

مقایسه و بررسی شبیه سازی حریق با نرخ آزادسازی حرارت بالا در محفظه بسته با نرم افزارهای FDS و OpenFOAM

چکیده: یکی از ابزارهای قوی در بررسی آتش، روش دینامیک سیالات محاسباتی است که قابلیت پیش بینی کامل پارامترهای اثر گذار در آتش همچون، دما، سرعت، فشار، گونه های سمی و تشعشع را دارد. البته در این روش نیاز به بررسی صحت سنجی می باشد که با شبیه سازی و اعتبار سنجی نتایج آن با نتایج تجربی، صحت نتیجه عددی را به خوبی شناخت و همچنین ارزش مدل های حاکم در شبیه سازی را بررسی کرد. از این رو در پژوهش حاضر، با استفاده و مقایسه نتایج دو نرم افزار اف دی اس و اپن فوم در هندسه آتش در محفظه، شرایط و پارامترهای دما، سرعت و گونه فرایند احتراق از ابتدا تا انتها بررسی و تحلیل شدند که با بررسی نتایج مشاهده شد که دو نرم افزار در صحت سنجی نتایج مشابهی دارند؛ اگرچه مقدار نتایج نرم افزار اپن فوم بهتر از اف دی اس می باشد. به طوری که نتایج دما و کربن دی اکسید در نرم افزار اپن فوم به ترتیب ۲۲/۴ و ۱۶ درصد خطای نسبی دارد؛ اما نرم افزار اف دی اس به ترتیب ۲۴ و ۳۱ درصد خطای نسبی دارد.

واژه های راهنما: حریق در محفظه، مطالعه رفتار آتش، شبیه سازی احتراق، نرم افزار اف دی اس، نرم افزار اپن فوم، جریان اغتشاشی، دینامیک سیالات محاسباتی

حمید تجدد
کارشناسی ارشد

قاسم حیدری نژاد*
استاد

محمد صفرزاده
دکتری،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹

Hamid Tajaddod
MSc.

Ghassem
Heidarinejad*
Professor

Mohammad
Safarzadeh
PhD,
Faculty of Mechanical
Engineering, Tarbiat
Modares University,
Tehran

Comparison and investigation of high HRR fire simulation in enclosed compartment with FDS and OpenFOAM

Abstract: One of the powerful tools for fire investigation is Computational Fluid Dynamics, which has the capability to predict all influential parameters in fire, such as temperature, velocity, pressure, toxic species, and radiation. However, this method requires validation to assess the accuracy of the results. This can be achieved by simulating and comparing the results with experimental data to evaluate the numerical accuracy and examine the validity of the governing models used in the simulation. In this study, the temperature conditions, velocity, and combustion species were investigated and analyzed in the geometry of the fire compartment, by comparing the results of two software, FDS and OpenFOAM. It was observed that both software have similar validation results, although OpenFOAM performs slightly better than FDS. For instance, the temperature and CO₂ species results in OpenFOAM have a relative error of 22.4 and 16%, while FDS have a relative error of 24 and 31%.

Keywords: Compartment fire, Fire behavior study, Fire simulation, FDS software, OpenFOAM software, Turbulence flow, Computational fluid dynamic (CFD)

۱- مقدمه

بسته با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را انجام داد [۱۰].

یکی از رایج‌ترین روش‌های شبیه‌سازی آتش استفاده از تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی است. در حال حاضر، بسیاری از این ابزارها قادر به شبیه‌سازی رفتار آتش هستند و در سال‌های اخیر با ارائه نرم‌افزارهای مختلف در زمینه مطالعه عددی رفتار آتش مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱۱]. نرم‌افزارهایی همچون اپن‌فوم^۲ (حلگر تخصصی فایرفوم^۳، فلوئنت^۴، اف‌دی‌اس^۵، سی‌اف‌ایکس^۶ و نرم‌افزارهایی دیگر از جمله این نرم‌افزارها هستند. در بین این نرم‌افزارها، اپن‌فوم و اف‌دی‌اس دو حلگری است که بیشتر از سایر نرم‌افزارها در شبیه‌سازی جریان حریق مورد استقبال قرار گرفته است.

مطالعات عددی در سناریوهای مختلف با این دو نرم‌افزار انجام شده است. به عنوان مثال، لی و همکاران به بررسی اولیه از ویژگی‌های احتراق در ارتفاعات مختلف یک محفظه پرداختند [۱۲]. یان و جرنی با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس به منظور بررسی مدل‌سازی عددی مختلف برای ارزیابی دما در سازه‌های فولادی تحت آتش‌سوزی موضوعی پرداختند و مشخص شد از بین روش‌های عددی مورد استفاده، مدل ارائه شده توسط هاسمی^۷، بیشترین مطابقت را با روش تجربی دارد [۱۳].

سیکانن و هوستیکا به بررسی شبیه‌سازی آتش‌سوزی در محفظه‌های دارای تهویه مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس پرداخته و نتایج نشان داد که نتایج عددی در پیش‌بینی نرخ سوختن^۸ در حالت پایدار ۱۵ درصد خطای نسبی با نتایج تجربی دارد [۱۴].

پریتلر و همکاران به بررسی رژیم‌های احتراق بدون تهویه طبیعی در محفظه بسته با هدف بهبود درک رژیم‌های احتراق با تمرکز بر اثر آتش و نرخ تهویه اجباری پرداختند و سه رژیم متفاوت در محفظه (دو رژیم نرخ سوزاندن ثابت با خاموش شدن به دلیل کمبود سوخت یا اکسیژن و یک رژیم نرخ سوزاندن گذرا با خاموش شدن در اثر کمبود اکسیژن) شناسایی کردند [۱۵]. اما در نرم‌افزار اپن‌فوم نیز مطالعاتی انجام شده است به عنوان مثال، صفرزاده و همکاران نیز با استفاده از این نرم‌افزار توانستند دما، سرعت و گونه‌های سمی را با کمتر از ۲۰ درصد خطای نسبی مدل‌سازی کنند. همچنین تاثیر تهویه (پرده‌ها) در کنترل و گسترش حریق با سوخت متان در ساختمان سه طبقه بررسی

حریق و کنترل آن امروزه به یک بحث مهم در جهان بدل شده است و متخصصان همواره در تلاش هستند که بتوانند از فرایند پیشروی و گسترش حریق در محیط جلوگیری کرده و خطرات متناسب با آن‌ها را کاهش دهند. بنابراین می‌توان با شبیه‌سازی محیط‌های پرخطر و با فرض شرایط و جریان احتراق، این مسائل را پیش‌بینی کرد و با برنامه‌ریزی مناسب از وقوع حوادث این چنینی جلوگیری کرد. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که آمارهای مربوط به حوادث ناشی از سوختگی مورد توجه قرار گیرد. مثلاً آمار ناشی از سوختگی در ایران در چهار ماهه نخست سال ۱۴۰۲، ۶۹۴ نفر می‌باشد [۱].

ارزیابی خطر آتش‌سوزی یک مسئله کلیدی است که عمدتاً به دلیل پیچیدگی سناریوی آتش‌سوزی در محفظه‌های بسته و تهویه‌شده مکانیکی است که به طور قابل توجهی بر فرآیندهای احتراق و دینامیک جریان دود تأثیر می‌گذارد [۲]. بسیاری از مطالعات بر روی آتش‌سوزی محفظه متمرکز شده اند [۳، ۴] زیرا در این زمینه مطالعاتی به طور قابل توجهی بزرگ و پیچیده است. با توجه به خطر آتش‌سوزی در محیط‌های صنعتی و ساختمان‌های مسکونی، مطالعه رفتار آتش و همچنین عوامل مؤثر بر جلوگیری از رشد و اطفای آن امری ضروری است [۵].

تحقیقات زیادی [۶، ۷] با هدف درک مکانیسم اشتعال و رشد آتش و همچنین حرکت دود به محفظه‌های مجاور انجام شده است. این مجموعه از تحقیقات منجر به مدل‌های رایج‌تری شد که رشد آتش‌سوزی و انتشار دود را در یک محفظه یا ساختمان پیش‌بینی می‌کند که می‌تواند برای طراحی استراتژی‌های مؤثر برای کنترل رشد و گسترش آتش به منظور بهبود ایمنی زندگی و کاهش آسیب اموال مورد استفاده قرار گیرد [۸]. از این رو کاربران در سال‌های گذشته برای شبیه‌سازی از این نرم‌افزارها بهره برده‌اند.

در برخی از مطالعات [۹] از پیشرفت‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ در آتش‌سوزی و با تشریح برخی از مثال‌ها، از تاثیر مهم استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداخته شده است. با توجه به اهمیت موضوع جریان آتش‌سوزی، مطالعات عددی و تجربی متعددی صورت گرفته است. مک‌گراتان از جمله اولین افرادی بود که شبیه‌سازی حریق در محیط باز و

⁵ Fire Dynamic Simulator (FDS)

⁶ CFX

⁷ Hasemi model

⁸ Burning rate

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

² OpenFOAM

³ fireFoam

⁴ Fluent

همچنین عمده تفاوت این دو نرم‌افزار در پروفیل دما بود که نرم‌افزار این‌فوم پیش‌بینی بهتری از نتایج دما داشته است [۲۱]. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت هر دو نرم‌افزار قابلیت‌های مختلفی دارند که در مطالعه پژوهش‌های مختلف به برخی از آن‌ها (رفتار حریق، بررسی دما، سرعت و گونه‌های سمی) اشاره شد. رفتار حریق (پلوم آتش) و مکانیزم آن در داخل محفظه‌های باز و بسته در پژوهش‌های گوناگون به صورت موردی بررسی شده است. اما مقایسه دو نرم‌افزار در سناریوی مشابه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه در سناریوی آتش استخری، این موضوع بررسی شده است. از این رو مقایسه دو نرم‌افزار در سناریوی آتش در فضای بسته می‌تواند کارایی این دو نرم‌افزار را بیشتر نمایان سازد. به این منظور در مطالعه حاضر، به بررسی و تحلیل رفتار حریق و برخی پارامترهای خروجی آن پرداخته شده و نتایج دو نرم‌افزار با یکدیگر مقایسه می‌گردد. همچنین به منظور بررسی کاملی از مقایسه‌ی این دو نرم‌افزار، نتایج دما، گونه و سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین سعی شده است که در موقعیت‌های مختلف این موضوع بررسی گردد.

۲- روابط ریاضی و مدل‌سازی

در این بخش معادلات ریاضی و همچنین روش عددی به تفصیل بیان می‌گردد.

۲-۱- مدل‌سازی حریق

برای شروع این پژوهش ابتدا لازم است که انواع مدل‌سازی‌های حریق در مناطق بسته بررسی شود. آتش‌سوزی در فضای بسته برخلاف آتش‌سوزی در محیط باز، به دلیل تاثیر مرزهای جامد، دیواره‌ها و وجود یا عدم تهویه، دارای مراحل مختلف مانند اشتعال^۵، رشد^۶، سوزش^۷، آتش توسعه‌یافته^۸ و خاموشی^۹ است. یکی از آسیب‌پذیرترین و پیچیده‌ترین سناریوهای مراحل آتش-سوزی در محیط بسته از لحاظ ایمنی آن، مرحله کاملاً توسعه‌یافته است [۲۲]. به طور کلی مدل‌های شبیه‌ساز رایانه‌ای حریق و توزیع دود در دو دسته مدل‌های ناحیه‌ای و مدل‌های میدانی قرار دارد [۲۳].

شد و دریافته‌اند که می‌توان گازهای سمی را به خوبی مدل‌سازی کرده و پرده هوا نیز در صورت استفاده، خطری برای طبقات بالاتر ندارد [۱۶].

رازقی و همکاران با استفاده از کد فایرفوم، حلگری برای استفاده از دو مدل احتراقی فلیملت آرام^۱ و اضمحلال گردابه‌ای^۲ را در نرم‌افزار این‌فوم توسعه دادند و به مقایسه و بررسی فیزیک جریان آتش این دو مدل در فضای تک اتاقی پرداختند و مشخص شد هزینه محاسباتی در مدل اضمحلال گردابه‌ای ۱۴ درصد نسبت به مدل دیگر بیشتر است و همچنین نتایج سرعت و دما در مدل احتراقی فلیملت آرام، از دقت بیشتری نسبت به مدل دیگر برخوردار است [۱۷].

پاسدارشهری و همکاران نیز با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم و به کارگیری روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۳، دقت این نرم‌افزار را در سناریوی آتش استخری و آتش در فضای تک و دو اتاقه، بررسی کردند و نتایج، دقت قابل قبول این نرم‌افزار را نشان داد [۱۸]. صفرزاده و همکاران با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم و اضافه کردن مدل احتراقی اف‌جی‌ام^۴ به حلگر فایرفوم، توانستند تمام گونه‌های سمی حاضر در حریق در فضای اتاق با سه نرخ آزادسازی حرارت ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات را مدل کنند [۱۹].

در حالت کلی هر یک از نرم‌افزارها قابلیت شبیه‌سازی خاصی دارند که متناسب با آن قابلیت‌ها، دقت مدل‌سازی تغییر می‌کند. نکته مهم در استفاده از این نرم‌افزارها، انتخاب نرم‌افزار با دقت محاسباتی بالاست. به این منظور مقایسه نتایج نرم‌افزار مورد استفاده در سناریوهای مختلف لازم است. به عنوان مثال مراگکاس و مرسی دو نرم‌افزار این‌فوم و اف‌دی‌اس را در سناریوی آتش‌سوزی استخری مقایسه کردند و دریافته‌اند که تطابق مناسبی بین نتایج عددی دو نرم‌افزار با نتایج تجربی وجود دارد به نحوی که نتایج سرعت و دما در ناحیه‌ی پلوم حرارتی در هر دو نرم‌افزار کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد [۲۰].

آلمیدا و همکاران به شبیه‌سازی عددی شعله نفوذی با سوخت متان پرداختند و نتایج میدان سرعت، دما و کسر مخلوط را در دو حلگر فایرفوم (در نرم‌افزار این‌فوم) و اف‌دی‌اس مقایسه کردند. با مقایسه نتایج مشخص شد که هر دو نرم‌افزار میدان‌های سرعت و گردابه را مشابه یکدیگر پیش‌بینی کردند و نرم‌افزار اف-دی‌اس، تخمین‌های بهتری برای کسر مخلوط نشان داد.

⁵ Ignition

⁶ Spread

⁷ Flashover

⁸ Fully-Developed Fire

⁹ Decay

¹ Steady Laminar Flamelet Model (SLFM)

² Eddy Dissipation Model (EDM)

³ Large Eddy Simulation (LES)

⁴ Flamelet Generated Manifold (FGM)

پیوستگی، مومنتوم، انرژی و کسر جرمی گونه‌ها، معادلات کلی حاکم برای پیش‌بینی حریق به کار برده می‌شود [۲۷]. معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها باید به صورت کوپل شده حل شوند و بعد نحوه گسسته‌سازی معادلات، مدل‌های تعریف شده، فرضیات و روند حل در نرم‌افزار مورد استفاده، مشخص گردد که در نهایت دستگاه حاصل از این معادلات، رفتار فیزیکی یک سیستم احتراقی را بیان خواهد نمود. معادلات حاکم بر جریان سیال در ادامه بیان می‌گردد [۲۸]. با اعمال قانون بقای جرم بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادله بقای جرم کلی به صورت معادله (۱) به دست خواهد آمد [۲۸].

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

در رابطه (۱) دانسیته، u سرعت، t زمان را نشان داده است و همچنین در این رابطه، منبع تولید یا همان ترم چشمه وجود ندارد. قانون فیک بیان می‌دارد که در یک مخلوط دوجزئی، شار جرمی گونه α از رابطه زیر (۲) به دست خواهد آمد [۲۸].

$$\dot{m}''_{\alpha} = Y_{\alpha} \dot{m}''_{tot} - \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} \quad (2)$$

با توجه به معادله (۲) فرم کلی معادله پایداری جرم گونه‌ها (۳) بصورت زیر است. در رابطه (۳) نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی α می‌باشد [۲۸].

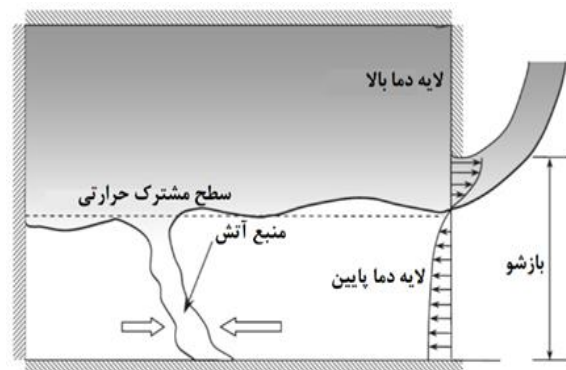
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{Y}_{\alpha}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{Y}_{\alpha} \bar{u}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} D_{\alpha} \nabla \bar{Y}_{\alpha}) + \dot{m}'''_{\alpha} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه (۲) برای همه گونه‌های احتراق در نهایت رابطه (۱) به دست می‌آید. چرا که $\sum_{\alpha=1}^N Y_{\alpha} \nu_{\alpha, diff} \approx 0$ و همچنین فرض می‌شود که $\sum_{\alpha=1}^N Y_{\alpha} = 1$ و $\sum_{\alpha=1}^N \dot{m}'''_{\alpha} = 0$ می‌باشد. با اعمال قانون دوم نیوتن بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادله بقای مومنتوم (۴) به صورت زیر به دست خواهد آمد [۲۸].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{u}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + (\bar{\rho} - \bar{\rho}_{\infty})g + \nabla \cdot \tau + f_b \quad (4)$$

مدل‌های ناحیه‌ای یکی از ساده‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی مناطق محصور به شمار رفته و می‌توان فضای داخل آن را به مناطق مختلف و شرایط را نیز به صورت یکنواخت در نظر گرفت. این مدل نیز به دو دسته مدل تک ناحیه‌ای و دو ناحیه‌ای تقسیم می‌شود [۲۴].

در مدل دو ناحیه‌ای، فضای مورد نظر به دو ناحیه تقسیم می‌شود، یکی ناحیه سرد پایینی که شامل تمام فضای زیرین ناحیه بالا که معمولاً محل منشا حریق بوده و ایجاد هوای لازم برای احتراق است و ناحیه بالایی که شامل بخارات داغ تولید شده توسط حریق که در طول حریق گسترش یافته و تمام فضای اتاق را اشغال می‌کند [۲۵]. در شکل (۱)، نمایی از مدل دو منطقه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی از مدل دو ناحیه‌ای [۱۸]

مدل دوم، مدل‌های میدانی می‌باشد که مدل‌های میدانی همان مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی است که از پیشرفته‌ترین و قدرتمندترین مدل‌ها در حوزه شبیه‌سازی حریق به شمار می‌رود. این مدل‌ها روشی برای محاسبه جریان سیال از طریق یک حجم با استفاده از حل عددی معادلات بقای انرژی، مومنتوم و جرم فراهم می‌کنند. یکی از اصلی‌ترین ویژگی این مدل که آن را از مدل قبل متمایز می‌کند، کاربرد آن نرم‌افزار برای هندسه‌های پیچیده است [۲۵].

۲-۲- معادلات انتقال حاکم

با توجه به رفتار آتش که یک جریان اغتشاشی هست و جریان هوای تولیدی حاصل از آن در یک محفظه بسته، جریان با ماخ پایین و چگالی متغیر است، بنابراین به دلیل متغیر بودن چگالی از متوسط وزنی فاوور برای متوسط‌گیری معادلات انتقال استفاده می‌شود [۲۶]. برای انجام شبیه‌سازی عددی یک مسئله فیزیکی، ابتدا بایستی معادلات حاکم بر آن مسئله معلوم گردند. معادلات

در واقع جریان آشفته، جریانی است که یک نوسان نامنظم (اختلاط یا حرکت گردابی) به جریان اصلی اضافه شده باشد برای همه مسائل، یک مدل آشفته واحد وجود ندارد و انتخاب مدل، بسته به شرایط فیزیکی جریان دارد. انتخاب مدل بر مبنای تجربه و کاربرد روش مورد نظر در هر مسئله خاص با در نظر گرفتن امکانات محاسباتی و زمان مورد نظر صورت می‌گیرد. همچنین کاربرد هر روش مستلزم آگاهی به اصول و محدودیت‌های آن روش است. به طور کلی برای مدل‌سازی جریان اغتشاشی در روش دینامیک سیالات محاسباتی، سه دسته روش وجود دارد [۳۰].

اولین روش حل مستقیم عددی^۱ است که در این روش مدل‌سازی، معادلات جریان (معادلات ناویر - استوکس) بدون اعمال مدل‌سازی و به شکل مستقیم حل می‌شوند. در این روش به دلیل اینکه نیاز است شبکه محاسباتی برای گسسته‌سازی معادلات جریان تمامی مقیاس‌های طولی جریان را پوشش دهند به همین خاطر اندازه شبکه محاسباتی باید به اندازه کوچک‌ترین مقیاس جریان یعنی مقیاس کلموگروف باشد، به همین دلیل از این روش در این پژوهش استفاده نمی‌شود. همچنین هزینه محاسباتی این روش بسیار بالا است.

دومین روش متوسط‌گیری شده زمانی معادلات ناویر - استوکس است که در این روش با متوسط‌گیری زمانی از این معادلات، معادلات متوسط‌گیری رینولدز به دست خواهد آمد که این معادلات، همان معادلات ناویراستوکس به همراه جملاتی که به آنها تنش‌های رینولدزی گفته می‌شود، است. از مزایای این روش این است که هزینه محاسبات آن نسبت به روش حل مستقیم عددی کمتر است، زیرا اندازه شبکه در این روش به مراتب نسبت به دو روش دیگر بزرگ‌تر است.

آخرین روشی که از آن برای مطالعه این پژوهش استفاده شده است، متوسط‌گیری مکانی با استفاده از فیلتر و روش گردابه‌های بزرگ است. در مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان به دو بخش گردابه‌های بزرگ و گردابه‌های کوچک تقسیم می‌شود. برای گردابه‌های بزرگ حل انجام می‌شود در حالیکه برای گردابه‌های کوچک مدل‌سازی صورت می‌گیرد. تشخیص گردابه‌های بزرگ و کوچک نیازمند وجود یک فیلتر است. در مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، این فیلتر تابعی از اندازه شبکه است. در واقع گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه در نظر گرفته نمی‌شوند و مدل می‌شوند که به مدل مقیاس زیر شبکه‌ای معروف است.

در رابطه $\nabla P(\mathcal{F})$ بردار فشار هیدرواستاتیکی، g شتاب گرانش، f_b نیرو و τ تانسور تنش می‌باشد. با اعمال قانون اول ترمودینامیک بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادلات پایستگی انرژی براساس آنتالپی محسوس، بصورت رابطه (۵) بدست خواهد آمد [۲۸].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}'' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (5)$$

در رابطه (۵) ε نماینده ترم اضمحلال در معادله انرژی (= ε) $(\tau:u)$ بیان گر نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم توسط واکنش شیمیایی، h_s نشان‌دهنده آنتالپی محسوس سیال که تابعی از دماست و \dot{q}'' نرخ انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش است که در معادله (۶) نشان داده شده است [۲۸].

$$\dot{q}'' = -k\nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{q}_r'' \quad (6)$$

در رابطه (۶) D_{α} ضریب بخش گونه α و k معرف ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. در آخر نیز معادله حالت به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می‌شود که R_u ثابت جهانی گازها و W_{α} جرم مولی گونه α است [۲۸].

$$p_0 = \rho R_u T \sum_{\alpha} Y_{\alpha} / W_{\alpha} \quad (7)$$

۲-۳- مدل‌سازی اغتشاشی

همان طور که در بخش‌های قبلی ذکر نمودیم، رفتار حریق در محیط یک پدیده فیزیکی و از نوع جریان اغتشاشی می‌باشد و از این رو باید از روش‌های مدل‌سازی اغتشاشی استفاده کنیم. در جریان‌های آرام و با اعداد رینولدز پایین وجود نیروهای لزجت باعث کاهش دامنه این حرکات نوسانی و تصادفی می‌گردد و با افزایش عدد رینولدز و تاثیر بیشتر نیروی اینرسی، نیروهای لزجت قدرت کافی به منظور حذف اغتشاشات از بدنه سیال را از دست داده و دامنه نوسان، تشدید می‌گردد؛ به گونه‌ای که جریان ناپایدار و آشفته می‌گردد [۲۹].

¹ Direct Numerical Simulation (DNS)

در روابط (۱۰) و (۱۱)، Pr_T عدد پرانتل اغتشاشی و Sc_T بیانگر عدد اشمیت اغتشاشی است که هر دو عدد مقادیر ثابتی فرض در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴- تابع دیواره‌ای

دقت روش زیر شبکه اسمانگورینسکی در نزدیکی مرز جامد پایین هست، زیرا گردابه‌های بزرگ وجود ندارند، گرادیان سرعت در جریان سیال بالا می‌رود و ابعاد شبکه محاسباتی بایستی کاهش یابد، به همین دلیل برای جریان در نزدیکی دیواره، اثرگذاری دیوار در نتایج حل عددی قابل توجه است. یکی از راه‌های افزایش دقت محاسبات در مجاورت دیواره، استفاده از تابع دیواره است [۲۹]. در کل می‌توان با استفاده از تابع کاهنده (رابطه ۱۲)، ضریب ثابت به کار رفته در مدل اسمانگورینسکی را با شرایط نزدیک دیوار تطبیق داد [۲۹] در رابطه (۱۳)، d فاصله از دیوار جامد است.

$$C_0 = 0.01 \left\{ 1.0 - \exp \left[\left(-\frac{d_+}{25} \right)^3 \right] \right\} \quad (12)$$

$$\begin{cases} d_+ = \frac{d}{u_* / \nu} \\ u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \end{cases} \quad (13)$$

۲-۵- انتقال حرارت تابشی

یکی از فرضیاتی که می‌توان در حوزه شبیه‌سازی آتش بررسی و در نظر گرفت، فرض گاز خاکستری است. در نرم‌افزار افدی‌اس انتقال حرارت تابشی به صورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری حل می‌شود [۱۸]. معادله انتقال تابشی برای فضایی که دارای پارامترهای تشعشع (جذب، نشر و انعکاس) است، به صورت رابطه (۱۴) خواهد بود [۳۱].

$$S \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, s) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s^*) I_\lambda(x, s^*) ds^* \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، $\kappa(x, \lambda)$ ضریب موضعی جذب، $\sigma_s(x, \lambda)$ ضریب موضعی انعکاس و $B(x, s)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی،

در این پژوهش با نرم‌افزار افدی‌اس شروع به شبیه‌سازی کردیم و از مدل اغتشاشی گردابه‌های بزرگ استفاده کردیم و علت این انتخاب این بوده است که این مدل نسبت به دو مدل قبلی دارای جزئیات بیشتر و زمان محاسباتی کمتری است، هرچند که در این نرم‌افزار فقط روش گردابه‌های بزرگ و حل عددی مستقیم وجود دارد.

در روش گردابه‌های بزرگ، انتخاب مدل مناسب برای محاسبه ترم تنش ناشی از اغتشاش (τ_{SGS}) بسیار گسترده و پیچیده بوده است. لذا با انتخاب مدل مناسب می‌توان مقدار انرژی اتلافی را چنان تعیین کرد که نظریه آشمار انرژی برقرار باشد [۱۸]. برای مدل‌سازی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، روش شناخته شده اسمانگورینسکی وجود دارد. در این روش، مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به طول مشخصه و مقیاس سرعت به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۲۹].

$$\mu_T^{SGS} = \bar{\rho} (C_S \Delta)^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (8)$$

در رابطه (۸) که یک ثابت تجربی و ضریب تطبیقی در مدل اسمانگورینسکی است و مقدار ضریب ثابت اسمانگورینسکی در رژیم‌های مختلف متفاوت است این مقدار به طور کلی در محدوده ۰/۰۹۴ تا ۰/۲ می‌باشد که در یک جریان معین مقدار آن عدد ثابتی خواهد بود. پهنای فیلتر که از رابطه (۹) بدست می‌آید [۲۹] و نشان‌دهنده کوچکترین مقیاس میدان است که حل می‌شود و با توجه به اندازه شبکه محاسباتی تعیین می‌شود و در نرم‌افزار افدی‌اس برابر با ریشه سوم حجم سلول محاسباتی قرار داده شده است.

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (9)$$

در ادامه بایستی بعد از محاسبه لزجت گردابه‌ای، پارامترهای نفوذ ضریب هدایت حرارتی اغتشاشی طبق رابطه (۱۰) و ضریب نفوذ اغتشاشی گونه طبق رابطه (۱۱) به صورت تابعی از لزجت گردابه‌ای مدل شوند [۳۱].

$$k_T^{SGS} = \frac{\mu_T^{SGS} C_p}{Pr_T} \quad (10)$$

$$(\rho D)_T^{SGS} = \frac{\mu_T^{SGS}}{Sc_T} \quad (11)$$

در رابطه (۱۵) \tilde{Y}_F کسر جرمی سوخت، \tilde{Y}_{O_2} کسر جرمی اکسیدکننده و S نسبت جرمی استوکیومتری هوا به سوخت است. همچنین τ_{mix} از طریق رابطه (۱۶) بدست می‌آید [۳۴].

$$\tau_{mix} = \min \left(\frac{K_{sgs}}{C_{EDM} \varepsilon_{sgs}}, \frac{\Delta^2}{C_{diff} \alpha} \right), \quad (16)$$

$C_{EDM} = 4, C_{diff} = 2$

۲-۸- روش عددی

در پژوهش حاضر از دو نرم‌افزار برای حل معادلات بالا استفاده شده است. نرم‌افزار این‌فوم (نسخه ۱۸,۰۶)، که با زبان برنامه نویسی C++ به صورت متن باز نوشته شده است، اولین نرم‌افزار مورد استفاده است. هم‌چنین این پژوهش در نرم‌افزار دیگری به نام اف‌دی‌اس (نسخه ۶) انجام شده است. نرم‌افزار اف‌دی‌اس در سال ۲۰۰۰ برای بررسی آتش و عملکرد سیستم‌های اطفاء حریق در انستیتوی ملی استانداردها و تکنولوژی آمریکا^۱، منتشر شد [۳۵]. این دو حلگر، معادلات انتقال حاکم را برای جریان‌هایی با ماخ پایین با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ حل می‌کنند.

در نرم‌افزار اف‌دی‌اس، برای سهولت در نتایج و هم‌چنین ایجاد رابط بصری بهتر برای خروج دود و سایر پارامترها از رابط گرافیکی به نام پایروسیم^۲ نیز استفاده شده است. این نرم‌افزار در شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل آتش استفاده شده و هم‌چنین یک مدل‌سازی احتراقی با کنترل ترکیبی که بر اساس اف‌دی‌اس و برنامه شبیه‌سازی دود^۳ می‌باشد و در نتیجه برنامه کاربردی آسان برای کاربران فراهم می‌کند [۳۶]. نرم‌افزار پایروسیم، همانند برنامه اف‌دی‌اس توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا توسعه یافته است.

به‌منظور رفع وابستگی معادلات انتقال پیوستگی، مومنتوم، انرژی و گونه از الگوریتم پیمپل^۴ در نرم‌افزار این‌فوم استفاده می‌شود. هم‌چنین به‌منظور گسسته‌سازی ترم‌های مشتق زمانی از روش گسسته‌سازی مرتبه اول اولر و برای ترم‌های مشتق مکانی نفوذی از روش گسسته‌سازی مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. هم‌چنین برای ترم‌های مکانی جابه‌جایی نیز از تقریب

$I_{\lambda}(x, S)$ شدت تابش در طول موج λ است. هم‌چنین ترم انتگرال در سمت راست رابطه (۱۴)، بیانگر انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهات دیگر است [۳۱].

نرم‌افزار اف‌دی‌اس رابطه (۱۴) را به‌صورت پیش‌فرض با ۱۰۰ زاویه گسسته شده محاسبه کرده که این تعداد زاویه محاسباتی، قابل افزایش می‌باشد. بنابراین بیش از ۲۰ درصد زمان پردازش مربوط به محاسبه رابطه (۱۴) است که با افزایش تعداد جهات، کل زمان لازم برای شبیه‌سازی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند [۲۲].

۲-۶- مدل‌سازی احتراقی

در نرم‌افزار اف‌دی‌اس دو روش برای مدل‌کردن احتراق تعریف شده است. مدل اول، مدل نرخ واکنش محدود است. در این مدل گونه‌های گازی شکل بر اساس رابطه آرینیوس با یکدیگر واکنش می‌دهند. این مدل بیشتر در شبیه‌سازی مستقیم عددی که نفوذ سوخت و اکسیدکننده به‌طور مستقیم مدل می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. درحالی‌که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ که در آن شبکه محاسباتی به‌اندازه شبکه مورد استفاده در روش شبیه‌سازی مستقیم عددی ریز نیست و از مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای می‌توان استفاده نمود.

در مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای، به محض حضور سوخت و اکسیژن، واکنش شیمیایی صورت خواهد گرفت. زمانی که احتراق از حالت آرام به حالت اغتشاشی می‌رسد، بایستی اثر متقابل احتراق و اغتشاش را در نظر گرفت. لذا نیاز است در مدل‌سازی آتش با به‌کارگیری مدل احتراقی مناسب، اثرات اغتشاش و احتراق واقع شده در آتش را وارد مدل‌سازی نمود [۳۲].

۲-۷- مدل اضمحلال گردابه‌ای

در مقاله حاضر، به‌منظور مدل‌سازی برهمکنش آشفته‌گی احتراق و تعیین نرخ مصرف و یا تولید گونه‌ها از مدل احتراقی اضمحلال گردابه استفاده شده است. در این مدل احتراقی، نرخ مصرف سوخت از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۳۳].

$$\bar{\omega}''_F = -\bar{\rho} \frac{\min(\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2}/S)}{\tau_{mix}} \quad (15)$$

³ Smokeview

⁴ PIMPLE

¹ National Institute of Standards and Technology (NIST)

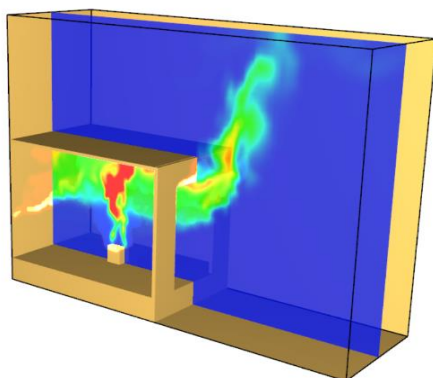
² Pyrosim software

به منظور بررسی اثر دما و سرعت رفتار حریق داخل محفظه ۵ سرعت سنج و ۵ دماسنج در محل درب در فاصله‌های ۵، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر از کف قرار داده شده است. دمای فضا در شرایط استاندارد محیط یعنی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است. نمایی از محیط فضای شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اف‌دی‌اس را در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

۳-۲- نتایج عددی

در شکل (۳) کانتور سه‌بعدی از شعله حریق آورده شده است. به منظور تحلیل بهتری از توسعه حریق در این فضا، کانتور دوبعدی دما به همراه بردار سرعت در صفحه میانی اتاق در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. ابتدا سوخت موجود در ظرف با هوا ترکیب شده و احتراق به صورت غیرپیش‌آمیخته شروع می‌شود (زمان کمتر از ۰/۵ ثانیه).

باتوجه به مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای، شعله‌ورسازی اولیه نیاز به جرقه ندارد و شعله به صورت خودبه‌خودی آغاز می‌شود که البته این موضوع تأثیری در ادامه شبیه‌سازی ندارد. باگذشت زمان شعله اولیه به سمت سقف اتاق کشیده شده (زمان ۱ ثانیه) و از زمان ۲ ثانیه به بعد شعله به سمت درب خروجی هدایت شده و حتی به خارج اتاق کشیده می‌شود. همچنین باتوجه به بردارهای سرعت در درب خروجی، در زمان‌های اولیه (کمتر از ۰/۵ ثانیه) جهت سرعت در تمام مقطع به سمت خارج اتاق جریان دارد. این موضوع ریشه در کاهش چگالی به تبع احتراق است که گازهای داخل اتاق را به سمت خروجی جهت می‌دهد تا به این ترتیب بتواند کاهش چگالی (نیاز به افزایش حجم) را جبران کند. در ادامه از حدود زمان ۱۰ ثانیه، شکل رفتار حریق در این اتاق به حالت پایداری رسیده است، یعنی تا زمانی که شرایط احتراق مهیا باشد به همین حالت به صورت شبه پایدار تا انتها به سوختن ادامه می‌دهد.



مرتبه دوم استفاده شده است. مقدار عدد کورانت موضعی حداکثر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. همچنین شبیه‌سازی به مدت ۱۰۰ ثانیه انجام می‌شود که از ثانیه ۵ به بعد، نتایج متوسط گیری شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

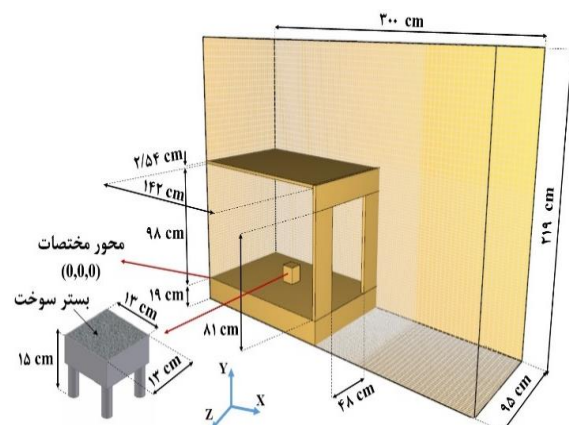
۳- نتایج و بحث

در این بخش با اشاره به هندسه مورد مطالعه، نتایج عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳-۱- هندسه مورد بررسی

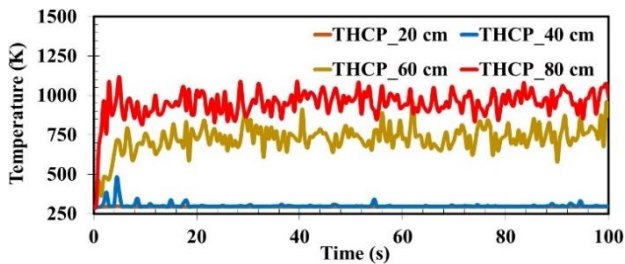
هندسه مورد نظر به منظور شبیه‌سازی، برگرفته از مطالعه آزمایشگاهی باندی و همکاران [۳۷] می‌باشد. این هندسه شامل فضایی به ارتفاع ۹۸ سانتی‌متر و سطح کف آن دارای طول ۱۴۲ سانتی‌متر و عرض ۹۵ سانتی‌متر مربع است. همچنین درب ورودی محفظه دارای سطح مقطع ۸۱ در ۴۸ سانتی‌متر مربع می‌باشد که برای تهویه طبیعی به کار برده شده است.

منبع سوخت مربعی در مرکز محفظه به طول ۱۳ سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر از کف تعبیه شده است و سوخت داخل آن متان می‌باشد. دیواره این فضا با دولایه صفحه عایق با ضخامت ۲/۵۴ سانتی‌متر ساخته شده است. برای شبیه‌سازی لازم است ناحیه محاسباتی اضافه در خروجی درب در نظر گرفته شود. از این رو یک فضا روبه‌روی درب ورودی به سطح مقطع ۱۵۸ در ۹۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۱۹ سانتی‌متر از کف محیط قرار داده و همچنین یک ناحیه محاسباتی دیگر هم به بالای فضای شبیه‌سازی به ارتفاع ۱۰۲ سانتی‌متر و سطح مقطع آن هم همانند هندسه اتاق است.



شکل ۲ هندسه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اف‌دی‌اس

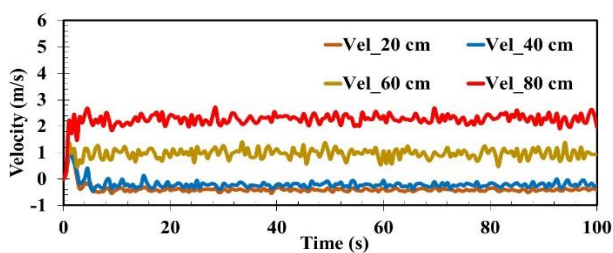
جریان هوای ورودی به اتاق، دمای کمتری را نشان می‌دهد و بالعکس سنسوری که در فاصله ۸۰ سانتی‌متری قرار دارد، حداکثر دما (حدود ۹۷۳ کلوین) را ثبت کرده است.



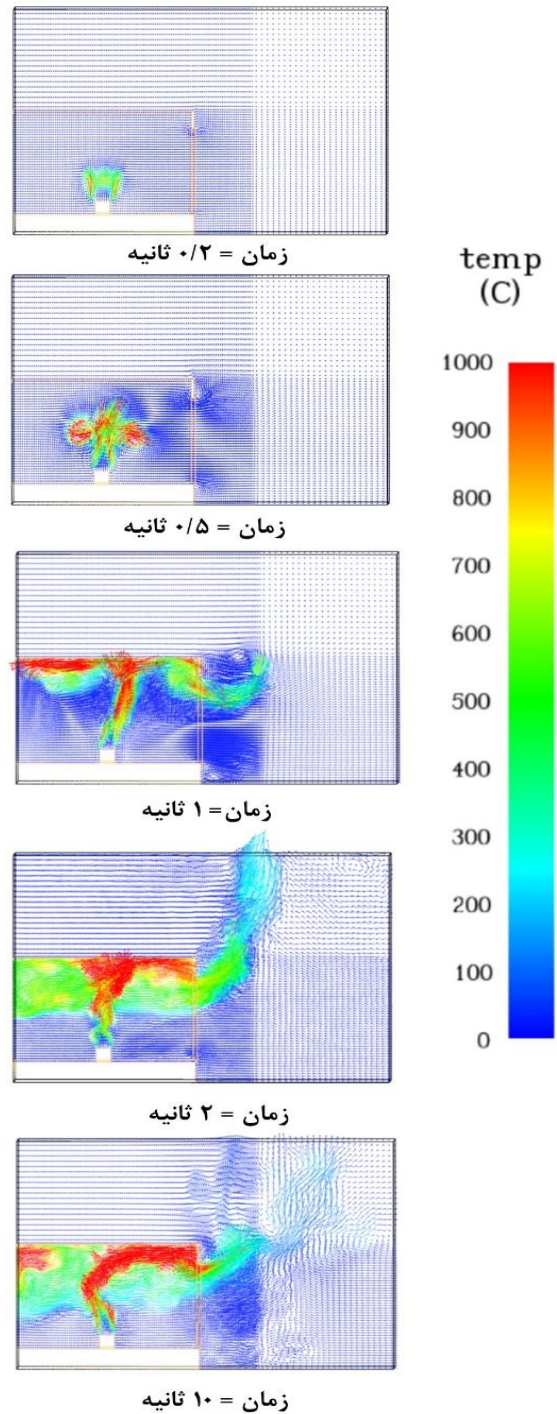
شکل ۴ نتایج عددی دما در خط مرکزی درب در نرم‌افزار افدی‌اس

باتوجه به شکل (۵)، به منظور تحلیل بهتری از شرایط و پارامترهای رفتار حریق در اتاق، همانند سنسورهای دما که در فواصل مختلف قرار داشتند، سنسورهای سرعت نیز وجود داشته است و در این حالت به بررسی سنسورهای سرعت پرداخته و مشخص شد هر ۵ سنسور سرعت در شروع فرایند احتراق و تا زمان حدود ۳ ثانیه افزایش پیدا کرده که علت این موضوع کاهش چگالی فضای اتاق نسبت به محیط بیرون (ناحیه محاسباتی) است. حد مقاله خودداری نمایم. مطالب هر بخش مرتبط با عنوان تیترا آن بخش و دور از حاشیه‌نویسی باشد.

سنسورهای ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری از کف هر دو بعد شروع فرایند احتراق در مرکز اتاق به دلیل دور بودن از شعله و همچنین جریان کاهشی هوای ورودی از پایین درب، باعث شده است بعد از زمان ۵ ثانیه سرعت تا حدود ۰/۵ متر بر ثانیه کاهش یافته و در ادامه به صورت شبه پایدار تا انتها پیش می‌رود. سرعت سنسور ۶۰ سانتی‌متری از کف، بعد از زمان ۲ ثانیه به دلیل جریان هوای گازهای خروجی حاصل از احتراق در حدود سرعت میانگین ۱ متر بر ثانیه (به سمت خارج اتاق) به دست آمده است. باتوجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود سنسور ۸۰ سانتی‌متری از کف نسبت به سایر سنسورها سرعت جریان بیشتری را ثبت نموده (حدود ۲/۴ متر بر ثانیه) که این به دلیل حجم بالای گازهای خروجی احتراق که از بالای درب به فضای خارج هدایت می‌شوند، است.



شکل ۵ نتایج عددی سرعت در خط مرکزی درب در نرم‌افزار افدی‌اس

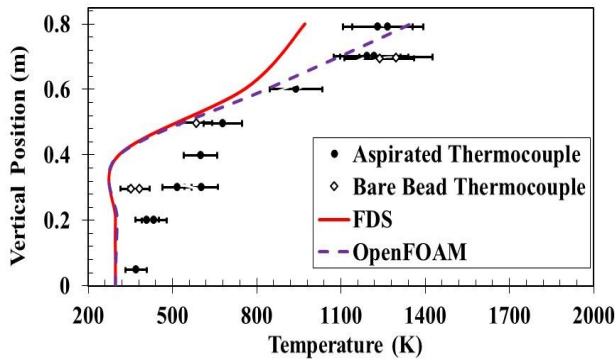


شکل ۳ کانتورهای دوبعدی و سه‌بعدی شعله در نرم‌افزار افدی‌اس

در شکل (۴) نتایج عددی دما در سنسورهای تعبیه شده در درب برای موقعیت‌های مختلف (در فواصل ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متری) نشان داده شده است. باتوجه به رفتار زمان‌مند در تمامی سنسورها دما از ۲۹۳ کلوین شروع شده و در زمان ۵ ثانیه به بعد به حالت شبه پایدار می‌رسد.

باتوجه به شکل (۴)، سنسوری که در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از کف محیط قرار دارد به دلیل دور بودن از شعله خروجی و گازهای حاصل از احتراق و همچنین جانمایی در محل ورود

سانتی متری برای دو نوع دماسنج Aspirated و Bead Bare به ترتیب ۱۱۲۰ و ۱۲۸۰ کلوین است. نتایج نرم افزار اف دی اس از فاصله ۶۰ تا ۸۰ سانتی متری تا دمای ۹۸۰ کلوین رسیده و در همین فاصله نرم افزار اپن فوم نیز تا ۱۳۲۰ کلوین رسیده است.



شکل ۶ اعتبارسنجی نتایج عددی دما در خط مرکزی درب برای دو نرم افزار اپن فوم و اف دی اس

در شکل (۷) سرعت متوسط سنسورهای نصب شده افقی در خروجی درب اتاق نشان داده است. در کف محیط اتاق، سرعت در نتایج تجربی و هم چنین در دو نرم افزار صفر است، زیرا سرعت در دیواره برابر صفر است (شرط عدم لغزش) و هم چنین همین اتفاق در فاصله ۸۰ سانتی متری از کف (لبه بالایی درب) در نتایج عددی و تجربی مشاهده شده است. در سنسور اول (فاصله ۵ سانتی متری) نتایج تجربی سرعت، $1/2$ متر بر ثانیه است که علامت منفی نشان دهنده ورود هوای محیط اطراف است. در همین نقطه نتایج دو نرم افزار هم به همین موضوع دلالت دارند و سرعت $0/5$ تا $0/7$ را نشان می دهد.

در فاصله ۲۰ سانتی متری سرعت جریان خروجی کمی افزایش یافته (نتیجه تجربی سرعت 1 متر بر ثانیه را نشان می دهد و هم چنین دو نرم افزار نیز تا حدودی سرعتی بیشتر از فاصله ۵ سانتی متری را تجربه کرده) و در ادامه بعد از فاصله ۲۰ سانتی متری، سنسور نصب شده در 40 سانتی متری، سرعت نتیجه تجربی آن $0/4$ متر بر ثانیه است که در همین فاصله دو نرم افزار سرعت کمتری (کمتر از $0/1$ متر بر ثانیه) را نشان داده است.

باتوجه به شکل (۷) نتایج عددی نرم افزار اپن فوم برای سرعت، همچون نتایج دما در خروجی درب، به نتایج تجربی نزدیک تر است. دمای سنسور TF2 نسبت به سنسور TF1، بالاتر است؛ زیرا باتوجه به جریان هوای خروجی و شعله آتش که از سمت درب به بیرون از اتاق منتقل می شود، باعث شده دمای بالاتری را گزارش کند.

۳-۳- اعتبارسنجی نتایج دو نرم افزار اپن فوم و اف دی اس با نتایج تجربی

پس از بررسی و تحلیل داده های دما و سرعت، بایستی نتایج دو نرم افزار اپن فوم و اف دی اس برای اعتبارسنجی با نتایج تجربی مقایسه شود تا برای تحلیل نهایی به جمع بندی رسیده شود. در داده های نتایج تجربی برای دقت و بررسی بهتر دما از دو نوع دماسنج استفاده شده است.

باتوجه به شکل (۶) که مقادیر سنسورهای دما در درب است، می توان نتیجه گرفت، دمای داده تجربی برای دماسنج نوع Aspirated در فاصله ۵ سانتی متری از کف در حدود 370 کلوین است و در فاصله ۲۰ سانتی متری از کف به حدود 420 کلوین رسیده است و در همین دو فاصله در نرم افزار اپن فوم دما از حدود 303 کلوین به 310 کلوین رسیده است و همچنین در نرم افزار اف دی اس دما در فاصله ۵ تا 20 سانتی متری حدوداً به صورت ثابت تا 300 کلوین می رسد.

در فاصله ۲۹ سانتی متری، نتایج تجربی به این صورت است که دماسنج نوع Aspirated دمای 560 کلوین و دماسنج نوع Bare Bead در همین فاصله نیز با عدم قطعیت ± 30 ، دمای 352 کلوین را نشان داده و دو نرم افزار اپن فوم و اف دی اس در بازه 20 تا 40 سانتی متری نسبت نتایج یکسانی داشته و دما در 303 کلوین باقی مانده است. در فاصله 40 سانتی متری نتیجه تجربی 590 کلوین را نشان داده است.

در این قسمت نتایج دما در دو نرم افزار به صورت نسبتاً یکسان تا فاصله 50 سانتی متری و با افزایش دما از 303 تا 530 کلوین رسیده و در ادامه از یکدیگر فاصله گرفته است. در همین فاصله (50 سانتی متری) دو نوع دماسنج Aspirated و Bare Bead به ترتیب دمای 680 و 580 کلوین را نشان داده است. در این فاصله نتایج عددی با نتایج تجربی همخوانی دارد به نحوی که میزان خطای نسبی دو نرم افزار با نتایج تجربی کمتر از 10 درصد است.

در فاصله 60 سانتی متری، دماسنج Aspirated دمای 940 کلوین را نشان داده و در همین فاصله نرم افزار اپن فوم 860 کلوین و نرم افزار اف دی اس 780 کلوین را نشان می دهد. از فاصله 60 سانتی متری به بعد نتایج عددی دو نرم افزار از یکدیگر فاصله گرفته که نتایج نرم افزار اپن فوم به نتیجه تجربی نزدیک تر است، به نحوی که میزان خطای نسبی این نرم افزار کمتر از 5 درصد است در صورتی که خطای نسبی نرم افزار اف دی اس بیشتر از 20 درصد است. در انتها مشاهده می شود، نتایج تجربی در فاصله 68

جدول ۱ مشخصات دو سنسور دما در نتایج تجربی و دو نرم افزار
اپن فوم و اف دی اس

نام سنسور	مختصات سنسور (سانتی متر)	نتایج تجربی دما (کلوین)	نتیجه عددی دما (کلوین)	نتیجه عددی دما (کلوین) اف دی اس
TF1	(۲۹، ۸۸، ۱۳۲)	1014 ± 54	۱۱۷۵	۹۱۵
TF2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	1325 ± 100	۱۴۴۵	۱۱۸۹

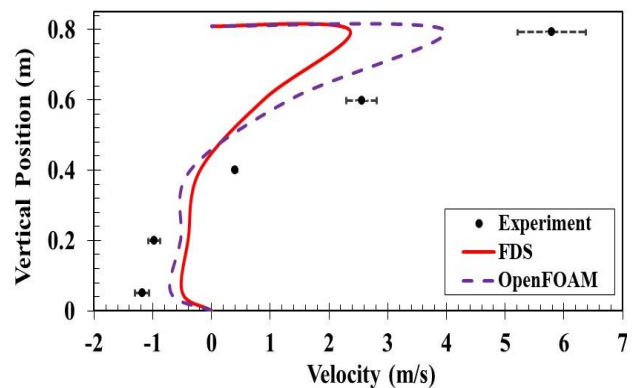
از بین گونه‌های مختلف خروجی حاصل از احتراق، در این گزارش به بررسی سه نوع آن پرداخته شده است. در جدول (۲) مشخصات و نتایج دو گونه‌های سمی دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن و گونه اکسیژن نشان داده شده است. هر سنسور گونه در دو موقعیت شبیه به محل نصب سنسورهای TF1 و TF2 قرار داده شده است.

در سنسور OX1، نتیجه عددی نرم افزار اف دی اس نسبت به اپن فوم دقت بهتری دارد، ولی در سنسور OX2 این اتفاق برعکس رخ داده است و نرم افزار اپن فوم دقت بیشتری دارد. علت مقدار اختلاف گزارش شده اکسیژن در این دو سنسور به دلیل وجود شعله آتش در نزدیکی درب است. از این رو مقدار اکسیژن در موقعیت OX1 به نسبت سنسور OX2 کمتر است. در سنسور CD1 (کربن دی‌اکسید) نتیجه تجربی مقدار ۸ درصد با عدم قطعیت ۰/۴ را ثبت نموده است که هر دو نرم افزار نیز در این نقطه از دقت خوبی برخوردار هستند و در سنسور CD2 این مقدار در حدود ۷/۳ درصد با میزان عدم قطعیت ۰/۲۴ درصد است که در این سنسور نتیجه نرم افزار اف دی اس تطابق بهتری با نتیجه تجربی دارد.

دو سنسور CM1 و CM2 که مربوط به اندازه‌گیری غلظت کربن مونوکسید هستند، به ترتیب دارای نتیجه تجربی ۱/۷ با عدم قطعیت ۰/۳ و ۲/۱ با عدم قطعیت ۰/۳۵ است که این مقادیر فقط در نرم افزار اف دی اس محاسبه گردیده است که در دو سنسور این نرم افزار مقدار تقریبی ۱ درصد گزارش شده و میزان خطا هر دو سنسور مقداری بالا است که نیاز به استفاده از سینتیک بالاتری دارد.

در نرم افزار اپن فوم به علت استفاده از سینتیک تک مرحله‌ای مقدار گونه کربن مونوکسید گزارش نشده است.

سنسور TF2 دمای ۱۳۲۵ کلوین با عدم قطعیت ۱۰۰ درجه را نشان داده و همچنین دو نرم افزار اف دی اس و اپن فوم در این نقطه به ترتیب دمای ۱۱۸۹ و ۱۴۴۵ کلوین را نشان داده است که در این سنسور نتیجه نرم افزار اپن فوم به نتیجه تجربی نزدیک تر بوده و خطای نسبی این نرم افزار ۹ درصد است که دقت بالایی دارد.



شکل ۷ اعتبارسنجی نتایج عددی دما در خط مرکزی درب برای دو نرم افزار اپن فوم و اف دی اس

در جدول (۱) مشخصات و نتایج به دست آمده دو سنسور دما، یکی در ارتفاع ۸۸ سانتی متری و فاصله ۲۹ سانتی متری از سطح دیوار انتهایی اتاق (TF1) و دیگری در ارتفاع ۸۸ سانتی متری و در فاصله ۱۳۲ سانتی متری از سطح دیوار انتهایی (TF2)، آورده شده است. دو سنسور از یکدیگر ۱۰۳ سانتی متر فاصله داشته و باتوجه به فاصله نصب شده از کف و نزدیک بودن به شعله حریق، هر دو سنسور، دما بالایی (نزدیک به ۱۰۰۰ کلوین) را گزارش کردند.

نتایج تجربی در سنسور TF1 با عدم قطعیت ۵۴ کلوین، ۱۰۱۴ کلوین را نشان داده و در همین سنسور دو نرم افزار اف دی اس و اپن فوم به ترتیب ۹۱۵ و ۱۱۷۵ کلوین را گزارش کرده است که هر دو نرم افزار با خطای نسبی کمتر از ۱۵ درصد به نتیجه تجربی نزدیک هستند (اگرچه نرم افزار اف دی اس کمی دقت بالاتری دارد). دمای سنسور TF2 نسبت به سنسور TF1، بالاتر است؛ زیرا باتوجه به جریان هوای خروجی و شعله آتش که از سمت درب به بیرون از اتاق منتقل می‌شود، باعث شده دمای بالاتری را گزارش کند. سنسور TF2 دمای ۱۳۲۵ کلوین با عدم قطعیت ۱۰۰ درجه را نشان داده و همچنین دو نرم افزار اف دی اس و اپن فوم در این نقطه به ترتیب دمای ۱۱۸۹ و ۱۴۴۵ کلوین را نشان داده است که در این سنسور نتیجه نرم افزار اپن فوم به نتیجه تجربی نزدیک تر بوده و خطای نسبی این نرم افزار ۹ درصد است که دقت بالایی دارد.

بهتری داشته و در سنسور OX2 نرم افزار اپن فوم دقت بیشتری دارد. علت مقدار اختلاف گزارش شده اکسیژن در این دو سنسور به دلیل وجود شعله آتش در نزدیکی درب است. در سنسور CD1 (کربن دی اکسید) هر دو نرم افزار از دقت خوبی برخوردار هستند؛ اگرچه نتایج نرم افزار اپن فوم بهتر بوده است. مقادیر دو سنسور CM1 و CM2 فقط در نرم افزار افدی اس محاسبه گردیده است و میزان خطا هر دو سنسور نسبتاً بالا است که نیاز به استفاده از سینتیک بالاتری دارد. در نرم افزار اپن فوم به علت استفاده از سینتیک تک مرحله ای مقدار گونه کربن مونوکسید گزارش نشده است.

۵- مراجع

- [1] M. Organization. "Statistics of deaths caused by burns." https://www.lmo.ir/web_directory/54002.html (accessed Sep. 05, 2023, 2023).
- [2] E. Georges, H. Pretrel, K. Varrall, and O. Vauquelin, "Burning rate of elevated pool fire in a well-ventilated compartment: Effects of radiative heat fluxes," *Fire Safety Journal*, p. 103933, 2023/09/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103933>.
- [3] J. Willi, D. Madrzykowski, M. McKinnon, and N. Dow, "Experimental data from compartment fires with gas burner and upholstered furniture fuels," *Data in Brief*, vol. 47, p. 108934, 2023/04/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.108934>.
- [4] J. Lee, B. Kim, S. Lee, and W. G. Shin, "Validation of the fire dynamics simulator (FDS) model for fire scenarios with two liquid pool fires in multiple compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 141, p. 103892, 2023/12/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103892>.
- [5] X. Shen *et al.*, "Inverse tracing of fire source in a single room based on CFD simulation and deep learning," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107069, 2023/10/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107069>.
- [6] A. I. Filkov *et al.*, "A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment," *Fire Safety Journal*, vol. 140, p. 103871, 2023/10/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>.
- [7] S. Shaharuddin, K. N. Abdul Maulud, S. A. F. Syed Abdul Rahman, A. I. Che Ani, and B. Pradhan, "The role of IoT sensor in smart building context for indoor fire hazard scenario: A systematic review of interdisciplinary articles," *Internet of Things*, vol. 22,

جدول ۲ مشخصات دو سنسور دما در نتایج تجربی و دو نرم افزار اپن فوم و افدی اس

نام سنسور	مختصات سنسور (سانتی متر)	نتایج تجربی	نتیجه عددی: اپن فوم	نتیجه عددی: افدی اس
OX1	(۱۳۲، ۸۸، ۲۹)	0.11 ± 0.15	۰/۵	۰/۵
OX2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	0.36 ± 0.52	۰/۵	۰/۶
CD1	(۱۳۲، ۸۸، ۲۹)	0.4 ± 8	۸/۹	۵/۵
CD2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	$0.28 \pm 7/3$	۸/۹	۵
CM1	(۱۳۲، ۸۸، ۲۹)	$0.3 \pm 1/7$	—	۱/۰۵
CM2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	$0.35 \pm 2/1$	—	۰/۹۵

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش های شبیه سازی در رایانه ها توسط دو نرم افزار اپن فوم و افدی اس، به تحلیل رفتار حریق (پارامترهای دما، سرعت و گونه) در فضای اتاقی پرداخته شد. همچنین، مدل اغتشاشی مورد نظر شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل احتراقی اضمحلال گردابه بود. نتایج مورد نظر در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه در یک اتاق بررسی و تحلیل شد که نتایج زیر مشاهده شد:

۱- با بررسی نتایج تجربی دما و مقایسه نتیجه عددی آن در دو نرم افزار مشخص شد، نتایج نرم افزار اپن فوم خطای نسبی کمتری نسبت به نرم افزار افدی اس دارد (به ترتیب ۲۲/۴ و ۲۵/۲) و نتایج سرعت آن نیز به این گونه است که دارای خطای نسبی ۵۰/۸ درصد در نرم افزار اپن فوم و ۵۴/۴ درصد در نرم افزار افدی اس به ثبت رسیده است. پس مشاهده شده است نتایج سرعت در هر دو نرم افزار خطای نسبی بیشتری نسبت به نتایج دما به ثبت رسیده که به صورت کلی نتایج نرم افزار اپن فوم قابل قبول تر است.

۲- همچنین با بررسی نتایج گونه نیز مشخص شد در سنسور OX1، نتیجه عددی نرم افزار افدی اس نسبت به اپن فوم دقت

- [17] S. M. J. Razeghi, m. safarzadeh, and H. PashdarShahri, "Comparison study of compartment fire simulation with steady laminar flamelet and eddy dissipation model," (in Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 2953-2966, 2021, doi: 10.22060/mej.2020.17303.6568.
- [18] H. Pashdarshahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Development of Compatible Subgrid Scale Model of LES in Numerical Simulation of Compartment Fires," Ph. D. Thesis, Tehran, Tarbiat Modares University, 2013, (In Persian), 2013.
- [19] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. PashdarShahri, "Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model," (in Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 5 (Special Issue), pp. 3335-3350, 2021, doi: 10.22060/mej.2020.18086.6729.
- [20] G. Maragkos and B. Merci, "Large Eddy Simulations of CH₄ Fire Plumes," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 99, 07/01 2017, doi: 10.1007/s10494-017-9803-4.
- [21] Y. P. Almeida, P. L. C. Lage, and L. F. L. R. Silva, "Large eddy simulation of a turbulent diffusion flame including thermal radiation heat transfer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 81, pp. 412-425, 2015/04/25/ 2015, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.027>.
- [22] M. Mapar, G. Heidarinejad, and H. Pashdarshahri, "Numerical Investigation of Two Simultaneous Fires in a Tunnel and Evaluation of the Obstructive Influence of Vehicles by Large Eddy Simulation," (in Persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 15, pp. 10-22, 2014. [Online]. Available: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-1927-en.html>.
- [23] R. Friedman, "An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke," *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 81-92, 1992, 10.1177/104239159200400301.
- [24] M. Monfared Mesqani, Mehriyar, Reza., "Investigation of the models used for the simulation of fire and smoke emission in closed spaces," (In Persian), *Mechanical Engineering*, vol. 25, no. 4, pp. 49-64, 2015, <https://dorl.net/dor/20.1001.1.16059719.1398.28.4.3.5>.
- [25] D. moradi, "Comparison of fire modeling in enclosed areas," (In Persian), 4th Iran Combustion Conference, Kashan, 2011.
- [26] H. PashdarShahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Large Eddy Simulation of Fire-induced p. 100803, 2023/07/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100803>.
- [8] H. Cheng and G. V. Hadjisophocleous, "The modeling of fire spread in buildings by Bayesian network," *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 6, pp. 901-908, 2009/08/01/ 2009, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.05.005>.
- [9] Z. Yan, "Development in comprehensive CFD simulation of fire and explosion," *Journal of Safety Science and Resilience*, vol. 4, no. 2, pp. 203-219, 2023/06/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.12.003>.
- [10] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pashdarshahri, "A Study on turbulence-combustion interaction and Sub-grid Scale model in the simulation of Methane pool fire using LES," (in en), *Scientia Iranica*, vol. 28, no. 4, pp. 2133-2149, 2021, 10.24200/sci.2021.53390.3217.
- [11] M. A. Orabi, A. A. Khan, L. Jiang, T. Yarlaga, J. Torero, and A. Usmani, "Integrated nonlinear structural simulation of composite buildings in fire," *Engineering Structures*, vol. 252, p. 113593, 2022/02/01/ 2022, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113593>.
- [12] Z.-h. Li, Y. He, H. Zhang, and J. Wang, "Combustion characteristics of n-heptane and wood crib fires at different altitudes," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 32, no. 2, pp. 2481-2488, 2009/01/01/ 2009, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.033>.
- [13] X. Yan and T. Gernay, "Numerical modeling of localized fire exposures on structures using FDS-FEM and simple models," *Engineering Structures*, vol. 246, p. 112997, 2021/11/01/ 2021, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112997>.
- [14] T. Sikanen and S. Hostikka, "Predicting the heat release rates of liquid pool fires in mechanically ventilated compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 266-275, 2017/07/01/ 2017, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.060>.
- [15] H. Pr  tre, N. Chaaoui, B. Lafdal, and S. Suard, "Effect of environmental conditions on fire combustion regimes in mechanically-ventilated compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 127, p. 103493, 2022/01/01/ 2022, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103493>.
- [16] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pashdarshahri, "Air curtain to control smoke and fire spread in a ventilated multi-floor building," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 159, p. 106612, 2021/01/01/ 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106612>.

- 42, no. 4, p. 208, 2020/03/30 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02291-9.
- [33] A. Ershadi and M. Rajabi Zargarabadi, "Prediction of turbulent Prandtl number in the methane-air combustion using a second-order turbulent scalar flux model," (In Persian), *Fuel and Combustion*, vol. 12, no. 2, pp. 31-48, 2019, doi: 10.22034/jfnc.2019.92713.
- [34] G. Heidarinejad, H. PasharShahri, and m. safarzadeh, "The Importance of the Compatible Combustion and Sub-grid Scale Models on the Simulation of Large-Scale Pool Fire," (In Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 9, pp. 2425-2442, 2019, doi: 10.22060/mej.2019.15288.6085.
- [35] J. Floyd, G. Forney, S. Hostikka, T. Korhonen, R. McDermott, K. B. McGrattan, and C. Weinschenk, "Fire dynamics simulator user's guide," in *NIST Special Publication* vol. 1019, ed, 2012.
- [36] J. Zhang, Y. Tao, X. Liu, and H. Zhao, "Fire Simulation Research on a Bus Based on Pyrosim," in *Journal of Physics: Conference Series* vol. 1678, ed, 2020.
- [37] M. Bundy, E. L. Johnsson, and M. Bundy, "NIST Technical Note 1483 Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires NIST Technical Note 1483 Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires," 2007, <https://doi.org/10.6028/nist.tn.1483>.
- Flow behind a Combustible Vertical Wall," (in Persian), *Fuel and Combustion*, vol. 6, no. 1, pp. -, 2013. [Online]. Available: https://www.jfnc.ir/article_46170_d33d99e40600856fe1cce3c8b0a21402.pdf.
- [27] A. Mostofizadeh, G. Moshir, and M. Bazazzadeh, "Investigation of the Effect of Centrifugal Acceleration on the Flame Propagation Speed in Premixed Combustion," (in Persian), *Fuel and Combustion*, vol. 14, no. 4, pp. 100-122, 2022, doi: 10.22034/JFNC.2022.314576.1293.
- [28] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overhold, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User 's Guide (FDS)," in *NIST Special Publication 1019* vol. Sixth Edit, ed, 2020, p. 402.
- [29] G. Heidarinejad, *An introduction to turbulence*. (In Persian), Tehran: Tarbiat Modares University, 2009, p. 185.
- [30] D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD," vol. 2, ed: DCW industries La Canada, CA, 1998, http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H133907.pdf.
- [31] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model," vol. 1, ed, 2015, pp. 1-147.
- [32] S. M. J. Razeghi, M. Safarzadeh, and H. Pasharshahri, "Comparison of combustion models based on fast chemistry assumption in large eddy simulation of pool fire," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol.

مطالعه پارامتری، تجزیه و تحلیل عملکرد یک آب شیرین کن تقطیر چند اثره مجهز به ترموکمپرسور

چکیده: در مطالعه حاضر، تحلیل پارامتری، تجزیه و تحلیل عملکرد یک آب شیرین کن تقطیر چند مرحله ای مجهز به ترموکمپرسور مورد بررسی قرار گرفته شده است. معادلات جرم، غلظت نمک، انرژی و انرژی و انرژی برای تک تک اجزای آب شیرین کن نوشته شده و در ادامه بررسی و تحلیل این آب شیرین کن با کمک نرم افزار EES انجام شده است. در این مطالعه، تأثیر دمای TBT، میزان غلظت آب و تعداد اثرات بر دبی آب خنک کننده کندانسور، دبی آب شیرین، نسبت عملکرد، مساحت مخصوص، میزان تخریب انرژی و راندمان انرژی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که آب شیرین کن ۸ مرحله‌ای بیشترین نسبت عملکرد را با توجه به شرایط ورودی سیستم دارا می باشد. همچنین با توجه به تحلیل انرژی، انرژی تخریبی اواپراتورها (اثرات)، کندانسور، ترموکمپرسور و پمپ ها به ترتیب برابر ۵۱۴۶، ۳۲۶۶، ۱۵۶۸ و ۳۶۶ کیلووات است که بیشترین و کمترین میزان تخریب انرژی به ترتیب متعلق به اواپراتورها و پمپ ها می باشند.

واژه‌های راهنما: آب شیرین کن، تقطیر چند اثره، تحلیل انرژی، تحلیل انرژی، نسبت عملکرد

عرفان عبادتی
کارشناسی ارشد

جاماسب پیرکندی*
دانشیار

امیر عابدی
کارشناسی ارشد

محمد احسان مصلحی
کارشناسی ارشد،
مجتمع دانشگاهی هوافضا،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

Erfan Ebadati
M.Sc.

Jamasb Pirkandi*
Associate Professor

Amir Abedy
M.Sc.

Mohammad
Ehsan Moslehi
M.Sc.,
Faculty of Aerospace,
Malek Ashtar
University of
Technology, Tehran

Parametric study, performance analysis of a multi-effect distillation with thermo vapor compression

Abstract: This study conducts a parametric analysis as well as performance evaluation of a multiple effect distillation system equipped with a thermocompressor. Equations for mass, salt concentration, energy, and exergy for each component of the desalination system are established. The study proceeds with an investigation and analysis of this system using the EES (Engineering Equation Solver) software. This research examines the effects of Top Brine Temperature (TBT), water concentration, and the number of effects on the flow rate of the cooling water in the condenser, the flow rate of produced fresh water, the performance ratio, specific area, the rate of exergy destruction, and the efficiency of exergy. The findings show that the eight-stage desalination system achieves the highest performance ratio under specific system input conditions. Additionally, the exergy analysis reveals that the exergy destruction rates for the evaporators (effects), the condenser, the thermocompressor, and the pumps are 5146, 3266, 1568 and 366 kW respectively, with the highest to the lowest exergy destruction correspondingly attributed to the evaporators and the pumps.

Keywords: Desalination, Multiple effect distillation, Energy analysis, Exergy analysis, Performance ratio

۱- مقدمه

سیستم هیبریدی آب شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای را با فرآیند شیرین‌سازی چندمرحله‌ای پیشنهاد دادند و نتایج مؤثری نسبت به سیستم غیرهیبریدی رسیدند.

السید و همکاران [۹] تجزیه و تحلیل عملکرد پایدار بر روی آب شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای که دو حالت جریان موازی و جریان موازی - متقاطع را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که آب شیرین‌کن موردنظر در جریان موازی - متقاطع عملکرد بهتری دارد ولی جریان موازی طراحی و ساخت ساده‌تری دارد. شکیب و همکاران [۱۰] مطالعاتی راجع به تجزیه و تحلیل حرارتی آب شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای با کمپرسور بخار حرارتی و آب شیرین‌کن اسمز معکوس در واحد آب شیرین‌کن نیروگاهی داشتند و به این نتیجه رسیدند که آب شیرین‌کن اسمز معکوس نقش مهمی در رشد راندمان و تولید آب شیرین دارد و همچنین آب شیرین‌کن هیبریدی باعث کاهش ۴۰ درصدی مصرف برق می‌شود.

فارسی و روزن [۱۱] یک سیستم ترکیبی زمین‌گرمایی با چرخه رانکین آلی و فرآیند تبخیر چندگانه برای تصفیه آب نمک تحلیل کردند و تأثیرات زیست محیطی استفاده از انرژی زمین‌گرمایی و تصفیه آب نمک بر مصرف منابع طبیعی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را نشان دادند.

پراجاپاتی و همکاران [۱۲] به بررسی جامع و پیشرفت‌های تصفیه آب دریایی با استفاده از فرآیند تبخیر چندگانه و ادغام آن با انرژی زمین‌گرمایی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی، هزینه‌های انرژی در این فرآیند کاهش می‌یابد و صرفه‌جویی در مصرف انرژی ایجاد می‌شود.

لین و مالمالی [۱۳] به بررسی تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی فرآیند تبخیر غشایی چند مرحله‌ای به همراه فشرده‌سازی مکانیکی بخار پرداختند و با تحلیل انرژی و انرژی به این نتیجه رسیدند که فشرده‌سازی مکانیکی بخار به منظور افزایش دما و فشار بخار، تأثیر قابل توجهی بر بهبود کارایی انرژی دارد.

هیلا ریوس [۱۴] به بررسی ارزیابی فنی، زیست محیطی و اقتصادی یک نوع نوین از آب شیرین‌کن خورشیدی برای تقطیر پایدار آب پرداخت. این سیستم اجازه می‌دهد تا انرژی خورشیدی به طور بهینه برای تقطیر آب استفاده شود و بازدهی بالاتری در مقایسه با سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی دارد.

خان محمدی و همکاران [۱۵] به مدل‌سازی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی چند هدفه یک سیستم تولید هم‌زمان، محرک به انرژی خورشیدی برای تولید برق و آب پرداختند. این سیستم

با بیش از ۵/۲ میلیارد نفر افزایش جمعیت جهان طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۳، تأمین انرژی و آب شیرین به یک چالش جهانی تبدیل شده است [۱]. حدود ۹۷ درصد از آب روی زمین شور است و در اقیانوس‌ها ذخیره شده است. علاوه بر این، تنها ۳ درصد (۳۶ میلیون کیلومتر مکعب) از این آب شیرین است و ۷۰ درصد از آب شیرین (۲۴ میلیون کیلومتر مکعب) به دلیل یخ زدگی قابل دسترس نیست. بر اساس برآوردها، تنها ۰/۷۷ درصد از کل آب زمین به صورت آب‌های زیرزمینی، سطحی و ... ذخیره می‌شود. نیمی از جمعیت جهان در بیش از ۸۰ کشور در حال توسعه با کمبود آب مواجه هستند که ۸۰ تا ۹۰ درصد از بیماری‌ها و ۳۰ درصد از کل مرگ و میرها ناشی از کیفیت پایین آب است. علاوه بر کمبود آب، توزیع نامتوازن منابع آب شیرین یک نگرانی عمده است. پیش‌بینی می‌شود که تمام جمعیت جهان در ۴۰ سال آینده در مناطق شهری ساکن شوند. اکثریت قریب به اتفاق این افراد با منابع آب کمیاب و اغلب ناموجود مواجه خواهند شد [۲]. پیش‌بینی می‌شود که عدم دسترسی به آب در سال ۲۰۵۰ به حدود ۴۰ درصد برسد زیرا مصرف انرژی و آب به ترتیب میزان ۳۳ و ۵۵ درصد افزایش می‌یابد [۳]. کمبود آب می‌تواند ناشی از دلایل و عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های جغرافیایی، شکست مدیریت، تغییرات آب و هوایی، موانع اقتصادی و یا حتی اختلافات سیاسی باشد [۴]. فناوری‌های شیرین‌کردن آب شور مهم‌ترین روش جهت غلبه بر این مشکل است [۵]. تا سال ۲۰۰۹، بیش از ۱۲۰۰۰ کارخانه آب شیرین‌کن در جهان وجود داشت ولی امروزه حدود ۲۱۰۰۰ نیروگاه تأسیس شده‌اند که افزایش ۷۵ درصدی آن را نشان می‌دهد [۲]. این امر به تنهایی برای شیرین‌کردن آب، مشکلات زیادی همچون هزینه و آلودگی زیست‌محیطی دارد و با هیبریدی شدن آن بازده انرژی و انرژی افزایش می‌یابد و انتشار آلاینده‌ها و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری کاهش می‌یابد [۶].

نتایج مطالعه فرانتز و سیفرت [۷] نشان داد که اگر برای سیستم آب شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای به جای دمای کارکرد ۶۵ درجه سانتی‌گراد از دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شود، تولید سالانه آب شیرین این سیستم را می‌توان به دو برابر تبدیل کرد. همچنین نتایج نشان داد که درجه حرارت بالا باعث پوسته پوسته شدن و خوردگی و در نتیجه باعث پایین آوردن طول عمر سیستم می‌شود.

الدن و سلیمان [۸] با بررسی و مطالعه بر روی گازهای ناشی از سوزاندن زباله‌ها جهت گرم‌کردن آب شیرین‌کن حرارتی،

در شکل (۱) نمونه‌ای از یک آب شیرین کن تقطیر چند اثره مجهز به ترموکمپرسور نمایش داده شده است.

سیستم نمک‌زدایی چند اثره از دو قسمت اصلی یعنی تعدادی اواپراتور و یک کندانسور تشکیل شده است. این سیستم شامل تجهیزات جانبی مانند محفظه‌های تبخیر، سیستم تغذیه آب شور و سیستم دفع آب شور می‌باشد. آب شیرین از تبخیر آب شور دریا در محفظه اواپراتور تولید می‌شود. کندانسور انتهایی وظیفه حذف گرمای اضافی از سیستم را بر عهده دارد. این فرآیند شامل یکسری مراحل (معمولاً ۲ تا ۱۶) است که در سطوح کاهشی، فشار حفظ می‌شود [۱۹]. ابتدا آب با دبی و دمای معین وارد کندانسور می‌شود. آب تغذیه در یک لایه نازک روی سطح اواپراتور پخش می‌شود. بخشی از آن به دلیل هدایت حرارتی ناشی از بخار داخل لوله‌ها که از منبع حرارت خارجی تأمین می‌شود، تبخیر می‌شود، بخشی از آن به عنوان آب خنک‌کننده از سیستم خارج می‌شود و بقیه به عنوان آب تغذیه به اثرات بعدی آب شیرین کن تزریق می‌شود. بخار تولید شده به اثر دوم هدایت می‌شود و از طریق لوله‌های تبخیری دوم به عنوان بخار گرم‌کننده اثر دوم جریان می‌یابد و این فرآیند در تمام اثرات دائماً تکرار می‌شود [۲۰]. هر اثر باید فشار کمتری نسبت به قبل داشته باشد. گرادیان فشار در امتداد اثرات تقطیر چند مرحله‌ای توسط فشار اشباع جریان تغذیه و فشار اشباع بخار متراکم خروجی از آخرین مرحله تغذیه می‌شود. بخار تولید شده در آخرین اثر در یک مبدل حرارتی جداگانه به نام کندانسور نهایی متراکم می‌شود که توسط آب ورودی دریا خنک می‌شود و سپس به عنوان آب تغذیه از قبل گرم شده برای فرآیند نمک زدایی استفاده می‌شود. از یک پمپ خلاء/کمپرسور برای حفظ گرادیان فشار تدریجی با حذف گازهای تراکم‌ناپذیر انباشته شده همراه با بخار آب باقی‌مانده پس از مرحله تراکم نهایی استفاده می‌شود [۲۱]، [۲۲].

یکی از مهم‌ترین مزایای این نوع سیستم آب شیرین کن پایین تر بودن ماکزیمم دمای آب دریا در اولین اثر است. در میان واحدهای حرارتی معمولی، تقطیر چند اثره دارای هزینه سرمایه گذاری اولیه کمتر، نرخ خوردگی کمتر، طول عمر بیشتر و مصرف برق کمتر است. یکی از موانع اصلی در نصب واحدهای تقطیر چند اثره، تقاضای زیاد آن‌ها برای انرژی حرارتی و دبی جرمی بخار است که می‌تواند با برداشت گرمای اتلاف موجود مانند گازهای خروجی از توربین یا منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد، گرمای حرارتی زمین و ... برطرف شود [۴]. با بکارگیری ترموکمپرسور در آب شیرین کن تقطیر چند اثره می‌توان عملکرد این نوع آب شیرین کن را افزایش داد. آنچه

قادر به تولید برق و آب با بازدهی بالا و هزینه کمتر است. بهره‌برداری هم‌زمان از منابع خورشیدی به منظور تولید چندین فرآیند می‌تواند بهبود قابل توجهی در بهره‌وری انرژی و مدیریت منابع منجر شود.

الفضلی و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی نیروگاه‌های هم‌زمان تولید و تصفیه آب شور با استفاده از انرژی خورشیدی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از انرژی خورشیدی در نیروگاه‌های هم‌زمان تولید و تصفیه آب شور می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد و بهره‌وری این نیروگاه‌ها به همراه داشته باشد.

خیر و همکاران [۱۷] تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم ترکیبی خورشیدی - زمین‌گرمایی برای تصفیه آب دریاچه پرداختند. تحلیل انرژی و انرژی سیستم ترکیبی خورشیدی - زمین‌گرمایی نشان می‌دهد که این سیستم قابلیت کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری انرژی را دارد که در نتیجه منجر به افزایش کارایی و پایداری در تصفیه آب دریاچه می‌شود.

نوآوری این مقاله به این صورت است که در تمامی مقالات، اغلب این سیستم آب شیرین کن به صورت یک سیستم هیبریدی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته شده است و به عنوان یک سیستم مجزا به طور جزئی مورد بررسی واقع نشده است. همچنین در اکثر مقالات، این نوع آب شیرین کن به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله، سیستم آب شیرین کن مجهز به ترموکمپرسور به صورت کاملاً جزئی، پارامتریک و ترمودینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معرفی سیستم آب شیرین کن تقطیر چند مرحله‌ای

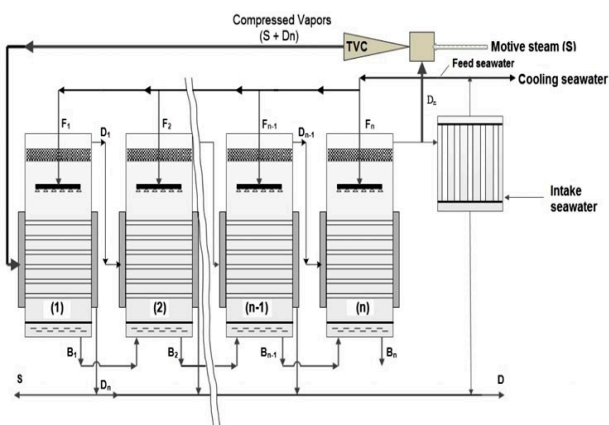
روش تقطیر چند اثره به عنوان مهم‌ترین فرآیند تقطیری است که به کمک آن می‌توان حجم آب شیرین زیادی تولید کرد. واحدهای تقطیر چند اثره عموماً در ظرفیت‌های ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب در روز ساخته می‌شوند.



شکل ۱ آب شیرین کن تقطیر چند مرحله‌ای [۱۸]

فرآیند تبخیر و فشرده‌سازی بخار و تأمین آب شور جهت شیرین‌سازی می‌باشد [۲۳].

در جدول (۱) مقایسه عملکردی انواع آب شیرین‌کن‌ها آورده شده است. در شکل (۲) دیاگرام آب شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای مجهز به ترموکمپرسور قابل مشاهده است.



شکل ۲ آب شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای مجهز به ترموکمپرسور [۲۳]

تقطیر چند مرحله‌ای ترموکمپرسور را متمایز می‌کند، ادغام فشار بخار حرارتی است. در این مرحله، بخار تولید شده در هر اثر با استفاده از یک کمپرسور یا اجکتور بخار فشرده می‌شود که دما و فشار آن را افزایش می‌دهد. با استفاده از حرارت پسماند مراحل قبلی و فشردن بخار، تقطیر چند مرحله‌ای ترموکمپرسور باعث افزایش بهره‌وری انرژی فرآیند تصفیه می‌شود همچنین، این روش قابلیت سازگاری با تغییرات غلظت آب شور و آب دریا را دارا است و می‌تواند نرخ بازیابی آب شیرین را افزایش دهد و به‌عنوان یک روش پایدار و با کارایی انرژی بالا نسبت به روش‌های سنتی تصفیه حرارتی آب شور محسوب می‌شود.

تقطیر چند مرحله‌ای ترموکمپرسور در کارخانه‌های آب شیرین‌کن بزرگ به‌طور گسترده استفاده شده است، به‌ویژه در مناطقی که حرارت پسماند در دسترس وجود دارد یا کارایی انرژی اولویت دارد. با توجه به تجهیزات و فرآیند پیچیده، پیاده‌سازی روش تقطیر چند مرحله‌ای ترموکمپرسور نیازمند سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا، نیاز به تأمین منابع حرارتی مناسب برای

جدول ۱ مقایسه عملکردی فرآیندهای اصلی شیرین‌سازی آب [۲۴]

پارامتر	تقطیر ناگهانی	تقطیر چند مرحله‌ای	تراکمی چند مرحله‌ای	ترمو کمپرسوری	غشایی - اسمز معکوس غلیظ	غشایی - اسمز معکوس رقیق	غشایی - الکترو دیالیز
ظرفیت تولیدی آب شیرین‌کن (m ³ /day)	۵۰۰۰۰-۷۰۰۰۰	۵۰۰۰-۱۵۰۰۰	۱۰۰-۳۰۰	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰۰	بیشتر از ۱۲۸۰۰۰	بیشتر از ۹۸۰۰۰	۲-۱۴۵۰۰۰
مصرف انرژی الکتریکی (KWh/m ³)	۲/۵-۵	۲-۲/۵	۱۲-۷	۱/۱-۸/۶	۴-۶ با بازیابی انرژی	۱/۲-۵/۵	۲/۵-۶۴/۵
مصرف انرژی حرارتی (MJ/m ³)	۲۸۲-۱۹۰	۲۳۰-۱۴۵	×	۲۲۷	×	×	×
معادل انرژی الکتریکی حرارتی (KWh/m ³)	۱۵/۸۳-۲۳/۵	۱۲/۱۹-۲/۱	×	۱۴/۵	×	×	×
مصرف کل انرژی الکتریکی (KWh/m ³)	۱۹/۵۸-۲۷/۲۵	۱۴/۴۵-۲۱/۳۵	۱۲-۷	۱۶/۲۶	۶-۴	۱/۲-۵/۵	۲/۵-۶۴/۵ ۰/۲-۷/۵
کیفیت آب شیرین تولید شده (ppm)	≈۱۰	≈۱۰	≈۱۰	≈۱۰	۵۰۰-۴۰۰	۵۰۰-۲۰۰	۵۰۰-۱۵۰

۳- فرضیات و مدل سازی ترمودینامیکی

۳-۱- فرضیات و ورودی سیستم

معادلات آب شیرین کن تقطیر چند اثره مجهز به ترموکمپرسور بر اساس فرضیات زیر ساده سازی شده اند:

- سیستم در حالت پایا کار می کند.
- جریان در تمامی اجزاء به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده اند.
- تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در تمامی اجزاء ناچیز در نظر گرفته شده اند.
- جریان آب تغذیه به طور یکنواخت بین اواپراتورها توزیع می شود.
- افت دما در هر اواپراتور یکسان فرض شده است.
- بخار تولید شده توسط سیستم آب شیرین کن کاملاً بدون نمک می باشد.
- برای تحلیل انرژی سیستم آب شیرین کن مورد نظر، دما و فشار محیط به عنوان دما و فشار مرجع در نظر گرفته شده است.

همچنین در جدول (۲) مقادیر ورودی جهت شبیه سازی سیستم آب شیرین کن مجهز به ترموکمپرسور نیز نمایش داده شده است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی جهت شبیه سازی آب شیرین کن تقطیر چند اثره مجهز به ترموکمپرسور

مقدار	نماد (واحد)	پارامتر
۲۹۸/۱۵	$T_{am} (K)$	دمای محیط
۱۰۱	$P_0 (kPa)$	فشار محیط
۴۶۰۰۰	$X_f (ppm)$	شوری آب دریا
۷۰۰۰۰	$X_n (ppm)$	شوری آب در آخرین اثر
۶	N	تعداد اثرات
۲۲۵	$T_S (°C)$	دمای بخار محرک
۲۵۰۰	$P_S (kPa)$	فشار بخار محرک
۶۸	$T_{BT} (°C)$	دمای بالای آب دریا
۴۰	$T_n (°C)$	دمای آب در آخرین اثر
۳۵	$T_f (°C)$	دمای آب تغذیه
۲۵	$T_{cw} (°C)$	دمای آب خنک کن کندانسور
۲/۸۵	$\Delta T_{loss} (°C)$	افت دما در هر اثر
۲	C_r	نسبت تراکم ترموکمپرسور

۳-۲- معادلات ترمودینامیکی

معادلات (۱) و (۲) تعادل کلی جرم و نمک را برای اولین اثر (اولین مرحله) نشان می دهد. این معادلات برای سایر اثرات با معادلات (۳) و (۴) نشان داده می شود زیرا آب شور هر مرحله وارد مرحله بعدی می شود [۴]، [۲۵].

$$X_{f,i} \times F_i = X_{b,i} \times B_i \quad (1)$$

$$X_{f,i} \times F_i + X_{b,i-1} \times B_{i-1} = X_{b,i} \times B_i \quad (2)$$

$i = 2, 3, 4, \dots, n$

$$F_i = B_i + D_i \quad (3)$$

$$F_i + B_{i-1} = B_i + D_i \quad i = 2, 3, 4, \dots, n \quad (4)$$

F ، D ، B و X به ترتیب به نرخ جریان آب تغذیه، سرعت جریان آب شور دریا، سرعت جریان آب مقطر و شوری اشاره دارد. اندیس های f ، b ، i و n به ترتیب نشان دهنده آب تغذیه، آب شور، عدد اثر و اولین اثر هستند. مقادیر آب تغذیه و آب مقطر وارد شده و تولید شده در اولین اثر از معادله بقای انرژی بیان شده در رابطه (۵) و نرخ جریان آب تغذیه و آب مقطر با استفاده از معادله (۷) و (۸) محاسبه می شود [۴]، [۲۶].

$$Q_1 = M_s \times \lambda_s \quad (5)$$

$$Q_1 = D_1 \times \lambda_1 + F_1 \times C_p \times (T_1 - T_f) \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{M_s \times \lambda_s}{C_p \times (T_1 - T_f) + \left(\left(1 - \frac{X_{f,1}}{X_{b,1}} \right) \times \lambda_1 \right)} \quad (7)$$

$$D_1 = \frac{M_s \times \lambda_s - F_1 \times C_p \times (T_1 - T_f)}{\lambda_1} \quad (8)$$

که در آن Q_1 ، λ_s و λ_1 به ترتیب نرخ انتقال حرارت از طریق اولین اثر، گرمای نهان تبخیر در دمای بخار گرمایش و بالاترین دمای آب دریا هستند. توزیع کل دبی آب تغذیه در بین اثرات یکنواخت است، دبی آب تغذیه در سایر اثرات به صورت زیر بدست می آید [۲۵]، [۲۷].

که در آن λ' و $T_{fb,i-1}$ گرمای نهان در T' و دمای محفظه‌ی تبخیر در اثر $(i-1)$ هستند. معادله (۱۸) از مشتق‌گیری معادلات (۱۶) و (۱۷) بدست آمده است [۲۷].

$$T_i'' = \frac{T_{v,i}^2 + 0.33 \times T_{fb,i-1}}{T_{v,i} + 0.33} \quad (18)$$

روابط (۱۹) و (۲۰) تعادل انرژی حاصل از اثر دوم تا اثر آخر را نشان می‌دهد [۲۷].

$$Q_i = D_{i-1} \times \lambda_{i-1} + d_{i-1} \times \lambda_{i-1} + d_{i-1}' \times \lambda_{i-1}' + B_{i-1} \times C_p \times (T_{i-1} - T_i) \quad i=2, 3, \dots, n \quad (19)$$

$$Q_i = F_i \times C_p \times (T_i - T_f) + D_{ti} \times \lambda_i \quad (20)$$

که در آن D_{ti} مقدار کل بخار تشکیل شده در اثر i است و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷].

$$D_{ti} = D_i + d_i \quad i=2, 3, 4, \dots, n \quad (21)$$

مقدار بخار آزاد شده از اثر دوم تا آخرین اثر را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳۰]:

$$D_{ti} = [D_{i,i-1} \times \lambda_{i-1} + d_{i-1}' \times \lambda_{i-1}' + B_{i-1} \times C_p \times (T_{i-1} - T_i) - F_i \times C_p \times (T_i - T_f)] / \lambda_i \quad (22)$$

$$i=2, 3, \dots, n$$

دبی کل آب مقطر (D_{total}) به صورت زیر بدست می‌آید [۳۰]:

$$D_{total} = D_1 \sum_{i=2}^n D_i \quad (23)$$

تعادل انرژی در کندانسور مطابق روابط (۲۴) و (۲۵) است که در آن Q_c ، M_{cw} و T_{cw} نرخ انتقال حرارت در کندانسور و دما و سرعت جریان جرمی آب خنک کننده با استفاده از معادله (۲۶) محاسبه می‌شود [۳۱].

$$Q_c = (d_n' + D_n - M_{ev} \times \lambda_n) \quad (24)$$

$$Q_c = (M_{cw} + M_f) \times C_p \times (T_f - T_{cw}) \quad (25)$$

$$M_{cw} = \frac{(d_n' + D_n - M_{ev}) \times \lambda_n}{C_p \times (T_f - T_{cw})} - M_f \quad (26)$$

$$F_i = F_1 \quad i=2, 3, 4, \dots, n \quad (9)$$

$$M_f = F_{hrsg} + \sum_{i=1}^n F_i \quad (10)$$

که در آن M_f کل نرخ جریان جرمی آب تغذیه است. در سیستم‌های تقطیر چند اثره با پیکربندی متقابل موازی، تبخیر با دو فرآیند انجام می‌شود: جذب حرارت بخار تولید شده در اثر قبلی و تبخیر هنگام اضافه شدن آب شور اثر قبلی. بخار خارج شده از آب شور دریا وارد اثرات d_i ، به صورت زیر بدست می‌آید [۲۸].

$$d_i = \frac{B_{i-1} \times C_p \times (T_{i-1} - T_i')}{\lambda_i} \quad i=2, 3, 4, \dots, n \quad (11)$$

که در آن T' دمای آب شور دریا است که در اثر قبلی هنگام خنک شدن با ورود به اواپراتور بعدی جمع شده است. حد غیرتعادلی (NEA) به صورت زیر بیان می‌شود که T_v دمای بخار است [۲۹].

$$T_i' = T_i + NEA_i \quad i = 2, 3, 4, \dots, n \quad (12)$$

$$NEA_i = 33 \times (T_{i-1} - T_i)^{0.55} / T_{v,i} \quad (13)$$

$$T_{v,i} = T_i - BPE \quad (14)$$

اختلاف نقطه جوش (BPE) افزایش دمای جوش در یک فشار معین به دلیل نمک‌های محلول در آب است. سرعت جریان بخار خارج شده در محفظه‌های تبخیر تقطیر شده (d_i') در معادله بیان می‌شود که در آن T'' دمای آب مقطر انباشته شده تشکیل شده در اثرات قبلی است که با ورود به محفظه‌ی تبخیر (i) سرد می‌شود [۳۰].

$$d_i' = D_{i-1} \times C_p \times \frac{T_{fb,i-1} - T_i''}{\lambda_i'} \quad i=2, 3, 4, \dots, n \quad (15)$$

$$T_i'' = T_{v,i} + NEA_i \quad (16)$$

$$NEA_i = 0.33 \times \frac{T_{fb,i-1} - T_i''}{T_{v,i}} \quad (17)$$

راندمان آگزرژی، عملکرد یک سیستم نیروگاه حرارتی را از منظر ترمودینامیکی اندازه‌گیری می‌کند. شناسایی انواع محصول و سوخت ضروری است زیرا تجزیه و تحلیل آگزرژی به کیفیت انرژی بستگی دارد. در سیستم نیروگاه حرارتی با تولید واحد، راندمان حرارتی و آگزرژی به یکدیگر نزدیک است، در حالی که در سیستم نیروگاه حرارتی تولید هم‌زمان، تفاوت بین آن‌ها قابل توجه است. راندمان آگزرژی نشان می‌دهد که چقدر می‌توان از حداکثر کار موجود استخراج کرد، در حالی که راندمان حرارتی نشان می‌دهد که چه مقدار خروجی کار می‌تواند از یک سوخت ورودی مشخص استخراج شود. راندمان آگزرژی به عنوان نسبت نرخ آگزرژی خروجی کل به نرخ آگزرژی ورودی کل یا نسبت نرخ آگزرژی تولید شده به نرخ آگزرژی سوخت عرضه شده به سیستم تعریف می‌شود که در رابطه‌ی زیر قابل مشاهده است [۳۲]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_f} = 1 - \frac{\dot{E}_d - \dot{E}_l}{\dot{E}_f} \quad (32)$$

که در آن \dot{E}_l و \dot{E}_d به ترتیب نشان‌دهنده میزان تخریب آگزرژی و اتلاف آگزرژی هستند. تخریب آگزرژی در طول یک فرآیند متناسب با تولید آنتروپی به دلیل برگشت‌ناپذیری در هر جزء در فرآیند است [۳۳]. در فرآیندهای حالت پایدار، تخریب آگزرژی را می‌توان از تفاوت در مقادیر آگزرژی در یک جزء آدیاباتیک محاسبه کرد [۳۲]:

$$\dot{E}_d = T_0 \Delta \dot{S} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (33)$$

که در آن T_0 به دمای مرجع بر حسب کلونین اشاره دارد و $\Delta \dot{S}$ نرخ افزایش آنتروپی است، در حالی که \dot{E}_{in} و \dot{E}_{out} به ترتیب آگزرژی ورودی و خروجی یک جزء را نشان می‌دهند [۳۲].

در واحد نمک‌زدایی، یک ورودی کار برای فرآیند جداسازی مورد نیاز است. حداقل کار جداسازی به آگزرژی محصول در فرآیند نمک‌زدایی اشاره دارد در حالی که گرمای ورودی نشان‌دهنده آگزرژی سوخت است. بنابراین، راندمان آگزرژی نشان‌دهنده نسبت حداقل کار جداسازی مورد نیاز به کل آگزرژی سوخت عرضه شده به سیستم است که در رابطه‌ی زیر قابل مشاهده می‌باشد [۳۲]:

$$\eta_{ex} = \frac{W_{min}}{\dot{E}_f} \quad (34)$$

اثر بازده آگزرژی عاملی حیاتی در ارزیابی عملکرد واحد نمک‌زدایی به منظور بررسی رفتار آگزرژی جریان در یک سیستم

پارامترهای نسبت عملکرد و مصرف گرمای ویژه به عنوان پارامترهای طراحی در سیستم‌های آب شیرین‌کن تقطیر چند اثره در نظر گرفته می‌شوند. در واحدهای نمک‌زدایی، نسبت بهره‌وری خروجی به عنوان نسبت آب مقطر تولید شده به دبی جرمی بخار تأمین شده توسط یک منبع حرارت خارجی تعریف می‌شود [۲۷].

$$PR = \frac{D_{total}}{M_m} \quad (27)$$

۳-۳- معادلات آگزرژی

آگزرژی حداکثر مقدار کار مفیدی است که هنگام وارد کردن یک سیستم به حالت تعادل با وضعیت محیطی آن می‌توان به دست آورد. با صرف نظر کردن از اثرات الکتریکی، هسته‌ای، مغناطیسی و کشش سطحی، آگزرژی کل شامل چهار جزء است: آگزرژی‌های فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل. تعادل کلی آگزرژی یک سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳۲]:

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_{ke} + \dot{E}_{pe} \quad (28)$$

که در آن \dot{E}_{ph} ، \dot{E}_{ch} ، \dot{E}_{ke} و \dot{E}_{pe} به ترتیب آگزرژی‌های فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل هستند. آگزرژی مخصوص یک جریان برابر است با کل آگزرژی سیستم تقسیم بر دبی جرمی [۳۲]:

$$e_x = \frac{\dot{E}_x}{\dot{m}} \quad (29)$$

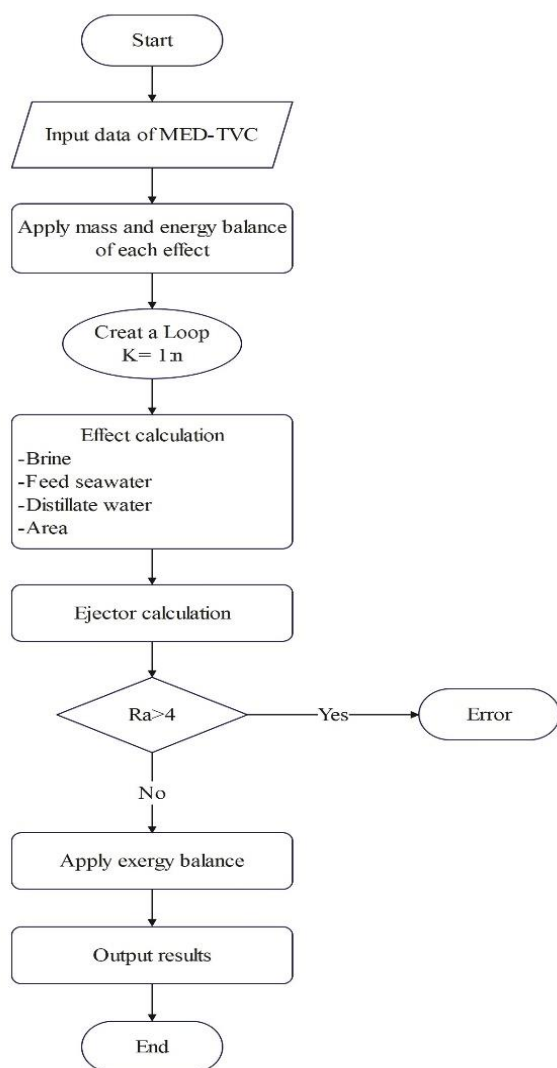
به عبارت دیگر، آگزرژی مخصوص یک جریان به صورت زیر قابل محاسبه است [۳۲]:

$$e_x = e_{ph} + e_{ch} + e_{ke} + e_{pe} \quad (30)$$

در مطالعه حاضر، آگزرژی جنبشی مخصوص، e_{ke} و آگزرژی پتانسیل مخصوص، e_{pe} به دلیل اثرات ناچیز نادیده گرفته شده است. بنابراین، آگزرژی فیزیکی که شامل آگزرژی‌های مکانیکی و حرارتی است، یک فرآیند کاملاً فیزیکی است و با معادله (۳۱) قابل محاسبه است که در آن زیر نویس‌های s و 0 به ترتیب نشان‌دهنده حالت‌های مشخص شده نسبت به حالت‌های محیطی و مرجع هستند [۳۲].

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m} [(h_s - h_0) - T_0 (s_s - s_0)] \quad (31)$$

محرك، دمای ورودی، دمای آب تغذیه، نرخ دبی جرمی بخار محرك و میزان افت دما در هر اثر وارد می‌گردند. در مرحله بعد معادلات توازن جرم، انرژی و انرژی و انرژی به طور هم‌زمان حل شده و نتایج مطلوب شامل نرخ دبی جرمی سیال خنک‌کننده کندانسور، مساحت کندانسور، نرخ انتقال حرارت در کندانسور، نسبت عملکرد، مساحت مخصوص، میزان دبی آب شیرین تولیدی، نرخ تخریب انرژی و راندمان انرژی حاصل می‌شود. نرم‌افزار EES با توجه به قابلیت بالای خود در یک زمان واحد می‌تواند تعداد زیادی معادلات خطی و غیرخطی را تحلیل نماید. نکته مهم در این کد نوشته شده، محاسبه دقیق خواص ترموفیزیکی ترکیب آب دریا در تمام نقاط سیکل می‌باشد که این مسئله سبب دقت نتایج سیکل خواهد شد. در شکل (۳) فلوجارت طراحی سیکل آب شیرین‌کن به همراه ترموکمپرسور نمایش داده شده است.



شکل ۳ فلوجارت طراحی سیکل آب شیرین‌کن چند اثره مجهز به ترموکمپرسور

است. براساس حجم کنترل یک اثر، راندمان انرژی اثر در یک واحد نمک‌زدایی چند اثره، نسبت انرژی محصول به انرژی سوخت است و می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۳۲]:

$$\eta_{effect} = \frac{(\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Brine} + (\dot{E}_{in})_{Distillate}}{(\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{steam} + (\dot{E}_{in})_{Feed}} \quad (35)$$

پتانسیل شیمیایی یک عامل مهم در ارزیابی سیستم‌های انرژی است، به ویژه زمانی که غلظت سیال عامل توسط یک فرآیند اختلاط یا یک فرآیند نمک‌زدایی تغییر می‌کند. پتانسیل شیمیایی یک خاصیت فشرده است که معیاری از تمایل جریان به رهاسازی ذرات به سمت جریان دیگر است. ممکن است پتانسیل شیمیایی برای هدایت ذرات از سطوح بالا به پایین در نظر گرفته شود. عمدتاً به ترکیب شیمیایی بستگی دارد و در حالت تعادل، همه اجزا دارای مقادیر یکسانی هستند. پتانسیل های شیمیایی آب و نمک در آب دریا با استفاده از مشتقات تابع انرژی کل گیبس به ترتیب در معادلات زیر به دست می‌آید [۳۲]:

$$\mu_w = \frac{\partial G_{sw}}{\partial m_w} = g_{sw} - W_s \frac{\partial g_{sw}}{\partial W_s} \quad (36)$$

$$\mu_s = \frac{\partial G_{sw}}{\partial m_w} = g_{sw} + (1 - W_s) \frac{\partial g_{sw}}{\partial W_s} \quad (37)$$

که در آن g_{sw} انرژی مخصوص گیبس آب دریا است و به صورت زیر بیان می‌شود [۳۲]:

$$g_{sw} = h_{sw} - (T + 273.15) S_{sw} \quad (38)$$

تمایز انرژی مخصوص گیبس با توجه به شوری که در معادلات (۳۶) و (۳۷) نشان داده شده است را می‌توان با استفاده از مشتقات همبستگی آنتالپی و آنتروپی به صورت زیر محاسبه کرد [۳۲]:

$$\frac{\partial g_{sw}}{\partial W_w} = \frac{\partial h_{sw}}{\partial W_s} - (T + 273.15) \frac{\partial S_{sw}}{\partial W_s} \quad (39)$$

۴- روش حل

با توجه به معادلات ذکر شده در بخش‌های قبلی، جهت تحلیل این مسئله یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار EES نوشته شده است. در بخش اول این کد، اطلاعات ورودی سیستم شامل نسبت تراکم ترموکمپرسور، شوری آب دریا، تعداد اثرات، فشار بخار

۵- بحث و نتایج

در این بخش، نتایج مربوط به سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است. در شکل (۵) نمودار تغییرات نرخ دبی جرمی بخار و آب خنک کننده کندانسور سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس دمای TBT نمایش داده شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش دمای TBT میزان نرخ دبی جرمی بخار محرک افزایش یافته ولی میزان نرخ دبی جرمی آب خنک کننده کندانسور کاهش می یابد. با افزایش دمای اثر اول، به وضوح باید میزان نرخ دبی جرمی بخار محرک افزایش یابد. همچنین با افزایش دمای اثر اول، به دلیل کاهش بار حرارتی کندانسور، نرخ دبی جرمی سیال خنک کننده کاهش می یابد. کمترین نرخ دبی جرمی بخار محرک و بیشترین نرخ دبی جرمی سیال خنک کننده کندانسور در دمای TBT ۶۰ درجه سانتی گراد رخ داده و به ترتیب برابر ۱۱/۷۹ کیلوگرم بر ثانیه و ۴۸۷/۳ کیلوگرم بر ثانیه می باشند. همچنین بیشترین نرخ دبی جرمی بخار محرک و کمترین نرخ دبی جرمی سیال خنک کننده کندانسور در دمای TBT ۱۲۰ درجه سانتی گراد رخ داده و به ترتیب برابر ۱۲/۲۷ کیلوگرم بر ثانیه و ۴۶۸/۳ کیلوگرم بر ثانیه می باشند.

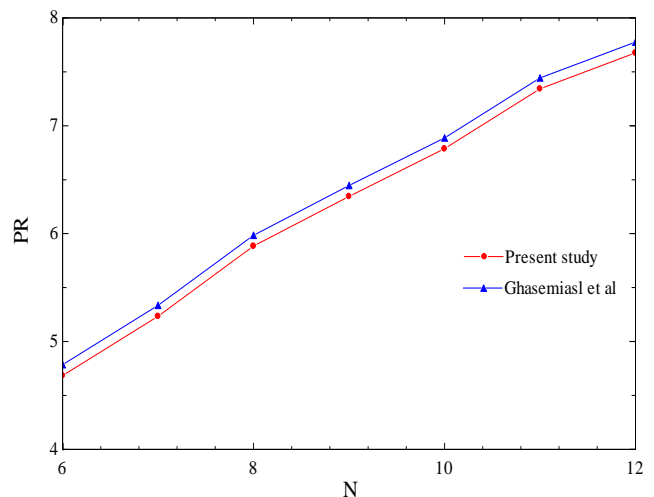
در شکل (۶) نمودار تغییرات نرخ انتقال حرارت و مساحت کندانسور سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC بر اساس دمای TBT آورده شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده است، می توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای TBT نرخ انتقال حرارت و مساحت کندانسور سیکل آب شیرین کن چند اثره کاهش می یابند. باید توجه داشت که تغییرات بار حرارتی و مساحت در یک مبدل حرارتی مانند کندانسور، همسو می باشد که این امر کاملاً در نتایج رعایت گردیده است. با افزایش دمای اثر اول و به تبع آن افزایش دمای اثرات دیگر و همچنین کاهش دبی جرمی بخار محرک، باعث می شود که میزان انتقال حرارت جهت خنک سازی بخار اثر آخر و به تبع آن مساحت کندانسور کاهش پیدا کند. همان طور که در شکل قابل مشاهده است، بیشترین بار حرارتی و مساحت کندانسور در دمای TBT ۶۰ درجه سانتی گراد رخ داده و به ترتیب برابر ۲۷۸۱۸ کیلوژول بر کیلوگرم و ۱۲۸۹ مترمربع می باشند. همچنین، کمترین بار حرارتی و مساحت کندانسور در دمای TBT ۱۲۰ درجه سانتی گراد رخ داده و به ترتیب برابر ۲۷۰۱۹ کیلوژول بر کیلوگرم و ۱۲۵۲ مترمربع می باشند.

باید توجه داشت که فعالیت دمایی سیکل آب شیرین کن چند اثره اغلب زیر ۷۰ درجه سانتی گراد می باشد و دمای مطلوب بخار جهت ورود به اثر اول این نوع آب شیرین کن، ۶۸ درجه

برای اعتبارسنجی سیکل آب شیرین کن چند اثره از دو مطالعه مجزا نیز استفاده شده است. در جدول (۳) اطلاعات ورودی سیستم آب شیرین کن جهت اعتبارسنجی قابل مشاهده است. در شکل (۴) مقایسه نمودار ضریب عملکرد آب شیرین کن چند اثره نسبت به تعداد اثرات با مطالعه قاسمی اصل و همکاران [۳۴] نمایش داده شده است. باید توجه داشت که با افزایش تعداد اثرات به دلیل افزایش آب شیرین تولیدی، ضریب عملکرد افزایش می یابد که در نمودار صحت آن کاملاً مشهود می باشد. درصد خطای محاسباتی برای اعتبارسنجی این نمودار حدود ۲ درصد می باشد و با دقت محاسباتی مناسبی مدل سازی شده است. همان طور که در این نمودار قابل مشاهده است، نتایج به دست آمده با استفاده از روش مطالعه حاضر مطابقت خوبی با نتایج مطالعه قاسمی اصل و همکاران دارد و می توان روش مدل سازی سیکل آب شیرین کن چند اثره مجهز به ترموکمپرسور مورد استفاده در این پژوهش را قابل اعتماد و دقیق اعلام کرد.

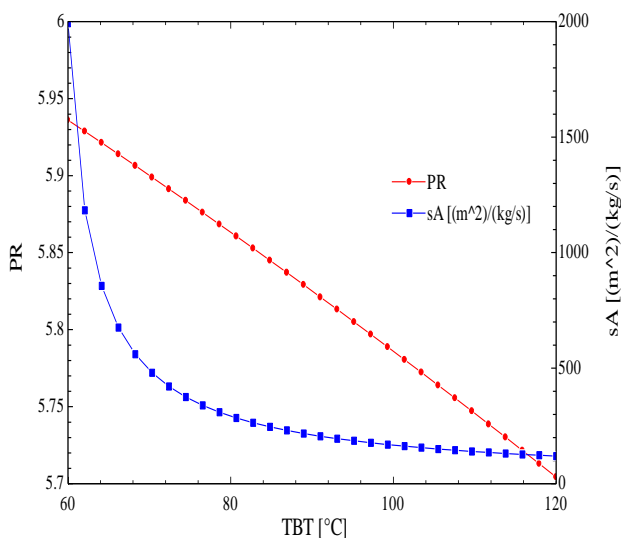
جدول ۳ اطلاعات ورودی سیستم آب شیرین کن جهت اعتبارسنجی

پارامتر	نماد (واحد)	مقدار
شوری آب دریا	X_f (ppm)	۴۶۰۰۰
شوری آب در آخرین اثر	X_n (ppm)	۷۰۰۰۰
تعداد اثرات	N	۶
دمای بخار محرک	T_S (°C)	۱۰۰
فشار بخار محرک	P_S (kPa)	۲۵۰۰
دمای بالای آب دریا	TBT (°C)	۷۰



شکل ۴ مقایسه نمودار ضریب عملکرد آب شیرین کن چند اثره MED-TVC نسبت به تعداد اثرات با مطالعه قاسمی اصل و همکاران

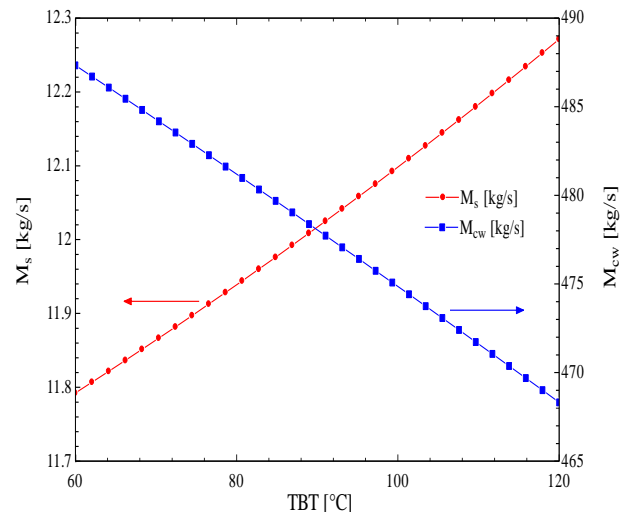
افزایش دمای TBT و به دنبال آن کاهش کلی مساحت کندانسور و اثرات سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC نیز مساحت ویژه این سیکل کاهش پیدا می‌کند. باید توجه داشت که مساحت ویژه به عنوان کل مساحت انتقال حرارت در واحد تقطیر تعریف می‌گردد. بیشترین ضریب عملکرد و مساحت ویژه در دمای TBT ۶۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده و به ترتیب برابر ۵/۹۳۶ و ۱۹۹۳ مترمربع بر کیلوگرم بر ثانیه می‌باشند. همچنین، کمترین ضریب عملکرد و مساحت ویژه در دمای TBT ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده و به ترتیب برابر ۵/۷۰۴ و ۱۱۹/۷ مترمربع بر کیلوگرم بر ثانیه می‌باشند. همچنین از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در بازه دمای TBT بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد افت شدید مساحت ویژه مشاهده می‌گردد و بعد از ۸۰ درجه سانتی‌گراد روند نزولی با شیب بسیار ملایمی ادامه پیدا کرده و در نهایت تقریباً ثابت می‌شود.



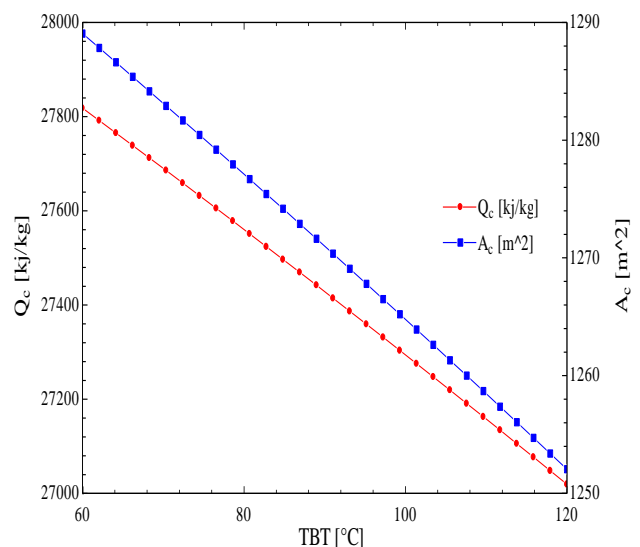
شکل ۷ تغییرات نسبت عملکرد و مساحت ویژه سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس دمای TBT

در شکل (۸) نمودار تغییرات نسبت عملکرد آب شیرین کن MED-TVC بر اساس دمای TBT در دماهای اتلافی ترمودینامیکی مختلف در اثرات ارائه گردیده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، با افزایش دمای TBT نسبت عملکرد سیکل آب شیرین کن چند اثره کاهش پیدا می‌کند و همچنین با افزایش اتلافات حرارتی در اثرات، نسبت عملکرد کاهش پیدا می‌کند. افزایش اتلافات حرارتی در اثرات به دلیل کاهش دمای مؤثر اثرات و کاهش نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی توسط اثرات، نسبت عملکرد را کاهش می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، بیشترین و کمترین نسبت عملکرد سیکل آب شیرین کن در تلفات دمایی ۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر

سانتی‌گراد می‌باشد. دماهای بالاتر می‌تواند وارد اثرات این نوع آب شیرین کن گردد ولی در کل باعث کاهش نسبت عملکرد سیستم می‌شود.



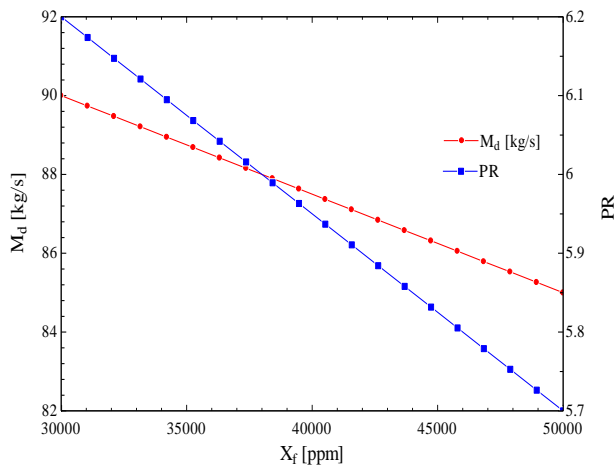
شکل ۵ تغییرات نرخ دبی جرمی بخار و آب خنک‌کننده کندانسور سیکل MED-TVC بر اساس دمای TBT



شکل ۶ تغییرات نرخ انتقال حرارت و مساحت کندانسور سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس دمای TBT

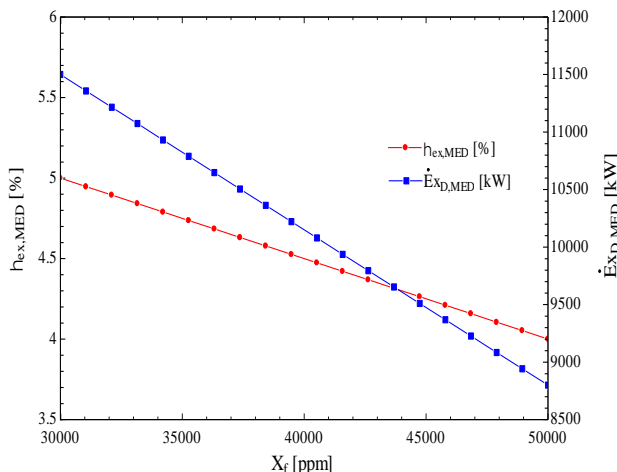
در شکل (۷) نمودار تغییرات نسبت عملکرد و مساحت ویژه سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC بر اساس دمای TBT نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش دمای TBT، نسبت عملکرد و مساحت ویژه سیکل آب شیرین کن موردنظر کاهش پیدا می‌کند. با افزایش دمای TBT همان‌طور که اشاره شد، نرخ دبی جرمی بخار محرک افزایش پیدا می‌کند و با افزایش نرخ دبی جرمی بخار محرک، نسبت عملکرد کاهش پیدا می‌کند. همچنین با

نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و نسبت عملکرد در میزان شوری ppm ۳۰۰۰۰ رخ داده و به ترتیب برابر ۹۰ کیلوگرم بر ثانیه و ۶/۲ می‌باشد. کمترین نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و نسبت عملکرد در میزان شوری ppm ۵۰۰۰۰ رخ داده و به ترتیب برابر ۸۵ کیلوگرم بر ثانیه و ۵/۷ می‌باشد.



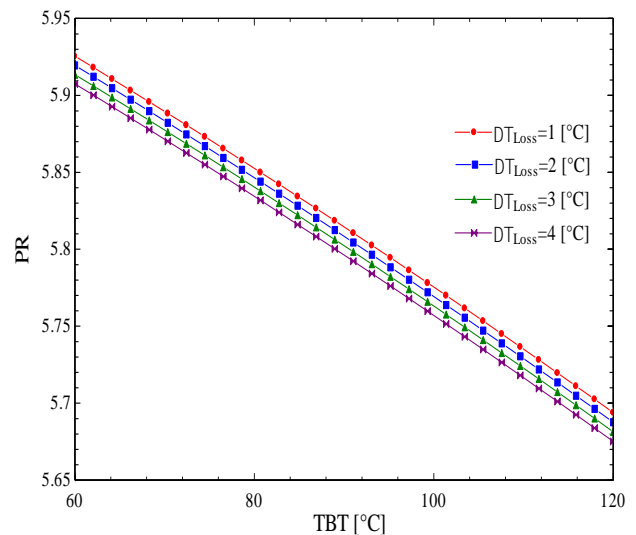
شکل ۹ تغییرات نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و نسبت عملکرد آب شیرین کن MED-TVC بر اساس میزان شوری آب تغذیه

در شکل (۱۰) نمودار تغییرات راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی آب شیرین کن MED-TVC بر اساس میزان شوری آب تغذیه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش میزان شوری آب تغذیه، راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی سیکل آب شیرین کن کاهش پیدا می‌کند. هر گونه افزایش در شوری آب دریا باعث افزایش نرخ جریان جرمی آب ورودی می‌شود و تولید بخار را در اثر جذب گرما، کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش تولید آب شیرین منجر به راندمان اگزرژی کمتر می‌گردد. همچنین، تخریب اگزرژی کمتری در نرخ جریان جرمی کمتر آب ورودی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی آب شیرین کن MED-TVC بر اساس میزان شوری آب تغذیه

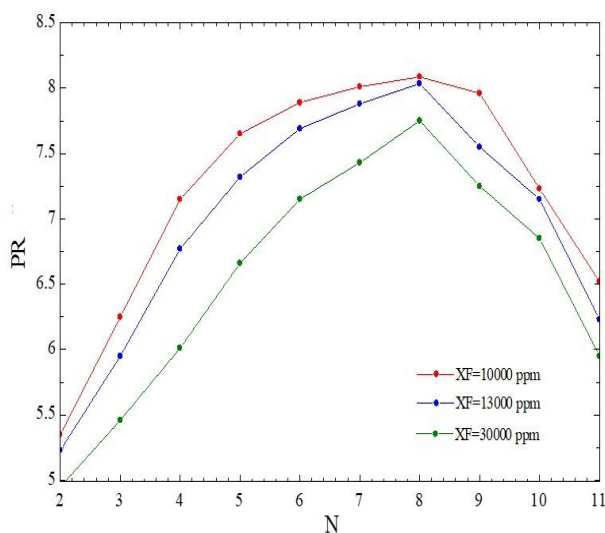
۵/۷۱۱ و ۵/۹۴۲، بیشترین و کمترین نسبت عملکرد سیکل آب شیرین کن در تلفات دمایی ۲ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۵/۷۰۴ و ۵/۹۳۶، بیشترین و کمترین نسبت عملکرد آب شیرین کن در تلفات دمایی ۳ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۵/۶۹۸ و ۵/۹۳، در نهایت، بیشترین و کمترین نسبت عملکرد آب شیرین کن در تلفات دمایی ۴ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۵/۶۹۲ و ۵/۹۲۴ می‌باشد. همچنین، بیشترین نسبت عملکرد سیستم در حالت تلفات دمایی ۱ درجه سانتی‌گراد و دمای TBT ۶۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین نسبت عملکرد سیستم در حالت تلفات دمایی ۴ درجه سانتی‌گراد و دمای TBT ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. باید توجه داشت که تلفات دمایی استاندارد در سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC در بازه بین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۸ تغییرات نسبت عملکرد آب شیرین کن MED-TVC بر اساس دمای TBT در دماهای اتلافی ترمودینامیکی مختلف در اثرات

در شکل (۹) نمودار تغییرات نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و نسبت عملکرد آب شیرین کن چند اثره MED-TVC بر اساس میزان شوری آب تغذیه نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش میزان شوری آب تغذیه، نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و همچنین نسبت عملکرد آب شیرین کن کاهش پیدا می‌کنند. می‌توان بدین صورت تعبیر نمود که با افزایش میزان شوری آب تغذیه ورودی به آب شیرین کن، به دلیل وجود نمک بالاتر در ابتدای فرآیند شیرین‌سازی و غلظت نمک بالاتر، به دلیل کاهش میزان نرخ آب تولیدی در هر اثر، میزان آب شیرین تولیدی کاهش پیدا می‌کند. همچنین به دلیل کاهش میزان آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن نیز نسبت عملکرد سیستم کاهش می‌یابد. بیشترین

آب شیرین کن افزایش پیدا می‌کند. باید توجه داشت که برای افزایش نسبت عملکرد آب شیرین کن، هم می‌توان میزان آب شیرین تولیدی را افزایش یا میزان دبی جرمی بخار ورودی به سیستم آب شیرین کن را کاهش داد. همچنین با افزایش تعداد اثرات، به دلیل افزایش اواپراتورها و ظرفیت کندانسور و ترموکمپرسور نیز نرخ تخریب اگزرژی سیکل آب شیرین کن افزایش پیدا کرده و به دلیل افزایش آب شیرین تولیدی، راندمان اگزرژی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین با افزایش تعداد اثرات، نرخ آب شیرین تولیدی، نسبت عملکرد، راندمان اگزرژی و تخریب اگزرژی افزایش می‌یابند در شکل (۱۳) نمودار تغییرات پارامتر نسبت عملکرد برای آب شیرین کن‌هایی با تعداد مراحل مختلف، در حالتی که غلظت نمک موجود در آب دریا متغیر می‌باشد، نشان داده شده است. برای رسم این نمودار، اختلاف دمای بین مراحل ۴/۵ درجه سانتی‌گراد، فشار بخار محرک ۱۰ بار، دمای آب دریا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دمای آب تغذیه، خروجی از کندانسور، ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همان طور که از این نمودار مشخص است، اگر سیستم شیرین‌سازی حرارتی برای شیرین‌سازی آب شور دریا که غلظت نمک موجود در آن نیز ۱۰۰۰۰ ppm می‌باشد، به کار رود، آب شیرین کن ۸ مرحله‌ای با نسبت عملکرد ۸/۰۸۵ عملکردی نزدیک به حالت بهینه دارد و چون تعداد اواپراتورهای آن کمتر است، می‌توان به عنوان شرایط بهینه از نظر فنی و اقتصادی نیز انتخاب شود.

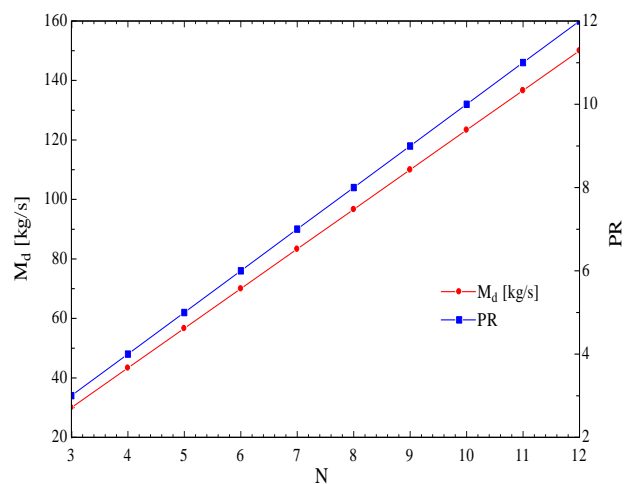


شکل ۱۳ تغییرات پارامتر نسبت عملکرد با تغییرات غلظت آب دریا برای آب شیرین کن‌هایی با تعداد مراحل مختلف

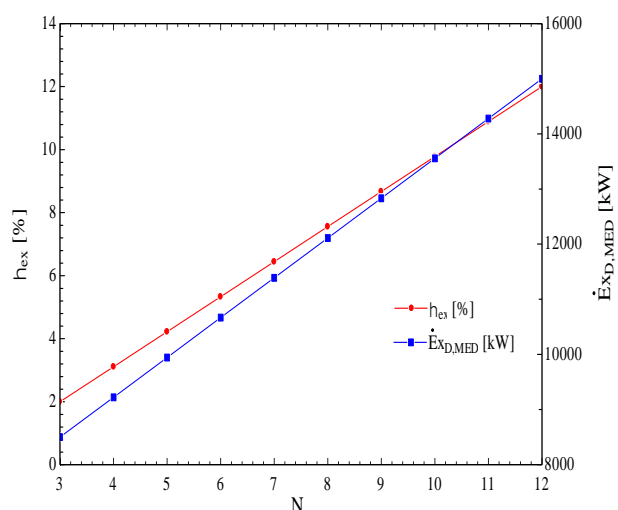
همان طور که از نمودار مشخص است با بالا رفتن غلظت املاح موجود در آب شرایط ماکزیمم نسبت عملکرد نیز تغییر می‌کند و پارامتر نسبت عملکرد تمامی سیستم‌ها کاهش پیدا کرده و

بیشترین راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی سیکل آب شیرین کن در شوری آب ۳۰۰۰۰ ppm رخ داده و به ترتیب برابر ۵ درصد و ۱۱۵۰۰ کیلووات می‌باشد. همچنین، کمترین راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی سیکل آب شیرین کن در شوری آب ۵۰۰۰۰ ppm رخ داده به ترتیب برابر ۴ درصد و ۸۸۰۰ کیلووات می‌باشد.

در شکل (۱۱) نمودار تغییرات نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و نسبت عملکرد سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس اثرات مختلف و همچنین در شکل (۱۲) نمودار تغییرات راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس اثرات مختلف نمایش داده شده است.



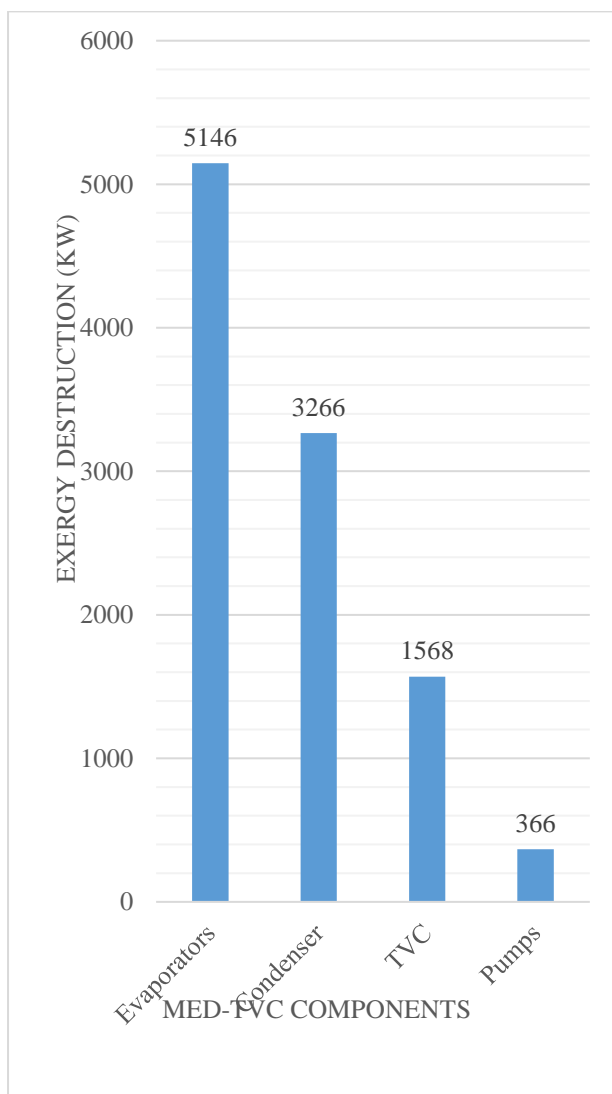
شکل ۱۱ تغییرات نرخ آب شیرین تولیدی و نسبت عملکرد سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس اثرات مختلف



شکل ۱۲ تغییرات راندمان اگزرژی و نرخ تخریب اگزرژی سیکل آب شیرین کن MED-TVC بر اساس اثرات مختلف

همان طور که قابل مشاهده است با افزایش تعداد اثرات، میزان نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی و به تبع آن نسبت عملکرد

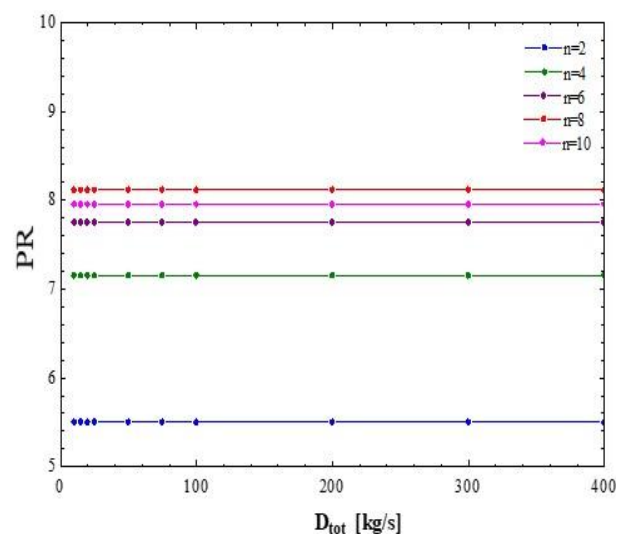
در شکل (۱۵) نمودار میزان تخریب اگزرژی اجزای مختلف سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC نمایش داده شده است. باید توجه داشت که یکی از مزایای تحلیل اگزرژی، محاسبه عددی میزان تخریب یا نابودی اگزرژی می باشد. این پارامتر به علت بازگشت ناپذیری های داخلی حجم کنترل ایجاد شده و منابع اصلی آن در سیستم های حرارتی شامل احتراق، واکنش های شیمیایی، انتقال حرارت، اختلاط مواد، انبساط ناگهانی، واکنش های هسته ای، پدیده هیستریزس در میدان های الکتریکی و مغناطیسی می باشند. همان طور که در شکل قابل مشاهده است، بیشترین نرخ اگزرژی تخریبی در سیکل آب شیرین کن چند اثره متعلق به اواپراتورها (اثرات) و کمترین نرخ اگزرژی تخریبی متعلق به پمپها می باشد. اگزرژی تخریبی اواپراتورها (اثرات)، کندانسور، ترموکمپرسور و پمپها به ترتیب برابر ۵۱۴۶، ۳۲۶۶، ۱۵۶۸ و ۳۶۶ کیلووات می باشند.



شکل ۱۵ میزان تخریب اگزرژی اجزای مختلف سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC

تعداد مراحل بهینه سیستم نیز تغییر می کند. بنابراین باید توجه داشت که سیستم آب شیرین کن تقطیر چند مرحله ای برای چه آبی بهره برداری می گردد. زیرا غلظت آب شور دریای خزر با خلیج فارس متفاوت است و حالت بهینه سیستم برای هر کدام با توجه به مقدار غلظت آب نیز متفاوت خواهد بود.

در شکل (۱۴) تغییرات نسبت بهره وری بر حسب دبی آب شیرین تولیدی برای تعداد مراحل مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است با تغییر دبی آب شیرین تولیدی و یا به عبارت دیگر با تغییر ظرفیت تولید آب شیرین کن، به ازای شرایط ورودی ثابت، هیچ تغییری در نسبت عملکرد سیستم در تعداد مراحل یکسان دیده نمی شود. در این حالت نیز برای تعداد مراحل معین، با تغییر دبی بخار محرک که ناشی از تغییر در ظرفیت سیستم آب شیرین کن می باشد، هیچ تغییری در نسبت عملکرد سیستم صورت نمی گیرد و با توجه به رابطه بین دبی بخار محرک و ظرفیت آب شیرین کن رابطه ای کاملاً خطی است، بنابراین با توجه به رابطه نسبت عملکرد، تغییرات صورت و مخرج کسر مذکور به صورت خطی می باشد و در نتیجه کل کسر، یعنی نسبت عملکرد سیستم ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. در نتیجه در شرایط ورودی های یکسان، با تغییر در ظرفیت، تغییری در نسبت عملکرد سیستم صورت نمی گیرد و نسبت عملکرد سیستم مستقل از ظرفیت سیستم می باشد. همچنین این نمودار، مبین این مطلب است که به ازای شرایط ورودی یکسان، سیستم آب شیرین کن ۸ مرحله ای بیشترین نسبت عملکرد را دارد و می توان به عنوان آب شیرین کن بهینه در شرایط عملکردی در نقطه طراحی نیز انتخاب شود.



شکل ۱۴ تغییرات نسبت عملکرد بر حسب دبی آب شیرین تولیدی آب شیرین کن با مراحل مختلف

۶- نتیجه گیری

با تغییر ظرفیت تولیدی آب شیرین کن، به ازای شرایط ورودی ثابت، هیچ تغییری در نسبت عملکرد سیستم در تعداد مراحل یکسان دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که نسبت عملکرد سیستم آب شیرین کن تقطیر چند مرحله‌ای مستقل از ظرفیت سیستم باشد. همچنین، نتایج نشان داد که بیشترین نرخ آگزرژی تخریبی در سیکل آب شیرین کن چند اثره متعلق به اوپراتورها (اثرات) و کمترین نرخ آگزرژی تخریبی متعلق به پمپ‌ها می‌باشد. آگزرژی تخریبی اوپراتورها (اثرات)، کندانسور، ترموکمپرسور و پمپ‌ها به ترتیب برابر ۵۱۴۶، ۳۲۶۶، ۱۵۶۸ و ۳۶۶ کیلووات می‌باشند. در کل مجموع تخریب آگزرژی در سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC برابر ۱۰۳۴۶ کیلووات است.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

<i>BPE</i>	اختلاف نقطه جوش °C
<i>MED</i>	آب شیرین کن تقطیر چند مرحله‌ای
<i>MED-TVC</i>	آب شیرین کن تقطیر چند اثره مجهز به ترموکمپرسور
<i>NEA</i>	حد غیر تعادلی °C
<i>PR</i>	نسبت عملکرد
<i>B</i>	نرخ جریان جرمی آب شور دریا، kg/s
<i>C_p</i>	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، kJ/kg*K
<i>D</i>	نرخ جریان جرمی آب شیرین تولیدی، kg/s
<i>d</i>	نرخ جریان جرمی بخار در اثرات مختلف، kg/s
<i>Ė</i>	نرخ جریان آگزرژی، kw
<i>e_x</i>	نرخ جریان آگزرژی مخصوص، kJ/kg
<i>F</i>	نرخ جریان جرمی آب تغذیه، kg/s
<i>G</i>	انرژی آزاد گیبس، kw
<i>g</i>	انرژی گیبس مخصوص، kJ/kg
<i>h</i>	آنتالپی، kJ/kg
<i>M</i>	نرخ جریان جرمی، kg/s
<i>n</i>	تعداد اثرات
<i>Q</i>	نرخ انتقال حرارت، J
<i>X</i>	میزان شوری آب، ppm

نمادهای یونانی

η	راندمان
μ	پتانسیل شیمیایی
زیر نویس‌ها	
<i>b</i>	دریا
<i>ch</i>	شیمیایی
<i>cw</i>	آب خنک کننده کندانسور
<i>ex</i>	آگزرژی
<i>f</i>	آب تغذیه

در کل مجموع تخریب آگزرژی در سیکل آب شیرین کن چند اثره MED-TVC برابر ۱۰۳۴۶ کیلووات است. دلیل بالا بودن نرخ تخریب آگزرژی در اوپراتورها (اثرات) این است که تعداد اثرات بالا بوده و همچنین در هر اثر به دلیل نرخ انتقال حرارت بین بخار و آب شور در کل، میزان آگزرژی تخریبی اثرات بیشتر می‌باشد. همچنین بعد از اثرات، بیشترین نرخ تخریب آگزرژی متعلق به کندانسور می‌باشد. در کندانسور، به دلیل نرخ انتقال حرارت بالا بین سیال خنک کننده و بخار، میزان تخریب آگزرژی بالا خواهد بود. پس از کندانسور، میزان نرخ تخریب آگزرژی ترموکمپرسور یا همان چرخه اجکتور بخار در جایگاه بعدی قرار می‌گیرد و در نهایت کمترین میزان تخریب آگزرژی سیکل آب شیرین کن چند اثره موردنظر در پمپ‌ها رخ می‌دهد.

با توجه به اینکه کشور ایران، مرز آبی وسیعی به طول ۲۷۰۰ کیلومتر با دریاهای خزر، خلیج فارس و عمان دارد، دارای پتانسیل خوبی برای شیرین سازی آب دریا جهت استفاده در صنایع آب شرب می‌باشد. مشخص شده است که نیروگاه‌های حرارتی آب شیرین کن می‌تواند عملکرد بسیار مناسبی برای تولید آب شرب داشته باشد.

هدف از این مطالعه، بررسی فنی سیستم آب شیرین کن تقطیر چند مرحله‌ای می‌باشد که این امر با مدل سازی ترمودینامیکی سیستم و به کمک بسته نرم افزاری EES و با بررسی پارامترهای مختلف سیستم مذکور، حاصل گردیده است. در ادامه، نتایج مهمی که در این مطالعه استخراج شده است، بیان شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای TBT میزان نرخ دبی جرمی بخار محرک افزایش یافته ولی میزان نرخ دبی جرمی آب خنک کننده کندانسور، نرخ انتقال حرارت کندانسور، مساحت کندانسور، نسبت عملکرد و مساحت ویژه سیکل آب شیرین کن موردنظر کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با افزایش میزان شوری آب تغذیه، نرخ دبی جرمی آب شیرین تولیدی، نسبت عملکرد، راندمان آگزرژی و نرخ تخریب آگزرژی سیکل آب شیرین کن کاهش پیدا می‌کند. غلظت املاح محلول در آب شور یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در بازده سیستم‌های شیرین سازی حرارتی است که افزایش آن باعث افت شدید نسبت عملکرد سیستم می‌گردد.

در این مطالعه، مشخص گردید که حالت بهینه سیستم، آب شیرین کن ۸ مرحله‌ای خواهد بود. نشان داده شد که به ازای شرایط ورودی یکسان، آب شیرین کن ۸ مرحله‌ای دارای بیشترین نسبت عملکرد سیستم خواهد بود. در نهایت، مشخص گردید که

Engineering, vol. 140, pp. 814-827, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.092>.

[7] C. Frantz and B. Seifert, "Thermal analysis of a multi effect distillation plant powered by a solar tower plant," *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 1928-1937, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.190>.

[8] M. A. S. Eldean and A. Soliman, "A novel study of using oil refinery plants waste gases for thermal desalination and electric power generation: Energy, exergy & cost evaluations," *Applied Energy*, vol. 195, pp. 453-477, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.052>.

[9] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Transient performance of MED processes with different feed configurations," *Desalination*, vol. 438, pp. 3753, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.03.016>.

[10] S. E. Shakib, M. Amidpour, M. Boghrati, M. M. Ghafurian, and A. Esmaeili, "New approaches to low production cost and low emissions through hybrid MED-TVC+ RO desalination system coupled to a gas turbine cycle," *Journal of Cleaner Production*, vol. 295, p. 126402, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126402>.

[11] A. Farsi and M. A. Rosen, "Assessment of a geothermal combined system with an organic Rankine cycle and multi-effect distillation desalination," *Earth Systems and Environment*, vol. 6, No. 1, pp. 15-27, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00275-w>.

[12] M. Prajapati, M. Shah, and B. Soni, "A comprehensive review of the geothermal integrated multi-effect distillation (MED) desalination and its advancements," *Groundwater for Sustainable Development*, p. 100808, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100808>.

[13] B. Lin and M. Malmali, "Energy and exergy analysis of multi-stage vacuum membrane distillation integrated with mechanical vapor compression," *Separation and Purification Technology*, vol. 306, p. 122568, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122568>.

[14] S. Hilarydoss, "Techno-enviro-economic assessment of novel hybrid inclined-multi-effect vertical diffusion solar still for sustainable water distillation," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, No. 7, pp. 17280-17315, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23286-0>.

fb محفظه بخار

ke جنبشی

m بخار محرک

out خروجی

θ بخار اشباع

i تعداد اثرات

in ورودی

pe پتانسیل

ph فیزیکی

s نمک

w آب

۸- مراجع

[1] E. Rafat and M. Babaelahi, "Recovering waste heat of a solar hybrid power plant using a Kalina cycle and desalination unit: A sustainability (emergo-economic and emergo -environmenal) approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 224, p. 113394, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113394>.

[2] F. Hesari, F. Salimzhad, M. H. K. Manesh, and M. R. Morad, "A novel configuration for low-grade heat-driven desalination based on cascade MED," *Energy*, vol. 229, p. 120657, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120657>.

[3] S. M. Alirahmi, S. B. Mousavi, A. R. Razmi, and P. Ahmadi, "A comprehensive techno-economic analysis and multi-criteria optimization of a compressed air energy storage (CAES) hybridized with solar and desalination units," *Energy Conversion and Management*, vol. 236, p. 114053, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114053>.

[4] H. Rostamzadeh, H. Ghiasirad, M. Amidpour, and Y. Amidpour, "Performance enhancement of a conventional multi-effect desalination (MED) system by heat pump cycles," *Desalination*, vol. 477, p. 114261, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114261>.

[5] S. Sadri, M. Ameri, and R. H. Khoshkhou, "Multi-objective optimization of MED-TVC-RO hybrid desalination system based on the irreversibility concept," *Desalination*, vol. 402, pp. 97-108, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.09.029>.

[6] M. Moghimi, M. Emadi, A. M. Akbarpoor, and M. Mollaei, "Energy and exergy investigation of a combined cooling, heating, power generation, and seawater desalination system," *Applied Thermal*

- [24] M. A. Abdelkareem, M. E. H. Assad, E. T. Sayed, and B. Soudan, "Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants," *Desalination*, vol. 435, pp. 97-113, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>.
- [25] H. El-Dessouky, I. Alatiqi, S. Bingulac, and H. Ettouney, "Steady-state analysis of the multiple effect evaporation desalination process," *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-PlantEquipmen-ProcessEngineering- Biotechnology*, vol. 21, No. 5, pp. 437-451, 1998, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4125](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4125).
- [26] P. Ahmadi, S. Khanmohammadi, F. Musharavati, and M. Afrand, "Development, evaluation, and multi-objective optimization of a multi-effect desalination unit integrated with a gas turbine plant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 176, p. 115414, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115414>.
- [27] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, "Development of a steady-state mathematical model for MEE-TVC desalination plants," *Desalination*, vol. 351, pp. 9-18, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.018>.
- [28] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Exergy and thermo-economic analysis for MED-TVC desalination systems," *Desalination*, vol. 447, pp. 29-42, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.008>.
- [29] N. Eshoul, A. Almutairi, R. Lamidi, H. Alhajeri, and A. Alenezi, "Energetic, exergetic, and economic analysis of MED-TVC water desalination plant with and without preheating," *Water*, vol. 10, No. 3, p. 305, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/w10030305>.
- [30] H. B. Harandi, A. Asadi, M. Rahnema, Z.-G. Shen, and P.-C. Sui, "Modeling and multi-objective optimization of integrated MED-TVC desalination system and gas power plant for waste heat harvesting," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 149, p. 107294, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107294>.
- [31] R. Kamali, A. Abbassi, S. S. Vanini, and M. S. Avval, "Thermodynamic design and parametric study of MED-TVC," *Desalination*, vol. 222, No. 1-3, pp. 596 - 604, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.120>.
- [32] A. Almutairi, P. Pilidis, N. Al-Mutawa, and M. Al-Weshahi, "Energetic and exergetic analysis of cogeneration power combined cycle and ME-TVC-MED water desalination plant: Part-1 operation and performance," *Applied Thermal Engineering*,
- [15] S. Khanmohammadi, S. Razi, M. Delpisheh, and H. Panchal, "Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a solar-driven multi-generation system producing power and water," *Desalination*, vol. 545, p. 116158, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116158>.
- [16] F. M. Al-Fadhli et al., "Optimizing cogeneration and desalination plants by incorporating solar energy," *Desalination*, vol. 549, p. 116320, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116320>.
- [17] T. Khir, "Energy and Exergy Analysis of a Hybrid Solar Geothermal Med Desalination System," doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4443982>.
- [18] S. Aly, H. Manzoor, S. Simson, A. Abotaleb, J. Lawler, and A. N. Mabrouk, "Pilot testing of a novel Multi Effect Distillation (MED) technology for seawater desalination," *Desalination*, vol. 519, p. 115221, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115221>.
- [19] F. Musharavati and S. Khanmohammadi, "Design and exergy based optimization of a clean energy system with fuel Cell/MED and hydrogen storage option," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, No. 62, pp. 26715-26727, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.214>.
- [20] S. Jehandideh, H. Hassanzade, and S. E. Shakib, "Environmental assessment of a hybrid system composed of solid oxide fuel cell, gas turbine and multiple effect evaporation desalination system," *Energy & Environment*, vol. 32, No. 5, pp. 874-901, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/0958305X20973575>.
- [21] M. Laissaoui, D. Nehari, A. Bouhalassa, M. Hazmoune, S. Lechehab, and A. Touil, "Thermodynamic analysis of combined CSP-MED desalination in Algeria," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference*, 2015: IEEE, pp. 16, doi: <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455096>.
- [22] C. Wen, H. Ding, and Y. Yang, "Performance of steam ejector with nonequilibrium condensation for multi-effect distillation with thermal vapour compression (MED-TVC) seawater desalination system," *Desalination*, vol. 489, p. 114531, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114531>.
- [23] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, "Current status and future directions of MED-TVC desalination technology," *Desalination and Water Treatment*, vol. 55, No. 1, pp. 1-9, 2015, doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.910841>.

doi:<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01071-1>.

vol.103,pp.77.91,2016,doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.121>.

[34] R. Ghasemiasl, M. A. Javadi, M. Nezamabadi, and M. Sharifpur, "Exergetic and economic optimization of a solar-based cogeneration system applicable for desalination and power production," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 145, pp. 993-1003,2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10242-8>.

[33] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *The European Physical Journal Plus*, vol. 136, pp. 1-19, 2021,

امکان سنجی استفاده از سیستم مگنتوهیدرودینامیک برای افزایش محدوده ماخ عملیاتی یک موتور توربین گاز هوایی

چکیده: امروزه افزایش ماخ عملیاتی موتورهای توربینی هوایی مورد توجه دانشمندان قرار دارد. استفاده از انرژی مگنتوهیدرودینامیک (MHD)^۱ سبب استفاده از موتور توربوجت در پرنده با سرعت سوپرسونیک می شود. برای عملکرد موتور توربوجت در پرنده های با سرعت سوپرسونیک نیاز به کاهش سرعت جریان ورودی است. در این روش جدید، انرژی جنبشی زیاد جریان سوپرسونیک ورودی، به انرژی الکتریکی تبدیل شده و با کاهش سرعت جریان هوای ورودی، علاوه بر ایجاد امکان عملکرد مناسب موتور توربینی، از انرژی الکتریکی برای شتاب دادن به جریان گاز خروجی استفاده می شود. در این تحقیق چرخه ترمودینامیکی یک موتور توربوجت با سیستم MHD، برای عملکرد مناسب این موتور در ماخ بالاتر از ۲، تحلیل و پارامترهای مؤثر بر تراست تولیدی و بازده، بررسی می شوند. نتایج نشان می دهند که اعمال میدان مغناطیسی به جریان، ضمن تامین شرایط مناسب موتور توربوجت در ماخ بالا، انرژی جنبشی جریان سرعت بالا را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و در نهایت صرف افزایش تراست می گردد و محدوده ماخ عملیاتی موتور توربوجت را افزایش می دهد. نتایج حاکی از آن است که در محدوده ماخ ۲ تا ۴ تراست مخصوص در موتور مورد مطالعه تا 343 N/(kg/s) افزایش می یابد.

واژه های راهنما: موتور توربین گاز هوایی، افزایش محدوده ماخ عملیاتی، افزایش نیروی پیشران، چرخه ترمودینامیکی، انرژی کنار گذر MHD.

بهروز شهریاری*
استادیار

سیدحمیدرضا

سادات پور

کارشناسی ارشد

سیدمحمد رضا

افقاری

دکتری،

مجتمع دانشگاهی مکانیک،

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

Feasibility of using magneto hydrodynamic system for increasing the operational Mach range of an aero gas turbine engine

Behrooz
Shahriari*
Assistant professor

Syed Hamidreza
Sadatpooor
M.Sc.

Syed
Mohammadreza
Afghari
PhD.,
Faculty of Mechanics,
Malek Ashtar University
of Technology

Abstract: Today, increasing the operating Mach of air turbine engines is the focus of scientists. The use of magneto-hydrodynamic (MHD) energy allows the use of a turbojet engine in a supersonic flight. For the performance of turbojet engine in supersonic flight, it is necessary to reduce the speed of the inlet flow. In this new method, the high kinetic energy of the incoming supersonic flow is converted into electrical energy, and by reducing the speed of the incoming air flow, in addition to enabling proper operation of the turbine engine, electrical energy is used to accelerate the outgoing gas flow. In this research, the thermodynamic cycle of a turbojet engine with MHD system, for the proper operation of this engine at Mach 2 above, is analyzed and the parameters affecting the production thrust and efficiency are investigated. The results show that applying a magnetic field to the flow, while providing suitable conditions for the turbojet engine at high Mach, converts the kinetic energy of the high-speed flow into electrical energy and is ultimately used to increase the thrust and increase the operating Mach range of the turbojet engine. The results indicate that in the range of Mach 2 to 4, the specific thrust in the studied engine increases up to 343 N/(kg/s) .

Keywords: Aero gas turbine engine, Increasing the operational Mach range, Increase thrust, Thermodynamic cycle, MHD energy bypass

* نویسنده مسئول، shahriari@mut-es.ac.ir

¹ Magneto Hydrodynamic (MHD) energy bypass

مغناطیسی بر اساس دو اصل قابل درک می‌باشد: (الف) القای جریان الکتریکی به دلیل حرکت ماده رسانا در یک میدان مغناطیسی، (ب) تأثیر نیروی لورنتز حاصل از اندرکنش میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی.

اولین تحقیق ثبت شده در مورد MHD به وسیله شیمیدان انگلیسی هامفری داویی در سال ۱۸۲۱ انجام شده است، هنگامی که او نشان داد یک قوس الکتریکی می‌تواند به وسیله یک میدان مغناطیسی منحرف شود. بیش از یک دهه بعد از آن فارادی پی برد که می‌توان از یک سیال رسانا به‌عنوان ماده عامل در ژنراتور توان استفاده کرد [۸]. پس از این، افراد زیادی در این زمینه کار کردند از جمله بلاکارلویتز یک مهندس متولد مجارستان اولین سیستم MHD گازی را پیشنهاد کرد. او به همراه هالاسز یک دستگاه MHD آزمایشگاهی را ایجاد کرد و تا سال ۱۹۴۶ نشان داد که از طریق تزریق گاز کاری، مقدار کمی توان الکتریکی می‌توان استخراج کرد. ایده استفاده از سیستم MHD برای پیشرانش وسایل دریایی نیز اولین بار توسط رایس در سال ۱۹۶۱ آورده شد [۹]. MHD نقش مهمی در اخترفیزیک، مغناطیس سیاره‌ای، مهندسی و همجوشی هسته‌ای کنترل شده ایفا می‌کند [۱۰]، [۱۱].

داویدسون [۱۱] در متنی جامع به جای پرداختن به جزئیات ریاضی MHD، بر ایده‌های فیزیکی آن تأکید کرد و کاربردهای مهندسی از آن را بیان نمود.

فناوری انرژی کنارگذر MHD یک فناوری جدید است که تاریخچه آن چنان طولانی ندارد ولی با این حال به نظر می‌رسد اولین تحقیقات در این زمینه را ناسا در سال ۲۰۰۰ آغاز کرده باشد، تحقیقاتی که منجر به ارائه مقاله‌ای با عنوان «تحلیل چرخه ترمودینامیکی انرژی کنارگذر MHD در موتورهای هایپرسونیک» [۱۲] شد. این مقاله حاصل تلاش‌های سه گروه از دانشمندان آمریکا و روسیه بود. در این مقاله چرخه ترمودینامیکی یک موتور رمجت/اسکرم جت همراه با سیستم انرژی کنارگذر MHD مورد بررسی قرار گرفت و روابط حاکم بر آن استخراج شد. از این سال به بعد تعداد اندکی از مقالات بر پایه این تحقیقات ناسا انجام شده است.

بلنکسون و اسکندر [۱۳] در سال ۲۰۰۳ به بررسی موتور هایپرسونیک با استفاده از کنارگذر انرژی MHD با یک موتور توربوجت معمولی پرداختند. بنیو از مرکز تحقیقات گلن ناسا [۱۴] در سال ۲۰۱۰ چرخه ترمودینامیکی یک موتور توربوجت را مورد مطالعه قرار داد و تأثیرات استفاده از این سیستم را بر

مثلاً زمان برخاست پرنده عملکرد داشته باشند زیرا فشار دینامیکی هوا جهت افزایش فشار سیکل برای مقادیر عملکردی مناسب، کافی نیست؛ از آنجا که موتورهای رم جت و اسکرم جت در سرعت‌های پایین عملکرد جلوبرندگی مقرون به صرفه ندارند سایر سیکل‌های ترمودینامیکی، موتورهای جت توربینی (توربوجت و توربوفن) یا راکت‌ها نیاز خواهند شد [۲].

اگر ماموریت شامل عمل در ماورای اتمسفر زمین باشد راکت‌ها در دستور کار خواهند بود. برای عملکرد مناسب در درون اتمسفر یک ترکیب موتورهای هوا تنفسی توربینی و غیر توربینی (رم جت و اسکرم جت) و عمل در سیکل‌های ترکیبی است. نمونه‌ای از این موتورهای ترکیبی موتور توربو-رم جت است که در سرعت‌های پایین بخش توربینی عمل کرده و در سرعت‌های بالا بخش توربینی از مدار خارج و بخش رم جت وارد عمل می‌شود. از معایب موتورهای سیکل ترکیبی، وزن بالا، پیچیدگی زیاد این سامانه و هزینه بالای دوره عمر می‌باشد. روش دیگر که یک روش نوین و در دست مطالعه است، انرژی کنارگذر مگنتوهیدرو دینامیک^۱ (MHD) نام دارد و در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته، باعث می‌شود از یک موتور جت توربینی معمولی علاوه بر سرعت‌های مادون صوت در محدوده مافوق صوت نیز نیروی پیشران قابل قبولی تولید کرد. در این روش جدید، انرژی جنبشی زیاد جریان هوا در سرعت‌های مافوق صوت هدر نمی‌رود بلکه این انرژی جنبشی تبدیل به انرژی الکتریکی شده و با این کار سرعت جریان هوای ورودی به موتور کاهش یافته و در نهایت از همین انرژی الکتریکی برای شتاب دادن به جریان گاز خروجی استفاده می‌شود.

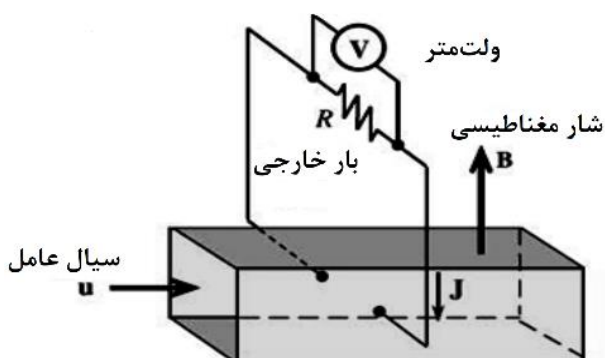
مگنتوهیدرو دینامیک پدیده‌ای است که در سیال رسانای الکتریسته در حضور یک میدان مغناطیسی به وقوع می‌پیوندد [۵]. وقتی جریان الکتریکی از طریق یک سیال رسانای الکتریسته که بین دو الکترود قرار گرفته انتقال پیدا می‌کند، در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی عمود بر جهت جریان، یک نیروی حجمی به نام نیروی لورنتز ایجاد می‌شود. به دلیل این نیروی حجمی توزیع شده، سیال رسانا اختلاف فشاری را تجربه می‌کند که سبب جریان یافتن سیال در طول کانال می‌شود [۶]. پدیده MHD اندرکنش بین فلزات مایع یا ذرات فرومغناطیس داخل جریان و میدان الکترومغناطیسی است؛ در مدل MHD معادلات ماکسول الکترو دینامیکی با معادلات سیال، ترکیب می‌شوند که نیروهای لورنتز حاصل از میدان مغناطیسی را نیز شامل می‌شود. ترکیب بین میدان جریان سیال و میدان

¹ Magneto Hydrodynamic (MHD) energy bypass

این موتور مینی توربوجت همراه با این سیستم در سرعت‌های سوپرسونیک بررسی می‌شود.

۲- آشنایی با مفاهیم کلی حاکم

مگنتوهیدرودینامیک زمینه ای نظری است که به مطالعه دینامیک سیالات با خاصیت رسانایی الکتریکی می‌پردازد و از سه کلمه گرفته شده است. کلمه مگنتو به معنی میدان مغناطیسی، هیدرو به معنی سیال و دینامیک به معنی حرکت می‌باشد. وقتی که یک گاز یونیزه شده در راستای عمود بر یک میدان مغناطیسی جریان پیدا می‌کند یک میدان الکتریکی القاء می‌کند که جهت آن عمود بر بردار جریان سیال و بردار میدان مغناطیسی می‌باشد و الکترون‌ها و یون‌های گاز سیال تحت تأثیر میدان الکتریکی القایی جریان الکتریکی را بوجود می‌آورد. در شکل (۳) نمایی از سیستم مگنتوهیدرودینامیک نشان داده شده است.



شکل ۳ طرح واره سیستم مگنتوهیدرودینامیک [۱۵]

تبدیل مگنتوهیدرودینامیک، کاربردی فنی از پلاسما محسوب می‌گردد که امکان تولید انرژی الکتریکی از انرژی جنبشی پلاسما را فراهم می‌آورد. از نظر فیزیکی، پلاسمایی که در مبدل MHD مورد استفاده قرار می‌گیرد، دمایش در مقایسه با پلاسمای مورد استفاده در گداخت هسته ای فوق‌العاده پایین تر است. ژنراتورهای MHD در یک چرخه مگنتوهیدرودینامیک در نقش یک ماشین الکتریکی ظاهر می‌شوند، یعنی می‌توان از انرژی حرکتی خطی ذرات پلاسمای متحرک برای تولید برق DC استفاده کرد و برعکس می‌توان از انرژی برق DC برای شتاب دادن ذرات پلاسما استفاده نمود، به عبارتی تبدیل مگنتوهیدرودینامیک یک فرآیند دو طرفه است که در سیستم انرژی کنارگذر MHD از هر دو طرف فرآیند استفاده می‌شود. [۱۴]

روی یک موتور توربوجت بررسی نمود و نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی در مسیر جریان مافوق صوت در محدوده ۲ تا ۳/۵ ماخ، رانش ویژه را تا ۴۲۰ نیوتن بر کیلوگرم بر ثانیه افزایش می‌دهد. همچنین با استفاده از یک سیستم کنارگذر انرژی MHD، ممکن است پاکت عملیاتی یک هواپیمای مافوق صوت به رژیم پرواز مافوق صوت افزایش یابد.

درخشان و یزدانی در سال ۲۰۱۵ به تحلیل عددی عملکرد یک میکروپمپ مگنتوهیدرودینامیک پرداختند [۶]. آنها یک مدل سه بعدی را برای بررسی جریان سیال در این میکروپمپ توسعه دادند و معادلات را به صورت عددی با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل حل نمودند.

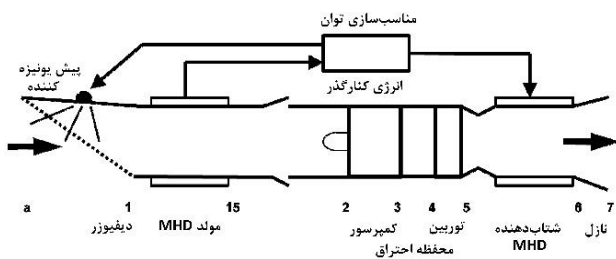
حق پرست و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک پیشرانه مگنتوهیدرودینامیکی دریایی را برای اولین بار به صورت کاملاً سه بعدی شبیه سازی کردند و پارامترهای عملکردی آن را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. در این شبیه سازی میدان های الکتریکی، مغناطیسی و سرعت سیال به صورت سه بعدی در نظر گرفته شدند و اثر ناهمسانی میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر جریان انتهایی و عملکرد پیشرانه تحلیل گردیدند.

وثوق و کارگر شریف آباد در سال ۲۰۱۵ تأثیر مگنتوهیدرودینامیک بر روی فروسیال درون کانال استوانه‌ای را بررسی عددی نمودند [۱۶].

در این مطالعه، رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی یک فروسیال (آب به علاوه ۲ درصد اکسید آهن) در یک کانال دو بعدی افقی و در حضور میدان های مغناطیسی مختلف، به صورت عددی با استفاده از مدل تک فاز و روش حجم محدود مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی کاربرد فناوری MHD در حوزه پیشران‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات در این زمینه، بیشتر در پمپ‌ها و پیشران‌ها دریایی بوده است. در حوزه پیشران‌ها هوایی تحقیقات بسیار اندکی روی موتورهای رم جت و اسکرم جت و همچنین موتور توربوجت مافوق صوت انجام شده است؛ این نشان می‌دهد بکارگیری این تکنولوژی در موتورهای هوایی امری بدیع است. با توجه به کلاس های مختلف موتورهای توربوجت، اعم از توربوجت معمولی، مینی توربوجت و میکرو توربوجت و کاربرد گسترده موتورهای مینی توربوجت، در این مقاله تحلیل چرخه ترمودینامیکی یک موتور مینی توربوجت موجود در کشور همراه با سیستم انرژی کنارگذر MHD مورد بررسی قرار می‌گیرد و پارامترهای مؤثر بر بازدهی این سیستم و مؤثر بر نیروی پیشران تولیدی ارزیابی می‌شوند. به عبارتی دیگر افزایش نیروی پیشران

تولیدشده می تواند برای نیاز های مختلف وسیله از جمله کنترل جریان پلازما در سراسر وسیله استفاده شود. [۱۴]



شکل ۴ نمایی شماتیک از یک موتور توربوجت همراه با سیستم انرژی کنارگذر MHD [۱۶]

۳- تحلیل چرخه ترمودینامیکی یک موتور توربوجت همراه با سیستم انرژی کنارگذر MHD

هدف اصلی در این مقاله امکان سنجی و اثبات تکنولوژی انرژی کنارگذر MHD در یک موتور توربوجت است. لازم به ذکر است که این نتایج مقدماتی هستند و به مطالعه بیشتر نیاز دارند. این تحلیل، یک تحلیل چرخه ترمودینامیکی نقطه به نقطه است که در آن فقط انرژی کنارگذر در نظر گرفته شده است. این تحلیل همچنین هیچ تغییری از سطح مقطع را در نظر نمی گیرد و دبی جریان هوای ورودی به موتور ثابت فرض می شود.

برای محاسبه نیروی پیشران از روابط رایج و شناخته شده موتورهای توربوجت استفاده می شود اما برای محاسبه فشار و دمای سکون هوا در بخش های اضافه شده به موتور توربوجت از این روابط استفاده می شود.

پیش یونیزه کننده: بر اساس معادلات اثبات شده در مرجع [۱۲] در پیش یونیزه کننده تغییرات فشار سکون اندک می باشد و می توان از آن ها صرف نظر نمود. اما تغییرات دمای سکون از رابطه (۱) بدست می آید:

$$T_{012} = \frac{T_{0a}}{1 - \chi \eta_{N(g)}} \quad (1)$$

که در این رابطه نسبت استخراج آنتالپی ($\eta_{N(g)}$) با استفاده از قدرت خروجی تولید شده توسط ژنراتور و آنتالپی جریان ورودی محاسبه می شود. این پارامتر نسبت تغییر آنتالپی سکون در دستگاه ژنراتور MHD به آنتالپی سکون ورودی است [۱۵]:

$$\eta_{N(g)} = \frac{P_{elec}}{\dot{m} C_p T_{0a}} \quad (2)$$

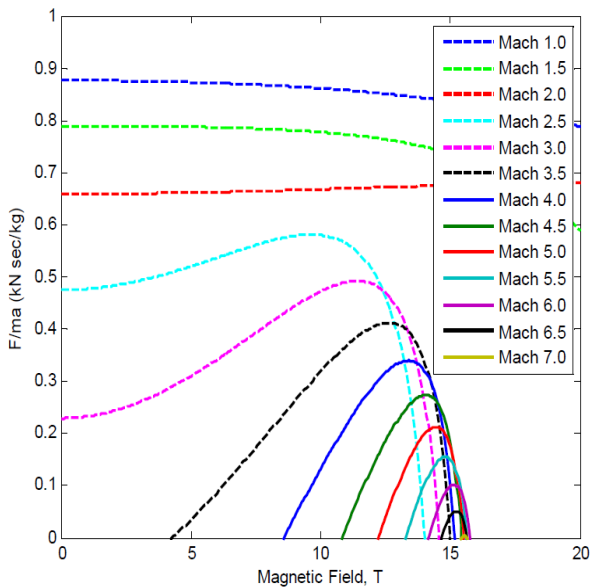
که در آن P_{elec} توان خروجی ژنراتور MHD (برحسب وات) و T_{0a} ، دمای سکون جریان آزاد هوا است و \dot{m} ، نرخ جریان جرم

یکی از روش های افزایش نیروی پیشران موتورهای هوایی در سرعت های سوپرسونیک و هایپرسونیک استفاده از سیستم انرژی کنارگذر MHD می باشد. تلفیق سیستم انرژی کنارگذر MHD با فناوری توربین گاز معمولی، مفهوم انقلابی و جدیدی ارائه می دهد که دارای سه مزیت متمایز است.

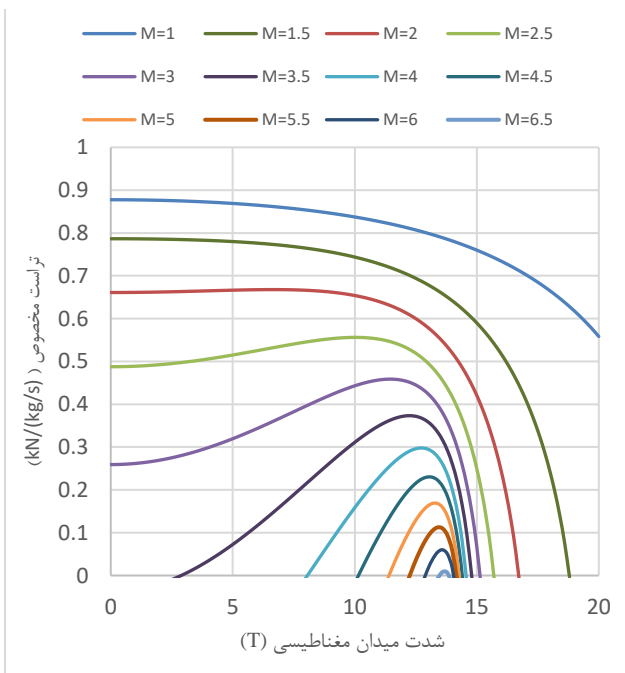
این سیستم به موتورهای توربوجت اجازه می دهد که به طور مداوم در دامنه ماخ ۰ تا ۷ کار کنند؛ تنها از سوخت هیدروکربن به جای هیدروژن استفاده می کند و در آخر، پتانسیل بالایی برای افزایش نیروی پیشران مخصوص دارد. سیستم انرژی کنارگذر MHD از سه بخش اصلی تشکیل شده که به ترتیب عبارتند از: ۱- دستگاه پیش یونیزه کننده که در ورودی موتور قرار گرفته است؛ جایی که جریان ورودی در ارتباط با میدان مغناطیسی یونیزه می شود و مزیت کنترل جریان را فراهم می کند. این جریان با ولتاژ بالا از روش تخلیه الکتریکی نانو ثانیه یونیزه می شود که در آن ولتاژ بالا طی مدت زمان کوتاهی اعمال می شود و از این طریق جریان هوای سرد در سرعت سوپرسونیک یونیزه می شود. ۲- دستگاه ژنراتور MHD که در جلوی موتور و قبل از کمپرسور واقع شده و به عنوان یک دستگاه کنترل جریان عمل می کند و انرژی الکتریکی لازم را برای دستگاه پیش یونیزه و شتاب دهنده MHD تأمین می کند. میدان های الکترومغناطیسی تولیدشده توسط ژنراتور MHD قادر به کنترل جریان ورودی متغیر هستند که شبیه به حالتی است که جریان با هندسه متغیر کنترل شود. ژنراتور MHD یک وسیله غیرممانع برای کاهش دمای کل است که می تواند توسط میدان مغناطیسی اعمال شده و تنظیم پارامتر بار کنترل شود. در ضمن دستگاه ژنراتور MHD دما و فشار هوای ورودی در ماخ های بالا را کاهش می دهد و بدین ترتیب دما و فشار عملیاتی یک موتور توربوجت را تأمین می کند. ۳- شتاب دهنده MHD که بعد از توربین و قبل نازل قرار گرفته و سرعت گازهای خروجی را افزایش می دهد و بدین ترتیب نیروی پیشران تولیدی را افزایش می دهد. شکل (۴) نمایی از این سیستم را به همراه یک موتور توربوجت نشان می دهد. [۱۴]

سه نتیجه مهم استفاده از این سیستم عبارتند از: اول، آنتالپی جریان ورودی به محفظه احتراق کاهش می یابد که باعث بهبود راندمان انرژی در محفظه احتراق، بدون تجاوز از محدودیت های دما بر مواد توربین می شود. دوم، میدان های الکترومغناطیسی اعمال شده می توانند با دست کاری ویژگی های جریان در ورودی سوپرسونیک/هایپرسونیک عملکرد خارج از طراحی را بهبود بخشیده و در نتیجه باعث کاهش افت فشار سکون و تغییرات آنتروپی نسبت به سایر روش ها شوند. سوم، توان الکتریکی

در این شکل محور افقی میدان مغناطیسی بر حسب تسلا و محور عمودی نیروی پیشران مخصوص می باشد. همان طور که در شکل (۵) ملاحظه می شود در زیر ماخ ۲ با افزایش میدان مغناطیسی هیچ گونه افزایشی در نیروی پیشران نخواهد بود اما از ماخ ۲ به بعد با افزایش میدان مغناطیسی اعمالی نیروی پیشران نیز افزایش می یابد. این افزایش نیروی پیشران همیشگی نخواهد بود و از یک میدان مغناطیسی خاص به بعد دوباره کاهش نیروی پیشران مشاهده می شود.



شکل ۵ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت Allison J-102 توسط بنیو [۱۴]



شکل ۶ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت Allison J-102 بدست آمده در تحقیق حاضر

هوای ورودی به ژنراتور MHD است. P_{elec} نیز از مرجع [۱۲] بدست می آید:

$$P_{elec} = \sigma u^2 B^2 k(1 - k) A_g L \quad (3)$$

که در آن σ ، ضریب هدایت الکتریکی هوا، u سرعت هوا، B ، شدت میدان مغناطیسی بر حسب تسلا، k ، ضریب بار فارادی است که معمولاً برابر ۰/۵ فرض می شود و A_g ، سطح مقطع ژنراتور MHD و L ، طول ژنراتور MHD می باشد. **ژنراتور MHD**: دما و فشار خروجی ژنراتور MHD با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه می شود [۱۶]:

$$T_{015} = T_{012} (1 - \eta_{N(g)}) \quad (4)$$

$$\frac{P_{015}}{P_{012}} = \left(1 - \frac{\eta_{N(g)}}{\eta_{S(g)}}\right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (5)$$

که در آن $\eta_{S(g)}$ راندمان آیزنتروپیک ژنراتور MHD می باشد. **شتاب دهنده MHD**: از آنجا که انرژی تولید شده در ژنراتور MHD در شتاب دهنده مصرف می شود، بنابراین افزایش درجه حرارت سکون و نسبت فشار سکون در این بخش برابر است با [۱۵]:

$$T_{06} = T_{05} + \frac{P_{elec} A}{\dot{m} C_p} \quad (6)$$

$$\frac{P_{06}}{P_{05}} = \left(1 + \eta_{S(a)} \eta_{N(a)}\right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (7)$$

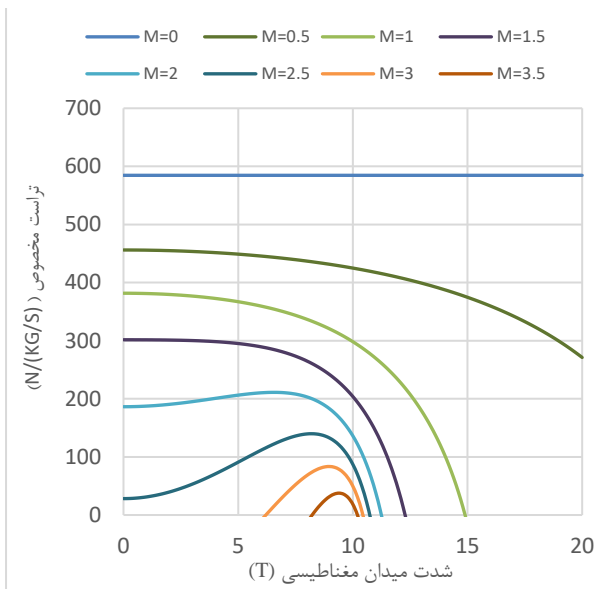
که در آن $\eta_{S(a)}$ راندمان آیزنتروپیک شتاب دهنده MHD می باشد. **محاسبه نیروی پیشران**: در موتورهای توربوجت، رانش خالص از جمع رانش ناشی از مقدار حرکت و رانش ناشی از فشار بدست می آید [۱۶]:

$$F = \dot{m}_a [(1 + f) C_e - C_a] + A_e (P_e - P_a) \quad (8)$$

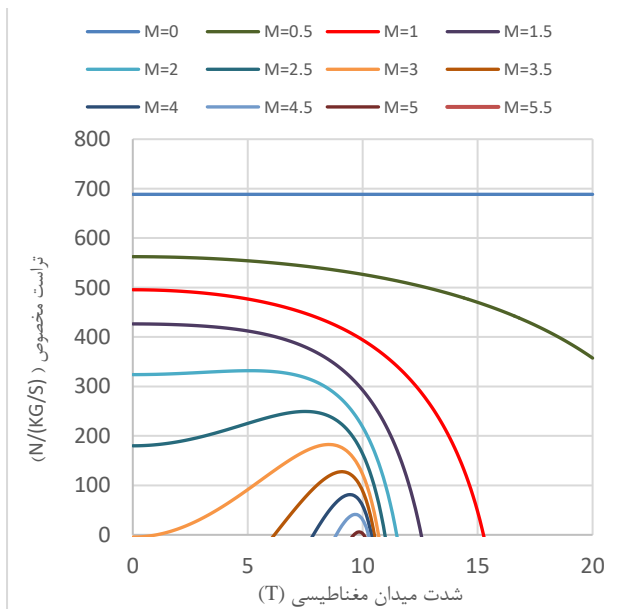
۴- اعتبارسنجی روش تحلیل

کار قبلی انجام شده در این زمینه توسط بنیو انجام شده است [۱۴]. بنیو در مقاله خود بر روی موتور Allison J-102 مطالعه کرده است. موتور Allison J-102 یک موتور توربوجت مافوق صوت است که بر روی موشک ها استفاده می شود. شکل (۵) نتایج تحقیق بنیو در مورد چرخه ترمودینامیکی موتور مذکور را نشان می دهد.

داده های موجود در شکل (۷) نشان می دهند که اگر دمای محفظه احتراق ۱۲۰۰ کلوین باشد، در میدان مغناطیسی به قدرت ۸/۴ تسلا و در ماخ ۲/۵، نیروی پیشران مخصوص ۱۱۲ N/(kg/s) افزایش می یابد.



شکل ۷ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 در $T_{0\text{lim}}=1200\text{ K}$



شکل ۸ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 در $T_{0\text{lim}}=1400\text{ K}$

حال اگر دمای محفظه احتراق ۲۰۰ کلوین افزایش یابد و به ۱۴۰۰ کلوین برسد، نیروی پیشران تولیدی و محدوده ماخ عملیاتی موتور نیز افزایش خواهد یافت. داده های موجود در شکل (۸) نشان می دهد که اگر دمای محفظه احتراق

برای اطمینان یافتن از درستی تجزیه و تحلیل انجام شده در این پروژه، با استفاده از همین روش و روابط، پروژه قبلی انجام شده توسط بنیو تکرار گردید. همان طور که در شکل های (۵) و (۶) مشاهده می شود نتایج کار هر دو تحقیق بسیار نزدیک به هم می باشد و اختلاف اندک موجود هم می تواند به علت نداشتن برخی اطلاعات کاری موتور توربوجت Allison J-102 باشد.

۵- تحلیل با موتور توربوجت TRI 60-1

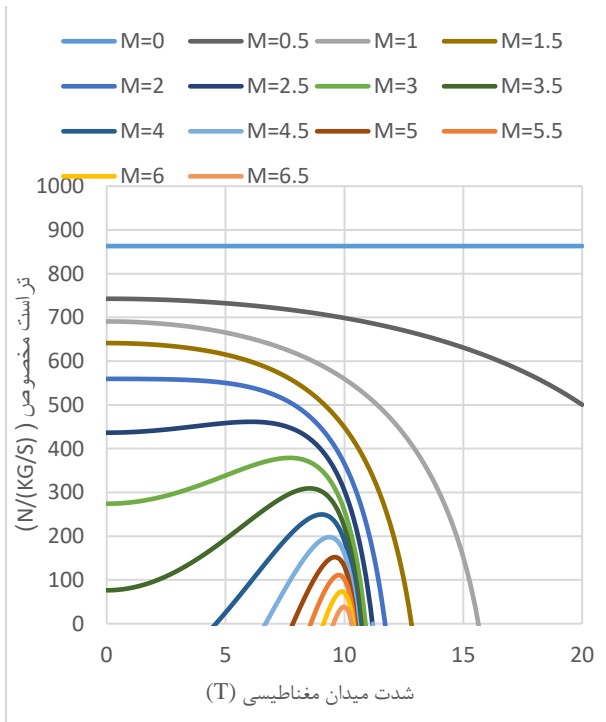
در این مقاله بر روی موتور توربوجت TRI 60-1 با شرایط عملیاتی مطابق جدول (۱) تمرکز شده است.

جدول ۱ شرایط عملیاتی موتور TRI 60-1

$P = 88\text{ kpa}$	فشار هوای ورودی
$\dot{m}_a = 6.12\text{ kg/s}$	دبی جریان هوا
$\sigma = 1\text{ s/m}$	ضریب هدایت الکتریکی هوا
$L = 1\text{ m}$	طول ژنراتور MHD
$A = 0.1\text{ m}^2$	سطح مقطع ژنراتور MHD
$\eta_{N(g)} = 0.9$	راندمان آیزنتروپیک ژنراتور MHD
$X = 0.05$	میزان انرژی الکتریکی صرف شده برای پیش یونیزه کننده
$K = 0.5$	ضریب بار فارادی
$\pi_c = 3.7$	نسبت فشار سکون کمپرسور
$\eta_c = 0.8$	راندمان آیزنتروپیک کمپرسور
$q_f = 45000\text{ kJ/kg}$	ارزش حرارتی سوخت
$\eta_t = 0.85$	راندمان آیزنتروپیک توربین
$\eta_{N(a)} = 0.9$	راندمان آیزنتروپیک شتاب دهنده MHD

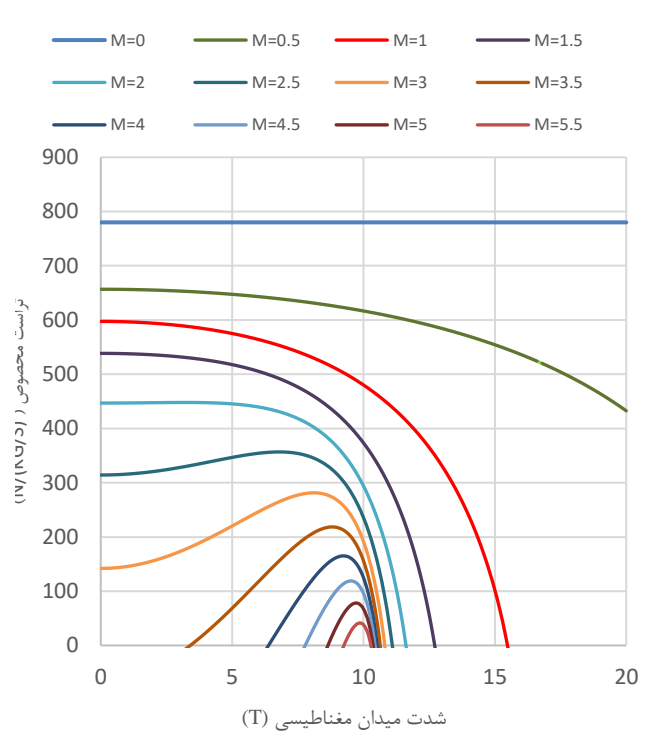
در این مقاله، پارامترهای مؤثر بر بازدهی سیستم MHD و مؤثر بر نیروی پیشران تولیدی ارزیابی شده است. برای این منظور ابتدا دمای محفظه احتراق از ۱۲۰۰ K تا ۲۰۰۰ K در پنج گام افزایش داده می شود، تا مشخص شود این سیستم در چه دمایی حداکثر کارایی را خواهد داشت. نمودارهای زیر نتایج را در پنج محدوده دمای محفظه احتراق و برای طیف وسیعی از اعداد ماخ (از ۱ تا ۷ ماخ) نشان می دهند. میدان مغناطیسی از ۰ تا ۲۰ تسلا تغییر می کند. در نمودارهای زیر ضریب هدایت الکتریکی هوا برابر ۱ s/m فرض شده است.

حقیقت را نیز در نظر گرفت که در ماخ های بالا، نیروی پیشران حداکثر تولیدی موتور نیز کاهش یافته است. در واقع با استفاده از سیستم انرژی کنارگذر MHD، می توان برد عملیاتی یک موتور توربوجت را به رژیم پروازی هایپرسونیک ارتقا داد.



شکل ۸ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 در $T_{0\lim}=1800\text{ K}$

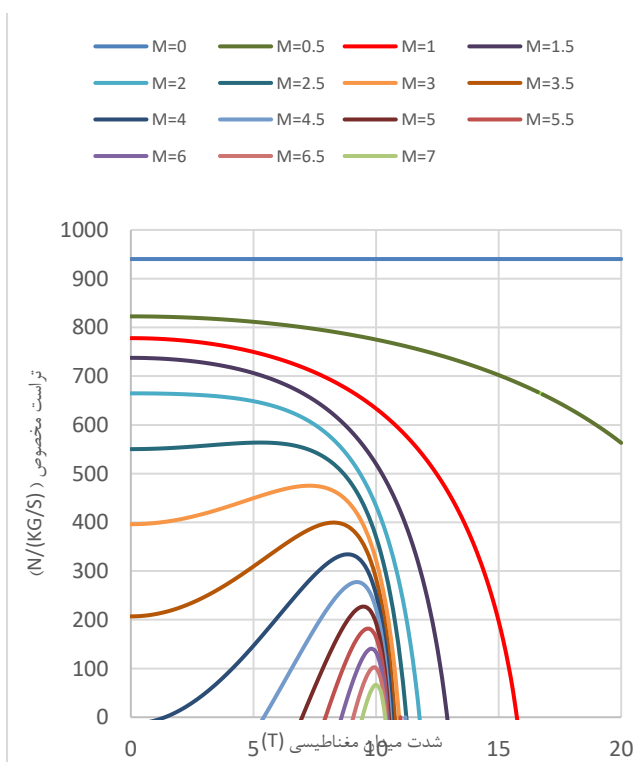
به ۱۴۰۰ کلون افزایش یابد، در میدان مغناطیسی به قدرت ۸/۶ تسلا و در ماخ ۳، نیروی پیشران مخصوص $N/(kg/s)$ ۱۸۶ افزایش می یابد.



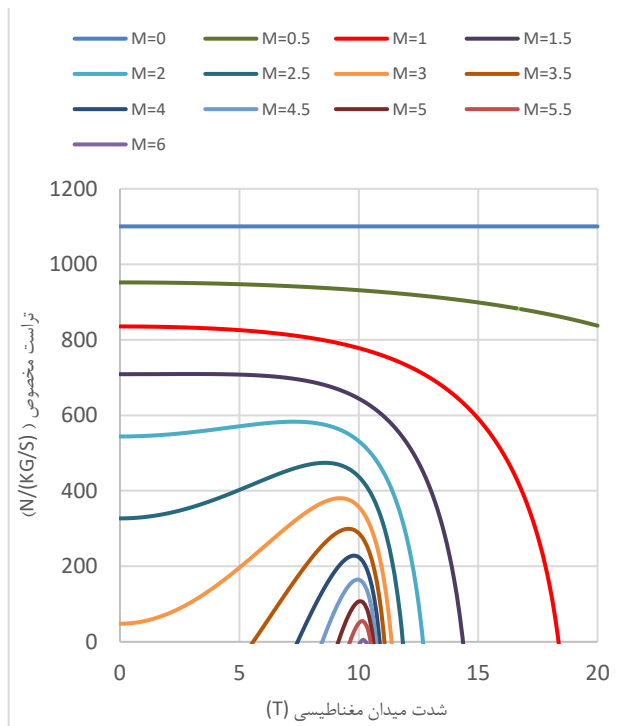
شکل ۹ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 در $T_{0\lim}=1600\text{ K}$

همان طور که در شکل (۹) مشاهده می شود، اگر دمای محفظه احتراق ۱۶۰۰ کلون باشد، در میدان مغناطیسی به قدرت ۸/۲ تسلا و در ماخ ۳، نیروی پیشران مخصوص $N/(kg/s)$ ۱۴۰ افزایش می یابد. اگر محدوده دمای محفظه احتراق به ۱۸۰۰ کلون افزایش یابد نتایج بهتری نیز بدست خواهد آمد. همان طور که در نمودار شکل (۱۰) مشاهده می شود، در میدان مغناطیسی به قدرت ۸/۶ تسلا و در ماخ ۳/۵، نیروی پیشران مخصوص $N/(kg/s)$ ۳۱۵ افزایش می یابد. در آخر همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، اگر دمای محفظه احتراق ۲۰۰۰ کلون باشد، در ماخ ۴ نیز افزایش نیروی پیشران مخصوص مشاهده می گردد و نیروی پیشران مخصوص در این سرعت ۳۴۳ $N/(kg/s)$ افزایش می یابد. باید توجه کرد که زیر ماخ ۲ هیچ افزایشی در نیروی پیشران مخصوص با استفاده از میدان های مغناطیسی وجود نخواهد داشت. استفاده از میدان مغناطیسی در ماخ های ۲ به بعد تأثیر مثبتی را در پی دارد.

با مقایسه شکل های (۷)، (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) می توان به این حقیقت دست یافت که با افزایش دمای محفظه احتراق، محدوده ماخ عملیاتی موتور نیز افزایش یافته است. اما باید این



شکل ۱۱ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 در $T_{0\lim}=2000\text{ K}$



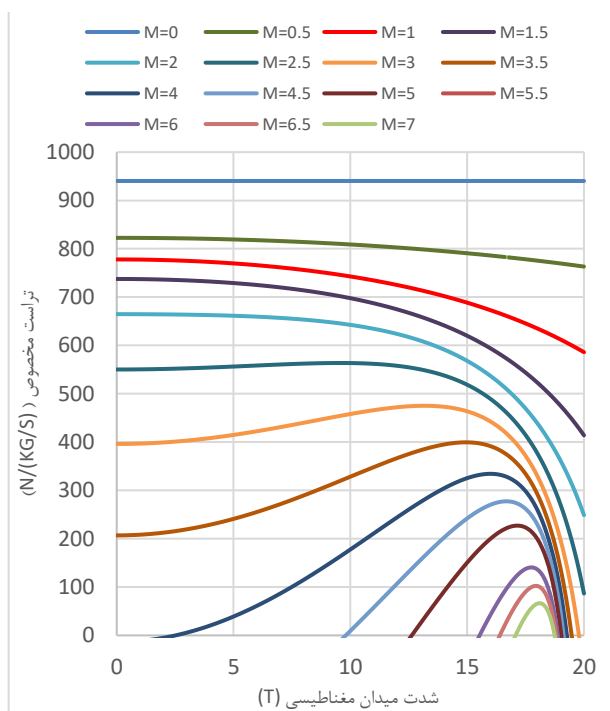
شکل ۱۳ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 مغناطیسی در $T_{0\text{ lim}}=2000$ و نسبت فشار کمپرسور $\Pi_c=10$

پارامتر موثر دیگر در توان ژنراتور MHD ضریب هدایت الکتریکی هوای یونیزه شده می‌باشد. کیفیت کار یک سیستم مگنتوهیدرودینامیک در اصل به قدرت تبدیل یک گاز خنثی به گازی که دارای خاصیت هدایت جریان الکتریکی است بستگی دارد. به منظور هادی کردن، یک جریان گاز باید دارای درصد فراوان الکترون یا یون هایی با بار مثبت باشد به عبارت دیگر گاز یونیزه شود. در این قسمت ضریب هدایت الکتریکی هوا را از 1 s/m به 5 s/m افزایش داده می‌شود تا تأثیر این پارامتر بر عملکرد سیستم MHD مشخص شود.

مقایسه شکل های (۱۴) و (۱۱) نشان می‌دهد که اگر هدایت الکتریکی هوا ۵ برابر افزایش یابد، میدان مغناطیسی اعمال شده مورد نیاز کاهش می‌یابد. تأمین این میدان مغناطیسی با قدرت ۳ تا ۴ تسلا بسیار ساده‌تر خواهد بود. در ضمن، این امر تأثیر به سزایی در کاهش وزن سیستم کنارگذر انرژی MHD خواهد داشت. بنابراین هرچه هوای ورودی به موتور یونیزه تر باشد برای این سیستم مناسب‌تر خواهد بود. در این حالت افزایش $N/(kg/s)$ ۲۰۰ تراست مخصوص در میدان مغناطیسی به قدرت $3/8$ تسلا تحقق می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که در سرعتی برابر $3/5$ ماخ و با دبی $6/12 \text{ kg/s}$ می‌توان تراست را نسبت به حالت بدون سیستم انرژی کنارگذر MHD به مقدار 1224 نیوتن افزایش داد.

حال به بررسی سایر پارامترهای مؤثر در افزایش تراست و عملکرد سیستم انرژی کنارگذر MHD پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا دبی هوای ورودی به موتور و سپس نسبت فشار کمپرسور را تغییر داده تا مشخص شود این سیستم در کدام موتورها بازدهی و تأثیر بیشتری خواهد گذاشت. همان طور که در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود با افزایش دبی هوای ورودی به موتور از $6/12 \text{ kg/s}$ به 20 kg/s میدان مغناطیسی مورد نیاز برای سیستم انرژی کنارگذر MHD نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. تأمین این میدان مغناطیسی با قدرت ۱۴ تا ۱۷ تسلا امری سخت و دشوار است. بنابراین با توجه به شکل های (۱۱) و (۱۲) به این نتیجه می‌توان رسید که هر چه دبی هوای ورودی به موتور کمتر باشد برای استفاده از سیستم انرژی کنارگذر MHD بهتر خواهد بود.

اکنون نسبت فشار کمپرسور افزایش داده می‌شود تا اثر آن بر روی سیستم انرژی کنارگذر MHD بررسی شود. همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت فشار کمپرسور از $3/7$ به 10 حداکثر تراست تولیدی کاهش یافته است. با مقایسه شکل های (۱۱) و (۱۳) این نتیجه بدست می‌آید که با افزایش نسبت فشار کمپرسور حداکثر تراست تولیدی و همراه با آن محدوده ماخ عملیاتی موتور کاهش می‌یابد. بنابراین سیستم انرژی کنارگذر MHD برای موتورهایی که نسبت فشار کمپرسور کمتری دارند مناسب‌تر خواهد بود.

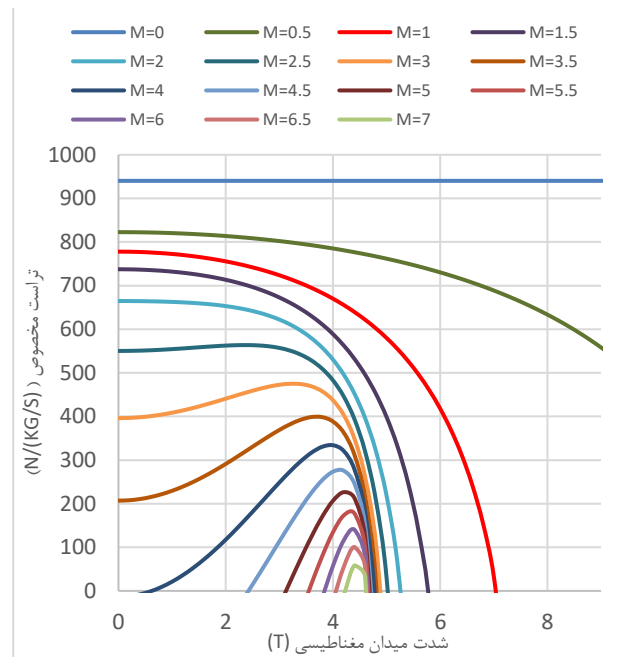


شکل ۱۴ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 در $T_{0\text{ lim}}=2000$ و دبی $m_a=20$

• توان الکتریکی تولید شده می تواند برای رفع نیازهای مختلفی از جمله کنترل جریان پلاسما در سرتاسر وسیله مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می توان جریان در حال گسترش در نازل را با بکارگیری شتاب دهنده MHD تقویت کرد تا تراست تولیدی افزایش یابد.

۷- مراجع

- [1] D. Musielak, "Scramjet propulsion: a practical introduction," Wiley, 2022, doi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119640646>.
- [2] C. Segal, "The Scramjet Engine: Processes and Characteristics," Cambridge University Press, 2009, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511627019>.
- [3] R. D. Flack, "Fundamentals of jet propulsion with applications," Cambridge Aerospace Series, New York, Cambridge University Press, 2005, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807138>.
- [4] A. Ingenito, "Subsonic Combustion Ramjet Design," Springer International Publishing, 2021, doi: <https://citations.springernature.com/book?doi=10.1007/978-3-030-66881-5>.
- [5] V. Patel, S. K. Kassegne, "Electroosmosis and thermal effects in magnetohydrodynamic (MHD) micropumps using 3D MHD equations," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 122, no. 1, pp. 42-52, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.05.015>.
- [6] S. Derakhshan S, K. Yazdani, "Numerical analysis of a magnetohydrodynamic micropump performance," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 13, pp. 251-258, 2015, [In Persian], <http://mme.modares.ac.ir/article-15-6410-fa.html>.
- [7] M. Pourjafarholi, "The role of electrohydrodynamic and magnetohydrodynamic methods in aerospace industries," *Mechanical Engineering*, vol. 27, no. 3, pp.16-24, 2017, [In Persian], https://mmep.isme.ir/article_35416.html.
- [8] F. Razi Astaraei, M. Samati, "New Magneto-Hydrodynamic Technology for Power Station Renewable Electricity Production," in *First National Conference on Environment, Energy and Biodefense*, Tehran, Iran, 2012, [In Persian], <https://www.academia.edu/5814854/>.
- [9] M. Neghahdari, I. Shafizadeh, and A. Enayat, "Using Electromagnetic Propulsion System as Submarine Propulsion System," *14th Marine Industries Conference*, Dec. 2011, [In Persian], <https://civilica.com/doc/473676/>.



شکل ۱۲ نتایج تحلیل چرخه ترمودینامیکی موتور توربوجت TRI 60-1 مغناطیسی در $T_{0\text{lim}}=2000$ و ضریب هدایت الکتریکی هوا $\sigma=5$

۶- نتیجه گیری

بررسی اثر استفاده از سیستم مگنتوهیدرودینامیک بر افزایش محدوده ماخ عملیاتی برای یک موتور توربوجت در این تحقیق، نشان می دهد که اعمال یک میدان مغناطیسی به مسیر جریان سوپرسونیک در محدوده ماخ ۲ تا ۴ تراست مخصوص را در موتور توربوجت مورد مطالعه تا 343 N/(kg/s) افزایش می دهد. انرژی کنارگذر MHD همچنین می تواند محدوده ماخ عملیاتی را برای یک موتور توربوجت افزایش دهد. همان طور که در این تحلیل نشان داده شد فناوری MHD پتانسیل بالایی برای گسترش پاکت عملیاتی تا ماخ ۷ دارد به شرط آن که شرایط مناسب وجود داشته باشد و بتوان دمای محفظه احتراق را تا 2000 کلوین افزایش داد. فناوری MHD می تواند در پروازهای سوپرسونیک و هایپرسونیک بکار گرفته شود و مزایای زیر را به دنبال خواهد داشت:

- آنتالپی جریان ورودی به محفظه احتراق کاهش می یابد که این خود باعث افزایش راندمان انرژی در محفظه احتراق بدون تجاوز از محدودیت های دما بر مواد توربین می شود.
- میدان های الکترومغناطیسی اعمال شده و نیروهای حجمی می توانند عملکرد خارج از طراحی موتور را با دستکاری ویژگی های جریان در ورودی سوپرسونیک/هایپرسونیک افزایش دهند که در نتیجه باعث کاهش افت فشار کل و تغییرات آنتروپی در همان سطح فشرده سازی در مقایسه با وسایل دیگر می شود.

- Technologies*, AIAA-2003-6922, 15 - 19 Dec. 2003, Norfolk, Virginia, USA,
<https://www.researchgate.net/publication/268555232>.
- [14] T. L. Benyo, "The Effect of Magnetohydrodynamic MHD Energy Bypass on Specific Thrust for a Supersonic Turbojet Engine," *48th Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, USA*, 2010,
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20110002743>.
- [15] M. Haqqarast, M. Alizadeh Pahlavani, and D. Azizi, Diako, "Finite Element Analysis of Magnetohydrodynamic Propulsion and the Effect of End Channel Electric Current on Efficiency," *Applied Electromagnetism*, vol. 4, no. 2, pp. 26-37, 2015, [In Persian],
https://elemag.ihu.ac.ir/article_203379.html.
- [16] B. Vasoogh, and H. Kargar Sharifabad, "Numerical investigation of the effect of magnetohydrodynamics on the ferrofluid inside the cylindrical channel, Mechanical and Vibration Engineering," vol. 7, no. 3, pp.65-74, 2015, [In Persian],
<https://sanad.iau.ir/Journal/jvibme/Article/934216>.
- [10] P. A. Davidson, "Introduction to Magnetohydrodynamics," 2nd ed., Cambridge University Press, 2017, doi:
<https://doi.org/10.1017/9781316672853>.
- [11] K. Shoji and F. Jun, "*Fundamentals of Astrophysical Fluid Dynamics: Hydrodynamics, Magnetohydrodynamics, and Radiation Hydrodynamics*," Springer, 2020,
<https://citations.springernature.com/book?doi=10.1007/978-981-15-4174-2>.
- [12] R. J. Litchford, J. W. Cole, V. A. Biturin, and J. T. Lineberry, "Thermodynamic Cycle Analysis of Magnetohydrodynamic-Bypass Hypersonic Airbreathing Engine," NASA/TP-2000-210387, 2000,
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20000095934>.
- [13] I. M. Blankson, and S. Schneider, "Hypersonic Engine using MHD Energy Bypass with a Conventional Turbojet," *12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and*

مروری بر طراحی و ساخت بازوهای بسیار-افزونه با تحریک ناپیوسته

چکیده: بازوهای بسیار-افزونه از روی هم چیده شدن چند مکانیزم موازی به عنوان پودمان، ایجاد می شوند. اگر تمام عملگرهای این بازوها ناپیوسته باشند به آنها بازوهای بسیار-افزونه با تحریک ناپیوسته گفته می شود. عملگرهای ناپیوسته تنها به چند وضعیت محدود قابل تحریک هستند و نسبت به حالت معمولی پیوسته، کنترل ساده تر، تکرارپذیری بیشتر، دقت بالاتر و قیمت کمتری دارند. تعداد نقاط قابل دسترسی در بازوهای ناپیوسته محدود است و تعقیب مسیر با آنها به صورت تکه تکه، با سرعت غیر یکنواخت و با تقریب صورت می گیرد. بنابراین در اغلب موارد ترجیح داده می شود که از بازوهایی با تحریک پیوسته استفاده شود و استفاده از بازوهای ناپیوسته به موارد خاصی محدود می شود. به عنوان مثال قابلیت استفاده از عملگرهای دو حالت ساده، سبک، کم حجم، ارزان و با مصرف انرژی پایین در این نوع بازوها باعث شده بتوان از آنها در کاوش های فضایی، مصارف پزشکی از قبیل درون بینی رباتیک و آموزش رباتیک استفاده کرد. در این مقاله انواع مختلفی از این ربات ها که تا کنون ساخته شده اند، از لحاظ طراحی و قابلیت هایی که دارند، بررسی خواهد شد تا از این طریق طراحان در آینده بتوانند موارد بهتری را طراحی کنند و از مزایای این ربات ها استفاده کنند.

واژه های راهنما: طراحی و ساخت ربات، بازوهای بسیار-افزونه، عملگرهای دو حالت، تحریک ناپیوسته

غلامرضا خلیج

دانشیار

علیرضا مطهری*

استادیار،

دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد

ساوه، ساوه

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

**Gholamreza
Khalaj**
Associated Professor

**Alireza
Motahari***
Assistant Professor,
Saveh Branch,
Islamic Azad
University, Saveh

A review of the design and implementation of discretely actuated hyper-redundant manipulators

Abstract: Hyper-redundant manipulators are created by stacking multiple parallel mechanisms as modules. If all the actuators of these manipulators are of the discrete type, they are called discretely-actuated hyper-redundant manipulators (DAHRMs). Discrete actuators (DAs) can only be actuated in a limited number of states. DAs have simpler control, more repeatability, higher accuracy, and a lower cost than the common continuous actuators. The number of accessible points in DAHRMs is limited, and they follow the paths segment by segment, at a non-uniform speed, and in an approximate, not exact, way. Therefore, in most cases, it is preferred to use continuous manipulators, and the use of DAHRMs is limited to certain cases. For example, the ability to use simple, light, compact, cheap and low-energy-consuming binary actuators in DAHRMs has made it possible to use them in space exploration, medical applications such as robotic endoscopy and robotic training. In this paper, different types of DAHRMs that have been made so far will be reviewed in terms of their design and capabilities so that designers can design better things in the future and use the advantages of these robots.

Keywords: Design and implementation of robots, Hyper-redundant manipulators, Binary actuators, Discrete actuation

۱- مقدمه

کاملاً جمع شده (یا کاملاً کشیده) برسد کافی است به شیر برقی مربوطه دستور داده شود تا مجرای درستی برای هوا باز شود، پس از این دستور، فقط باید زمان کافی به سیلندر داد تا کاملاً جمع (یا کاملاً کشیده) شود. در این حالت پیستون داخل سیلندر آنقدر حرکت می کند تا به متوقف کننده‌ها برخورد کند. بنابراین به هیچ حسگری برای تشخیص میزان حرکت سیلندر احتیاج نیست. در ضمن لازم نیست سیلندر در بین راه متوقف شود. در این حالت (تحریک پیوسته)، دقت و تکرار پذیری حرکت، مستلزم استفاده از لوازم کنترلی بیشتری بوده و این کار حتی بواسطه خاصیت تراکم پذیری هوا مشکل تر خواهد بود. رفتارهای غیر خطی در بسیاری از عملگرهای دیگر مثل عملگرهای اس-ام-ای^۴ یا عملگرهای دی الکتریک^۵ هم دیده می شود؛ کنترل پیوسته آن‌ها حتی با مشکلات بیشتری همراه است، اما تحریک ناپیوسته کنترل آنها را ساده تر می کند.

یکی از مکانیزم‌هایی که استفاده از عملگرهای ناپیوسته در آن مورد توجه قرار گرفته است، بازوهای بسیار-افزونه می باشد [۲-۶]. این بازوها از چیدن مکانیزم‌های موازی بر روی هم، به عنوان پودمان^۶، ساخته می شود. به عنوان مثال یک پودمان وی-جی-تی^۷ در شکل ۱-الف) نمایش داده شده است.

هر پودمان وی-جی-تی یک مکانیزم زنجیره بسته^۸ صفحه‌ای شامل سه عملگر خطی دو حالت (میله‌های^۹ AC, AD, BC در شکل ۱-الف)) و دو میله با طول ثابت (میله‌های AB, CD در شکل ۱-الف)) می باشد. این میله‌ها مطابق آنچه در شکل ۱-الف) نمایش داده شده است در نقاط A, B, C, D به صورت غیر فعال^{۱۰} با لولا اتصال داده شده اند. با ترکیب حالات تحریک عملگرها، این پودمان می تواند به $2^3 = 8$ صورت مختلف تحریک شود، که در شکل ۱-ب) نمایش داده شده اند. به هر یک از این فرم ها یک پیکربندی^{۱۱} گفته می شود. با چیدن این پودمان ها روی هم یک بازو به دست می آید که هر یک از پودمان‌های آن مستقلاً می توانند در یکی از هشت پیکربندی مذکور تحریک شود.

شکل (۲) یک بازو با چهار پودمان وی-جی-تی را نمایش می دهد که در آن پودمان اول (پودمان متصل به پایه) در پیکربندی شماره ۴، پودمان دوم در پیکربندی ۸، پودمان سوم در پیکربندی ۳ و آخرین پودمان در پیکربندی ۶ قرار دارد.

ربات‌ها معمولاً دارای عملگرهایی با تحریک پیوسته هستند. منظور از تحریک پیوسته یک عملگر آن است که مقدار تحریک آن می تواند هر عددی داخل یک بازه مشخص باشد. به عبارت دیگر مقدار حرکت عملگر در یک بازه پیوسته قابل کنترل است. از این پس به این نوع عملگرها، عملگرهای پیوسته گفته می شود. اگر تمام عملگرهای یک ربات، از نوع پیوسته باشند، به آن ربات پیوسته گفته می شود. آنچه از یک ربات پیوسته انتظار می رود آن است که بتواند حرکات دقیقی را انجام دهد و مقدار حرکت عملگرها در هر لحظه تحت کنترل باشد. این امر مستلزم استفاده از تجهیزات کنترلی دقیقی از قبیل حسگرها و پردازشگرها می باشد، علاوه بر آن عملگرهای مورد استفاده هم باید قابلیت کنترل پذیری بالا و ایجاد حرکات دقیق را داشته باشند. علاوه بر این تجهیزات سخت افزاری، نرم افزارهای پیچیده ای برای کنترل مناسب ربات باید طراحی شود. این موارد باعث می شود یک ربات پیوسته معمولاً دارای وزن، حجم و قیمت بالایی باشد، تعمیر و نگهداری آن مشکل و پرهزینه باشد و کاربری آن مشکل باشد و به دانش بالایی احتیاج داشته باشد. این مشکلات وقتی تعداد عملگرها بیشتر می شود (مثلاً در بازوهای بسیار-افزونه)، افزایش پیدا می کند.

برای کاستن از این مشکلات، برخی از محققین به فکر استفاده از عملگرهایی با تحریک ناپیوسته افتادند [۱،۲]. در عملگرهای ناپیوسته^۱، مقدار تحریک به چند انتخاب محدود می شود. مثلاً در یک سیلندر دو حالت^۲، فقط دو مقدار برای تحریک وجود دارد: حالت کاملاً جمع شده (حالت ۰) و حالت کاملاً کشیده (حالت ۱). به عملگرهای ناپیوسته می توان دستور داد که به اندازه یکی از این مقادیر حرکت کند و در حین حرکت دیگر کنترلی بر روی عملگر وجود ندارد. عملگرهای ناپیوسته می توانند ساختار ساده تری نسبت به عملگرهای پیوسته داشته باشند و کنترل آن‌ها نیز ساده تر است. برای کنترل آن‌ها به پسخور^۳ و تجهیزات کنترلی پیچیده احتیاج نیست. برنامه های کنترلی هم ساده تر خواهند بود. علاوه بر این‌ها دقت و تکرار پذیری این عملگرها بیشتر از نوع پیوسته خواهد بود. به عنوان مثال در مورد یک سیلندر دو حالت نیوماتیکی برای آنکه به حالت

⁷ VGT: Variable Geometry Truss

⁸ Closed chain

⁹ Links

¹⁰ Passive

¹¹ Configuration

¹ Discrete actuators

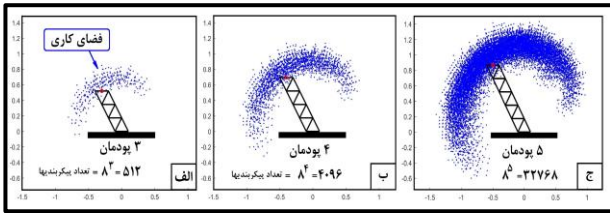
² Binary cylinder

³ Feedback

⁴ SMA: Shape-Memory Alloy

⁵ Dielectric

⁶ Module

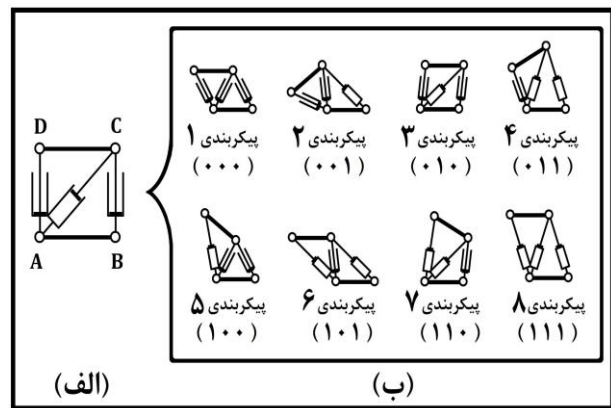


شکل ۳ نمایش فضای کاری یک بازوی وی-جی-تی، شامل: الف) سه پودمان، ب) چهار پودمان، ج) پنج پودمان

حالا اگر چگالی نقاط در فضای کاری بالا باشد، یعنی نقاط قابل دسترسی، فاصله کمی از هم داشته باشند، آنگاه خطای دسترسی به نقاط از نوع دوم کمتر خواهد بود. همانطور که شکل (۳) نشان می‌دهد برای افزایش چگالی فضای کاری، باید تعداد پودمان‌ها افزایش داده شود.

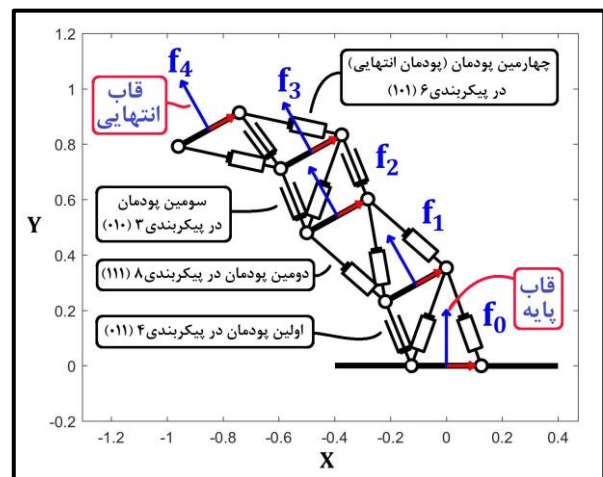
مفهوم درجه آزادی که در مورد ربات‌های پیوسته تعریف می‌شود، در مورد ربات‌های ناپیوسته کمی چالش برانگیزتر است. هنگامی که درجه آزادی یک بازوی صفحه‌ای بیش از سه باشد، به این معنی است که بازو می‌تواند بدون تغییر در موقعیت و جهت مجری نهایی حرکت کند و در پیکربندی دیگری قرار گیرد. اما این لزوماً در مورد بازوهای ناپیوسته صدق نمی‌کند، زیرا پیکربندی‌های آن‌ها محدود است. اگر تعداد پودمان‌ها به اندازه کافی زیاد باشد، به طوری که تراکم فضای کاری به اندازه کافی افزایش یابد بازو می‌تواند به طور تقریبی این کار را انجام دهد. این بدان معنی است که می‌توان پیکربندی بازو را تغییر داد، بدون اینکه مجری نهایی حرکت قابل توجهی داشته باشد. این موضوع در شکل (۴-الف) برای یک بازوی وی-جی-تی با ۲۰ پودمان در یک موقعیت نمونه نشان داده شده است. قاب‌های انتهایی به رنگ آبی نشان داده شده‌اند. از این ویژگی می‌توان برای جلوگیری از برخورد با موانع در حین تعقیب مسیر استفاده کرد.

شکل (۴-ب) کیفیت تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته را نشان می‌دهد. بازوی نمایش داده شده شامل ۱۰ پودمان وی-جی-تی است. مسیر مطلوب برای تعقیب توسط بازو یک خط بنفش رنگ است. جهت‌گیری مطلوب برای محور Y قاب انتهایی در طول این مسیر، عمودی و به سمت بالا است. پنج قاب مربوط به نقاط دقت در این مسیر با خط چین سبز رنگ و فریم انتهایی با خط قرمز نشان داده شده است. این مسیر در چهار مرحله با تغییر در پیکربندی بازو دنبال می‌شود. مسیر طی شده توسط مجری نهایی بازو با منحنی‌های آبی نشان داده شده است. فرض بر این است که سرعت سیلندرها در حین باز یا بسته شدن ثابت می‌ماند. همچنین این سرعت برای تمامی سیلندرها یکسان است. در تعقیب مسیر توسط بازوهای پیوسته، پیکربندی بازو در هر



شکل ۴ الف) پودمان وی-جی-تی، ب) پیکربندی‌های پودمان وی-جی-تی

این شماره‌ها مطابق با شکل (۱-ب) عنوان شده‌اند. بنابراین آنچه گفته شد، یک بازو با چهار پودمان وی-جی-تی می‌تواند $4^4 = 256$ پیکربندی مختلف داشته باشد. هر پیکربندی، فریم انتهایی خود را در مکان خاصی از صفحه خواهد برد. بنابراین فضای کاری این بازو شامل همین تعداد فریم در صفحه خواهد بود. شکل‌های (۳-الف)، (۳-ب)، و (۳-ج) فضای کاری یک بازوی وی-جی-تی را نشان می‌دهد که به ترتیب شامل سه، چهار و پنج پودمان است. در این شکل‌ها طول سیلندرها در حالت کاملاً کشیده (حالت ۱) یک و نیم برابر طول آن‌ها در حالت کاملاً جمع شده (حالت ۰) است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پودمان‌ها، تعداد نقاط فضای کاری به طور نمایی افزایش می‌یابد. همچنین اندازه فضای کاری هم زیاد می‌گردد. اگر بازو بخواهد به یک نقطه دلخواه در محدوده فضای کاری دست پیدا کند، دو حالت مطرح می‌شود: این نقطه یکی از نقاط فضای کاری است یا آنکه بین آن‌ها واقع شده است. در حالت اول از نظر تئوری بازو می‌تواند بدون خطا به آن نقطه دست پیدا کند. اما در حالت دوم، خطا در دستیابی اجتناب ناپذیر است.



شکل ۵ یک بازوی وی-جی-تی چهار پودمانی در پیکربندی ۴۸۳۶

همانطور که قبلاً بحث شد، برای افزایش انعطاف پذیری، جلوگیری از برخورد با موانع، افزایش دسترسی به نقاط و افزایش دقت در تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته، باید تعداد پودمان‌های آن‌ها افزایش یابد. اما با این کار وزن و قیمت آنها افزایش می‌یابد. این یک چالش برای این نوع بازوهاست و باعث می‌شود که بازوهای پیوسته در بیشتر موارد بر بازوهای ناپیوسته ترجیح داده شوند. دلیل دیگری که باعث می‌شود بازوهای ناپیوسته کمتر مورد استفاده قرار گیرند، ضعف آن‌ها در تعقیب مسیر است (همانطور که در شکل (۴-ب) توضیح داده شد). این دلایل باعث می‌شود که استفاده از بازوهای ناپیوسته به موارد خاصی محدود می‌شود. این موارد در بخش بعدی مقاله توضیح داده خواهد شد. برخی از مزایا و معایب بازوهای ناپیوسته در جدول (۱) ارائه شده است.

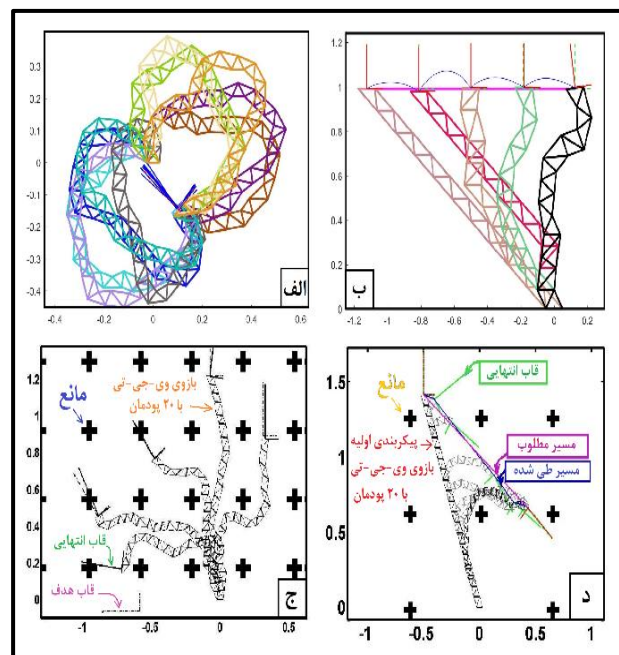
جدول ۱ مزایا و معایب بازوهای ناپیوسته در مقایسه با بازوهای پیوسته

مزایا	معایب
کنترل آسان عملگرهای ناپیوسته بدون نیاز به پسخور دقت بالا و تکرارپذیری عملگرهای ناپیوسته	فضای کاری گسسته است، بنابراین برای افزایش تعداد نقاط دسترسی باید تعداد پودمان‌ها را افزایش داد. این کار باعث افزایش هزینه و وزن بازو می‌شود.
بدلیل عدم نیاز به تجهیزات کنترلی پیچیده، از وزن، حجم و قیمت آن کاسته می‌شود.	تعقیب مسیر معمولاً نمی‌تواند به صورت دقیق انجام شود. بازو از یک نقطه هدف به نقطه هدف بعدی می‌رود و در حین تغییر پیکربندی هیچ امکان ساخت عملگرهای ناپیوسته در ابعاد میلی، میکرو و نانو بهتر از نوع پیوسته است.
نوعی از عملگرهای ناپیوسته به نام عملگرهای دو پایا بعد از تغییر پیکربندی قفل می‌شوند و برای حفظ موقعیت خود در حالت بی حرکت، احتیاج به مصرف انرژی ندارند. این کار مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.	تعقیب مسیر نمی‌تواند با سرعت ثابت انجام شود. زیرا در حین تغییر پیکربندی، هیچ کنترلی روی ربات وجود ندارد. در ضمن تعقیب مسیر به صورت تکه تکه انجام می‌شود و پس از اجرای هر دستور اندکی مکث می‌کند.

همانطور که گفته شد بازوهای ناپیوسته مصارف خاص و محدودی دارند. اما در مقابل امکاناتی فراهم می‌کنند که از عهده نوع مرسوم بازوها خارج است. برای آشنایی با این توانایی‌ها در ادامه مقاله در بخش دوم، تمام نمونه‌هایی که از بازوهای ناپیوسته تا کنون ساخته شده است، مورد به مورد معرفی و بررسی می‌شوند. پس از آن در بخش سوم به جمع بندی و پیشنهاد برای تحقیقات آتی پرداخته می‌شود. در نهایت، منابع ارائه می‌گردد.

۲- معرفی و بررسی نمونه های ساخته شده از بازوهای ناپیوسته

لحظه تحت کنترل است و مسیر طی شده توسط مجری نهایی بازو معمولاً بسیار شبیه به مسیر مطلوب می‌باشد. همچنین مجری نهایی می‌تواند کل مسیر را با سرعت تقریباً ثابتی طی کند. اما در بازوهای ناپیوسته این طور نیست؛ ابتدا دستور یک تغییر پیکربندی اجرا می‌شود و سپس باید به اندازه کافی منتظر شد تا تغییر پیکربندی به طور کامل انجام شود. سپس برای تعقیب ادامه مسیر، یک تغییر پیکربندی جدید باید اجرا شود. بنابراین تعقیب مسیر معمولاً به صورت تکه تکه انجام می‌شود و بین هر تکه از پیمایش مسیر، بازو برای مدتی ثابت می‌ماند. تعداد این تکه‌ها برابر با تعداد نقاط دقت است. انتخاب تعداد و محل نقاط دقت می‌تواند موضوعی برای یک تحقیق باشد. علاوه بر این، در حین تغییر پیکربندی، هیچ کنترلی روی بازو وجود ندارد و مسیر پیموده شده لزوماً به صورت دقیق بر روی مسیر مطلوب منطبق نمی‌گردد (عدم انطباق منحنی پیموده شده آبی رنگ و مسیر مطلوب بنفش رنگ در شکل (۴-ب)). بنابر آنچه گفته شد، بازوهای ناپیوسته برای کارهایی که نیاز به تعقیب مسیر با دقت بالا و سرعت ثابت دارند، مناسب نیستند. به عنوان مثال، رنگ آمیزی پاششی خودرو یا جوشکاری قوس الکتریکی مداوم برای این بازوها مناسب نیست و بهتر است توسط بازوهای پیوسته انجام شود. شکل (۴-ج) توانایی بازوهای ناپیوسته را برای دوری از موانع نشان می‌دهد. شکل (۴-د) توانایی بازوهای ناپیوسته را برای دنبال کردن یک مسیر در یک محیط با مانع نشان می‌دهد.

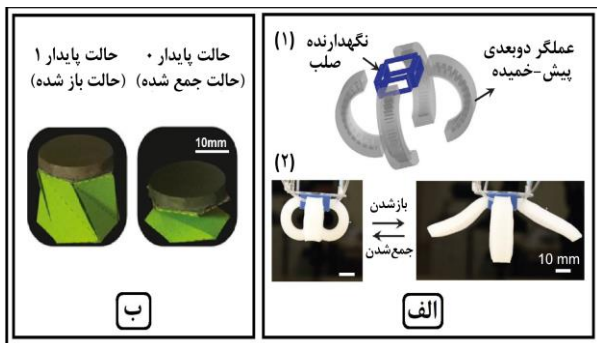


شکل ۴ الف) ۱۰ پیکربندی با موقعیت قاب انتهایی نزدیک به هم مربوط به یک بازوی وی-جی-تی با ۲۰ پودمان، ب) یک نمونه از تعقیب مسیر توسط بازوی وی-جی-تی با ۱۰ پودمان، ج) ۵ نمونه پیکربندی بدون برخورد [۵]، د) یک نمونه از تعقیب مسیر در فضای مانع دار [۶]

از پیش کشیده شده ایجاد می شود؛ این لایه از زیر به یک لایه الاستومری بدون تنش ضخیمتر چسبانده می شود که حاوی کانال های هوا می باشد.

برخی از عملگرهای چند پایا، با کمک از اورینگامی^۵ ایجاد شده اند و در حال توسعه هستند [۵۰-۴۶، ۱۹، ۱۴، ۱۰]. خوانندگان برای اطلاعات بیشتر در مورد عملگرهای چند پایایی که بر اساس اورینگامی ابداع شده اند می توانند به مقاله مروری سان و همکاران [۵۱] مراجعه نمایند.

در شکل (۵-ب)، نمونه ای از یک عملگر دو پایا نمایش داده شده که بر اساس طرح اورینگامی کرسلینگ^۶ ارائه شده است [۴۷]. در این عملگر، از تحریک الکترومغناطیس بدون تماس استفاده می شود. دیسک رویی این عملگر یک آهنربای دائمی است و وقتی در یک میدان مغناطیسی نامسو قرار می گیرد، گشتاور پیچشی به دیواره اعمال کرده و باعث چرخش دیسک و در نتیجه، جمع شدن و یا باز شدن دیواره می شود.



شکل ۵ الف- یک چنگک با چهار عملگر دو پایای نرم بادی [۷]؛
ب- یک عملگر دو حالتی که بر اساس طرح اورینگامی کرسلینگ ساخته شده است [۴۷]

بررسی انواع عملگرهای ناپیوسته به بحث مفصلی احتیاج دارد که خود می تواند موضوع یک مقاله مروری دیگر باشد و در اینجا به همین مقدار بسنده می شود. اما چیزی که موضوع این مقاله است بررسی بازوهای ناپیوسته ای است که تا کنون ساخته شده اند. هدف از این بررسی پاسخ به سوالات زیر می باشد: (۱) زمینه هایی که این نوع بازوها می توانند به کار روند، چیست؟ (۲) ساختار و طراحی این ربات ها چگونه بوده است؟ (۳) این بازوها تا چه حد در انجام وظایف خود موفق هستند؟ (۴) سرعت عمل و قدرت این بازوها و ابعاد و وزن آنها چگونه است؟ پاسخ به این سوالات می تواند راهنمایی برای طراحی های بعد باشد و اطلاع

عملگرهای ناپیوسته امروزه مصارف متنوعی دارند، علاوه بر بازوهای بسیار-افزونه، این عملگرها در چنگک ها^۱ [۷-۱۳]، سوئیچ ها [۱۴]

ربات های پوشیدنی توانبخشی^۲ [۱۵-۱۶]، آینه های متمرکز کننده نور [۱۷-۱۸]، میلی روباتها [۱۹] و میکروروباتها [۲۰-۲۲]، ربات هایی برای هدایت سوزن تشخیص و درمان سرطان پروستات [۲۳-۲۴]، سازه های فعال با چند شکل پایدار [۲۵-۲۶]، ربات برای گذاشتن و برداشتن سریع اشیاء [۲۷] کاربرد دارند. اغلب این عملگرها را می توان در یکی از انواع بادی [۲۷، ۲۶، ۲۴، ۱۶] الکترومغناطیسی [۲۸]، الکتروترمال [۲۲، ۲۰]، مکانیکی [۱۲]، پلیمرهای تحریک پذیر با الکتروسیسته یا دی الکتریک [۲۳-۲۹، ۳۱]، آلیژهای حافظه دار یا اس-ام-ای [۳۲-۳۹] و الکتروموتورها [۱۵، ۴۰-۴۲] قرار داد.

لازم به ذکر است که دسته وسیعی از ربات های نرم^۳ از نوعی از عملگرهای دو حالتی به نام عملگرهای دو پایا^۴ استفاده می کنند [۷-۱۱، ۱۳، ۲۹، ۴۳-۴۴]. عملگرهای دو پایا دو حالت تعادل پایدار دارد. در این عملگرها، معمولاً از یک مکانیزم دو پایا و یک ماده نرم تحریک پذیر استفاده می شود. مکانیزم های دو پایایی مختلفی وجود دارند؛ به عنوان مثال می توان از نوار خمیده فلزی دو پایا نام برد [۷، ۹، ۱۱، ۲۹]. نوار فلزی دو پایا شبیه متر نواری فلزی دارای دو حالت مستقیم و حلقه ای می باشد. مواد نرم تحریک پذیر هم شامل انواع پلیمرهایی هستند که با تحریک الکتریکی [۱۰، ۲۹، ۴۳]، بادی [۷-۹، ۱۱، ۱۳]، مغناطیسی [۴۴] و مانند آن، تغییر شکل می دهند. تغییر شکل ماده نرم پلیمری باعث اعمال نیرو به مکانیزم دو پایا و تغییر وضعیت آن از یک حالت پایدار به حالت پایدار دوم می شود. از این عملگرهای نرم در انواع چنگک های چند انگشتی [۷-۹، ۱۱، ۱۳] و ربات هایی برای خزیدن، دوییدن، پریدن، غلطیدن و شنا کردن [۷، ۱۳، ۴۳] استفاده می شود. برخی از این ربات ها می توانند با سرعت بیش از دو برابر طول خود در ثانیه بدون [۱۳]. خوانندگان برای اطلاعات بیشتر در مورد عملگرهای نرم دو پایا چند پایا می توانند به مقاله چی و همکاران مراجعه نمایند [۴۵].

در شکل (۵-الف) یک نمونه چنگک با چهار انگشت نمایش داده شده که هر انگشت، خود یک عملگر دو پایای نرم است [۷]. این عملگر با تحریک بادی کنترل می شود؛ به این صورت که در حالت بدون باد، بصورت جمع شده و در حالت اعمال باد، بصورت باز شده در می آید. مکانیزم دو پایا بواسطه یک لایه الاستومری

⁴ Bistable actuators

⁵ Origami

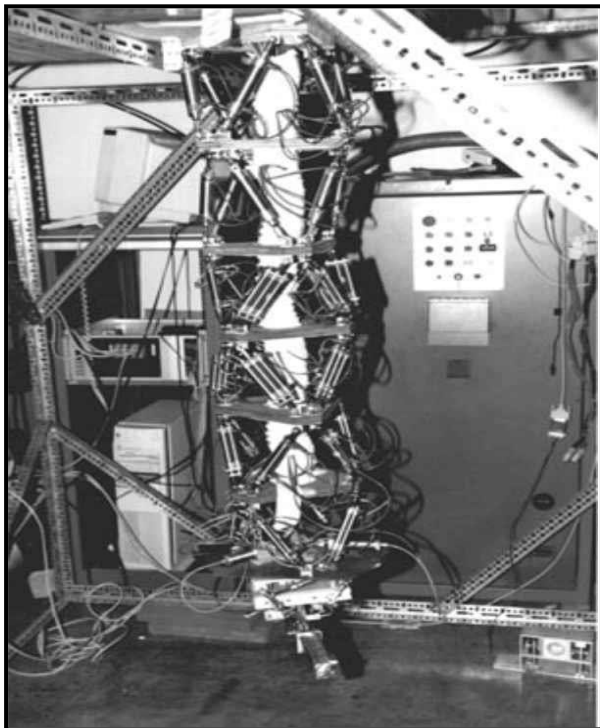
⁶ Kresling pattern-based origami actuators

¹ Grippers

² Exoskeleton Rehabilitation Robots

³ Soft robots

جهت بودند، حرکت سیلندر با سرعت زیادی اتفاق می افتاد. این امر با وجود مکانیزمی که برای کنترل جریان هوا در نظر گرفته بودند اتفاق می افتاد. این مکانیزم شامل مجرای قابل کنترلی^۸ برای عبور هوا بود که بر روی هر شیر برقی^۹ بطور جداگانه نصب می شد. علت اصلی بروز این مشکل، قطر کم سیلندرها در مقایسه با بار استاتیکی وارد بر هر سیلندر بود. علت دیگر آن بود که مجرای کنترل هوا به جای آنکه در مجرای هوای سیلندر قرار بگیرد بر روی شیر برقی نصب شده بود، که به واسطه قابلیت فشرده شدن هوا در شیلنگ های رابط بین سیلندرها و شیر برقی ها، از تاثیر کنترل کنندگی در جریان هوا کاسته می شد. ایبرت-یوفاف و چیریکجیان علاوه بر ساخت بازوی مذکور، مقالات ارزنده ای در ارتباط با محاسبه چگالی فضای کاری بازوهای ناپیوسته بسیار-افزونه و سینماتیک معکوس آنها ارائه کردند [۵۳-۵۶].



شکل ۶ بازوی ایبرت-یوفاف، این بازو شامل شش پودمان از نوع مکانیزم شش پایه ای (استوارت-گاوف) می باشد [۵۲]

۲-۲- بازوی سوتاکن

سوتاکن در جریان رساله دکتری خود به راهنمایی دکتر چیریکجیان در دانشگاه جان هاپکینز در سال ۲۰۰۳، با تکیه بر

از نقاط قوت و ضعف این بازوها می تواند برای طراحان مفید باشد. تاکنون تعداد کمی از انواع بازوهای ناپیوسته، آن هم در مقیاس آزمایشگاهی، ساخته شده اند. این بازوها به شرح زیر هستند: (۱) بازوی ایبرت-یوفاف^۱، (۲) بازوی سوتاکن^۲، (۳) بازوی براید^۳، (۴) بازوی جنیفن و لانتینگن^۴، (۵) بازوی درون بینی اس-ام-ای، (۶) بازوی تیپ^۵ و همکاران، (۷) بازوی مطهری و همکاران. در ادامه به شرح تک تک این موارد پرداخته می شود.

۱-۲- بازوی ایبرت-یوفاف

ایبرت-یوفاف در جریان پایان نامه دکترای خود به راهنمایی دکتر چیریکجیان در دانشگاه جان هاپکینز در سال ۱۹۹۸، یک بازوی ناپیوسته ساخت که شامل شش پودمان استوارت-گاوف^۶ بود [۵۲]. این بازو در شکل (۶) قابل مشاهده است. هر پودمان شامل شش سیلندر نیوماتیکی است که به صورت دو حالتی تحریک می شوند. بنابراین هر پودمان $2^6 = 64$ پیکربندی دارد و از آنجا که بازو شامل شش پودمان است، تعداد پیکربندی های بازو که همان تعداد نقاط فضای کاری است برابر با $6(2^6) = 1010 \times 6/87$ خواهد بود. بیشترین شیب صفحه متحرک یک پودمان نسبت به صفحه پایه آن در پنج پودمان انتهایی $16/2$ درجه و در پودمان پایه $14/5$ درجه است. ارتفاع بازو در حالتی که تمام سیلندرها جمع هستند، $118/5$ سانتی متر می باشد. جنس صفحات میانی^۷، چوبی در نظر گرفته شده اند تا وزن بازو کمتر شود. قیمت تمام شده در حدود ۴۳۰۰ دلار گزارش شده است که به نظر سازنده، قیمت پایینی در مقایسه با انواع بازوهای تحریک پیوسته به حساب می آید.

محدوده حرکتی اندک پودمان های گاوف باعث می شد تا فضای کاری در این بازو به شدت کاهش پیدا کند و این از معایب این بازو به حساب می آید. در آزمایش هایی که بر روی این ربات صورت گرفت ثابت شد که ربات می تواند از هر پیکربندی ای به پیکربندی دیگر برود. البته رفتار ربات در انتقال از یک پیکربندی به پیکربندی دیگر آنچنان که کسی انتظار دارد، نرم و ملایم نبود. این امر بدان سبب بود که سیلندرهایی که تحت بار استاتیکی زیادی بودند با تاخیر در حد چند ثانیه شروع به حرکت می کردند. این تاخیر در برخی موارد به ۸ ثانیه می رسید؛ اما برعکس در سیلندرهایی که بار استاتیکی و جهت حرکت سیلندر در یک

⁶ Stewart-Gough modules

⁷ Platforms

⁸ Orifice

⁹ Solenoid valve

¹ Ebert-Uphoff

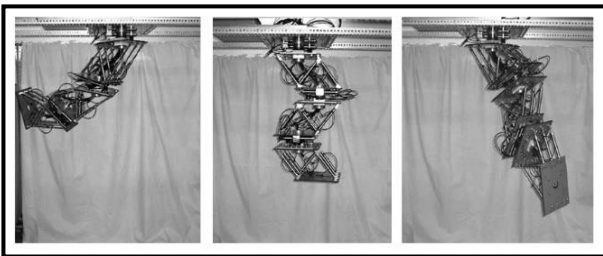
² Suthakorn

³ BRAID

⁴ Jnifene and Lantaigne

⁵ Tappe

قیمت کل بازو ۵۲۰۲/۹۷ دلار شده است. هدف از ساخت این ربات، بررسی نحوه کارکرد این نوع بازو معرفی شده است. آزمایشات بر روی این ربات برای بررسی سه هدف طراحی شدند: تکرار پذیری (قابلیت انجام حرکت صحیح و کامل، به دفعات)، کنترل ارتعاشات در انتهای حرکت و طول زمانی که ربات به فرمان ورودی پاسخ حرکتی می دهد. این آزمایشات به صورت دپداری انجام شده و داده آماری ای در بر نداشته است. آزمایشات نشان دادند استفاده از میراگرهای پر شده از روغن بطور موثری از ارتعاشات (که به واسطه سرعت بالای عملگرها ایجاد می شد) می کاهد. زمان پاسخ و تکرارپذیری وقتی فشار هوای ورودی مناسب باشد، خیلی خوب گزارش شده است؛ اما وقتی فشار هوای تانک کم می شود این دو نیز کاهش پیدا می کنند.



شکل ۷ سه پیکربندی مختلف از بازوی سوتاکن [۵۸]

۲-۳- بازوهای براید

دوبوسکی^۳ و شاگردانش در دانشگاه ام-آی-تی طی سالهای ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶، چند بازوی دوحالته با نام کلی براید^۴ ساختند [۶۰-۶۸]. تفاوت عمده این بازوها در نوع عملگر آنها بود. در اولین نمونه ساخته شده بازوی براید، از عملگر اس-ام-ای استفاده شد [۶۱-۶۲]. دومین نمونه، از عملگرهای الکترومغناطیس بهره گرفت [۶۳]. سومین و چهارمین نمونه هم از عملگرهای الاستومری دی الکترونیک^۵ یا به طور خلاصه عملگرهای دی-ای^۶ استفاده می کرد [۶۴-۶۸]. استفاده از عملگرهای رایج مثل موتورهای دی-سی یا سیلندرهای نیوماتیک و هیدرولیک به خاطر جرم زیاد و پیچیدگی آنها ممکن نبود؛ بنابراین در تمام این بازوها، طراحی عملگرها به طور اختصاصی و با هدف کاهش جرم، پیچیدگی و مصرف انرژی انجام شد. سازه اصلی براید در تمام نمونه ها، شامل یک مکانیزم موازی سه پایه بود که برای کاهش وزن، تماماً از جنس پلاستیک ساخته

تجرباتی که از ساخت بازوی ایبرت-یوفاف بدست آمده بود یک بازوی ناپیوسته جدید ساخت و سعی کرد تا نواقص آن را جبران کند [۵۷-۵۹]. این بازو شامل سه پودمان بود که هر کدام، یک پودمان وی-جی-تی صفحه ای سه بیته دو حالته^۱ بودند. بنابراین هر پودمان $2^3=8$ پیکربندی داشت. اما برای آنکه بازو حرکتی فضایی داشته باشد، بین هر دو پودمان مجاور و همچنین قبل از اولین پودمان، یک مفصل چرخشی ناپیوسته با ۱۶ حالت پایدار قرار داده شد، که قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه هر پودمان را نسبت به پودمان قبلی ایجاد می کرد.

شکل (۷) سه پیکربندی مختلف از این بازو را نمایش می دهد. تعداد پیکربندی های بازو که برابر با تعداد نقاط فضای کاری آن می باشد برابر است با $2/1 \times 10^6 \cong (2^3 \times 16)^3$. سیستم قدرت در این بازو نیز نیوماتیکی بود. سیستم نیوماتیکی به واسطه وزن کم، قیمت پایین و قدرت بالای آن مورد استفاده قرار گرفت. هر پودمان شامل ۹ عملگر بود که سه به سه با هم موازی بودند. هر سه عملگر نیوماتیکی موازی هم به عنوان یک بیت از پودمان به حساب می آمد. عملگر میانی از هر سه عملگر موازی، از روغن پر می شد و به عنوان میراگر عمل می کرد، در حالی که دو تای دیگر، بوسیله فشار هوا و به صورت موازی تحریک می شدند. استفاده از میراگر باعث ایجاد حرکتی نرمتر در هنگام تغییر پیکربندی بازو می شد. این طراحی برای رفع مشکلی در نظر گرفته شد که در بازوی ایبرت-یوفاف دیده شده بود.

بازوی وی-جی-تی از نظر محدوده مجاز برای تغییر زاویه صفحه متحرک، بسیار مناسب بود، چرا که در آن از مفاصل لولایی استفاده می شد. هرچه نسبت طول حداکثر به طول حداقل سیلندرها بیشتر می بود مقدار این زاویه بیشتر می شد؛ بنابراین بیشترین نسبت ممکن برای انتخاب عملگرها مورد استفاده قرار گرفت، که تقریباً برابر ۱/۵ بود.

برای کاهش وزن بازو، صفحات میانی از جنس گارلولایت^۲ که یک نوع فایبرگلاس بود ساخته شدند. علاوه بر سبکی، طول عمر بالا و قابلیت ماشینکاری ساده از دیگر مزایای این جنس بود. بر روی صفحه متحرک انتهایی یک چنگک ساده نصب شد. برای نصب بازو یک قاب طراحی شد و پایه بازو به سقف قاب متصل گردید. همانطور که در شکل (۷) مشخص است، بازو از سقف قاب به صورت وارونه نصب شد. طول بازو در حالت جمع شده ۷۸۸ میلیمتر و در حالت کشیده ۱۱۶۹ میلیمتر می باشد.

⁴ BRAID: Binary Robotic Articulated Integrated Device

⁵ Dielectric Elastomer Actuators (DEAs)

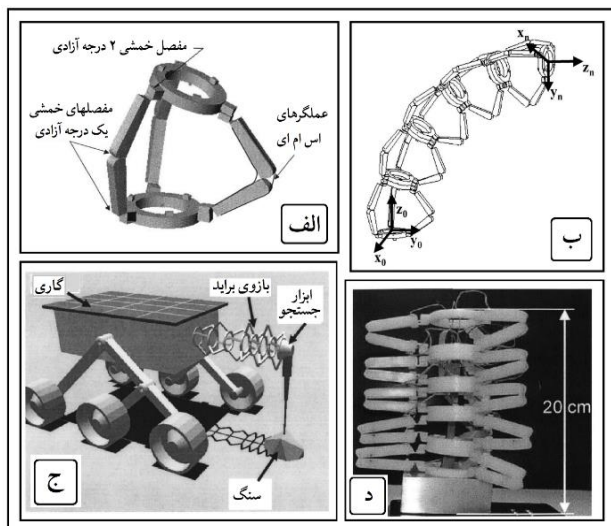
⁶ DE

¹ A 3-bit binary planar VGT module

² Garlolite

³ Dubowsky

معمولی، با باریک کردن میله‌ها در محل مفاصل به صورت یک نوار، از خم شدن این قسمت استفاده می‌شود. در مورد مفصل-های کروی در انتهای پایه‌ها با توجه به اضافی بودن یک درجه آزادی، از مفصل دو درجه آزادی استفاده شده است که خود شامل دو مفصل خمشی مجاور می‌شود.



شکل ۸ بازوی برابرد با عملگرهای اس-ام-ای، الف) مدل یک پودمان از بازو، ب) مدل بازو در یک پیکربندی خاص، ج) کاربرد بالقوه بازو در کاوشگری فضایی، د) بازوی ساخته شده در پیکربندی کاملاً جمع شده [۶۱-۶۲].

۲-۳-۲- بازوی برابرد با عملگرهای الکترومغناطیسی

با توجه به محدودیت‌های بازوی برابرد با عملگرهای اس-ام-ای، از جمله زمان نسبتاً طولانی پاسخ به تحریک و اتلاف زیاد انرژی از طریق حرارت، دوبوسکی و همکاری یک بازوی برابرد با عملگرهای الکترومغناطیسی طراحی کرده و ساختند [۶۳]. یک طرح از این بازو با سه پودمان در شکل (۹-الف) نمایش داده شده است. اما بازویی که ساخته شد، مطابق شکل (۹-ب) دارای دو پودمان مشابه بود که هر کدام یک مکانیزم موازی لولایی-لولایی-کروی سه گانه بود. عملگر الکترومغناطیسی شامل آهنربای دائمی و سیم پیچ خمیده با مقطع مستطیلی بود که می‌توانست مطابق شکل (۹-ج) در دو وضعیت پایدار صفر و یک تحریک شود و روی مفصل لولایی دوم عمل می‌کرد. خمیدگی آهنربا و سیم پیچ برای به حداقل رساندن فاصله هوایی این دو در حین حرکت چرخشی مفصل خمشی مربوطه بود. معیارهای اصلی در طراحی عملگر برای بازوی برابرد، افزایش نیرو، کاهش

می‌شد. هدف از پروژه ساخت بازوی برابرد، ساخت یک بازوی سبک، ارزان و با مصرف انرژی پایین، با وجود تعداد درجات آزادی بالای دو حالت بود، به نحوی که بتوان از آن برای توسعه سیستم‌های رباتیک در کاوش‌های فضایی استفاده کرد. در ادامه هر یک از نمونه‌های ساخته شده برابرد به طور جداگانه معرفی خواهد شد.

۲-۳-۱- بازوی برابرد با عملگرهای اس-ام-ای

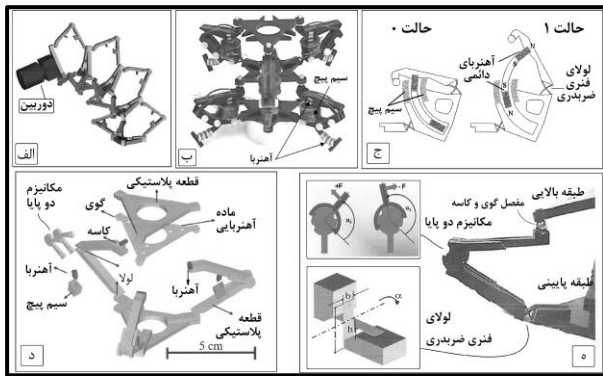
دوبوسکی و همکاریانش، ربات برابرد با عملگرهای اس-ام-ای را در آزمایشگاه رباتیک زمین و فضای دانشگاه ام-آی-تی^۱ ساختند [۶۱-۶۲]. بازوی برابرد (شکل ۸) شامل پنج پودمان بسیار سبک و کوچک از جنس پلی اتیلن^۲ بود و هر پودمان یک مکانیزم موازی لولایی-لولایی-کروی سه گانه^۳ بود. عملگرهای این بازو هم از نوع مرسوم نبودند، بلکه از جنس مواد حافظه دار (سیم اس-ام-ای) ساخته شده بودند که به صورت دو حالت تحریک می‌شدند. برای تحریک، از جریان الکتریسته استفاده می‌شد. اعمال جریان الکتریکی سبب داغ شدن سیم اس-ام-ای و جمع شدن آن می‌شد. سیم اس-ام-ای فقط قادر است در حین تحریک و جمع شدن نیرو اعمال کند، اما در حین بازگشت به طول اولیه پس از قطع جریان و خنک شدن، نمی‌تواند نیرو اعمال کند، چون کماتش در آن ایجاد می‌شود. بنابراین در اینجا از چیزی شبیه ماهیچه‌های متقابل استفاده شد، به این معنی که مطابق شکل (۸-الف)، در مفصل خمشی یک درجه آزادی در میانه هر پایه از یک پودمان، از دو سیم اس-ام-ای استفاده می‌شود؛ وقتی یکی از آنها تحریک می‌شود، دیگری در حالت خاموش است. بنابراین می‌توان نیرو را در هر دو جهت ایجاد کرد. برای باقی ماندن عملگر در حالت جمع شده، احتیاج به جریان مداوم الکتریسته بود و این سبب اتلاف انرژی می‌شد. از عیوب عملگرهای اس-ام-ای، کندی آن‌ها در پاسخ به تحریک الکتریکی، تغییر شکل کم آن‌ها و نیروی کمی بود که می‌توانستند اعمال کنند.

طراحی مفاصل در بازوی برابرد به طور اختصاصی انجام شده است و برای کاهش جرم آنها از هیچ جنس فلزی که در مفاصل معمولی رایج است، استفاده نشده است. مثلاً به جای مفاصل لولایی از مفاصل‌های خمشی استفاده شده است، به این معنی که برای چرخش در محل مفصل، به جای استفاده از یاتاقان‌های

³ 3-RRS

¹ MIT Field and Space Robotics Laboratory

² Polyethylene



شکل ۹ معرفی بازوی برآید با عملگرهای الکترومغناطیسی،

الف) طرحی از بازو با سه پودمان، ب) نمونه ساخته شده بازو با دو پودمان، ج) نمایش نحوه عملکرد عملگر در دو وضعیت صفر و یک، د) مدل انفجاری یک پودمان از بازو، ه) نمایش مکانیزم دو حالت و مفصل خمشی از یک پایه [۶۳]

۲-۳-۳- بازوی برآید با عملگرهای دی-ای سری اول

دوبوسکی و همکارانش پس از ساخت نمونه ای از بازوی دوحالتی برآید با عملگرهای الکترومغناطیسی برای بهبود عملکرد این بازو به سراغ طراحی و ساخت عملگرهای الاستومری دی الکتریک (دی-ای) رفتند [۶۴-۶۶]. آزمایشات نشان می داد که مواد دی-ای به عنوان عملگر، علاوه بر جرم و قیمت کم، کرنش های بالا (در شرایط آزمایشگاهی می توانند تا ۳۸۰٪ کرنش را ایجاد کنند) ولی در عمل این مقدار کمتر خواهد بود) و چگالی انرژی بالاتری نسبت به سایر عملگرهای مرسوم دارند. منظور از چگالی انرژی عملگر، نسبت کار خروجی عملگر در یک سیکل کاری بر واحد جرم عملگر می باشد. بنابراین پتانسیل خوبی برای استفاده به عنوان عملگر در بازوهای بسیار-افزونه دوحالتی دارند. چالش اصلی در مورد طراحی عملگرهای دی-ای، تبدیل این پتانسیل بالا در مورد کرنش و چگالی انرژی به فعل می باشد. بر این اساس چند نوع عملگر دی-ای یکی پس از دیگری توسط دوبوسکی و شاگردانش در دانشگاه ام آی تی طراحی و ساخته شدند. در این قسمت اولین سری از این دسته بررسی می شود.

اساس کار یک عملگر دی-ای در شکل (۱۰-الف) نمایش داده شده است. یک لایه الاستومر دی الکتریک با دو لایه نازک رسانای الکتریکی (الکترودها) در دو سمت پوشش داده می شود. وقتی اختلاف پتانسیل بالا به این الکترودها اعمال می شود، نیروی الکترواستاتیکی بین دو الکترودها ایجاد می شود که در راستای ضخامت لایه الاستومری دی الکتریک، به آن فشار اعمال می کند و باعث انبساط این لایه در راستای سطح می گردد. مشکل در این است که به عنوان یک عملگر، این افزایش سطح

اتلاف انرژی، کاهش حجم و جرم عملگر به صورت همزمان عنوان شده است. هر پودمان مطابق شکل (۹-د) شامل دو صفحه مثلثی شکل در پایین و بالای خود می شکه با سه پایه به هم متصل می شوند. هر پایه شامل دو میله بود که از طریق یک مفصل خمشی^۱ به همراه یک مکانیزم دو پایا به هم وصل می شد. مفصل خمشی و مکانیزم دو پایا در شکل (۹-ه) به وضوح نمایش داده شده اند. مفصل خمشی که مانند مفصل لولایی عمل می کند شامل دو نوار پلاستیکی فنری با عمر خستگی بالا می باشد، که به صورت ضربدری استفاده می شوند. این طراحی، دامنه حرکتی بالا و سفتی قابل قبولی برای جلوگیری از حرکت های خارج از صفحه ایجاد می کند. مکانیزم دو پایا به صورت غیر فعال دو وضعیت پایدار برای مفصل ایجاد می کند. استفاده از مکانیزم های دو پایا مختص به این بازو نمی شود، مثلاً در درب تاشو شامپوها، پایه تاشو دوچرخه ها، سوئیچ های فشاری دو پایا و خودکارهایی که دکمه فشاری در سر خود دارند نیز دیده می شود.

استفاده از مکانیزم دو پایا در بازو مزایای زیادی به همراه دارد؛ باعث می شود بتوان در وضعیت های پایدار، برق عملگر را قطع کرد و مصرف انرژی را از این طریق پایین آورد. این مورد به خصوص در مورد وسایلی که در فضا استفاده می شوند و منبع انرژی محدودی دارند، بسیار مهم است. در ضمن تکرارپذیری و دقت عملگر را بالا می برد.

هر پایه از پایین با یک مفصل خمشی به صفحه پایینی و از بالا با یک مفصل کاسه ساچمه (کروی)^۲ به صفحه بالایی متصل می شود. بنابراین در مجموع هر پایه ۵ درجه آزادی خواهد داشت، که شامل یک درجه آزادی در هر مفصل خمشی و سه درجه آزادی در مفصل کاسه ساچمه است. هر پودمان سه درجه آزادی دو حالتی داشت و در نتیجه می توانست در $2^3 = 8$ پیکربندی مختلف قرارگیرد؛ همچنین بازوی ساخته شده با دو پودمان می توانست $8^2 = 64$ پیکربندی مختلف داشته باشد. محدودیت حرکتی در مفصل خمشی پایینی ± 25 درجه و در مفصل خمشی میانی ± 17 درجه می باشد. محدودیت کج شدن مفصل کاسه ساچمه ± 60 درجه است.

تمام سازه از جمله مفاصل ذکر شده، برای سبکی از یک جنس پلاستیکی به نام دلرین^۳ (پلی اکسی متیلن با ۲۰٪ تفلون^۴) ساخته شده است. جنس دلرین علاوه بر سبکی، استحکام، مقاومت به ضربه و تحمل خستگی بالایی دارد و در ضمن، قابلیت ماشینکاری خوبی هم دارد. نیروی عملگر در حدود ۱/۵ نیوتون و جرم آن ۲۰ گرم بود.

³ Delrin 100

⁴ Polyoxymethylene with 20% teflon

¹ Cross-flexural hinge

² Spherical joint or cone-ball sliding bearing

آمپراژ بسیار پایین) و توان ورودی ۰/۱۶۵ وات است. جدول (۲) برای مقایسه عملگر دی-ای سری اول با عملگر الکترومغناطیس مورد استفاده در بازوی برآید قبلی ارائه شده است.

جدول ۲ مقایسه عملکرد عملگرهای الکترومغناطیسی و دی-ای سری اول ساخته شده برای بازوی برآید [۶۶]

عملگر دی-ای سری اول	عملگر الکترومغناطیس	عملگر
۱/۵ نیوتون	۱/۵ نیوتون	بیشترین نیروی عملگر
۱۵ میلی ژول	۱۵ میلی ژول	کار در هر سیکل
۹/۲ گرم	۲۰ گرم	جرم عملگر
۱/۶ ژول بر کیلوگرم	۰/۸ ژول بر کیلوگرم	کار در هر سیکل بر واحد جرم عملگر
مقایسه تنها بر اساس اجزاء فعال عملگر		
۰/۲ گرم	۱۴ گرم	جرم قسمت‌های فعال عملگر
۷۵ ژول بر کیلوگرم	۱/۱ ژول بر کیلوگرم	کار در هر سیکل بر واحد جرم قسمت‌های فعال عملگر

بر اساس جدول (۲) می‌توان گفت جرم عملگر دی-ای سری اول کمتر از نصف عملگر الکترومغناطیسی است. در هر دو بازو کسر قابل توجهی از جرم مربوط به ساختار نگهدارنده است و سهم قسمت فعال خیلی کمتر است. بازوی برآید ساخته شده با عملگر دی-ای سری اول در شکل (۱۰-د) قابل مشاهده است. این بازو شامل دو پودمان مشابه کاملاً پلاستیکی با مکانیزم موازی لولایی-کشویی-کروی سه گانه و سه درجه آزادی دو حالتی در هر پودمان می‌باشد که در شکل (۱۰-ه) بیشتر قابل تشخیص است. جرم کل بازو ۷۴ گرم و جرم کل عملگرها ۵۸ گرم است. اما جرم قسمت‌های فعال عملگرها شامل لایه های الاستومری و الکترودها روی هم، ۱/۲ گرم است که ۲٪ کل جرم بازو می‌باشد. بنابراین بدون نگرانی از افزایش جرم بازو یا عملگر می‌توان تعداد لایه را افزایش داد. در مورد عملگر الکترومغناطیس اجزای فعال شامل سیم پیچ و آهنربا می‌شود که در یک عملگر ۱۴ گرم جرم دارد در حالی که در یک عملگر دی-ای اجزای فعال ۰/۲ گرم جرم دارد. کار عملگر در هر سیکل بر واحد جرم اجزای فعال آن، در مورد عملگر دی-ای سری اول، حدوداً ۷۰ برابر عملگرهای الکترومغناطیس است. هزینه ساخت بازوی دی-ای چندین برابر کمتر از بازوی الکترومغناطیس گزارش شده است. نیروی تولید شده در عملگرهای دی-ای برای حمل یک

باید اعمال نیرو کرده و بتواند چیزی را جابجا کند؛ اما وقتی لایه الاستومری تحت فشار قرار گیرد به راحتی کماتش می‌کند. برای حل این مشکل دوبوسکی و همکارانش، لایه الاستومری با پوشش الکترودها را با یک پیش-کشش در یک قاب انعطاف پذیر قرار دادند. وقتی ولتاژ به الکترودها اعمال می‌شود، با انبساط این لایه، از نیروی کششی لایه کاسته شده و به اصطلاح لایه کمی شل می‌شود؛ در نتیجه قاب کمی آزاد شده و در راستای فعال خود افزایش طول می‌دهد. در عمل از شروع چروک شدن لایه الاستومری برای تعیین حداکثر ولتاژ تحریک استفاده می‌شود. در نهایت خاموش شدن ولتاژ باعث بازگشت عملگر به طول اولیه می‌شود.

در شکل (۱۰-ب) یک مجموعه دو لایه ای الاستومر و قاب انعطاف پذیر شش ضلعی مهار کننده آن، نمایش داده شده است. وقتی تعداد لایه های الاستومری زیاد می‌شود، نیروی عملگر هم زیادتر می‌شود؛ بنابراین در اینجا از دو لایه به جای یک لایه استفاده شده است. البته با افزایش لایه‌ها باید قاب هم به طور متناسب با آن تقویت شود تا نیروی پیش-کشش مناسب را بتواند ایجاد کند. ضخامت یک تک لایه کشیده شده در قاب، ۰/۱ میلیمتر (مثل ضخامت یک ورق کاغذ) می‌باشد. قاب عملگر، از یک جنس پلاستیکی (رزین استال یا دلرین^۱) یک تکه و شش ضلعی ساخته شده است که به صورت یک مکانیزم حلقه بسته شش میله‌ای عمل می‌کند و مفصل بین این میله‌ها از طریق نازک کردن محل اتصال ایجاد شده است. برای لایه الاستومری در اینجا از یک ماده اکریلیک^۲ به نام وی-اچ-بی ۳۴۹۱۰ که توسط شرکت تری-ام^۳ به عنوان نوار چسب ساخته شده، استفاده شده است. این ماده ارزان و در دسترس است. البته می‌شد از مواد سیلیکونی^۵ هم استفاده کرد. برای الکترودها از پوشش یک لایه رسانا مثل پودر کربن مخلوط شده با گریس نقره (گریس رسانای الکتریکی) می‌توان استفاده کرد. علاوه بر لایه های الاستومری و قاب نگه دارنده، یک مکانیزم غیر فعال دو پایا برای این عملگر طراحی شده است که عملگر را در دو وضعیت پایدار نگه می‌دارد. عملگر ساخته شده در دو وضعیت پایدار خود، در شکل (۱۰-ج) قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود با اعمال ولتاژ طول عملگر در راستای فعال خود از ۱۴ میلیمتر به ۲۲ میلیمتر افزایش پیدا می‌کند. یعنی طول کورس عملگر ۸ میلیمتر و کرنش آن $57\% = 100 \times (14 - 8)$ است. ولتاژ تحریک ۵/۵ کیلو ولت و آمپراژ آن ۰/۰۳ میلی آمپر (ولتاژ بسیار بالا و

⁴ 3M

⁵ Silicones

¹ Acetal resin (Delrin)

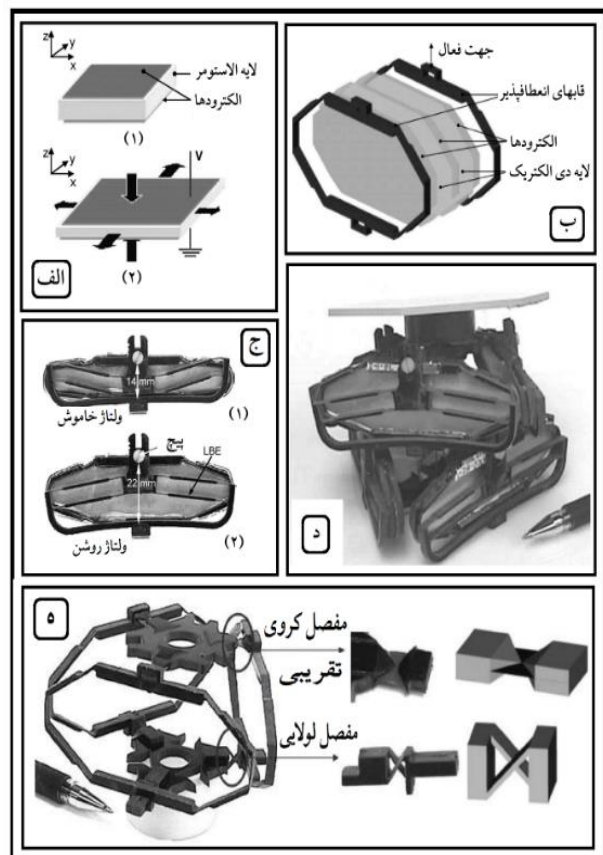
² Acrylic

³ VHB 4910

دوربین کوچک توسط بازو کفایت می‌کند. برای تغییر پیکربندی عملگر دی-ای سری اول، حدوداً ۳ ثانیه زمان لازم است. البته سرعت پاسخ عملگر تا حد زیادی به جنس لایه الاستومری وابسته است. در این عملگر از جنس اکریلیک وی-اچ-بی ۴۹۱۰ به خاطر در دسترس بودن، هزینه کم و عدم حساسیت نسبی به تکنیک‌های ساده ساخت مورد استفاده در آزمایشگاه استفاده شد. در حالی که این جنس به خاطر خاصیت ویسکوالاستیک^۱ متوسطی که دارد سرعت پاسخش محدود است. بسیاری از مواد دی-ای دیگر مثل مواد پایه سیلیکونی، خاصیت ویسکوالاستیکی کمتری دارند و سریعتر به تحریک پاسخ می‌دهند.

عملگرهای دی-ای نسل اول با مشکلاتی مواجه بود که مهمترین آنها خرابی‌های^۲ لایه دی-ای بود که توجیهی برای آن وجود نداشت؛ در نتیجه قابلیت اطمینان به این عملگرها زیاد نبود و عملاً کاربرد آنها را توجیه ناپذیر می‌کرد. در واقع روی مکانیک عملگرهای دی-ای و مکانیزم‌های تخریب آن مطالعه کافی انجام نشده بود؛ بنابراین دبووسکی و همکارانش مطالعات بیشتری در این زمینه انجام دادند و عملگر جدیدی را طراحی کرده و ساختند که مشکلات عملگر نسل قبل را به خصوص در زمینه قابلیت اطمینان نداشت [۶۷-۶۸]. این عملگر در شکل (۱۱-الف) به شکل نمادین در دو حالت بسته و باز نمایش داده شده است. این عملگر شامل سه لایه دی-ای از جنس وی-اچ-بی ۴۹۰۵ بود که ضخامت هر کدام ۰/۵ میلی‌متر بود. همچنین لایه‌ها در یک قاب لوزی شکل از جنس پلاستیک قرار می‌گرفت که به صورت یک مکانیزم چهار میله ای با مفاصل لولایی عمل می‌کرد. لایه‌های دی-ای را قبل از قرار دادن در قاب‌های لوزی شکل، در جهت فعال عملگر، یعنی قطر کوچک لوزی، می‌کشند. علاوه بر این از دو نوار الاستیک برای ایجاد نیروی پیش-بار استفاده می‌شود که در شکل (۱۱-ب) قابل مشاهده است. با وصل کردن ولتاژ بالای الکتریکی (۱۰ کیلو ولت) به الکترودها، این عملگر مطابق شکل (۱۱-ب) در جهت فعال خود، از طول ۱۹ میلی‌متر به طول ۴۱ میلی‌متر تغییر طول میدهد. بنابراین کورس حرکتی آن ۲۲ میلی‌متر خواهد بود و کرنش آن از ۱۰۰٪ فراتر خواهد رفت. نیروی حداکثر عملگر ۳ نیوتون می‌باشد. برای آزمون قابلیت اطمینان و عمر عملگر، از یک عملگر تک لایه ای تحت ۶۰٪ کرنش استفاده کردند و دیده شد که این عملگر ۱۵۰۰۰ بار تحریک را تحمل کرده است. تحقیقات این محققین نشان داد که مود اصلی تخریب در عملگرهای دی-ای به نام مود شکست کششی^۳ است که به شدت به نرخ کشش^۴، که همان سرعت عملگر است، وابسته است. در نرخ‌های کششی بالا، نیروی ویسکوز لایه دی-ای، این لایه را سخت و محکم ساخته و جلو تخریب کششی را می‌گیرد؛ بنابراین در نرخ‌های پایین کشش، عمر و قابلیت اطمینان به شدت پایین می‌آید و برعکس در نرخ‌های بالای کشش عمر و قابلیت اطمینان به عملگر زیاد می‌شود. برای عملکرد دوحالته دقیق و با قابلیت تکرار بالا، بهتر است از مکانیزم‌های دو پایای غیر فعال، به صورت کمکی، استفاده شود. اولین طرحی که دنبال شد، در شکل (۱۱-ج) قابل مشاهده است که با نام عملگر دی-ای متقابل یا دوتایی^۵ معرفی شده که در آن

شکل ۱۰ معرفی بازوی برآید با عملگرهای دی-ای (سری اول)، الف) نمایش اساس عملکرد عملگرهای دی-ای، ب) یک عملگر دو لایه دی-ای با قاب شش ضلعی انعطاف پذیر، ج) عملکرد نمونه ساخته شده عملگر دو حالتی دی-ای به همراه مکانیزم غیر فعال دو پایا، در دو وضعیت پایدار خود، د) نمونه ساخته شده بازوی دو حالتی برآید با عملگرهای دی-ای سری اول، ه) نمایش سازه و مفاصل یک پودمان از بازو [۶۴-۶۶]



شکل ۱۰ معرفی بازوی برآید با عملگرهای دی-ای (سری اول)، الف) نمایش اساس عملکرد عملگرهای دی-ای، ب) یک عملگر دو لایه دی-ای با قاب شش ضلعی انعطاف پذیر، ج) عملکرد نمونه ساخته شده عملگر دو حالتی دی-ای به همراه مکانیزم غیر فعال دو پایا، در دو وضعیت پایدار خود، د) نمونه ساخته شده بازوی دو حالتی برآید با عملگرهای دی-ای سری اول، ه) نمایش سازه و مفاصل یک پودمان از بازو [۶۴-۶۶]

۲-۳-۴- بازوی برآید با عملگرهای دی-ای سری دوم

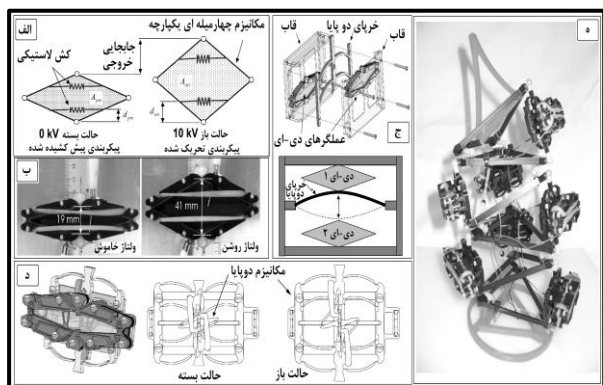
^۱ Stretch rate

^۵ Antagonistic actuators

^۱ Viscoelastic

^۲ Failure

^۳ Pull-in failure



شکل ۱۱ معرفی بازوی برای دو عملگرهای دی-ای سری دوم، (الف) نمایش نمادین عملگر دی-ای نسل دوم در دو حالت بسته و باز، (ب) نمایش عملگر ساخته شده در دو وضعیت ولتاژ خاموش و روشن، (ج) نمایش اجزای عملگر دی-ای دو تایی، (د) نمایش اجزای عملگر دی-ای تکی، (ه) بازوی ساخته شده [۶۷-۶۸]

۴-۲- بازوی جنیفن و لانتینگن

جنیفن و لانتینگن در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸، یک بازوی ناپیوسته با چهار پودمان مشابه ساختند که هر کدام از این پودمان‌ها شامل ۳ عملگر دو حالته اس-ام-ای بود [۶۹-۷۰]. این بازو و اجزای آن در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. وقتی جریان الکتریکی مناسب به یک عملگر اس-ام-ای (شماره ۱ در شکل ۱۲-ج) اعمال می‌شود، دمای آن بالا رفته و در نتیجه تغییر ساختار میکروسکوپی آن از مارتنزیت^۲ به آستنیت^۳، طول آن کاهش پیدا می‌کند. برای برگشت عملگر به طول اولیه در حین خنک شدن از هوای فشرده استفاده می‌شود. این هوای فشرده، توسط پمپ از سوراخ مرکزی پایه بازو به بازو تزریق می‌شود و از طریق لوله‌های تهویه (شماره ۴ در شکل ۱۲-ج) به داخل هر پودمان راه پیدا می‌کند و از سوراخ‌های کناری روی صفحات نگهدارنده (شماره ۳ در شکل ۱۲-ج) باز می‌گردد. این گردش هوا، سبب خنک‌کاری اجباری عملگرها می‌شود که زمان بازگشت عملگرها را به یک سوم کاهش می‌دهد. در ضمن فشار هوای فشرده که در لوله خرطومی‌ها (شماره ۲ در شکل ۱۲-ج) حفظ می‌شود، باعث اعمال نیروی کششی در عملگرها شده که در هنگام خنک شدن آن‌ها را به طول اولیه باز می‌گرداند و بازو را راست نگه می‌دارد.

مشکلی که مواد اس-ام-ای دارند این است که تغییر طولشان کم است. برای حل این مشکل از یک ساختار زیگزاگ مطابق شکل (۱۲-د) استفاده شده است. تغییر شکل در قسمت‌های خمیده با تغییر زاویه ای همراه است که طول کل عملگر را به

از دو عملگر سه لایه لوزی شکل و یک خرابی دو پایا استفاده شده است. در این مجموعه همواره یکی از عملگرها در حالت روشن (تحریک) و دیگری در حالت خاموش می‌باشد. اما جرم این مجموعه زیاد بود (۲۲۰ گرم) و عملاً با نیروی کمی که تولید می‌کرد (حداکثر ۳ نیوتون) برای استفاده در بازوهای ایستاده، که عملگر مجبور است وزن قسمت‌های بالایی بازو را تحمل کند، مناسب نبود. بنابراین برای کاهش جرم، مکانیزم دو حالته دیگری مطابق شکل (۱۱-د) طراحی شد که در آن از یک عملگر سه لایه لوزی شکل و دو خرابی دو پایا استفاده می‌شد. بنابراین جرم این مجموعه به ۱۶/۴ گرم کاهش پیدا کرد. به این مجموعه، عملگر تکی^۱ گفته شده است. لازم به ذکر است که جنس تمام قسمت‌های الحاقی، پلاستیکی بود. جدول (۳) به مقایسه ویژگی‌های عملگر دو تایی و تکی می‌پردازد.

بازوی ساخته شده با عملگر تکی در شکل (۱۱-ه) نمایش داده شده است. این بازو شامل ۷ عملگر تکی و در نتیجه ۷ درجه آزادی دو حالته می‌باشد و مکانیزم طبقات آن با سایر بازوهای برابری متفاوت است. جرم بازو ۱۷۳ گرم و زاویه کج شدن انتهای بازو نسبت به پایه مطابق شکل، بین ۳۵- تا ۲۰+ می‌تواند تغییر کند. این بازو تماماً پلیمری است و می‌تواند برای مداخلات پزشکی کم نیرو (در حد ۵ نیوتون) در داخل محیط‌های تصویر برداری شدیداً مغناطیسی (ام-آر-آی) استفاده شود.

جدول ۳ مقایسه ویژگی‌های دو عملگر دو تایی و تکی [۶۰]

ویژگی	عملگر دو تایی (در سرعت ۱/۶ میلیمتر بر ثانیه)	عملگر تکی (در سرعت ۰/۸ میلیمتر بر ثانیه)
جابجایی (طول کورس)	۲۵ میلیمتر	۱۳ میلیمتر
کرنش	۳۰٪	۳۵٪
نیرو (حداکثر/حداقل)	۳-۱ نیوتون	۳/۵-۱ نیوتون
جرم عملگر	۲۲۰ گرم	۱۶/۴ گرم
نسبت نیرو به وزن	۰/۴۶	۶
کار خروجی بر واحد جرم عملگر	$10^{-4} \times 1/14$ ژول بر گرم	$0/0015$ ژول بر گرم
زمان سوئیچ کردن یا تغییر وضعیت عملگر	تقریباً ۵ ثانیه	تقریباً ۵ ثانیه
اندازه عملگر در حالت جمع شده	$135 \times 81 \times 48$ میلیمتر	$65 \times 35 \times 22$ میلیمتر

³ Austenite

¹ Single actuator

² Martensite

شکل (۱۲-ج)) در عمل قابل مونتاژ نبوده و اصلاً ساخته نشده و نصب هم نشده است. در مجموع، هدف سازندگان برای ساخت بازویی کوچک و سبک با قابلیت مانور بالا تا حدودی موفق شده است، البته همانطور که گفته شد، مشکلاتی هم وجود دارد.

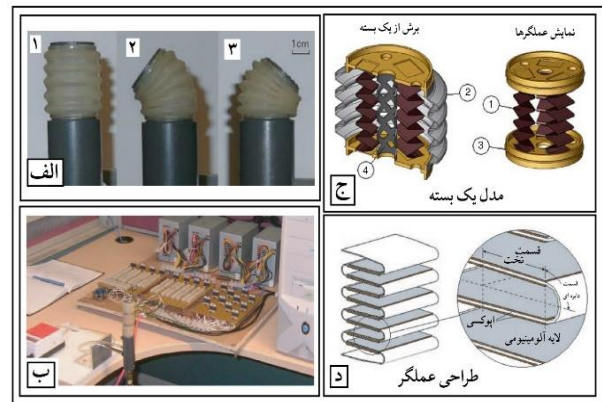
۲-۵- بازوی درون بینی اس-ام-ای

زوراکلفدراکیس و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک بازوی هشت پودمانی دوحالته ساختند (شکل ۱۳) [۷۱-۷۲]. آن‌ها برای کاهش وزن و قطر بازو، از سیم‌هایی با جنس اس-ام-ای (نایتینول^۱) به جای عملگرهای کشویی معمولی استفاده کردند. این سیم‌ها با اعمال جریان الکتریکی، داغ شده و تا حدی جمع می‌شدند و بعد از قطع جریان، با خنک شدن دوباره به طول اولیه بر می‌گشتند. البته این فرآیند چند ثانیه طول می‌کشد که از عیوب این بازو به حساب می‌آید. هر پودمان شامل سه سیم اس-ام-ای و یک فنر فولادی برای برگرداندن سیم‌ها به طول اولیه در حین خنک شدن بود. هر پودمان طوری طراحی شده بود که به صورت یک مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه گانه کار می‌کرد که سیم‌های اس-ام-ای بعنوان پایه‌های این مکانیزم بود و یک فنر آنها را احاطه می‌کرد.

مطابق شکل (۱۳)، هر مکانیزم توسط یک میله استوانه‌ای به مکانیزم بعدی متصل می‌شود. این میله با روش نمونه سازی سریع و از جنس پلاستیک ساخته شده و توخالی می‌باشد، تا سیم‌های الکتریکی و دیگر موارد از داخل آن عبور کند و علاوه بر آن یک تراشه کنترل کننده پودمان، داخل آن قرار بگیرد. قطر میله‌ها (قطر بازو) ۲۰ میلی‌متر و طول آن ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. طول کلی بازو ۲۵۰ میلی‌متر و وزن آن ۸۰ گرم می‌باشد. وزن هر پودمان به تنهایی ۱۰ گرم است. زاویه خم شدن پودمان‌ها ۸ درجه است. بازو علاوه بر وزن خود، قادر به حمل ۱۰۰ گرم بار اضافی خارجی متصل به انتهای بازو را دارد.

استفاده از عملگرهای اس-ام-ای مزایا و محدودیت‌هایی به همراه دارد که قبل از انتخاب این نوع عملگرها حتماً باید مد نظر قرار گیرد. از جمله مزایای این نوع عملگرها به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: قیمت کم، اندازه و وزن فوق العاده کم، عملیات بی سر و صدا، تحریک آسان (تنها با اعمال جریان الکتریکی پایین)، نسبت قدرت به وزن بالا، سازگاری با محیط و مقاومت در برابر خوردگی. این مجموعه مزایا آن‌ها را برای استفاده در ابعاد کوچک مناسب می‌سازد و دو عامل آخری برای استفاده در داخل بدن،

مقدار زیادی تغییر می‌دهد. طول کشیده عملگرها ۳۰ میلی‌متر و در حین تحریک کامل به ۱۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد یعنی کورس عملگر ۴۰٪ طول اولیه آن می‌باشد. برای این عملگر از یک نوار از جنس اس-ام-ای با ضخامت ۷۰ میکرون متر و عرض ۷ میلی‌متر استفاده شده که در جریان ۲/۹ آمپری حدوداً ۱۰ ثانیه طول می‌کشد تا کاملاً جمع شود و نیرویی معادل ۳/۸ نیوتون در دمای بالای ۸۵ درجه سانتی‌گراد تولید کند. برای سرد شدن و برگشت به طول اولیه یعنی ۳۰ میلی‌متر در هوای ساکن ۵۰ ثانیه طول می‌کشد، اما در شرایط جریان هوای فشرده بازو این زمان به ۲۰ ثانیه تقلیل می‌یابد. فرکانس کاری عملگرهای این بازو ۰/۰۴۶ هرتز اعلام شده است. قطر صفحات نگهدارنده ۲۰ میلی‌متر و حداکثر قطر خارجی خرطوم‌ها ۲۸ میلی‌متر، وزن یک پودمان ۴/۵ گرم، فشار هوای فشرده ۲۲ کیلو پاسکال و بار قابل حمل توسط بازو ۶۲/۳ گرم اعلام شده است.



شکل ۱۲ بازوی جنیفن و لانتینگن، الف- سه پیکربندی از یک پودمان، ب- بازوی ساخته شده در حال کار، ج- نمایش اجزای یک پودمان، د- نمایش یک عملگر اس-ام-ای [۶۹-۷۰]

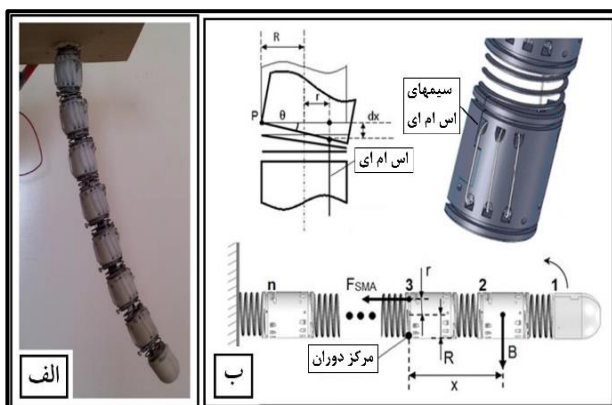
در شکل (۱۲-الف) سه پیکربندی مختلف یک پودمان نمایش داده شده است. در قسمت ۱، تمام عملگرها غیر فعال و در طول حداکثر خود هستند. در قسمت ۲، یکی از عملگرها فعال شده است که باعث کج شدن صفحه نگهدارنده در زاویه ۵۳ درجه شده است. در قسمت ۳، دو عملگر فعال شده اند و زاویه کج شدن ۴۲ درجه می‌باشد. اما حالتی که هر سه عملگر فعال شده اند با موفقیت اجرا نشده و نمایش داده نشده است. وقتی هر سه عملگر فعال شده اند به خاطر حرارت بالا چسب اپوکسی اتصال دهنده عملگرها به صفحه نگهدارنده جدا شده است. در ضمن تصویری که از بازو نمایش داده شده سه پودمانی است نه چهار پودمانی. همچنین اعلام شده که لوله تهویه (شماره ۴ در

¹ Nitinol wires

کاست. برای این کار هر سیم اس-ام-ای را از داخل یک تیوب نایلونی عبور داده می شود.

انتخاب قطر سیم بر اساس حداکثر نیروی لازم در عملگر انجام می شود. سیم‌های قطورتر نیروی بیشتری هم می توانند ایجاد کنند؛ اما مشکلی هم وجود دارد: وقتی سیم قطور می شود در حین پیچش طول اضافی داخل سوراخ های میله، خم می-خورد و گیر می کند. برای حل این مشکل از دو سیم نازکتر به جای یک سیم قطورتر استفاده شده است.

نکته مهم دیگر در مورد عملگرهای اس-ام-ای این است که قابلیت تکرارپذیری دارند یا خیر. به این معنی که اگر یک عملگر را چندین بار تحریک کامل و سپس کاملاً سرد کنیم، در هر بار رفتار مشابهی را نشان می دهد یا خیر. مثلاً اگر در بار نخست، عملگر در تحریک کامل ۸ درجه خم شد، در بار دوم و سوم و بیشتر هم همان ۸ درجه خم می شود یا خیر. با آزمایشاتی که بر روی بازو انجام شده، از این بابت اطمینان داده شده است که بازو از نظر تکرارپذیری خوب عمل می کند.



شکل ۱۳ الف- بازوی ناپیوسته درون بینی اس-ام-ای، ب- نمایش ساختار این بازو [۷۱-۷۲]

۲-۶- بازوی ناپیوسته تیپ و همکاران

تیپ و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹، یک بازوی ناپیوسته مارگونه ۱۰ پودمانی ساختند که با نیروی الکترومغناطیس کار میکرد (شکل ۱۴) [۷۳-۷۸]. هر پودمان در واقع یک عملگر چرخشی دو حالته با یک درجه آزادی بود که با نیروی الکترومغناطیس کار می کرد. هر عملگر، مطابق شکل (۱۴-ب) شامل چهار نیم حلقه از جنس فرومغناطیس^۴ بود که با یک لولای آلومینیومی به هم متصل می شدند. انتخاب جنس

مثلاً به عنوان بازوی رباتیک درون بینی، مناسب می باشد. اما محدودیت های این نوع عملگرها به ترتیب زیر هستند: بازده پایین (کمتر از ۱۰٪)، کورس حرکتی پایین (میزان کاهش طول یک عملگر اس-ام-ای در تحریک کامل، در حدود ۳٪ از طول اولیه آن می باشد)، ناتوانی تحریک با فرکانس بالا (به این معنی که برای آنکه بتوان یک عملگر را دوباره تحریک کرد باید به آن فرصت داد تا خنک شده و به طول اولیه برگردد که به آن زمان سرد شدن^۱ می گویند؛ علاوه بر آن در حین تحریک، برای رسیدن سیم اس-ام-ای به دمای گذار^۲، به آن جریان الکتریکی اعمال میشود و سیم در اثر مقاومت الکتریکی خود داغ می شود و در نتیجه به خاطر خواص ذاتی ماده اس-ام-ای شروع به جمع شدن می کند. زمان لازم برای جمع شدن عملگر^۳، بسته به قطر سیم و جریان اعمالی و بار وارده متفاوت است)، کنترل مشکل عملگرهای اس-ام-ای به خاطر غیرخطی بودن شدید اثر حافظه داری این مواد (البته در تحریک دو حالته این مشکل وجود ندارد چون یا عملگر خاموش است یا در تحریک کامل).

دمای گذار در سیم مورد استفاده ۹۰ درجه سانتیگراد و زمان رسیدن به دمای گذار، یک ثانیه در نظر گرفته شده و جریان تحریک بر این اساس محاسبه گردیده است. اما زمان جمع شدن عملگرها در آزمایشاتی که بر روی بازو انجام شده است، بسته به میزان بار، بین ۳/۵ تا ۷ ثانیه اعلام شده است. اما زمان خنک شدن عملگر از این هم بیشتر است چون خنک شدن از طریق هوای اطراف انجام می شود. برای کاهش این زمان پیشنهاد شده است که از خنک کاری اجباری، مثلاً از طریق یک تیوب حاوی سیال خنک کننده که از داخل بازو می گذرد، استفاده کرد. در مجموع زمان نسبتاً زیاد لازم برای سیکل تحریک و خنک کاری عملگر یکی از مشکلات کار با این نوع عملگرها می باشد که باید مد نظر قرار گیرد.

محدودیت دیگری که اشاره شد، کورس کم جمع شدن سیم اس-ام-ای است. در بازوی ارائه شده، برای آنکه یک پودمان بتواند ۸ درجه خم شود، طول عملگر باید ۲/۲۴ میلیمتر کوتاه شود. با توجه به کورس ۳٪ که اشاره شد، طول سیم باید ۷۴/۷ میلیمتر باشد که از طول فنر (۱۰ میلیمتر) و طول میله استوانه ای (۲۰ میلیمتر) بیشتر است.

برای رفع این مشکل، سوراخ‌هایی در دیواره میله تعبیه شده که اضافی سیم دور آن بیچد. اما برای آنکه طول سیم بتواند کم و زیاد شود باید از اصطکاک آن در تماس با سوراخ و دیواره میله

³ Rise time

⁴ Ferromagnetic material

¹ Cooling (descent) time

² Transition temperature

مراحل بصورت برخط انجام شود و در ثانی کنترل بازو باید بصورت بصری و کاربر پسند^۴ انجام شود و در نهایت تعقیب مسیر بدون اعمال فشار به دیواره محیط اطراف و ایجاد جراحات انجام شود. لازم به یادآوری است که حرکت بازو درون حفره، ناشی از دو حرکت مجزا می باشد: اول، تغییر پیکربندی بازو و دوم، حرکت تغذیه یا پیشروی که از سر بازو و بصورت خودکار اعمال می شود^۴. سازندگان این بازو، برای تعقیب مسیر از روش پیروی از سر بازو^۵ استفاده کردند که تمام ویژگی های گفته شده را دارد [۷۶، ۷۴]. برای آنکه تعقیب مسیر با کمترین انحراف از مسیر انجام شود، سنتر پارامترهای سینماتیکی بر روی این بازو انجام گرفته است.

این پارامترها شامل ارتفاع عملگرها، زاویه کج شدن و زاویه پیچش می باشد. همچنین تاثیر این پارامترها بر فضای کاری و شعاع انحنای بازو مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد فضای کاری، هر چه حجم فضای کاری و چگالی نقاط در آن بیشتر باشد، بهتر است. بیشتر بودن چگالی نقاط قابل دسترسی در محدوده فضای کاری به معنی کم شدن فاصله این نقاط می باشد که باعث می شود دسترسی بازو به یک هدف دلخواه در محدوده فضای کاری با خطای کمتری قابل انجام باشد. به عنوان مثال وقتی زاویه کج شدن عملگرها بیشتر می شود، حجم فضای کاری افزایش پیدا می کند، اما چگالی فضای کاری کم می شود. علاوه بر فضای کاری، حداقل شعاع انحنای قابل حصول توسط بازو هم از عوامل مهم تاثیرگذار بر کارایی بازو می باشد. هر چه این شعاع کمتر باشد یا به عبارت دیگر هر چه بازو بتواند بیشتر خم شود، بهتر می تواند بر روی مسیرهای منحنی شکل مختلف بنشیند^۶ و در نتیجه، تعقیب مسیر هم با انحراف کمتری از مسیر قابل انجام خواهد بود. هر چه ارتفاع عملگر کمتر باشد و یا زاویه کج شدن بیشتر گردد، شعاع انحنای بازو هم کمتر خواهد بود [۷۳].

تیپ و همکاریانش علاوه بر مسائلی که مطرح شد، یک مدل دینامیکی از بازو ارائه کردند [۷۵]. برای بررسی دینامیک بازو ابتدا لازم بود تا رابطه ای برای پیش بینی مقدار گشتاور تولیدی در اثر تحریک الکترومغناطیسی معین شود. بنابراین، عوامل موثر بر گشتاور تولید شده در یک عملگر را مورد بررسی قرار گرفت و با ساده سازی، ارتباط بین گشتاور، جریان سیم پیچ و زاویه کج شدن عملگر پیشبینی گردید. در نهایت موارد پیش بینی شده با آزمایش عملی بر روی بازو، مورد صحت گذاری قرار گرفت.

آلومینیومی به منظور جداسازی مغناطیسی نیم حلقه ها بود. برای ایجاد مدار مغناطیسی در هر نیم حلقه، از یک سیم پیچ الکتریکی استفاده شده که به دور یک هسته فولادی بسته شده است. مدل یک عملگر و کل بازو بصورت مونتاژ شده، در شکل (۱۴-ج) قابل مشاهده است.

مشخصات هندسی عملگرها به این صورت است: ارتفاع هر عملگر ۱۶ میلیمتر، قطر عملگر ۴۵ میلیمتر و حداکثر زاویه کج شدن عملگر به طرفین یا به طور خلاصه، زاویه کج شدن 6 ± 1 درجه. محور چرخش هر عملگر نسبت به عملگر قبلی ۹۰ درجه حول محور بازو می چرخید تا فضای کاری بازو بیشترین پوشش فضایی را ایجاد کند. به این زاویه بطور خلاصه، زاویه پیچش^۲ گفته می شود. فضای کاری این بازو شامل $10.24 = 210$ نقطه در فضا می باشد. هدف طراحی و ساخت این نمونه، استفاده به عنوان یک سیستم رباتیک درون بینی معرفی شده است [۷۷-۷۸].

سیستم های معمول درون بینی شامل یک لوله انعطاف پذیر و غیر فعال هستند که وظیفه پیشروی و تصویر برداری داخل بدن را بر عهده دارند؛ البته نمونه هایی هم برای بازرسی فنی در داخل دستگاه هایی مثل موتور جت و لوله به منظور تشخیص زود هنگام خرابی ها وجود دارد. این سیستم ها در حین پیشروی تمایل دارند در اثر نیروهای وارده حلقه بزنند و با تکیه بر دیواره محیط اطراف، به آن نیرو وارد کنند که با درد و ایجاد جراحات در فرد بیمار همراه خواهد بود. استفاده از سیستم فعال رباتیک برای رفع این مشکلات پیشنهاد شده است. وظیفه یک سیستم رباتیک درون بینی آن است که بتواند با قابلیت خوب تعقیب مسیر و مقاومت در برابر نیروهای اعمالی، کار جستجو و تصویر برداری در محیط خواسته شده را انجام دهد.

برای جلوگیری از ایجاد خراش و گاز گرفتگی در اندام، یک غلاف سیلیکونی برای پوشاندن بدنه بازو طراحی و ساخته شده است. این غلاف نباید جلو حرکت و آزادی عمل بازو را بگیرد؛ همچنین در کشیده و فشرده شدن های متوالی که در حرکت بازو اجتناب ناپذیر است، خاصیت کشسانی خود را حفظ کند. برای ضبط و ذخیره حرکات بازو، حسگرهایی به این غلاف اضافه شده است و تشخیص پیکربندی عملگرها از طریق حسگرهای روی غلاف انجام می گیرد؛ البته در خود بازو از هیچ حسگری استفاده نشده و کنترل بازو، بدون پسخور صورت می گیرد.

یکی از وظایف سیستم های درون بینی، تعقیب مسیر است. تعقیب مسیر در عمل باید به شیوه ای انجام شود که اولاً تمام

⁴ Automatic feed motion

⁵ Follow-the-leader

⁶ Curve fitting

¹ Tilting angle

² Twisting angle

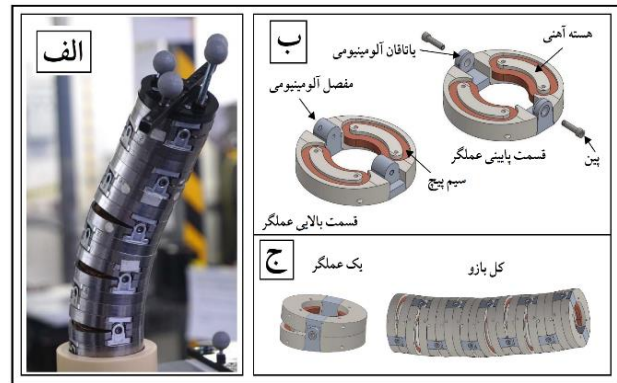
³ User friendly

سیلندرها به صفحه متحرک و صفحه پایه در هر پودمان، گوشه-های مثلثی متساوی الاضلاع به اضلاع ۱۷۳ میلیمتر بود.

در ساخت صفحات مذکور، برای سبکی و استحکام مناسب، از جنس آلومینیوم استفاده شد. برای جلوگیری از تکان خوردن پایه بازو یا افتادن آن در حین تغییر پیکربندی، پایه بازو به یک چهارپایه سنگین و بزرگ با طول و عرض ۸۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۴۰۰ میلیمتر پیچ شده است. تجهیزات نیوماتیک و الکترونیک کنترل کننده در یک سینی فلزی در زیر میز قرار دارند. برای فرمان دادن به هر سیلندر، از یک شیر برقی استفاده می شود که باد را به از مجراهای بالا یا پایین سیلندر وصل میکند و فشار باد تا وقتی فرمان جدیدی اجرا نشود، حفظ خواهد شد. شیرهای برقی، که ۹ عدد هستند و هر کدام به یک سیلندر مرتبط میباشند، از یک پی-ال-سی^۲ با ۱۶ خروجی دیجیتال فرمان می-گیرد و خود پی-ال-سی هم از رایانه دستور می گیرد. برای ثبت حرکات بازو برای تحقیقات، به هر سیلندر یک خط کش اهمی متصل شده است (شکل ۱۵-ب). طول سیلندرها در هر لحظه توسط خط کش‌های متصل به آنها اندازه گیری شده و به رایانه فرستاده می شود و از طریق محاسبات سینماتیکی مختصات کل ربات در هر لحظه قابل رصد خواهد بود.

آزمایشات اولیه بر روی بازو مشکلاتی را نشان داد. تغییر پیکربندی بازو بصورت نرم و یکنواخت انجام نمی شد و با تاخیر زمانی همراه بود. سرعت بازو یا بسته شدن سیلندرها ثابت نبود. بخصوص در مواردی که بازو از حالت خم شده به یک سمت می خواست به سمت دیگری خم شود، سرعت برخی سیلندرها به یکباره زیاد میشد. برای حل این مشکل، از شیرهای کنترل جریان^۳ بر روی مجراهای ورودی و خروجی تمام سیلندرها بازو، استفاده شد. این شیرها یک پیچ تنظیم داشتند که با آن مجرای عبور هوا تنگ یا گشاد می شد. با تنگ کردن مجرای عبور هوا در ورودی و خروجی سیلندر، سرعت بازو بسته شدن سیلندر یکنواخت تر می شد. البته اگر مجرا خیلی تنگ می شد سرعت حرکت سیلندر کم شده و حتی ممکن بود به صفر برسد.

دو آزمایش بر روی بازو انجام گرفت: اول بررسی سرعت حرکت سیلندرها بازو در حین دو تغییر پیکربندی متفاوت، و دومی بررسی نحوه تعقیب مسیر بر روی یک مسیر مستقیم با تعداد نقاط دقت مختلف. آزمایشات نشان داد بازو می تواند در حالت بدون بار تمام تغییر پیکربندی هایی که به آن فرمان داده می شود را به نحو مطلوبی انجام دهد. برای تغییر در پیکربندی‌های



شکل ۱۴ الف- بازوی ناپیوسته تیپ و همکاران، ب- مدل دو نیمه از یک عملگر، ج- مدل یک عملگر و کل بازو [۷۷-۷۸]

۲-۷- بازوی مطهری و همکاران

مطهری و همکارانش در سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ با هدف بررسی نحوه حرکت و تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته اقدام به طراحی و ساخت یک بازوی ناپیوسته شامل سه پودمان مشابه لولایی-کشویی-کروی سه گانه کردند که پایه‌های آن شامل یک سیلندر بادی با تحریک دوحالته بود [۷۹،۶]. بنابراین هر پودمان، هشت پیکربندی مختلف داشت که با ترکیب این حالات برای سه پودمان، $8^3 = 512$ پیکربندی مختلف برای بازو وجود داشت. این بازو در شکل (۱۵-الف) قابل مشاهده است. در شکل (۱۵-ب) یک پایه از یک پودمان نمایش داده شده است. به جای مفصل کروی در اینجا از مفصل چهارشاخه^۱ استفاده شده است، چراکه نیازی به درجه آزادی سوم در این مفصل وجود ندارد. به عبارت دیگر، با توجه به جهت گیری خاصی که محور لولاها روی صفحه پایه نسبت به هم دارند، صفحه متحرک هر پودمان حول محور عمود بر خودش، چرخشی نخواهد داشت.

مفصل‌های چهارشاخه موجود در بازار تحت زاویه بیشتری نسبت به مفاصل کروی می توانند کج بشوند و از این طریق فضای کاری وسیعتری را میتوانند ایجاد کنند، بنابراین به مفاصل کروی ترجیح داده می شوند. زاویه خم شدن صفحه متحرک نسبت به صفحه ثابت در هر پودمان حداکثر ۳۲ درجه است، بنابراین کل بازو میتواند $96 = 3 \times 32$ درجه خم شود (شکل ۱۵-الف). تمام ۹ سیلندر بازو با قطر داخلی ۲۵ میلیمتر و طول کورس ۸۰ میلیمتر هستند. طول جمع شده آن‌ها ۲۲۰ میلیمتر و طول باز شده ۳۰۰ میلیمتر میباشد، بنابراین حداقل طول بازو ۶۶۰ میلیمتر و حداکثر آن ۹۰۰ میلیمتر میباشد. محل اتصال

³ Flow control valves

¹ Universal joint

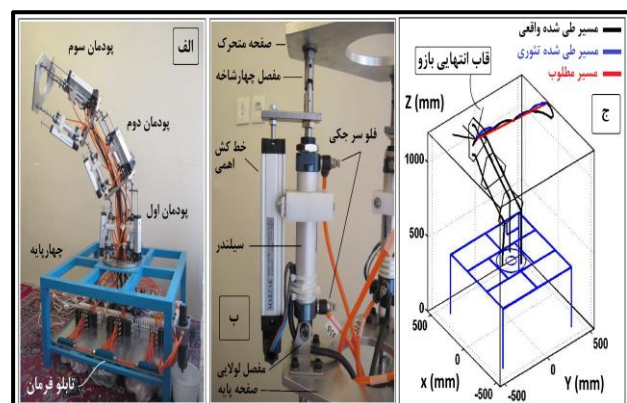
² PLC

نوع پیوسته ترجیح داده می شود. این به خاطر چالش‌هایی است که در استفاده از تحریک ناپیوسته وجود دارد. با افزایش تعداد پودمان‌ها، بازوهای ناپیوسته مانند نوع پیوسته دارای فضای کاری وسیع و قابلیت دوری از موانع خواهند بود. در عین حال عملگرهای ناپیوسته معمولاً از نوع پیوسته ارزانتر هستند و کنترل ساده‌تری دارند، همچنین دقت حرکتی و تکرار پذیری بالایی دارند. بازوهای ناپیوسته تنها قابلیت قرارگیری در پیکربندی‌های محدودی را دارند، اما تعداد این پیکربندی‌ها با افزایش تعداد پودمان‌ها بصورت نمایی رشد کرده و تعداد زیادی خواهد شد. بنابراین می توان انتظار داشت که بازو با دقت قابل قبولی به هر نقطه که در محدوده فضای کاریش باشد دسترسی پیدا کند. اما از طرف دیگر، افزایش تعداد پودمان‌ها باعث می شود هزینه و وزن بازو زیاد شود. مشکل مهمتر در مورد بازوهای ناپیوسته، کیفیت تعقیب مسیر در آن‌ها است. وقتی به بازو فرمان داده می شود که از یک پیکربندی به پیکربندی دیگری برود، نحوه این تغییر در بین مسیر قابل کنترل نیست، چون عملگرها پیوسته نیستند. بنابراین نمی توان مسیر حرکت را در بین دو پیکربندی مذکور کنترل کرد. بنابراین، تعقیب مسیر به صورت نقطه به نقطه صورت می‌گیرد. دو مشکل در اینجا بروز می کند، اولاً مسیر طی شده بین نقاط لزوماً روی مسیر مطلوب نمی افتد، در ثانی بین هر تکه از تعقیب مسیر یک مکس وجود دارد. بنابراین سرعت طی مسیر یکنواخت نیست و با وقفه‌های همراه است و در ضمن مسیر بصورت دقیق دنبال نمی شود. این ویژگی بازوهای ناپیوسته نقصان اجتناب ناپذیری نسبت به عملگرهای پیوسته محسوب می شود که کاربرد آن‌ها را محدود می کند. اما در بسیاری از وظایف ربات‌ها، دقت در مسیر حرکت اهمیت چندانی ندارد و فقط دقت نقاط ابتدایی و انتهایی مهم هستند؛ مثلاً گذاشتن و برداشتن اشیاء اینگونه است و می توان از یک بازوی ناپیوسته برای این نوع وظایف استفاده کرد. بازوهای ناپیوسته در عمل خیلی مورد توجه قرار نگرفته اند و تنها چند نمونه از آن‌ها ساخته شده است که در این مقاله مورد بررسی اجمالی قرار گرفت. اکثر این موارد هم فقط با هدف تحقیقات دانشگاهی ساخته شده‌اند. تنها چند مورد در سال‌های اخیر با هدف کاربردهای پزشکی و درون بینی در مرحله تحقیقاتی ساخته شده اند.

جدول (۴)، یک جمع بندی از ویژگی‌های بازوهای ناپیوسته مطرح شده در این مقاله را ارائه می کند. آنچه در طراحی این بازوها مشهود است، استفاده از ویژگی عملگرهای ناپیوسته (که عمدتاً از نوع دو حالت هستند) برای ساخت بازوهایی سبک، ساده، کوچک، ارزان، با کنترل ساده و مصرف انرژی پایین است.

مختلف، کمتر از ۴ ثانیه زمان اعلام شده است. اما برای حالت حمل بار، گزارشی ارائه نشده است. تجربه نشان داد که برای رسیدن به سرعت‌های ثابت باید مجرای هوای سیلندر تنگ شود، که باعث ایجاد تاخیر و یا گاهی توقف حرکت سیلندر در بارهای سنگین می شد. برای کاهش این مشکل بهتر است از سیلندرهایی با قطر بیشتر از آنچه برای حمل بار لازم است، استفاده شود. همچنین برای پودمان‌های نزدیک به پایه بازو، که بار بیشتری نسبت به پودمان‌های انتهایی تحمل می کنند از سیلندرهایی قطورتری استفاده شود.

در آزمون دوم، برای تعقیب یک مسیر مشخص، ابتدا تعداد و مکان نقاط دقت تعیین می شد، سپس نرم افزار، چند پیکربندی (به تعداد نقاط دقت) با کمترین خطای ممکن را مشخص می کرد. سپس این پیکربندی‌ها، یکی پس از دیگری با فواصل زمانی کافی (زمان لازم برای اجرای حرکت) به بازو فرمان داده می شد. در شکل (۱۵-ج) نتیجه یک آزمون با پنج نقطه دقت نمایش داده شده است. مسیر مطلوب یک خط است که با رنگ قرمز نمایش داده شده. مسیری که در عمل مجری نهایی طی کرده، به کمک داده‌هایی که خط کش‌های اهمی اندازه گیری کرده اند، مشخص می شود. این مسیر با رنگ سیاه نمایش داده شده است. منحنی آبی رنگ با این فرض ترسیم شده که سرعت بازو یا بسته شده تمام سیلندرها ثابت و مساوی بوده است. این فرض با آنچه در عمل اتفاق می افتد اندکی متفاوت است. در این شکل هم می توان ماهیت تقریبی و تکه تکه بودن تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته را مشاهده کرد.



شکل ۱۵ الف- بازوی ناپیوسته مطهری و دیگران، ب- یک پایه از یک پودمان این بازو، ج- نتایج آزمون تعقیب مسیر با ۵ نقطه دقت [۷۹].

۳- نتیجه‌گیری

بازوهای ناپیوسته با وجود مزایایی که نسبت به بازوهای پیوسته دارند، در عمل استفاده از آن‌ها بسیار محدود بوده است و غالباً

عملی نمی گردد. مثلاً وقتی عملگر سبک و کوچک است، نیروی زیادی تولید نمی کند و نمی توان تعداد پودمان‌ها را زیاد کرد. سادگی در ارتباط با کاربر و کنترل ربات، ارزان بودن، سبکی، کم حجم بودن و مصرف کم انرژی استفاده شود. احتمال می رود بتوان بازوهای رباتیک ناپیوسته ارزان و ساده ای ساخت که محیط های آموزش رباتیک بتوانند از آن بهره ببرند.

چالشی که در مقابل این اهداف وجود دارد بیشتر بر روی طراحی عملگر می باشد. چراکه معمولاً تمام این اهداف بصورت یکجا چون در این صورت وزن خود را تحمل نمی کند و نمی تواند تمام تغییر پیکربندی‌ها را به درستی اجرا کند. بنابراین پیشنهاد می شود محققین بر روی طراحی و ساخت عملگرهای ناپیوسته ای که تمام این ویژگی‌ها را داشته باشد کار کنند. در ضمن پیشنهاد می شود بر روی طراحی و ساخت بازوهای ناپیوسته ای کار شود که مناسب برای محیط های آموزشی باشند و در این راه از قابلیت

جدول ۴ ویژگی‌های بازوهای ناپیوسته ساخته شده

نام بازو	سال ساخت	تعداد پودمان	مکانیزم پودمان	تعداد پیکربندی‌ها	نوع تحریک	هدف طراحی و کاربرد بازو	نقاط قوت و ضعف
ایبرت-یوفاف	۱۹۹۸	۶	استوارت-گاوف	$6/87 \times 10^3$	نیوماتیک	بررسی رفتار بازوهای ناپیوسته	محدوده حرکتی کوچک؛ تاخیر زیاد در انجام برخی تغییر پیکربندی‌ها؛ حرکات بصورت نرم و ملایم انجام نمی شد.
سوتاکن	۲۰۰۳	۳	وی-جی-تی صفحه ای با چرخش فضایی	$2/1 \times 10^6$	نیوماتیک	بررسی رفتار بازوهای ناپیوسته	فضای کاری وسیع؛ استفاده از میراگر روغنی برای یکنواخت کردن حرکات
براید اس-ام-ای	۲۰۰۱-۲۰۰۴	۵	آر-پی-اس سه گانه	۳۲۷۶۸	اس-ام-ای	طراحی با هدف کاهش وزن، پیچیدگی و مصرف انرژی برای استفاده در کاوش‌های فضایی	وزن اندک به خاطر بدنه تمام پلاستیک؛ قابلیت جمع شدن بازو؛ کندی در پاسخ؛ نیروی کم؛ اتلاف انرژی در اثر حرارت سیم‌های اس-ام-ای
براید الکترومغناطیسی	۲۰۰۳	۲	آر-آر-اس سه گانه	۶۴	الکترومغناطیس	کاهش اتلاف انرژی در حین سبکی و کوچکی برای استفاده در کاوش‌های فضایی	جرم نسبتاً بالا؛ نیروی کم؛ تعداد پودمان‌های کم
براید دی-ای سری اول	۲۰۰۲-۲۰۰۶	۲	آر-پی-اس سه گانه	۶۴	دی الکتریک	هدف طراحی کاهش وزن در حین مصرف کم انرژی، برای استفاده در کاوش‌های فضایی	جرم نسبتاً بالا؛ نیروی تولیدی کم؛ خرابی زیاد عملگر و عدم اطمینان؛ تعداد پودمان‌های کم

- Masia and A. Merola, "Design, Computational Modelling and Experimental Characterization of Bistable Hybrid Soft Actuators for a Controllable-Compliance Joint of an Exoskeleton Rehabilitation Robot," *Actuators*, vol. 11, no. 2, p. 32, 2022. <https://doi.org/10.3390/act11020032>.
- [17] S. J. Lee, A. M. Bilton and S. Dubowsky, "On the kinematics of solar mirrors using massively parallel binary actuation," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 44106, pp. 1177-1186, 2010. <https://doi.org/10.1115/DETC2010-28875>.
- [18] S. M. Rudolph, M. W. Nurnberger, H. F. Alqadah and J. P. Bobak, "Ultra-Low-Loss, Binary-State Elements for a Mechanically Actuated Reconfigurable Reflectarray," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1951-1952. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889144>.
- [19] Q. Ze, S. Wu, J. Dai, S. Leanza, G. Ikeda, P. C. Yang, G. Iaccarino and R. R. Zhao, "Spinning-enabled wireless amphibious origami millirobot," *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, p. 3118, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30802-w>.
- [20] A. Mohand-Ousaid, I. Bouhadda, G. Bourbon, P. Le Moal, Y. Haddab and P. Lutz, "Compact Digital Microrobot Based on Multistable Modules," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 1926-1933, 2021. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3061003>.
- [21] H. Hussein, I. Bouhadda, A. Mohand-Ousaid, G. Bourbon, P. Le Moal, Y. Haddab and P. Lutz, "Design and fabrication of novel discrete actuators for microrobotic tasks," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 271, pp. 373-382, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.065>.
- [22] L. Zhou and H. Xie, "A Novel Out-of-Plane Electrothermal Bistable Microactuator," in *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)*, Berlin, Germany, 2019, pp. 1953-1956. <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808360>.
- [23] K. Tadakuma, L. M. DeVita, J.-S. Plante, Y. Shaoze, and S. Dubowsky, "The experimental study of a precision parallel manipulator with binary actuation: With application to MRI cancer treatment," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008, pp. 2503-2508. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4534488>.
- Advanced Materials Technologies*, vol. 5, no. 9, p. 2000370, 2020. <https://doi.org/10.1002/admt.202000370>.
- [8] Y. Lin, C. Zhang, W. Tang, Z. Jiao, J. Wang, W. Wang, Y. Zhong et al., "A Bioinspired Stress-Response Strategy for High-Speed Soft Grippers," *Advanced Science*, vol. 8, no. 21, p. 2102539, 2021. <https://doi.org/10.1002/advs.202102539>.
- [9] X. Wang, A. Khara and C. Chen, "A soft pneumatic bistable reinforced actuator bioinspired by Venus Flytrap with enhanced grasping capability," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 15, no. 5, p. 056017, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aba091>.
- [10] M. Mungekar, L. Ma, W. Yan, V. Kackar, S. Shokrzadeh and M. K. Jawed, "Design of Bistable Soft Deployable Structures via a Kirigami-Inspired Planar Fabrication Approach," *Advanced Materials Technologies*, vol. 11, no. 2, p. 2300088, 2023. <https://doi.org/10.1002/admt.202300088>.
- [11] X. Wang, H. Zhou, H. Kang, W. Au and C. Chen, "Bio-inspired soft bistable actuator with dual actuations," *Smart Materials and Structures*, vol. 30, no. 12, p. 125001, 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac2e19>.
- [12] J. McWilliams, Y. Yuan, J. Friedman and C. Sung, "Push-on push-off: A compliant bistable gripper with mechanical sensing and actuation," in *2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, New Haven, CT, USA, 2021, pp. 622-629. <https://doi.org/10.1109/RoboSoft51838.2021.9479209>.
- [13] Y. Tang, Y. Chi, J. Sun, T.-H. Huang, O. H. Maghsoudi, A. Spence, J. Zhao, H. Su and J. Yin, "Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots," *Science advances*, vol. 6, no. 19, p. eaaz6912, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6912>.
- [14] R. Masana, S. Khazaaleh, H. Alhussein, R. S. Crespo and M. F. Daqaq, "An origami-inspired dynamically actuated binary switch," *Applied Physics Letters*, vol. 117, no. 8, p. 081901, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0010236>.
- [15] L. Cappello, M. Xiloyannis, B. K. Dinh, A. Pirrera, F. Mattioni and L. Masia, "Multistable series elastic actuators: Design and control," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 118, p. 167-178, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.04.014>.
- [16] D. Dragone, L. Randazzini, A. Capace, F. Nesci, C. Cosentino, F. Amato, E. De Momi, R. Colao, L.

- no. 4, p. 046002, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/046002>.
- [33] Y. Gandhi, A. Pironi, and L. Collini, "Analysis of bistable composite laminate with embedded SMA actuators," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 12, pp. 429-437, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.075>.
- [34] K.-J. Cho, B. Selden, and H. H. Asada, "Segmented binary control of multi-axis SMA array actuators," in *Smart Structures and Materials 2005: Modeling, Signal Processing, and Control*, San Diego, California, USA, 2005, p. 314. <https://doi.org/10.1117/12.600307>.
- [35] K.-J. Cho and H. H. Asada, "Architecture design of a multi-axis cellular actuator array using segmented binary control of shape memory alloy," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 4, pp. 831-843, Aug. 2006. <https://doi.org/10.1109/TRO.2006.878981>.
- [36] E. Ottaviano, G. Carbone, and M. Ceccarelli, "Workspace analysis and performance of a binary actuated parallel manipulator with flexural joints," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 217, no. 3, pp. 313-330, Mar. 2003. <https://doi.org/10.1243/095440603762869984>.
- [37] G. Borchert, C. Löchte, S. Brumme, G. Carbone, M. Ceccarelli, and A. Raatz, "Design methodology for a compliant binary actuated parallel mechanism with flexure hinges," in *New Trends in Mechanism and Machine Science: Theory and Applications in Engineering*, V. Parenti-Castelli and C. Fanghella, Eds. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013, pp. 171-179. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4902-3_18.
- [38] G. Carbone, E. D'Aliesio, G. Borchert, and A. Raatz, "Design and validation of the binary actuated parallel manipulator BAPAMAN2," *Adv. Robot.*, vol. 27, no. 13, pp. 1033-1043, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1080/01691864.2013.804800>.
- [39] G. Carbone, "Experimental characterization of a binary actuated parallel manipulator," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 445-453, May 2016. <https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0323.036>.
- [40] R. Addo-Akoto and J.-H. Han, "Bidirectional actuation of buckled bistable beam using twisted string actuator," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 506-516, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1177/1045389X18817830>.
- [41] M. Gerbl and J. Gerstmayr, "Self-reconfiguration of shape-shifting modular robots with triangular structure," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 147, p. 103930, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103930>.
2508. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543589>.
- [24] G. Miron, A. Girard, J.-S. Plante, and M. Lepage, "Design and manufacturing of embedded pneumatic actuators for an MRI-Compatible Prostate Cancer Binary Manipulator," in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, Illinois, USA, 2012, pp. 1133-1142. <https://doi.org/10.1115/DETC2012-71380>.
- [25] T. Chen and K. Shea, "An autonomous programmable actuator and shape reconfigurable structures using bistability and shape memory polymers," *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 5, no. 2, pp. 91-101, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1089/3dp.2017.0118>.
- [26] W. Ding and Y.-A. Yao, "Construction and locomotion analysis of modular robots with pneumatic-actuated and binary-controlled expandable cubes," *Adv. Robot.*, vol. 28, no. 22, pp. 1487-1505, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.959052>.
- [27] D. Schütz, A. Raatz, and J. Hesselbach, "Adapted task configuration of a reconfigurable binary parallel robot with PRRRP structure," *Robotica*, vol. 31, no. 2, pp. 285-293, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000240>.
- [28] M. Russo, J. Barrientos-Diez, and D. Axinte, "A kinematic coupling mechanism with binary electromagnetic actuators for high-precision positioning," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 27, no. 2, pp. 892-903, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3074286>.
- [29] H. Shao, S. Wei, X. Jiang, D. P. Holmes, and T. K. Ghosh, "Bioinspired electrically activated soft bistable actuators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 35, p. 1802999, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802999>.
- [30] I. A. Anderson, T. A. Gisby, T. G. McKay, B. M. O'Brien, and E. P. Calius, "Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines," *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 4, p. 041101, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1063/1.4740023>.
- [31] P. Chouinard and J.-S. Plante, "Bistable antagonistic dielectric elastomer actuators for binary robotics and mechatronics," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 17, no. 5, pp. 857-865, Oct. 2011. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2135862>.
- [32] H. Yuk, D. Kim, H. Lee, S. Jo, and J. H. Shin, "Shape memory alloy-based small crawling robots inspired by *C. elegans*," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6,

- [com.access.semantak.com/dissertations-theses/on-development-discretely-actuated-hybrid-serial/docview/304420212/se-2?accountid=173708](https://www.semanticscholar.org/thesis/development-discretely-actuated-hybrid-serial/docview/304420212/se-2?accountid=173708).
- [53] I. Ebert-uphoff and G. S. Chirikjian, "Efficient workspace generation for binary manipulators with many actuators," *J. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 6, pp. 383–400, Jun. 1995. <https://doi.org/10.1002/rob.4620120605>.
- [54] I. Ebert-Uphoff and G. S. Chirikjian, "Inverse kinematics of discretely actuated hyper-redundant manipulators using workspace densities," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, Apr. 1996, vol. 1, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1996.503586>.
- [55] I. Ebert-Uphoff and G. S. Chirikjian, "Discretely actuated manipulator workspace generation by closed-form convolution," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Irvine, CA, USA, Aug. 1996, vol. 97577, p. V02AT02A014. <https://doi.org/10.1115/96-DETC/MECH-1162>.
- [56] G. S. Chirikjian and I. Ebert-Uphoff, "Numerical convolution on the Euclidean group with applications to workspace generation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 14, no. 1, pp. 123–136, Feb. 1998. <https://doi.org/10.1109/70.660856>.
- [57] J. Suthakorn, "Paradigms for service robotics," Baltimore, MD, USA: *The Johns Hopkins University*, 2003. <https://www-proquest-com.access.semantak.com/dissertations-theses/paradigms-service-robotics/docview/288276541/se-2?accountid=173708>.
- [58] J. Suthakorn and G. S. Chirikjian, "Design and implementation of a new discretely-actuated manipulator," in *Experimental Robotics VII*, D. Rus and S. Singh, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2002, pp. 151–157. https://doi.org/10.1007/3-540-45118-8_16.
- [59] J. Suthakorn and G. S. Chirikjian, "A new inverse kinematics algorithm for binary manipulators with many actuators," *Adv. Robot.*, vol. 15, no. 2, pp. 225–244, 2001. <https://doi.org/10.1163/15685530152116245>.
- [60] J. Plante et al., "Binary actuation," in *Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors*, K. J. Kim and S. Tadokoro, Eds. London, U.K.: Springer, 2008, ch. 26, pp. 270–278. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=53ad7c3afb1092c833daaae26d21a48c3a21d346>.
- [42] M. Gerbl and J. Gerstmayr, "Self-reconfiguration planning of adaptive modular robots with triangular structure based on extended binary trees," in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, Oct. 2020, pp. 3312–3319. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341300>.
- [43] D. K. Patel et al., "Highly Dynamic Bistable Soft Actuator for Reconfigurable Multimodal Soft Robots," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 8, no. 2, p. 2201259, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1002/admt.202201259>.
- [44] Z. Zhang et al., "Magnetic actuation bionic robotic gripper with bistable morphing structure," *Compos. Struct.*, vol. 229, p. 111422, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111422>.
- [45] Y. Chi et al., "Bistable and multistable actuators for soft robots: Structures, materials, and functionalities," *Adv. Mater.*, vol. 34, no. 19, p. 2110384, May 2022. <https://doi.org/10.1002/adma.202110384>.
- [46] W. Ma et al., "An origami-inspired cube pipe structure with bistable anti-symmetric CFRP shells driven by magnetic field," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 2, p. 025028, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaf6ba>.
- [47] L. S. Novelino et al., "Untethered control of functional origami microrobots with distributed actuation," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 117, no. 39, pp. 24096–24101, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013292117>.
- [48] Q. Ze et al., "Soft robotic origami crawler," *Sci. Adv.*, vol. 8, no. 13, p. eabm7834, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7834>.
- [49] K. Hu, T. Jeannin, J. Berre, M. Ouisse, and K. Rabenorosoa, "Toward actuation of Kresling pattern-based origami robots," *Smart Mater. Struct.*, vol. 31, no. 10, p. 105025, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac9020>.
- [50] S. Wu et al., "Stretchable origami robotic arm with omnidirectional bending and twisting," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 118, no. 36, p. e2110023118, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2110023118>.
- [51] H. Son, Y. Park, Y. Na, and C. Yoon, "4D Multiscale Origami Soft Robots: A Review," *Polymers*, vol. 14, no. 19, p. 4235, Sep. 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14194235>.
- [52] I. R. Ebert-Uphoff, "On the development of discretely actuated hybrid-serial-parallel manipulators," Baltimore, MD, USA: *The Johns Hopkins University*, 1998. <https://www-proquest-com.access.semantak.com/dissertations-theses/on-the-development-of-discretely-actuated-hybrid-serial-parallel-manipulators/docview/304420212/se-2?accountid=173708>.

- pp. 1180-1183, 2006. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2006.277347>.
- [70] E. Lantaigne and A. Jnifene, "An experimental study on a SMA driven pressurized hyper-redundant manipulator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, no. 9, pp. 1067-1076, 2008. <https://doi.org/10.1177/1045389X07083185>.
- [71] A. Mavrommati, E. Tzorakoleftherakis, and A. Tzes, "Design and development of a hyper-redundant binary active laparoscopic manipulator," in *2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, pp. 327-332, 2012. <https://doi.org/10.1109/MED.2012.6265659>.
- [72] E. Tzorakoleftherakis, A. Mavrommati, and A. Tzes, "Design and implementation of a binary redundant manipulator with cascaded modules," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 8, no. 1, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4030372>.
- [73] S. Tappe, J. Kotlarski, T. Ortmaier, M. Dörbaum, A. Mertens, and B. Ponick, "The kinematic synthesis of a spatial, hyper-redundant system based on binary electromagnetic actuators," in *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, pp. 211-216, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICARA.2015.7081149>.
- [74] S. Tappe, J. Pohlmann, J. Kotlarski, and T. Ortmaier, "Towards a follow-the-leader control for a binary actuated hyper-redundant manipulator," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3195-3201, 2015. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353820>.
- [75] S. Tappe, M. Dörbaum, J. Kotlarski, B. Ponick, and T. Ortmaier, "Kinematics and dynamics identification of a hyper-redundant, electromagnetically actuated manipulator," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 601-607, 2016. <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576834>.
- [76] S. Tappe, J. Pohlmann, J. Kotlarski, and T. Ortmaier, "Optimization strategies for task specific path-following capabilities of a binary actuated snake-like robot using follow-the-leader control," in *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 298-303, 2017. <https://doi.org/10.1109/AIM.2017.8014243>.
- [77] S. Tappe, P. Boyraz, H. Korz, and T. Ortmaier, "Design, production and integration of a shape sensing robotic sleeve for a hyper-redundant, binary actuated robot," in *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 298-303, 2018. <https://doi.org/10.1109/AIM.2018.8452710>.
- [61] V. A. Sujan, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "Lightweight hyper-redundant binary elements for planetary exploration robots," in *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings*, Como, Italy, Jul. 2001, vol. 2, pp. 1273-1278. <https://doi.org/10.1109/AIM.2001.936904>.
- [62] V. A. Sujan and S. Dubowsky, "Design of a lightweight hyper-redundant deployable binary manipulator," *J. Mech. Des.*, vol. 126, no. 1, pp. 29-39, Jan. 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1637647>.
- [63] M. Hafez, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "Optimized binary modular reconfigurable robotic devices," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 8, no. 1, pp. 18-25, Mar. 2003. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2003.809156>.
- [64] A. Wingert, M. D. Lichter, S. Dubowsky, and M. Hafez, "Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary-dielectric polymers," in *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Y. Bar-Cohen, Ed., San Diego, CA, USA, Mar. 2002, vol. 4695, pp. 415-423. <https://doi.org/10.1117/12.475189>.
- [65] J. Vogan et al., "Manipulation in MRI devices using electrostrictive polymer actuators: With an application to reconfigurable imaging coils," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004, New Orleans, LA, USA, Apr. 2004, vol. 3, pp. 2498-2504. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307436>.
- [66] A. Wingert, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "On the design of large degree-of-freedom digital mechatronic devices based on bistable dielectric elastomer actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 11, no. 4, pp. 448-456, Aug. 2006. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2006.878542>.
- [67] J.-S. Plante, M. Santer, S. Dubowsky, and S. Pellegrino, "Compliant bistable dielectric elastomer actuators for binary mechatronic systems," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 47446, pp. 121-126, 2005. <https://doi.org/10.1115/DETC2005-85576>.
- [68] J.-S. Plante, "Dielectric elastomer actuators for binary robotics and mechatronics," *Ph.D. dissertation*, Massachusetts Institute of Technology, 2006. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/35305>.
- [69] E. Lantaigne and A. Jnifene, "Design of a link-less hyper-redundant manipulator and composite shape memory alloy actuator," in *2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*,

- [79] A. Motahari, H. Zohoor, and M. Habibnejad Korayem, "Design and construction of a discretely actuated hyper-redundant manipulator," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 669-676, 2020. <https://mme.modares.ac.ir/article-15-30410-en.html>.
- [78] M. Dörbaum, S. Tappe, T. Ortmaier, and B. Ponick, "Design and analysis of electromagnetic tilting actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 5, pp. 2171-2181, 2019. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2929735>.

تحلیل انرژی و انرژی تبدیل کننده گرمایی جذبی با بکارگیری لوله گرمایی حلقوی

چکیده: روند رو به رشد نیاز جوامع بشری به مصرف انرژی و مشکلات موجود در امر تولید انرژی، منجر به توجه پژوهشگران به امر بازیافت و ارتقای کیفیت منابع گرمایی هدر رفته شده است. در این راستا، تبدیل کننده گرمایی جذبی یکی از جذاب ترین فناوری های صرفه جویی در مصرف انرژی است. همچنین، لوله گرمایی حلقوی یک وسیله ساده است که قادر به انتقال گرما در فواصل طولانی می باشد. استفاده از لوله گرمایی حلقوی به عنوان مبادله کن گرمایی در سیستم تبدیل کننده گرمایی جذبی می تواند منجر به بهبود عملکرد آن شود. بنابراین امکان سنجی و بررسی تأثیر بکارگیری لوله گرمایی حلقوی، در سیستم تبدیل کننده گرمایی جذبی امری ضروری و حائز اهمیت می باشد. در این پژوهش، در ابتدا هر یک از سیستم های مذکور به طور مجزا از دیدگاه ترمودینامیکی تحلیل و اعتبارسنجی شدند. سپس به تحلیل ترمودینامیکی سیستم تبدیل کننده گرمایی جذبی ادغام شده با لوله گرمایی حلقوی پرداخته شد و عملکرد آن با چرخه متداول تبدیل کننده گرمایی جذبی مقایسه گردید. تمامی بررسی ها در نرم افزار EES انجام گرفته و سیال عامل چرخه LiBr-H₂O می باشد. نتایج نشان می دهد COP و ECOP چرخه ترکیبی بالاتر از چرخه تبدیل کننده گرمایی جذبی تک اثره معمولی می باشد.

واژه های راهنما: تبدیل کننده گرمایی جذبی، لوله گرمایی حلقوی، تحلیل ترمودینامیکی، ضریب عملکرد، بازده قانون دوم

سمیه زارع قوزلوجه
کارشناسی ارشد

لیلی گروسی فرشی*
دانشیار

فرامرز طلعتی
دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تبریز، تبریز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

Somayyeh Zare
Quzlujeh
MSc.

Leili Garousi
Farshi*
Associate professor

Faramarz Talati
Associate professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Tabriz
university, Tabriz

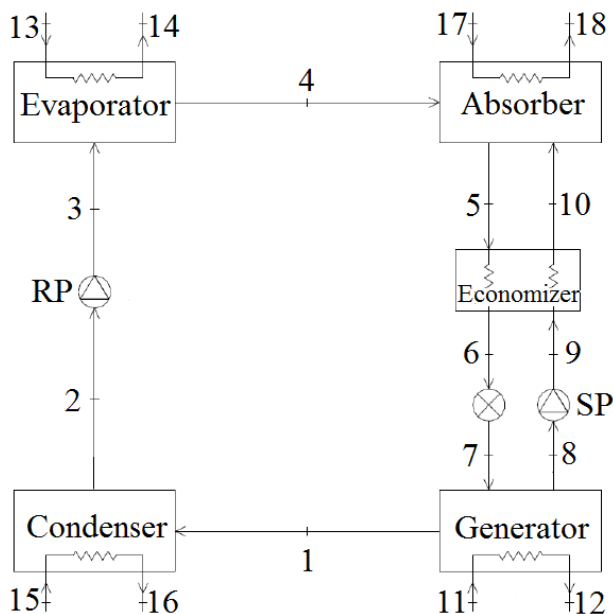
Energy and exergy analysis of an absorption heat transformer by using loop heat pipe

Abstract: The growing trend of human society's need for energy consumption and the problems in energy production, leads to paying attention of researchers to recycle and improve the quality of waste heat sources. In this regard, an absorption heat transformer is one of the most attractive energy-saving technologies. Also, the loop heat pipe is a simple device that is able to transfer heat over long distances. Using the loop heat pipe as heat exchangers inside the absorption heat transformer system can lead to improving its performance. Therefore, it is necessary and important to assess the feasibility and effect of using the loop heat pipe in the absorption heat transformer system. In this study, at first, both of the mentioned systems were analyzed and validated separately from the thermodynamic point of view. Then, the thermodynamic analysis of the absorption heat transformer system integrated with the loop heat pipe was done and its performance was compared with the conventional absorption heat transformer cycle. All investigations are done in the EES software and the working fluid of the cycle is LiBr-H₂O. The results show that the COP and ECOP of the combined cycle are higher than the conventional absorption heat transformer cycle.

Keywords: Absorption heat transformer, Loop heat pipe, Thermodynamic analysis, Coefficient of performance, Second-law efficiency

۱- مقدمه

عرضه می‌شود. مبرد تبخیر شده، در چگالنده در دمای (T_{CO}) و فشار پایین (P_{CO}) تبدیل به مایع می‌شود و گرما (\dot{Q}_{CO}) را به یک محیط خنک‌کننده دفع می‌کند و در ادامه از چگالنده به تبخیرکن که در فشار بالای چرخه (P_{EV}) قرار دارد، پمپ می‌شود، جایی که با دریافت گرمای (\dot{Q}_{EV}) از منبع گرمای هدر رفت در دمای (T_{EV}) تبخیر می‌شود. سپس بخار آب توسط محلول غلیظ (غلظت لیتیوم برماید) در جاذب با دمای بالای (T_{AB}) طی یک فرایند گرمازا جذب شده و گرمای حاصل به عنوان گرمای مفید از چرخه خارج می‌گردد. در نهایت، محلول رقیق شده از جاذب خارج شده و در صرفه‌جو گرما مبادله می‌کند تا محلول غلیظ پمپ شده از ژنراتور به جاذب قبل از تکرار مجدد چرخه، پیش‌گرم شود و بعد از آن از طریق شیر خفانش به ژنراتور بازگردانده شده و چرخه تکرار می‌گردد.



شکل ۱ نقاط کارکردی چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره

عملکرد کلی سیستم‌های گرمایی جذبی تحت تأثیر بسیاری از پارامترها قرار دارد. به عنوان نمونه، عملکرد AHT به انتخاب جفت جاذب/مبرد مناسب بستگی دارد. دو مورد از متداول‌ترین سیالات کاری مورد استفاده در سیستم‌های مذکور محلول آب و لیتیوم بروماید ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$) و آب و آمونیاک ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) می‌باشد [۵]. کورم و هوروز [۶]، تبدیل‌کننده‌های گرمایی جذبی را با سیال‌های عامل آب و لیتیوم بروماید و آب و آمونیاک تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، سیستم AHT با استفاده از محلول آب و لیتیوم بروماید عملکرد بهتری نسبت به سیستم

با توجه به رشد سریع اقتصاد، افزایش روز افزون مصرف انرژی به شکل‌های مختلف و به وجود آمدن بحران انرژی به علت اتمام‌پذیر بودن سوخت‌های فسیلی و تولید آلودگی زیاد ناشی از استفاده از این قبیل سوخت‌ها، استفاده از انرژی‌هایی با دمای پایین برای جهان اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. روزانه مقادیر بالایی از انرژی مورد استفاده در صنعت در نهایت به صورت گرما به محیط پیرامون دفع می‌گردد [۱]. از آن جایی که بخش صنعت بعد از حمل و نقل بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده انرژی در جهان می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت در هر لحظه بخش قابل توجهی از انرژی تولیدشده بدون هیچ استفاده‌ای تلف می‌گردد [۲]. بنابراین بازیابی این گرمای هدر رفته می‌تواند کمک بزرگی در صرفه‌جویی در مصرف انرژی و به تبع آن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش بهره‌وری انرژی ارائه نماید.

به منظور استحصال توان از گرمای هدر رفته صنایع، فناوری‌های متعددی توسعه یافته است [۱]. در این راستا، تبدیل‌کننده گرمایی جذبی (AHT^1) وسیله‌ای است که انرژی گرمایی دما پایین و یا متوسط ($80\text{-}100^\circ\text{C}$) را با مصرف مقدار ناچیزی توان مکانیکی به انرژی گرمایی دما بالای قابل استفاده در سایر فرایندها، تبدیل می‌نماید [۳] و [۴]. چرخه عملکردی تبدیل‌کننده گرمایی جذبی برعکس چرخه پمپ گرمایی جذبی می‌باشد، از اینرو تبدیل‌کننده گرمایی جذبی با نام پمپ گرمایی جذبی نوع II نیز شناخته می‌شود. تبدیل‌کننده‌های گرمایی جذبی را می‌توان به سه نوع تک اثره، دو اثره و سه اثره تقسیم‌بندی نمود. سیستم تک اثره AHT در دو سطح فشار شامل فشار بالا که فشار اشیاع دمای تبخیرکن و فشار پایین که فشار اشیاع دمای چگالنده می‌باشد، عمل می‌کند. معمولاً دمای تبخیرکن و ژنراتور یکسان است، زیرا هر دو از یک منبع گرمای اتلافی استفاده می‌کنند. از این رو، سه سطح دما در سیستم AHT تک اثره وجود خواهد داشت (دمای جاذب، دمای چگالنده و دمای تبخیرکن که برابر با دمای ژنراتور است). نحوه عملکرد تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

یک AHT شامل پنج دستگاه مبادله‌کن گرمایی اصلی (تبخیرکن، چگالنده، ژنراتور، جاذب و یک صرفه‌جو) می‌باشد (شکل ۱). مقدار مشخصی از منابع گرمای اتلافی به ژنراتور (\dot{Q}_{GE})، جهت تبخیر مبرد (آب) از محلول در دمای (T_{GE})

¹ Absorption Heat Transformer (AHT)

این تحقیق نشان داد، با بکارگیری ۷ لوله گرمایی استوانه‌ای مابین فرایندهای تبخیر و میعان، نزدیک به یک سوم گرمای کل مورد نیاز سیستم تأمین می‌گردد. بنابراین، ضریب عملکرد حدود ۲۰ درصد بهبود می‌یابد. این روش علاوه بر کاهش منبع گرمای اولیه و در پی آن افزایش COP، سبب کاهش اندازه سیستم AHT نیز می‌گردد.

با توجه به این نکته که در زمینه سیستم تبدیل‌کننده گرمایی جذبی مطالعات محدودی با بکارگیری لوله گرمایی صورت گرفته است، نیاز به بررسی و امکان‌سنجی از نقطه نظر ترمودینامیکی این چرخه و کار بر روی انواع لوله گرمایی از جمله بررسی بکارگیری لوله گرمایی حلقوی که تاکنون صورت نپذیرفته، شدیداً احساس می‌شود.

در این پژوهش، سعی بر آن است، ترکیب تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره (سیال عامل آب و لیتیوم برماید) و لوله گرمایی حلقوی (سیال عامل آب) از دیدگاه ترمودینامیکی مورد مطالعه قرار گیرد. مدل‌های ترمودینامیکی تبدیل‌کننده گرمایی جذبی و لوله گرمایی برای مدل‌سازی عملکرد این سیستم ترکیبی ارائه و تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم انجام خواهد شد. تمامی تلفات انرژی موجود در این سیستم محاسبه و بازده‌های انرژی و انرژی برآورد خواهد شد. همچنین، اثرات برخی پارامترها، نظیر دمای جاذب، چگالنده، ژنراتور و تبخیرکن بر عملکرد چرخه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- توصیف چرخه لوله گرمایی حلقوی

لوله گرمایی حلقوی (LHP)^۱ یک دستگاه انتقال گرمای دو فازی است که با استفاده از اثر موینگی گرما را از منبع خارجی دریافت کرده و به چگالنده منتقل می‌کند. اهمیت استفاده از نوع حلقوی در این است که از آن‌ها می‌توان در فواصل طولانی بدون توجه به موقعیت قرارگیری و با انواع بارهای گرمایی با راندمان گرمایی بسیار بالا (بالتر از ۹۵ درصد) استفاده نموده و کنترل دمایی بسیار دقیقی را از آن‌ها انتظار داشت. از نقطه نظر طراحی، LHP شامل لوله‌های مهر و موم شده است که یک تبخیرکن (چشمه گرما) و یک چگالنده (چاه گرمایی) را به یکدیگر متصل می‌کند [۱۰]. قسمت تبخیرکن لوله گرمایی شامل سه بخش محفظه جبران، فیتیله اولیه و ثانویه و بخش تبخیر می‌باشد، اما قسمت

با سیال عامل آب و آمونیاک در استفاده از منابع دما پایین دارد. با وجود این، محلول آب و لیتیوم بروماید برای استفاده در AHTها دارای معایبی مثل خوردگی، لزجت بالا، حلالیت محدود و محدودیت دمای بالا چرخه می‌باشد. مطالعات ساچدوا و همکاران [۷]، در زمینه بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم AHT نشان داد، افزایش دمای تبخیرکن و ژنراتور سبب افزایش ضریب عملکرد می‌شود، اما افزایش دمای چگالنده، منجر به کاهش ضریب عملکرد می‌شود.

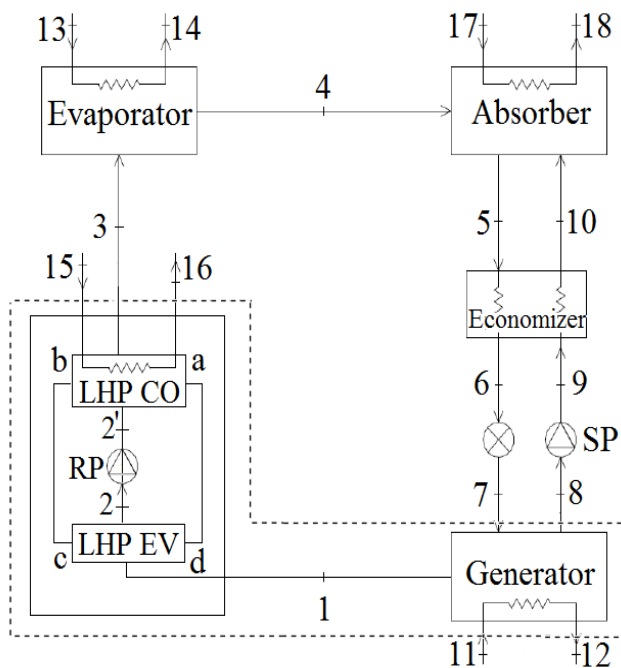
بهبود عملکرد چرخه‌های تبدیل‌کننده گرمایی جذبی همواره برای پژوهشگران چالش برانگیز بوده و مطالعات متعددی در این رابطه صورت گرفته است. یکی از راهکارها برای بیشینه سازی ضریب عملکرد سیستم، بکارگیری لوله‌های گرمایی در سیستم تبدیل‌کننده گرمایی جذبی می‌باشد. لوله‌های گرمایی، لوله‌هایی هستند که با مایع پر شده‌اند و با جذب یا دفع گرما و تغییر فاز سیال عامل، امکان انتقال گرما در فواصل طولانی را بدون نیاز به توان ورودی فراهم می‌سازند. در واقع لوله گرمایی از لحاظ ظاهری یک لوله باریک و بلند است که هیچ قطعه متحرکی در آن به کار گرفته نشده و کاملاً عایق‌بندی شده است. لایه داخلی این لوله، ساختاری موئین و فیتیله‌ای دارد و درون این ساختار، جریان اندکی از آب در حالت اشباع برقرار است. در یک انتهای این لوله، قسمت تبخیرکن قرار دارد. در این قسمت، گرما جذب شده و سیال (که معمولاً آب است) تبخیر می‌شود. قسمت چگالنده، در انتهای دیگر لوله گرمایی قرار دارد. تغییر فاز بخار به مایع و آزاد شدن گرما در این قسمت انجام می‌شود. در بین دو انتهای لوله، قسمت آدیاباتیک قرار می‌گیرد. در قسمت آدیاباتیک، فازهای بخار و مایع در جهت‌هایی خلاف یکدیگر، یکی از قسمت مرکزی لوله و دیگری از قسمت فیتیله‌ای، در حرکت هستند تا با کمترین میزان اتلاف انرژی، چرخه لوله گرمایی کامل شود. لوله‌های گرمایی بر اساس ساختارشان به پنج نوع استوانه‌ای، دوار، حلقوی، رسانایی متغیر و ضربانی تقسیم‌بندی می‌شوند [۸].

هردیا و همکاران [۹]، به منظور به بیشینه سازی ضریب عملکرد سیستم AHT، امکان استفاده از لوله گرمایی استوانه‌ای به عنوان مبادله‌کن گرما داخل سیستم AHT را از نقطه نظر قوانین انتقال گرما بررسی کردند. بدین صورت که، به کمک لوله‌های گرمایی امکان مبادله گرمایی بین فرآیندهای چگالنده و تبخیرکن سیستم AHT فراهم شد. ظرفیت گرمایی سیستم ۰/۷ کیلووات و سیال عامل آن آب و لیتیوم بروماید بوده است.

^۱ Loop Heat Pipe (LHP)

چگالنده و جاذب گرما را انتقال می‌دهند. مشروط بر اینکه قوانین ترمودینامیکی نقض نشوند، می‌توان گرما را بین اجزاء منتقل کرد و تقاضای گرمای اولیه برای AHT را کاهش داد. اگر گرمای چگالنده به کمک LHP برای تامین گرمای مورد نیاز تبخیرکن بازیابی شود، عملکرد AHT بهبود می‌یابد، زیرا با وجود ثابت ماندن گرمای خروجی جاذب، مصرف گرمای اولیه کاهش یافته است. در مورد AHT، بخار فوق گرم خروجی از ژنراتور، به قسمت تبخیرکن LHP گرمای خود را منتقل کرده و مایع می‌شود. مبرد مایع برای دریافت گرما از LHP و پیش گرم شدن به فشار بالا (PEV) پمپ می‌شود.

در مورد LHP، مبرد آن با فشار کم تبخیر می‌شود، زمانی که به حالت بخار اشباع رسید، به چگالنده می‌رود تا گرما را برای تبخیرکن در AHT بازیابی نماید. مبرد در حالت مایع مترکم به دلیل اثرات موینگی و گرانش برای تکرار مجدد چرخه LHP، از چگالنده به منطقه تبخیرکن باز می‌گردد. برای سادگی مدلسازی چرخه ترکیبی اجزای داخل خط چین شکل (۳) یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است.



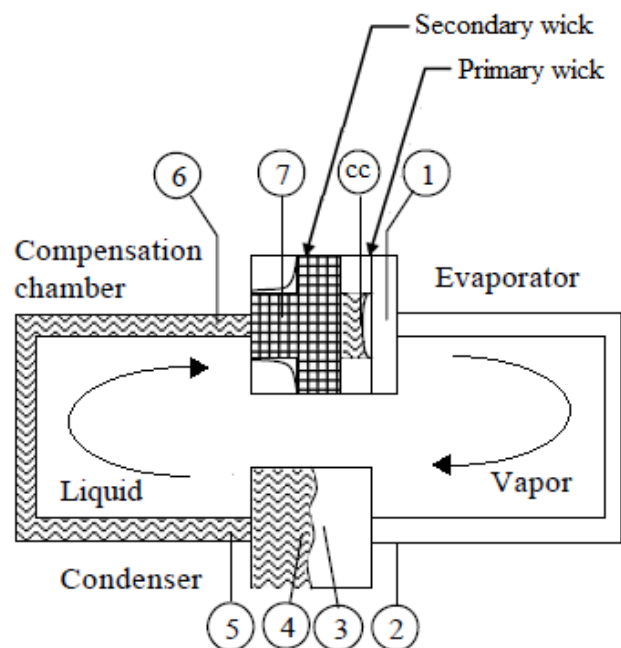
شکل ۳ نقاط کارکردی چرخه ترکیبی AHT-LHP

۲-۳- فرضیات مدلسازی

جهت مدلسازی چرخه مذکور، فرض‌های زیر لحاظ می‌گردد:
 (۱) سیال عامل در تمام حالات پایدار می‌باشد و شرایط تعادل ترمودینامیکی در کل سیستم برقرار خواهد بود. (۲) سیال خروجی از چگالنده AHT در حالت مایع اشباع و از تبخیرکن،

چگالنده اجزای پیچیده دیگری نداشته و صرفاً در آن قسمت تبادل گرما صورت گرفته و سیال عامل دچار تغییر فاز می‌گردد. بنابراین، جریان سیال عامل در داخل لوله گرمایی حلقوی را می‌توان به چهار جزء شامل جریان بخار در بخش انتقال (خط بخار)، جریان مایع در بخش انتقال (خط مایع)، جریان بخار در تبخیرکن و چگالنده و جریان مایع در تبخیرکن و چگالنده تقسیم نمود [۱۱].

گرما در بخش تبخیرکن وارد شده، سیال عامل در نتیجه دریافت گرمای نهان تبخیر، تبدیل به بخار اشباع شده و باعث ایجاد گرادیان فشار در لوله می‌شود. بخار اشباع حاصل به علت وجود اختلاف فشار به ناحیه چگالنده در انتهای دیگر لوله گرمایی منتقل می‌شود. در واقع، نیروی پیشران در لوله گرمایی، اختلاف فشار مابین بخش تبخیرکن و بخش چگالنده می‌باشد. قرارگیری چگالنده در بخش خنک‌تر، سبب انتقال گرمای نهان تبخیر از بخار اشباع به قسمت دما پایین شده و بخار اشباع تغییر فاز داده، به حالت مایع در می‌آید. مایع اشباع حاصل، به کمک نیروی موینگی از طریق ساختار فتیله‌ای به بخش تبخیرکن برمیگردد. این چرخه مجدداً تکرار می‌شود و پیوسته گرما از بخش گرم به سرد منتقل می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲ نقاط کارکردی لوله گرمایی حلقوی [۱۲]

۲-۲- توصیف چرخه AHT-LHP

یک AHT دارای چهار نقطه برای تبادل گرما با مدارهای خارجی می‌باشد، جایی که ژنراتور و تبخیرکن گرما را دریافت می‌کنند و

جدول ۲ شرایط مبنایی جهت مدلسازی چرخه LHP

پارامتر	مقدار	واحد
سیال عامل	آب	-
تبخیرکن		
مساحت مؤثر	۱	cm ²
تخلخل فیتیله	۲۰٪	-
ضخامت فیتیله	۲۰۰	μm
رسانایی گرمایی سیلیکون	۱۴۰	W/m.K
خط بخار		
شعاع	۰٫۳۵	mm
طول	۳۰۰	mm
خط مایع		
شعاع	۰٫۳۵	mm
طول	۲۰۰	mm

بخار اشباع می‌باشد. (۳) محلول خروجی از جاذب و ژنراتور در حالت اشباع قرار دارد. (۴) دماهای خروجی ژنراتور و تبخیرکن به دلیل دریافت نمودن گرما از یک منبع مشترک، یکسان می‌باشد. (۵) میزان جذب و دفع گرما و افت فشار ناشی از اصطکاک در اجزای مختلف سیستم ناچیز می‌باشد. (۶) محفظه جبران LHP در شرایط اشباع قرار دارد. (۷) مایع در حالت تک فاز محفظه جبران را ترک می‌کند. (۸) در LHP سطح مشترک بخار و مایع در ورودی چگالنده قرار دارد. به عبارت دیگر، به دلیل ناچیز بودن گرمای محسوس بخار در مقایسه با گرمای خارج شده توسط قسمت دیگر چگالنده، میتوان از طول ورودی بخار در چگالنده در مقایسه با طول چگالنده چشم‌پوشی کرد. (۹) فیتیله همواره خیس می‌باشد. (۱۰) خط بخار و مایع کاملاً عایق می‌باشند. (۱۱) در بخش LHP تمامی خواص سیال عامل به جز چگالی، در کل چرخه ثابت فرض شده است. (۱۲) اختلاف دمای ناچیزی برای فرایند انتقال گرما در LHP و AHT در نظر گرفته شده است.

۲-۴- آنالیز انرژی

بر اساس معادلات (۱) تا (۳)، تحلیل انرژی سیستم‌های AHT، LHP و AHT-LHP انجام می‌شود.

معادله موازنه جرم:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

معادله موازنه جرم لیتیوم برماید:

$$\sum \dot{m}_{in} \dot{X}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \dot{X}_{out} \quad (2)$$

معادله موازنه انرژی:

$$\sum \dot{Q} - \sum \dot{W} = \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (3)$$

جهت مدل‌سازی کل لوله گرمایی حلقوی به عنوان یک چرخه، باید فیزیک جریان در گردش را درک کرد. برای داشتن یک LHP در حال کار سیال عامل باید به حالت ترمودینامیکی مایع متراکم به محفظه جبران برسد تا از تشکیل حباب در ورودی محفظه جبران یا در لوله‌ها جلوگیری کند (نقطه ۵ با

جدول ۱ شرایط مبنایی و بازه مقادیر پارامترهای عملکردی چرخه AHT

پارامتر	مقدار
دمای جاذب	$T_{AB} = 105 - 135 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای ژنراتور = دمای تبخیرکن	$T_{GE} = T_{EV} = 75 - 85 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای چگالنده	$T_{CO} = 26 - 35 \text{ } ^\circ\text{C}$
کارایی صرفه‌جو	$\varepsilon_{EC} = 80 \%$
بازده آیزنتروپیک پمپ‌ها	$\varepsilon_p = 80 \%$
دبی جرمی میرد (آب)	$\dot{m}_r = 0.003 \text{ kg/s}$
دمای ورودی آب خنک‌کن چگالنده	$T_{CO} - 8 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای خروجی آب خنک‌کن چگالنده	$T_{CO} - 3 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای ورودی آب جاذب	$T_{AB} - 8 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای خروجی آب جاذب	$T_{AB} - 3 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای ورودی بخار اشباع گرم‌کن ژنراتور و تبخیرکن	$T_{GE} + 10 \text{ } ^\circ\text{C}$
دمای خروجی مایع اشباع گرم‌کن ژنراتور و تبخیرکن	$T_{GE} + 10 \text{ } ^\circ\text{C}$

چرخه ترمودینامیک LHP از چهار فرآیند اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: (۱) افزایش گرمای فشار ثابت در تبخیرکن، (۲) آنتالپی ثابت در لوله مایع عایق شده، (۳) دفع گرما با فشار ثابت در چگالنده و (۴) آنتالپی ثابت در لوله بخار عایق شده. نمودار دما-آنترپی و فرایندهای ترمودینامیکی داخل لوله گرمایی حلقوی در شکل (۴) ارائه شده است. با استفاده از موازنه انرژی برای بخش تبخیرکن و چگالنده می‌توان کل گرمای ورودی و خروجی LHP را تعیین نمود.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_1 - h_6) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_2 - h_5) \quad (5)$$

با توجه به فرضیات مدلسازی، لوله‌ها عایق هستند و محفظه جبران در حالت تعادل قرار دارد. بدین معنا که گرمای ورودی در تبخیرکن باید برابر با گرمای خروجی در چگالنده باشد.

$$\dot{Q}_{LHP} = \dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} \quad (6)$$

از طرف دیگر کل گرمای دریافتی در تبخیرکن شامل گرمای محسوس، گرمای نهان و گرمای نشت (به صورت انتقال گرمای همرفتی) می‌باشد.

$$\dot{Q}_{leak} = h_{cc}A(T_{cc} - T_{cc,sat}) \quad (7)$$

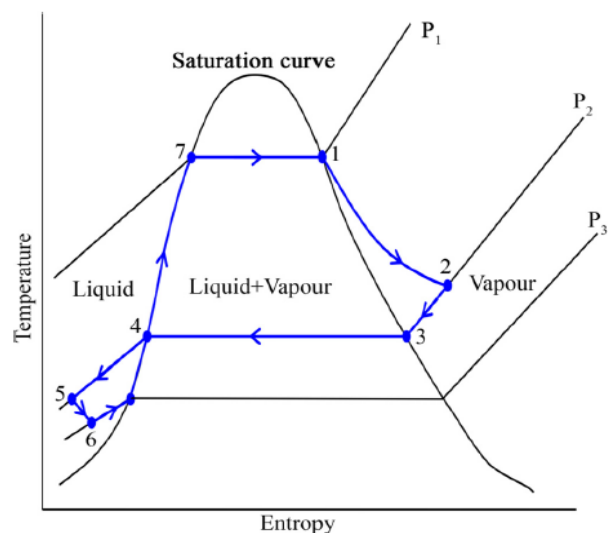
$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}Cp_{l,c}(T_1 - T_{cc}) + \dot{m}h_{fg,h} + h_{cc}A(T_{cc} - T_{cc,sat}) \quad (8)$$

در بخش چگالنده LHP نیز گرمای خروجی از سه قسمت شامل گرمای محسوس جهت خنک کردن بخار از دمای T_2 تا دمای T_c ، گرمای نهان برای تغییر فاز بخار به مایع و در نهایت گرمای محسوس برای خنک کردن مایع از دمای T_c به T_5 می‌باشد.

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}[Cp_{v,c}(T_2 - T_c) + h_{fg,c} + Cp_{l,c}(T_c - T_5)] \quad (9)$$

جهت نوشتن یک مدل حالت پایدار جامع برای LHP، باید نحوه انتقال گرما در تبخیرکن را درک کرد. بنابراین درک

دمای (T_5) . اگر یک حباب در داخل سیستم لوله‌کشی یا درست قبل از ورودی محفظه جبران تشکیل شود، می‌تواند جریان را مسدود کند و باعث حرکت جریان حجیم شود. این نوع حرکت عملکرد لوله گرمایی حلقوی را کاهش می‌دهد زیرا جریان قطع می‌شود و عملکرد LHP رفتار دوره‌ای و متناوب خواهد داشت. در ادامه سیال عامل از حالت مایع متراکم به دمای اشباع محفظه جبران $T_{cc,sat}$ می‌رسد. در نتیجه، سطح انرژی مایع افزایش می‌یابد. فیتیله ثانویه، که در محفظه جبران قرار دارد، مایع اشباع شده را به فیتیله اولیه می‌رساند (فقط مایع اشباع داخل فیتیله اولیه جذب می‌شود). سپس مایع اشباع شده نسبت به سطح داغ پایین فیتیله اولیه گرم‌تر می‌شود و به علت اثر موینگی از محفظه جبران به سمت بالای فیتیله انتقال می‌یابد. در آن نقطه مایع تا دمای T_1 گرم می‌شود و سطح انرژی سیال افزایش می‌یابد. مایع اشباع در فشار تبخیرکن در فصل مشترک بخار-مایع تغییر فاز می‌دهد و انرژی سیال از مایع اشباع به بخار اشباع در همان دمای T_1 به سطح بالاتری می‌رود. فشار بخار در اثر حرکت در خط بخار به دلیل وجود اصطکاک و فرایند تغییر فاز بخار به مایع در چگالنده، افت می‌کند. جریان بخار در داخل خط بخار به عنوان جریان داخل یک مجرای عایق در نظر گرفته می‌شود. برای جریان در داخل مجرای عایق، آنتالپی ثابت می‌ماند و جریان را آنتالپی ثابت می‌نامند. همچنین سطح مجرا در کل سیستم یکسان می‌باشد. افت فشار در خط مایع کم است زیرا سرعت جریان کم است، یعنی جریان آرام می‌باشد. بنابراین، می‌توان فرض کرد که سیال کار در طول خط مایع همواره به شکل مایع ادامه می‌یابد و به حالت بخار تبدیل نمی‌شود.



- 1-2 Isenthalpic process
- 2-3-4-5 Constant pressure process
- 5-6 Isenthalpic process
- 7-1 Constant pressure process

شکل ۴ نمودار ترمودینامیکی دما-آنترپی چرخه LHP [۱۳]

$$T_5 = T_c - \frac{h_{cc}A}{\dot{m} C_{p_{l,c}}} (T_{cc} - T_{cc,sat}) - (T_1 - T_{cc}) + \frac{(h_{fg,c} - h_{fg,h})}{C_{p_{l,c}}} + \frac{C_{p_{v,c}}}{C_{p_{l,c}}} (T_2 - T_c) \quad (16)$$

به کمک روابط (۸) و (۱۱) می‌توان دمای محفظه جبران را محاسبه کرد.

$$T_{cc} = T_1 - \left(\frac{\dot{Q}_{LHP} - \dot{m} h_{fg,c}}{\dot{m} C_{p_{l,c}}} \right) \times (1 - e^{-\left(\frac{\dot{m} C_{p_{l,c}} L}{k_{eff} A} \right)}) \quad (17)$$

با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۵) رابطه (۱۸) برای محاسبه دمای نقطه ۱ حاصل می‌شود.

$$T_1 = T_{cc,sat} + \left(\frac{\nu_{fg,c} T_c}{h_{fg,c}} \right) \left(\frac{8\mu_{l,c} \dot{m} (l - l_v)}{\pi \rho_{l,c} R^4} + \frac{8\mu_{v,c} \dot{m} l_v}{\pi (\rho_{v,c} + \rho_{v,e}) R^4} \right) \quad (18)$$

برای اینکه LHP عملکردی بدون وقفه داشته باشد، بایستی محفظه جبران همواره در حالت تعادل باشد. برای دستیابی به حالت تعادل و برای جبران نشت گرما به محفظه جبران، باید سیال عامل در خروجی چگالنده در حالت مایع متراکم باشد ($\dot{Q}_{leak} = \dot{Q}_{sub-cooled}$). بنابراین جهت محاسبه T_6 رابطه (۱۹) به کار می‌رود.

$$T_6 = T_{cc,sat} + \frac{\dot{Q}_{leak}}{\dot{m} C_{p_{l,c}}} \quad (19)$$

گرمای مبرد خروجی ژنراتور چرخه AHT به طور کامل توسط بخش تبخیرکن لوله‌های گرمایی دریافت می‌شود. تعداد لوله‌های گرمایی (N) مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$N = \frac{\dot{Q}_{CO,AHT}}{\dot{Q}_{EV,LHP}} \quad (20)$$

چگونگی انتقال گرما در فیتیله بسیار مهم است. رابطه توزیع دما داخل فیتیله به صورت زیر می‌باشد [۱۰].

$$T(x) = T_{cc} + \left(\frac{\dot{Q}_{LHP}}{\dot{m} C_p} - \frac{h_{fg}}{C_p} \right) e^{-\frac{\dot{m} C_p}{k_{eff} A} L} (e^{\frac{\dot{m} C_p}{k_{eff} A} x} - 1) \quad (10)$$

با استفاده از معادله توزیع دما برای فیتیله، می‌توان گرمای نشت شده به محفظه جبران را محاسبه کرد [۱۰].

$$\dot{Q}_{leak} = \dot{m} C_p e^{-\frac{\dot{m} C_p}{k_{eff} A} L} \left(\frac{\dot{Q}_{LHP}}{\dot{m} C_p} - \frac{h_{fg}}{C_p} \right) \quad (11)$$

که k_{eff} رسانایی گرمایی موثر فیتیله می‌باشد و بر اساس میزان تخلخل فیتیله ($\varepsilon: 0-1$) تعیین می‌گردد [۱۴].

$$k_{eff} = \varepsilon k_s + (1 - \varepsilon) k_l \quad (12)$$

به دلیل بالا بودن گرمای نهان تبخیر آب، مقدار جریان گرمی کوچکی در LHP به گردش در می‌آید. کم بودن دبی گرمی با کوچک بودن مقدار نسبت قطر لوله به طول لوله، فرض جریان کاملاً توسعه یافته لایه‌ای را برای جریان مایع و بخار توجیه می‌کند. برای جریان کاملاً توسعه یافته لایه‌ای، تلفات فشار در خط لوله مایع و بخار را می‌توان به کمک معادله مومنتم بیان کرد (اثرات مفاصل و خمیدگی‌ها در نظر گرفته نشده است).

$$\Delta P_l = P_c - P_6 = \frac{8\mu_{l,c} \dot{m} (l - l_v)}{\pi \rho_{l,c} R^4} \quad (13)$$

$$\Delta P_v = P_1 - P_c = \frac{8\mu_{v,c} \dot{m} l_v}{\pi \left(\frac{\rho_{v,c} + \rho_{v,e}}{2} \right) R^4} \quad (14)$$

همچنین به دلیل وجود شرایط اشباع در بخش تبخیرکن و چگالنده LHP می‌توان رابطه کلاپیرون را نوشت.

$$P_h - P_c = \frac{h_{fg,c}}{\nu_{fg,c} T_c} (T_1 - T_c) \quad (15)$$

به کمک روابط (۶) تا (۹) می‌توان رابطه‌ای برای محاسبه دمای T_5 به دست آورد.

که در آن $e_{LiBr}^{0,ch}$ و $e_{H_2O}^{0,ch}$ اگزرژی شیمیایی استاندارد آب و لیتیوم برماید است و a_{LiBr} و a_{H_2O} فعالیت شیمیایی آب و لیتیوم برماید می‌باشند که از مرجع [۱۵] استخراج گردیده‌اند. کل تخریب و تلفات اگزرژی از طریق رابطه (۲۷) محاسبه می‌شوند.

$$\dot{E}x_D + \dot{E}x_L = \sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} + \sum \dot{Q}(1 - \frac{T_0}{T}) + \sum \dot{W} \quad (27)$$

در سیستم‌های AHT و AHT-LHP بازده قانون دوم و یا ضریب عملکرد اگزرژی (ECOP) به صورت نسبت اگزرژی جریان محصول (جریان دما بالای تولیدی جاذب) به اگزرژی جریان سوخت (جریان دما پایین ورودی تبخیرکن و ژنراتور) تعریف می‌شود.

$$ECOP_{AHT} = \frac{\dot{Q}_{AB}(1 - \frac{T_0}{T_{AB}})}{\dot{Q}_{EV}(1 - \frac{T_0}{T_{EV}}) + \dot{Q}_{GE}(1 - \frac{T_0}{T_{GE}})} \quad (28)$$

$$ECOP_{AHT-LHP} = \frac{\dot{Q}_{AB}(1 - \frac{T_0}{T_{AB}})}{(\dot{Q}_{EV} - \dot{Q}_{rec})(1 - \frac{T_0}{T_{EV}}) + \dot{Q}_{GE}(1 - \frac{T_0}{T_{GE}})} \quad (29)$$

۳- اعتبارسنجی مدلسازی

برای اعتبارسنجی مدلسازی تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره، از نتایج پژوهش تجربی ریورا و همکاران [۱۶] استفاده شده است. شکل (۵) مقایسه بین ضریب عملکرد به دست آمده از کار حاضر را با آنچه توسط ریورا و همکاران گزارش شده است نشان می‌دهد. داده‌های نمودار حاکی از وجود یک تطابق عالی بین دو نتیجه می‌باشد.

مقایسه نتایج مدلسازی ترمودینامیکی لوله گرمایی با مطالعه تجربی هم‌دان [۱۰] در شکل (۶) نشان داده شده است. در اعتبارسنجی مذکور، سیال عامل لوله گرمایی حلقوی، آب در نظر گرفته شده است، همچنین دمای چگالنده و ابعاد لوله گرمایی حلقوی مطابق با کار هم‌دان انتخاب شدند. با توجه به نمودار می

گرمای بازیاب شده برای تبخیرکن AHT از طریق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\dot{Q}_{rec} = NU_{LHP}A_{LHP}(T_3 - T_2') \quad (21)$$

U ضریب عمومی انتقال حرارت لوله گرمایی $160 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته می‌شود [۹]. برای نشان دادن نتایج تحلیل انرژی لازم است COP سیستم محاسبه گردد.

$$COP_{AHT} = \frac{\dot{Q}_{AB}}{\dot{Q}_{EV} + \dot{Q}_{GE}} \quad (22)$$

$$COP_{AHT-LHP} = \frac{\dot{Q}_{AB}}{\dot{Q}_{GE} + \dot{Q}_{EV} - \dot{Q}_{rec}} \quad (23)$$

۲-۴- آنالیز اگزرژی

به کمک قانون دوم ترمودینامیک می‌توان عملکرد چرخه را با استفاده از مقادیر اگزرژی بررسی و باهم مقایسه نمود. مقدار اگزرژی از رابطه ذیل قابل حصول است.

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (24)$$

با بکارگیری مقادیر آنتالپی و آنتروپی ویژه اگزرژی فیزیکی از رابطه ذیل قابل محاسبه است.

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (25)$$

اگزرژی شیمیایی از طریق رابطه (۲۶) محاسبه می‌گردد [۱۵].

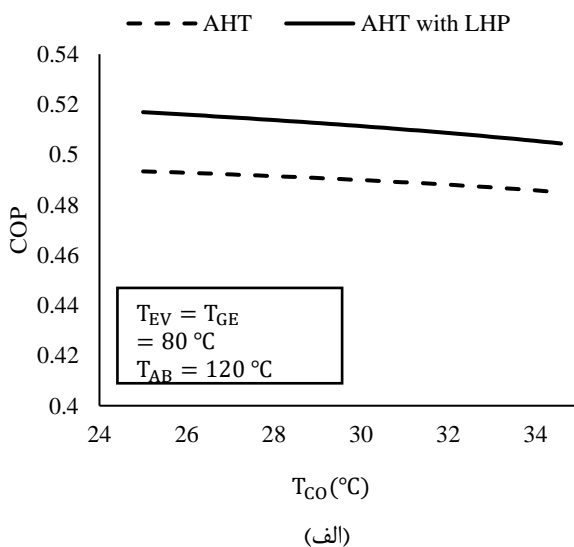
$$\begin{aligned} \dot{E}x_{ch} &= \dot{E}x_{ch}^0 + \dot{E}x_{ch}^{dis} \\ &= \dot{m} \left[\left(\frac{1-x}{M_{H_2O}} \right) e_{H_2O}^{0,ch} + \left(\frac{x}{M_{LiBr}} \right) e_{LiBr}^{0,ch} \right] \\ &+ \dot{m} \cdot T_0 \left[\left(\frac{\bar{R} \cdot (1-x)}{M_{H_2O}} \right) \ln(a_{H_2O}) + \left(\frac{\bar{R} \cdot x}{M_{LiBr}} \right) \ln(a_{LiBr}) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

(۱) می‌باشد $T_{AB} = 105 - 135 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{CO} = 26 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ و $(T_{GE} = T_{EV} = 75 - 85 \text{ }^\circ\text{C})$.

نمودار مقایسه‌ای روند تغییر ضریب عملکرد چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی با و بدون بکارگیری لوله گرمایی حلقوی بر اساس دمای چگالنده، جاذب و تبخیرکن به ترتیب در شکل (۷) نشان داده شده است.

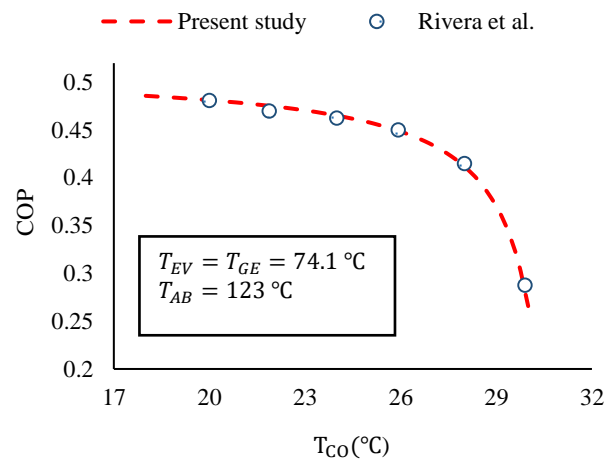
با توجه به نمودارها بکارگیری لوله گرمایی حلقوی در چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره موجب افزایش ۶ تا ۸ درصدی ضریب عملکرد نسبت به چرخه AHT متداول شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، افزایش دمای چگالنده منجر به کاهش جزئی ضریب عملکرد در هر دو سیستم شده است. همچنین با افزایش دمای جاذب COP در ابتدا به آرامی کاهش یافته و در شرایط عملکردی مشخص شده بر روی شکل (۷) دمای جاذب بالاتر از ۱۲۸ درجه سلسیوس، به سرعت کم می‌شود.

این امر به این دلیل است که با افزایش دمای جاذب غلظت محلول رقیق (شکل (۳) نقطه ۵) بیشتر شده و بنابراین به تبع آن نسبت جریان جرمی محلول غلیظ به مبرد نیز افزایش یافته و نهایتاً منجر به کاهش ظرفیت گرمایی جاذب می‌گردد. اما افزایش دمای تبخیرکن منجر به افزایش گرمای ورودی به ژنراتور و خروجی از جاذب گشته که برآیند این دو عامل سبب افزایش ضریب عملکرد سیستم می‌شود و یا به عبارت دیگر افزایش دمای منبع گرمایی منجر به کاهش غلظت محلول رقیق (شکل (۳) نقطه ۵) و در واقع کاهش نسبت دبی جرمی محلول به مبرد می‌گردد و در نتیجه ضریب عملکرد و ظرفیت گرمایی جاذب افزایش می‌یابد. روند تغییرات COP با آنچه در تحقیقات قبلی گزارش شده است، مطابقت دارد.

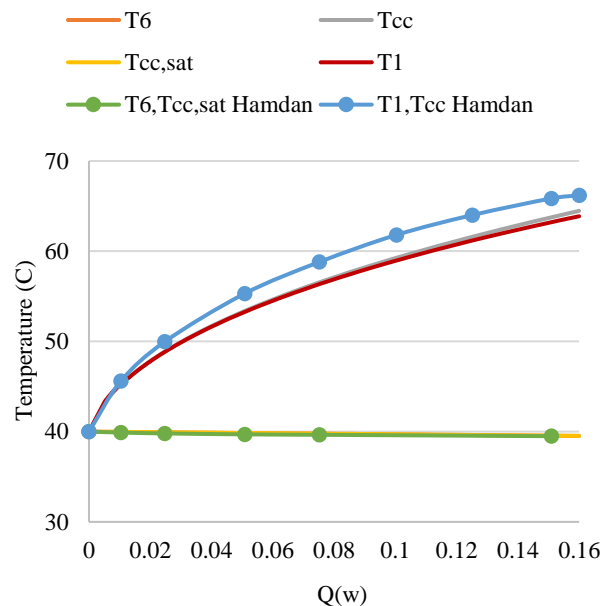


(الف)

توان دریافت که نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج کار هم‌دان تطابق خوبی داشته و حداکثر اختلاف نسبی ۳/۲ درصد است.



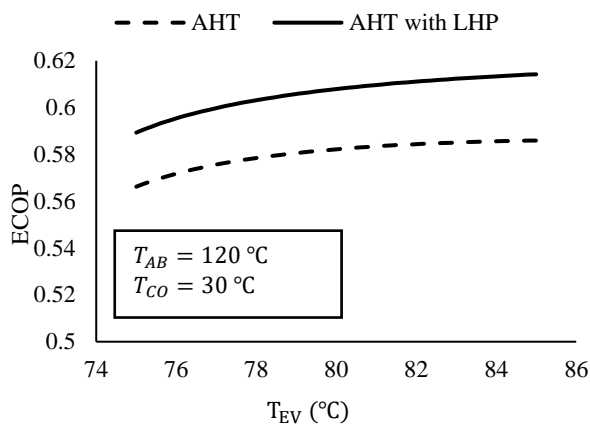
شکل ۵ اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی AHT توسط نتایج مطالعه ریورا و همکاران [۱۶]



شکل ۶ اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی LHP توسط نتایج مطالعه هم‌دان [۱۰]

۴- نتایج

در این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از گروه لوله‌های گرمایی حلقوی در چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره مورد مطالعه قرار گرفت و میزان تأثیر آن از لحاظ انرژی و انرژی روی چرخه ساده تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره بررسی گردید. محدوده داده‌های ورودی به نرم‌افزار EES مطابق جدول



(ج)

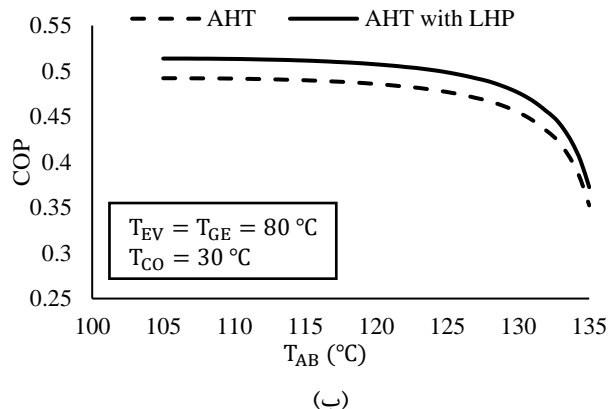
شکل ۸ تغییرات ECOP بر حسب دما الف- چگالنده ب- جاذب ج- تبخیرکن

بکارگیری لوله گرمایی حلقوی در چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی سبب کاهش تلفات اگزرژی چرخه می‌شود که در نتیجه آن ضریب عملکرد اگزرژی چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره افزایش می‌یابد.

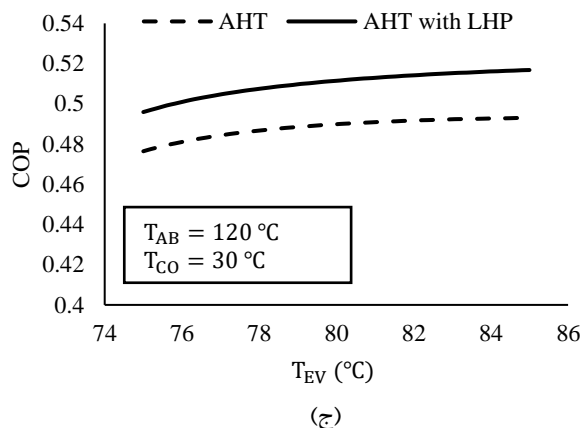
در شکل (۸) مقایسه تغییرات ضریب عملکرد اگزرژی (ECOP) چرخه AHT با و بدون بکارگیری LHP بر حسب دمای چگالنده، جاذب و تبخیرکن گزارش شده است. در پی افزایش دمای چگالنده، تلفات اگزرژی ناشی از گرمای خروجی از چگالنده بیشتر شده و ECOP چرخه کاهش می‌یابد. همچنین، ECOP بر حسب دمای جاذب در ابتدا با افزایش دمای جاذب به آرامی افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه رسیده و بعد از آن با افزایش بیشتر دما به سرعت کاهش یافته است. از طرف دیگر افزایش دمای تبخیرکن سبب بیشتر شدن ECOP چرخه شده است. روند تغییرات ECOP با آنچه در تحقیقات قبلی گزارش شده است، مطابقت دارد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج مذکور در قسمت‌های پیشین، بکارگیری لوله گرمایی حلقوی در چرخه تبدیل‌کننده گرمایی جذبی تک اثره مفید واقع شده و موجب بهبود عملکرد ترمودینامیکی چرخه گشته است. با توجه به بهبود عملکرد ترمودینامیکی حاصل از به کارگیری LHP در چرخه AHT امید است که این تغییر بهبود چرخه از نظر ترمواقتصادی را نیز در پی داشته باشد. جهت اطمینان از این مساله تحلیل ترمواقتصادی چرخه‌های مورد مطالعه ضروری است که نویسندگان در حال کار بر روی آن می‌باشند.

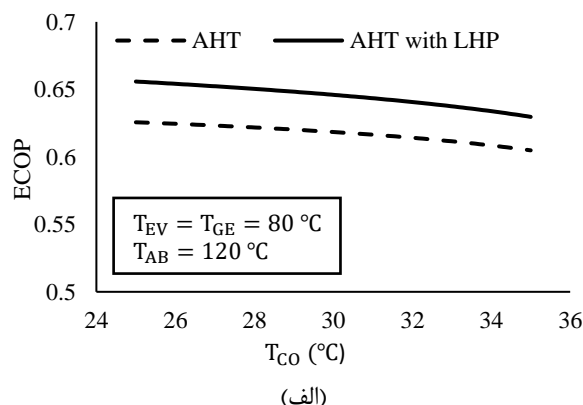


(ب)

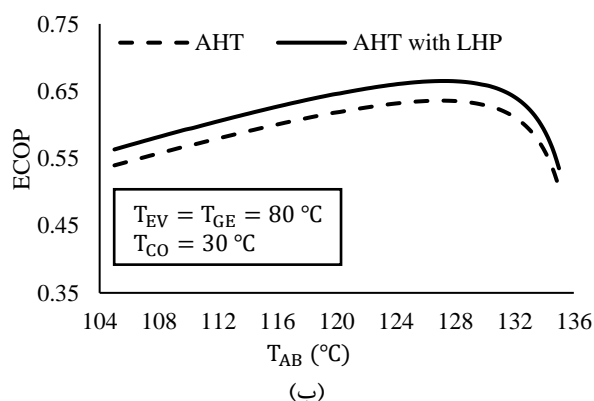


(ج)

شکل ۷ تغییرات COP بر حسب دما الف- چگالنده ب- جاذب ج- تبخیرکن



(الف)



(ب)

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

l	مایع
out	خروجی
P	پمپ
r	مبرد
rec	بازیابی شده
s	جامد
sat	اشباع
v	بخار

۷- مراجع

- [1] E. Garofalo, M. Bevione, L. Cecchini, F. Mattiussi, and A. Chiolerio, "Waste heat to power: Technologies, current applications, and future potential," *Energy Technology*, vol. 8, no. 11, p. 2000413, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/ente.202070113>.
- [2] I. E. Agency. World energy balances [Online] Available: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/data/data-00512-en>.
- [3] Ji, L., Shukla, S., Zuo, Z., Lu, X., Ji, X., & Wang, C. (2023). An overview of the progress of new working pairs in absorption heat pumps. *Energy Reports*, 9, 703–729. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.143>.
- [4] Cudok, F., Giannetti, N., Ciganda, J. L. C., Aoyama, J., Babu, P. D., Coronas, A., Fujii, T., Inoue, N., Saito, K., Yamaguchi, S., & Ziegler, F. (2021). Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 141, 110757. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110757>.
- [5] Ansari, K. A., Azhar, & Siddiqui, M. R. (2020). Exergy Analysis of Single-Effect Vapor Absorption System using design parameters. *Journal of Energy Resources Technology-transactions of the Asme*, 143(6). <https://doi.org/10.1115/1.4048594>.
- [6] Kurem, E., & Horuz, I. (2001). A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in absorption heat transformers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 28(3), 427–438. [https://doi.org/10.1016/s0735-1933\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/s0735-1933(01)00247-0).
- [7] Sachdeva, G., Rohilla, N., Kumar, M., & Khatak, P. (2023). Thermodynamic analysis of Absorption Heat Transformer. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/369660989_Thermodynamic_analysis_of_Absorption_Heat_Transformer.
- [8] Jose, J., & Hotta, T. K. (2023). A comprehensive review of heat pipe: Its types, incorporation

A	مساحت (m ²)
AHT	تبدیل کننده گرمایی جذبی
COP	ضریب عملکرد
C _p	گرمای ویژه (kJ/kgK)
Ė _x	آهنگ انرژی (kW)
ECOP	بازده قانون دوم
h	آنالتپی مخصوص (kJ/kg)
h _{cc}	ضریب همرفت در محفظه جبران (W/m ² K)
h _{fg}	آنالتپی تبخیر (kJ/kg)
k	رسانایی گرمایی (kW/mK)
L	طول لوله (m)
LHP	لوله گرمایی حلقوی
M	جرم مولی (g/mol)
ṁ	آهنگ جریان جرمی (kg/s)
N	تعداد لوله گرمایی
P	فشار (kPa)
Q̇	آهنگ انتقال گرما (kW)
R	شعاع لوله (m)
R̄	ثابت عمومی گازها (8.314 J/mol.K)
s	آنترپپی ویژه (kJ/kgK)
T	دما (°C یا K)
U	ضریب عمومی انتقال گرما (kW/m ² K)
Ẇ	توان (kW)
X	غلظت جرمی لیتیوم بروماید (wt %)

علائم یونانی

ε	کارایی یا تخلخل فیتیله
μ	لزجت دینامیکی (kg/s.m)
ρ	چگالی (kg/m ³)
ν	لزجت سینماتیکی (m ² /s)

زیرنویس‌ها

0	محیط
AB	جاذب
c	چگالنده لوله گرمایی حلقوی
cc	سطح پایین فیتیله
cc, sat	شرایط اشباع محفظه جبران
CO	چگالنده
D	تخریب
e	تبخیرکن لوله گرمایی حلقوی
EC	صرفه جو
EV	تبخیرکن
GE	ژنراتور
in	ورودی
L	تلفات

- [13] Tharayil, T., Asirvatham, L. G., Dau, M. J., & Wongwises, S. (2017). Entropy generation analysis of a miniature loop heat pipe with graphene–water nanofluid: Thermodynamics model and experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 407–421. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.035>.
- [14] Tharayil, T., Asirvatham, L. G., Dau, M. J., & Wongwises, S. (2017). Entropy generation analysis of a miniature loop heat pipe with graphene–water nanofluid: Thermodynamics model and experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 407–421. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.035>.
- [15] Palacios-Bereche, R., Gonzales, R., & Nebra, S. A. (2010). Exergy calculation of lithium bromide-water solution and its application in the exergetic evaluation of absorption refrigeration systems LiBr-H₂O. *International Journal of Energy Research*, 36(2), 166–181. <https://doi.org/10.1002/er.1790>.
- [16] Rivera, W., Cerezo, J., Rivero, R., Cervantes, J., & Best, R. (2003). Single stage and double absorption heat transformers used to recover energy in a distillation column of butane and pentane. *International Journal of Energy Research*, 27(14), 1279–1292. <https://doi.org/10.1002/er.943>.
- techniques, methods of analysis and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 42, 101860. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101860>.
- [9] Heredia, M., Siqueiros, J., Hernández, J., Juárez-Romero, D., Huicochea, A., & Gonzalez-Rodriguez, J. (2018). Energy saving into an absorption heat transformer by using heat pipes between evaporator and condenser. *Applied Thermal Engineering*, 128, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.017>.
- [10] Hamdan, M. O., & Elnajjar, E. (2009). Thermodynamic analytical model of a loop heat pipe. *Heat and Mass Transfer*, 46(2), 167–173. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0555-0>.
- [11] Pastukhov, V. G., & Maydanik, Y. F. (2019). Development and Study of a Loop Heat Pipe with Several Heat Sources of Different Power. *High Temperature*. <https://doi.org/10.1134/s0018151x19050122>.
- [12] M. Hamdan, F. M. Gerner and H. T. Henderson, "Steady state model of a loop heat pipe (LHP) with coherent porous silicon (CPS) wick in the evaporator," Nineteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2003., San Jose, CA, USA, 2003, pp. 88-96. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1194344>.

طراحی بهینه یک ساختار جدید جذب کننده ساندویچی برای سپر جلو خودرو

چکیده: در تحقیق حاضر، با ارائه ساختار جدیدی از جذب کننده ها تلاش شده است عملکرد آن نسبت به جذب کننده یکپارچه پلیمری که در سپر خودروها بکار گرفته می شود، بهبود یابد. جذب کننده ارائه شده ساختاری ساندویچی دارد بطوریکه پوسته ها و هسته به ترتیب از جنس فوم آلومینیومی و فوم پلیمری می باشند. پژوهش حاضر با استفاده از روش اجزا محدود حل و جهت انجام شبیه سازی ها از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین شبیه سازی مسئله مطابق استاندارد ای سی ای آر ۰۴۲ (E.C.E-R042) انجام گرفته است. در نهایت با تحلیل نتایج مشاهده گردید چگالی نسبت به ضخامت تاثیر بیشتری بر عملکرد جذب کننده دارد. در تمام حالات ساندویچی بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل نسبت به جذب کننده پلیمری کاهش داشته است و بیشینه نیرو برخورد در بازه محدودی از چگالی پوسته نسبت به جذب کننده پلیمری کمتر بوده است. در نهایت با استفاده از روش تاگوچی بهترین ساختار برای تحمل بیشینه نیروی برخورد، بالاترین تنش فون مایسس و کرنش پلاستیک معادل محاسبه گردید که جذب کننده ساندویچی با ضخامت پوسته ۲۵ میلیمتر و چگالی ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان مورد منتخب معرفی شد.

واژه‌های راهنما: جذب کننده سپر، برخورد سرعت پایین، اجزا محدود، ساختار ساندویچی، فوم آلومینیومی، روش تاگوچی، آنالیز واریانس

علی افراسیابی

دانشجوی کارشناسی ارشد

حسین محمدی*

دانشیار

کامیار هاشم‌نیا

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه شیراز، شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

Ali Afrasiabi
MSc. Student

Hossein
Mohammadi*
Associate Professor

Kamyar
Hashemnia
Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Shiraz University,
Shiraz

Optimum designing of a new sandwich absorber structure for car front bumper

Abstract: In this study, a novel absorber design is presented to enhance performance over the conventional polymer variant in car bumpers. The new absorber adopts a sandwich structure with aluminum foam shells and a polymer foam core. Finite Element Method (FEM) and Abaqus software were employed, conforming to the E.C.E-R042 standard. Analysis indicates density has a more significant impact on performance than thickness. Across sandwich configurations, both maximum von Mises stress and plastic strain were significantly reduced compared to the polymer absorber. The maximum impact force, within a specified shell density range, was lower than the polymer counterpart. The optimal structure for maximum impact force, von Mises stress, and the plastic strain was determined using the Taguchi method. The selected item: sandwich absorber, 25mm shell thickness, and 225 kg/m³ density.

Keywords: Bumper absorber, Low-speed impact, Finite Element Method (FEM), Sandwich structure, Aluminum foam, Taguchi method, Analysis of Variance (ANOVA)

۱- مقدمه

ای را در کامپیوتر شبیه سازی کرد. روش اجزا محدود، بر اساس حل عددی مسائل کاملاً پیچیده همراه با شرایط مرزی مختلف را شبیه سازی می کند.

از جمله اولین تحقیقات مربوط به بهبود عملکرد سیستم سپر توسط چئون و همکارانش، با هدف تنظیم مصرف سوخت خودروهای سواری و کاهش گازهای گلخانه ای بدون کاهش ایمنی خودروهای سواری صورت گرفت. آن ها با استفاده از مواد مرکب در سپر خودرو مطالعات خود را آغاز کردند. برای نمونه سپر خودرویی را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش خمش شبه استاتیکی را بر روی سپر از جنس فولاد انجام دادند و بار دیگر تست را بر روی سپری مشابه، با جنس ماده مرکب اپوکسی با پارچه الیاف کربنی تکرار کردند. همین آزمایشات را بصورت عددی با روش اجزا محدود مجدداً انجام و نتایج هر دو روش نشان داد بجز افزایش مقاومت خمشی سپر، کاهش وزن محسوسی نیز در سپر جدید وجود دارد [۴].

سایوان و همکاران، با بررسی روش ها و دیدگاه های مختلف به بهینه سازی پوسته سپر با جنس ماده مرکب پرداختند. آن ها در انتها بهترین روش را جهت توسعه پوسته سپر انتخاب و پیشنهاد دادند بهترین ماده جهت جذب ضربه، وزن کم و زیبایی، ماده مرکب پایه پلیمر است [۵]. لیو و دی با استفاده از ضربه زننده ای آزمون برخورد با سپر خودرو را انجام دادند. ضربه زننده در هر آزمایش به ترتیب از سه فاصله متفاوت ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر از سپر بصورت سقوط آزاد به وسط آن بصورت کاملاً عمودی برخورد کرد. نیرو عکس العمل در انتهای جداکننده ها و جابجایی در محل اتصال جداکننده ها و سپر اندازه گیری شد. نتایج با پاسخ های عددی و تحلیلی همخوانی قابل قبولی داشت [۶].

داوودی و همکاران، پژوهشی بر روی میزان آسیب پا، لگن، بالاتنه و سر عابر پیاده با خودرو حین تصادف داشتند و تلاش کردند راه حلی برای کاهش آسیب عابرین پیاده ارائه دهند. در این پژوهش از بالشتک از جنس ماده مرکب اپوکسی با الیاف تقویت شده به شکل بیضوی به جای جذب کننده فومی از جنس پلی پروپیلن منبسط شده استفاده شد. همچنین در پژوهش دیگر آن ها با در نظر گرفتن فاکتورهای کمی و کیفی مدنظر خود در انتخاب بهترین سپر از لحاظ ایمنی و عملکرد، هشت سپر با سطح مقطع متفاوت اما با منحنی یکسان در هندسه جلو سپر، ضخامت، ابعاد و جنس یکسان مورد بررسی قرار دادند. آن ها با شبیه سازی تست برخورد سرعت پایین در نرم افزار آباکوس سپرها را مورد ارزیابی قرار دادند و با بررسی نتایج، مناسب ترین سطح مقطع را معرفی کردند [۷، ۸]. کوریچو و همکاران، تلاش کردند سپری با

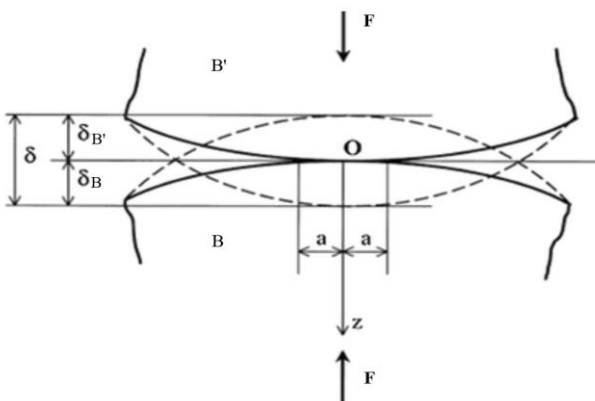
برخورد با سرعت پایین بطور قابل توجهی به دلیل حرکت آهسته در ترافیک سنگین و یا در هنگام پارک کردن خودرو رخ می دهد. برخی از سپرها به درستی طراحی نمی شوند و در هنگام برخورد با سرعت پایین نمی توانند از آسیب به قطعات مختلف جلوگیری کنند و یا استحکام کافی برای مهار نیروی وارده در طول برخورد را ندارند [۱].

سیستم سپر خودرو اجزا مختلفی دارد که یکی از آن ها جذب کننده نام دارد. این قسمت دومین جزء اصلی سیستم سپر پس از پوسته می باشد که پشت پوسته سپر قرار می گیرد. وظیفه اصلی آن مهار قسمتی از نیروی وارده برخورد می باشد. غالباً جنس آن ها از فوم های فشرده پلیمری می باشد که برای ساخت آن ها از فرآیند های خاصی استفاده شده است [۲].

در مجموع فوم ها به سه دسته پلیمری، سرامیکی و فلزی تقسیم می شوند. تلاش های دانشمندان متالوژی برای ایجاد تخلخل در فلزات باعث دستیابی به مواد مهندسی به نام فوم های فلزی شد. آن ها با ادامه آزمایشات و تحقیقات خود بر روی مواد پایه فوم ها دریافتند بیشتر فلزها توانایی تبدیل به ساختار فومی را دارند، منتهی با روش های متفاوت و گاهاً دشوار. مواد پایه این فوم ها را می توان از فلزات مختلفی مانند آلومینیوم، فولاد، نیکل، مس، روی، تیتانیوم، منیزیم و آلومینیوم انتخاب کرد. به دلیل چگالی پایین نسبت به سایر فلزات، در دسترس بودن و نقطه ذوب پایین رایج ترین آن ها آلومینیوم می باشد. برای انتخاب ماده زمینه یا پایه فوم ها نمی توان تنها به فلزات مذکور در حالت خالص و آلیاژی که از آن ها ساخته می شود اکتفا کرد بلکه از مواد مرکب پایه فلزی و ترکیبات بین فلزی مانند نیکل تیتانیوم نیز می توان استفاده کرد که در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. فوم های فلزی دارای خواص جدید فیزیکی، حرارتی، صوتی، مقاومت بالا و چگالی کم هستند [۳].

با پیشرفت علم و تولید مواد جدید با ویژگی های منحصر بفرد، محققان و دانشمندان زیادی در صنعت خودرو در تلاش هستند با استفاده از مواد جدید و طراحی منحصر بفرد عملکرد سیستم سپر را بهبود ببخشند. بدین منظور اولین مطالعات و تحقیقات برای بهبود عملکرد سیستم سپر روی مدل های تجربی صورت گرفت. به دلیل پارامترهای مختلف، محدودیت ها و هزینه های زیاد، استفاده از مدل های تجربی در همه حالات امکان پذیر نبود. اخیراً با ظهور کامپیوترهای قدرتمند، روش های جدید حل و نرم افزارهای قدرتمند شبیه سازی می توان هر پدیده

در این تحقیق فقط جزء نرمال سرعت نسبی خطی مورد توجه است. با تماس دو جسم با یکدیگر مطابق شکل (۱)، نقطه تماس O بوجود می آید به طوری که در مقایسه با بقیه جسم ابعاد خیلی کمی دارد و به مرور دو جسم در یکدیگر فرو می‌روند که منجر به توسعه نقطه تماس می شود و به سطح تماس تبدیل می شود. از برخورد دو جسم به یکدیگر، فرورفتگی نسبی بین دو جسم به وجود می آید که ناشی از نیروی برخورد بین دو جسم است. نیروی برخورد بوجود آمده حین برخورد مطابق رابطه (۱ الف) بیان می شود. همچنین میزان فرورفتگی کل از رابطه (۱ ب) محاسبه می گردد [۱۴].



شکل ۱ نفوذ دو جسم B و B' حین برخورد با یکدیگر [۱۵]

$$F_{imp} = -m_B \ddot{\delta}_B = -m_{B'} \ddot{\delta}_{B'} \quad (الف)$$

$$\delta = \delta_B + \delta_{B'} \quad (ب)$$

جذب کننده سیستم سپر از جنس فوم می باشد. مدل فوم له شونده برای فوم های مختلف ارائه شده است [۱۶]. این مدل برای مدل سازی فوم هایی که معمولاً ساختارهای جذب انرژی هستند یا مواد خردشونده به غیر از فوم ها، مانند چوب استفاده می شود. در این پژوهش برای مدل سازی رفتار پلاستیک فوم آلومینیوم از سخت شوندگی همسانگرد استفاده شده است. برای رفتار پلاستیک فوم ها تابع تسلیم یا سطح تسلیم در مدل فوم له شونده با سخت شوندگی همسانگرد مطابق شکل (۲)، نمایش داده شده است که یک بیضی در صفحه تنش $p-q$ را نشان می دهد. همچنین معادله بیضی مذکور در رابطه (۲ الف) نمایش داده شده است. سطح تسلیم در سخت شوندگی همسانگرد پس از ورود به ناحیه پلاستیک بی آنکه جابجا شود، بزرگ می شود. در اصل این مدل برای فوم های فلزی ارائه شده است.

طراحی جدید بسازند که عملکرد بهتری نسبت به سپرهای پیشین از خود نشان دهد. آن ها با مطالعه بر روی نوعی ماده مرکب تلاش کردند سپری جدید بسازند و با استفاده از نمودار نیرو زمان و میزان آسیب، آن را با سپر فولادی مقایسه کنند. با استفاده از نرم افزار آباکوس، این سپر را شبیه سازی و با انجام مقایسه به این نتیجه رسیدند که عملکرد سپر با جنس ماده مرکب بسیار بهتر از فولادی می باشد [۹]. خدکار و همکاران، به تحلیل تجربی و عددی شبه استاتیکی تیر ضربه گیر سپر خودرو پرداختند. آن ها در آزمایشگاه سه تیر را که هر کدام از یک نوع خاص از آلایژ فولاد بودند، تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار دادند. آزمایش را به روش اجزا محدود تکرار کردند. نتایج دو روش با درصد کم خطا به یکدیگر شباهت داشتند و ماده منتخب برای تیر ضربه گیر پیشنهاد شد [۱۰]. لیو و همکاران پاسخ ضربه پنل ساندویچی را تحت ضربه های منفرد و مکرر مطالعه کردند و تأثیر ضخامت ورق های جلو و عقب و فوم آلومینیوم را بر ظرفیت حمل و جذب انرژی بررسی کردند [۱۱]. یینگ و همکاران عملکرد سازه های فلزی جدار نازک را با استفاده از فوم های آلومینیومی که سبک وزن و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند بهبود بخشیدند [۱۲]. هو و همکاران طراحی بهینه ای را برای تیر ضربه گیر سپر با استفاده از ورقه های فلزی فیبری^۱ انجام دادند که منجر به بهبود عملکرد تحت تست برخورد سرعت پایین گردید [۱۳]. بررسی مراجع نشان دهنده آن است که در اغلب پژوهش ها کوشیده شده است با تغییر ماده یا ساختار قسمتی از سیستم سپر و بررسی پارامترهای مختلف که تأثیر گذار هستند، عملکرد آن را بهبود ببخشند.

در پژوهش حاضر تلاش شده است ساختار جدیدی از جذب کننده ها ارائه و با در نظر گرفتن اثر گذاری چگالی و ضخامت پوسته های جذب کننده بر روی پارامترهای مدنظر بررسی گردد و نهایتاً بهینه ترین حالت جذب کننده بین حالت های بررسی شده با استفاده از روش تاگوچی مشخص گردد. همچنین تست برخورد در سرعت بالاتر تکرار می گردد تا تأثیر آن به عنوان یک پارامتر بر روی جذب کننده بررسی شود.

۲- مبانی نظری

۲-۱- روابط و معادلات حاکم بر مسئله

در هر لحظه در طول برخورد، نرخ تغییر جزء نرمال سرعت نسبی به نیروی F_{imp} که در نتیجه به جابجایی δ منجر می شود؛ بستگی دارد [۱۴].

¹ Fiber Metal Laminates (FMLs)

۲-۲- تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری^۱

این مطالعه از روش تحلیل رابطه ای خاکستری برای بررسی اثر همزم آن چند پارامتر بر پاسخ خروجی استفاده کرده است. این روش برای تعیین مقدار بهینه برای هر پارامتر با تبدیل آن‌ها به متغیر پس از انجام شبیه سازی یا آزمایش و استخراج پارامترها استفاده می شود. این رویکرد امکان تعیین یک مقدار بهینه برای هر پارامتر را در حین در نظر گرفتن تعاملات بین آن‌ها فراهم می کند [۱۸].

این روش اولین بار در تحقیق [۱۹] معرفی و توسعه یافت. برای استفاده از روش تحلیل رابطه خاکستری، اولین مرحله شامل نرمال سازی داده‌ها بین ۰-۱ برای ایجاد یک رابطه خاکستری می باشد. سپس این روش از معادله های (۵ الف) و (۵ ب) برای تعیین مقدار بهینه برای هر پارامتر بر اساس اینکه مقدار کوچکتر یا بزرگتر بهتر است، استفاده می کند. این رویکرد امکان تعیین یک مقدار بهینه را برای هر پارامتر در حالی که تعاملات بین آن‌ها در نظر گرفته می شود کاربرد دارد [۱۸].

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}; \quad (الف ۵)$$

$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b$

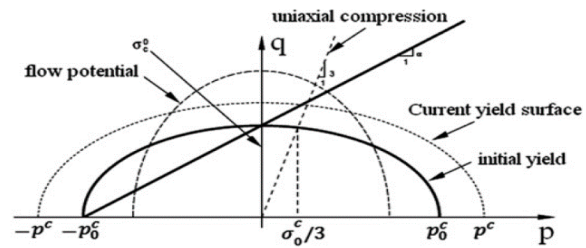
$$x_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}; \quad (ب ۵)$$

$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b$

که در آن a و b به ترتیب تعداد شبیه سازی ها یا آزمایش - های انجام شده و تعداد پارامترهای موثر در هر شبیه سازی یا آزمایش می باشد. x_{ij} مقدار پس از تولید رابطه خاکستری و y_{ij} مقدار اصلی برای شبیه سازی i ام در پارامتر j ام است [۱۶]، [۲۰]. x_{0j} ایده آل ترین گزینه نرمال شده در بین تمامی شبیه سازی ها در پارامتر موثر j ام است. در مرحله بعد برای نشان دادن اینکه x_{ij} چه میزان به x_{0j} نزدیک است از ضریب رابطه خاکستری^۲ استفاده می شود که در رابطه (۶ الف) بیان می شود. شایان ذکر است ضریب رابطه خاکستری بزرگتر به x_{0j} نزدیکتر است [۱۶، ۱۸، ۲۰].

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0ij} + \zeta \Delta_{max}}; \quad (الف ۶)$$

$\zeta \in [0, 1]$



شکل ۲ سطح تسلیم در صفحه تنش p - q برای فوم له شونده با سخت شونده گی همسانگرد [۱۷]

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B = 0 \quad (الف ۲)$$

$$B = \alpha p_c \quad (ب ۲)$$

که در رابطه (۲ الف)، p و q به ترتیب به عنوان تنش فشاری میانگین و تنش فون مایسس معرفی می شوند و در رابطه (۲ ب)، p_c مقاومت تسلیم در فشار هیدرو استاتیکی و α اندازه حدودی بردار منحنی بیضی تسلیم در صفحه تنش p - q را نشان می دهد و با نام ضریب شکل شناخته می شود (رابطه ۳ الف).

$$\alpha = \frac{3K}{\sqrt{9-K}} \quad (الف ۳)$$

$$K = \frac{\sigma_0^c}{p_0^c} \quad (ب ۳)$$

رابطه (۳ ب)، معرف نسبت تنش می باشد و σ_0^c و p_0^c به ترتیب معرف تنش تسلیم اولیه در فشار تک محوره و تنش تسلیم اولیه در فشار هیدرواستاتیک است. پارامتر β مخصوص مدل فوم له شونده با سخت شونده گی همسانگرد می باشد که در رابطه (۴ الف) آورده شده است. همچنین مطابق رابطه (۴ ب)، نسبت پواسون پلاستیک، بیانگر نسبت کرنش پلاستیک عرضی به طولی تحت بارگذاری فشاری تک محوره می باشد. برای اکثر فوم ها با چگالی پایین نسبت پواسون پلاستیک نزدیک صفر است و $\beta \sim 2/12$ می شود.

$$\beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1-2\nu_p}{1+\nu_p}} \quad (الف ۴)$$

$$\nu_p = \frac{3-K^2}{6} \quad (ب ۴)$$

² Grey Relational Coefficient (GRC)

¹ Grey Relational Analysis (GRA)

(۶ ب)

$$\Delta_{0ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$$

۳- شبیه سازی

در محاسبات ضریب تمییز γ معمولاً مقدار ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. همچنین Δ_{min} و Δ_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر Δ_{0ij} را در بین تمام شبیه سازی ها در پارامتر موثر Z ام نشان می‌دهند. ضریب رابطه خاکستری بالاتر نشان دهنده نزدیکی بیشتر پارامتر مربوطه به مقدار بهینه است و درجه رابطه خاکستری^۱ را می‌توان با استفاده از رابطه (۷) پس از محاسبه ضرایب رابطه خاکستری بدست آورد.

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^b \omega_j \xi_{ij} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $\sum_{j=1}^b \omega_j = 1$ ، که در آن ω_j ضریب وزنی برای پارامتر Z ام است. با تبدیل چندین ضرایب رابطه ای خاکستری به یک درجه رابطه خاکستری برای هر شبیه سازی، می‌توان تعیین کرد که درجه رابطه خاکستری بالاتر مربوط به نزدیکی بیشتر به حالت بهینه می‌باشد [۲۱].

۲-۳- آیین نامه برخورد سرعت پایین

آیین نامه و استانداردهای زیادی جهت تست برخورد خودروها وجود دارد. در پژوهش حاضر از توافقنامه اعلام شده در سازمان ملل متحد (ای سی ای) استفاده شده است. مقررات شماره ۴۲ این توافقنامه در مورد تایید تجهیزات و قطعات حفاظتی مستقر در قسمت های جلو و عقب وسایل نقلیه موتوری در برخورد سرعت پایین برای اطمینان از اینکه ضربه های جزئی صدمه جدی وارد نمی‌کند، اعمال شده است. منطقه آزمایش باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا ضربه زننده و خودرو را در خود جای دهد تا پس از برخورد اجازه جابجایی به هر دو را بدهد. تجهیزات تست وسیله نقلیه باید بر روی یک سطح افقی، صاف و صلب قرار گیرند.

همچنین خودرو باید در حال سکون باشد، چرخ های جلو در وضعیت مستقیم قرار گیرند و ترمزها باید جدا شوند. ضربه زننده یک سازه صلب است که اصولاً از جنس فولاد سخت شده می‌باشد و جرم آن باید برابر با جرم بدون بار خودرو مورد آزمایش باشد. ضربه زننده باید با سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت به خودرو برخورد کند و هر دو دقیقاً در یک راستا با یکدیگر برخورد کنند [۲۲].

اجزای اصلی سیستم سپر مطابق شکل (۳)، به ترتیب پوسته، جذب کننده، تیر ضربه گیر و جداکننده‌ها می‌باشند که ضخامت پوسته، تیر ضربه گیر و جداکننده‌ها به ترتیب ۳/۱، ۲/۴۵ و ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر، ضربه زننده همراه با قید جسم صلب مدلسازی شده است. پوسته سپر از پلی اتیلن چگالی بالا و تیر ضربه گیر و جداکننده‌ها از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ می‌باشند که خواص آن‌ها در جدول (۱)، گزارش شده است. جذب کننده پلیمری از جنس فوم پلی پروپیلن گسترده و ضخامت آن ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد، درحالیکه جذب کننده جدید مطابق شکل (۴)، ساختاری ساندویچی دارد، بطوریکه هسته همان جذب کننده پلیمری و پوسته ها از جنس فوم آلومینیومی می‌باشند که خواص آن‌ها در جدول (۲)، آورده شده است. همچنین حالت خاصی جهت بررسی عملکرد جذب کننده انتخاب شده است، به گونه ای که نیمی از ضخامت پوسته دارای چگالی ۱۵۰ و نیمی دیگر ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد و در مجموع چگالی آن ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. دو پارامتر موثر در شبیه سازی‌ها یعنی ضخامت و چگالی پوسته جذب کننده و همچنین ضریب اصطکاک بین سطوح در جدول (۳)، قابل مشاهده هستند. مدت زمان شبیه سازی برخورد ۰/۱۳ ثانیه و جرم خودرو ۱۳۰۰ کیلوگرم در شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، ابتدا طرح هندسی اولیه سیستم سپر خودرو با تمام اجزا و ضربه زننده در نرم افزار سالدورکس ترسیم و جهت استفاده به نرم افزار آباکوس منتقل و در گام بعد موادی را که مدنظر می‌باشند بصورت کامل در آباکوس تعریف و به قسمت مربوطه اختصاص گردید. اجزا مختلف مطابق با استانداردهای گفته شده جایگذاری و تنظیم شد. سپس قیود، شرایط اولیه و مرزی لحاظ گردید. در این پژوهش تماس بین ضربه زننده و سپر از نوع Surface to surface contact در نظر گرفته شده است. همچنین جهت جلوگیری از جدا شدن اجزا سپر بین آن‌ها قید Tie تعریف شده است و برای ضربه زننده قید Rigid body در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مطابق با آیین نامه برخورد سرعت پایین طوری تنظیم شده است که ضربه زننده و خودرو در یک راستا با یکدیگر برخورد می‌کنند. از المان C3D8R برای سپر و المان R3D4 برای ضربه زننده استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع المان برای ضربه زننده

¹ Grey Relational Grade (GRG)

جدول ۲ خواص مکانیکی و مشخصات فوم‌های تشکیل دهنده جذب کننده [۲۵،۲۶]

فوم	مدول الاستیسیته (Mpa)		نسبت پواسون		چگالی (kg/m ³)
	نسبت پواسون	نسبت پواسون	نسبت پواسون	نسبت پواسون	
فوم پلی پروپیلن گسترده	۵/۱۳۲	۰	۰	۰	۷۰
فوم آلومینیومی	۱۵۰۰	۰/۳	۰/۳	۰/۰۵	۱۵۰
					۳۰۰

جدول ۳ پارامترهای موثر و مهم استفاده شده در شبیه سازی‌ها

۲۵، ۲۰، ۱۵	ضخامت پوسته جذب کننده (mm)
۳۰۰، ۲۲۵، ۱۵۰	چگالی پوسته جذب کننده (kg/m ³)
۰/۳	ضریب اصطکاک بین سطوح

۴- اعتبار سنجی

۴-۱- استقلال از شبکه

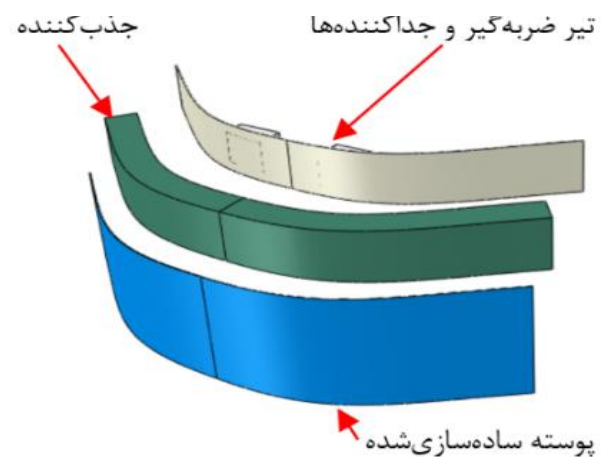
بررسی استقلال از شبکه یکی از با اهمیت ترین بخش های هر شبیه سازی می باشد. بررسی این مورد نه تنها در نرم افزار آباکوس بلکه در تمامی نرم افزارهای تحلیلی که دامنه را گسسته سازی^۱ می کنند اهمیت فراوانی دارد. بطور کلی می توان بیان کرد اگر در شبیه سازی، مطالعه استقلال از شبکه صورت نگرفته باشد، پاسخ های بدست آمده به هیچ عنوان قابل استناد نمی باشد. به بیان دیگر استقلال از شبکه یعنی انتخاب بهینه ترین مش بندی ممکن برای دریافت پاسخ های قابل قبول.

در این پژوهش نیروی حاصل از برخورد، یکی از متغیرهای مهم می باشد که در تعداد المان های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. ابتدا شبیه سازی با یک مش نسبتاً درشت انجام و متغیر مورد نظر استخراج شد. جهت صرفه جویی در وقت و هزینه محاسباتی، تعداد المان مدل یکی مانده به آخر که مورد تایید واقع شد، جهت شبیه سازی انتخاب گردید.

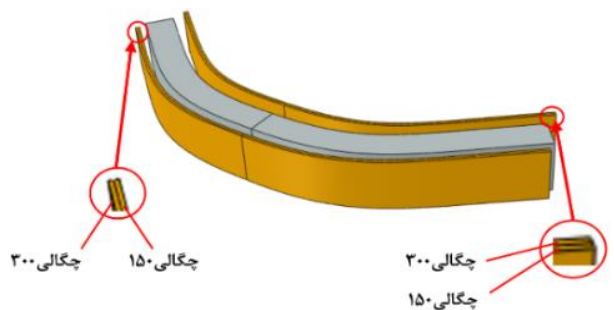
در تحقیق حاضر جهت بررسی استقلال از شبکه، ۵ مدل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که تعداد المان ها، در نمودار شکل (۵) آورده شده است. همچنین مدل های بررسی شده، جذب کننده سیستم سپر در حالت پلیمری و بدون ساختار ساندویچی می باشند.

این می باشد که پس از طراحی ضربه زننده در سالدورکس و آمدن به آباکوس تبدیل به پوسته شده است و قید جسم صلب به آن اعمال شده است. لذا به این دلیل از المان R3D4 استفاده شده است.

نرم افزار آباکوس با حل عددی مسئله برخورد، با استفاده از حلگر Abaqus Explicit شبیه سازی را انجام داد که می توان آن را همراه با نتایج خروجی مشاهده و مورد بررسی قرار داد. در گام بعد برای بررسی پارامتر سرعت و تاثیر آن بر روی جذب کننده، شبیه سازی با سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت تکرار گردید.



شکل ۳ سیستم سپر در حالت اصلی به تفکیک اجزا



شکل ۴ جذب کننده با ساختار ساندویچی به همراه پوسته با ساختار ترکیبی

جدول ۱ خواص مکانیکی و مشخصات مواد تشکیل دهنده سیستم سپر [۲۳،۲۴]

ماده	مدول الاستیسیته (Gpa)	نسبت پواسون	چگالی (kg/m ³)
پلی اتیلن چگالی بالا	۱/۱۸	۰/۴۶	۹۵۰
آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳	۷۰	۰/۳	۲۷۷۰

¹ Discretization

۵- بحث و نتایج

جهت مطالعه تاثیر ضخامت پوسته جذب کننده با ساختار ساندویچی از ۳ ضخامت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی متر با دو ساختار پوسته بصورت پلیمری و ترکیبی استفاده شده است. ضخامت و چگالی پوسته دو پارامتر مجزا هستند که تاثیر جداگانه ای بر عملکرد سیستم سپر حین برخورد دارند. با در نظر گرفتن ۳ پارامتر بیشینه نیروی برخورد، بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل برای جذب کننده به بررسی آنها در چگالی و ضخامت های مختلف جذب کننده پرداخته شده، همچنین مقایسه ای بین حالات ساندویچی و جذب کننده پلیمری صورت گرفته است و در نهایت بهینه ترین حالت بین موارد بررسی شده انتخاب گردیده است.

در ادامه به تعریف پارامتری بی بعد پرداخته شده است که در نمودارها و نتایجی که گفته خواهد شد، کاربرد دارد و از آن استفاده فراوانی می شود.

نسبت ضخامت: این پارامتر بی بعد مربوط به ضخامت پوسته های جذب کننده می شود که عبارت است از:
نسبت ضخامت پوسته به هسته جذب کننده. این پارامتر با نماد t_{SC} نشان داده شده است (رابطه (۸)).

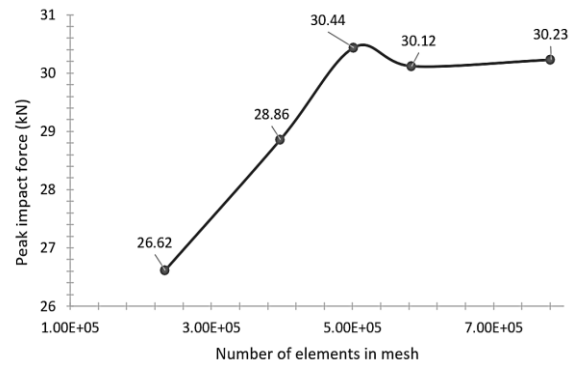
$$t_{SC} = \frac{t_{face-sheet}}{t_{core}}; t_{SC} \geq 0 \quad (8)$$

جدول ۴ نامگذاری مدل های بررسی شده

نام اختصاری مدل	توضیح
Simple	جذب کننده پلیمری
SanR-T	جذب کننده ساندویچی با ضخامت R و چگالی T
HybridR	جذب کننده ساندویچی با پوسته ترکیبی با ضخامت R

به دلیل بالا بودن تعداد مدل های بررسی شده، جهت سهولت در نامگذاری مدل ها مطابق جدول (۴) هر مدل بصورت اختصاری کدگذاری شده است.

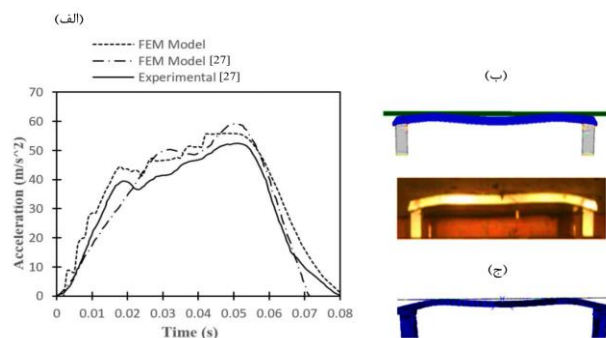
۵-۱- تأثیرات ضخامت و چگالی پوسته جذب کننده بر بیشینه نیروی برخورد



شکل ۵ مطالعه استقلال از شبکه با بررسی بیشینه نیروی برخورد

۴-۲- اعتبارسنجی مدل سازی سپر حین تست برخورد

با هدف اطمینان بخشیدن به روش مدل سازی سپر و همچنین نحوه شبیه سازی برخورد سرعت پایین، یکی از پژوهش های پیشین که در این زمینه انجام گرفته است در نظر گرفته شد و بخشی از مطالعه آن که بر روی برخورد سرعت پایین سپر خودرو بود مورد ارزیابی قرار گرفت. در بخشی از پژوهشی که توسط سان و همکاران [۲۷]، صورت گرفته، ابتدا سپر را مطابق استاندارد IIHS^۱ بصورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند و سپس تست برخورد را در نرم افزار، شبیه سازی و پس از حل با نتایج تجربی مقایسه کردند که پاسخها تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند. برای دقت در حل مسئله و بدست آمدن جوابی مشابه با مقاله به تبعیت از آن از المان هایی با سایز ۳mm استفاده شده است.



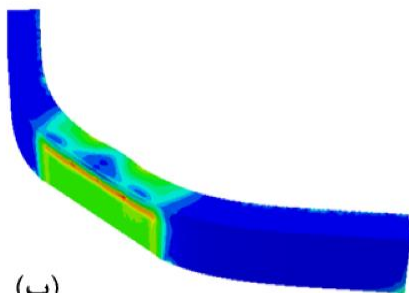
شکل ۶ (الف) شتاب بر حسب زمان و (ب) مقایسه نتایج گزارش شده منبع [۲۷] با (ج) نتیجه شبیه سازی ارائه شده

طبق نتایج گزارش شده در بخشی از تحقیق سان و همکاران، که به مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی برخورد سرعت پایین سپر پرداختند، همانطور که در نمودار شکل (۶) قابل مشاهده می باشد، روند تغییرات شتاب در طول برخورد مطابقت خوبی با نتیجه شبیه سازی انجام شده دارد.

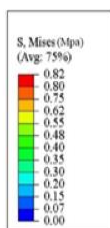
¹ Insurance Institute For Highway Safety

دو پارامتر مذکور یعنی بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل حین برخورد از مواردی هستند که می توانند حائز اهمیت باشند. با تغییر ساختار در جذب کننده سیستم سپر انتظار می رود که تغییراتی در عملکرد سپر حین برخورد بروز دهد. با وجود آنکه بیشترین نیروی برخورد در حالات مختلف بررسی شد، اما این موضوع حائز اهمیت می باشد که عملکرد جذب کننده نیز مطالعه شود. بدین منظور، تصمیم گرفته شد در زمانی که بحرانی ترین وضعیت سپر و بیشترین نیروی برخورد و فشردگی رخ می دهد، بررسی ها صورت گیرد. بدین منظور بررسی کانتور تنش فون مایسس هسته جذب کننده در زمان مذکور انجام شد. شکل (۸)، تصویری از جذب کننده پلیمری و هسته جذب کننده در حالتی که پوسته ساختاری ترکیبی دارد و ضخامت آن ۲۵ میلیمتر می باشد آورده شده است.

(الف)



(ب)

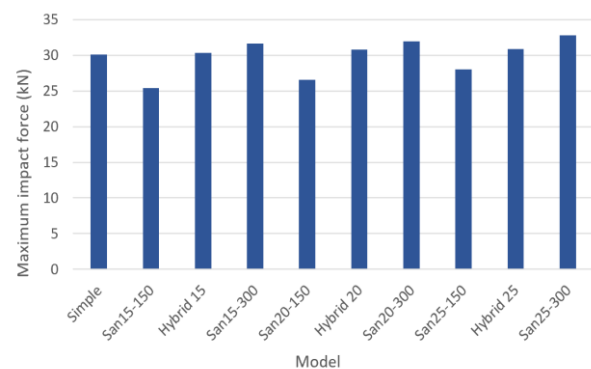


شکل ۸ تنش فون مایسس؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلیمتر و چگالی پوسته ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب

کرنش پلاستیک معادل در ناحیه جدایش برای تمامی حالات بررسی گردید. برای نمونه مطابق شکل (۹) مقایسه ای بین هسته جذب کننده ساندویچی ($t_{sc} = 0.25$) و جذب کننده پلیمری با در نظر گرفتن کانتور کرنش پلاستیک معادل انجام گرفته است. با بررسی تمامی کانتورها مشاهده گردید، تنش فون مایسس جذب کننده کاهش پیدا کرده است بطوریکه با افزایش چگالی پوسته جذب کننده، مقدار آن کمتر شده است، همچنین می توان

در ابتدا تغییرات نیروی برخورد برای حالتی که سیستم سپر همراه با جذب کننده پلیمری می باشد، بررسی و سپس برای حالت های مختلف دیگر با چگالی و ضخامت متفاوت پوسته جذب کننده مورد بررسی قرار گرفت. با یک بررسی جزئی بصری نمودار می توان متوجه شد که روند تمام حالات، مشابه یکدیگر می باشند.

با بررسی نمودار شکل (۷)، می توان به این نتیجه دست یافت که در چگالی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بیشینه نیروی برخورد نسبت به جذب کننده پلیمری که مقدار آن ۳۰/۱۲۱ کیلو نیوتون می باشد، کاهش داشته است. همچنین در حالتی که چگالی پوسته جذب کننده، ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد، مقدار پارامتر مذکور تفاوت زیادی با جذب کننده پلیمری ندارد و تقریباً برابر می باشد اما در چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب این مقدار نسبت به جذب کننده پلیمری مقدار بیشتری را نشان می دهد. در مجموع بیشترین نیروی برخورد در یک ضخامت و سرعت برخورد ثابت برای پوسته جذب کننده با افزایش چگالی، افزایش می یابد. همچنین بیشترین نیروی برخورد در یک چگالی و سرعت برخورد ثابت همیشه روند افزایشی را از خود نشان می دهد اما روند رشد آن نسبت به افزایش چگالی کمتر می باشد. نیروی برخورد در چگالی های بالای پوسته از جذب کننده پلیمری پیشی گرفت که نشان دهنده این موضوع می باشد، در افزایش چگالی پوسته جذب کننده محدودیت یا به عبارت دیگر بازه مجازی وجود دارد و متناسب با چگالی و ضخامت هسته جذب کننده، می توان مقدار آن را افزایش داد.



شکل ۷ بیشینه نیروی برخورد در ضخامت و چگالی های مختلف پوسته

۵-۲- تاثیرات ضخامت و چگالی پوسته جذب کننده بر بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل

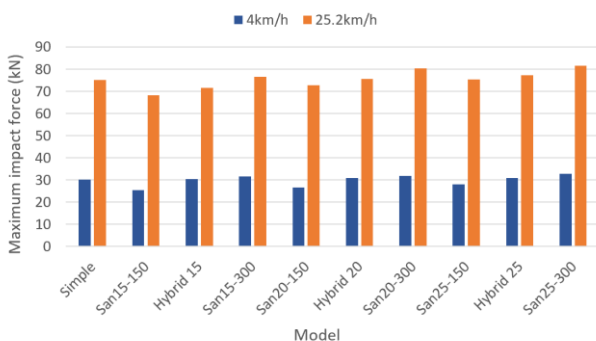
برای آگاهی از نتایج تمام مدل‌ها، در جدول (۵)، میزان کاهش بیشینه تنش فون مایسس هسته جذب کننده با ساختار ساندویچی نسبت به جذب کننده پلیمری که مقدار آن ۰/۸۲ مگاپاسکال می‌باشد، آورده شده است. همچنین در جدول مذکور میزان کاهش بیشینه کرنش پلاستیک معادل نسبت به جذب کننده پلیمری که مقدار آن ۰/۳۸۹ است، نیز قابل مشاهده می‌باشد.

۵-۳- پارامتر سرعت

در بخش‌های (۵-۱) و (۵-۲)، پارامترهای مدنظر مطابق استاندارد گفته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. حال در این بخش با هدف تاثیر سرعت بر عملکرد جذب کننده سپر جلو و بررسی رفتار جذب کننده در حالتی که تحت فشردگی بیشتر قرار گیرد، سرعت ضربه زننده در تست برخورد سرعت پایین از مقدار استاندارد ۴ کیلومتر بر ساعت به ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت افزایش یافت.

۵-۳-۱- بیشینه نیروی برخورد

تست برخورد در سرعت ۲۵/۲ تکرار گردید. بیشینه نیروی برخورد حاصله در این سرعت برای جذب کننده پلیمری ۷۵/۲۲ کیلو نیوتون را نشان داد و همانطور که در شکل (۱۰) قابل مشاهده می‌باشد، روند تغییرات بیشینه نیروی برخورد در حالات مختلف جذب کننده ساندویچی مشابه سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت می‌باشد و تغییر خاصی در روند نمودارها مشاهده نگردید. در شکل (۱۱) تغییرات نیرو بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۰ تاثیرات چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده با ساختار ساندویچی بر بیشترین نیرو حاصل از برخورد

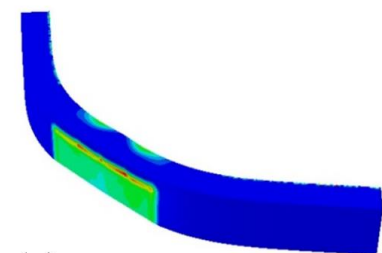
در مجموع با توجه به نتایج حاصله از شکل (۱۰) و شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت، در دو سرعت در نظر گرفته شده

عنوان کرد در همه حالات، بیشینه تنش فون مایسس جذب کننده با ساختار ساندویچی مقدار کمتری نسبت به پلیمری دارد. از دلایل کاهش مقدار آن می‌توان به خواص مکانیکی فوق العاده فوم آلومینیومی اشاره کرد و اینکه این فوم‌ها نسبت به فوم‌های پلیمری از مدول الاستیسیته و تنش تسلیم بالاتری برخوردار هستند.

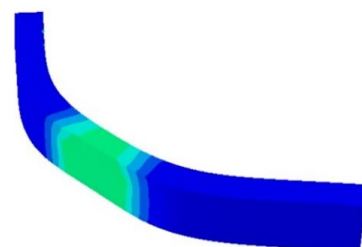
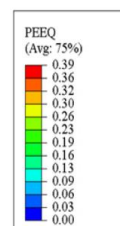
جدول ۵ میزان کاهش بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل هسته جذب کننده نسبت به جذب کننده پلیمری بر اساس معیار تسلیم فون مایسس و کرنش پلاستیک معادل

مدل	میزان کاهش براساس معیار تسلیم فون مایسس (%)	میزان کاهش براساس کرنش پلاستیک معادل (%)
San15-150	۱۵/۹	۲۸/۲
Hybrid 15	۳۸/۱	۳۱/۷
San15-300	۴۳/۳	۳۸/۸
San20-150	۳۱/۶	۳۱/۹
Hybrid 20	۴۴/۱	۳۴/۷
San20-300	۴۷/۲	۴۰/۴
San25-150	۳۷/۷	۴۹/۶
Hybrid 25	۴۶/۳	۵۷/۱
San25-300	۴۵/۵	۶۲/۵

(الف)

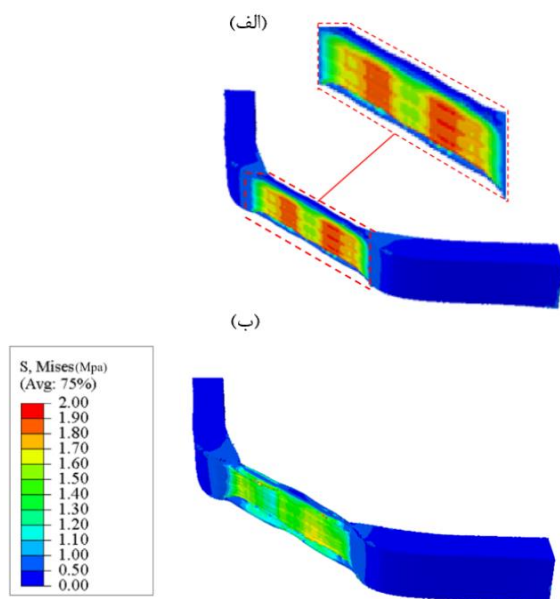


(ب)

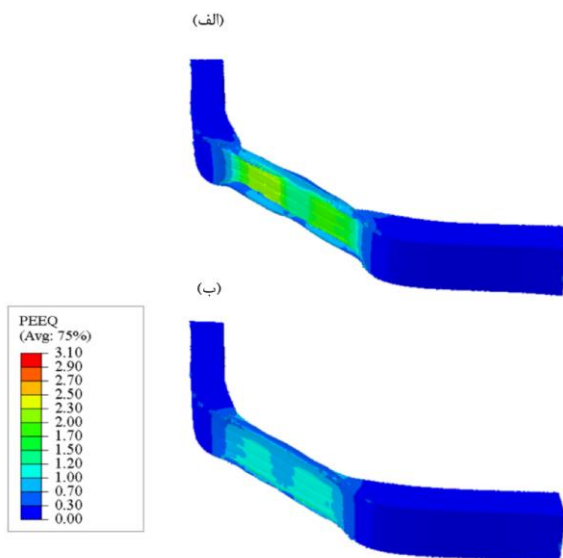


شکل ۹ کرنش پلاستیک معادل؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و چگالی پوسته ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

همچنین با بررسی کانتورهای کرنش پلاستیک معادل همه رفتارهایی که در بخش (۵-۲) به آن اشاره شد مجدداً مشاهده گردید. برای نمونه در شکل (۱۲) مقایسه ای بین جذب کننده پلیمری و هسته جذب کننده ساندویچی در زمانی که بیشترین نیروی برخورد حاصل می گردد انجام و در شکل (۱۳) بیشترین کرنش پلاستیک معادل آورده شده است. در جدول (۶) میزان کاهش دو پارامتر مدنظر در حالت ساندویچی نسبت به جذب کننده پلیمری قابل مشاهده می باشد.

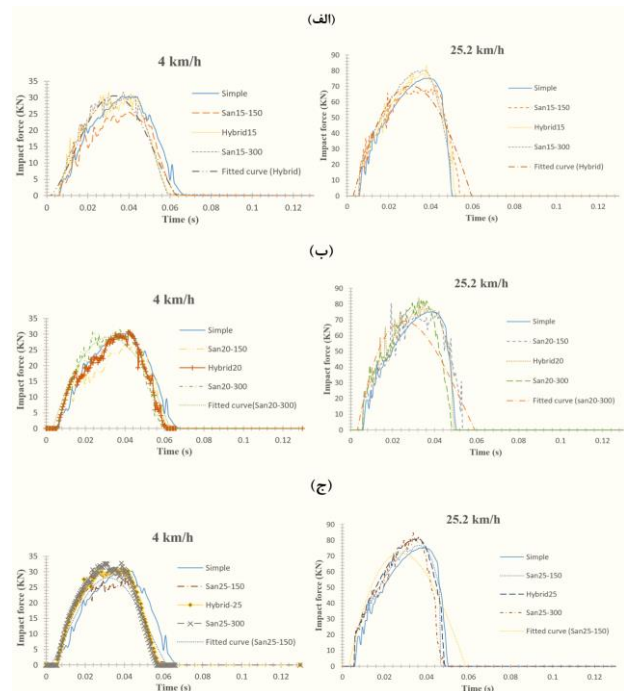


شکل ۱۲ تنش فون مایسس (سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت)؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلیمتر و چگالی پوسته ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۱۳ کرنش پلاستیک معادل (سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت)؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلیمتر و چگالی پوسته ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

بیشترین نیروی برخورد در یک ضخامت برای پوسته با افزایش چگالی، افزایش می یابد. همچنین بیشترین نیروی برخورد در یک چگالی و سرعت برخورد ثابت همیشه روند افزایشی را از خود نشان می دهد اما روند رشد آن نسبت به افزایش چگالی کمتر می باشد.



شکل ۱۱ تغییرات نیرو زمان؛ (الف) مقایسه حالات ساده (Simple) و ($tsc = 0.15$) (ب) مقایسه حالات ساده (Simple) و ($tsc = 0.20$)، (ج) مقایسه حالات ساده (Simple) و ($tsc = 0.25$)

۵-۳-۲- پیشینه تنش فون مایسس و پیشینه کرنش پلاستیک معادل

در این بخش به تاثیر پارامتر سرعت بر پیشینه تنش فون مایسس در زمان بروز پیشینه نیروی برخورد و پیشینه کرنش پلاستیک معادل در بازه جدایش پرداخته شده است.

با بررسی کانتورها مشاهده گردید، تنش فون مایسس جذب کننده ساندویچی مانند برخورد در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت کاهش پیدا کرده است، بطوریکه با افزایش چگالی پوسته جذب کننده، مقدار آن کمتر شده است، همچنین می توان عنوان کرد با وجود فشردگی قابل توجهی که در هسته جذب کننده ساندویچی و جذب کننده پلیمری قابل مشاهده می باشد، در همه حالات، بیشترین تنش فون مایسس جذب کننده با ساختار ساندویچی مقدار کمتری نسبت به جذب کننده پلیمری دارد. پیشینه تنش فون مایسس و پیشینه کرنش پلاستیک معادل در جذب کننده پلیمری به ترتیب ۲ مگا پاسکال و ۳/۱۰ می باشد.

جدول ۷ پارامترها و سطوح مرتبط

پارامتر	سطح (واحد)
ضخامت	۱۵ (mm)
	۲۰ (mm)
	۲۵ (mm)
چگالی	۱۵۰ (kg/m ³)
	۲۲۵ (kg/m ³)
	۳۰۰ (kg/m ³)

جدول ۸ آرایه تعامد تاگوچی (L9)

شبه سازی	چگالی (kg/m ³)	ضخامت (mm)	نیروی برخورد (kN)	بیشینه تنش فون مایسس (Mpa)	بیشینه کرنش پلاستیک معادل (Mpa)
۱	۱۵۰	۱۵	۲۵/۴۲	۰/۷۱	۰/۳۰
۲	۱۵۰	۲۰	۳۰/۳۰	۰/۵۹	۰/۲۹
۳	۱۵۰	۲۵	۳۱/۶۴	۰/۵۷	۰/۲۸
۴	۲۲۵	۱۵	۲۶/۵۵	۰/۶۲	۰/۲۹
۵	۲۲۵	۲۰	۳۰/۸۰	۰/۵۶	۰/۲۸
۶	۲۲۵	۲۵	۳۱/۹۲	۰/۵۵	۰/۲۷
۷	۳۰۰	۱۵	۲۷/۹۸	۰/۵۹	۰/۲۶
۸	۳۰۰	۲۰	۳۰/۸۲	۰/۵۶	۰/۲۵
۹	۳۰۰	۲۵	۳۲/۷۷	۰/۵۶	۰/۲۴

جدول ۹ تولید رابطه خاکستری

شبه سازی	بیشینه نیروی برخورد (kN)	بیشینه تنش فون مایسس (Mpa)	رابطه خاکستری	
			ماکزیم کرنش پلاستیک معادل (Mpa)	
۱	۱	۰	۰	۰
۲	۰/۳۳۶۱	۰/۷۵۰	۰/۱۶۶۷	
۳	۰/۱۵۳۷	۰/۸۷۵	۰/۳۳۳۳	
۴	۰/۸۴۶۳	۰/۵۶۲۵	۰/۱۶۶۷	
۵	۰/۲۶۸۰	۰/۹۳۷۵	۰/۳۳۳۳	
۶	۰/۱۱۵۶	۱	۰/۵۰۰۰	
۷	۰/۶۵۱۷	۰/۷۵۰	۰/۱۶۶۷	
۸	۰/۲۶۵۳	۰/۹۳۷۵	۰/۸۳۳۳	
۹	۰	۰/۹۳۷۵	۱	

جدول ۶ میزان کاهش بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل هسته جذب کننده نسبت به جذب کننده پلیمری در سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت براساس معیار تسلیم فون مایسس و کرنش پلاستیک معادل

مدل	میزان کاهش براساس معیار تسلیم فون مایسس (%)	میزان کاهش براساس کرنش پلاستیک معادل (%)
San15-150	۵/۲	۲۷/۲
Hybrid 15	۱۷/۱	۳۳/۶
San15-300	۱۹/۶	۴۵/۷
San20-150	۱۱/۴	۳۵/۹
Hybrid 20	۱۹/۱	۴۷/۵
San20-300	۲۲/۲	۵۴/۶
San25-150	۱۳/۹	۴۲/۵
Hybrid 25	۲۱/۹	۵۴/۳
San25-300	۲۳/۱	۶۱/۲

۴-۵- بهینه سازی

در مطالعه انجام گرفته با هدف کاهش بیشینه نیروی برخورد، کاهش بیشینه تنش فون مایسس و کاهش کرنش پلاستیک معادل، دو پارامتر کنترل کننده یعنی چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده در سرعت برخورد ۴ کیلومتر بر ساعت که مطابق استاندارد می باشد در نظر گرفته شده است که هر کدام دارای ۳ سطح می باشند (جدول (۷)). شایان ذکر است سرعت در این بخش مورد نظر نمی باشد به این دلیل که مطابق استاندارد تست برخورد سرعت پایین، سرعت ضربه زننده می بایست ۴ کیلومتر بر ساعت باشد. لذا در این بخش این پارامتر در نظر گرفته نشده است. روش تاگوچی با اهداف کاهش تعداد محاسبات مبتنی بر تاثیر همزمان پارامترهای مدنظر مورد استفاده قرار گرفته است. نهایتاً با استفاده از آنالیز واریانس^۱ پارامترها بر روی اهداف در نظر گرفته شده بررسی می گردد.

در جدول (۸) آرایه تعامد تاگوچی^۲ و نتایج مربوط به آن قابل مشاهده می باشد.

با بهره گیری از رابطه (۵) ابتدا مقادیر پارامترهای مدنظر، نرمالیزه می گردد. قابل ذکر است هر چقدر مقادیر ۳ پارامتر مدنظر کمتر باشد مطلوب تر می باشد (جدول (۹)).

² Taguchi orthogonal array

¹ Analysis of Variance (ANOVA)

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، شبیه سازی تست برخورد سپر شامل جذب کننده با ساختار ساندویچی با استفاده از روش اجزا محدود انجام گرفته است. اثر چگالی و ضخامت پوسته به عنوان دو پارامتر تعیین کننده بر عملکرد جذب کننده با ساختار ساندویچی بر مبنای بیشینه نیروی برخورد، بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل شده از شبیه سازی ها، افزایش چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده رابطه مستقیمی با بیشینه نیروی برخورد جذب کننده دارد. در بررسی ها مشخص گردید در بازه مشخصی از چگالی پوسته مقدار بیشینه نیروی برخورد نسبت به جذب کننده پلیمری کاهش دارد که بیانگر این موضوع می باشد که تمام چگالی ها مجاز به انتخاب نیستند لذا باید مقدار مناسب از محدوده مشخص شده انتخاب گردد. در تمام مدل های ساندویچی بیشینه تنش فون مایسس در لحظه وقوع بیشینه نیروی برخورد که بیشترین فشردگی رخ می دهد و بیشینه کرنش پلاستیک معادل هسته در بازه جدایش برخورد مقدار کمتری نسبت به جذب کننده پلیمری داشتند. همچنین چگالی پوسته نسبت به ضخامت آن تاثیر بیشتری بر موارد بررسی شده از خود نشان داد. جهت بررسی تاثیر پارامتر سرعت بر عملکرد جذب کننده در بازه سرعت پایین مقدار از ۴ به ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت افزایش پیدا کرد. در این حالت، فشردگی قابل توجهی در جذب کننده مشاهده گردید اما با بررسی نتایج بدست آمده تغییری در روند نتایجی که در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت بدست آمد، مشاهده نگردید.

با هدف کاهش بیشینه نیروی برخورد، کاهش بیشینه تنش فون مایسس و کاهش کرنش پلاستیک معادل، دو پارامتر کنترل کننده یعنی چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده در سرعت برخورد ۴ کیلومتر بر ساعت که مطابق استاندارد می باشد در نظر گرفته شده است که هر کدام دارای ۳ سطح می باشند. برای چگالی ۱۵۰، ۲۲۵ و ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و برای ضخامت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شد و با استفاده از روش تاگوچی و تولید رابطه خاکستری و اعمال محدودیت در انتخاب چگالی بهینه ترین حالت بین موارد بررسی شده انتخاب گردید. به این ترتیب بهینه ترین جذب کننده ساندویچی با چگالی و ضخامت ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۲۵ میلیمتر برای پوسته انتخاب گردید.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

B میزان کشیدگی بیضی تسلیم روی محور قائم (Pa)
 F_{imp} نیروی برخورد (kN)

جدول ۱۰ تولید ضریب و درجه رابطه خاکستری

رتبه سازی	ضریب رابطه خاکستری		
	بیشینه کرنش پلاستیک معادل (Mpa)	بیشینه تنش فون مایسس (Mpa)	بیشینه نیروی برخورد (kN)
۱	۰/۳۳۳۳	۰/۳۳۳۳	۱
۲	۰/۳۷۵۰	۰/۶۶۶۷	۰/۴۲۹۶
۳	۰/۴۲۸۶	۰/۸۰۰۰	۰/۳۷۱۴
۴	۰/۳۷۵۰	۰/۵۳۳۳	۰/۷۶۴۹
۵	۰/۴۲۸۶	۰/۸۸۸۹	۰/۴۰۵۸
۶	۰/۵۰۰۰	۱	۰/۳۶۱۲
۷	۰/۶۰۰۲	۰/۶۶۶۷	۰/۵۸۹۴
۸	۰/۷۵۰۰	۰/۸۸۸۹	۰/۴۰۵۰
۹	۱	۰/۸۸۸۹	۰/۳۳۳۳

جدول ۱۱ میانگین نمره رابطه خاکستری بر اساس سطوح پارامتر

سطح	چگالی	ضخامت
۱	۰/۵۲۶۴	۰/۵۷۷۳
۲	۰/۵۸۴۱	۰/۵۸۲۰
۳	۰/۶۸۰۲	۰/۶۳۱۴

در گام بعد همانطور که در جدول (۱۰) مشخص می باشد، با استفاده از روابط (۶ الف) و (۶ ب) و با در نظر گرفتن $\zeta = 0.5$ و $X_0 = 1$ ضریب رابطه خاکستری برای پارامترها تولید می شود و با بهره گیری از رابطه (۷) درجه رابطه خاکستری محاسبه می گردد. در انتها مطابق جدول (۱۱) میانگین نمره رابطه خاکستری بر اساس سطوح پارامتر محاسبه گردید.

همانطور که در جدول (۱۱) مشخص می گردد، چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۲۵ میلیمتر بیشترین امتیاز را کسب کردند که بهینه ترین حالت بین موارد بررسی شده می باشند اما از آنجا که در بخش های قبل اثبات شد، با در نظر گرفتن پارامتر بیشینه نیروی برخورد در افزایش چگالی، محدودیت وجود دارد و همانطور که مشاهده گردید بیشینه نیروی برخورد در چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از حالت اولیه پیشی گرفت که قابل قبول نمی باشد. بنابراین در این مسئله چگالی ۲۲۵ کیلوگرم به عنوان مقدار منتخب در نظر گرفته می شود.

[4] S. S. Cheon, J. H. Choi, and D. G. Lee, "Development of the composite bumper beam for passenger cars," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1, pp. 491-499, 1995/01/01/ 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)00078-X](https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00078-X).

[5] S. M. Sapuan, M. A. Maleque, M. Hameedullah, M. N. Suddin, and N. Ismail, "A note on the conceptual design of polymeric composite automotive bumper system," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, no. 2, pp. 145-151, 2005/01/30/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.063>.

[6] Y. Liu and M. L. Day, "Experimental Analysis and Computer Simulation of Automotive Bumper System under Impact Conditions," *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 9, no. 1, pp. 51-59, 2008/01/01 2008, doi: 10.1080/15502280701759218.

[7] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, and R. Yunus, "Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber," *Materials & Design*, vol. 29, no. 7, pp. 1447-1452, 2008/01/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.07.011>.

[8] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, D. Ahmad, A. Aidy, A. Khalina, and M. Jonoobi, "Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material," *Materials & Design*, vol. 32, no. 10, pp. 4857-4865, 2011/12/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.011>.

[9] A. T. Beyene, E. G. Koricho, G. Belingardi, and B. Martorana, "Design and Manufacturing Issues in the Development of Lightweight Solution for a Vehicle Frontal Bumper," *Procedia Engineering*, vol. 88, pp. 77-84, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.129>.

[10] N. K. Khedkar, C. R. Sonawane, and S. Kumar, "Experimental and static numerical analysis on bumper beam to be proposed for Indian passenger car," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 383-387, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.582>.

[11] K. Liu, S.-B. Kang, and S. Gao, "Experimental and analytical study on impact response of stainless steel-aluminium foam-alloy steel sandwich panels," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 179, p. 104661, 2023/09/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104661>.

[12] L. Ying, S. Wang, T. Gao, M. Dai, P. Hu, and Y. Wang, "Crashworthiness analysis and optimization of multi-functional gradient foam-aluminum filled hierarchical thin-walled structures," *Thin-Walled Structures*, vol. 189, p. 110906, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110906>.

F	سطح تسلیم
K	تنش فون مایسس در رفتار پلاستیک فوم ها (Pa)
p	سطح تسلیم
P_c	مقاومت تسلیم در فشار هیدرواستاتیکی (Pa)
q	تنش فون مایسس در رفتار پلاستیک فوم ها (Pa)
R	ضخامت پوسته جذب کننده ساندویچی (mm)
T	چگالی پوسته جذب کننده ساندویچی (kg/m^3)
tSC	نسبت ضخامت
α	ماتریس مقادیر واقعی
γ	ماتریس نرمالیزه مقادیر واقعی

علائم یونانی

δ	فرورفتگی نسبی
α	ضریب شکل
ζ	ضریب تمییز
ξ	ضریب رابطه خاکستری
Δ	قدرمطلق اختلاف مقدار ایده آل نرمالیزه و دیگر مقادیر در هر پارامتر
ρ	چگالی
σ_0^C	تنش تسلیم اولیه در فشار تک محوره (Pa)
p_0^C	تنش تسلیم اولیه در فشار هیدرواستاتیکی (Pa)
β	شکل بیضی جریان پلاستیک

زیرنویس‌ها

B	جسم B
p	پلاستیک
min	کمترین
max	بیشترین
a	فلز پایه فوم
f	فوم

بالانویس‌ها

..	مشقت دوم
----	----------

۸- مراجع

[1] C. R. Sonawane and A. L. Shelar, "Strength Enhancement of Car Front Bumper for Slow Speed Impact by FEA Method as per IIHS Regulation," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no. 5, pp. 599-606, 2018/10/01 2018, doi: 10.1007/s40032-017-0365-y.

[2] T. Wang and Y. Li, "Design and analysis of automotive carbon fiber composite bumper beam based on finite element analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 6, p. 1687814015589561, 2015/06/01 2015, doi: 10.1177/1687814015589561.

[3] A. K. Shukla and J. D. Majumdar, "Studies on Microstructure and Mechanical properties of Aluminium Foam prepared by Spray Forming Route," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 861-865, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.032>.

- [21] C.-P. Fung, C.-H. Huang, and J.-L. Doong, "The study on the optimization of injection molding process parameters with gray relational analysis," *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 22, no. 1, pp. 51-66, 2003.
- [22] T. Hinz and R. Lewkowicz, "Some selected methods and purpose of the low speed tests for estimation of the vehicle bumpers vulnerability to damage," *Mechanik*, vol. 90, pp. 476-479, 05/01 2017, doi: 10.17814/mechanik.2017.5-6.62.
- [23] L. Chang, Y. Patel, H. Wang, and J. Williams, "The partitioning of plastic energy in cutting tests," *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 309-315, 2016.
- [24] N. Alexopoulos and P. Papanikos, "Experimental and theoretical studies of corrosion-induced mechanical properties degradation of aircraft 2024 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 498, no. 1-2, pp. 248-257, 2008.
- [25] A. G. Hanssen, Y. Girard, L. Olovsson, T. Berstad, and M. Langseth, "A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, no. 7, pp. 1127-1144, 2006/07/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.09.004>.
- [26] D. S. Cronin and S. Ouellet, "Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: Strain rate and size effects on mechanical properties," *Polymer Testing*, vol. 53, pp. 40-50, 2016/08/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.018>.
- [27] G. Sun, X. Wang, J. Fang, T. Pang, and Q. Li, "Parallelized optimization design of bumper systems under multiple low-speed impact loads," *Thin-Walled Structures*, vol. 167, p. 108197, 2021/10/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108197>.
- [13] W. Hou, M. Li, X. Zhang, Z. Liu, and L. Sang, "Design and optimization of the bumper beam with corrugated core structure of fiber metal laminate subjected to low-velocity impact," *Thin-Walled Structures*, vol. 187, p. 110746, 2023/06/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110746>.
- [14] W. J. Stronge, *Impact mechanics*. Cambridge university press, 2018.
- [15] S. He, W. Liu, and X. Li, "Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles," *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, no. 4, p. 298, 2016/02/11 2016, doi: 10.1007/s12665-015-5180-2.
- [16] V. S. Deshpande and N. A. Fleck, "Isotropic constitutive models for metallic foams," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 48, no. 6, pp. 1253-1283, 2000/06/01/ 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(99\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00082-4).
- [17] A. Ghamarian, H. R. Zarei, and M. T. Abadi, "Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 10, pp. 1312-1319, 2011/10/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.03.005>.
- [18] Y. Kuo, T. Yang, and G.-W. Huang, "The use of a grey-based Taguchi method for optimizing multi-response simulation problems," *Engineering Optimization*, vol. 40, no. 6, pp. 517-528, 2008/06/01 2008, doi: 10.1080/03052150701857645.
- [19] S. Liu and Y. Lin, "Introduction to Grey Systems Theory," in *Grey Systems: Theory and Applications*, S. Liu and Y. Lin Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 1-18.
- [20] W. Yan, E. Durif, Y. Yamada, and C. Wen, "Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminium Tubes," *Materials Transactions - MATER TRANS*, vol. 48, pp. 1901-1906, 07/01 2007, doi: 10.2320/matertrans.MRA2007071.