(\boldsymbol{E})$ تعیین می‌شود. در معادله‌های بالا، C^E ماتریس ضرایب کشسان، e^E ثابت تنش پیزوالکتریک و $\boldsymbol{\sigma_{ad}}$ تنش اضافی است. همچنین، جابجایی الکتریکی $\boldsymbol{D}_p$، توسط ε و $\boldsymbol{E}$ تحت تأثیر قرار می‌گیرد، که ε_r انعطاف‌پذیری ماده‌ی پیزوالکتریک است و $\boldsymbol{D}_r$، جابجایی الکتریکی باقی‌مانده می‌باشد. با استفاده از فشار سیال، تیر دچار تغییر شکل کشسان می‌شود و بار الکتریکی ایجاد می‌کند. هنگامی که میدان الکتریکی وجود داشته باشد، قبل از اینکه تیر دچار تغییر شکل شود، بر تنش نیز تأثیر می‌گذارد. سیستم هم‌بسته‌ی هیدرو الاستیسیته و سیستم هم‌بسته‌ی الکترومکانیکی از طریق ساختار تیر به هم متصل می‌شوند. با ریزش منظم گردابه‌ها، سطح تیر دچار اختلاف فشار متناوب می‌شود. با تکرار این فرایند، نوک آزاد تیر تحت تأثیر نیروی برآی فشاری به بالا و پایین ارتعاش می‌کند.

۳. اعتبارسنجی و نتایج

۱.۳. دامنه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی

در این بخش، سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک از طریق جریان در اطراف یک جسم بلاف، برای جمع‌آوری و تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور انتخاب یک دامنه‌ی محاسباتی مناسب برای تنظیم دنباله و ارتعاش ناشی از گردابه، بر اساس پژوهش‌های پیشین، گستره‌ی طول کانال در جهت جریان $۱۰D \leq x \leq D$ و در جهت عمود بر جریان $-۱۰D \leq y \leq ۱۰D$ در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است، فاصله‌ی مرز ورودی کانال تا مرکز استوانه $۱۰D$ و از مرکز استوانه تا مرز خروجی $۳۵D$، همچنین از دیواره پایین تا بالای کانال $۲۰D$ انتخاب می‌گردد.[۱۹-۲۲]

ساختار سیستم برداشت انرژی و شرایط مرزی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. یک استوانه در قسمت بالادست جریان به‌عنوان جسم بلاف قرار می‌گیرد. یک تیر پیزوالکتریک در امتداد خط مرکزی استوانه قرار داده می‌شود و به‌عنوان تیر یک‌سرگیردار در جهت جریان ثابت می‌شود. برای به دست آوردن انرژی جنبشی بیشتر از گردابه‌ها، فاصله بین نوک آزاد تیر و سطح پشت استوانه طبق نتایج به‌دست آمده که در بخش‌های بعد ارائه می‌گردد و طبق نتایج پژوهش‌های صورت گرفته، $۲/۵D$ در نظر گرفته شده که در آن $D = ۰/۰۲m$ قطر استوانه است. الکترودها به سطوح لایه PVDF متصل می‌شوند که به مدار برداشت انرژی متصل است.[۲۳]

شرایط مرزی، برای مرز سمت چپ کانال شرط سرعت ورودی، مرز سمت راست شرط فشار خروجی، دیواره‌ها شرط متقارن و برای سطح استوانه شرط دیوار یا عدم لغزش تعیین شده است. تیر پشت استوانه یک تیر اولر ـ برنولی فرض شده است.

شکل ۲. دامنه‌ی محاسباتی.

شکل ۳. هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی.[۲۳]

ابعاد تیرکشسان مورد نظر بصورت مستطیل شکل با طول $۲ * D$ و عرض $D/۱۰$ و لایه پیزوالکتریک به طول $۲ * D$ و عرض $D/۶۰$ در نظر گرفته شده است. خواص تیرکشسان با مدول یانگ $E = ۵/۶[MPa]$، ضریب پواسون $\vartheta = ۰/۴$ $\rho = ۱۰۰۰[kg/m^۳]$ تعریف شده‌اند. لایه پیزوالکتریک با $\rho = ۱۷۸۰[\frac{kg}{m^۳}]$ که بر روی تیرکشسان گسترده شده نیز PVDF در نظر گرفته می‌شود.

۲.۳. شبکه‌بندی

تولید شبکه مناسب و با کیفیت یکی از مهم‌ترین عواملی است که باید برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی مورد توجه قرار بگیرد. هر چه شبکه‌بندی با جزئیات بیش‌تری ارائه شود، مسئله دقیق‌تر خواهد بود. در شماتیک دامنه محاسباتی در شکل ۴، در اطراف استوانه یک ناحیه مستطیل شکل مشخص گردیده که بیانگر ناحیه‌ی دارای شبکه متحرک است. با استفاده از شبکه متحرک و کد FSI، نیروی وارد شده از طرف سیال ورودی بر استوانه و تیرکشسان محاسبه می‌گردد. مدل المان محدود سیال ـ سازه در این پژوهش طبق شکل ۴ به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱) ناحیه نزدیک به استوانه و سطح تیرکشسان که در آن گرادیان سرعت زیاد است و لذا شبکه‌ی ریزتر و چهارضلعی برای آن انتخاب شده تا دقت حل عددی را بهبود ببخشد. ۲) ناحیه بیرونی و دورتر از استوانه و تیر که از شبکه‌ی مثلثی درشت‌تری استفاده شده است. نحوه‌ی شبکه‌بندی در مرزهای مشترک اطراف استوانه، تیر و سیال در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

در این مطالعه، استقلال از شبکه برای هندسه‌ی استوانه ساکن و تیرکشسان بررسی می‌شود. در جدول ۱ ضریب پسا برای سه شبکه‌بندی مختلف مورد مقایسه

شکل ۴. نواحی مختلف شبکه (ناحیه وسط شامل شبکه متحرک می‌باشد).

شکل ۵. جزئیات شبکه در مرز مشترک بین دیواره تیر، استوانه و حوزه سیال.

جدول ۱. بررسی هندسه با سه شبکه‌بندی متفاوت.

پارامترهای مورد بررسی	شبکه ۱	شبکه ۲	شبکه ۳
Cd max	۱/۰۱۴۱	۱/۰۱۴۰	۱/۰۱۴۰
Δt	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
کیفیت کوچکترین المان	۰/۲۹۱۵	۰/۴۰۲۵	۰/۳۹۹۷
متوسط کیفیت المان‌ها	۰/۸۶۳۴	۰/۸۷۱۸	۰/۸۸۸۹
تعداد سلول محاسباتی	۹۴۸۷	۱۰۴۷۸	۱۵۳۳۲

شکل ۶. ضرایب پسا در سه شبکه‌بندی مختلف.

جدول ۲. جدول ۲. اعتبارسنجی کار حاضر برای استوانه ساکن بدون حضور تیر کشسان در رینولدز ۲۰۰.

پارامتر	C_D	C_L
مطالعه حاضر	۱ ± ۰/۳۱۸	±۰/۵۱۷
مرجع[۲۴]	۱/۱۹ ± ۰/۰۴۲	±۰/۶۴
مرجع[۲۵]	۱/۲۳ ± ۰/۰۵	±۰/۶۵
مرجع[۲۶]	۱۴۶ ± ۰/۰۴	±۰/۷
مرجع[۲۷]	۱/۴۶ ± ۰/۰۵	±۰/۶۹
مرجع[۲۸]	۱/۳۱	±۰/۴۳۱

قرار گرفته است. طبق شکل ۶ و با توجه به نزدیک بودن نتایج شبکه‌بندی‌های مختلف، برای کاهش زمان محاسبات در این پژوهش از شبکه‌ی ۲ استفاده می‌گردد.

۳.۳. استوانه‌ی تنها

قبل از اضافه کردن تیر کشسان به مسئله، ضرایب برآ و پسای استوانه‌ی تنها در رینولدز ۲۰۰، تحت تأثیر نیروی جریان وارد شده بر استوانه اعتبارسنجی می‌شود. این نتایج در شکل ۷ نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بعد از گذشت چند ثانیه از آغاز حل، تغییرات ضرایب برآ و پسا بصورت تناوبی منظم می‌شوند. این نتیجه برای اطمینان از صحت حل با پژوهش‌های پیشین در رینولدز ۲۰۰، در جدول ۲ مورد مقایسه قرارگرفته و نتیجه‌ی قابل قبولی به‌دست آمده است

۴.۳. تأثیر تیر کشسان بر برداشت انرژی جریان حول استوانه

استفاده از استوانه کنترلی و تیرهای یک‌سرگیردار یکی از روش‌های تأثیرگذار بر کنترل

شکل ۷. تغییرات ضریب پسا (سمت راست) و ضریب برآ (سمت چپ) بر حسب زمان برای استوانه ساکن تنها در رینولدز ۲۰۰.

ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌باشد. بکارگیری این روش‌ها موجب به تعویق افتادن تشکیل گردابه‌ها روی سازه اصلی می‌شود. همچنین، میزان نیروی برآ و پسای وارد شده بر سازه کاهش می‌یابد.

۱.۴.۳. استوانه ساکن در حضور تیر کشسان

کاهش پسا روی استوانه با استفاده از تیر یک سرگیردار، بصورت عددی مورد مطالعه قرارگرفته است. پژوهش برای رینولدز ۲۰۰ و در حالت‌های مختلف: نحوه قرارگیری تیر کشسان نسبت به استوانه، ابعاد مختلف تیر و ... بررسی شده است. در ابتدا، حالت استوانه‌ی بدون تیر با حالت استوانه در حضور تیر مقایسه می‌شود که از کاهش پسای استوانه در حضور تیر اطمینان حاصل شود. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، ضریب پسا در حضور تیر به‌طور قابل ملاحظه‌یی کاهش یافته است. با حضور تیر در پشت سیلندر، فرایند ریزش گردابه در دنباله‌ی سیلندر سرکوب شده و در نتیجه فشار پشت سیلندر افزایش یافته که نتیجه آن کاهش ضریب پسا روی استوانه است. قابل ذکر است که استفاده از جداکننده[۱۵]، یک روش شناخته شده درکاهش ضریب درگ استوانه می‌باشد.[۲۹و۳۰]

ضرایب برآ نیز برای دو حالت استوانه‌ی تنها و استوانه با حضور تیر در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که ضرایب برآ بر حسب زمان برای استوانه تنها کاملاً متناوب و سینوسی می‌باشد. در حالیکه توزیع متغیرها برای استوانه با حضور تیر، بر روی دو سیکل متوالی کاملا متناوب نیست، اما تناوب را بر روی چند سیکل متوالی می‌توان مشاهده کرد. بدین ترتیب، مفهوم جدیدی تحت عنوان رفتار

شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب پسا در حالت‌های استوانه تنها و استوانه با حضور تیر در رینولدز ۲۰۰.

شکل ۹. مقایسه‌ی ضریب برآی استوانه در رینولدز ۲۰۰ در حالت استوانه با حضور تیر (سمت راست) و استوانه‌ی تنها (سمت چپ).

تنفسی[16] تعریف می‌شود و بدین معنی است که نوسانات سیگنال‌ها همیشه کاملا سینوسی نیستند و یک رفتار شبه تناوبی دارند. دوره تناوب تنفسی در شکل ۹ ب مشخص شده است.

۲.۴.۳. برداشت انرژی از استوانه و تیر کشسان

همان‌گونه که ذکر شد، استفاده از تیرهای یک‌سرگیردار یکی از روش‌های تأثیرگذار و غیرفعال جهت کنترل ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌باشد، اما در این پژوهش، هدف

شکل ۱۰. جابجایی انتهای آزاد تیر در ابعاد مختلف تیر کشسان.

از بکارگیری تیر متفاوت بوده و بر مقدار انرژی برداشت شده از آن تمرکز می‌شود. بنابراین، جهت دستیابی به بهترین حالت برداشت انرژی می‌بایست پارامترهای طول، تعداد و نحوه قرارگیری تیر نسبت به استوانه که از عوامل تأثیرگذار بر این معیار است، مورد بهینه‌سازی قرار بگیرد.

۴. بهینه‌سازی هندسه‌های مختلف استوانه و تیر

۱.۴. بهینه‌سازی طول تیر

مسئله حاضر، در مرحله اول برای طول تیر به عنوان متغیر مستقل بهینه‌سازی شده است. هدف این پژوهش، یافتن طولی از تیر است که تحت تأثیر جریان ورودی، متحمل جابجایی بیشتری شود و به دنبال این جابجایی، ولتاژ خروجی نیز بیشتر شود. با گذر جریان سیال از روی استوانه و با گذشت زمان، گردابه‌های منظمی از بالا و پایین استوانه جدا می‌شوند و به صورت الگوی تکرار شونده‌یی ادامه می‌یابد. در اثر برخورد گردابه‌های ایجاد شده با تیر کشسان، تیر دچار ارتعاش می‌شود و در پی این ارتعاشات لایه پیزوالکتریک نیروی مکانیکی ورودی را به نیروی الکتریکی تبدیل می‌کند. در این قسمت طول‌های مختلفی برای تیر در نظر گرفته شده و جابجایی تیر و ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، بر اثر نیروی وارد شده از طرف جریان سیال، انتهای آزاد تیر کشسان با طول ۲D بیشترین جابجایی را داشته است. ضمن این که هدف در اینجا برداشت انرژی بیشتر می‌باشد. بنابراین، طولی از تیر مورد تایید قرار خواهد گرفت که ولتاژ خروجی بیشتری داشته باشد. چنانچه از نتایج شکل ۱۱ مشخص است، ولتاژ خروجی از لایه پیزوالکتریک نصب شده بر تیر کشسان در حالتی که طول تیر $2D$ باشد، حداکثر مقدار است. با افزایش طول تیر کشسان از یک مقدار به بعد، میرایی سیستم افزایش می‌یابد که این موضوع سبب کمتر شدن کرنش و در نتیجه کاهش توان خروجی می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده در این قسمت، طول تیر در شبیه‌سازی‌های انجام شده در ادامه‌ی پژوهش به اندازه $2D$ در نظر گرفته می‌شود. به نظر می‌رسد شکستگی‌های موجود در نمودارهای ولتاژ به دلیل خطای عددی اتفاق می‌افتند. چنانچه گام زمانی حل مسئله کوچکتر انتخاب شود، جواب‌های هموارتری حاصل خواهد شد. البته قابل ذکر است که هرچند مقادیر ولتاژ بدست آمده دارای شکستگی هستند اما رفتار کلی جواب‌ها صحیح بوده و برداشت درستی از مسئله به ما می‌دهند.

شکل ۱۱. ولتاژهای خروجی لایه پیزوالکتریک در ابعاد مختلف تیرکشسان.

شکل ۱۲. جابجایی انتهای آزاد تیرکشسان در سه مکان مختلف نسبت به استوانه.

۲.۴. انتخاب مناسب‌ترین مکان قرارگیری تیرکشسان پشت استوانه

در اثر جریان سیال اطراف تیر و پیدایش خیابان گردابه فن‌کارمن، نیروهای وارد شده به تیرکشسان در مکان‌های مختلف قرارگیری آن متفاوت است. همچنین، میزان جابجایی انتهای آزاد تیرکشسان بر اثر نیروی سیال مقدارهای متفاوتی بدست می‌آید. طبق شکل ۱۲، این جابجایی در هندسه‌یی که فاصله‌ی پشت استوانه تا ابتدای تیر به اندازه‌ی $2/5D$ انتخاب شده است به حداکثر مقدار رسیده و شبیه‌سازی مسئله برای فاصله‌های $3D$ به بعد منجر به مقادیر غیرنوسانی و واگرایی سیستم شده که از هدف این پژوهش دور می‌گردد.

مقادیر مختلف جابجایی سبب ایجاد دامنه نوسانی متفاوتی در انتهای آزاد تیر می‌شود. به همین دلیل، مقادیر ولتاژ ایجاد شده نیز برای سه حالت فوق بررسی شد و نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به نمایش گذاشته شده است. براساس نتایج بدست آمده، حداکثر مقدار ولتاژ تولید شده نیز برای حالت تیر در فاصله‌ی $2/5D$ از پشت استوانه بوده است. همان‌طورکه نتایج بررسی هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد، مناسب‌ترین حالت برای تعبیه‌ی تیرکشسان، قرار دادن آن در فاصله‌ی $2/5D$ از پشت استوانه تا لبه ابتدایی تیر می‌باشد. با توجه به نتایج بهینه‌سازی‌های انجام شده، در ادامه از اندازه‌ی تیر $2D$ و مکان قرارگیری $2/5D$ استفاده خواهد شد.

۳.۴. انتخاب نقطه مناسب برای گیردار کردن تیرکشسان

تیرکشسان که هم به‌عنوان کاهش‌دهنده‌ی نیروی برآ و پسای وارد بر استوانه و

شکل ۱۳. ولتاژ خروجی تیرکشسان در مکان قرارگیری $1/5D$ از پشت استوانه.

شکل ۱۴. ولتاژ خروجی تیرکشسان در مکان قرارگیری $2D$ از پشت استوانه.

شکل ۱۵. ولتاژ خروجی تیرکشسان در مکان قرارگیری $2/5D$ از پشت استوانه.

هم برای تکیه‌گاه لایه‌ی پیزوالکتریک با هدف برداشت انرژی در نظر گرفته شده است، از دو نقطه‌ی سمت چپ و راست ثابت شده و در هر حالت نتایج حاصل بررسی گردید. جابجایی انتهای آزاد تیرکشسان که از دو نقطه متفاوت ثابت شده بود، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، زمانی که تیر از سمت راست ثابت شده است جابجایی بیشتری از خود نشان داده است. ولتاژهای خروجی از دو هندسه ذکر شده با نقطه‌ی ثابت متفاوت نیز در شکل ۱۷ قابل مقایسه می‌باشند. همان‌گونه که از شکل ب مشخص

شکل ۱۶. جابجایی انتهای آزاد تیرکشسان در دو حالت نقطه سمت چپ ثابت و نقطه سمت راست ثابت.

شکل ۱۷. مقایسه ولتاژ خروجی برای دو حالت تیرکشسان با نقاط ثابت متفاوت: سمت راست تیر ثابت باشد (شکل سمت راست) و سمت چپ تیر ثابت باشد (شکل سمت چپ).

است، خروجی ولتاژ در هندسه‌یی که سمت راست آن ثابت شده است بیشتر می‌باشد.

از مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در این بخش می‌توان دریافت که با ثابت نگه داشتن انتهای سمت راست تیر، جابجایی انتهای آزاد آن و ولتاژ خروجی به مقادیر بیشتری می‌رسند. در شکل ۱۸ خط تراز سرعت، در شکل ۱۹ خط تراز فشار و در شکل ۲۰ خطوط جریان در حالت نهایی طول تیر $2D$، مکان قرارگیری تیر $2/5D$ و همچنین نقطه‌ی ثابت سمت راست تیر در رینولدز ۲۰۰ ارائه گردیده است. تشکیل خیابان گردابه فن کارمن و چگونگی توزیع فشار و توزیع گردابه‌ها در این شکل‌ها بخوبی مشخص

شکل ۱۸. خط تراز سرعت حول استوانه و تشکیل خیابان گردابه فن‌کارمن در رینولدز ۲۰۰ در حالت هندسه بهینه.

شکل ۱۹. خط تراز فشار حول استوانه و تشکیل خیابان گردابه فن‌کارمن در رینولدز ۲۰۰ در حالت هندسه بهینه.

شکل ۲۰. خطوط جریان حول استوانه و تشکیل خیابان گردابه فن‌کارمن در رینولدز ۲۰۰ در حالت هندسه بهینه.

است. مشاهده می‌شود که حضور تیر در پشت سیلندر مکانیزم ریزش گردابه را تغییر داده به نحوی که گردابه‌هایی که بلافاصله در دنباله‌ی سیلندر تشکیل شده‌اند (شکل ۲۰) را سرکوب کرده و اجازه تداوم و رها شدن آن‌ها در ادامه جریان را نمی‌دهد. این

مسئله، همان‌طور که قبلا هم توضیح داده شد، از طرفی باعث کاهش ضریب پسای استوانه شده و از طرفی نیروهای تناوبی تولید شده توسط برخورد گردابه‌ها به تیر باعث نوسان آن و در نتیجه برداشت انرژی می‌گردد. در واقع، خیابان گردابه تشکیل شده در میدان بعد از محل قرارگیری تیر قابل مشاهده است و بدین معنی است که ترکیب سیلندر و تیر همانند یک جسم بلاف عمل کرده و سبب تشکیل خیابان گردابه در دنباله می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی پدیده‌ی FSI و برداشت انرژی در جریان حول یک استوانه ثابت با حضور و عدم حضور تیر کشسان پرداخته شده است. در همین راستا، یک استوانه و تیر کشسان در معرض جریان سیال قرار داده شده‌اند که تیر کشسان با لایه‌ی پیزوالکتریک پوشیده شده است. به‌واسطه‌ی جریان سیال که به تیر برخورد می‌کند، انرژی مکانیکی جریان به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. ابتدا نتایج جریان اطراف استوانه‌ی ساکن تنها با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین صحت‌سنجی شد. سپس، پارامترهایی نظیر استقلال از شبکه و هندسه‌های مختلف همچون طول تیر، مکان قرارگیری تیر و نقطه‌ی ثابت تیر برای حالت استوانه ساکن بررسی شد و بهینه‌ترین حالت برای برداشت انرژی انتخاب گردید. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که بهینه‌ترین حالت ممکن در رینولدز ۲۰۰، استوانه ساکن با هندسه‌یی شامل طول تیر $2D$، مکان قرارگیری تیر $2/5D$ و نقطه‌ی ثابت سمت راست تیر می‌باشد.

پانوشت‌ها

1. Energy Harvesting
2. Flow Induced Vibration (FIV)
3. Ferrybridge Power Stations
4. Tanvi
5. Wang and Ko
6. Lallrt
7. FLUID-SOLID INTERACTION (FSI)
8. Du Xiaozhen
9. Nan Wu
10. Bloff Body
11. Comsol Multiphysics
12. Finite Element
13. PDEs (Partial Differential Equations)
14. Karman Vortex Street
15. Splitter
16. Beating

منابع (References)

1. Rostami, A.B. and Armandei, M., 2017. Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, pp.193-214. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.202.
2. Thomas, J.P., Qidwai, M.A. and Kellogg, J.C. 2006. Energy scavenging for small-scale unmanned systems. *Journal of Power Sources*, *159*(2), pp.1494-1509. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.084.
3. Ehsanul Kabira., Pawan Kumar., Sandeep Kumarc., Adedeji A. Adelodund. and Ki-Hyun Kime., 2018. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, pp.894-900. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094.
4. Xiang, J., Yan, Y. and Li, D., 2014. Recent advance in nonlinear aeroelastic analysis and control of the aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*, *27*(1), pp.12-22. https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.12.009.
5. Farshidiyanfar, A. and Naranjani, Y., 2011. Extraction of clean and unlimited energy from self-excited vibrations caused by vortices. Mechanical Engineering, 77, pp.73-85. [In Persian]. https://sid.ir/paper/450706/fa.
6. Dhakar, L., 2017. Triboelectric Devices For Power Generation and Self-powered Sensing Applications. Springer.
7. Ikeda, T., 1996. *Fundamentals of Piezoelectricity. Illustrated ed.* Oxford University Press.
8. Dikshit, T., Shrivastava, D., Gorey, A., Gupta, A., Parandkar, P. and Katiyal, S., 2010. Energy harvesting via piezoelectricity. *BVICAM's International Journal of Information Technology*, *2*(2), pp.265-270.
9. Wang, D.A. and Ko, H.H., 2010. Piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibration. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *20*(2), p.025019. DOI:10.1088/0960-1317/20/2/025019.
10. 10. Lallart, M., Pruvost, S. and Guyomar, D., 2011. Electrostatic energy harvesting enhancement using variable equivalent permittivity. *Physics Letters A*, *375*(45), pp.3921-3924. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.09.043.
11. Bouzelata, Y., Kurt, E., Uzun, Y. and Chenni, R., 2018. Mitigation of high harmonicity and design of a battery charger for a new piezoelectric wind energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, *273*, pp.72-83. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.023.
12. Alaei, E., Afrasiab, H. and Dardel, M., 2020. Analytical and numerical fluid-structure interaction study of a microscale piezoelectric wind energy harvester. *Wind Energy*, *23*(6), pp.1444-1460. https://doi.org/10.1002/we.2502.
13. Bungartz, H.J. and Schafer, M., 2006. Fluid-structure interaction: Modelling. *Simulation, Optimisation*, *53*, Springer Science & Business Media.
14. Singh, K., Sadeghi, F., Russell, T., Lorenz, S., Peterson, W., Villarreal, J. and Jinmon, T., 2021. Fluid-structure interaction modeling of elastohydrodynamically lubricated line contacts. *Journal of Tribology*, *143*(9). https://doi.org/10.1115/1.4049260.

15. Du, X., Zhao, Y., Liu, G., Zheng, M., Wang, Y., and Yu, H., 2020. Enhancement of the piezoelectric cantilever beam performance via vortex-induced vibration to harvest ocean wave energy. *Shock and Vibration*, 2020, pp.1-11. https://doi.org/10.1155/2020/8858529.

16. Wu, N., Bao, B. and Wang, Q., 2021. Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output. *Engineering Structures*, *235*, p.112068. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112068.

17. Lee, G., Lee, D., Park, J., Jang, Y., Kim, M. and Rho, J., 2022. Piezoelectric energy harvesting using mechanical metamaterials and phononic crystals. *Communications Physics*, *5*(1), p.94. http://dx.doi.org/10.1038/s42005-022-00869-4.

18. Zhang, L., Zhang, F., Qin, Z., Han, Q., Wang, T. and Chu, F., 2020. Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring. *Energy*, *238*, p.121770. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121770.

19. Zhu, H. and wang, K., 2019. Wake adjustment and vortex-induced vibration of a circular cylinder with a C-shaped plate at a low Reynolds number of 100, *Physics of Fluids*, *31*(10). https://doi.org/10.1063/1.5124818.

20. Esmaeili, M., Rabiee, A.H. and Bayandar, P., 2020. Numerical simulation of fluid-structure interaction and vortex induced vibration of the circular and truncated cylinders. *Journal of Hydraulics*. https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.219014.1438.

21. Wang, J., Zhao, W., Su, Z., Zhang, G., Li, P. and Yurchenko, D., 2020. Enhancing vortex-induced vibrations of a cylinder with rod attachments for hydrokinetic power generation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *145*. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106912.

22. Amiraslanpour, M., Ghazanfarian, J. and S.E. Razavi., 2017. Drag suppression for 2D oscillating cylinder with various arrangement of splitters at Re =100: A high-amplitude study with OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *164*, pp.128-137. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.02.018.

23. Pan, F., Xu, Z., Jin, L., Pan, P. and Gao, X., 2017. Designed simulation and experiment of a piezoelectric energy harvesting system based on vortex-induced vibration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *53*(4), pp.3890-3897. https://doi.org/10.1109/tia.2017.2687401.

24. Belov, A., Martinelli, L. and Jameson, A., 1995. A new implicit algorithm with multigrid for unsteady incompressible flow calculations. In 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.

25. Rogers, S.E. and Kwak, D., 1990. Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations. *AIAA Journal*, *28*(2), pp.253-262. https://doi.org/10.2514/3.10382.

26. Lecoint, Y. and Piquet, J., 1984. On the use of several compact methods for the study of unstedy incompressible viscous flow round a circular cylinder. *Computers & Fluids*, *12*(4), 255-280. https://doi.org/10.1016/0045-7930(84)90009-4.

27. Rosenfeld, M., Kwak, D. and Vinokur, M., 1988. A solution method for the unsteady incompressible Navier-Stokes equations in generalized coordinate systems. In 26th Aerospace Sciences Meeting.

28. Ajiliyan Momtaz, A. and Farshidiyanfar, A., 2012. Numerical simulation of the effect of using a control object on the system response in the lock-in range in the vibrations induced by the vortex flow current behind a cylinder placed on the elastic bed. *2nd International Conference on Acoustics and Vibration*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran [In Persion].

29. Hwang, J. Y. and Yang, K.S., 2007. Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *95*(7), pp.551-564. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.11.003.

30. Ogunremi, A. and Sumner, D., 2015. The effect of a splitter plate on the flow around a finite prism. *Journal of Fluids and Structures*, *59*, pp.1-21. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.09.001.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۷۵-۸۲، (پژوهشی)

Original Article

فرآوری لوله‌های نازک منیزیمی با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) با هندسه ذوزنقه‌یی

محسن کامران ماسوله (دانشجوی کارشناسی ارشد)
احمد عاصم‌پور* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

در این پژوهش، با طراحی بهینه پارامترهای هندسی کانال ذوزنقه‌یی، نیروی فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) کاهش یافته و برای اولین بار لوله‌های منیزیمی با ضخامت ۱ میلی‌متر با استفاده از این فرایند فرآوری شده‌اند. در ابتدای پژوهش، با استفاده از مدل المان محدود، فرایند در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و تأثیر پارامترهای هندسی بر روی نیروی فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد فرایند با پارامترهای هندسی بهینه، لوله‌های منیزیمی با قطر خارجی ۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس طی سه پاس، فرآوری شده‌اند. نتایج حاصل از آزمون‌های متالوگرافی، میکروسختی و کشش نشان می‌دهد که فرایند TCAP با هندسه ذوزنقه‌یی و پارامترهای هندسی بهینه، فرایند مناسبی برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی لوله‌های منیزیمی با ضخامت یک میلی‌متر است. مقادیر استحکام تسلیم و استحکام نهایی در پاس دوم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲۶ برابر نمونه اولیه شده و به مقدار ۶۰ و ۹۲ مگاپاسکال رسیده‌اند.

واژگان کلیدی: تغییرشکل پلاستیک شدید، فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی، لوله‌های فوق ریزدانه نازک، منیزیم.

mohsenkamran7394@gmail.com
assem@sharif.edu

۱. مقدمه

لوله‌های نازک نقش مهمی در محصولات فناوری‌های الکترونیکی، مهندسی پزشکی و میکرومبدل‌های حرارتی دارند. در همین راستا، فرایند شکل‌دهی و ساخت این محصولات از نظر کیفیت محصول تولیدی بسیار مهم است. به عنوان مثال، منیزیم به دلیل سازگاری مناسب با بدن برای ساخت استنت‌های زیست‌تخریب‌پذیر، ماده‌یی مناسب است، اما خواص مکانیکی آن برای کاربردهای استنت مطلوب نیست. به همین دلیل، در تحقیقات اخیر با استفاده از روش‌های مختلف از جمله فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)[۱] خواص مکانیکی و ریزساختار آن بهبود یافته است. در فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید در حضور فشار هیدرواستاتیک بالا، بدون اینکه تغییر محسوسی در ابعاد نمونه ایجاد گردد، کرنش شدیدی به ماده اعمال می‌شود. تاکنون روش‌های SPD گوناگونی برای فرآوری مواد توده‌یی، لوله‌ها و ورق‌ها ابداع شده است. فرایندهای فشار در کانال مساوی زاویه‌دار (ECAP)[۲] پیچش فشار بالا (HPT)[۳] اکستروژن متوالی فشار (CEC)[۴] و نورد اتصالی تجمعی (ARB)[۵] از مهم‌ترین فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید مواد توپر به‌حساب می‌آیند.[۱-۴] تاکنون، فرایندهای متعددی از SPD برای فرآوری لوله‌های ضخیم ارائه شده است. در سال ۲۰۰۹، توث و همکاران روش پیچش لوله در فشار بالا (HPTT)[۶] را معرفی کردند. این روش نیاز به تجهیزات پیچیده و نیروی زیاد دارد که مشکل عمده این فرایند است.[۵] در سال ۲۰۱۰، فرایند اتصال چرخشی تجمعی (ASB)[۷] برای فرآوری لوله‌های بلند استفاده شد. وجود عیوب سطحی در راستای ضخامت لوله در این روش گزارش شده است.[۶] فرجی و همکاران با معرفی فرایندهای فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP)[۸] و فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی موازی (PTCAP)[۹] گام مؤثری در جهت تولید لوله‌های ضخیم فوق ریزدانه برداشتند.[۷-۸] در سال ۲۰۱۹، سوارآبادی و همکاران فرایند انبساط و اکسترود تناوبی هیدرواستاتیک لوله (HTCEE)[۱۰] را معرفی کردند. در این روش، با استفاده از سیال تحت فشار، نیروی فرایند کاهش یافته است و از این طریق، امکان فرآوری لوله‌های فوق ریزدانه بلند تسهیل شده است.[۹] به دلیل کم بودن ضخامت لوله‌های نازک، فرآوری آن‌ها با استفاده از روش تغییر شکل پلاستیک شدید با چالش‌هایی همچون کمانش سنبه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۱، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۷.

استناد به این مقاله:
ماسوله، محسن کامران و عاصم‌پور، احمد، ۱۴۰۲. فرآوری لوله‌های نازک منیزیمی با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی (TCAP) با هندسه ذوزنقه‌یی. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۷۵-۸۲. DOI:10.24200/J40.2023.61457.1660

و پارگی لوله در راستای ضخامت همراه است. به همین دلیل، تاکنون روش‌های محدودی برای فرآوری لوله‌های نازک فوق‌ریزدانه ارائه شده است. در سال ۲۰۱۰، لاپووک و همکاران از فرایند HPTT برای فرآوری لوله‌هایی با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده کردند. در این تحقیق، عدم یکنواختی در خواص مکانیکی در راستای ضخامت لوله به دلیل عدم یکنواختی کرنش‌های اعمالی گزارش شده است.[۱۰]

در سال ۲۰۱۵، گروهی از پژوهشگران با قرار دادن یک لاستیک از جنس پلی‌اورتان در داخل لوله، تغییرشکل پلاستیک شدید را با استفاده از فرایند ECAP به لوله نازک مسی اعمال کردند. در این تحقیق، تلرانس ابعادی ضخامت لوله بعد از فرآوری از دقت زیادی برخوردار نبوده است.[۱۱] فرجی و همکاران، روش‌های افزایش و کاهش تناوبی قطر (CFS)[۱۱] و استحکام‌دهی لوله توسط لاستیک (RPTS)[۱۲] را برای تولید لوله‌های فوق‌ریزدانه نازک بلند ابداع نمودند. در این فرایندها، در هر پاس، کرنش کمی به ماده وارد می‌شود. به همین دلیل، برای رسیدن به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب، نمونه باید تحت تعداد پاس‌های فراوانی قرار گیرد.[۱۲-۱۳]

در برخی از تحقیقات برای فرآوری لوله‌های نازک فوق ریزدانه، ابتدا لوله ضخیم تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرد، سپس با استفاده از فرایند میکرواکستروژن ضخامت لوله کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، عبدالوند و همکاران ابتدا با استفاده از فرایند PTCAP، لوله‌ای با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر را فرآوری کردند، سپس با استفاده از فرایند اکستروژن معکوس لوله (TBE)[۱۳] ضخامت آن را به ۰/۷۵ میلی‌متر کاهش دادند و از این طریق موفق به تولید لوله نازک فوق ریزدانه شدند.[۱۴]

در فرایند TCAP که یکی از مؤثرترین فرایندهای فرآوری لوله‌های ضخیم است، سطح مقطع لوله و سنبه یکسان است، به همین دلیل با کاهش ضخامت لوله، ظرفیت تحمل بار سنبه به شدت کاهش می‌یابد و امکان فرآوری لوله‌های نازک با استفاده از این فرایند ممکن نمی‌شود. برای فرآوری لوله‌های نازک با استفاده از این فرایند، باید نیروی فرایند به میزانی کاهش یابد که سنبه در زمان انجام فرایند دچار تسلیم و کمانش نشود. کانال شکل‌دهی در این فرایند می‌تواند اشکال مثلثی، نیم‌دایره و ذوزنقه‌یی داشته باشد. هندسه ذوزنقه‌یی از لحاظ همگن بودن کرنش‌های اعمالی در راستای ضخامت و نیروی فرایند در وضعیت مناسبی قرار دارد.[۱۵]

در پژوهش حاضر، با طراحی بهینه پارامترهای هندسی کانال ذوزنقه‌یی، امکان فرآوری لوله‌هایی با ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP فراهم شده است. برای بررسی عملکرد این فرایند در فرآوری لوله‌های نازک، یک لوله منیزیمی با قطر خارجی ۵ و ضخامت ۱ میلی‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس تحت سه پاس با استفاده از این فرایند فرآوری شده و ریزساختار و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. اساس فرایند فشار درکانال زاویه‌دار لوله‌یی با هندسه ذوزنقه‌یی

اساس فرایند فشار درکانال زاویه‌دار لوله‌یی با هندسه ذوزنقه‌یی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرایند ابتدا لوله در داخل قالب با برآمدگی ذوزنقه‌یی شکل قرار می‌گیرد و از سمت دیواره‌های قالب به آن فشار هیدرواستاتیک وارد می‌شود. سپس با استفاده از یک سنبه توخالی، لوله به کانال زاویه‌دار اکسترود می‌شود

شکل ۱. شماتیکی از فرایند TCAP ذوزنقه‌یی و اجزای مربوطه.

شکل ۲. پارامترهای هندسی و نواحی مختلف TCAP ذوزنقه‌یی.

و با عبور از منطقه تغییرشکل، کرنش پلاستیکی شدیدی به آن اعمال می‌شود. شکل۲، پارامترهای هندسی قالب TCAP ذوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، ماده با عبور از مناطق ۱ تا ۵، چهار مرتبه تحت کرنش برشی، یک بار به‌صورت کششی و یک بار به صورت فشاری تحت کرنش شعاعی و محیطی قرار می‌گیرد.

۳. طراحی بهینه پارامترهای هندسی کانال ذوزنقه‌یی شکل فرایند TCAP

انتخاب مناسب هرکدام از پارامترهای هندسی قالب می‌تواند تأثیر بسزایی در نتایج خروجی فرایند داشته باشد. با توجه به شکل ۲، زوایای کانال (φ)، زوایای انحنای گوشه (ψ)، طول قاعده کوچک (L) و نسبت تغییر شکل (R) به عنوان متغیرهای طراحی در نظرگرفته شده است. با استفاده از مدل المان محدود، فرایند شبیه‌سازی شده و تأثیر پارامترهای هندسی قالب بر نیرو فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از متغیرهای طراحی، مطابق جدول ۱، در سه سطح تنظیم شده‌اند. برای بررسی اثر تمامی متغیرهای طراحی به روش فاکتوریل کامل[۱۴] به ۷۲۹ آزمایش نیاز داریم. اما با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی[۱۵] این تعداد آزمایش به ۲۷ عدد کاهش می‌یابد. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تَب [۱۶] آرایه متعامد ($L_{27}(3^6)$ برای طراحی آزمایش انتخاب شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از حلگر دینامیک صریح[۱۷] و به صورت تقارن محوری انجام شد. تمامی اجزای قالب

جدول ۱. سطوح متغیرهای طراحی.

پارامتر	سطح		
	۱	۲	۳
زاویه ورودی کانال (φ_1)	۱۲۰°	۱۳۵°	۱۵۰°
زاویه خروجی کانال (φ_2)	۱۲۰°	۱۳۵°	۱۵۰°
زاویه انحنای ورودی و خروجی (ψ_1)	۰°	۳۰°	۴۵°
زاویه انحنای وسط (ψ_2)	۰°	۳۰°	۴۵°
نسبت تغییرشکل ($R = R_1/R_0$)	۱/۲	۱/۵	۲
طول قاعده کوچک (L)	۱/۵ mm	۲/۵ mm	۵ m

شکل ۳. تاثیر پارامترهای هندسی کانال ذوزنقه‌یی بر نیروی فرایند TCAP.

جدول ۲. پارامترهای هندسی بهینه قالب TCAP ذوزنقه‌یی.

پارامتر	مقدار
$\varphi_1 = \varphi_2$	۱۵۰°
$\psi_1 = \psi_2$	۱۳/۲°
L	۱/۵ mm
$R = R_1/R_0$	۱/۲

به صورت صلب تحلیلی[۱۸] و لوله به صورت شکل‌پذیر مدل گردیده است. ضریب اصطکاک بین لوله و اجزای قالب ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. با توجه به شدید بودن تغییرشکل در طول فرایند، از تکنیک مش سازگار[۱۹] برای جلوگیری از اعوجاج شدید المان‌ها استفاده شد.

شکل ۳ نمودار تغییرات نیرو براساس پارامترهای هندسی قالب را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۳، زوایای کانال و نسبت تغییرشکل، بیشترین تأثیر را بر روی نیروی فرایند دارند. با افزایش مقدار R، نیرو با شیب تندی افزایش می‌یابد و با افزایش مقادیر φ_1 و φ_2 نیرو کاهش می‌یابد. متغیرهای ψ_1، ψ_2 و L تأثیر کمتری بر روی نیروی فرایند دارند. به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو برای فرآوری لوله‌های با ضخامت ۱ میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP، پارامترهای هندسی قالب به صورت جدول ۲ طراحی شده است.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار لوله فراوری شده، مقدار کرنش اعمالی در طول فرایند است. با بسط دادن رابطه کرنش معادل در فرایند TCAP با هندسه مثلثی فرمول محاسبه کرنش معادل در فرایند حاضر به‌صورت

شکل ۴. الف) تجهیزات انجام فرایند TCAP ذوزنقه‌یی ب) نمونه فرآوری شده.

رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید.[۱۶]

$$\varepsilon_{eq} = N \left[\sum_{i=1}^{4} \left[\frac{2\cot\left(\frac{\phi_i}{2}+\frac{\psi_i}{2}\right) + \psi_i \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi_i}{2}+\frac{\psi_i}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{4}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_1}{R_0} \right] \quad (1)$$

با جایگذاری پارامترهای هندسی قالب در رابطه‌ی ۱، مقدار کرنش معادل در پاس اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۱/۶۴، ۳/۲۸ و ۴/۹۲ بدست می‌آید.

۴. آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش، لوله‌های منیزیم خالص با قطر خارجی ۵ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۲۵ میلی‌متر و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، با استفاده از فرایند TCAP ذوزنقه‌یی طی سه پاس فرآوری شدند.

۱.۴. نحوه انجام فرایند

تجهیزات انجام فرایند و نمونه فرآوری شده در شکل ۴ نشان داده شده است. برای انجام فرایند، از دستگاه پرس SANTAM با سرعت متوسط ۷۰ میلی‌متر در دقیقه استفاده شد. دمای قالب با استفاده از چهار عدد المنت حرارتی از نوع فشنگی با ابعاد ۴۰ در ۱۰ میلی‌متر مربع و توان ۳۵۰ وات افزایش یافت و برای تنظیم دما از کنترل‌کننده PID استفاده شد. در فرایندهای اکستروژن از پودر MOS_2 به عنوان روان‌کننده استفاده می‌شود که در این تحقیق برای افزایش کارایی این پودر، با روغن هیدرولیک ترکیب شده و قبل از انجام فرایند، لوله و دیواره‌های قالب به آن آغشته شدند. سیاهی نمونه‌یی که در اثر استفاده از پودر مولیبدن دی‌سولفید به وجود آمده بود، با کشیدن سنباده نرم از روی سطح لوله به راحتی از بین می‌رود.

۲.۴. آزمون کشش

شکل ۵ تجهیزات آزمون کشش را نشان می‌دهد. با توجه به ابعاد کوچک لوله، امکان خارج کردن نمونه استاندارد آزمون کشش از آن وجود نداشت، بنابراین آزمون بر روی خود لوله انجام شد. برای جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی فرایند بر نتایج آزمون کشش، طول نمونه خارج شده از داخل قالب به اندازه ۲/۵ میلی‌متر از هر طرف کوتاه گردید. همچنین، برای جلوگیری از لغزش لوله در داخل گیره دستگاه کشش، ابتدا ۵ میلی‌متر

شکل ۵. نحوه انجام آزمون کشش.

از سر و ته نمونه در داخل کوپلینگ قرارگرفت و سپس کوپلینگ‌ها میان فک‌های گیره قرارگرفتند. همچنین، برای جلوگیری از لهیدگی لوله در داخل کوپلینگ، دو عدد پین با قطر ۳ میلی‌متر و طول ۵ میلی‌متر در دو انتهای لوله قرار داده شد. آزمون در دمای محیط و با نرخ کرنش ۰/۰۰۱ ثانیه انجام گردید. از آنجا که تمام نمونه‌ها در شرایط یکسانی تحت آزمون کشش قرارگرفتند، نتایج حاصل از این آزمون به لحاظ کیفی، قابل استناد هستند.

۳.۴. آزمون میکروسختی

متناسب با ابعاد کوچک نمونه‌های منیزیمی، برای محاسبه سختی از آزمون میکروسختی ویکرز استفاده شد. برای انجام آزمون، نمونه‌ها در جهت عمود بر محور اکستروژن برش داده شدند و در داخل مانت قرارگرفتند. سپس، نمونه‌ها با استفاده از سنباده ۵۰۰۰ تمیز شدند تا کثیفی‌های سطحی از بین برود. در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی بوهلر، باری به مقدار ۵۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه بر روی نمونه اعمال شد. مقدار سختی در سه نقطه مختلف در مقطع لوله اندازه‌گیری شد و میانگین این سه نقطه به عنوان مقدار سختی گزارش گردید.

۴.۴. متالوگرافی

به منظور متالوگرافی در دو جهت، یعنی محور اکستروژن و عمود بر محور اکستروژن، نمونه‌ها مورد مقطع‌گیری قرار گرفتند. سپس سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سلیسیم تا شماره ۵۰۰۰ تحت فرایند پرداخت سطحی قرار گرفت و در پایان، با استفاده از خمیر الماس ۱ میکرون پولیش شد. برای اچ کردن نمونه‌ها از محلول استیک ـ پیکرال استفاده شد که یک محلول مناسب و عمومی برای منیزیم است. در این فرایند، سطح نمونه‌ها به مدت ۲۰ ثانیه در تماس با محلول قرارگرفت و سپس با استفاده از اتانول شسته شد تا هیچ اثری از محلول روی آن باقی نماند. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده گردید و اندازه دانه‌ها با استفاده از روش تقاطع خطی محاسبه شد. در تصویر میکروسکوپی لوله قبل از فرآوری، با کشیدن یک خط صاف ممکن است نهایتاً ۴ الی ۵ مرزدانه با خط تقاطع داشته باشند، لذا در این حالت و به دلیل بزرگ بودن اندازه دانه‌ها، طول محیط خارجی، داخلی و مرکزی را بر تعداد دانه‌هایی که در این مناطق وجود دارند تقسیم کرده و سپس میانگین این سه عدد به عنوان اندازه دانه گزارش شده است.

۵. نتایج و بحث و بررسی

۱.۵. بررسی ریزساختار

شکل ۶، نمودار توزیع اندازه دانه و تصویر ریزساختار لوله اولیه را نشان می‌دهد. این

شکل ۶. الف) ریزساختار لوله قبل از فرآوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر ب) نمودار توزیع اندازه دانه نمونه اولیه.

تصویر نشان می‌دهد که با توجه به استفاده از شمش منیزیم خالص، توزیع دانه در لوله اولیه به شدت غیریکنواخت و اندازه دانه‌ها بسیار بزرگ است. بر اساس شکل، مشاهده می‌شود که اندازه دانه‌ها در وسط ضخامت لوله بزرگ‌تر از محیط داخلی و خارجی است. این تفاوت ممکن است ناشی از انجام فرایند ماشین‌کاری در ساخت لوله باشد. بر اساس نمودار توزیع اندازه دانه، کوچکترین و بزرگترین اندازه دانه به ترتیب ۲۵ و ۶۲۵ میکرومتر است و متوسط اندازه دانه لوله ساخته شده از شمش ریختگی منیزیم خالص ۲۰۰ میکرومتر است.

فرایند TCAP یک فرایند ترمومکانیکال است که در آن کرنش و دما باعث بهبود و تصفیه ریزساختار می‌شود. شکل ۷ نشان‌دهنده ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده در پاس‌های مختلف فرایند TCAP است. در موادی که دارای شبکه کریستالی هگزاگونال متراکم (HCP)[۲۰] مانند منیزیم هستند، تعداد سیستم‌های لغزش در دمای پایین بسیارکم است. در این مواد، با تشکیل دوقلویی‌های مکانیکی صفحات لغزش بیشتری برای حرکت نابه‌جایی‌ها فراهم می‌شود و از این طریق شکل‌پذیری مواد با ساختار HCP افزایش می‌یابد. به همین دلیل دوقلویی‌ها در ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه افزایش یافته است. دوقلویی‌ها در نمونه فرآوری شده دانه‌های درشت را به صورت لایه‌یی تقسیم کرده‌اند که تعداد محدودی از آن‌ها در پاس دوم با پیکان‌های قرمز رنگ، در ریزساختار مشخص شده است.[۱۷] در قسمت‌هایی از ریزساختار نمونه فرآوری شده در پاس دوم و سوم که با مربع‌های سبز رنگ نشان داده شده، دانه‌های ریز مانند گردنبند حول دانه‌های درشت شکل گرفته‌اند که این اتفاق ناشی از اصلاح ریزساختار براساس مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی است و در تحقیقات

شکل ۷. ریزساختار لوله‌های فرآوری شده با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر در الف) پاس اول ب) پاس دوم ج) پاس سوم.

پیشین نیز با اعمال فرایند ECAP بر روی منیزیم و آلیاژهای آن مشاهده گردیده است.[۱۸-۱۹]

شکل ۸ نمودار توزیع اندازه دانه نمونه‌های فرآوری شده در طی پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که توزیع اندازه دانه در نمونه‌های فراوری شده دوقله‌یی[۲۱] است و نسبت به نمونه اولیه یکنواخت‌تر شده است. مقادیر کوچکترین و بزرگترین اندازه دانه در پاس اول به ترتیب برابر با ۱ و ۲۷ میکرومتر است که در پاس سوم به مقدار ۰/۵ و ۱۰/۵ میکرون رسیده است. بنابراین، با افزایش تعداد پاس‌ها، توزیع اندازه دانه یکنواخت‌تر شده و محدوده تغییرات آن کاهش می‌یابد. شکل ۹ تغییرات متوسط اندازه دانه طی پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. در نمونه‌های فرآوری شده در پاس دوم و سوم متوسط اندازه دانه نسبت به نمونه اولیه به ترتیب ۹۷ و ۹۸/۵ درصد کاهش یافته و به مقدار ۶ و ۳ میکرون رسیده است. مطابق با شکل، با افزایش کرنش اعمالی در پاس‌های متوالی اندازه دانه به طور پیوسته کاهش یافته است.

۲.۵. سختی سنجی

شکل ۱۰، تغییرات سختی نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱۰، با بالا رفتن تعداد پاس، مقدار سختی به طور پیوسته افزایش یافته است. در موادی مانند منیزیم که دارای ساختار کریستالی HCP هستند، به دلیل کمبود سیستم‌های لغزش، مقدار سختی به طور شدیدی به اندازه دانه وابسته است.[۲۰] بنابراین، افزایش

شکل ۸. نمودار توزیع اندازه دانه نمونه‌های فرآوری شده در الف) پاس اول ب) پاس دوم ج) پاس سوم.

شکل ۹. نمودار تغییرات متوسط اندازه دانه نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه.

شکل ۱۰. نمودار تغییرات سختی نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه.

شکل ۱۱. نمودار تنش و کرنش نمونه اولیه و نمونه‌های فرآوری شده در پاس اول، دوم و سوم.

مقدار سختی می‌تواند متناسب با ریزدانه شدن نمونه‌های فرآوری شده باشد. با ادامه روند کاهش اندازه دانه در طی پاس‌های متوالی، مقدار سختی به ترتیب به مقادیر ۳۵، ۳۹ و ۴۰ ویکرز رسیده است. مقدار سختی در پاس سوم نسبت به پاس دوم با افزایش سه درصدی همراه بوده است. این موضوع بیانگر اشباع‌شدگی افزایش سختی براساس تعداد پاس می‌باشد که در تحقیقات مشابه بر روی آلیاژ منیزیم مشاهده شده است.[۲۱]

۳.۵. آزمون کشش

شکل ۱۱، نمودار تنش و کرنش لوله اولیه و لوله‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل۱۱، استحکام تسلیم، استحکام نهایی و افزایش طول[۲۲] لوله‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه افزایش یافته است. با اعمال تغییرشکل پلاستیک به مواد، نابجایی‌ها در ریزساختار شروع به حرکت می‌کنند و زمانی که به مرزدانه می‌رسند، به علت متفاوت بودن جهت‌گیری دانه‌ها لغزش آن‌ها از یک دانه به دانه دیگر با مشکل همراه می‌شود. در همین راستا، با کاهش اندازه دانه و افزایش تعداد مرزدانه‌ها در فرایندهای SPD، استحکام مواد افزایش می‌یابد. در نمونه‌های آلیاژ منیزیم که با استفاده از فرایندهای SPD فرآوری شده‌اند، افزایش همزمان شکل‌پذیری و استحکام گزارش شده و برای این اتفاق دلایلی مانند کاهش نسبت تنش برشی بحرانی منعکس شده[۲۳] به دلیل پالایش دانه، توزیع یکنواخت رسوب و تغییر بافت کریستالی در ریزساختار بیان شده است.[۲۲-۲۳] یکی دیگر از دلایل افزایش همزمان استحکام و شکل‌پذیری در مواد فوق ریزدانه، توزیع دوقله‌یی اندازه دانه در ریزساختار است. در موادی که دارای توزیع دوقله‌یی اندازه دانه در ریزساختار خود هستند، مکانیزم کرنش سختی به نحوی است که تغییرشکل یکنواخت پایدار باقی می‌ماند و شکست نهایی دیر انجام می‌شود.[۲۴] توزیع دوقله‌یی اندازه دانه و پالایش دانه در ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده می‌توانند دلایلی برای افزایش همزمان استحکام و شکل‌پذیری در این پژوهش باشند.

با توجه به شکل ۱۱، مقدار استحکام تسلیم از مقدار اولیه ۳۷ مگاپاسکال به ترتیب در نمونه‌های یک پاس، دو پاس و سه پاس به مقادیر ۵۲، ۶۰ و ۵۶ مگاپاسکال رسیده است. بیشترین افزایش استحکام تسلیم در پاس دوم اتفاق افتاده و بعد از پاس دوم مقدار استحکام تسلیم کاهش یافته است. استحکام نهایی نمونه‌های یک پاس، دو پاس و سه پاس نسبت به نمونه اولیه، به ترتیب ۱۵، ۲۵/۷ و ۱۷/۸ درصد افزایش یافته است. میزان افزایش طول در نمونه‌های مربوط به یک پاس، دو پاس و سه پاس به ترتیب به مقادیر ۱۳/۲۵، ۱۳/۷۲ و ۱۲/۴ درصد رسیده است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، لوله‌های منیزیمی با ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP با کانال ذوزنقه‌یی و پارامترهای هندسی بهینه فرآوری شد و تأثیر تعداد پاس بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرارگرفت. برخی از نتایج مهم این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. با توجه به نتایج، فرآوری لوله‌های منیزیمی با ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از فرایند TCAP ذوزنقه‌یی با پارامترهای هندسی بهینه با مشکلاتی از قبیل کمانش سنبه و پارگی لوله همراه نبوده و فرایند مناسبی برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی لوله‌های نازک است.

۲. بهترین حالت برای بهبود خواص مکانیکی در طول یک فرایند SPD، حالتی است که همزمان استحکام و شکل‌پذیری افزایش یابند؛ این موضوع در این فرایند به وقوع پیوسته است.

۳. مقدار استحکام تسلیم، استحکام نهایی و افزایش طول از پاس اول تا دوم افزایش و از پاس دوم به سوم کاهش یافته است. مقدار استحکام تسلیم و استحکام نهایی در پاس دوم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲۶ برابر نمونه اولیه شده است.

پانوشت‌ها

1. Severe Plastic Deformation (SPD)
2. Equal Channel Angular Pressing (ECAP)
3. High Pressure Torsion (HPT)
4. Cyclic Extrusion Compression (CEC)
5. Accumulative Roll Bonding (ARB)

6. High Pressure Tube Twisting (HPTT)
7. Accumulative Spin Bonding (ARB)
8. Tubular Channel Angular Pressing (TCAP)
9. Parallel Tube Channel Angular Pressing (PTCAP)
10. Hydrostatic Tube Cyclic Expansion Extrusion (HTCEE)
11. Cyclic Flaring and Sinking (CFS)
12. Rubber Pad Tube Straining (RPTS)
13. Tube Back Extrusion (TBE)
14. Full Factorial
15. Tuguchi Design
16. Minitab
17. Dynamic Explicit
18. Analytical Rigid
19. Adaptive Mesh
20. Hexagonal Close Pack (HCP)
21. Bimoda
22. Elongation
23. Critical Resolved Shear Stress

منابع (References)

1. Segal, V. and et al., 1981. Plastic working of metals by simple shear. Russian Metallurgy, pp.99-105.
2. Alexander, P. and et al., 2008. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, *53*(6), pp.893-979. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002.
3. Richert, M., Liu, Q. and Hansen, N., 1999. Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic- extrusion-compression. *Materials Science and Engineering: A*, *260*(1.2), pp.275-283. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00988-5.
4. Saito, Y. and et al., 1999. Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*, *47*(2), pp.579-583. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6.
5. Arzaghi, M. and et al., 2009. Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting. *Scripta Materialia*, *60*, pp.175-177. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.09.029.
6. Mohebbi, M.S. and Akbarzadeh, A., 2010. Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(1), pp.180-188. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.081.
7. Faraji, G., Mosavi, M. and Seop, H., 2011. Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*, *65*(19-20), pp.3009-3012. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.06.039.
8. Faraji, G. and et al., 2012. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*, *77*, pp.82-85. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.007.
9. Motallebi Savarabadi, M., Faraji, G. and Zalnezhad, E., 2019. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*, *785*, pp.163-168. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.149.
10. Lapovok, R. and et al., 2010. Severe plastic deformation processes for thin samples. *Journal of Materials Science*, *45*, pp.4554-4560. https://doi.org/10.1007/s10853-010-4403-x.
11. Al-Mufadi, F. and Djavanroodi, F., 2015. Equal-channel angular pressing of thin-walled copper tube. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *40*, pp.2785-2794.
12. Torabzadeh Kashi, H. and Faraji, G., 2015. Cyclic flaring and sinking (CFS) as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes. *Modares Mechanical Engineering*, *15*(8), pp.411-416 [In persian].
13. Shapourgan, O. and Faraji, G., 2016. Rubber pad tube straining as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *230*(10), pp.1845-1854. https://doi.org/10.1177/0954405416654185.
14. Abdolvand, H. and et al., 2015. A novel combined severe plastic deformation method for producing thin-walled ultrafine grained cylindrical tubes. *Materials Letters*, *143*, pp.167-171. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.12.107.
15. Faraji, G., Reshadi, F. and Baniasadia, M., 2014. A new approach for achieving excellent strain homogeneity in tubular channel angular pressing (TCAP) process. *Journal of Advanced Materials and Processing*, *2*(1), pp.3-11.
16. Mesbah, M., Faraji, G. and Bushroa, A.R., 2014. Characterization of nanostructured pure aluminum tubes produced by tubular channel angular pressing (TCAP). *Materials Science and Engineering: A*, *590*, pp.289-294. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.036.
17. Knauer, E., Freudenberger, J., Marr, T., Kauffmann, A. and Schultz, L., 2013. Grain Refinement and Deformation Mechanisms in Room Temperature Severe Plastic Deformed Mg-AZ31. *Metals*, *3*(3), pp.283-297. https://doi.org/10.34657/4382.
18. Figueiredo, R.B. and Langdon, T.G., 2009. Principles of grain refinement in magnesium alloys processed by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, *44*, pp.4758-4762. http://dx.doi.org/10.1007/s10853-009-3725-z.
19. Figueiredo, R. and Langdon, T., 2009. The nature of grain refinement in equal-channel angular pressing: A comparison of representative fcc and hcp metals. *International Journal of Materials Research*, *100*(12), pp.1638-1646. https://doi.org/10.3139/146.110228.
20. Faraji, G., Mashhadi, M.M. and Kim, H.S., 2011. Microstructure inhomogeneity in ultra-fine grained bulk AZ91 produced by accumulative back extrusion (ABE). *Materials Science and Engineering: A*, *528*(13.14), pp.4312-4317. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.075.
21. Faraji, G., Yavari, P., Aghdamifar, S. and Mosavi Mashhadi, M., 2014. Mechanical and Microstructural Properties of Ultra-fine Grained AZ91 Magnesium Alloy Tubes Processed via Multi Pass Tubular Channel Angular Pressing (TCAP). *Journal of Materials Science & Technology*, *30*(2), pp.134-138. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.08.010.

22. Samadpour, F., Faraji, G. and Savarabadi, M.M., 2020. Processing of long ultrafine-grained AM60 magnesium alloy tube by hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) under high fluid pressure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *111*, pp.3535-3544. DOI:10.1007/s00170-020-06352-0.

23. Jafarzadeh, H,. Abrinia, K. and Babaei, A., 2014. Repetitive tube expansion and shrinking (RTES) as a novel SPD method for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*, *596*, pp.194-199. http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.037.

24. Wang, Y.M. and Ma, E., 2004. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal. *Acta Materialia*, *52*(6), pp.1699-1709. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.022.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۸۳-۹۱، (پژوهشی)

Original Article

کنترل بازخورد مرزی برای ردیابی مسیر اجسام صلب در حضور تلاطم سیال کم‌عمق

میثم جوکار (دانشجوی دکتری)
حسن سالاریه* (استاد)
حسین نجات پیش‌کناری (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

در این مقاله، مسئله طراحی کنترلر ردیابی مسیر با در نظرگرفتن تلاطم سیال کم‌عمق برای اجسام صلب مورد بررسی قرارگرفته است. در این راستا، دینامیک سیال با معادلات هذلولوی سنت ـ ونانت مدل شده و این معادلات درکنار معادله‌ی دیفرانسیل معمولی جسم صلب، یک سیستم معادلات کوپل و غیرخطی پاره‌یی ـ معمولی را تشکیل می‌دهند. هدف اصلی این پژوهش، طراحی یک کنترلر فیدبک مرزی نوآورانه برای غلبه بر خطای ردیابی مسیر است. با اعمال نیروی کنترلی منحصراً به جسم صلب، روش ارائه شده به‌طور مؤثری قادر است تمام حالات سیستم (بعد محدود و بی‌نهایت درجه آزادی) را پایدار کند. پیچیدگی اصلی این کنترلر این است که هیچ حسگری نباید در محدوده‌ی مایع نصب شود. در واقع، قانون کنترلی توسعه‌یافته برای محاسبه‌ی سیگنال لحظه‌یی فقط به (الف) خطای ردیابی جسم صلب و سرعت آن و (ب) فشار مایع در مرز سیال نیازمند است. پایداری مجانبی سیستم مدار بسته با استفاده از نظریه‌ی لیاپانوف و قضیه‌ی ناوردای لاسال و بدون هیچگونه گسسته‌سازی، ساده‌سازی و خطی‌سازی تحلیل خواهد شد. از دیگر مزیت‌های کنترلر فیدبک مرزی می‌توان به رفتارگذرای بهتر آن در مقایسه با کنترلر تناسبی ـ مشتقی مرتبط و مقاومت آن نسبت به تأخیر زمانی و عدم قطعیت اشاره کرد که با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده می‌شوند.

واژگان کلیدی: جسم صلب، تلاطم کم‌عمق، مدل سنت ـ ونانت، سیستم معادلات کوپل پاره‌یی ـ معمولی، کنترل بازخورد مرزی.

meysam.jokar@mech.sharif.edu
salarieh@sharif.edu
nejat@sharif.edu

۱. مقدمه

۱.۱. مرور پژوهش‌های مرتبط

هنگامی که یک جسم صلب حاوی سیال تحت جابه‌جایی قرار می‌گیرد، حرکت سیال می‌تواند منجر به اِعمال نیرو و گشتاور ناخواسته به جسم صلب و اثرگذاری نامطلوب بر دینامیک و کنترل سیستم کلی شود. این نوع حرکت سیال را تلاطم[۱] سیال می‌نامند. پدیده‌ی تلاطم از گذشته تاکنون و در طیف وسیعی از مسائل مهندسی نظیر ماهواره،[۱و۲] خودرو،[۳] ربات[۴] و کشتی[۵] مورد توجه محققان بوده است.

مدل استاندارد برای حرکت یک سیال با استفاده از سیستم معادلات دیفرانسیل پاره‌یی، غیرخطی و کوپل ناویر ـ استوکس به دست می‌آید که در حالت کلی، معادلاتی سهموی محسوب می‌شوند. اما در شرایطی که بعد افقی سیال در مقایسه با بعد عمودی آن بسیار بزرگتر باشد، مدل حرکت سیال با شرط سیال غیرقابل تراکم و نیوتونی بر اساس معادلات سنت ـ ونانت[۲] به دست می‌آید. این معادلات، سیستمی از معادلات دیفرانسیل پاره‌یی هذلولوی، غیرخطی و کوپل هستند.[۶] مدل‌سازی یک جسم صلب حاوی سیال با فرض تلاطم کم‌عمق[۳] در پژوهش‌های بسیاری مورد بررسی قرارگرفته است.[۷-۹] در این شرایط، آشکار است که با ترکیبی از معادلات دیفرانسیل معمولی و پاره‌یی کوپل روبرو هستیم.

پایدارسازی سیستم‌های سیالاتی یک مسئله مهم و چالش‌برانگیز در زمینه‌ی تئوری و کاربرد سیستم‌های کنترلی است. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، با ساده‌سازی معادلات دیفرانسیل پاره‌یی و گسسته‌سازی آنها (به کمک فرض صلبیت سیال و استفاده از معادل‌های مکانیکی پرکاربرد نظیر پاندول و جرم ـ فنر) همراه بوده است.[۱۰-۱۲] اما طراحی کنترلر در فضای معادلات ساده شده می‌تواند منجر

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۱۹، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۵.

استناد به این مقاله:
جوکار، میثم، سالاریه، حسن، و نجات پیش‌کناری، حسین، ۱۴۰۲. کنترل بازخورد مرزی برای ردیابی مسیر اجسام صلب در حضور تلاطم سیال کم‌عمق. مهندسی مکانیک شریف، ۲(۳۹)، صص. ۸۳-۹۱. DOI:10.24200/J40.2023.61473.1661

به ناپایداری اسپیل‌اُور[4] شود. در واقع، علاوه بر عوامل و اغتشاشات خارجی، کنترلر هم می‌تواند با تحریک مودهای مرتبه بالای مدل نشده، ناپایداری ایجاد کند.[۱۳و۱۴] علاوه بر این مسئله، روش اشاره شده منجر به از دست رفتن دقت کنترلر می‌شود. این مسئله به‌خصوص در کاربردهای فضایی اهمیت بیشتری پیدا کرده است، زیرا نیاز به دقت و کنترل دقیق در این حوزه بسیار بالاست.[۱و۱۵] بنابراین، در دوران اخیر، پژوهشگران تمرکز بیشتری بر کنترل سیستم‌های سیالاتی در فضای معادلات دیفرانسیل پاره‌یی داشته‌اند.[۱۶-۲۰] با این حال، در پژوهش‌های اشاره شده و برای ساده شدن طراحی کنترلر، معادلات پاره‌یی حول یک نقطه‌ی تعادل خطی‌سازی شده‌اند و این موضوع به‌ویژه برای سیستم‌های غیرخطی سیالاتی، باعث از دست رفتن دقت و کلیت مسئله می‌شود.

نکته‌ی دیگری که باید در نظر گرفته شود این است که بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کنترل سیستم‌های سیالاتی، بدون در نظر گرفتن دینامیک جسم صلب حاوی سیال است.[۲۱و۲۲] این در حالی است که از لحاظ مباحث ریاضی، اضافه شدن معادله‌ی دیفرانسیل معمولی دینامیک جسم صلب به معادلات سنت ـ ونانت، تأثیر بسیار زیادی در افزایش دقت و در عین حال، پیچیدگی روند اثبات پایداری کنترلر طراحی شده دارد.

به‌تازگی، بخشی از نواقص اشاره شده با طراحی یک کنترلر مبتنی بر معادلات ناویر ـ استوکس برای حرکت وضعی یک ماهواره در حضور تلاطم سوخت، پوشش داده شده است.[۱] در پژوهش اشاره شده، ابتدا معادلات حاکم بر دینامیک وضعیت ماهواره و سوخت مایع با استفاده از اصل همیلتون استخراج شده‌اند. در ادامه، بدون ساده‌سازی معادلات، یک کنترلر لیاپانوف ـ مبنا طراحی شده است. کنترلر طراحی شده، یک کنترلر بازخورد مرزی[5] نیست. به عبارت بهتر، برای محاسبه‌ی سیگنال لحظه‌یی کنترلر، هیچ اطلاعاتی از مرز سیال به کار گرفته نمی‌شود و همین موضوع باعث پایین آمدن کیفیت پاسخ‌گذرای سیستم مدار بسته می‌شود. منظور از کنترل فیدبک مرزی این است که مشابه کنترل فیدبک مرسوم در سیستم‌های بعد محدود،[۲۳و۲۴] فیدبک از بخش بعد نامحدود (پارامترهای مرزی سیال) گرفته می‌شود. اما نیروی کنترلی به بخش دیگری از سیستم یعنی بخش بعد محدود (جسم صلب) وارد می‌شود.

۲.۱. نوآوری‌ها

با تاکید بر پژوهش‌های اشاره شده، در پژوهش حاضر، یک کنترلر فیدبک مرزی ردیابی موقعیت مبتنی بر معادلات دیفرانسیل پاره‌یی سیال و معادله‌ی یک بعدی حرکت انتقالی جسم صلب دربرگیرنده‌ی آن توسعه داده می‌شود. معادلات ترکیبی مزبور در فرایند طراحی کنترلر به هیچ وجه گسسته‌سازی و خطی‌سازی نمی‌شوند. در سیستم مورد مطالعه، یک ارابه به‌عنوان جسم صلب دارای یک حفره‌ی نیمه پر از یک سیال نیوتونی، تراکم ناپذیر و کم‌عمق انتخاب شده است. ارابه محدود به حرکت در راستای x محور مختصات کارتزین است. به‌طور خلاصه و در مقایسه با پژوهش‌های موجود، نوآوری‌های پژوهش حاضر عبارتند از:

- برخلاف برخی از پژوهش‌های اخیر[۲۱و۲۲] که ظرف حاوی سیال را بدون جرم فرض کرده‌اند، در این پژوهش، دینامیک جسم صلب در نظر گرفته شده است. بنابراین، معادلات حاکم بر مسئله شامل دو معادله‌ی پاره‌یی حاکم بر حرکت سیال (معادلات هذلولوی سنت ـ ونانت) و یک معادله‌ی معمولی حاکم بر حرکت افقی ارابه می‌شود. این معادلات، غیرخطی و کوپل هستند. همچنین در مراجع اشاره شده، قانون کنترلی برای محاسبه‌ی لحظه‌یی سیگنال کنترلر به اندازه‌گیری سرعت و عمق سیال در تمام میدان سیال نیاز دارد و این موضوع امکان‌پذیری کنترلر را به شدت پایین می‌آورد؛
- در مقایسه با دیگر منابع،[۱و۲۵] در این پژوهش به جای استفاده از معادلات ناویر استوکس، از معادلات سنت ـ ونانت حاکم بر تلاطم کم‌عمق استفاده شده است. می‌توان نشان داد که با علم به شرایط کم‌عمقی سیال، میزان تلاش کنترلی برای پایدارسازی سیستم سیالاتی کمتر از حالتی است که معادلات کامل حاکم بر سیال در نظر گرفته شوند.[۲۶] از طرف دیگر و از منظر ریاضی، در این شرایط معادلات پاره‌یی از نوع سهموی نبوده، بلکه از نوع هذلولوی هستند. بنابراین، با توجه به طبیعت نظریه‌ی کنترل پاره‌یی، تغییرات بسیار گسترده‌یی در روند طراحی و اثبات پایداری کنترلر ایجاد خواهد شد؛
- متفاوت از برخی منابع،[۱۰و۱۱] که در آنها کنترلرهایی بر مبنای معادلات گسسته‌سازی شده (یا بر اساس دینامیک سیال صلب) طراحی شده است، کنترلر ارائه شده در پژوهش حاضر، یک کنترلر فیدبک مرزی است که علاوه بر موقعیت لحظه‌یی ارابه و خطای ردیابی، از اطلاعات مرزی سیال بهره می‌برد. این روش در مقایسه با کنترلر تناسبی ـ مشتقی (با پسخوراند از سرعت لحظه‌یی ارابه و خطای ردیابی[۱])، رفتارگذرای بسیار بهتری دارد. بر اساس شبیه‌سازی‌ها مشخص می‌شود که این کنترلر نسبت به وجود عدم قطعیت و تأخیر در دینامیک سیستم مقاوم است. با استفاده از این روش می‌توان خطای ردیابی موقعیت ارابه و بی نهایت حالت سیال را به‌صورت مجانبی به سمت صفر میل داد. نیروی کنترلی توسعه داده شده فقط به ارابه وارد می‌شود و عملگرهای مرسوم نظیر یک رانشگر[6] برای اعمال کنترلر کافی هستند. به عبارت بهتر، این کنترلر از نوع فیدبک مرزی است، نه مرزی.

۳.۱. ساختار مقاله‌ی حاضر

در این مقاله و در بخش ۲، پیش‌زمینه‌یی دینامیکی شامل معرفی معادلات سنت ـ ونانت و کوکر ارائه شده است. در ادامه و در بخش ۳، کنترلر مورد بحث طراحی شده و با استفاده از نظریه‌ی لیاپانوف، پایداری مجانبی مدار بسته اثبات شده است. در پایان این بخش، دو نکته‌ی بسیار مهم در ارتباط با تفاوت‌های کنترلر مرزی و بازخورد مرزی و سنسورهای لازم برای اجرای عملی روش ارائه شده مطرح شده است. در بخش ۴ و با استفاده از یک روش ابتکاری به‌طور کامل ضمنی برای شبیه‌سازی عددی، کارایی کنترلر طراحی شده بررسی شده است. در پایان، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه می‌شود.

۲. پیش‌زمینه‌ی دینامیکی

در این بخش، توصیف ریاضی دینامیک افقی یک جسم صلب با حفره‌ی نیمه پر از یک سیال نیوتونی ارائه شده است. شکل ۱ نمایشی از سیستم مورد بحث است. در این شکل، دو دستگاه مختصات معرفی شده‌اند: یکی دستگاه اینرسی Oxy و دیگری دستگاه بدنی $O'\xi h$ و دستگاه دوم متصل به جسم صلب است. پارامترهای t، $x(t)$، $h(t,\xi)$، m_b، g و $f(t)$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی زمان، موقعیت افقی ارابه نسبت به مرجع ثابت، عمق سیال در حفره، جرم ارابه‌ی خالی از سیال، شتاب جهانی گرانش و نیروی کنترلی هستند. فشار نسبی هوای بالای سیال برابر با صفر فرض شده است. همچنین در این پژوهش، فرض بر این است که سیال کم عمق است. به عبارت دیگر، بعد افقی سیال بسیار بزرگتر از بعد عمودی آن است. در

شکل ۱. تعریف دستگاه‌های مختصات و پارامترهای سیستم.

این شرایط، شتاب عمودی سیال برابر با صفر خواهد بود. فرضیات دیگر این مسئله، تراکم‌ناپذیری و غیرلزج (اما چرخشی) بودن سیال است.

بر اساس فرضیات بالا، معادلات حرکت سیال کم عمق، معروف به معادلات سنت ـ ونانت به‌صورت زیر به دست می‌آیند:[۶]

$$h_t + hU_\xi + Uh_\xi = 0 \quad (1)$$

$$U_t + UU_\xi + gh_\xi = -\ddot{x} \quad (2)$$

در روابط بالا، $(.)_t$ مشتق نسبت به زمان و $(.)_\xi$ مشتق نسبت به بعد افقی حفره هستند. دو معادله‌ی پاره‌یی، هذلولوی و غیرخطی بالا، با معادله‌ی حاکم بر حرکت افقی ارابه موسوم به عبارت کوکر[۷] کوپل هستند:[۲۶]

$$m_b\ddot{x} = \frac{1}{2}\rho g\left[h^2(t,l) - h^2(t,0)\right] + f(t) \quad (3)$$

معادلات ۱ تا ۳ یک سیستم معادلات کوپل هستند و این گونه سیستم‌ها در ادبیات کنترل با عنوان آبشار پاره‌یی ـ معمولی[۸] شناخته می‌شوند. شرایط مرزی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$U(t,0) = U(t,l) = 0 \quad (4)$$

و شرط پیوستگی (عدم ریزش[۹]) با فرض بعد واحد در راستای عمود بر صفحه به شکل زیر برقرار است:

$$\int_0^l \rho h d\xi = m_l = cte. \quad (5)$$

در روابط بالا، m_l، l، U و ρ به ترتیب بیانگر جرم سیال، طول افقی حفره، سرعت افقی سطح آزاد سیال و چگالی سیال هستند.

۳. طراحی سیستم کنترلی

این بخش به معرفی اهداف کنترلی، پیشنهاد رابطه‌ی کنترلر و اثبات پایداری آن تحت نظریه‌ی پایداری لیاپانوف اختصاص دارد.

۱.۳. اهداف کنترلی

در این پژوهش، مسئله‌ی حرکت افقی یک جسم صلب دارای حفره‌ی نیمه پر از سیال با تلاطم کم‌عمق بررسی شده است. هدف اصلی کنترلی در این مقاله، طراحی یک کنترلر فیدبک مرزی مبتنی بر معادلات ۱ تا ۵ است به‌طوری که سیستم مدار بسته پایدار بماند، جسم صلب به موقعیت افقی دلخواه برود و بی‌نهایت مود ارتعاشی سیال صفر شوند.

۲.۳. کنترلر و اثبات پایداری لیاپانوف

برای احراز اهداف اشاره شده در زیر بخش قبل و بر اساس معادلات ۱ تا ۵، نیروی کنترلی زیر پیشنهاد می‌شود که مطابق شکل ۱، به جسم صلب وارد می‌شود:

$$f(t) = \left(k_1 + k_2\frac{\partial}{\partial t}\right).f_l - k_p e_x - k_d\dot{x} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا، $k_1 > -1$ و $k_2, k_p, k_d > 0$ ثابت، $\partial/\partial t$ عملگر مشتق زمانی، $e_x = x - x_{des}$ خطای ردیابی مسیر و x_{des} موقعیت افقی دلخواه هستند. در واقع k_p, k_d ضرایب بخش تناسبی ـ مشتقی (PD) کنترلر پیشنهادی هستند. همچنین داریم:

$$f_l = \rho g\int_0^l hh_\xi d\xi \quad (7)$$

با استفاده از انتگرال جزبه‌جز می‌توان نوشت:

$$f_l = \frac{1}{2}\rho g\left[h^2(t,l) - h^2(t,0)\right] \quad (8)$$

قضیه (نتیجه‌ی اصلی): پس از در نظر گرفتن سیستم دینامیکی توصیف شده با معادلات ۱ تا ۵، فرض می‌شود که نیروی کنترلی $f(t)$ مطابق معادله ۶ باشد. در این صورت، تمام حالات سیستم شامل $\left(e_x, \dot{x}, h - \frac{m_l}{\rho l}, U\right)$ به‌صورت مجانبی به سمت صفر میل می‌کنند.

اثبات: تحلیل پایداری سیستم معادلات ۱ تا ۵ تحت نیروی کنترلی معادله ۶ با استفاده تابع کاندیدای لیاپانوف زیر انجام می‌شود:

$$V(t) = V_a(t) + V_b(t) + V_c(t) \quad (9)$$

که در آن:

$$V_a(t) = \int_0^l\left[\frac{1}{2}\rho h(U+\dot{x})^2 + \frac{1}{2}\rho g\bar{h}^2\right]d\xi \quad (10)$$

$$V_b(t) = \frac{1}{2}\Delta^2 \quad (11)$$

$$V_c(t) = \frac{1}{2}\alpha_1 e_x^2 \quad (12)$$

در معادلات بالا و معادله ۱۳، α_1 و α_2 دو ثابت مثبت هستند و:

$$\Delta = m_b\dot{x} + \alpha_2(-f_l + \alpha_1 e_x) \quad (13)$$

$$\bar{h} = h - h^*; h^* = \frac{m_l}{\rho l} \quad (14)$$

رابطه ۱۳، مربوط به محاسبه Δ، برای ایجاد ترم‌های مرزی در کنترلر، به تابع کاندیدای لیاپانوف معادله ۹ اضافه شده است. در بخش شبیه‌سازی مشخص می‌شود که ترم‌های مرزی، رفتارگذرای سیستم مدار بسته را به‌طور مؤثری بهبود می‌دهند. واضح است که تابع لیاپانوف معادله ۹ مثبت معین است. مشتق این تابع از تساوی زیر به دست می‌آید:

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_a(t) + \dot{V}_b(t) + \dot{V}_c(t) \quad (15)$$

جمله‌ی اول سمت راست معادله ۱۵ با استفاده از معادله ۱۰ برابر است با:

$$\begin{aligned}\dot{V}_a(t) &= \int_0^l \tfrac{1}{2}\rho h_t (U+\dot{x})^2 d\xi \\ &+ \int_0^l \rho h (U+\dot{x})(U_t+\ddot{x})\, d\xi \\ &+ \int_0^l [\rho g h h_t - \rho g h^* h_t]\, d\xi\end{aligned} \tag{۱۶}$$

با جایگذاری معادلات ۱ و ۲ در تساوی بالا، استفاده از معادله ۵ و کمی ساده‌سازی ریاضی داریم:

$$\begin{aligned}\dot{V}_a(t) &= \rho \int_0^l \left(-\tfrac{3}{2} h U^2 U_\xi - \tfrac{1}{2} U^3 h_\xi\right) d\xi \\ &+ \rho \int_0^l \left(-2\dot{x} h U U_\xi - \dot{x} U^2 h_\xi\right) d\xi \\ &+ \rho \int_0^l \left(-2 g U h h_\xi - g h^2 U_\xi - g \dot{x} h h_\xi\right) d\xi\end{aligned} \tag{۱۷}$$

و با استفاده از انتگرال جزبه‌جز، عبارت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{V}_a(t) = -\rho g \dot{x} \int_0^l h h_\xi d\xi \tag{۱۸}$$

با استفاده از معادلات ۳ و ۱۱، جمله‌ی دوم سمت راست معادله ۱۵ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\dot{V}_b(t) &= \Delta\dot{\Delta} \\ &= \Delta\left[f_l + f(t) - \alpha_2 \tfrac{\partial f_l}{\partial t} + \alpha_1\alpha_2\dot{x}\right]\end{aligned} \tag{۱۹}$$

در نهایت، جمله‌ی سوم سمت راست معادله ۱۵ عبارت است از:

$$\dot{V}_c(t) = \alpha_1 e_x \dot{x} \tag{۲۰}$$

با جایگذاری معادلات ۱۸ تا ۲۰ در معادله ۱۵ و با یادآوری تساوی معادله ۷، داریم:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= -f_l\dot{x} + \alpha_1 e_x \dot{x} \\ &+ \Delta\left[f_l + f(t) - \alpha_2\tfrac{\partial f_l}{\partial t} + \alpha_1\alpha_2\dot{x}\right]\end{aligned} \tag{۲۱}$$

حال، نیروی کنترلی به‌صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$\begin{aligned}f(t) &= -f_l + \alpha_2\tfrac{\partial f_l}{\partial t} - \alpha_1\alpha_2\dot{x} \\ &- \tfrac{1}{\alpha_2}\dot{x} - \alpha_3\Delta\end{aligned} \tag{۲۲}$$

که در آن، α_3 یک ثابت مثبت است. داریم:

$$\begin{aligned}k_1 &= \alpha_2\alpha_3 - 1 > -1 \\ k_2 &= \alpha_2 > 0 \\ k_p &= \alpha_1\alpha_2\alpha_3 > 0 \\ k_d &= \alpha_1\alpha_2 + \alpha_3 m_b + \frac{1}{\alpha_2} > 0\end{aligned} \tag{۲۳}$$

بنابراین با استفاده از معادلات ۱۳، ۲۲ و ۲۳ به نیروی کنترلی پیشنهاد شده در معادله ۶ می‌رسیم. اگر معادله ۲۲ را در معادله ۲۱ جایگذاری کنیم، تساوی زیر برای مشتق تابع لیاپانوف حاصل می‌شود که منفی نیمه معین است:

$$\dot{V}(t) = -\alpha_3\Delta^2 - \frac{m_b}{\alpha_2}\dot{x}^2 \le 0 \tag{۲۴}$$

۳.۳. اثبات پایداری مجانبی سیستم مدار بسته

گزاره: با توجه به نامساوی ۲۴، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری لیاپانوف برقرار است. به عبارت دیگر، تمام متغیرهای موجود در تابع لیاپانوف ۹ شامل $(e_x, \dot{x}, \bar{h}, U)$ محدود باقی می‌مانند. برای اثبات پایداری مجانبی این متغیرها از قضیه‌ی ناوردای لاسال[10] استفاده می‌کنیم.[27] بر طبق این قضیه، تمام پاسخ‌های سیستم معادلات ۱ تا ۵ تحت نیروی کنترلی معادله ۶ به‌صورت مجانبی به سمت مجموعه‌ی ناوردای زیر همگرا می‌شود:

$$\mathbf{S}_i = \left\{ e_x, \dot{x}, \bar{h}, U \,\middle|\, \dot{V}(t) = 0 \right\} \tag{۲۵}$$

شروط لازم برای برقراری تساوی $\dot{V}(t) = 0$ عبارتند از:

$$\Delta = 0 \tag{۲۶}$$

$$\dot{x} = 0 \tag{۲۷}$$

در این شرایط، نیروی کنترلی برابر است با:

$$f(t) = -f_l + \alpha_2\frac{\partial f_l}{\partial t} \tag{۲۸}$$

با قرار دادن معادله ۲۸ در معادله ۳ و استفاده از معادلات ۷ و ۸ داریم:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^l h h_\xi d\xi = 0 \tag{۲۹}$$

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که h تابعی از زمان نبوده و درواقع $h = h(\xi)$ است. حال با استفاده از معادله‌ی ۱ می‌توان نوشت:

$$(hU)_\xi = 0 \rightarrow U(t,\xi) = \frac{C(t)}{h(\xi)} \tag{۳۰}$$

و در آن، $C(t)$ تابعی از زمان است و از شرایط مرزی تعیین می‌شود. تساوی دوم معادله ۳۰ باید در همه‌ی زمان‌ها برقرار باشد. بنابراین، با استفاده از شرایط مرزی معادله ۴ می‌توان نتیجه گرفت که $C(t) \equiv 0$ و متعاقباً $U(t,\xi) \equiv 0$. با جایگذاری در معادله ۲ و استفاده از معادله ۵ داریم:

$$g h_\xi = 0 \rightarrow h(t,\xi) = cte. = h^* \tag{۳۱}$$

در انتها و با استفاده از معادلات ۷، ۱۳، ۲۶، ۲۷ و ۳۱، تساوی زیر نتیجه می‌شود:

$$e_x = 0 \tag{۳۲}$$

پس می‌توان دریافت که تنها عضو مجموعه‌ی ناوردای ۲۵ برابر است با:

$$\mathbf{S}_i = \left\{ e_x, \dot{x}, \bar{h}, U \right\} = \{0\} \tag{۳۳}$$

بنابراین، قانون کنترل فیدبک مرزی طراحی شده، پایداری مدار بسته و همگرایی مجانبی تمام حالات سیستم شامل خطای ردیابی مسیر و تلاطم سیال را تضمین می‌کند و قضیه اثبات می‌شود.

نکته‌ی ۱: همانطور که پیشتر اشاره شد، کنترلر طراحی شده در این پژوهش از نوع فیدبک مرزی است، نه مرزی. به عبارت دیگر، برای اعمال کنترلر و محاسبه‌ی سیگنال لحظه‌یی کنترلی، برخی از پارامترهای مرزی سیال باید محاسبه شوند، امّا هیچگونه عملگری در مرز سیال وجود ندارد. درواقعیت، عملگرهای مرزی، امکانپذیری کنترلر را کاهش می‌دهند. بنابراین، برای اعمال کنترلر طراحی شده در این پژوهش، استفاده

از عملگرهایی نظیر رانشگرها که فقط به جسم صلب نیرو اعمال می‌کنند، کافی هستند؛

نکته‌ی ۲: دو مجموعه حسگر برای محاسبه‌ی سیگنال لحظه‌یی کنترلر فیدبک مرزی ارائه شده لازم است. یک مجموعه برای اندازه‌گیری متغیرهای زمانی نظیر موقعیت و سرعت لحظه‌یی ارابه به کار می‌رود و مجموعه دیگر برای متغیرهای مکانی ـ زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان سنسورهای مجموعه‌ی اول، می‌توان از پتانسیومتر و انکودر استفاده کرد. برای معرفی سنسورهای دسته‌ی دوم، ابتدا در مورد جمله‌ی f_l بیشتر توضیح داده می‌شود. با استفاده از مکانیک سیالات و در دیدگاه اویلرین، معادلات مومنتوم برای سیال تراکم‌ناپذیر و غیر لزج در دستگاه بدنی جسم صلب حاوی آن عبارت است از:[۲۶]

$$\frac{Du}{Dt}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial \xi}=-\ddot{x} \tag{۳۴}$$

$$\frac{Dv}{Dt}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}=-g \tag{۳۵}$$

در روابط بالا، p فشار، u سرعت در راستای محور ξ، v سرعت در راستای محور y و D/Dt مشتق کلی سیال نسبت به زمان هستند. حال با استفاده از قانون دوم نیوتون می‌توان نوشت:

$$\frac{d}{dt}\left[\int_0^l\int_0^h \rho u dy d\xi+(m_l+m_b)\,\dot{x}\right]=f(t) \tag{۳۶}$$

جمله‌ی اول سمت چپ به‌صورت زیر قابل ساده‌سازی است:

$$\begin{aligned}\tfrac{d}{dt}\int_0^l\int_0^h \rho u dy d\xi &= \int_0^l\int_0^h \rho\tfrac{Du}{Dt}dy d\xi\\ &=\int_0^l\int_0^h\left(-\tfrac{\partial p}{\partial\xi}-\rho\ddot{x}\right)dy d\xi\\ &=-m_l\ddot{x}-\int_0^l\left(\tfrac{\partial}{\partial\xi}\int_0^h p dy\right)d\xi\\ &\quad+\int_0^l p\left(t,\xi,h(t,\xi)\right)h_\xi d\xi\\ &=-m_l\ddot{x}-\int_0^h p dy\,\Big|_{\xi=0}^{\xi=l}\end{aligned} \tag{۳۷}$$

در رابطه‌ی بالا، برای تساوی دوم از معادله‌ی ۳۴، برای تساوی سوم از قضیه‌ی انتقال رینولدز و برای تساوی آخر از فرض فشار نسبی صفر در هوای محبوس در حفره استفاده شده است. حال با جایگذاری نتیجه‌ی معادله ۳۷ در معادله ۳۶ و مقایسه با معادلات ۳ و ۸ داریم:

$$f_l=\int_0^h p dy\,|_{\xi=l}-\int_0^h p dy\,|_{\xi=0} \tag{۳۸}$$

با توجه به تساوی بالا، نتیجه می‌شود که برای سنجش پارامترهای مرزی سیال، فقط کافیست از سنسور فشارسنج استفاده شود. به بیان بهتر، برای محاسبه‌ی سیگنال لحظه‌یی کنترلر، می‌توان از تعداد محدودی فشارسنج ساده در دو مرز چپ و راست حفره بهره برد و به کمک درون‌یابی، داده‌های مرز را در هر نقطه‌یی تعیین کرد.

۴. شبیه‌سازی

در این بخش، با استفاده از حل معادلات ۱ تا ۵ تحت نیروی کنترلی معادله ۶، به بررسی عملکرد کنترلر ارائه شده پرداخته شده است.

۱.۴. روش حل

برای حل سیستم معادلات کوپل درگیر (شامل دو معادله‌ی پاره‌یی هذلولوی و یک معادله‌ی معمولی)، یک روش ابتکاری به‌طورکامل ضمنی[۱۱] به‌کارگرفته شده است. دقت این روش در فضا و زمان از مرتبه‌ی دو است. در این روش، محور ξ (سطح آزاد سیال) به $J-1$ قسمت با طول $\Delta\xi=l/(J-1)$ تقسیم می‌شود و

$$\xi_j=(j-1)\,\Delta\xi;\, j=1,2,\ldots,J \tag{۳۹}$$

همچنین،

$$t_n=n\Delta t;\, n=0,1,2,\ldots \tag{۴۰}$$

$$h_j^n=h\left(t_n,\xi_j\right);\, U_j^n=U\left(t_n,\xi_j\right) \tag{۴۱}$$

برای گسسته‌سازی معادلات ۱ تا ۳، مشتقات مکانی با تفاضلات مرکزی و مشتقات زمانی با تفاضلات پیشرو تقریب زده می‌شوند. در این صورت، فرم گسسته‌ی معادلات ۱ تا ۳ به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}&\tfrac{h_j^{n+1}-h_j^n}{\Delta t}+\tilde{U}_j\tfrac{h_{j+1}^{n+1}-h_{j-1}^{n+1}}{2\Delta\xi}\\ &\quad+\tilde{h}_j\tfrac{U_{j+1}^{n+1}-U_{j-1}^{n+1}}{2\Delta\xi}=0\end{aligned} \tag{۴۲}$$

$$\begin{aligned}&\tfrac{U_j^{n+1}-U_j^n}{\Delta t}+\tilde{U}_j\tfrac{U_{j+1}^{n+1}-U_{j-1}^{n+1}}{2\Delta\xi}\\ &+g\tfrac{h_{j+1}^{n+1}-h_{j-1}^{n+1}}{2\Delta\xi}=-\tfrac{1}{m_b}\left[f_l(t)+f(t)\right]\end{aligned} \tag{۴۳}$$

$$m_b\ddot{x}=f_l(t)+f(t) \tag{۴۴}$$

کمیت‌های دارای علامت $\sim$، مقادیر میانی ضرایب غیرخطی هستند. برای تقابل با این غیر خطی‌گری‌ها، در هرگام زمانی فرض می‌شود که $\tilde{h}_j=h_j^n$ و $\tilde{U}_j=U_j^n$ در این صورت، تخمینی برای h_j^{n+1} و U_j^{n+1} حاصل شده و مقادیر $\tilde{h}_j$ و $\tilde{U}_j$ به‌روزرسانی می‌شوند. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف مقادیر لحظه‌یی و اخیر h و U به اندازه‌ی دلخواهی کوچک شود. سیستم گسسته‌سازی شده به‌صورت بلوک سه‌قطری زیر قابل بازنویسی است:

$$\begin{aligned}&-\tilde{\mathbf{A}}_j^{n+1}\mathbf{z}_{j-1}^{n+1}+\mathbf{B}^{n+1}\mathbf{z}_j^{n+1}+\tilde{\mathbf{A}}_j^{n+1}\mathbf{z}_{j+1}^{n+1}\\ &\quad=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}\mathbf{z}_j^n+\alpha^n\Delta t\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{۴۵}$$

و در آن،

$$\mathbf{z}_j^n=\begin{bmatrix}h_j^n\\U_j^n\end{bmatrix} \tag{۴۶}$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_j^{n+1}=\frac{\Delta t}{2\Delta\xi}\begin{bmatrix}\tilde{U}_j&\tilde{h}_j\\g&\tilde{U}_j\end{bmatrix};\,\mathbf{B}^{n+1}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix} \tag{۴۷}$$

$$\alpha^n=f_l(t)+f(t) \tag{۴۸}$$

برای استخراج معادلات گسسته در نقاط مرزی $j=1$ و $j=J$، از شرایط مرزی استفاده شده است. شرط مرزی در $x=0$ عبارت است از $U=0$. مدل گسسته‌ی این شرط به‌صورت زیر است:

$$U_1^n=0;\,\frac{U_0^n+U_2^n}{2}=0 \tag{۴۹}$$

که در آن، U_0^n یک نقطه‌ی مجازی در فاصله‌ی $\Delta\xi$ سمت چپ $x=0$ است. برای محاسبه‌ی شرط مرزی h در $x=0$ از قانون پایستگی جرم استفاده شده است:

$$h_t+\tilde{h}U_x=0\rightarrow\frac{h_1^{n+1}-h_1^n}{\Delta t}+\tilde{h}_1\frac{U_2^{n+1}}{\Delta\xi}=0 \tag{۵۰}$$

به همین ترتیب و برای $x = 1$ می‌توان نوشت:

$$U_J^n = 0;\ \frac{U_{J-1}^n + U_{J+1}^n}{2} = 0 \tag{51}$$

$$h_t + \tilde{h}U_\xi = 0 \rightarrow \frac{h_J^{n+1} - h_J^n}{\Delta t} - \tilde{h}_J \frac{U_{J-1}^{n+1}}{\Delta \xi} = 0 \tag{52}$$

که در آن، U_{J+1}^n یک نقطه‌ی مجازی در فاصله‌ی $\Delta\xi$ سمت راست $x = 1$ است. ترکیب معادلات ۴۹ و ۵۰ و همچنین معادلات ۵۱ و ۵۲ به تساوی‌های زیر منتهی می‌شود:

$$\mathbf{z}_1^{n+1} + \frac{\tilde{h}_1 \Delta t}{\Delta \xi}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{z}_2^{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{z}_1^n \tag{53}$$

$$-\frac{\tilde{h}_J \Delta t}{\Delta \xi}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{z}_{J-1}^{n+1} + \mathbf{z}_J^{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{z}_J^n \tag{54}$$

مجموعه‌ی معادلات ۴۵، ۵۳ و ۵۴، در هرگام زمانی $2J$ معادله با ماتریس ضرایب سه‌قطری را تشکیل می‌دهد. در هر مرحله، سیستم معادلات مزبور به روش گاوس ـ جوردن و معادله‌ی معمولی دینامیک سیستم (معادله‌ی ۴۴) به روش رانگ ـ کوتا حل می‌شوند. روش ارائه شده، یک روش به‌طورکامل ضمنی و به لحاظ ساختاری، اتلافی[12] است.

۲.۴. پارامترهای سیستم و ضرایب کنترلی

پارامترهای فیزیکی سیستم در نظرگرفته شده و ضرایب کنترلر فیدبک مرزی توسعه داده شده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.[3] همچنین، گام زمانی و گام مکانی به ترتیب ۰/۰۱ ثانیه و ۰/۸ سانتیمتر در نظرگرفته شده است. ضرایب کنترلی به نحوی انتخاب شده‌اند که پاسخ گذرای مطلوب به دست آید. این ضرایب باید شرایط معادله ۲۳ را احرازکنند. روش‌های متعددی برای تنظیم این ضرایب وجود دارد که بر اساس اعمال محدودیت بر روی پارامترهای پاسخ گذرای سیستم نظیر انحراف معیار، خطای RMS و زمان نشست هستند. اطلاعات تکمیلی در مراجع ارائه شده است.[23و24] توجه به این نکته ضروری است که گسسته‌سازی معادلات در روش عددی معرفی شده، فقط برای شبیه‌سازی است و هیچ تأثیری بر روند طراحی و اثبات پایداری کنترلر ندارد. تمام کدهای محاسباتی و رسم نمودارها در نرم افزار MATLAB ۲۰۱۸b انجام شده است.

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی سیستم شامل شرایط اوّلیه.

پارامتر	مقدار
m_b	$15Kg$
ρ	$1000Kg.m^{-3}$
l	$80\ cm$
$x(0)$	$0m$
$\dot{x}(0)$	$-0/5\,m.sec^{-1}$
$U(0,x)$	$0m.sec^{-1}$
$h(0,x)$	$4cm$

جدول ۲. ضرایب کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده.

پارامتر	مقدار
k_1	2
k_2	$0/5\,sec$
k_p	$4N.m^{-1}$
k_d	$25N.sec.m^{-1}$
x_{des}	$1m$

۳.۴. بررسی مقاومت کنترلر طراحی شده به کمک شبیه‌سازی

برای بررسی کارایی و مقاومت کنترلر ارائه شده نسبت به تأخیر و عدم قطعیت، سعی بر این بوده تا فقط در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مقداری تأخیر و عدم قطعیت در نظر گرفته شود. برای این هدف، فرض بر این است که تأخیری برابر با ۰/۲ ثانیه در اعمال کنترلر وجود دارد. همچنین، فرض بر این است که مقدار واقعی چگالی سیال، ۲۰ درصد کمتر از مقداری است که در جدول ۱ نوشته شده است (مقدار نامی). با یک نگاه کلی به سه شکل مزبور می‌توان دریافت که کنترلر طراحی شده قادر است سیستم مدار بسته را حتی در حضور تأخیر و عدم قطعیت پایدارکند.

شکل ۲. موقعیت جسم صلب به‌صورت تابعی از زمان تحت کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده بدون تأخیر وعدم قطعیت (آبی ممتد)، بخش تناسبی ـ مشتقی کنترلر طراحی شده بدون تأخیر و عدم قطعیت (سیاه نقطه‌چین) و کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده با تأخیر و عدم قطعیت (قرمز نقطه‌خط).

شکل ۳. سرعت خطی جسم صلب به‌صورت تابعی از زمان تحت کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده بدون تأخیر و عدم قطعیت (آبی ممتد)، بخش تناسبی ـ مشتقی کنترلر طراحی شده بدون تأخیر و عدم قطعیت (سیاه نقطه‌چین) و کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده با تأخیر و عدم قطعیت (قرمز نقطه‌خط).

شکل ۴. کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده بدون تأخیر و عدم قطعیت (آبی ممتد)، بخش تناسبی ـ مشتقی کنترلر طراحی شده بدون تأخیر و عدم قطعیت (سیاه نقطه‌چین) و کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده با تأخیر و عدم قطعیت (قرمز نقطه‌خط).

جدول ۳. مشخّصات پاسخ گذرای سیستم مدار بسته تحت کنترلر فیدبک مرزی (BFC) و تناسبی ـ مشتقی مرتبط (PD) و فیدبک مرزی با تأخیر و عدم قطعیت (BFC − DU).

کنترلر	BFC	PD	BFC − DU
زمان نشست (٪۲)	$۱۹/۶۷sec$	$۳۰/۷۷sec$	$۱۸/۱۲sec$
بیشینه‌ی فروجهش	٪۴۶/۵	٪۷۱/۳	٪۵۷/۸۴
خطای RMS	۰/۵۰۳	۰/۶۹۲	۰/۵۵۲
$\max_t \lvert f(t) \rvert$	$۱۶/۵N$	$۲۷/۵N$	$۱۶/۹N$

۴.۴. نتایج و مقایسه

شکل ۲، نمودار موقعیت لحظه‌یی جسم صلب را تحت کنترلر فیدبک مرزی و همچنین تحت بخش تناسبی ـ مشتقی همین کنترلر نشان می‌دهد. نمودار به خوبی نمایشگر مزیت نسبی کنترلر فیدبک مرزی در رفتارگذرای سیستم مدار بسته است. در ضمن، در این شکل وجود اندکی فراجهش در شرایط وجود تأخیر و عدم قطعیت مشهود است. در شکل ۳، نمودار سرعت خطی جسم صلب بر حسب زمان تحت دو کنترلر مورد بحث و همچنین در حالت حضور تأخیر و عدم قطعیت نشان داده شده است.

نمودار تلاش کنترلی برای کنترلر فیدبک مرزی در حضور و عدم حضور تأخیر و عدم قطعیت و همچنین کنترلر تناسبی ـ مشتقیِ مربوط، در شکل ۴ آورده شده است. مطابق شکل، تلاش کنترلی کنترلر فیدبک مرزی، کمی سریع‌تر از بقیه همگرا می‌شود. نکته‌ی دیگر این است که ضرایب کنترلی انتخاب شده در جدول ۲، از عبور تلاش کنترل فیدبک مرزی از حدّ ۱۶/۵ نیوتون جلوگیری می‌کند که ۴۰ درصد از مقدار بیشینه‌ی کنترلر تناسبی ـ مشتقی مرتبط، کمتر است. برای مقایسه‌ی بهتر دو کنترلر فیدبک مرزی و تناسبی ـ مشتقی، برخی از مشخصات پاسخ گذرای سیستم مدار بسته (شامل زمان نشست،[13] بیشینه‌ی فروجهش،[14] خطای RMS و مقدار بیشینه‌ی سیگنال کنترلی) تحت این دو کنترلر و همچنین کنترلر فیدبک مرزی با تأخیر و عدم قطعیت، در جدول ۳ آورده شده است که نتایج ذکر شده را تأیید می‌کند.

شکل ۵ نمایشی از عمق سیال درون حفره تحت کنترلر فیدبک مرزی طراحی شده است. این شکل به خوبی رفتار مجانبی عمق سیال را به سمت حالت پایای

شکل ۵. عمق سیال درون حفره تحت کنترلر فیدبک مرزی به‌صورت تابعی از بُعد افقی حفره و زمان.

شکل ۶. سرعت سطح آزاد سیّال درون حفره تحت کنترلر فیدبک مرزی بر حسب زمان در سه نقطه‌ی $\xi = ۱۶cm$ (آبی ممتد)، $\xi = ۴۰cm$ (سیاه نقطه‌چین) و $\xi = ۷۲cm$ (قرمز نقطه‌خط).

خود (h^*) نشان می‌دهد. نکته‌ی مهم دیگر این نمودار، اثبات معادله ۵ در هر لحظه از زمان است. در نهایت و در شکل ۶، نمودار سرعت سیال در سه نقطه از سطح آزاد به صورت تابعی از زمان آورده شده است. نمودار مابقی نقاط سطح آزاد نیز این چنین رفتاری دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بعد از حدود ۱۰ ثانیه، سرعت سطح آزاد و در ادامه آن سرعت تمام المان‌های سیال (به دلیل فرض شتاب عمودی صفر در سیال کم‌عمق) به صفر می‌رسد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به مسئله‌ی کنترل ردیابی مسیر برای یک جسم صلب با وجود تلاطم سیال کم‌عمق پرداخته شده است. به‌طور خلاصه، حرکت افقی یک جسم صلب دارای حفره در نظر گرفته شد؛ به‌طوری که حفره نیمه‌پر از یک سیال نیوتونی، تراکم‌ناپذیر، غیرلزج (اما چرخشی) و کم‌عمق است. سیستم معادلات حاکم بر مسئله‌ی مزبور، شامل دو معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌یی، غیرخطی و هذلولوی موسوم به معادلات سنت ـ ونانت (حاکم بر دینامیک سیال) و یک معادله‌ی معمولی (حاکم بر دینامیک جسم صلب) می‌شود. بنابراین، این معادلات یک سیستم کوپل پاره‌یی ـ معمولی را تشکیل

می‌دهند. بر مبنای سیستم اشاره شده و بدون هیچگونه ساده‌سازی، خطی‌سازی و گسسته‌سازی، یک کنترلر فیدبک مرزی طراحی شد که قادر است تمام حالات بعد محدود (جسم صلب) و بی‌نهایت درجه آزادی (سیال) را پایدار و جسم صلب را به سمت موقعیت دلخواه هدایت کند. در نهایت، پایداری مجانبی سیستم مدار بسته با استفاده از نظریه‌ی لیاپانوف اثبات شد. مزایای روش ارائه شده در مقایسه با پژوهش‌های مرتبط پیشین عبارت است از: (الف) برای محاسبه‌ی سیگنال لحظه‌یی کنترلر، استفاده از حسگرهای پرکاربرد نظیر پتانسیومتر و فشارسنج (در مرز سیال) کفایت می‌کند. (ب) نیروی کنترلی طراحی شده فقط به جسم صلب وارد می‌شود و به هیچ عملگری در محدوده‌ی سیال نیازی نیست. (ج) رفتارگذرای مدار بسته تحت کنترلر ارائه شده بسیار بهتر از رفتارگذرا تحت کنترلر تناسبی ـ مشتقی است. (د) روش ارائه شده نسبت به وجود تأخیر زمانی در اعمال کنترلر و عدم قطعیت در پارامترهای سیستم، مقاوم است. طراحی یک مشاهده‌گر مرزی برای حذف فشارسنج در مرز سیال می‌تواند موضوعی چالش برانگیز برای پژوهش‌های آینده باشد. یکی دیگر از مسائل موجود برای بررسی در پژوهش‌های آینده، استخراج یک کنترلر مقاوم نسبت به عدم قطعیت‌های سیستم با مکانیزمی برای جبران تأخیر[15] و همچنین اثبات پایداری سیستم مدار بسته تحت این کنترلر است.

پانوشت‌ها

1. Sloshing
2. De Saint-Venant
3. Shallow-Sloshing
4. Spillover Instability
5. Boundary Feedback
6. Thruster
7. Cooker's Equation
8. PDE-ODE Cascade
9. Spill-Free
10. LaSalle's Invariance Principle
11. Fully Implicit
12. Dissipative
13. Settling Time
14. Maximum Under-Shoot
15. Delay-Compensated

منابع (References)

1. Jokar, M., Salarieh, H. and Pishkenari, H.N., 2022. Satellite attitude PDE-based controller design considering fluid fuel sloshing in planar maneuver. *Aerospace Science and Technology*, *122*, 107366. https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107366.
2. Navabi, M. and Davodi, A., 2019. Modeling of fuel sloshing in a spacecraft and control it by active control method using nonlinear control. *Modares Mechanical Engineering*, *19*(9), pp.2121-8. http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1398.19.9.2.2.
3. Berger, T., Puche, M. and Schwenninger, F.L., 2022. Funnel control for a moving water tank. *Automatica*, *135*, 109999. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109999.
4. Moriello, L., Biagiotti, L., Melchiorri, C. and Paoli, A., 2018. Manipulating liquids with robots: A sloshing-free solution. *Control Engineering Practice*, *78*, pp.129-41. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.06.018.
5. Kim, Y., Nam, B., Kim, D. and Kim, Y., 2007. Study on coupling effects of ship motion and sloshing. Ocean Engineering, *34*(16), pp.2176-87. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.03.008.
6. De St Venant, B., 1871. Theorie du mouvement non-permanent des eaux avec application aux crues des rivers et a l'introduntion des Marees dans leur lit. *Academic de Sci Comptes Redus*, *73*(99), pp.148-54.
7. Ardakani, H.A. and Bridges, T.J., 2010. Dynamic coupling between shallow-water sloshing and horizontal vehicle motion. *European Journal of Applied Mathematics*, *21*(6), pp.479-517.
8. Bresch, D., Noble, P. 2007. Mathematical justification of a shallow water model. *Methods and Applications of Analysis*, *14*(2), pp.87-118.
9. Chin-Bing, S., Jordan, P. and Warn-Varnas, A., 2011. A note on the viscous, 1D shallow water equations: Traveling wave phenomena. *Mechanics Research Communications*, *38*(5), pp.382-7. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2011.05.003.
10. Zhang, T. and Yang, J., 2019. Nonlinear dynamics and robust control of sloshing in a tank. *Journal of Vibration and Control*. *25*(1), pp.132-40. https://doi.org/10.1177/1077546318772256.
11. Alshaya, A. and Alshayji, A., 2021. Robust multi-steps input command for liquid sloshing control. *Journal of Vibration and Control*, 10775463211017721. https://doi.org/10.1177/10775463211017721.
12. Hamaguchi, M., 2019. Damping control of sloshing in liquid container in cart with active vibration reducer: The case of a curved path on a horizontal plane. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, *24*(1), pp.361-72. https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2892089.
13. Han, Z., Liu, Z., Kang, W. and He, W., 2021. Boundary feedback control of a nonhomogeneous wind turbine tower with exogenous disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *67*(4), pp.1952-9. https://doi.org/10.1109/TAC.2021.3071021.
14. Ataei, M.M., Nejat, H. and Salarieh, H., 2022. Simultaneous attitude and bending-torsional-vibration control of a satellite with multi-section flexible panels using PDE based boundary control-observer. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*.
15. Saltari, F., Traini, A., Gambioli, F. and Mastroddi, F., 2021. A linearized reduced-order model

approach for sloshing to be used for aerospace design. *Aerospace Science and Technology*, *108*, 106369. https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106369.

16. Bastin, G., Coron, J.M. and Hayat, A. 2021. Feedforward boundary control of 2× 2 nonlinear hyperbolic systems with application to Saint-Venant equations. *European Journal of Control*, *57*, pp.41-53. https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2020.11.002.
17. Coron, J.M., Hayat, A., Xiang, S. and Zhang, C., 2022. Stabilization of the linearized water tank system. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, *244*(3), pp.1019-97. https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.08293.
18. Diagne, A., Diagne, M., Tang, S. and Krstic, M., 2017. Backstepping stabilization of the linearized Saint-Venant-Exner model. *Automatica*, *76*, pp.345-54. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.10.017.
19. Diagne, M., Tang, S.X., Diagne, A. and Krstic, M., 2017. Control of shallow waves of two unmixed fluids by backstepping. *Annual Reviews in Control*, *44*, pp.211-25. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.09.003.
20. Hayat, A. and Shang, P., 2019. A quadratic lyapunov function for Saint-Venant equations with arbitrary friction and space-varying slope. *Automatica*, *100*, pp.52-60. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.10.035.
21. Karafyllis, I., Vokos, F. and Krstic, M., 2022. Feedback stabilization of tank-liquid system with robustness to wall friction. *ArXiv Preprint PrXiv*, 220601385. https://doi.org/10.1051/cocv/2022076.
22. Karafyllis, I. and Krstic, M. 2022. Spill-free transfer and stabilization of viscous liquid. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *67*(9), pp.4585-4597. https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3162551.
23. Keighobadi, J., KhalafAnsar, H.M. and Naseradinmousavi, P., 2022. Adaptive neural dynamic surface control for uniform energy exploitation of floating wind turbine. *Applied Energy*, *316*, 119132. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119132.
24. Moghanni-Bavil-Olyaei, M.R., Keighobadi, J., Ghanbari, A. and Olegovna Zekiy, A., 2022. Passivity-based hierarchical sliding mode control/observer of underactuated mechanical systems. *Journal of Vibration and Control*, 10775463221091035. https://doi.org/10.1177/10775463221091035.
25. Jokar, M., Salarieh, H. and Pishkenari, H.N., 2022. Observer-based boundary feedback control for attitude tracking of rigid bodies with partially liquid-filled cavities. *Aerospace Science and Technology*, 108068. https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.108068.
26. Ardakani, H.A., 2010. Rigid-body motion with interior shallow-water sloshing: University of surrey (United Kingdom).
27. Khalil, H.K., 2015. Nonlinear control: Pearson New York. *406*.

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۹۳-۱۰۶، (پژوهشی)

Original Article

شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل تئوری جریان نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانس

سید امیرحسین زمزمیان* (دانشیار)
سهیل رضازاده مفردنیا (کارشناس همکار)
محمدرضا پازوکی (کارشناس همکار)
پژوهشگاه مواد و انرژی، گروه پژوهشی انرژی خورشیدی
محمد پازوکی (استاد)
پژوهشگاه مواد و انرژی، گروه پژوهشی محیط زیست

در این مقاله، با بررسی‌های جامع کتابخانه‌یی، اطلاعات قابل قبولی در راستای ایجاد نانو روغن بهینه در محدوده عملیاتی به دست آمده است. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی همزمان پدیده‌های انتقال، شرایط سیالات در حضور نانوذرات و اصول القای الکترومغناطیسی و عایقی الکتریکی در داخل ترانسفورماتورهای توزیع یا قدرت انجام شده است. نتایج نظری مستخرج از مراحل شبیه‌سازی بر روی نمونه‌های طراحی شده و اطلاعات جامع برای نانوذرات هیبریدی و تأثیرپذیری آنها در فرایند آزمایشگاهی و در پایان، ارائه راهکارهای بهبود خواص کاهش یافته در ترانسفورماتورهای روغنی از نوآوری‌های اساسی در مطالعه می‌باشد. به این ترتیب، برای تعیین روش پژوهش، با توجه به بررسی‌های انجام شده، نانوذرات CuO، TiO_2، Al_2O_3، SiO_2 و MWCNT به‌صورت نانو ساختارهای هیبریدی معلق در روغن ترانس در نظر گرفته شده است که در واقع بیشترین کاربرد را در تحقیقات به خود اختصاص داده‌اند. علاوه بر تعیین نوع نانوذرات منتخب، از دیگر دستاوردهای مهم این پژوهش می‌توان به یافتن بهترین ترکیب برای افزایش هدایت حرارتی و اصول هدایت الکتریکی و شاخص‌های استاندارد صنایع تولید ترانسفورماتورها اشاره کرد. برای آغاز مراحل آزمایشگاهی، بهترین و بهینه‌ترین دستورالعمل استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌یی عملکرد ترانسفورماتور در زمان استفاده از نانوروغن‌های مختلف می‌باشد که در گام بعدی، این شبیه‌سازی در نرم‌افزار صورت گرفته است تا بتوان نانو ذرات مختلف را به‌صورت دقیق اولویت‌بندی کرد.

واژگان کلیدی: روغن ترانسفورماتور، نانوسیال بر پایه روغن، نانوذرات هیبریدی، انتقال حرارت، خنک‌کاری.

azamzamian@merc.ac.ir
srezazadeh69@gmail.com
pazoukim.reza@gmail.com
m.pazouki@merc.ac.ir

۱. مقدمه

ترانسفورماتورها تجهیزاتی هستند که انرژی الکتریکی را در یک سیستم جریان متناوب از یک مدار به مدار دیگر منتقل می‌کنند و ولتاژ کم را بـه ولتاژ زیاد و بالعکس تبدیل می‌نمایند. بر خلاف ماشین‌های الکتریکی که انرژی الکتریکی و مکانیکی را به یکدیگر تبدیل می‌کنند، در ترانسفورماتورها، انرژی به همان شکل الکتریکی باقیمانده و فرکانس آن نیز تغییر نمی‌کند و فقط مقادیر ولتاژ و جریان در اولیه و ثانویه متفاوت خواهد بود. ترانسفورماتورها نه تنها به عنوان اجزاء اصلی سیستم‌های انتقال و پخش حامل‌های انرژی مطرح هستند، بلکه در تغذیه مدارهای الکترونیکی و کنترل، یکسوسازی، اندازه‌گیری و کوره‌های الکتریکی نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند. ترانسفورماتورها یکی از پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده در صنعت هستند. ترانسفورماتورها را می‌توان از جهات مختلف دسته‌بندی کرد. یکی از انواع

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۲۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۴، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۷.

استناد به این مقاله:
زمزمیان، سید امیرحسین، رضازاده مفردنیا، سهیل، پازوکی، محمدرضا، و پازوکی، محمد، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل تئوری جریان نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانس. مهندسی مکانیک شریف، (۳۹)۲، صص. ۹۳-۱۰۶. DOI:10.24200/J40.2023.61526.1662

این دسته‌بندی‌ها که در واقع موضوع مطالعه حاضر است، نحوه خنک کردن آنها است. بر این اساس، ترانسفورماتورها به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱. ترانس‌های روغنی؛

۲. ترانس‌های هواخنک یا خشک (رزینی).

عواملی مانند مقاومت الکتریکی سیم پیچ‌ها، تلفات پسماند و عوامل متعدد دیگر می‌توانند موجب اتلاف حرارتی در ترانس شوند. در ترانسفورماتورهای روغنی، برای انتقال حرارت ایجاد شده در داخل ترانسفورماتور به محیط اطراف، از روغن به عنوان واسطه حرارتی استفاده می‌شود. در این راستا، حرارت قطعات به روغن منتقل شده و این حرارت از طریق جداره‌های تانک که با محیط پیرامون در ارتباط است، به بیرون انتقال می‌یابد. در طی این فرایند، تا زمانی که مقدار گرمای ایجاد شده برابر با مقدار گرمای انتقالی توسط روغن شود، روغن شروع به گرم شدن می‌کند. در ترانسفورماتورهای قدرت، مسئله انتقال حرارت و خنک نگه داشتن ترانسفورماتور از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر دمای روغن ترانسفورماتور بیش از حد افزایش یابد، علاوه بر اینکه اجزای ترانسفورماتور آسیب می‌بینند و عملکرد آنها کاهش می‌یابد، اگر دمای آن از حد معینی فراتر رود، ترانسفورماتور به‌طور کامل از مدار خارج خواهد شد. بنابراین، تلاش برای بهبود عملکرد حرارتی ترانسفورماتور موجب بالا رفتن بازده، افزایش طول عمر و کوچک شدن آن می‌شود که این مسائل به نوبه خود باعث کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. یکی از روش‌های اساسی انتقال حرارت، استفاده از نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتور است که با افزودن نانوذرات به درون روغن ترانسفورماتور و سپس پراکندگی و پایدارسازی نانو روغن حاصل به دست می‌آید. به‌منظور افزایش عملکرد انتقال حرارت در روغن ترانسفورماتور، از افزایش هدایت حرارتی روغن استفاده می‌شود. محیط‌های انتقال حرارت در روغن ترانسفورماتور خالص، از ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به فلزات پایه، اکسیدهای فلزی و ترکیبات بر پایه کربن برخوردارند. برای افزایش هدایت حرارتی از تعلیق و پراکندگی کامل نانوذرات جامد با اندازه نانومتری در سیال پایه روغن خالص استفاده می‌شود.[۱]

در دهه‌های گذشته، پژوهش‌هایی در رابطه با انتقال حرارت جابجایی با استفاده از سوسپانسیون پایدار ذرات جامد در ابعاد نانومتری در سیالات پایه خالص صورت گرفته است. بررسی‌های اخیر در رابطه با نانوسیال‌ها، که معمولاً به چنین سوسپانسیون‌هایی گفته می‌شود، نشان می‌دهد که نانوذرات معلق به‌طور قابل توجهی خواص انتقال و ویژگی‌های انتقال حرارت سوسپانسیون را تغییر می‌دهند.[۲]

به‌عنوان مثال، صادق مقانلو و همکاران ایشان در پژوهشی جدید نشان دادند که پراکنده‌سازی نانوذرات اکسید آلومینیوم با غلظت ۰/۳ درصد وزنی درون روغن عایق و میدان الکتریکی قوی ۱۵/۵۱ kV می‌تواند انقال حرارت را تا ۵۲ درصد بهبود بخشد که این امر در عملیات خنک‌کاری ترانسفورماتورهای روغنی می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.[۳]

قدیمی‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، کلاس جدیدی از سیالات دی‌الکتریک کلوئیدی با اصلاح فروسیال‌های مبتنی بر روغن معدنی برای افزایش عملکرد دی‌الکتریک را توسعه داده است. در ترکیب بهینه، عایق کلوئیدی دارای قدرت شکست جریان متناوب AC با فرکانس ۶۰ هرتز نزدیک به روغن سیال حامل[۱] است، در حالی‌که مقاومت ولتاژ ضربه‌یی آن در هندسه سوزن به کره بهبود یافته است. برای سوزن مثبت، ولتاژ شکست ضربه‌یی تا ۵۰ درصد در مقایسه با روغن معدنی خشک و گاز زدایی شده توسط اکسون یونیولت ۶۰ افزایش یافته است. برای سوزن منفی، مقدار شکست نزدیک به حامل روغن باقی می‌ماند، به نحوی که این دو مقدار در واقع برابر هستند. ولتاژ شروع تخلیه جزئی[۲] در جریان متناوب با فرکانس ۶۰ هرتز، ۵۰۰ ولت بر ثانیه بهبود یافته، است. از سوی دیگر، هندسه سوزن به کره نشان داده که تا ۳۰ درصد افزایش یافته است. به این ترتیب، عایق کلوئیدی جدید، تغییر کمی در مقاومت الکتریکی و ویسکوزیته سینماتیکی پس از پیری سریع در درجه حرارت ۱۸۵ درجه سانتیگراد نشان داده است.[۴] نانوسیالات به‌عنوان یک جایگزین برجسته و امیدوارکننده دی‌الکتریک مایع در کاربردهای صنعتی ظهور کرده‌اند. برای اولین بار، کاربرد ورق‌های گرافن آمورف[۳] یا نانوسیال‌های تزریق شده صورت پذیرفت که قدرت شکست دی‌الکتریک و خواص حرارتی بسیار تقویت شده‌یی را ارائه داده است. پراکندگی همگن پایدار، بدون سورفکتانت و رقیق یک نانوماده دی‌الکتریک دو بعدی جدید با ورق‌های گرافن آمورف در روغن ترانسفورماتور و توسط نانو پرکننده‌هایی با غلظت کمتر حدود ۰/۰۱-۰/۰۰۱۲ درصد وزنی انجام شده است. این نوع نانوسیالات به‌طور هوشمندانه مدیریت حرارتی و الکتریکی با عملکرد و کارایی مؤثر را با مقاومت بالا و تلفات اندک در مقایسه با روغن پایه تأمین خواهد کرد. هدایت حرارتی بالا، عملکرد دی‌الکتریک برتر، همراه با روش سنتز کم هزینه، باعث شده است تا این نانوسیالات هیبریدی یا ترکیبی را به‌عنوان یک درخواست جدید برای کاربردهای واقعی در ترانسفورماتورهای الکتریکی قدرت و همچنین در سیستم‌های مدیریت انرژی حرارتی معرفی و فعال نماید.[۵] داده‌های آماری موجود از خرابی ترانسفورماتورها نشان می‌دهد که میانگین عمر ترانسفورماتورها حدود ۱۸ سال است که تقریباً نیمی از عمر برای آنها یعنی ۳۶ الی ۴۴ سال کاملاً قابل پیش بینی است و معادل $\frac{1}{3}$ ترانسفورماتورهای فشار قوی یا قدرت به دلیل خرابی عایق یا انتقال حرارت از بین رفته است.[۶] در حال حاضر در نیروگاه‌ها و یا سیستم‌های تأمین برق غالباً از دو نوع ترانسفورماتور استفاده می‌شود که عبارتند از ترانسفورماتورهای نوع خشک و ترانسفورماتورهای نوع روغنی و در میان آنها ترانسفورماتورهای روغنی بیشترین کاربرد را برای سیستم توزیع دارند. مکانیزم شکست پیشنهادی روغن ترانسفورماتور توسط نانو پرکننده‌ها[۴] ارائه شده است. مکانیسم‌های پیشنهادی بر اساس نتایج اعوجاج الکتریسیته ناشی از تجمع بار بر روی سطوح نانوذرات در مواجهه با میدان الکتریکی خارجی است. عوامل مختلف موثر بر قدرت شکست روغن ترانسفورماتور توسط نانو پرکننده‌ها در نظر گرفته شده است. این عوامل عبارتند از دمای روغن، نوع، غلظت و اندازه نانوپرکننده‌ها. بنابراین، قدرت شکست روغن ترانسفورماتور نانو پر شده به‌صورت تجربی در دماهای ۳۵، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی گراد ارزیابی می‌شود تا شرایط عملیاتی واقعی از حالت بدون بار تا شرایط بار سنگین شبیه سازی شده است. انواع مواد نانوپرکننده مورد تأیید شامل: SiO_2، TiO_2 و ZrO_2 با در نظر گرفتن اندازه ذرات به‌طور یکسان برای هرکدام ۲۵ نانومتر هستند. انواع مواد انتخاب شده دارای ضرایب نسبی متفاوت به میزان ۴/۳، ۷۰ و ۱۰۰ به ترتیب برای SiO_2، ZrO_2 و TiO_2 هستند. سطوح غلظت مواد نانوپرکننده مورد مطالعه ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین، تأثیر اندازه ذرات بر قدرت شکست با در نظر گرفتن نانوذرات TiO_2 با اندازه ذرات ۲۵ نانومتر و ۱۰۰ نانومتر در سطوح غلظت اتخاذ شده مورد مطالعه قرار گرفته است. تست مقاومت شکست بر روی تمام نمونه های آماده شده بر اساس روش آزمون استاندارد ASTM D۱۶۹۳ برای تمام نمونه‌های آماده شده انجام شده است. به‌طور کلی نکات به شرح توضیحات ذیل نتیجه گیری شده است:

- نوع مواد پرکننده نانو تأثیر به‌سزایی بر ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور نانو پر شده دارد. مواد با گذردهی بالاتر منجر به افزایش بیشتر ولتاژ شکست نانوسیالات می‌شوند؛

- افزایش دمای روغن منجر به افزایش درصد افزایش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور نانو پر شده تا دمای ۷۰ درجه سانتی گراد می‌شود. سپس، کاهش ولتاژ شکست رخ می‌دهد؛
- کاهش اندازه نانوذرات منجر به افزایش بیشتر ولتاژ شکست نانوسیال روغن ترانسفورماتور می‌شود؛
- بر اساس ساز و کار پیشنهادی، دو عامل اساسی موثر بر قدرت شکست وجود دارد. این عوامل عبارتند از: ۱. به دام انداختن بار و ۲. اعوجاج میدان الکتریکی.
- به دام انداختن شارژ، قدرت شکست نانوسیال روغن ترانسفورماتور را افزایش می‌دهد و در سطوح پایین‌تر غلظت نانوپرکننده غالب است؛
- اعوجاج میدان الکتریکی قدرت شکست را کاهش می‌دهد و اثر آن در سطوح غلظت بیشتر ظاهر می‌شود.[۷]

فاینمن[۵] مفهوم نانوفنّاوری را در سال ۱۹۵۹ ارائه کرده است.[۸] تاکنون این مفهوم در چندین شاخه علم و به‌طور خاص در علوم مواد، فیزیک و مهندسی اجرا شده است. نانوفنّاوری به‌منظور بهبود خاصیت مواد از ایجاد تغییرات در سطح مواد و در مقیاس نانو بهره می‌برد. مفهوم مشابهی در سیالات دی‌الکتریک وجود دارد که به منظور بهبود خواص حرارتی و دی‌الکتریک مایعات از این مواد نانو بهره گرفته می‌شود. نانوسیالات، ذرات با اندازه نانو هستند که به‌طور همگن در سیال پایه معلق هستند و توسط چوی و ایستمن در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است.[۹] از نظر کاربردی، انواع مختلفی از نانومواد تاکنون به روش‌های سنتزی تولید و مشخصه‌یابی شده‌اند. البته در این میان نانوذرات اکسیدهای فلزی بسیار مهم هستند و می‌توانند در زمینه‌های مختلف مانند سیال‌کاری و به ویژه به‌عنوان فعالیت روغن ترانسفورماتور کاربرد داشته باشند. در بین این نانوذرات اکسیدی نیز SnO_2، Fe_2O_3، ZnO، TiO_2، CuO جزء برترین‌ها هستند. نسبت مساحت سطح به حجم این نانوساختارها بسیار بزرگ بوده و لذا می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند. تاکنون روش‌های زیادی برای تهیه این نانوذرات اکسیدی گزارش شده است. با این حال، روش رایج در صنعت مواد، سل ـ ژل یا تکنیک شیمی نرم است. به‌طور کلی، برای دستیابی به این روش نیاز به نیترات یا استات‌های فلزی و چند عامل پوشش دهنده مطابق شکل ۱ است.[۱۰]

شکل ۱. روش های متداول برای تهیه نانوذرات.

در روش تک مرحله‌یی، نانوذرات آماده شده و در سیال پایه پراکنده و کاملاً می‌شوند. از مراحل مختلف مانند خشک کردن تبخیری، ذخیره‌سازی و حمل و نقل به‌منظور افزایش پایداری ذرات و همچنین به حداقل رساندن تجمع یا به هم چسبیدن نانوذرات اجتناب می‌شود. با این حال، این روش پر هزینه است و نمی‌توان آن را در مقیاس بزرگ تولید کرد.[۱۱] در روش دو مرحله‌یی، ابتدا نانوذرات با استفاده از روش‌های شیمیایی یا فیزیکی با هم یکی می‌شوند. سپس، نانوذرات خشک با کمک روش‌های مختلف مخلوط کردن مانند آسیاب گلوله‌یی، اختلاط با برش بالا،[۶] اختلاط اولتراسونیک یا مغناطیسی به‌طورکامل در سیال حامل معلق و پراکنده می‌شوند. این فرایند شامل مراحل زیادی است، بنابراین شانس چسبیدن ذرات به یکدیگر بیشتر است اما هزینه تولید کاهش می‌یابد و می‌توان در مقیاس بزرگ از آن بهره برد. در همین راستا، محققان مختلف این روش را ترجیح می‌دهند. برای جلوگیری از چسبیدن ذرات به یکدیگر، ته‌نشینی و افزایش پایداری ذرات از انواع مختلفی از سورفکتانت‌ها یا مواد فعال‌کننده سطحی استفاده می‌شود.[۱۲] یکی از سورفکتانت‌های رایج اسید اولئیک و سایر سورفکتانت‌های مورد استفاده عبارتند از: اسید استئاریک، پروپیلن گلیکول، سوربیتان مونولئات، اسپن ۸۰ و سدیم دودسیل بنزن سولفونات. پراکندگی مغناطیسی با زاویه کوچک نوترون‌های غیرقطبی و قطبی شده از فروسیال‌ها (مگنتیت پوشیده شده توسط اسید اولئیک در بنزن) تجزیه و تحلیل می‌شود. در این حالت، یک همبستگی پیچیده در ساختار مغناطیسی مشاهده می‌شود که در اندازه طولی بیش از اندازه ذرات اتفاق می‌افتد و ساختار پوسته مانندی دارد. علاوه بر آن، هیچ همبستگی خاصی بین ذره‌یی فضایی در ساختار هسته‌یی تشخیص داده نمی‌شود. ویژگی‌های ساختار مغناطیسی مگنتیت/اسید اولئیک/فروسیال بنزن که با استفاده از پراکندگی زاویه‌یی کوچک نوترون‌های غیرقطبی و قطبی شده تعیین می‌شود، نشان‌دهنده حالت یا شرایط مغناطیسی کردن موضعی پیچیده در سیال است. سه اندازه مغناطیسی مشخصه برای سیالات با غلظت مگنتیت در محدوده ۱ الی ۱۰ درصد حجمی مشاهده شده است. به این ترتیب، آنها با فواصل طولی ۲ الی ۵، ۵ الی ۲۰ و۲۰ الی ۳۰ نانومتر مطابقت دارند.[۱۳] از ملاحظات اصلی و اساسی این مطالعه می‌توان به این نکته اشاره کرد که تاکنون چندین پژوهشگر گزارش کرده‌اند که استفاده از نانوذرات مختلف در روغن ترانسفورماتورهای توزیع یا قدرت، موجب بهبود خواص حرارتی و دی‌الکتریک شده و می‌تواند در مقایسه با سیال پایه همزمان به‌عنوان بهترین عایق و خنک‌کننده عمل کند. به‌عنوان مثال، نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتور شامل نانوذرات اکسید زیرکونیوم[۷] و اکسید سریم[۸] با غلظت نانوذرات ۰/۵ درصد وزنی به روش دو مرحله‌یی سنتز شده و افزایش ولتاژ شکست را نشان داده است.[۱۴] از طرف دیگر، روش دو مرحله‌یی برای سنتز اکسید تیتانیوم[۹] و اکسید آلومینیوم یا آلومینا[۱۰] با نسبت‌های وزنی مختلف ۰/۰۱، ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱ گرم بر لیتر و همچنین مواد فعال‌کننده سطحی یا سورفکتانت برای نشان دادن بهبود یا افزایش قدرت شکست استفاده شده است.[۱۵] نیاریکا بارواه و همکاران، نانوذرات نیترید بور شش ضلعی لایه لایه شده[۱۱] را سنتز کرده و در روغن ترانسفورماتور خالص و همچنین روغن گیاهی با غلظت های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و همچنین ۰/۱ درصد وزنی پراکنده کرده‌اند که افزایش قدرت دی‌الکتریک را نشان داده است.[۱۶] محمود حسین و همکاران، از غلظت‌های مختلف فریت نیکل منگنز نانوکریستالی یعنی نانوکریستال $Mn_{0/2}Ni_{0/8}Fe_2O_4$ استفاده کرده‌اند و افزایش قدرت دی‌الکتریک را برای تمام غلظت‌ها تعیین کرده‌اند. با این حال، غلظت ۰/۰۴ گرم بر لیتر افزایش بیشتری در ولتاژ شکست حدود ۴۲/۳ درصد نسبت به سایر غلظت‌ها نشان داده است. به این ترتیب، ارزیابی‌های آزمایشگاهی تأیید کرده است که نانوکریستال فریت

نیکل منگنز ویژگی‌های دی‌الکتریک روغن ترانسفورماتور را به خوبی بهبود داده است.[۱۷]

با توجه به موارد اشاره شده، در مطالعه دیگری که توسط زینالی هریس و همکاران صورت گرفته است، ابتدا و در گام نخست، نانوذرات حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) که با نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2) آغشته شده و تحت تأثیر آن قرارگرفته‌اند سنتز شده و با اسید اولئیک اصلاح شدند و مواد سنتز شده با استفاده از آنالیزهایی از جمله FTIR، XRD، SEM و EDX تایید شده‌اند. سپس، تأثیر نانوسیال‌های روغن ترانس/نانولوله‌های کربنی چنددیواره همراه با نانوذرات اکسید تیتانیوم با درصدهای جرمی مختلف به‌صورت نانوذرات هیبریدی و توان‌های ورودی مختلف شامل: ۵/۵۰، ۷۵/۶، ۱۰۰ و ۱۲۴ وات بر حسب انتقال حرارت جابجایی طبیعی، عدد ناسلت، عدد رایلی و عدد گراشوف و در شرایط جریان هوای آزاد ارزیابی شده است. همچنین، تأثیر درصدهای جرمی مختلف نانوذرات هیبریدی بر مقدار ولتاژ شکست بر حسب کیلوولت و ویژگی‌های ترموفیزیکی روغن ترانسفورماتور، مانند ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه حجمی، مقاومت و انتشار مورد بررسی قرارگرفته است. علاوه بر این، اثرات جریان هوای اجباری که با دو دمنده در اطراف سیستم آزمایشگاهی نصب شده، بر روی انتقال حرارت روغن ترانسفورماتور بررسی شده است.[۱۸] در پژوهشی دیگر و به‌منظور ملاحظه و تأیید موضوع استفاده از نانوذرات پایه کربنی، اثر افزودن نانوذرات حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره غیرکووالانسی عامل‌دار و نانولوله‌های کربنی چند جداره هیدروکسیله شده با عامل OH (MWCNTs-OH) به‌عنوان نانو مواد افزودنی برای بهبود خواص حرارتی روغن ترانسفورماتور خالص و نیز بر روی ولتاژ شکست در داخل یک محفظه مستطیلی مطالعه شده است. نکته نوآورانه پژوهش مذکور، استفاده از نانولوله‌های کربنی چند جداره هیدروکسیله و غیرکووالانسی عامل‌دار شده کووالانسی در روغن ترانسفورماتور است و دلیل انتخاب این نانوذرات رسانایی حرارتی ذاتی بالا نسبت به سایر نانوذرات می‌باشد. بین هر دو نانوسیال مورد مطالعه، عملکرد حرارتی و الکتریکی MWCNTs-OH عامل‌دار کووالانسی به دلیل بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت انتقال آزاد بهتر گزارش شده است و استفاده از تکنیک مربوط به نانولوله‌های کربنی عامل‌دار کووالانسی موجب شد که به ترتیب ۲۶/۲۳ و ۳۰/۰۸ درصد بهبود در انتقال حرارت حاصل شود. همچنین، با اندازه‌گیری ولتاژ شکست مشخص شد که نانولوله‌های کربنی عامل‌دار کووالانسی با غلظت ۰/۰۰۱ درصد وزنی کمترین کاهش را نسبت به سیال پایه داشته و برابر با ۵۵/۶ کیلوولت بوده و به دلیل استاندارد مشخص شده برای خاصیت ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور که باید بین ۳۰ الی ۷۰ کیلوولت باشد، عملکرد بسیار مناسبی را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، نتایج نانوسیال روغن ترانسفورماتور با عامل کووالانسی عملکرد حرارتی بهتری نسبت به روغن خالص دارد که از افزایش درجه حرارت ترانسفورماتور جلوگیری می‌کند و همچنین می‌تواند به‌عنوان عایق الکتریکی در ترانسفورماتورها استفاده شود.[۱۹]

لازم به ذکر است که با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته از گذشته تا کنون، مشخص می‌شود که استفاده از نانوذرات مختلف و ترکیبی در سیال‌های غیر به‌طور گسترده‌یی مورد بررسی قرارگرفته است. در پژوهشی دیگر، خواص حرارتی و جریان سیالی نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم (پایدار درون آب) جهت مشاهده اثر خنک‌کنندگی مکانیکی این نانوسیال بررسی شده و نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌طور کلی استفاده از نانوذرات ترکیبی یا هیبریدی سبب بهبود خواص حرارتی شده و نانوسیال حاوی دو نانوذره هیبریدی خواص حرارتی مطلوب‌تری را نسبت به نانوسیال تک ذره اکسید تیتانیوم و نانوسیال تک ذره اکسید آلومینیوم داشته است.[۲۰]

با توجه به شرایط مورد بررسی اولیه، هدف پژوهش حاضر، انتخاب بهترین نوع نانوذره و بهترین غلظت آن برای پایداری در روغن ترانس می‌باشد که منجر به افزایش بیشتر بازده ترانسفورماتور می‌گردد. با استناد به بررسی‌های کتابخانه‌یی، لیست کاملی از نانوذرات مؤثر که عملکرد عایقی و مشخصه‌های انتقال حرارت در روغن پایه در شرایط مختلف و در ترانسفورماتورها به‌طور تجربی گزارش شده‌اند، مورد بررسی و مطالعه قرارگرفته است. مسئله پایداری در نانوسیالات هیبریدی بسیار مهم است و باید در نظرگرفته شود. نانوذرات آب‌دوست یا آب‌گریز برای انتخاب نانوذرات یکدست حائز اهمیت است. با توجه به هدایت حرارتی بالای نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT)، یکی از نانوذرات به کار رفته در تهیه نانوسیال هیبریدی نانوروغن ترانس مورد مطالعه می‌باشد. روش تعیین نانوساختار بهینه هیبریدی نانوذرات به دلیل اهمیت سایر ویژگی‌ها و بر اساس روش مبتنی بر پنج گام اساسی به‌منظور دستیابی به بالاترین بازدهی با تهیه سوسپانسیون مختلف از نانوذرات و سیال پایه لحاظ و تعیین شده است. این پنج گان عبارتند از: ۱. احصاء، طبقه‌بندی شهودی ۲. بررسی معنی دار بودن تغییرات ۳. اصل برهمنهی ۴. تعیین بهترین نوع و ترکیب ۵. ارزیابی بهینه.

۲. مبانی نظری

تاکنون تلاش‌های گسترده‌یی در زمینه بهبود عملکرد ترانسفورماتورهای قدرت و بهبود عملکرد حرارتی روغن‌های ترانسفورماتورها صورت گرفته است و تولیدکنندگان این دست از روغن‌ها تلاش‌های زیادی را جهت بهبود خواص عایقی، خنک‌کاری، ساختاری و سایر خواص روغن انجام داده‌اند. در همین راستا می‌توان به مواردی از قبیل ساخت مواد مکمل افزودنی[۱۲] و تولید روغن‌های دارای مواد آنتی اکسیدان[۱۳] اشاره کرد که همگی برای کاهش رسوب‌گذاری، تشکیل لجن و افزایش عمر روغن مورد استفاده قرارگرفته‌اند. از طرف دیگر، همان‌طورکه مطرح شد، تلاش این است تا بر اساس اصول محاسباتی و تکیه به معادلات علمی بتوان راهکاری در بهبود تولید نانوروغن‌ها پیدا کرد تا اثرگذاری نانومواد مختلف را با توجه به صرفه اقتصادی ارائه داد. نکته حائز اهمیت در این مطالعه این است که در ایران تاکنون از روغن‌های بدون افزودنی و معمولی استفاده می‌شود که بخصوص در مناطق گرم جنوبی بسیار مشکل زا می‌باشد و مانع بهره‌وری بیشتر از ترانسفورماتورها می‌شود. شرکت‌های معتبر در ارائه محصولات روغن ترانسفورماتور مانند ایران ترانسفو و شرکت پالایش روغن‌های صنعتی زنگان نیز تاکنون داده‌های قابل قبولی برای روغن ترانسفورماتورها با مواد افزودنی ارائه نکرده‌اند. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، اثرگذاری مواد و نانوذرات مختلف در تحقیقات بر پایه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های محاسباتی مورد بررسی و تحلیل قرارگرفته است. این پژوهش‌ها اولویت نحوه شبیه‌سازی و انتخاب نانوذرات را به‌طور مؤثری مورد تأثیر قرارداده و خط مشی عملی را مشخص کرده است. به‌طور کلی، نانوذرات برای استفاده در روغن‌های ترانسفورماتور و تأثیرگذاری به دو دسته اصلی نانوذرات پرکاربرد (شامل ۱۲ نانوذره) و نانوذرات تلفیقی/ترکیبی/هیبریدی تقسیم می‌شوند که به‌صورت ترکیب دوتایی و سه‌تایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و باعث بهبود چشمگیر عملکرد روغن (به خصوص شرایط حرارتی و الکتریکی) می‌شوند. این نانوذرات به‌صورت تفکیکی در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

۳. روش تحقیق

همان‌طورکه از مراحل طی شده مشخص است، انتخاب ایده‌آل‌ترین نانوذرات بسیار

جدول ۱. لیست نانوذرات معمولی.

ردیف	نانوذرات	سال تحقیق
۱	TiO_2	۲۰۱۹ – ۲۰۱۸
۲	Al_2O_3	۲۰۱۹ – ۲۰۱۸
۳	SiO_2	۲۰۲۰ – ۲۰۱۹
۴	CuO	۲۰۱۹ – ۲۰۱۸
۵	ZnO	۲۰۲۰ – ۲۰۱۹
۶	BN	۲۰۱۹ – ۲۰۱۸
۷	Graphene-CNT-MWCNT	۲۰۱۶ – ۲۰۱۵ – ۲۰۱۴
۸	Nano Diamond	۲۰۱۵
۹	$BaTiO_3$	۲۰۱۹
۱۰	$NiFe_2O_4$	۲۰۱۹
۱۱	MoS_2	۲۰۱۹

جدول ۲. لیست ترکیب های دوتایی و سه تایی.

ردیف	هیبرید دوتایی و سه‌تایی	سال تحقیق
۱	$WO_3 - Ag$	۲۰۱۶
۲	$CaCu_3Ti_4O_{12}$(CCTO)	۲۰۱۹
۳	TiO_2/Al_2O_3	۲۰۲۰ – ۲۰۱۹
۴	TiO_2/SiO_2	۲۰۲۰ – ۲۰۱۹
۵	SiO_2/Al_2O_3	۲۰۲۰ – ۲۰۱۹
۶	CuO/ZnO	۲۰۲۰ – ۲۰۱۹
۷	Al_2O_3/MWCNT	۲۰۱۸
۸	$ZnO/ZrO_2/Al_2O_3$	۲۰۱۶
۹	$Fe_3O_4/ZnO/SiO_2$	۲۰۱۷
۱۰	$TiO_2/Al_2O_3/MoS_2$	۲۰۱۹
۱۱	$Fe_3O_4/TiO_2/Al_2O_3$	۲۰۱۸

قابل اهمیت می‌باشد و با توجه به اصول ساخت نانوسیالات و موارد مورد نیاز برای ترانسفورماتورها، اهمیت این انتخاب بیشتر از قبل نیز خواهد بود. طبق پژوهش‌های صورت گرفته و جدول ارائه شده، از نانوذرات موثر منتخب، پنج نانوذره CuO، TiO_2، Al_2O_3، SiO_2 و MWCNT مورد انتخاب نهایی قرار گرفته‌اند. این انتخاب از دو جهت صورت گرفته است که به شرح زیر دسته‌بندی می‌شود:

- شبیه‌سای‌های ابتدایی صورت گرفته با نانوذرات متفاوت در حالت دوبعدی؛
- نمونه‌های ساخته شده با غلظت‌های بسیار پایین و کمتر از ۱ درصد حجمی که رفتار نانوسیالات را می‌توان از آنها رصد کرد.

این دو پارامتر دید مناسبی را برای اجرای نهایی فرایند ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی‌های مدنظر با استفاده از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵/۵ صورت گرفته که همزمان موارد اصلی و پایه یک ترانسفورماتور به‌صورت دو بعدی مورد اجرا قرار می‌گیرد و دید ابتدایی درستی از ساختارهای مجموعه سیستم را ارائه می‌دهد. ذکر این نکته بسیار مهم است که صحت تمامی شبیه‌سازی‌های عددی با فرض عدم چسبندگی ذرات و پایداری نانوسیال قابل قبول می‌باشد، زیرا در عمل ممکن است به علت وجود میدان‌های الکتریکی قوی و خواص دی‌الکتروفورسیس و مگنتوفورسیس ذرات و سیال، نانوذرات اکسید فلزی به یکدیگر جذب شده و رسوب تشکیل می‌دهند و یا به‌صورت زنجیروار به سمت میدان الکتریکی قوی‌تر جذب می‌شوند و در سیستم سیال ناپایداری ایجاد می‌نمایند که می‌تواند چالش بسیار جدی در شرایط مسئله

شکل ۲. توزیع سطح الکتریکی انجام شده توسط معادلات الکترومغناطیس دوفازی.

ایجاد کند. با توجه به بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته و همچنین نیازهای مربوط به فرایند داخل ترانسفورماتورها و تأثیرپذیری نانوروغن مدنظر، این نتیجه حاصل شده است که باید فرایند شبیه‌سازی در سه مرحله هم‌زمان صورت بگیرد که به شرح ذیل می‌باشد:

- بررسی پدیده انتقال (انتقال حرارت و انتقال جرم)؛
- بررسی شرایط سیالات در حضور نانوذرات متفاوت؛
- بررسی اصول القای الکترومغناطیسی و عایقی الکتریکی در داخل ترانسفورماتور.

پس از این سه اصل اساسی، مهم‌ترین مورد در اجرای شبیه‌سازی، ساخت اجزای اصلی سیستم و همچنین شبکه‌بندی (مش‌زنی) دقیق و موثر در فرایند شبیه‌سازی می‌باشد تا در زمان ارائه بهترین نتایج در زمان کوتاه شرایط واقعی فرایند مد نظر را القا کند. پس از بررسی پژوهش‌های صورت گرفته مشخص می‌شود هیچ یک از موارد بالا به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته و این تصمیم به‌منظور اجرای همه پارامترها و بررسی تأثیر همه‌جانبه می‌تواند به‌طور کامل به انتخاب صحیح‌ترین نمونه منجر شود. طبق نتایج اولیه به دست آمده، نانوذرات مورد بحث می‌توانند در گام نخست ایده صحیحی را در خصوص فرایند موثر در ترانسفورماتورها فراهم کنند. به‌صورت نمونه الگوهای محاسباتی با توزیع سطح الکتریکی در حالت دو فازی که در شکل ۲ ارائه شده است، می‌توان بررسی کرد که توسط معادلات الکترومغناطیس دوفازی مورد محاسبه و اجرا در نرم‌افزار قرار گرفته است. معادلات حاکم الکترومغناطیس برای این محاسبه شرح زیر می‌باشد:[۲۱]

$$\nabla \bullet \left(\varepsilon \overrightarrow{E}\right) = \rho_p + \rho_n + \rho_e \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla . \overrightarrow{J}_p = G_T H(W) + \left[G_I + \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{e} + \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e}\right] (۱ - H(W)) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla . \overrightarrow{J} = \left[\frac{\rho_e}{\tau_e} - \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e}\right] \quad (۳)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla . \vec{J} = -G_T H(W) + \left[-G_I - \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{e} - \frac{\rho_e}{\tau_e}\right] (1 - H(W)) \quad (۴)$$

شکل ۳ الف، تصویری را برای این ترانسفورماتور نشان می‌دهد، در حالی‌که شکل ۳ ب یک نقشه شماتیک از نمای بیرونی این ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی عددی ترانسفورماتور کامل نشان داده شده در شکل ۳ پیچیده است و نیاز به زمان پردازش و حافظه زیادی دارد. بنابراین، برای ساده‌سازی حل عددی و به دلیل تقارن هندسی می‌توان از یک چهارم ترانسفورماتور به‌عنوان مدل محاسباتی استفاده کرد.

ترانسفورماتور کامل را همانطور که در شکل ۴ الف نشان داده شده است که نمای بیرونی مدل محاسباتی (چهارم ترانسفورماتور) را نشان می دهد و شکل ۴ ب که نشان‌دهنده مدل محاسباتی برای سیم پیچ‌ها و مجموعه هسته (یک چهارم سیم پیچ‌ها و مجموعه هسته) است، از آنجایی که سیم پیچ‌ها به عنوان یک استوانه جامد در نظر گرفته می شوند.

شکل ۳. الف) تصویر برای ترانسفورماتور ۲۵ kVA مورد مطالعه، ب) شکل شماتیک برای ترانسفورماتور ۲۵ kVA مورد مطالعه.

شکل ۴. الف) مدل محاسباتی (نمای بیرونی یک چهارم ترانسفورماتور)، ب) مدل محاسباتی (یک چهارم سیم پیچ ها و مجموعه هسته)، ج) نمای بیرونی (مش استفاده شده برای مدل محاسباتی).

۴. توصیف شرایط مسئله

ترانسفورماتورهای قدرت یا توزیع از نوع ترانس نرمال ۲۵ kVA ردیف ۳۳ kV ساخت شرکت ایران ترانسفو به‌عنوان مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شده است که به‌طور گسترده در شبکه برق سراسری استفاده می‌شود. ترانسفورماتور نرمال ۲۵ kVA و ولتاژ ۳۳ kV یا نسبت ولتاژ ۳۳ kV – ۰/۴ ایران ترانسفو در دسته ترانسفورماتورهای توزیع روغنی سه فاز با منبع انبساط قرار دارد. این ترانس از دسته ترانسفورماتورهای کوچک شرکت ایران ترانسفو محسوب می‌شود و جهت برق رسانی در شبکه توزیع و عمدتاً در محل‌های کم‌بار یا چگالی بار پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترانسفورماتور ۲۵ کیلوولت آمپر نرمال مناسب برای نصب روی تیرهای برق و در فضای بسته یا فضای باز است. این ترانس دارای منبع انبساط در سمت طولی (فشار ضعیف)، محفظه رطوبت‌گیر نیم کیلویی، شیر تخلیه و محفظه برای نمونه برداری روغن DIN۴۲۵۵۱، روغن نمای مغناطیسی و کلید تنظیم ولتاژ سه حالته می‌باشد.

ابعاد و مشخصات فنی ترانس نرمال ۲۵ kVA ردیف ۳۳ kV ایران ترانسفو:

۱. ترانسفورماتور با توان ۴۰۰ کیلوولت آمپر؛

۲. مطابق با استاندارد IEC۶۰۰ – ۷۶؛

۳. ترانسفورماتوری از نوع کاهنده ولتاژ؛

۴. دارای فرکانس نامی ۵۰ Hz؛

۵. ارتفاع محل نصب: ۱۰۰۰ متر از سطح دریاهای آزاد؛

۶. سیستم خنک کنندگی: ONAN؛

۷. روغن مطابق با استاندارد IEC۶۰۲۹۶؛

۸. افزایش دمای ماکزیمم روغن ۶۰ درجه سانتیگراد و افزایش دمای متوسط سیم‌پیچ ۶۵ درجه سانتیگراد؛

۹. تلرانس تلفات و امپدانس اتصال کوتاه مطابق استاندارد IEC ۶۰۰۷۶؛

۱۰. ابعاد ترانس ۲۵ kVA نرمال (ارتفاع×عرض×طول): ۹۱۸ × ۶۹۳ × ۱۳۸۱ سانتیمتر.

ترانسفورماتور از کویل و مجموعه هسته تشکیل شده است و شامل سه سیم‌پیچ مسی و یک هسته فولادی است که آنها را به یکدیگر متصل می‌کند. تمامی موارد نام برده شده در روغن ترانسفورماتور موجود در بدنه ترانسفورماتور غوطه‌ور می‌شوند که مجهز به پره‌هایی برای افزایش منطقه انتقال حرارت است. روغن ترانسفورماتور دو نقش مهم را ایفا می‌کند که عبارتند از: یک محیط خنک کننده که گرمای تولید شده در سیم‌پیچ‌ها و هسته را به دیواره‌های بیرونی منتقل می‌کند و یک عایق الکتریکی. بر اساس داده‌های موجود، گرمای تولید شده در ترانسفورماتور در شرایط بار کامل ۱۰۰۰ وات از هر سیم‌پیچ و ۵۰۰ وات از هسته است. این گرمای تولید شده باید دفع شود تا دمای روغن در سطح قابل قبولی حفظ شود.

تمامی مواد به غیر از روغن ترانسفورماتور، مستقل از درجه حرارت فرض می‌شوند و خواص آنها در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است.[۲۲] خواص روغن ترانسفورماتور پس از افزودن نانوذرات اصلاح می‌شود و مدل‌هایی برای پیش‌بینی این خواص برای آماده‌سازی و تجزیه و تحلیل مواد پیشنهاد شده است. چگالی معادل و گرمای ویژه نانوسیال به‌طور مستقیم فرمول‌بندی شده است. خواص روغن ترانسفورماتور در

جدول ۳. مشخصات نانوذرات هیبریدی و روغن ترانسفورماتور.[۲۲]

مواد	دانسیته (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی ویژه $(J/kg.K)$	هدایت حرارتی $(W/m.K)$
CuO	۶۳۱۵	۵۳۱	۷۵ − ۲۰
TiO_2	۴۲۵۰	۶۸۶/۲	۸/۹۵۳
Al_2O_3	۳۶۰۰	۷۶۵	۴۰ − ۳۶
SiO_2	۲۴۰۰	۷۴۱/۸	۱/۴
MW_{CNT}	۱۳۵۰	۷۵۰	۶۰۰۰ − ۳۰۰۰
عایق	۹۳۰	۱۳۴۰	۰/۱۹

جدول ۴. خصوصیات روغن ترانسفورماتور قدرت.[۲۲]

خواص فیزیکی	مقدار
دانسیته	$۸۸۷ - ۰/۶۵۹T \quad (kg/m^3)$
ویسکوزیته دینامیکی	$۱/۳۵۷۳ \times ۱۰^{-۶} \left[\exp\left(\frac{۲۷۹۷/۳}{T+۲۷۳}\right)\right] \quad (kg/m.s)$
ظرفیت حرارتی ویژه	$۱۹۶۰ + ۴/۰۰۵T \quad (J/kg.K)$
هدایت حرارتی	$۰/۱۲۰۲ \ (w/m.K) \ @ \ ۲۵°C$

جدول ۴ آمده است.[۲۲]

$$\rho_{nf} = (۱ - \phi)\,\rho_f + \phi\,\rho_p \tag{۵}$$

$$C_{nf}\,\rho_{nf} = (۱ - \phi)\,C_f\,\rho_f + \phi\,C_p\,\rho_p \tag{۶}$$

$$\mu_{nf} = \mu_f \left[۱ + ۲/۵\phi \left(۱ + \frac{۸/۸۶۸}{r}\right)\right] \tag{۷}$$

$$k_{nf} = k_f \left[۱ + ۴/۴\mathrm{Re}_p^{۰/۴}\,\mathrm{Pr}_{rf}^{۰/۶۶} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{۱۰} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{۰/۰۳} \phi^{۰/۶۶}\right] \tag{۸}$$

که در آن ϕ کسر حجمی نانوذرات است. استخراج مدل‌های دقیق برای ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال تا حدودی دشوار است. به‌منظور محاسبه تأثیر برهمکنش بین سیال پایه و نانوذرات بر روی خواص روغن، پارامترهای میکروسکوپی در مدل گنجانده شده است. مدل ویسکوزیته بر اساس فرمول ویسکوزیته انیشتین و مدل هدایت حرارتی حاصل از برازش داده‌های اندازه‌گیری شده در تحلیل زیر استفاده می‌شوند که در آن، r شعاع نانوذرات، Pr عدد پرانتل سیال پایه روغن خالص ترانسفورماتور و T_{fr} نقطه انجماد سیال پایه می‌باشد. عدد رینولدز نانوذرات Re_p به‌صورت معادله ۹ تعریف می‌شود:[۲۳]

$$\mathrm{Re}_p = \frac{۲\,\rho_f\,k_b\,T}{\pi\,\mu_f^۲\,d_p} \tag{۹}$$

برای تعیین الگوی حرکت سیال، جریان نانوسیال در سیم‌پیچ ترانسفورماتور به‌عنوان یک جریان تک فاز معمولی در نظر گرفته می‌شود. خواص معادل نانوسیال بر پایه روغن ترانس با غلظت‌های مورد نظر با مدل‌های معرفی شده به دست آمده است. عدد رینولدز محاسبه شده برای این مسئله حدود ۱۰۰۰ است که بسیار کوچکتر از مقدار بحرانی (۲۱۰۰) برای جریان آرام است. علاوه بر این، جریان روغن در این سیم‌پیچ به‌صورت آرام پیش‌بینی شده است. از این رو، تمام جریان‌های مورد مطالعه نیز آرام هستند و نیازی به مدل‌های آشفتگی نمی‌باشد. برای گسسته‌سازی فضایی اندازه حرکت خطی یا ممنتوم و انرژی، طرح مرتبه دوم جهت مخالف استفاده می‌شود و در نهایت مسئله با حلگر مبتنی بر فشار به‌صورت جفت شده حل می‌شود. معیار همگرایی برای باقیمانده‌های معادله‌های حاکم با $۱/۰ \times ۱۰^{-۶}$ تنظیم شده است. تغییرات دما نیز برای تخمین همگرایی پایش می‌شود. هنگامی که سیستم به تعادل حرارتی می‌رسد، دمای قسمت‌های فعال دیگر افزایش نمی‌یابد و گرمای تولید شده به‌طورکامل تلف می‌شود که پس از به دست آوردن نتایج قابل بررسی است. در مدل مخلوط، معادله‌های بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی برای نانوسیال به جای هر فاز فرمول‌بندی می‌شود. تفاوت سرعت بین فازها در معادله‌های حاکم بر اندازه حرکت و انرژی در نظر گرفته می‌شود و یک معادله دیگر برای کسر حجمی نانوذرات فرمول‌بندی می‌شود. به این ترتیب، معادله‌های حاکم به‌صورت زیر ارائه شده است:[۲۳]

پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf}\,V_m) = ۰ \tag{۱۰}$$

اندازه حرکت خطی:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf}\,V_m\,V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho_{nf}\,g + \nabla \cdot \left(\sum_{k=۱}^{۲} \phi_k\,\rho_k\,V_{dr,k}\,V_{dr,k}\right) \tag{۱۱}$$

انرژی:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=۱}^{۲} \phi_k\,V_k\,(\rho_k\,E_k + P)\right) = \nabla \cdot (k_{nf}\,\nabla T) + S_e \tag{۱۲}$$

و رابطه کسر حجمی نانوذرات:[۲۳]

$$\nabla \cdot \left(\phi_{\rho p}\,V_m\right) = -\nabla \cdot \left(\phi_{\rho p}\,V_{dr,p}\right) \tag{۱۳}$$

V_m سرعت متوسط جرمی مخلوط به‌صورت رابطه ذیل خواهد بود:[۲۳]

$$V_m = \frac{\sum_{k=۱}^{۲} \phi_k\,\rho_k\,V_k}{\rho_{nf}} \tag{۱۴}$$

τ تانسور تنش برشی که به‌صورت رابطه ذیل تعریف شده است:[۲۳]

$$\tau = \mu_{nf}\,\nabla V_m \tag{۱۵}$$

سرعت رانش $V_{dr,p}$ و سرعت جریان نسبی V_{pf} فاز دوم با فرمول زیر به هم متصل می‌شوند:[۲۳]

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=۱}^{۲} \frac{\phi_k\,\rho_k}{\rho_{nf}}\,V_{fk} \tag{۱۶}$$

یک رابطه جبری نیز برای سرعت نسبی که مبتنی بر فرض تعادل موضعی بین فازها در یک مقیاس طولی کوتاه می‌باشد، اتخاذ شده است:[۲۴]

$$V_{pf} = \frac{\rho_p\,d_p^۲}{۱۸\mu_f\,f_{drag}}\,\frac{(\rho_p - \rho_{eff})}{\rho_p}\,a \tag{۱۷}$$

که در آن مقدار a شتاب می‌باشد.[۲۴]

$$a = g - (V_m \cdot \nabla)\,V_m \tag{۱۸}$$

و همچنین تابع نیروی کششی یا درگ f_{drag} توسط معادله ۱۹ پیشنهاد شده است:[۲۴]

$$f_{drag} = \begin{cases} ۱ + ۰/۱۵Re_p^{۰/۶۷۸} & Re_p \leq ۱۰۰۰ \\ ۰/۰۱۸۳Re_p & Re_p > ۱۰۰۰ \end{cases} \quad (۱۹)$$

به این ترتیب، در مدل مخلوط، معادله‌های حاکم که شامل معادله پیوستگی مخلوط، معادله اندازه حرکت مخلوط، معادله انرژی مخلوط، معادله کسر حجمی فاز ثانویه و عبارات جبری سرعت‌های نسبی هستند، با یکدیگر حل می‌شوند. در نتیجه، تعداد متغیرها در مدل مخلوط بزرگ‌تر از مدل تک فاز و کوچک‌تر از مدل کامل چند فازی است.

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل مجموعه معادله‌های فوق عبارتند از: عدم سرعت لغزش در تمام دیوارهای جامد شامل کویل‌ها، هسته‌ها و تمام دیوارهای ترانسفورماتورهای شبکه توزیع. کویل‌ها و هسته‌ها به‌عنوان منبع تولید حرارت ثابت شناخته می‌شوند که تلفات حرارتی واقعی تولید شده در ترانسفورماتورواقعی را محاسبه می‌کنند. مقادیر این تلفات حرارتی از داده‌های موجود برای تلفات الکتریکی در سیم پیچ‌ها و هسته، که برای تبدیل به انرژی حرارتی محاسبه می‌شود، به دست می‌آید. تمام دیواره‌های خارجی ترانسفورماتور، از جمله سطوح پره‌ها، تحت جریان جابجایی طبیعی و تشعشع ترکیبی قرار می‌گیرند، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی و تابش خارجی در نظر گرفته شده است. مدل فوق به‌صورت عددی حل شده است. سپس، میانگین و حداکثر دما و سرعت انتقال حرارت روغن قابل محاسبه است. ابتدا ترانسفورماتور با روغن ترانسفورماتور خالص شبیه‌سازی شده و سپس محلول با نانوسیال هیبریدی مبتنی بر روغن ترانسفورماتور و در نظر گرفتن مقادیر غلظت لحاظ شده است.

۵. شبیه‌سازی ترانسفورماتور

شبیه‌سازی ترانسفورماتور توزیع توسط یک هسته E با در نظر گرفتن منحنی BH غیرخطی انجام شده است. مطالعه مشابه برای نانوذرات منفرد در کار بهادری و همکاران ارائه شده است.[۲۴] به‌طور مشابه، برای مقایسه اثرات منفرد چند نانوذره تکی در مطالعه مشتاق اسماعیل حسن، شبیه‌سازی با همین ساختار بکار رفته است.[۲۲] فرضیه‌های زیر به‌منظور بررسی انتقال حرارت در یک ترانسفورماتور روغنی در حضور و عدم حضور نانوذرات هیبریدی مدنظر قرار گرفته است.

نانوذرات تحت میدان مغناطیسی هیدرودینامیکی و میدان الکتریکی:

- این نانوسیالات (نانوروغن) یک‌دست و یکسان تلقی می‌شوند و از اختلاف فاز مداوم روغن و فاز پراکنده نانوذرات صرف نظر شده است؛
- از رسوب ذرات، گرفتگی معابر میکروکانال و فرسایش لوله صرف نظر شده است؛
- در شبیه‌سازی ترانسفورماتور، از دست دادن گرداب و اثر هیسترزیس[۱۴] صرف نظر شده است؛
- حدود ضریب انتقال حرارت گروه بی‌بعد عدد ناسلت برای هوای مجاور، ۵ در نظر گرفته شده است.[۲۵]

تمامی شبیه‌سازی‌های به قطعات جامد و قطعات مایع تقسیم می‌شوند. بخش‌های جامد شامل هسته و سیم‌پیچ هستند و روغن یا نانوروغن مخلوط بخش جریان مایع یا دو فاز است.

روابط میدان مغناطیسی و الکتریکی: مهمترین اصل در ترانسفورماتورها رعایت اصول الکترومغناطیسی می‌باشد که الویت شرایط فرایند عملیاتی می‌باشد و همواره باید در جهت بهبود و رعایت استانداردهای محاسباتی اجرایی شود. معادله‌های مربوط به میدان مغناطیسی و الکتریکی به شرح زیر ارائه داده شده است:[۲۵]

$$\nabla \times H = j \times \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۲۰)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (۲۱)$$

$$\nabla D = \rho \quad (۲۲)$$

$$\nabla B = ۰ \quad (۲۳)$$

در معادله‌های بالا، H و E به ترتیب شدت یا شار میدان مغناطیسی و الکتریکی می‌باشند. D چگالی جریان، B چگالی شار مغناطیسی، j چگالی جریان و q چگالی بار الکتریکی است. معادله‌های ۲۰ و ۲۱ به‌عنوان قانون آمپر ماکسول[۱۵] و قانون فارادی[۱۶] شناخته شده‌اند. معادله‌های ۲۲ و ۲۳ اشکال الکتریکی و مغناطیسی قانون گوس[۱۷] هستند. معادله پیوستگی، معادله دیگری برای پیش‌بینی میدان الکتریکی و مغناطیسی است که به فرم زیر ارائه می‌شود:[۲۵]

$$\nabla \cdot j = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (۲۴)$$

این مدل برای فرکانس خطی ۵۰ هرتز حل شده است. القاء شده ولتاژ (V_{in}) متناسب با میزان شار مغناطیس (φ) و تعداد سیم پیچ (N) به‌صورت معادله ۲۵ ارائه شده است:

$$V_{in} = -N\frac{d\varphi}{dt} \quad (۲۵)$$

به این ترتیب، ولتاژ ناشی از سیم پیچ‌های ثانویه متناسب با ولتاژ ناشی از سیم پیچ‌های اولیه (V_p) است:[۲۵]

$$\frac{V_S}{V_p} = \frac{V_S}{V_p} \quad (۲۶)$$

برای ورود اطلاعات به داخل نرم‌افزار بر پایه سلسله مراتب و اصول معادله‌های بالا در بخش الکترومغناطیس اطلاعات اولیه مربوط به پره و هسته نیاز است تا به‌صورت ورودی قطعی برای محاسبات به نرم‌افزار داده شود. هر چند که بسیاری از این مقادیر در نرم فزار موجود می‌باشد، اما برای افزایش دقت عمل با استفاده از اسناد مربوط به استانداردها این مقادیر برگرفته شده است که به شرح جدول ۵ و ۶ می‌باشد.

۶. معادلات انتقال حرارت در داخل ترانسفورماتور (نانوروغن)

برای شبیه‌سازی نانوروغن در داخل ترانسفورماتور نیاز به ایجاد تغییر در تعدادی از معادله‌های اشاره شده می‌باشد، زیرا اصول انتقال جرم و انتقال حرارت در نانوسیالات متفاوت بوده و به همین منظور باید شرایط را برای نتیجه‌یی مناسب آماده کرد. در این بخش، نانوذرات مدنظر به روغن پایه اضافه و پراکنده می‌شود تا موارد مربوط به انتقال حرارت در سیستم محاسبه گردد. در این شبیه‌سازی، همان‌طور که پیش‌تر در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، از مدل مخلوط برای پیش‌بینی رفتار جریان دو فاز استفاده شده است. نانوذرات و روغن به ترتیب مراحل مداوم و پراکنده در نظر

جدول ۵. اطلاعات ورودی مربوط به پره‌های ترانسفورماتور.

Property	Value	Unit
Electrical conductivity	۵/۹۹ × ۱۰^۷	S/m
Thermal conductivity	۴۰۰	W/m.K
Heat capacity	۸۷۰۰	Kg/m^۳
Density	۳۸۵	$j/kg.K$
Surface radiation	۰/۵	-
Relative permeability	۱	-
Thermal resistance coefficient	۳/۸۶۲ × ۱۰^-۳	$1/K$
Primary windings number (N_p)	۷۵۶	-
Secondary windings number (N_s)	۱۲۶	-
Primary windings resistance (R_p)	۳۵۲	ohm
Secondary windings resistance (R_s)	۷/۰۵	ohm
Voltage frequency (N_u)	۵۰	Hz
Voltage (V_{ac})	۱۰	Kv

جدول ۶. اطلاعات ورودی مربوط به هسته ترانسفورماتور.

Property	Value	Unit
Electrical conductivity	۱۲ × ۱۰^۷	S/m
Thermal conductivity	۸۰	W/m.K
Density	۷۸۵۰	Kg/m۳
Heat capacity	۴۵۰	j/kg.K

گرفته می‌شوند. خواص نانوسیال به‌عنوان تابعی از روغن ترانسفورماتور (سیال پایه) و نانوذرات (ذرات جامد) به شرح معادله‌های زیر می‌تواند تعریف شود:[۲۵]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = ۱ + \frac{۳(\alpha - ۱)\varepsilon}{(\alpha + ۲) - (\alpha - ۱)\varepsilon} \qquad (۲۷)$$

در معادله ۲۷، ترم $\alpha = \frac{k_S}{k_f}$ نسبت هدایت حرارتی نانوذرات به هدایت حرارتی روغن را نشان می‌دهد و φ کسر حجمی نانوذرات است. خواص هرکدام از نانوذرات

جدول ۷. خواص نانوذره منتخب $TiO_۲$.

Property	Value
Electrical conductivity	۱ × ۱۰^-۱۱
Thermal conductivity (W/m.K)	~ ۹
Nanoparticles size (nm)	۱/۷

شکل ۵. شماتیک دو بعدی ترانسفورماتور برای طراحی.

برای ورودی معادله‌ها و نرم‌افزار متفاوت می‌باشد که در جدول ۳ مشخصات نانوذرات برای معلق‌سازی در روغن ترانسفورماتور به‌صورت نانوروغن هیبریدی ارائه شده است. به‌عنوان مثال، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم $TiO_۲$ به شرح اطلاعات جدول ۷ می‌باشد.

چگالی نانوذرات و ضریب انبساط حرارتی وابسته به درجه حرارت در معادله‌های زیر نشان داده شده‌اند:[۲۵]

$$\rho_{TiO_۲} = ۳۹۰۷/۰۰ - ۲/۹۰۷۳۷۷ \times ۱۰^{-۳} - ۷/۲۸ \times ۱۰^{-۳} T^۲ \qquad (۲۸)$$

$$\beta_{TiO_۲} = ۱/۸۸۰ \times ۱۰^{-۶} + ۶/۵۴۴ \times ۱۰^{-۹} T \qquad (۲۹)$$

با توجه به محاسبات ارائه شده گروه‌های بدون بعد، عدد ناسلت[۱۸] و رایلی[۱۹] به‌صورت معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند:[۲۵]

$$Ra = \frac{\rho g^۲ C_P \beta \Delta T x^۳}{\alpha \mu} \qquad (۳۰)$$

$$Nu = \frac{q \cdot x}{\Delta T \alpha} \qquad (۳۱)$$

۷. پیکربندی و شبکه‌بندی

همان‌طورکه اشاره شد، شبیه‌سازی به‌صورت حالت دو بعدی و سه بعدی (فاز بعدی) صورت خواهد گرفت، اما پیکربندی و مش‌بندی هر دو شبکه در این فاز مورد بررسی و بهینه‌سازی قرارگرفته که می‌تواند نگاه دقیقی در خصوص شرایط پایه را ارائه دهد. در گام اول، پیکربندی دو بعدی که از دو پرده‌بندی اصلی (سیم پیچ‌های اصلی) و مخزن روغن تشکیل شده، انجام شده است که به‌طور شماتیک در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به اصول طراحی پیکربندی و شماتیک مدنظر، آنچه در نرم‌افزار مورد بررسی و طراحی قرارگرفته است به‌صورت شکل ۶ می‌باشد که به‌طور کامل مجزا شدن موارد مد نظر مشخص می‌باشد و می‌تواند ساختاری برای ایجاد مش‌بندی و

شکل ۶. تصویر شماتیک ساختار شبیه سازی شده دو بعدی و ساختار مش زده شده داخل نرم افزار.

شکل ۷. نمایی ساختار شماتیک و شبیه‌سازی شده سه بعدی.

شروع محاسبات براساس معادله‌های ذکر شده باشد. نکته حائز اهمیتی که باید به آن توجه شود این است که، از آنجا که ترانسفورماتور و تجهیزات آن به‌صورت متقارن می‌باشند، شبیه‌سازی را نیز به همین صورت باید انجام داد تا از مقدار محاسبات کاسته شود، اما در شبیه‌سازی سه بعدی به‌صورت یکپارچه انجام شده است. برای اجرای شبیه‌سازی نیاز به شبکه بندی (مش‌زنی) ساختار طراحی شده می‌باشد و از آنجا که ساختاری دو بعدی به‌صورت یک مستطیل می‌باشد، بهترین انتخاب برای هر فاز مش مربعی می‌باشد تا بتواند بیشترین تأثیرگذاری را در محاسبات داشته باشد. در دیواره نیز به دلیل احتمال انباشت نانوروغن لایه مرزی برای جریان در نظر گرفته شده است. تعداد مجموع مش‌های اجرایی در داخل فاز دو بعدی ۱۸۱۳۴ می‌باشد که از این تعداد، ۱۷۲۲۸ برای دامنه اصلی و ۹۰۶ مش برای لایه مرزی می‌باشد.

در شبیه‌سازی سه بعدی نیز همین روند اجرایی می‌باشد و تفاوت خاصی در سلسله مراتب و انتخاب معادله‌ها ندارد، اما از آنجا که به‌صورت کامل مد نظر نمی‌باشد، تصویر طراحی شده آن در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد که در فاز بعدی تمامی جزییات مش‌زنی، تعداد و نتایج تفصیلی آن ارائه شده است.

۸. نتایج اجرای مدل شبیه‌سازی دو بعدی

با توجه به هدف‌مندی و انتخاب بین نانوذرت هیبریدی مطابق جدول ۳، شبیه‌سازی

شکل ۸. تأثیر نانوذرات هیبریدی بر دمای نقطه داغ ترانسفورماتور.

صورت گرفته برای نانوذرات TiO_2 و CuO انجام شده و نتایج بهینه نانوذره اکسید تیتانیوم به‌صورت زیر می‌باشد. دلیل ارائه شبیه‌سازی نمونه بهینه از آن جهت می‌باشد که در نهایت برای انجام فعالیت‌های تجربی، تنها نمونه‌های ایده‌آل و موثر در بهبود فرایند شرایط آزمایشگاهی ارائه شود. البته نمونه‌هایی که بتواند بهینه بودن نانوذراتی همچون CuO نشان دهد، در بخش آزمایشگاهی ساخته و ارائه خواهد شد تا به این ترتیب صحت فرایند شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گیرد. در این بخش از روغن خالص به‌عنوان روغن پایه برای بررسی انتقال حرارت در ترانسفورماتور توزیع سه فاز استفاده شده است. روغن وظیفه انتقال طبیعی حرارت تولید شده توسط میدان الکترومغناطیسی ترانسفورماتور را بر عهده دارد. شکل ۸ اثر نانوذرات نانوساختارهای هیبریدی مورد نظر را بر دمای نقطه داغ ترانسفورماتور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دمای نقطه داغ برای ترانسفورماتور پر از روغن خالص، ۴۷/۲ درجه سانتیگراد می‌باشد که نشان دهنده تطابق نتایج این پژوهش با یافته‌های دیگر پژوهش‌های صورت گرفته است.[۲۳و۲۵] برای بررسی اثرات افزودن نانوذرات بر روغن ترانسفورماتور، کسر حجمی ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۱ از نانوذرات به روغن اضافه شده و از نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی اثرات نانوذرات بر روی انتقال حرارت استفاده شده است. همان‌طورکه اشاره شد، حداکثر درجه حرارت برای روغن خالص با در نظر گرفتن الکترومغناطیسی تولیدی ترانسفورماتور، ۴۷/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، با افزودن نانوذرات هیبریدی به روغن، حداکثر دمای اجزای ترانسفورماتور به دلیل افزایش هدایت حرارتی روغن کاهش می‌یابد. مشخص می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات از صفر به ۰/۰۱، حداکثر دمای اجزای ترانسفورماتور از ۴۷/۲ درجه سانتیگراد به ۴۳/۰۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. لازم به ذکر است، همان‌طورکه پیش‌تر نیز مطرح شد، اثرات تجربی نانوذرات منفرد مختلف در روغن ترانسفورماتور توسط پژوهشگران مطالعه و گزارش شده است.[۲۵-۲۷]

نمودار شکل ۹ نیز عدد ناسلت را در روغن ترانسفورماتور در شرایط حضور و عدم حضور نانوذرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد ریلی، مقدار ناسلت افزایش می‌یابد. همان‌طورکه نشان داده شده است، روغن با عدد ناسلت نانوذرات تیتانیوم، به ویژه زمانی که از صفر به ۰/۰۱ افزایش می‌یابد، دارای ارتباط است. افزایش غلظت نانوذرات از صفر به ۰/۰۱ افزایش مقدار ناسلت از ۱/۴ به ۱/۹ را نشان می‌دهد و اهمیت ترکیب نانوذرات با روغن ترانسفورماتور را بیان می‌کند. با این حال، با افزایش غلظت نانوذرات از ۰/۰۱، اثرات آن در انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

شکل ۹. تغییرات مقدارناسلت به‌عنوان تابعی از عدد ریلی و غلظت حجمی نانوذرات.

شکل ۱۰. عدد نسلت، ویسکوزیته سینماتیکی و ولتاژ شکست برحسب کسر حجمی نانوذرات در روغن ترانسفورماتور.

شکل ۱۰ مقدار عدد ناسلت، ویسکوزیته سینماتیکی و ولتاژ شکست را با توجه به کسری حجمی از نانوذرات هیبریدی در روغن ترانسفورماتور نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مقدار ناسلت برای روغن خالص ۲/۱۷ حاصل شده است (منحنی آبی رنگ). در ابتدا و با افزودن نانوذرات، ناسلت به‌سرعت افزایش می‌یابد. با این وجود، با افزایش غلظت نانوذرات، از سرعت افزایش کاسته می‌شود. علاوه بر این، منحنی ولتاژ خرابی دارای حداکثر نقطه در غلظت نزدیک به ۰/۴۵٪ است. با توجه به ملاحظات موجود، این نمونه شبیه‌سازی شده در شرایط میدانی و عملیاتی قابل پیاده‌سازی بوده که باید بررسی‌های آزمایشگاهی و تکمیلی‌تری بر روی آن صورت گیرد اما به‌طور معمول، نانوذرات هیبریدی می‌تواند در نمونه‌های نهایی بسیار تأثیرگذار باشد. در این امر که ممکن است موثر نباشد، می‌توان به این صورت بیان کرد که پس از این مرحله منحنی ولتاژ شکست کاهش می‌یابد. از آنجا که حداقل ولتاژی که باعث می‌شود قسمتی از عایق رسانای الکتریکی شده و جریان الکتریکی از آن عبور نماید، کاهش ولتاژ شکست روغن مطلوب نیست. به‌عبارت دیگر، ولتاژ شکست، حداکثر اختلاف ولتاژی است که می‌تواند قبل از انجام عایق در تمام مواد اعمال شود. بنابراین، با کاهش ولتاژ خرابی، احتمال شکست روغن ترانسفورماتور و در نتیجه احتمال ایجاد آسیب در ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش نانوذرات باعث افزایش ویسکوزیته سینماتیکی روغن می‌شود که در شرایط سیال تا حدودی مؤثر است. بنابراین، غلظت بهینه نانوذرات در روغن ترانسفورماتور برای

شکل ۱۱. دستگاه اندازه‌گیری رسانایی و مقاومت حرارتی KD۲ Pro.

بهبود انتقال حرارت و کاهش درجه حرارت نقاط داغ در حدود ۰/۱٪ می‌تواند تعیین شود.

۹. نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به انتخاب نانوذرات در مرحله شبیه‌سازی، همان نمونه‌ها به‌صورت هدف اصلی برای طراحی تجربی و شرایط آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفته خواهد شد. نتایج آزمایشگاهی در ابتدا به جهت آشنایی با خصوصیات رفتاری نانوذرات و عوامل تأثیرگذار در پایداری ذرات در محیط روغنی و همچنین جلوگیری از هدر رفت ذرات در ساخت نمونه‌های اولیه، ابتدا در حجم کوچک (۵-۱۰ میلی‌لیتر) تهیه شده و پس از شناسایی نمونه‌های مطلوب، در حجم‌های بزرگتر (۱-۲ لیتر) تهیه و آزمایش می‌شود. بنابراین، مطابق جدول ۳، نمونه‌های نانوروغن TiO_2، CuO، Al_2O_3، SiO_2 و MWCNT تهیه خواهد شد. با وجود اینکه نتایج شبیه‌سازی بر روی نانوذره CuO مطلوب نبود، در نمونه‌سازی‌های آزمایشگاهی تهیه گردید تا بتوان به وسیله مشاهده‌های آزمایشگاهی نیز داده‌های تجربی استخراج گردد. در نمونه‌های آزمایشگاهی، دو ماده Tween ۸۰ و اولئک اسید به‌عنوان ماده پایدارکننده مدنظر قرار گرفت که ماده Tween ۸۰ به دلیل خواص آب‌دوستی (HLB > ۹)، حلالیت در روغن نداشته و از بین دو گزینه مد نظر حذف گردید و تنها از ماده پایدارکننده اولئیک اسید که به‌طورکامل در محلول‌های روغنی پخش می‌شود، استفاده شده است. به این ترتیب، از خواص مهم و نیازمند اندازه‌گیری در این مطالعه که خود از مشخصه‌های اصلی روغن‌های ترانسفورماتور نبوده اما از مشخصه‌های بسیار با اهمیت جهت خنک‌سازی ترانسفورماتورها، رسانایی حرارتی و مقاومت حرارتی می‌باشد. این مشخصه از آن جهت با اهمیت است که یکی از اهداف اصلی وجود روغن درون محفظه ترانسفورماتور، علاوه بر ایجاد خاصیت عایقی، هدایت حرارت ایجاد شده درون هسته به صفحات فلزی اطراف ترانس و انتقال آن به بیرون می‌باشد. افزایش خاصیت رسانایی حرارتی روغن و کاهش مقاومت حرارتی آن می‌تواند وظیفه خنک‌کاری سیستم را به خصوص در فصول گرم سال به خوبی انجام دهد. برای بررسی خواص حرارتی نانوروغن‌های تولیدی از دستگاه KD۲ Pro و سنسور KS − ۱ که مخصوص اندازه‌گیری خواص حرارتی سیال‌های روغنی می‌باشد، مطابق شکل ۱۱، استفاده شده است.

شکل ۱۲. نتایج مربوط به آزمون اندازه‌گیری رسانایی و مقاومت حرارتی نمونه‌های منتخب.

نتایج آنالیزهای حرارتی حاکی از بهبود قابل توجه خاصیت رسانایی حرارتی و مقاومت حرارتی برای نانوروغن‌های تولیدی است. با مشاهده نتایج ارائه شده در شکل ۱۲، مشخص می‌گردد که رسانایی حرارتی و مقاومت حرارتی تمام نانوروغن‌های تولیدی به‌طور تقریبی به ترتیب ۲۸۵٪ افزایش و ۷۵٪ کاهش داشته است.

۱۰. جمع‌بندی نتایج نهایی مطالعات شبیه‌سازی

- بر اساس نتایج به دست آمده از مراحل شبیه‌سازی اولیه و مطالعات انجام شده، همچنین با توجه به مشاهده نتایج اولیه، نکات مهمی در زمینه‌های جهت‌گیری تحقیقات در فرایند تجربی و اجرای نمونه بهبود یافته نهایی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرارگرفته است. این نتایج بهبود مراحل اجرایی و نمونه‌های آزمایشگاهی را تسهیل داده و امکان ارائه نمونه‌های کامل‌تر با توجه به تست‌های آزمایشگاهی را فراهم کرده است. این کارها به‌منظور بررسی و رصد کامل خواص پایه نمونه‌های قطعی انجام می‌شود؛
- ملاحظات انجام شده بر روی نمونه‌های طراحی شده و همچنین شبیه‌سازی‌های انجام شده، اطلاعات جامع در مورد نانوذرات هیبریدی و تأثیر آنها به دست آمده است. همچنین، در فرایند آزمایشگاهی، نانوذرات به‌طورکامل مورد آزمایش قرار می‌گیرند و آزمون‌های تکمیلی نیز انجام می‌شود. این کارها به‌منظور ارائه راه‌حل‌های جهت بهبود برخی از ویژگی‌هایی که کاهش یافته، مانند ولتاژ شکست، انجام می‌شوند؛
- بررسی‌های پایه‌یی شبیه‌سازی محاسباتی با آنچه در نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده و در بحث‌های حرارتی کاملاً یکسان بوده و لذا نشان از بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانسفورماتور توسط نانوروغن است؛
- شبیه‌سازی نانوذرات در داخل ترانسفورماتور بر اساس اصول و سلسله مراتب معادله‌های ارائه شده در جهت تشخیص عملکرد نانوذرات، کمک شایانی کرده است. با رعایت ملاحظات می‌توان به‌طورکامل فرایند آزمایشگاهی را طی کرده و نمونه‌های اصلی را تهیه کرد؛
- همان‌طورکه ملاحظه شد، شبیه‌سازی نشان داد که حرارت داخل ترانسفورماتور در حضور نانوذرات موثر مانند اکسید تیتانیوم کاهش یافته و تبادل حرارتی داخل با بیرون به کمترین حد خود رسیده است؛
- از میان مهم‌ترین دلایل بهبود عملکرد شبیه‌سازی می‌توان به بهبود شرایط گردش نانوروغن در سیستم و بین پره‌ها اشاره کرد که موجب بهبود خنک‌سازی سیستم می‌شود؛
- نکته مهم دیگری که در ترانسفورماتورها باید مد نظر قرارگیرد، موضوع نقطه و یا نقاط داخل مابین هسته‌ها می‌باشد که نانوذرات موجود در روغن به علت بهبود گردش در سیستم باعث افت درجه حرارت محسوس آن خواهد شد و هم‌زمان تغییر غلظت و تغییر عدد ناسلت بر افزایش عدد ریلی تأثیر دارد که این امر در بهبود عملکرد ترانسفورماتور به‌صورت بهینه بسیار موثر خواهد بود؛
- به‌طورکلی، با توجه به ملاحظات شبیه‌سازی در مطالعات دیده می‌شود که نانوذرات باعث بهبود عملکرد تقریبا بالای ۶۰٪ ترانسفورماتورها می‌شوند و در صورت استفاده از نانوروغن‌ها در محیط‌های تحت بار، عملکرد بهینه و پایداری بیشتر عملیاتی به‌خصوص در بحث خنک‌سازی ترانس و در نتیجه سلامت طولانی مدت ترانسفورماتور حاصل می‌شود.

تقدیر و تشکر

این مطالعه بر اساس قرارداد پژوهشی به شماره ۹۹/۹۰۶۴۰۰۹ با شرکت سهامی برق منطقه‌یی خوزستان انجام شده است لذا بدین وسیله از حمایت های مالی شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان برای انجام این پروژه قدردانی می‌گردد.

فهرست علائم

a: شتاب $\frac{m}{s^2}$؛
B: چگالی شار مغناطیسی $\frac{wb}{m^2}$؛
D: ضریب نفوذ مولکولی، $\frac{m^2}{s}$؛
d: قطر نانوذرات nm؛
Cp: ظرفیت گرمایی ویژه، $\frac{J}{Kg.°C}$؛
f_{drag}: تابع نیروی کششی یا درگ N؛
$\vec{E}$: بردار شدت میدان الکتریکی $\frac{N}{C}$؛
G_I: منبع نرخ چگالی بار یونیزاسیون؛
g: شتاب جاذبه $\frac{m}{s^2}$؛
$\vec{H}$: بردار شدت میدان مغناطیسی؛
J: چگالی جریان الکتریکی $\frac{A}{m^2}$؛
k: ضریب هدایت حرارتی، $\frac{w}{m.K}$؛
N: تعداد سیم‌پیچ ترانسفورماتور؛
Nu: عدد بی‌بعد ناسلت؛
P: فشار Pa؛
Pr: عدد بی‌بعد پرانتل؛
q: شار حرارتی $\frac{w}{m^2}$؛
Ra: عدد بی‌بعد رایلی؛
Re: عدد بی‌بعد رینولدز؛
T: درجه حرارت $°C$؛
V: سرعت $\frac{m}{s}$؛
V_{in}: ولتاژ القاء شده؛

t: زمان S؛

x: طول مشخصه اعداد رایلی و ناسلت m.

- **علائم یونانی**

α: نسبت هدایت حرارتی نانوذرات به روغن؛

ρ: چگالی $\frac{kg}{m^3}$؛

τ: تنسور تنش برشی Pa؛

μ: ویسکوزیته، $\frac{kg}{m.s}$؛

ϕ: کسر حجمی نانوذرات؛

φ: شار مغناطیسی wb؛

β: ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{^\circ C}$؛

$\in$: ثابت دی‌الکتریک؛

ω: سرعت زاویه‌یی $\frac{Rad}{s}$؛

∇: عامل دیفرانسیلی Del؛

Δ: عامل دلتا.

- **زیرنویس‌ها**

$diff$: عامل نفوذی؛

b: توده یا بالک سیال؛

e: ذرات الکترون‌ها؛

fr: نقطه انجماد سیال پایه روغن؛

rh: اتلاف مغناطیسی هسته؛

m: مقدارمتوسط یا میانگین؛

n: یون‌های بار الکتریکی منفی؛

nf: نانوسیال روغن ترانسفورماتور؛

p: نانوذرات جامد؛

P: یون‌های بار الکتریکی مثبت؛

f: سیال پایه روغن ترانسفورماتور؛

r: شعاع نانوذرات.

پانوشت‌ها

1. The Carrier Oil
2. The Partial Discharge Inception Voltage (PDVI)
3. Amorphous Graphene Sheets (a-GS)
4. Nanofilled
5. Feynman
6. High-Shear Mixer
7. دی‌اکسید زیرکونیوم به انگلیسی Zirconium Dioxide با نام زیرکونیا و فرمول مولکولی ZrO_2
8. اکسید سریم (IV) به انگلیسی Cerium(IV) Oxide با فرمول شیمیایی CeO_2
9. دی‌اکسید تیتانیوم به انگلیسی Titanium Dioxide همچنین به‌عنوان تیتانیوم ۴ اکسید یا تیتانیا با فرمول شیمیایی TiO_2
10. Al_2O_3
11. Exfoliated Hexagonal-Boron Nitride (Eh-BN)
12. Additive
13. Inhibited
14. Hysteresis
15. Maxwell-Ampere's law
16. Faraday's law
17. Gause's law
18. Nusselt number
19. Rayleigh number

منابع (References)

1. Maxwell, J.C., 1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford: Clarendon Press. 1. https://doi.org/10.1017/CBO9780511709333.
2. Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: A review. *Int. J. Therm. Sci*, *46*, pp.1-19. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010.
3. Moghanlou, F.S., Khorrami, A.S., Esmaeilzadeh, E. and Vajdi, M., 2021. Effect of strong electric field on heat transfer enhancement in a mini channel containing Al_2O_3/oil nanofluid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *43:149*, pp.1-13. https://doi.org/10.1007/s40430-021-02869-x.
4. Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles argonne national lab. IL (United States).
5. Bhunia, M.M., Panigrahi, K., Das, S., Chattopadhyay, K.K. and Chattopadhyay, P., 2018. Amorphous graphene - Transformer oil nanofluids with superior thermal and insulating properties. *Carbon*, *139*, pp.1010-1019. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.012.
6. EPRI Portfolio., 2007. Transmission reliability and performance:37.002, transformer life extension, http://www.epri.com/portfolio.
7. Samy, A.M., Ibrahimb, M.E., Abd-Elhadyb, A.M., Izzularabb, M.A., 2020. On electric field distortion for breakdown mechanism of nanofilled transformer oil. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *117*, pp.1-7. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105632.
8. Dean, S.W., Mansoori, G.A. and Fauzi Soelaiman, T.A., 2005. Nanotechnology2014 an introduction for the standardscommunit. *J. ASTM Int*, *2*(6), pp.13110-13122. https://doi.org/10.1520/JAI13110.
9. Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, *66*, Washington, DC, USA, pp.99-105, 199.
10. Rajnak, M., Timko, M., Kopcansky, P., Paulovicova, K., Kuchta, J., Franko, M., Kurimsky, J., Dolnik, B. and Cimbala, R., 2019. Transformer

oil-based magnetic nanofluid with high dielectric losses tested for cooling of a model transformer, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 26*, pp.1343-1349. https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008047.

11. Yu, W. and Xie, H., 2011. A review on nano_uids: Preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012, pp.1-17. https://doi.org/10.1155/2012/435873.

12. Dombek, G., Nadolny, Z. and Przybyłek, P., 2014. The study of thermal properties of mineral oil and synthetic ester modified by nanoparticles TiO_2 and C60. ICHVE, pp.1-4.

13. Avdeev, M.V., Balasoiu, M., Aksenov, V.L. Garamus, V.M., Kohlbrecher, J., Bica, D. and Vekas, L., 2004. On the magnetic structure of magnetite/oleic acid/benzene ferrofluids by small-angle neutron scattering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *270*(3), pp.371-379. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.08.032.

14. Suri Babu, G. and Chiranjeevi, T., 2019. Synthesis and application of CeO2 and Zro2 nanoparticles for enhancement of dielectric strength of transformer oil. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng. (IJITEE)*, *8*(9), ISSN:2278-3075. http://dx.doi.org/10.35940/ijitee.H7408.078919.

15. Diaa-Eldin, A.M., Elaseed, A.M. and Izzularab, M.A., 2016. The role of intertfacial zone in dielectric properties of transformer oil-based nanofluid. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 23*(6), https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005697.

16. Baruah, N., Maharana, M. and Dey, S.S., 2019. Nanoparticle polarization effect on the permittivity of the dielectric liquid. *In: IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Roma, Italy. pp.23-27.

17. Hessien, M.M., Sabiha, N.A., Ghoneim, SS.M. and Alahmadi, AA., 2017. Enhancement of dielectric characteristics of transformer oils with nanoparticles. *Int. J. Appl. Eng. Res. 12*(24), ISSN 0973-4562, pp.15668-15673. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.16376.34565.

18. Pourpasha, H., Zeinali Heris, S. and Mohammadpourfard, M., 2023. The effect of TiO_2 doped multi-walled carbon nanotubes synthesis on the thermophysical and heat transfer properties of transformer oil: A comprehensive experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, *41*, pp.1-19. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102607.

19. Alizadeh, H., Pourpasha, H., Zeinali Heris, S. and Estell´, P., 2022. Experimental investigation on thermal performance of covalently functionalized hydroxylated and non-covalently functionalized multi-walled carbon nanotubes/transformer oil nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering. 31*, pp.1-16. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101713.

20. Ataei, M., Moghanlou, F.S., Noorzadeh, S., Vajdi, M. and Shahedi Asl, M., 2020. Heat transfer and flow characteristics of hybrid Al_2O_3/TiO_2-water nanofluid in a minichannel heat sink. *Heat Mass Transfer*, *56*, pp.2757-2767. http://dx.doi.org/10.1007/s00231-020-02896-9.

21. O'Sullivan F., Hwang, J.G., Zahn, M., Olof Hjortstam, O., Pettersson, L., Liu, R. and Biller, P., 2008. A model for the initiation and propagation of positive streamers in transformer oil. *In: Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp.210-214. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4570312 authors#authors.

22. Hasan M.I., 2017. Using the transformer oil-based nanofluid for cooling of power distribution transformer. *Int. J. Energy Environ*, *8*(3), pp.229-238.

23. Zhang, Y., Ho, S.L., Fu, W., Yang, X., Wu, H.,Yang, H. and Jie, Y., 2019. Numerical study on nanofluids natural convection heat transfer inside power transformer windings. *AIP Advances*, *9*, pp.1-5. https://doi.org/10.1063/1.5130146.

24. Zhang, Y., Ho, S.L., Fu, W., Yang, X. and Wu, H., 2019. Numerical study on natural convective heat transfer of nanofluids in disc-type transformer windings. *IEEE Access, Multidisciplinary Rapid Review Open Access Journal*, *7*, pp.51267-51275. http://hdl.handle.net/10397/87623. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911712.

25. Mehrvarz, B., Bahadori, F. and Zolfaghari Moghaddam, S., 2019. Heat transfer enhancement in distribution transformers using TiO_2 nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, *30*(2), pp.221-226. https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.10.026.

26. Taghikhani, M.A., 2012. Power transformer winding thermal analysis considering load conditions and type of oil. *International Journal of Material and Mechanical Engineering*, *1*(6), pp.108-113.

27. Guan, W., Jin, M., Fan, Y.,Chen, J., Xin, P., Li, Y., Dai, K., Zhang, H., Huang, T. and Ruan, J., 2014. Finite element modeling of heat transfer in a nanofluid filled transformer. *IEEE Trans. Magn*, *50*, pp.3-4. doi: 10.1109/TMAG.2013.2279479.

DOI:10.24200/J40.2023.61526.1662

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 93-106, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 17 December 2022; received in revised form 24 January 2023; accepted 6 February 2023.

Abstract

Transformers are one of the most important and expensive equipments in industries whose optimal performance has been influenced by various parameters such as weather conditions (temperature, humidity, etc.) and consumption patterns of the region. Transformer oils are one of the most vital materials used in this equipment. The oil of the transformer coils has been controlled by two factors: First, it acts as an electrical insulator between the coils and the body. Second, the heat created in the parts and the core of the transformer is transferred to the outside. In the electrical industry, many problems may be caused by transformers. Most of these cases have been affected by the performance of oils. In case of improper operation of the oil, it will cause disruption in electricity distribution and even damage and destruction. The oil should perform both tasks of cooling the transformer and insulating the body with electricity at the ideal level. However, due to the low thermal conductivity of such mineral oils, transformers cannot provide optimal performance.

In this research by the simulation study, sufficient and acceptable information has been obtained to create the most optimal nano-oil in the operational range with comprehensive library reviews. On the other hand, according to the theoretical analysis, it has been presented that metal oxide nanoparticles, such as CuO, TiO_2, Al_2O_3, SiO_2, and MWCNT as hybrid NMs, have been used so far. The most important result of this study, in addition to the type of hybrid nanoparticles, is to find the best combination to increase thermal conductivity and the principles of electrical conductivity and standard indicators of transformer industries. To start the experimental design, the best and most optimal instruction is simulating the function of the transformer using different nano-oils by a computer. Then, in the next step, this simulation has been done by COMSOL software. So, first of all, precise prioritization for using different nanoparticles can be obtained.

Key Words: Transformer oil, nanofluid based on oil, hybrid nanoparticles, heat transfer, cooling.

stent application. Accordingly, lately, microstructure and mechanical properties of magnesium have been improved using various methods, including Severe Plastic Deformation (SPD). Many SPD methods have been introduced for the fabrication of ultrafine grain tubes until now, and the process of Tubular Channel Angular Pressing (TCAP) is the most effective one. In this research, by optimally designing the geometrical parameters of the trapezoidal channel, the process force in TCAP has been reduced, and for the first time, magnesium tubes with a thickness of 1 mm have been processed using this process. At the beginning of the research, using the finite element model, the process was simulated in Abaqus software, and the effect of the geometric parameters on the process force was investigated. To investigate the performance of the process with optimal geometric parameters, magnesium tubes with an outer diameter of 5 mm and a thickness of 1 mm were processed at a temperature of 200°C in three passes. The results of metallographic, microhardness, and tensile tests show that the TCAP process with trapezoidal geometry and optimal geometrical parameters is a suitable process for modifying the microstructure and improving the mechanical properties of magnesium tubes with a thickness of one millimeter. The values of yield strength and ultimate strength in the second pass are 1.6 and 1.26 times the initial sample, respectively, and have reached 60 and 92 MPa. The average grain size and hardness have reached from 200μm and 30 HV in the initial sample to 3μm and 40 HV after the third pass, respectively. The ductility and strength of processed samples have improved compared to the initial sample.

Key Words: Severe plastic deformation, tubular channel angular pressing (TCAP) process, ultrafine-grained thin tubes, magnesium.

BOUNDARY FEEDBACK TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF RIGID BODIES WITH INTERIOR SHALLOW-WATER SLOSHING

M. Jokar
meysam.jokar@mech.sharif.edu
H. Salarieh(corresponding author)
salarieh@sharif.edu
H. Nejat Pishkenari
nejat@sharif.edu
Dept. of Mechanical Engineering
Sharif University of Technology
DOI:10.24200/J40.2023.61473.1661

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 83-91, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 7 December 2022; received in revised form 9 January 2023; accepted 14 February 2023.

Abstract

The problem of tracking control is addressed for rigid bodies with interior shallow-water sloshing. The liquid motion is modeled by the Saint-Venant equations, coupled with the ODE of the rigid body, leading to a global system with an ODE-hyperbolic PDE cascade structure. The paper aims to design an innovative boundary feedback framework for a pre-specified position to deal with rigid body tracking errors. Using only one control force applied to the rigid body, the formulated strategy efficiently stabilizes both the finite- and infinite-dimensional states. The main complexity lies in the fact that no sensor can be implemented in the liquid domain. Indeed, the proposed stabilizing feedback law simply requires measurements of (i) the rigid body position error and velocity and (ii) the liquid pressure at the cavity walls (liquid boundary). The asymptotic stability of the closed-loop system is analyzed using the Lyapunov direct method and LaSalle's invariance principle without any discretization, reduction, and linearization. Additional controller features are highlighted by simulation results, including its benefits in contrast to the corresponding PD controller and its robustness to time delay and system uncertainty.

Key Words: Rigid body, shallow-water sloshing, saint-venant model, hyperbolic PDE-ODE cascade, Boundary feedback control.

SIMULATION AND THEORETICAL ANALYSIS OF THE NANOFLUID-BASED OIL TRANSFORMERS FOR IMPROVING THE COOLING PERFORMANCE OF THE TRANSFORMER

S.A.H. Zamzamian(corresponding author)
azamzamian@merc.ac.ir
S. Rezazade Mofradnia
srezazadeh69@gmail.com
M.R. Pazouki
pazoukim.reza@gmail.com
Dept. of Energy Materials and Energy Research Center (MERC)
Solar Energy Group
M. Pazouki
m.pazouki@merc.ac.ir
Dept. of Energy Materials and Energy Research Center (MERC)

the illness. This paper describes a method for predicting the position and orientation of a magnetic capsule in a fluid environment, as well as controlling it. In the suggested approach, it is assumed that the capsule moves at a low speed in the stomach; hence, the Stokes equations are used for the motion, and the equations of motion of a capsule were extracted. The position and orientation of the capsule are determined using a non-linear Kalman filter with the help of external magnetic sensors. A method has also been provided for controlling and positioning this capsule simultaneously using a duty cycle. The actuation fields and magnetic sensors are not used concurrently in this method, and the sensor data is used for localization when the actuation is turned off. The performance of the proposed methods was investigated using simulation.

Key Words: Localization, control, kalman filter, capsule endoscopy, magnetic field.

NUMERICAL SIMULATION OF ENERGY HARVESTING FROM A FLEXIBLE PLATE BEHIND A CYLINDER USING FLOW-INDUCED VIBRATIONS

M. Poormomeni Firoozabadi
poormomenimahnaz@gmail.com
A. Tayebi(corresponding author)
tayebi@yu.ac.ir
Y. Shekari
shekari@yu.ac.ir
Faculty of Engineering
Yasouj University
DOI:10.24200/J40.2023.60966.1653

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 65-74, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 8 November 2022; received in revised form 1 February 2023; accepted 7 February 2023.

Abstract

Energy harvesting is the process of converting different kinds of energy, such as solar, thermal, kinetic energy of fluid, etc., to a usable form of energy. Different kinds of transduction mechanisms are used for energy harvesting. The piezoelectric mechanism has received considerable interest because of its advantages, such as ease of application and working over a wide range of frequencies. Simulation and investigation of energy harvesting from a piezoelectric plate, which is mounted on an elastic beam and located behind a cylinder through flow-induced vibrations, is the subject of the present research. First, the results of the lift and drag coefficients in the fluid flow around a stationary cylinder at Reynolds 200 are compared and validated with the previous studies. After that, by placing an elastic beam and a piezoelectric behind the cylinder, flow around the cylinder, and the fluid-solids interactions are investigated. Due to the vortex shedding phenomenon, which happens in the fluid flow past the cylinder, the elastic piezoelectric beam deforms periodically, and thus, the mechanical energy of the flow is converted into electrical energy. In this problem, the beam effect on both the drag/lift reduction and the amount of voltage extracted from the piezoelectric layer were investigated, and the optimal mode obtained was selected based on the extraction of more energy. In this regard, the process of finding the most optimal energy harvesting mode for the location of the elastic beam, the length of the beam, and the fixed point of the elastic beam in different geometries are carried out. The results of the optimal investigations are as the length of the elastic beam of 2D, the distance of the beam from the back of the cylinder 2.5D, and the state in which the beam is fixed from the right side, where D is the diameter of the cylinder.

Key Words: Energy harvesting, piezoelectric, flow-induced vibrations, flexible plate.

PROCESSING OF THIN MAGNESIUM TUBES BY TUBULAR CHANNEL ANGULAR PRESSING (TCAP) PROCESS WITH TRAPEZOIDAL GEOMETRY

M. Kamran Masouleh
mohsenkamran7394@gmail.com
A. Assempour(corresponding author)
assem@sharif.edu
Dept. of Mechanical Engineering
Sharif University of Technology
DOI:10.24200/J40.2023.61457.1660

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 75-82, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 28 November 2022; received in revised form 31 January 2023; accepted 6 February 2023.

Abstract

Due to the compatibility of Magnesium with the body, it is a suitable material for making biodegradable stents, although its mechanical properties are not desirable for

ROTOR DESIGN AND PERFORMANCE STUDY OF AN AIRBORNE WIND ENERGY SYSTEM WITH FLIGHT DYNAMICS SIMULATOR

M. Ahmadi
mahdiahmadi@modares.ac.ir
S. Karimian Aliabadi(corresponding author)
karimian@modares.ac.ir
Faculty of Mechanical Engineering
Tarbiat Modares University
DOI:10.24200/J40.2022.60848.1651

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 45-56, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 29 August 2022; received in revised form 8 October 2022; accepted 9 November 2022.

Abstract

Airborne wind energy system (AWES) is a novel approach in wind energy harvesting. It has several advantages against conventional horizontal axis wind turbine (HAWT), like using less material and thus lower manufacturing cost, higher efficiency, stable electricity output and higher capacity for energy harvesting. It is obviously embedding a complex control system which makes the appropriate flight trajectory for the vehicle. These systems need to be carefully designed so using virtual flight simulators in design process is crucial. The main components of a typical AWES are: tether, flyer, and rotors. The flyer is designed to have a tether-constrained flight across the wind in a circular path. Consequently, the mounted rotors on the flyer's wings will capture energy and this mechanical/electrical energy would be sent back to the ground via the same tether. It is notable that the flight path and the special design of the flyer, would make it capable to have a sustained motion in the circular loop with no energy consumption. A tethered drone equipped with several rotors is an example of such devices, already has been built and tested. In previous literature, the flight simulators usually contain some simple aerodynamic models for predicting the forces and moments generated by the rotors. It is derived by constant aerodynamic coefficients. In the current study, it has been developed a flight simulator for a typical AWES having onboard rotors. To make this flight simulator more accurate and to improve its fidelity in different environmental conditions, proper estimation of the external forces, particularly the aerodynamic forces and moments, seems to be necessary. Therefore, toward developing a high-fidelity simulator, Lagrangian dynamics and a new algorithm for estimation of the rotor aerodynamics, has been utilized. This new method is shown to have more accurate approximations of the system performance and also better description of the vehicle trajectory. By this framework, one could design optimized blades of the rotors and also the rotors arrangement. Implementing the new simulator, a single drone, as the flyer in AWES, having 3m wing span, would experience 40 percent improvement in the average power extracted which is near 2 KW.

Key Words: Airborne wind energy system (AWES), lagrangian flight simulator, tethered flight, aerodynamic coefficients, rotor section.

LOCALIZATION AND CONTROL OF AN ENDOSCOPIC CAPSULE USING STOKES FLOW EQUATIONS

P. Sadeghi Boroujeni
sadeghi_pouria@mech.sharif.edu
H. Nejat Pishkenari(corresponding author)
nejat@sharif.edu
H. Moradi
hamedmoradi@sharif.edu
Gh. Vossoughi
vossough@sharif.edu
Dept. of Mechanical Engineering
Sharif University of Technology
DOI:10.24200/J40.2023.61340.1657

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 57-63, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 7 November 2022; received in revised form 9 January 2023; accepted 21 January 2023.

Abstract

Small magnetic robots are now widely used in the treatment of a variety of ailments. Capsule endoscopy is a non-invasive procedure used to examine the digestive tract. Wireless capsule endoscopy is a significant innovation in this century to diagnose gastrointestinal tract disorders with minimal pain for the patient. This technology facilitates the inspection of the digestive system and avoids the risks of conventional endoscopy. Determining the exact position and placement of this capsule can help the doctor determine the exact location of the lesions in the digestive tract. In addition, once the exact position is determined, it can be used as input for control systems. The ability to determine the position and orientation of the capsule and control its movement can greatly assist the treating physician in detecting the disease. Moreover, the active endoscopic capsule allows the doctor to control the capsule in any desired position and direction, leading to a more accurate diagnosis of

Dept. of Energy Graduate University of Advanced Technology, Kerman
DOI:10.24200/J40.2022.60770.1649

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 25-35, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 August 2022; received in revised form 15 October 2022; accepted 19 October 2022.

Abstract

The analysis of heat transfer in the channel in many types of heat exchangers, such as electric cooling equipment, solar collectors, heat exchanger systems, high-performance boilers, gas turbine blade coolers, etc., is the basis of the design, construction, and optimization. Controlling heat transfer to increase the rate of heat transfer in such systems by improving the cooling method is an effective energy engineering from the point of saving energy. Increasing the heat transfer performance in the scales of macro and microchannels is crucial. The use of expanded surfaces in the channel is a practical method to increase the heat transfer coefficient. In the upcoming article, the smart design of a two-dimensional nanofluid heat exchanger has been studied numerically in order to achieve optimal performance conditions in terms of heat transfer rate, the amount of deposition of nanoparticles in the structure of the exchanger, as well as the fluid pressure drop while passing through it. It can be seen that the geometric structure optimized by the combination of genetic algorithm and computational fluid dynamics of this channel causes an increase of 1.14% in the enthalpy of the passing nanofluid, a decrease of 11.21% in the pressure drop of the passing nanofluid, and a reduction of 8.44% percentage in the deposition of nanoparticles inside the channel and a total increase of 24.82% in the fitting function defined in terms of these three variables, compared to the channel designed in previous studies. Therefore, this optimal channel has a higher heat transfer rate with a pressure drop and a lower amount of nanoparticle deposition compared to the previous channel, which proves the ability of the genetic algorithm with computational fluid dynamics in the optimal design of all types of heat exchangers.

Key Words: Nanofluid heat exchanger design, expanded surfaces, computational fluid dynamics, genetic algorithm, image processing.

EXPERIMENTAL STUDY OF MULTI-POINT INCREMENTAL FORMING FOR CONICAL PARTS

S. Faraji(corresponding author)
sadeghbizaki@gmail.com
Y. Rostamian
yasser.rostamiyan@iausai.ac.ir
A.A. Shamsi-Sarband
ali.shamsisarband@iausai.ac.ir
Faculty of Mechanical Engineering Azad University, Sari
DOI:10.24200/J40.2022.60611.1644

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 37-44, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 July 2022; received in revised form 8 October 2022; accepted 29 October 2022.

Abstract

The development of rapid prototyping methods has been very drastic in recent years. One of these methods, with a nature similar to sheet-forming processes, is the incremental forming method. In the last two decades, this technique has attracted much attention in industrial applications. The incremental forming process has been able to play a major role in advancing industrial projects in the production of low-volume prototypes. This process is a suitable alternative to conventional forming processes in the single production of conical geometries because of the low cost of machinery, equipment, and tools. In this paper, the two-point incremental forming of conical parts by three multi-point matrix designs, including single, double, and three-step cylinders, were investigated. For this purpose, the feed rate (400-1000 mm/min) and the penetration step of the tool (0.5-1.1 mm) were investigated in three levels to form the aluminum sheets with a thickness of 0.5 mm. In the following, the effect of the input parameters on the limiting height of the formed specimens, thickness distribution, surface roughness, and geometric accuracy of longitudinal cut specimens was assessed. According to the results, using the multi-point matrixes, despite increasing the final geometric accuracy, friction was reduced compared to the conical matrix. Using a two-step matrix, deeper pieces were formed by increasing the formability of the sheet, in which the average height was improved by an average of 12%. However, no significant change was observed in the roughness of the samples formed by all three types of matrixes. Therefore, the design of the proposed matrix had almost no tangible effect on the final surface roughness output. From the view of geometric accuracy, the matrix design with three steps created the highest geometric accuracy, as well as the least deviation relative to the planned path.

Key Words: Incremental forming, supporting die, geometry deviation, thickness distribution, surface roughness.

ing and aerodynamic forces after changing the phase to austenite. The governing equations of the system were extracted through the layer theory method to show the effects of in-plane displacements better.
Investigations on the effect of different layers (symmetry effects and arrangement angle of composite sheets) were performed to investigate thermal buckling. According to the obtained results, the layer arrangement of plates (0.90 / 0.90), (-45.45), (30/60), and (0.90 / 90.0), respectively, had the greatest effect on raising the critical temperature of thermal buckling in dimensional ratios equal to or greater than one. This shows that the symmetry of the arrangements has a greater effect than the angle of the arrangements. Examining the buckling diagrams for the effect of a shape memory alloy, it can be concluded that by placing this alloy in the composite panel, in addition to raising the buckling temperature, this alloy has a greater effect on displacement control by increasing the temperature after the critical buckling temperature.

Key Words: Shape memory alloys, composite, supersonic flow, thermal buckling, thermal post-buckling.

DESIGN AND COMPARISON OF COMBINED, PARABOLIC, AND FLAT PLATE REFLECTORS ON THE PERFORMANCE OF A SOLAR MODULE

M. Asvad
mostafaasvad75@gmail.com
M. Gorji(corresponding author)
gorji@nit.ac.ir
A. Mahdavi
arashmahdavi93@gmail.com
Faculty of Mechanical Engineering
Babol Noshirvani University of Technology
DOI:10.24200/J40.2022.60438.1642

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 13-24, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 7 June 2022; received in revised form 8 October 2022; accepted 19 October 2022.

Abstract

Solar energy is the most abundant source of energy among renewable energies, which can be directly converted into electricity by solar modules. To tackle the low energy output of solar modules in places where there are not enough spaces to install many solar modules, the use of reflectors is recommended. The use of reflectors increases the solar radiation on the surface of the module, hence will boost its power output. In this study, two-dimensional simulations were performed using ANSYS Fluent 2021 R2 package software in which the effects of a flat plate, parabolic, and hybrid reflectors on the temperature and efficiency of the module were investigated. The numerical simulation of the current study was validated against an experimental case study. Although there were so many simplifications and assumptions for the validation, the maximum deviation between the present numerical result and the experimental was less than 3.86%, which certifies the results of this paper. Based on the output, the surface temperature of the solar module with °85 flat plate reflector and °85 parabolic reflector reached 360.82 (K) and 371.11 (K), respectively, while the temperature with °50 reflector for both parabolic and flat plate modes reached 345.94 (K) and 346 (K), which are approximately equal. It was also observed that with increasing the angle of flat and parabolic reflectors, the module temperature increased, and parabolic reflectors had higher temperatures at higher angles. The module temperature using a type 6 reflector increased by 7.14% and 0.92% compared to the °80 flat plate reflector and °80 parabolic reflector, respectively. In terms of efficiency, since reflectors will intensify the solar radiation on a solar module surface, it will enhance the operating temperature of the module so that in all cases with reflectors, the efficiency will drop from an initial maximum value to a certain minimum value. This drop is more significant in the parabolic reflectors compared to the flat plate reflectors.

Key Words: Solar energy, solar module, reflector, module temperature, efficiency.

THE SMART DESIGN OF HEAT EXCHANGERS WITH EXPANDED SURFACES BY GENETIC ALGORITHM AND IMAGE PROCESSING

B. Abolpour(corresponding author)
bahadorabolpor1364@yahoo.com
Dept. of Chemical Engineering
Sirjan University of Technology
R. Hekmatkhah
ramtin.hekmatkhah@ut.ac.ir
Faculty of New Sciences and Technologies,
University of Tehran
A.B. Ansari
a.b.ansari@kgut.ac.ir

Abstracts of Papers in English

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHAPE MEMORY ALLOY ON BUCKLING AND POST-BUCKLING OF COMPOSITE PANELS IN SUPERSONIC FLOW WITH THERMAL HEATING

Z. Zabihi
zabiha.zabih@yahoo.com
M. Dardel(corresponding author)
dardel@nit.ac.ir
Dept. of Mechanical Engineering
Babol Noshirvani University of Technology
A.R. Fathi
a.fathi@um.ac.ir
Dept. of Mechanical Engineering
Ferdowsi University of Mashhad
DOI:10.24200/J40.2022.59615.1630

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 38, Issue 1, Page 3-11, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 January 2022; received in revised form 8 October 2022; accepted 8 November 2022.

Abstract

In the present work, the effect of smart shape-memory alloys on thermal buckling and post-buckling of monoclinic and unidirectional composite panels has been investigated. The aerodynamic pressure applied to the system was modeled using the piston theory method. The effect of thermal heating for ultrasonic flows was also estimated from the reference temperature method. The panel is modeled nonlinearly with large deformations based on Van Karmen's theory. The obtained results show that the shape-memory alloy was able to increase the critical temperature of thermal buckling. The effect of the arrangement of composite layers on increasing the thermal buckling temperature was also studied. The results show that the amount of thermal deflection is greatly reduced due to the use of this alloy. Also, in the higher temperature differences, the rate of reduction of the panel increases.

In this work, the effects of thermal stress on buckling and thermal buckling in a rectangular composite panel with hinge-hinge boundary conditions were investigated. Also, the effect of shape retention alloy in controlling these two phenomena has been studied. The shape memory alloy wire was placed in martensitic mode to apply a compressive force to the panel to control the heat-

Mechanical Engineering

Sharif

2

Fall
2023

Editor-in-Chief: Mehrdad Taghizadeh Manzari

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published semiannually in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, **"Sharif"** publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN
Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983
Web: http://journal.sharif.ir/ http:// www. globalsciencejournals.com
E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

3 **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHAPE MEMORY ALLOY ON BUCKLING AND POST-BUCKLING OF COMPOSITE PANELS IN SUPERSONIC FLOW WITH THERMAL HEATING**
Z. Zabihi, M. Dardel and A.R. Fathi

13 **DESIGN AND COMPARISON OF COMBINED, PARABOLIC, AND FLAT PLATE REFLECTORS ON THE PERFORMANCE OF A SOLAR MODULE**
M. Asvad, M. Gorji and A. Mahdavi

25 **THE SMART DESIGN OF HEAT EXCHANGERS WITH EXPANDED SURFACES BY GENETIC ALGORITHM AND IMAGE PROCESSING**
B. Abolpour, R. Hekmatkhah and A.B. Ansari

37 **EXPERIMENTAL STUDY OF MULTI-POINT INCREMENTAL FORMING FOR CONICAL PARTS**
S. Faraji, Y. Rostamian and A.A. Shamsi-Sarband

45 **ROTOR DESIGN AND PERFORMANCE STUDY OF AN AIRBORNE WIND ENERGY SYSTEM WITH FLIGHT DYNAMICS SIMULATOR**
M. Ahmadi and S. Karimian Aliabadi

57 **LOCALIZATION AND CONTROL OF AN ENDOSCOPIC CAPSULE USING STOKES FLOW EQUATIONS**
P. Sadeghi Boroujeni, H. Nejat Pishkenari, H. Moradi and Gh.Vossoughi

65 **NUMERICAL SIMULATION OF ENERGY HARVESTING FROM A FLEXIBLE PLATE BEHIND A CYLINDER USING FLOW-INDUCED VIBRATIONS**
M. Poormomeni Firoozabadi, A. Tayebi and Y. Shekari

75 **PROCESSING OF THIN MAGNESIUM TUBES BY TUBULAR CHANNEL ANGULAR PRESSING (TCAP) PROCESS WITH TRAPEZOIDAL GEOMETRY**
M. Kamran Masouleh and A. Assempour

83 **BOUNDARY FEEDBACK TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF RIGID BODIES WITH INTERIOR SHALLOW-WATER SLOSHING**
M. Jokar, H. Salarieh and H. Nejat Pishkenari

93 **SIMULATION AND THEORETICAL ANALYSIS OF THE NANOFLUID-BASED OIL TRANSFORMERS FOR IMPROVING THE COOLING PERFORMANCE OF THE TRANSFORMER**
S.A.H. Zamzamian, S. Rezazade Mofradnia, M.R. Pazouki and M. Pazouki

APPENDIX

114 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**