



بررسی عددی اثرات انفجار گردابه و تغییر مدل آشفتگی روی رفتار آیرودینامیکی بال مثلی

علیرضا سخاوت بنیس *

مربی

عضو هیأت علمی دانشگاه علوم انتظامی امین

مصطفی هادی دولابی

دانشیار

مجتمع دانشگاهی هوافضا

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

ایمان شفیعی نژاد

استادیار

پژوهشگاه هوافضا

علی میرزایی کهق

استادیار

عضو هیأت علمی دانشگاه علوم انتظامی امین

چکیده: بال مثلی در انفجار گردابه‌ها به وسیله‌ی مدل‌های آشفتگی متفاوت، به صورت عددی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بال مثلی با استفاده از هندسه‌ای که مراجع پیشین از آن استفاده کرده‌اند، مدل شده و شبکه‌ای با کیفیت بالا حول هندسه مورد نظر تولید شده است. هدف این تحقیق، بررسی و استخراج ضرایب آیرودینامیکی بال برای حالات مختلف جریان می‌باشد همچنین بررسی نمودارهای مربوط با این ضرایب آیرودینامیکی در حالت انفجار گردابه و مدل‌های آشفتگی مختلف است. روش این تحقیق همانطور که از عنوان مقاله مشخص است، روش عددی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش زاویه حمله تا ۳۵ درجه گردابه‌های روی بال منفجر می‌شوند و باعث کاهش کارایی بال می‌شود. همچنین با به کارگیری مدل‌های آشفتگی متفاوت روی بال مثلی و مقایسه آن‌ها با نتایج عملی، مشخص می‌شود که مدل آشفتگی kw از سایر مدل‌ها برای بررسی بال مثلی، دقیق‌تر می‌باشد. نوآوری که تحقیق حاضر بدان پرداخته است، بررسی انفجار گردابه‌ها در زاویه حمله ۳۵ درجه می‌باشد که تا بحال بال مثلی در این زاویه حمله مطالعه نشده است. همچنین نوآوری دیگر این تحقیق، بررسی جریان حول بال مثلی با ۳ مدل آشفتگی kw، ke و SA می‌باشد که از میان این مدل‌های آشفتگی، kw از سایر مدل‌ها به داده‌های عملی و تجربی نزدیک‌تر می‌باشد.

واژه های راهنما: بال مثلی، الگوی جریان، گردابه لبه حمله، انفجار گردابه، مدل‌های آشفتگی

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

Alireza Sekhvat Benis
Faculty instructor
Amin Police University,
Tehran

Mostafa Hadi Doolabi
Associated Professor
Malek Ashtar university
of Technology, Tehran

Iman Shafiee Nejhad
Assistant professor
Aerospace Research
institute, Tehran

Ali Mirzaee Kahagh
Assistant professor
Amin Police University,
Tehran

Numerical analysis of vortex break down and turbulent model change on Aerodynamic behavior of Delta wing

Abstract: Delta wing is studied numerically for vortex break down in different turbulent model. It is modeled with the geometry used in elder references and a high quality mesh is applied on it. The aim of this article is to study Aerodynamic coefficients for different states of the delta wing and also to study the charts of these coefficients in vortex break down mode and different turbulent model mode. The method of this study is numerical. Aerodynamic coefficient captured in this study is compared with elder studies. The results show that by increasing the angle of attack up to 35 degrees, the vortices on the wing breakdown and the performance is worsened and the turbulent model kw shows Aerodynamic behavior better than others.

The innovation of this article is that vortex break down is studied in 35 degrees angle of attack and the other innovation is that, 3 vortex models is applied and considered kw is the best.

Keywords: Delta wing, Flow algorithm, Vortex of leading edge, Vortex break down, Turbulent model.

۱- مقدمه

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

شرایط مرزی معادله ۳:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

شرایط مرزی معادله ۴:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0$$

شرایط مرزی معادله ۵:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$$

معادله حاکم در مدل $k-\omega$ در حالت کلی، بصورت زیر است

و مقادیر ثابت ها با توجه به زیرمدل های مختلف، از آزمایش های

تجربی بدست می آید.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (6)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \beta f_{\beta} \omega^2 \quad (7)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

البته باید در نظر گرفت که این مدل آشفتگی برای

جریان هایی که با دیواره محدود شده اند مورد استفاده قرار

می گیرد.

میلر و وود [۲] به روش تجربی جریان روی بال های مثلثی

با زوایای پسگرایی مختلف و لبه حمله تیز را با استفاده از

روش های جریان روغن، تافت و صفحه بخار مطالعه کردند. آنها

این جریان ها را به شش الگو بر اساس α_N و M_N طبقه بندی

بال های مثلثی کاربرد فراوانی در وسایل هوافضایی دارند که از جمله آن می توان به هواپیمای جنگنده با مانوردهی بالا و هواپیمای مسافربری مافوق صوت و پهپادهای جنگنده اشاره نمود. بسیاری از هواپیماهای مافوق صوت، دارای بال مثلثی هستند که در برخاستن از روی باند و فرود روی باند باید دارای زاویه حمله بالا باشند چرا که عملکرد این بال ها در زوایای حمله کم، بسیار پایین است. پدیده غالب در جریان روی بال های مثلثی در زوایای حمله بالا، گردابه هایی هستند که از لبه حمله جدا شده و به صورت جریانی با نواحی دارای چرخش بالا شکل می گیرند. جریان از لبه حمله بال روی سطح مکش جدامی شود. این جریان روی بال باعث به وجود آمدن سرعت محوری و چرخش زیاد و فشار کم در این گردابه می شود که خود باعث مکش بیشتر و به وجود آمدن نیروی برآ روی بال مثلثی می شود.

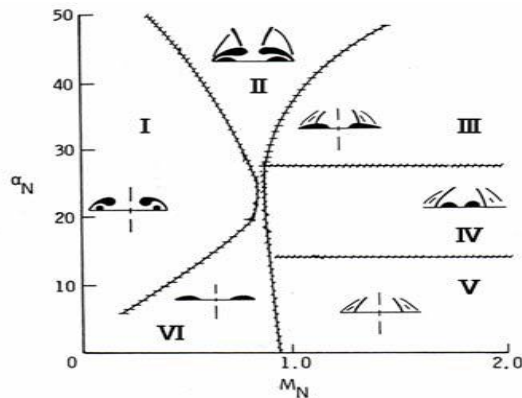
اولین تلاش برای درک جریان مافوق صوت حول بال های مثلثی در شرایط مختلف جریان و برای هندسه های مختلف بال توسط استنبروک و اسکوائر [۱] انجام شد. آنها با ارزیابی همه داده های تجربی موجود، طبقه بندی الگوهای جریان را بر اساس مؤلفه زاویه حمله عمود بر لبه حمله α_N و مؤلفه عدد ماخ عمود بر لبه حمله M_N ارائه دادند. آنها جریان را به دو نوع تقسیم بندی کردند: جریان چسبیده و جریان جدا شده در لبه حمله. خط مرزی بین این دو نوع جریان در نزدیکی $M_N = 1$ وجود دارد و به نام مرز استنبروک-اسکوائر شناخته می شود. پارامترهای α_N و M_N به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\alpha_N = \tan^{-1}(\tan \alpha / \cos \Lambda) \quad (1)$$

$$M_N = M_{\infty} \cos \Lambda \sqrt{1 + \sin^2 \alpha \tan^2 \Lambda} \quad (2)$$

که در معادلات فوق α به عنوان زاویه حمله و Λ نیز بیانگر زاویه پسگرایی بال مثلثی می باشد. معادله شماره (۱) بیانگر این مطلب است که زاویه حمله عمود بر لبه حمله برابر است با معکوس تانژانت (تانژانت زاویه حمله تقسیم بر کسینوس زاویه پسگرایی) و همچنین معادله شماره (۲) بیانگر این است که مؤلفه عدد ماخ عمود بر لبه حمله برابر جریان عدد ماخ در کسینوس زاویه پسگرایی در ریشه دوم (عدد ۱ بعلاوه سینوس به توان ۲ زاویه حمله در تانژانت به توان ۲ زاویه پسگرایی) می باشد.

همچنین معادلات ناویر اتوکس سه بعدی تراکم پذیر پایا که اساس جریان روی بال مثلثی است به صورت زیر بیان می شود:



شكل ۱ دسته بندی جریان توسط ميلر و وود [۲]

در مقاله حاضر، ميدان جريان حول بال مثلی در زوایای حمله و اعداد ماخ مختلف به صورت عددی شبیه سازی شده و نتایج تحلیل شده اند. هدف این مطالعه بررسی دقیق تر ضرایب آیرودینامیکی در حالات مختلف، تغییرات آنها و بررسی رفتار آیرودینامیکی می باشد.

۲- معادلات حاکم بر جريان

معادله (۳)، حرکت جريان مافوق صوت را حول یک جسم جامد نشان می دهد:

$$-(M^2 - 1)\varphi_{xx}(x, y, z, t) + \varphi_{yy}(x, y, z, t) + \varphi_{zz}(x, y, z, t) - (1/a^2)[2U\varphi_{xt}(x, y, z, t) + \varphi_{tt}(x, y, z, t)] = 0 \quad (8)$$

که $\varphi(x, y, z, t)$ تابع پتانسیل سرعت می باشد. نیرویی که به بال وارد می شود از رابطه (۴) حساب می شود:

$$Q = -2\rho \int_0^n \int_{-mx}^{mx} [\varphi_t(x, y, z, t) + U\varphi_x(x, y, z, t)] dx dy \quad (9)$$

که در رابطه فوق، ρ مقدار چگالی می باشد.

۳- روش عددی

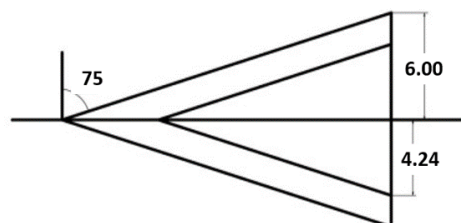
معادلات حاکم معادلات سه بعدی ناویر-استوکس تراکم پذیر پایا می باشند. شارهای غیرلزج با روش بالادست رو گسسته سازی شده و از الگوریتم MUSCL برای افزایش دقت تا مرتبه دوم استفاده شده است. شارهای لزج به روش مرکزی مرتبه دوم گسسته می شوند. میدان جريان کاملاً آشفته فرض شده و از مدل های اسپالارت-آلماراس، $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای مدل سازی آشفتگی استفاده شده است. از روش گام برداری زمانی ضمني برای تسريع در روند حل استفاده شده است. نرم افزار تجاری مورد استفاده Fluent 6.3.26 می باشد.

کردند (شكل ۱) که عبارتند از: ۱) گردابه کلاسیک، ۲) گردابه با موج ضربه ای، ۳) حباب جدایش با موج ضربه ای، ۴) جدایش القایی از سوی موج ضربه ای، ۵) موج ضربه ای بدون جدایش و ۶) حباب جدایش بدون موج ضربه ای. منظور از حباب جدایش، گردابه ای بدون گردابه ثانویه است. شادروخ و پیکه [۳] طبقه بندی مشابهی را برای بال های با ضخامت بیشتر پیشنهاد دادند. سشادری و نارایان [۴] و برودتسکی و همکاران [۵] طبقه بندی مشابهی را با ارزیابی میدان های جريان با جزئیات بیشتر ارائه دادند. ایمای و همکاران [۶] مکانیزم تعیین کننده نوع جريان را با انجام محاسبات میدان جريان روی بال مثلی با زاویه پسگرایی ۶۵ درجه در زوایای حمله بالا در رژیم های گذر صوت و مافوق صوت برای درک بهتر این مکانیزم بررسی کردند. اوایما و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۸ اثر عدد ماخ را بر میدان جريان روی یک بال مثلی ۶۵ درجه با لبه ی حمله پخ و در زوایای حمله بالا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که جريان روی بال مثلی با لبه ی حمله ی پخ می تواند مخلوطی از دو نوع مختلف ساختار جريان در جريان مافوق صوت با زاویه ی حمله بالا باشد.

خان و همکاران [۹] گردابه های روی بال مثلی را با شکل ها و مدل های آشفتگی مختلف بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که کیفیت آیرودینامیکی با آشفتگی در ورودی مرتبط است. افغان خان [۱۰] رفتار آیرودینامیکی بال مثلی را در اعداد رینولدز پایین مطالعه نمود و به این نتیجه رسید که در اعداد رینولدز ذکر شده، ضریب برآ به حداکثر مقدار خود (۰/۴) در زوایای حمله مورد نظر می رسد. هان تو و همکاران [۱۱] فشار روی سطح و سازه را بر روی بال مثلی شتاب داده شده بررسی نمودند و تغییرات گردابه را روی بال مشاهده نمودند. دمورت و همکاران [۱۲] اثرات لایه مرزی غیرفعال در اعداد رینولدز پایین را برای بال مثلی بررسی نمودند و از داده های بدست آمده، برای کنترل غیر فعال بهره بردند. رزما و همکاران [۱۳] نیز با شبیه سازی عددی، پخشندگی مصنوعی جريان روی بال مثلی را بررسی نمودند که نتایج قابل قبولی نسبت به نتایج تجربی دارد. تیراب [۱۴] یک بال مثلی با زاویه عقبگرد ۷۰ درجه با فلپ که دارای اسپن چند تکه را بررسی نمود و عوامل موثر بر پایداری این بال ها را بررسی نمود. گولرمو [۱۵] فاز طراحی مفهومی بال مثلی را در جريان مافوق صوت با روش های مختلف بررسی نمودند. آرون و همکاران [۱۶] مولفه های آیرودینامیکی بال مثلی منقطع شده را در جريان صوت بررسی نمودند دراز و همکاران [۱۷] جريان هوا را حول بال مثلی عادی و بال مثلی منقطع شده بررسی نمودند و تفاوت جريان میان هر دو را استخراج کردند.

۴- هندسه مدل و شبکه محاسباتی

هندسه مدل در شکل ۲ نشان داده شده است که مشابه هندسه ایجاد شده در مقاله میلر و وود [۲] می باشد. بال مثلثی مورد مطالعه در اینجا زاویه پسگرایی ۷۵ و ۶۵ و ۶۰ درجه دارد. نوک لبه حمله آن به پهنای ۰/۱ ضخامت بال تخت شده است. سطوح بالا و پایین بال تخت می باشند و ضخامت بال ۲٪ طول وتر است. فرض شده است که میدان جریان روی خط مرکزی بال متقارن است. بنابراین، دامنه محاسباتی تنها نیمی از بال را پوشش می دهد (شکل ۳). شبکه محاسباتی از نوع بی سازه برای چهاروجهی بوده که به روش دلانی تولید شده است. برای شبیه سازی گردابه های روی بال با دقت کافی، ناحیه ای با شبکه ریز حول بال در محدوده اثر تقریبی گردابه ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ هندسه معرفی شده در مقاله میلر و وود [۲]

۵- شرایط جریان

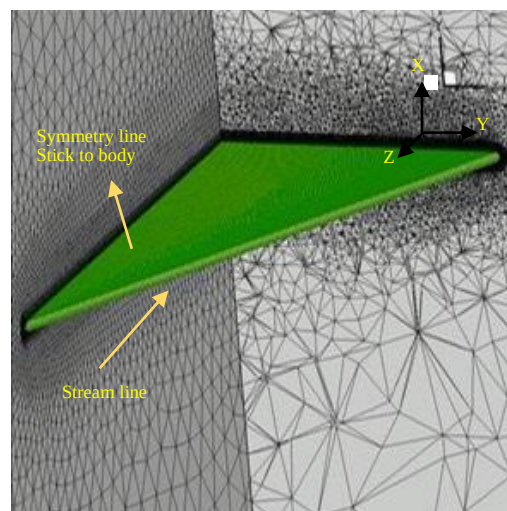
عدد ماخ جریان آزاد از ۱/۲ تا ۲ و زاویه حمله از ۸ تا ۲۴ درجه (با گام های ۴ درجه) بعلاوه ی زوایای حمله ۳۵ و ۳۰ درجه در نظر گرفته شده اند. تعداد ۶۰ اجرا انجام شده است که همه الگوهای جریان و مشخصه های آیرودینامیکی در این مطالعه بر اساس متغیرهای فیزیکی متوسط گیری شده با زمان هستند.

۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، از نتایج مقاله فالونین و همکاران [۸] استفاده شده است. مقاله مورد نظر برای تعداد زیادی زوایای حمله و زوایای عقبگرد تست های تجربی انجام داده و نتایج آن می تواند برای اعتبارسنجی مفید باشد. با مقایسه مدل های آشفتگی (جدول ۲)، متوجه این نکته می شویم که مدل آشفتگی k- ω نسبت به سایر مدل های آشفتگی دارای خطای کمتر و قابل قبول است و در نتایج بدست آمده نیز از همین مدل آشفتگی استفاده شده است.

جدول ۲ مقایسه داده های بدست آمده در این پروژه با داده های فالونین [۸] برای زاویه عقبگرد ۶۰ و ماخ ۱/۲

AoA	Cl			Cd			
	SA	KE	kw	M=۱/۵	SA	KE	kw
۱۵	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۶۰	٪۱۳/۴۱	٪۶/۶۲	٪۲/۸۱
۲۵	۱/۰۳	۱/۱۲	۱/۰۸	۱/۰۴	٪۱/۵۲	٪۷/۱۵	٪۳/۲۴
۳۵	۱/۰۳	۰/۹۲	۱/۰۰	۰/۹۵	٪۷/۹۳	٪۱۴/۰۹	٪۴/۶۹

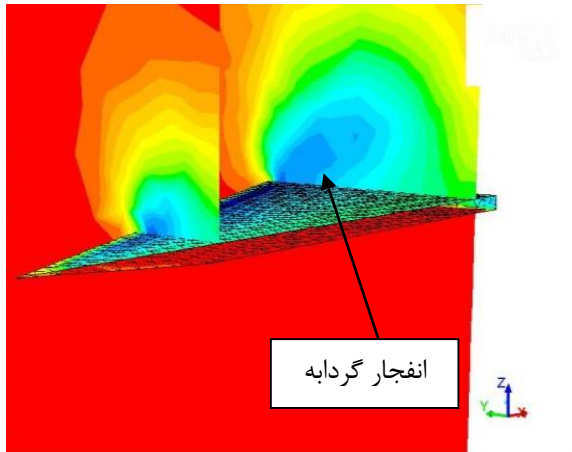


شکل ۳ شبکه بندی هندسه بال مثلثی به کار رفته در این مقاله

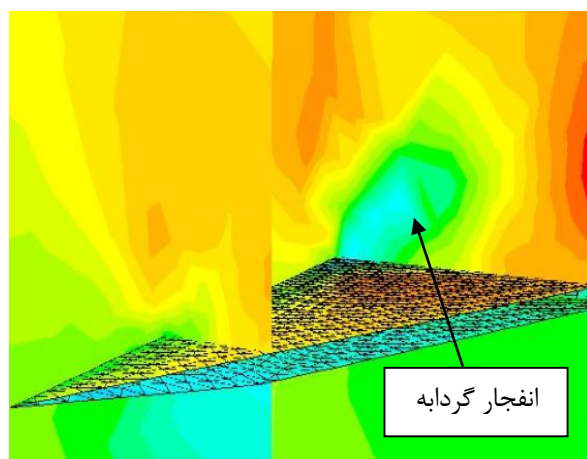
۵- استقلال از شبکه

برای این که از میزان ریز بودن شبکه اطمینان حاصل نماییم، برای هر زاویه عقبگرد، پنج نوع شبکه ایجاد نموده ایم. در مطالعه ی شبکه مبنا این است که اگر به جایی برسیم که با ریزتر کردن

۷- بررسی انفجار گردابه



شکل ۵ الف- انفجار گردابه‌ها در ۹۵٪ بال - $M=2$, $\Lambda=65$, $\alpha=35$



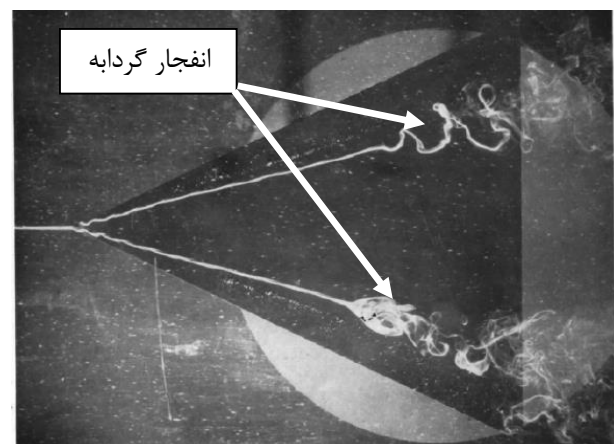
شکل ۵ ب - انفجار گردابه‌ها در ۹۵٪ بال - $M=2$, $\Lambda=65$, $\alpha=35$

در شکل‌های ۶ و ۷، نمودار ضریب فشار (اختلاف فشار تقسیم بر فشار دینامیکی سیال جریان آزاد) بر حسب طول اسپن برای زاویه حمله ۳۵ درجه که مربوط به انفجار گردابه‌ها است برای زوایای عقبگرد مختلف رسم شده است. در این نمودارها در قسمت بالایی نمودار، شاهد شکستگی به وجود آمده به علت وجود گردابه‌ها نیستیم و این خط به صورت شیب ملایم می‌باشد. به علت عدم وجود شکستگی و عدم کاهش مقدار ضریب فشار برای سطح بالایی در زاویه حمله ۳۵ درجه، بال مثلی نمی‌تواند مقدار نیروی برای مورد نظر بال را تولید نماید. در حالت عادی که گردابه‌ها روی بال ایجاد می‌شود، سرعت محوری در مرکز گردابه تا ۱/۵ برابر سرعت جریان آزاد هم می‌تواند افزایش یابد. با افزایش سرعت گردابه‌ها روی بال، ضریب فشار کاهش می‌یابد و اگر ضریب فشار روی بال کاهش یابد، مقدار ضریب نیروی برآ نیز افزایش می‌یابد و برای بال مفید خواهد بود. با انفجار گردابه‌ها، سرعت گردابه به مقدار محسوسی کاهش می‌یابد و با این کاهش سرعت، فشار روی بال افزایش می‌یابد و به این ترتیب مقدار نیروی برای به وجود آمده برای بال مثلی کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه حمله بیش از ۳۵ درجه، روی بال مثلی گردابه‌ها دچار انفجار می‌گردند و سرعت آن‌ها بسیار افت پیدا می‌کند و باعث کاهش بسیار در عملکرد بال مثلی می‌شوند. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در ابتدای بال، شاهد انفجار گردابه‌ها نیستیم ولی با پیشروی جریان، انفجار گردابه‌ها رخ می‌دهد.

علت انفجار گردابه‌ها در وسط بال (شکل ۴) این است که با توجه به بزرگتر شدن گردابه در میانه تا انتهای بال (قسمت‌های آبی رنگ شکل ۵)، در آن‌ها شکست رخ می‌دهد و باعث کاهش کارایی می‌گردد.

علاوه بر این همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، با توجه به انفجار گردابه‌ها در میانه بال، این اغتشاش، تلاطم و گسستگی از میانه بال تا انتهای بال ادامه می‌یابد. در شکل ۵ هم مشاهده می‌شود که انفجار گردابه (رنگ آبی) با حرکت جریان به سمت انتهای بال، دچار جدایش و گسستگی می‌شود و هرچه عقب تر رود، این گسستگی بیشتر می‌شود.



شکل ۴ انفجار گردابه (دید از بالا)

همان طور که در شکل‌های ۵ (الف و ب) مشاهده می‌شود، در زوایای حمله بالا شاهد انفجار گردابه‌ها هستیم. به گونه‌ای که در ابتدای بال، نشانه‌ای از انفجار گردابه نیست. در شکل‌های بالا اولین مقطع مشاهده شده در ۲۰٪ طول بال مشاهده می‌شود. در این مقطع اولیه، نشانی از انفجار گردابه‌ها نیست. اما با رسیدن جریان به مقطع ۹۵٪ بال شاهد انفجار گردابه‌ها در این مکان هستیم. نواحی دارای سرعت کم (قسمت‌های آبی رنگ) نشان از انفجار گردابه‌ها است. انفجار گردابه‌ها باعث کاهش سرعت گردابه‌ها می‌شود که باعث افزایش فشار روی بال می‌شود که از نظر آیرودینامیکی مطلوب نیست.

۸- بررسی تغییرات مدل‌های آشفتگی متفاوت

مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ یکی از مدل‌های آشفتگی متداول است، اگرچه عملکرد مناسبی در گرادیان‌های فشار معکوس بزرگ ندارد. این مدل یک مدل دو معادله‌ای است، به عبارتی شامل دو معادله انتقالی اضافی برای محاسبه خواص آشفتگی جریان می‌باشد. از این معادلات می‌توان برای محاسبه تأثیرات جابجایی و پخش در انرژی آشفتگی بهره برد. اولین متغیر انتقالی، انرژی آشفتگی جنبشی یا همان k است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا همان ε است. به عبارتی می‌توان گفت که k ، انرژی را در آشفتگی و ε مقیاس آشفتگی را معین می‌کند. هدف اصلی مدل فوق را می‌توان بهبود مدل طول مختلط^۱ دانست، به گونه‌ای که بتواند یک توصیف جبری برای مقیاس طول آشفتگی در جریان‌های با پیچیدگی زیاد بیان کند. مدل $k-\varepsilon$ برای جریان‌های داخلی و خارجی و جریان‌های با دیواره محدود با گرادیان فشار نسبتاً کوچک دقت و عملکرد خوبی دارد. متعاقباً دقت این مدل برای جریان‌های با فشار معکوس زیاد، کاهش می‌یابد [۴].

مدل آشفتگی اسپالارات-آلماراس یک مدل تک معادله‌ای است که به خصوص برای کاربردهای هوافضایی طراحی شده است. این مدل، معادله انتقال را برای لزجت گردابی جنبشی و بدون محاسبه مقیاس طولی مربوط به ضخامت لایه برشی حل می‌کند. متغیر انتقالی در مدل اسپالارات-آلماراس، سرعت است که در نواحی که به وسیله تأثیرات لزجی قوی از قبیل نواحی نزدیک دیوار منتشر نشده است، به لزجت حرکتی آشفتگی مدل می‌شود [۴].

همه مدل‌های اسپالارت-آلماراس، $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ ، بر اساس رویکرد میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس - Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) بنا نهاده شده‌اند. در این روش معادلات ناویر-استوکس که متوسط‌گیری زمانی شده‌اند حل می‌شوند. تنش‌های رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند با استفاده از یک مدل آشفتگی مدل‌سازی می‌شوند که نقطه ضعف این مدل‌ها، این است که ویسکوزیته آشفتگی را به صورت یک کمیت اسکالر معرفی می‌نماید. در بررسی جریان که نایکنواختی آشفتگی داریم، مدل RSM بر مدل RANS برتری دارد.

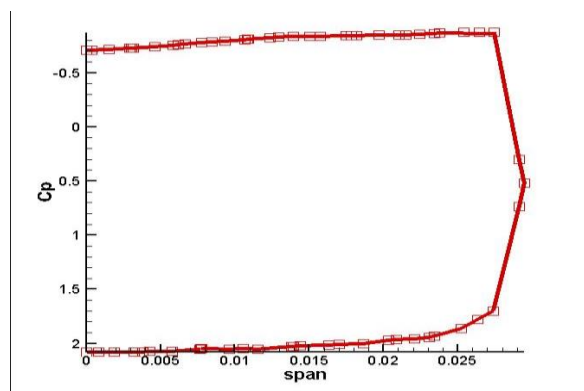
مدل $k-\omega$ که برای حل، از دو معادله انرژی جنبشی (k) و آهنگ پخش آشفتگی (ω)، بهره می‌برد، با اینکه از لحاظ هزینه محاسباتی گران است، ولی نسبت به سایر مدل‌ها پاسخ مناسب‌تری در موارد حل جریان گردابه‌ای روی بال مثلی به ما می‌دهد.

می‌توان گفت انفجار گردابه‌ها در بال‌های مثلی، همانند پدیده واماندگی در بال‌های متعارف است. بر اثر واماندگی، بال‌هایی که دهانه بزرگ دارند، با افزایش زاویه حمله کارایی خود را از دست داده و ضریب برآ در آن‌ها کاهش می‌یابد. در انفجار گردابه‌ها نیز بدین صورت است که با افزایش زاویه حمله (مثبت)، ضرایب برآ و پسا افزایش نمی‌یابد و بال مثلی به علت انفجار گردابه‌ها روی بال مثلی و کاهش سرعت گردابه‌ها روی بال، کارایی و بازدهی آیرودینامیکی قبل را ندارد و برای بال کاهش می‌یابد. این پدیده انتشار موج است و این موضوع شباهت زیادی به شوک‌ها در دینامیک گازها دارد. تجربه‌های عملی و تئوری، این موضوع را نشان می‌دهد که دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در حرکت انفجار گردابه‌ها عبارت است از:

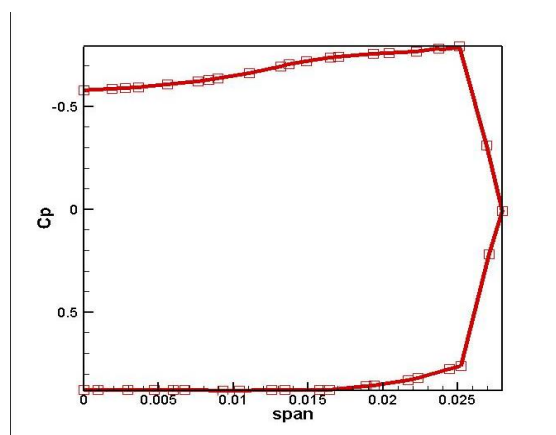
الف) سطح و رویه چرخیدن

ب) گرادیان فشار خارجی خارج از مرکز گردابه

افزایش جزیی در هر یک از پارامترهای فوق باعث ایجاد سریع‌تر انفجار گردابه‌ها می‌شود.

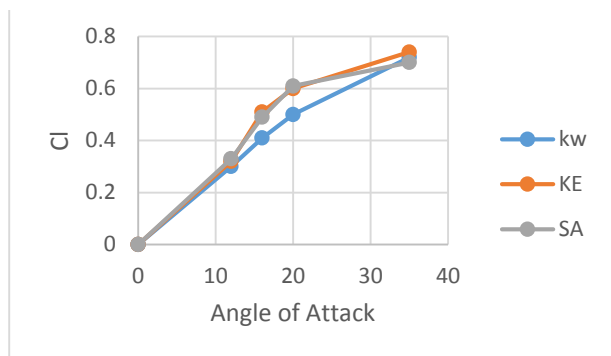


شکل ۶ نمودار ضریب فشار بر حسب اسپن (انفجار گردابه‌ها در مقطع ۵۰٪ بال - $M=2$, $\Lambda=75$, $\alpha=35^\circ$)

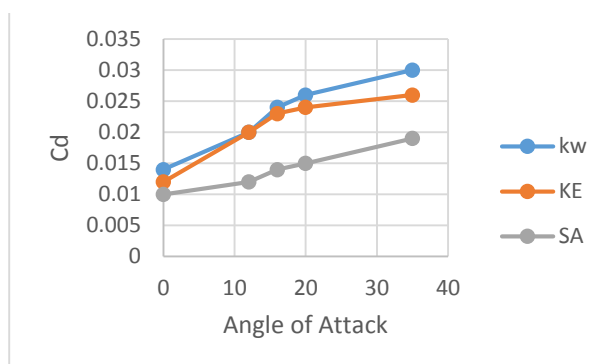


شکل ۷ نمودار ضریب فشار بر حسب اسپن (انفجار گردابه‌ها در مقطع ۵۰٪ بال - $M=2$, $\Lambda=65$, $\alpha=35^\circ$)

^۱ Mixing-Length Model



شکل ۸ مقایسه نمودارهای ضریب برآ بر حسب زاویه حمله با تغییر مدل های آشفتگی $M=1.2, \Lambda=65$



شکل ۹ مقایسه نمودارهای ضریب پسا بر حسب زاویه حمله با تغییر مدل های آشفتگی $M=1.2, \Lambda=65$

شکل های ۱۰ و ۱۱ نمودارهای ضرایب برآ بر حسب زاویه حمله و ضرایب پسا بر حسب زاویه حمله، با تغییر مدل آشفتگی برای زاویه عقبگرد ۷۵ درجه و عدد ماخ (سرعت جریان آزاد) ۲ را نشان می دهد. طبق اعتبار سنجی که در ابتدای این بخش انجام شد، مدل آشفتگی kw، بیشترین نزدیکی و قرابت را با داده های تجربی دارد به گونه ای که در تمامی زوایای عقبگرد و در تمامی اعداد ماخ (سرعت جریان آزاد)، بیشترین نزدیکی را با داده های تجربی دارا می باشد.

با مشاهده شکل های ۱۰ و ۱۱ که نمودار برآ بر حسب زاویه حمله و پسا بر حسب زاویه حمله را نشان می دهد، می توان دریافت که در کلیه مدل های آشفتگی، با افزایش زاویه حمله، ضرایب برآ و پسا نیز افزایش می یابد. به گونه ای که این افزایش در مدل های آشفتگی kw و KE بیشتر نمایان است. اما همان طور که از شکل برمی آید، مدل آشفتگی SA بیشترین اختلاف و خطا را نسبت به حالت مرجع kw دارد.

با مشاهده شکل های ۱۰ و ۱۱ می توان دریافت که برای عدد ماخ ۲ و زاویه عقبگرد ۷۵ درجه، زاویه حمله بحرانی برای نیروهای برآ و پسا، حدود ۳۵ درجه می باشد که در این زاویه حمله با توجه

در زوایای حمله پایین که هنوز جدایش جریان از روی بال نداریم و جریان به بال چسبیده، روش SA، چون از یک معادله استفاده می نماید و سریع تر است، برای حل، بهتر است. ولی این روش، در زوایای حمله بالا که جدایش جریان داریم و گردابه ها پدید می آیند، نمی تواند چرخش جریان و وجود گردابه ها را رهگیری نماید. مشاهدات و تحقیقات نیز توانایی بالای مدل kw را در بررسی جریان در زاویه حمله بالا و نشان دادن چرخش جریان و حضور گردابه ها را به خوبی نشان می دهد.

در شکل های ۸ و ۹ نمودارهای ضرایب برآ بر حسب زاویه حمله و ضرایب پسا بر حسب زاویه حمله، با تغییر مدل آشفتگی برای زاویه عقبگرد ۶۵ درجه و عدد ماخ (سرعت جریان آزاد) ۱/۲ را نشان می دهد. طبق اعتبارسنجی که در ابتدای این بخش انجام شد، مدل آشفتگی kw، بیشترین نزدیکی و قرابت را با داده های تجربی دارد به گونه ای که در تمامی زوایای عقبگرد و در تمامی اعداد ماخ (سرعت جریان آزاد)، بیشترین نزدیکی را با داده های تجربی دارا می باشد.

با مشاهده شکل ۸ که نمودار برآ بر حسب زاویه حمله را نشان می دهد، می توان دریافت که در کلیه مدل های آشفتگی، با افزایش زاویه حمله، ضریب برآ نیز افزایش می یابد. به گونه ای که این افزایش در مدل های آشفتگی kw و KE بیشتر نمایان است. اما همان طور که از شکل برمی آید، مدل آشفتگی SA بیشترین اختلاف و خطا را نسبت به حالت مرجع kw دارد. علت این موضوع این است که مدل آشفتگی SA برای حل میدان جریان، از یک معادله استفاده می نماید و به طور دقیق نمی تواند جدایش از روی بال را پیش بینی و لحاظ نماید.

با مشاهده شکل ۹ که نمودار ضریب پسا بر حسب زاویه حمله را نشان می دهد، می توان دید که در کلیه مدل های آشفتگی، با افزایش زاویه حمله، ضریب پسا نیز افزایش می یابد. به گونه ای که این افزایش در مدل های آشفتگی kw و KE بیشتر نمایان است. اما همان طور که از شکل برمی آید مشابه ضریب برآ، مدل آشفتگی SA بیشترین اختلاف و خطا را نسبت به حالت مرجع kw در تخمین ضریب پسا دارد. در زوایای حمله پایین که هنوز جدایش جریان از روی بال نداریم و جریان به بال چسبیده، روش SA به دلیل هزینه محاسباتی کمتر برای حل، بهتر است. ولی این روش، در زوایای حمله بالا که جدایش جریان داریم و گردابه ها پدید می آیند، نمی تواند چرخش جریان و وجود گردابه ها را رهگیری نماید.

با مشاهده شکل های ۸ و ۹ می توان دریافت که زاویه حمله بحرانی برای نیروهای برآ و پسا، حدود ۳۵ درجه می باشد که در این زاویه حمله با توجه به وجود انفجار گردابه ها، ضرایب اشاره شده دیگر افزایش نمی یابند و بال کارایی خود را از دست می دهد.

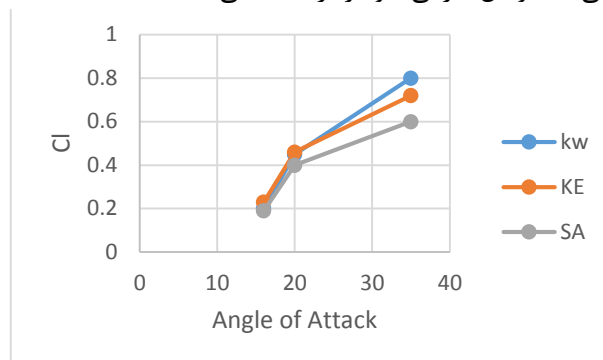
مدل آشفتگی متفاوت می‌باشد. با استفاده از یافته‌های این تحقیق می‌توان بیان نمود که با افزایش زاویه حمله اندازه گردابه روی بال افزایش می‌یابد تا اینکه در زوایای حمله بالا (حدود ۳۵ درجه) انفجار گردابه‌ها را شاهد هستیم که در سرعت‌های جریان آزاد مختلف (اعداد ماخ ۱/۲ و ۲) نیز این پدیده مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیقات فالونین [۸]، در زاویه حمله ۳۵ درجه، دقت و صحت نتایج تحقیق حاضر تایید می‌شود.

در کلیه اعتبارسنجی‌های انجام شده مشخص گردیده است که مدل آشفتگی kw نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی به نتایج عملی نزدیک‌تر است و پس از آن مدل آشفتگی KE می‌باشد و در نهایت مدل آشفتگی SA است که برای بال مثلی در زاویه حمله بالا مناسب نیست زیرا نمی‌تواند جدایش جریان را پیش‌بینی نماید. در کلیه نمودارهای ضریب برآ و ضریب پسا بر حسب زاویه حمله مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه حمله، هم ضریب برآ و هم ضریب پسا افزایش می‌یابد. با توجه به اعتبارسنجی‌های انجام شده مدل kw را به عنوان مدل مرجع در نظر گرفتیم که مدل آشفتگی KE به مدل فوق‌الذکر نزدیک‌تر بوده و مدل SA پر خط‌ترین مدل آشفتگی است. همچنین مشاهده می‌شود که نتایج حاصل شده به وسیله مدل آشفتگی kw قرابت بیشتری با نتایج فالونین [۸] دارند.

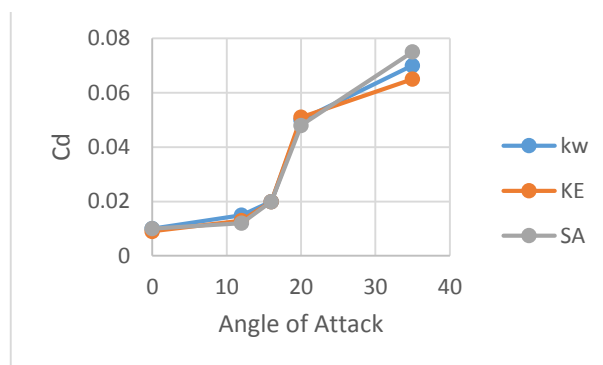
مراجع

- [1] Stanbrook, A., and Squire, L.C., Possible Types of Flow at Swept Leading Edges, Aeronautical Quarterly, v. 15, n. 2, pp. 72-78, (1964).
- [2] Miller, D.S., and Wood, R.M., Leeward Flows over Delta Wings at Supersonic Speeds, Journal of Aircraft, v. 21, n. 9, pp. 680-686, (1984).
- [3] Szodruch, J.G., and Peake, D.J., Leeward Flow over Delta Wings at Supersonic Speeds, NASA-TM, n. 81187, (1980).
- [4] Seshadri, S.N., and Narayan, K.Y., Possible Types of Flow on Lee-Surface of Delta Wings at Supersonic Speeds, Aeronautical Journal, n. 5, pp. 185-199, (1998).
- [5] Brodetsky, M.D., Krause, E., Nikiforov, S.B., Pavlov, A.A., Kharitonov, A.M., and Shevchenko, A.M., Evolution of Vortex Structures on Leeward Side of a Delta Wing, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, v. 42, n. 2, pp. 242-254, (2001).
- [6] Imai G., Fujii K., and Oyama A., Computational Analyses of Supersonic Flows over a Delta Wing at High Angles of Attack, the 24th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), (2006).

به وجود انفجار گردابه‌ها، ضرایب اشاره شده دیگر افزایش نمی‌یابند و بال کارایی خود را از دست می‌دهد.



شکل ۱۰ مقایسه نمودارهای ضریب برآ بر حسب زاویه حمله با تغییر مدل‌های آشفتگی $M=2, \Lambda=75$



شکل ۱۱ مقایسه نمودارهای ضریب پسا بر حسب زاویه حمله با تغییر مدل‌های آشفتگی $M=2, \Lambda=75$

۹- فهرست علائم و اختصارات (در صورت لزوم)

مؤلفه زاویه حمله عمود بر لبه حمله	α_N
مؤلفه عدد ماخ عمود بر لبه حمله	M_N
زاویه عقبگرد	
سرعت در جهت محور X	u
سرعت در جهت محور Y	v
سرعت در جهت محور Z	w
تابع پتانسیل سرعت	$\varphi(x, y, z, t)$
چگالی	ρ
ضریب برآ	Cl
ضریب پسا	Cd
زاویه حمله	AoA & α
عدد ماخ	M

۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق جریان پایا روی بال مثلی برای مطالعه انفجار گردابه و مدل‌های آشفتگی مختلف به صورت عددی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است. نوآوری تحقیق حاضر، بررسی جریان حول بال در زاویه حمله ۳۵ درجه و مشاهده انفجار گردابه در این حالت است و نوآوری دیگر، بررسی همین جریان با ۳

- artificial dissipation of transitional flow over a delta wing, *Journal of Computational Physics*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109182>.
- [14] Lance W. Traub (2020) Experimental Evaluation of Partial-Span Flaps on a Seventy-Degree Delta Wing. *Journal of aircraft*. <https://doi.org/10.2514/1.C036019>.
- [15] Guillermo-Monedero, Daniel (2020) A Comparison of Euler Finite Volume and Supersonic Vortex Lattice Methods used during the Conceptual Design Phase of Supersonic Delta Wings. 2020, Master of Science, Ohio State University, Aero/Astro Engineering. <http://orcid.org/0000-0003-4432-2012>.
- [16] Arun, M. P., Satheesh, M., Dhas, Edwin Raja J. (2020) Optimization of Aerodynamic Parameters of Cropped Delta Wing with Fence at Sonic Mach Number. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, Volume 16, Number 2, February 2019, pp. 403-409(7), American Scientific Publishers, <https://doi.org/10.1166/jctn.2019.7740>
- [17] Ahmed Mohamed Mohamed Draz, H. M., El Saadany, M. M., Awad, W. M. El Awady. (2020) Investigation of Air Flow Over Delta and Cranked Arrow Delta Wings. *MANSOURA ENGINEERING JOURNAL, (MEJ)*, VOL. 45, ISSUE 2, DOI: 10.21608/BFEMU.2020.112323
- [7] Oyama, A., Ito, M., Imai, G., Tsutsumi, S., Amitani, N., and Fujii, K., Mach Number Effect on Flow Field over A delta Wing in Supersonic Region, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, (2008).
- [8] M. P. Falunin, G. S. Ulyanov, A. A. Makabin, A. F. mosin, Supersonic Aerodynamic characteristics of delta wings at high angles of attack, (2012).
- [9] Tran Ngoc Khanh, Nguyen Van Khang, Nguyen Phu Khanh, Hoang Thi Kim Dung, Dao Van Quang, Effect of Shapes and Turbulent Inlet Flow to Vortices on Delta Wings. *Applied Mechanics and Materials*, ISSN: 1662-7482, Vol. 889, pp 434-439, (2018).
- [10] Ilya Bashiera Hamiz, Sher Afghan Khan, Aerodynamics Investigation of Delta Wing at Low Reynold's Number. *CFD Letters*, Volume 11, Issue 2, pp 32-41, (2019).
- [11] Han Tu, Matthew Marzanek, Melissa A. Green, David E. Rival Investigation of accelerating non-slender delta-wing planforms at high angle of attack using Lagrangian coherent structures, *AIAA SciTech Forum*, (2019).
- [12] Anna, C., Demoret, Michael, M., Walker, Mark F. Reeder, The Effect of Passive Boundary-Layer Fences on Delta Wing Performance at Low Reynolds Number, *AIAA Scitech*, (2020).
- [13] Wybe Rozema, Johan C.Kok, Arthur E.P. Veldman, Roel W.C.P. (2019) Numerical simulation with low



بررسی کاربرد کلان داده ها و کنترل مبتنی بر داده در روش - های ساخت افزایشی مواد

آرش خاکزاد شاهاندشتی*

کارشناس مطالعات فناوری، گروه مپنا، تهران

محسن پیرمحمدی

مدیر تحقیقات، گروه مپنا، تهران

چکیده: در روش های ساخت افزایشی امکان کنترل ریزساختار، با تغییر پارامترهای فرایند در حین ساخت قطعات وجود دارد. هدف این مقاله بررسی کاربرد تحلیل داده های خروجی از فرایند ساخت افزایشی مواد بر کنترل متغیرهای ساخت، حین فرایند ساخت افزایشی می باشد. قطعات ساخته شده با استفاده از روش ساخت افزایشی در معرض تغییرات ریزساختاری از حیث جهت گیری کریستالوگرافی و همچنین ناهمگونی خواص مکانیکی قرار دارد. این امر سبب شد که تحقیقات و پژوهش های زیادی به منظور بررسی و امکان برقراری فرایند کنترل ریزساختار و خواص در حین تولید قطعه انجام شود. در این مقاله ابتدا چالش های ریزساختاری و خواص مکانیکی به وجود آمده در تولید قطعات اعم از تغییرات سختی و تغییرات دانه بندی اشاره می شود و سپس به روش های کنترلی ریزساختار به منظور غلبه بر تغییرات ناخواسته ذکر شده در تحقیقات اشاره خواهد شد. تولید لایه لایه قطعات و اجرای ارزیابی ویژگی های قطعه تولید شده از طریق استفاده از داده های تصاویر دوربین مادون قرمز قبل و بعد از ایجاد هر لایه، اساس این روش های کنترل کننده ریزساختار است. لذا با ایجاد یک سیستم به منظور جمع آوری و تحلیل داده ها حین فرایند ساخت، امکان پیش بینی خواص و سپس تغییر پارامترهای ساخت به منظور دستیابی به خواص مطلوب وجود خواهد داشت.

واژه های راهنما: ساخت افزایشی، کلان داده، نظارت درجا، تصویربرداری ترموگرافیک، کنترل حین فرایند، کنترل مبتنی بر داده، ناهمگونی ریزساختاری و خواص مکانیکی.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

Arash
Khakzadshahandashti*
Technology studies expert,
Mapna group, Tehran

Mohsen
Pirmohammadi
Research manager, Mapna
group, Tehran

Application of big data and data driven control in additive manufacturing

Abstract: controlling of microstructural features is possible by changing of additive manufacturing process parameters. The purpose of this paper is the application investigation of manufacturing process data analysis in process parameters during manufacturing of parts. In this paper, microstructural defect such as grain misorientation is presented, and then the effect of microstructural and manufacturing parameters control on elimination of these defects is studied. In-situ controlling of microstructural features is possible by using data of thermographic imaging during the additive manufacturing process. Forecasting of microstructural and mechanical properties is possible by developing a system for gathering and analysis of manufacturing data during the process.

Keywords: Additive manufacturing, Big data, In-situ monitoring, Thermographic imaging, Data driven control, microstructural heterogeneity.

۱- مقدمه

تمامی این مدل‌ها پتانسیل زیادی برای ارتقا و بهبود دارند که این امر با به‌کارگیری و اعتبار سنجی^۸ داده‌های فرایند ساخت افزایشی میسر خواهد بود. این ارتقا منجر به بهبود قابلیت اطمینان مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و فرایند کنترل خواص در حین ساخت خواهد شد. این مقاله به مطالعه روش‌های ذکر شده اختصاص دارد که در این روش‌ها یک فرایند کنترلی ایجاد خواهد شد که در آن با تغییر و تنظیم پارامترها، به ایجاد یک فرایند ساخت موفق کمک خواهد کرد [۲-۴].

۲- چالش‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی در روش ساخت افزایشی

به طور عمومی سوپرآلیاژهای پایه نیکل را به دو دسته جوش‌پذیر و غیر جوش‌پذیر تقسیم می‌کنند. به طور مثال در پژوهشی برای ورق‌های IN718 با ضخامت ۲ میلی‌متر، مدلی به منظور پیش‌بینی رفتار جوش‌پذیری این سوپرآلیاژ با توجه به توان لیزر و سرعت حرکت پرتو توسعه داده شد [۵]. با توجه به این مدل مشخص شد که در جوشکاری ورق‌های سوپرآلیاژ امکان ایجاد جوش‌هایی عاری از ترک در سرعت‌های بیش از ۵ میلی‌متر بر ثانیه وجود ندارد. اما در حین ساخت افزایشی قطعات سوپرآلیاژی با استفاده از روش ذوب بستر پودر با لیزر^۹ امکان ساخت قطعات سالم حتی با وجود سرعت‌هایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه وجود دارد [۶]. لذا از یک سو فرایندهای ساخت افزایشی شباهت زیادی با فرایندهای جوشکاری پیشرفته با استفاده از لیزر و پرتو الکترونی از حیث جوش‌پذیری آلیاژها دارد. اما از طرف دیگر فناوری فرایند در این روش‌ها و نحوه تأثیر پارامترهای فرایند بر ریزساختار تفاوت‌های اساسی با جوشکاری دارد. این تفاوت به دلیل اختلاف در شرایط انتقال حرارت در طول فرایندهای ساخت افزایشی لیزر و روش‌های جوشکاری لیزر می‌باشد. تفاوت در نحوه حرکت منبع پرتو سبب تفاوت در توزیع انتقال حرارت در قطعه کار خواهد شد [۷].

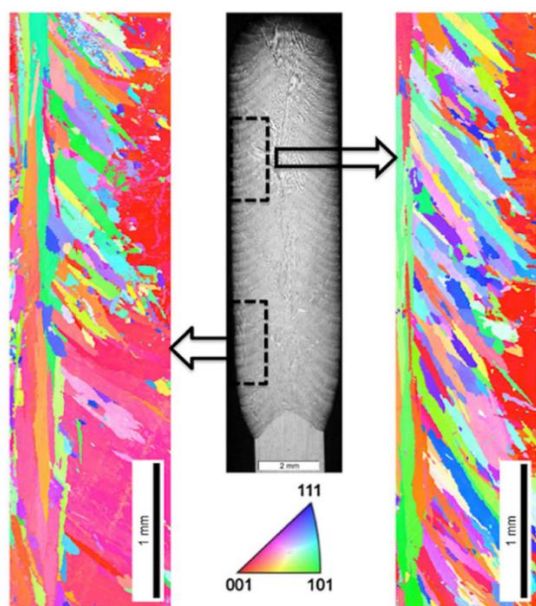
در پژوهش انجام شده در تعمیر قطعات ساخته شده از سوپرآلیاژ IN718 با استفاده از روش لایه نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی^{۱۰} دو نوع از ناهمگونی^{۱۱} در خواص مشاهده شده است. مورد اول مربوط به جهت‌گیری اجزای ریزساختاری و دیگری مربوط به تغییرات سختی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با افزایش فاصله از زیرلایه (شکل سمت راست) میزان رشد دانه‌ها با جهت غیر مرجح افزایش یافته است. این تغییر در جهت‌گیری رشد دانه‌ها به دلیل تغییر حوضچه جوش و همچنین کاهش گرادیان دمایی با افزایش ارتفاع از زیرلایه می‌باشد. نوع دیگری از ناهمگونی مربوط به نقشه سختی قطعه تعمیر شده است (شکل ۲) که تغییرات زیادی را از ۲۰۰

روش‌های ساخت افزایشی^۱ فرایندی برای تولید قطعات فلزی جامد از طریق ساخت به روش لایه لایه پودر، سیم و یا ورق‌های نازک مواد فلزی می‌باشد. روش‌های ساخت افزایشی فلزات مزایای زیادی نسبت به روش‌های مرسوم و قدیمی تولید ایجاد می‌کند. این مزایا شامل انعطاف‌پذیری بالا در تولید اشکال پیچیده، کاهش زمان تولید، کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات می‌باشد. تحقیقات گسترده به منظور توسعه بیشتر این فناوری مورد نیاز است تا نیازهای صنعتی مرتفع و امکان استفاده گسترده از این روش ایجاد شود. از دیگر مزایای استفاده از روش ساخت افزایشی عدم نیاز به فرایندهای تکمیلی نظیر فرایندهای مورد نیاز برای آماده سازی سطوح و همچنین دستیابی به محدوده ابعادی مورد نظر و تکرار پذیری فرایند است [۱].

یکی از چالش‌های اساسی در تولید قطعات با استفاده از روش‌های ساخت افزایشی، عدم یکنواختی در خواص مکانیکی قطعات تولیدی است. در روش‌های ساخت افزایشی امکان کنترل ریزساختار، با تغییر پارامترهای فرایند در حین ساخت قطعات وجود دارد. تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که هدف این تحقیقات کاهش نیاز به انجام آزمایشات تجربی بر هزینه و زمان بر می‌باشد. این تحقیقات به نظارت درجا^۲ بر خواص ریزساختاری و مکانیکی قطعات تولید شده به منظور کنترل حین فرایند ساخت اختصاص دارد. با توسعه سریع روش‌های جمع‌آوری، ذخیره و انتقال داده‌ها، امکان به‌کارگیری مدل‌های و ابزارهای هوشمند برای مانیتور کردن دقیق تعداد بسیار زیادی از داده‌ها فراهم شده است. امکان به‌کارگیری این مدل‌ها و ابزار در روش‌های ساخت افزایشی با رشد چشمگیری مواجه شده است که سبب خواهد شد فناوری کلان‌داده^۳ تا حد زیادی سبب پیشرفت و بهبود خواص قطعات ساخته شده با روش ساخت افزایشی شود. کلان‌داده و ساخت افزایشی از جمله فناوری‌های کلیدی در انقلاب صنعتی چهارم^۴ می‌باشد. پرینت سه بعدی^۵، رایانش ابری^۶، کلان‌داده و اینترنت اشیا^۷ فناوری‌های هستند که در سال‌های آتی تحولات اساسی در صنایع مختلف جهان ایجاد خواهند کرد. با استفاده از فناوری کلان‌داده در روش ساخت افزایشی و تغییر پارامترهای فرایندی و کنترل آن‌ها فرایند تصمیم‌گیری هوشمند در حین فرایند ارتقا می‌یابد و می‌توان بر عیوب ریزساختاری و عدم یکنواختی در خواص مکانیکی حین تولید قطعات غلبه کرد.

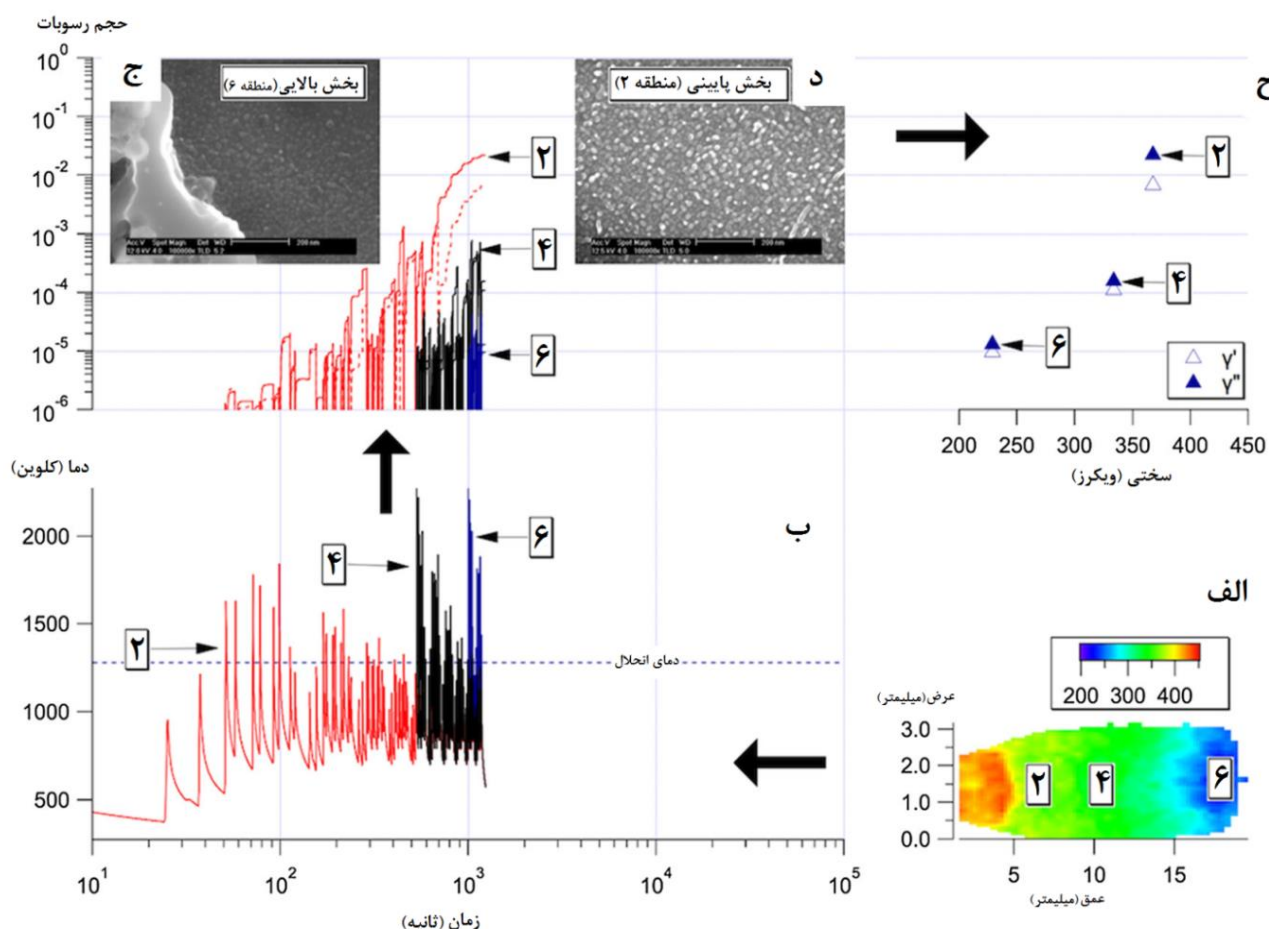
به منظور دستیابی به اهداف ذکر شده از مدل‌های (انجمادی، سیالاتی و ...) پیش‌بینی‌کننده ریزساختار و خواص در فرایند ساخت، در ابعاد و زمان‌های متفاوت استفاده خواهد شد. البته

⁷ Internet of things (IoT)⁸ validation⁹ Laser powder bed fusion¹⁰ Direct energy deposition¹¹ heterogeneity¹ Additive manufacturing² In-situ monitoring³ Big data⁴ Industry 4.0⁵ 3D printing⁶ Cloud computing



شکل ۱ ناهمگونی ریزساختاری در قطعه تعمیر شده با استفاده از روش لایه نشانی با توزیع مستقیم انرژی در دو بخش مختلف: سمت چپ) نزدیک به زیرلایه و سمت راست) نزدیک به بخش بالایی [۸].

ویکرز تا ۴۵۰ ویکرز نشان می‌دهد. منطقه با بیشترین سختی (منطقه ۲) در لایه‌های ایجاد شده نزدیک به زیرلایه و کمترین سختی (منطقه ۶) در لایه‌های بالایی ایجاد شده دیده شده است. فرایند رسوب‌سختی سوپرآلیاژ IN718 از طریق رسوب‌گذاری فازهای γ' و γ'' انجام می‌شود. تغییرات دمایی در اطراف دمای انحلال برای مناطق ۲، ۴ و ۶ با استفاده از محاسبات المان محدود محاسبه شد. در همه مناطق محدوده دمایی در اطراف دمای انحلال فازهای γ' و γ'' نوسان داشته است. این نوسانات در منطقه ۲ بیشتر از سایر مناطق بوده است. لذا میزان رسوبات در منطقه ۲ بیشتر از منطقه ۴ و منطقه ۶ است. مشاهدات ریزساختاری نتایج ذکر شده را تأیید کردند (شکل ۲- ج و د) [۷، ۸]. با توجه به مباحث ذکر شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قطعات ساخته شده با استفاده از روش ساخت افزایشی در معرض تغییرات ریزساختاری از حیث جهت‌گیری کریستالوگرافی و همچنین ناهمگونی خواص مکانیکی قرار دارد. این امر سبب شد که تحقیقات و پژوهش‌های زیادی به منظور بررسی و امکان برقراری فرایند کنترل ریزساختار و خواص در حین تولید قطعه (روش‌های نظارت درجا) انجام شود.



شکل ۲ ناهمگونی خواص مکانیکی در سوپرآلیاژ IN718 تعمیر شده با روش لایه نشانی با توزیع مستقیم انرژی (الف) نقشه میزان سختی در ارتفاع و عرض قطعات تعمیر شده (ب) سیکل‌های دمایی در نقاط ۲، ۴ و ۶ (ج) رسوبات اندک در لایه‌های بالایی ایجاد شده (د) رسوبات بیشتر در لایه پایینی ایجاد شده (ه) کسر حجمی رسوبات در مناطق مختلف [۸].

۳- استفاده از تصویربرداری ترموگرافیک به منظور کنترل خواص قطعات تولید شده

همانطور که ذکر شد در روش‌های نظارت درجا، امکان ایجاد یک فرایند کنترلی وجود دارد که در این فرایند با تغییر و تنظیم پارامترهای فرایند ساخت، به ایجاد یک ساخت موفق کمک خواهد کرد. قطعات سوپرآلیاژی که در توربین‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تحت دما و تنش بالا و همچنین محیط خورنده قرار دارند. قطعات تولید شده توربین پس از تولید، مطابق استانداردهای کیفی، می‌بایست مرحله ارزیابی از طریق آزمایشات مخرب و غیرمخرب را طی کنند. انجام آزمایشات غیر مخرب همواره با خطاهایی همراه می‌باشد. از آنجایی که روش ساخت افزایشی یک روش ساخت بر اساس ذوب لایه لایه می‌باشد، امکان اجرای ارزیابی ویژگی‌های قطعه تولید شده از طریق تشخیص و کنترل ویژگی‌های حرارتی و سطح قطعه وجود دارد تا به اطلاعاتی در خصوص میزان توزیع عیوب (حفرات و ترک‌ها) و همچنین خواص ریزساختاری دست یافت. دستیابی به این اطلاعات از طریق استفاده از تصاویر مادون قرمز^۱ قبل و بعد از ایجاد هر لایه امکان‌پذیر است.

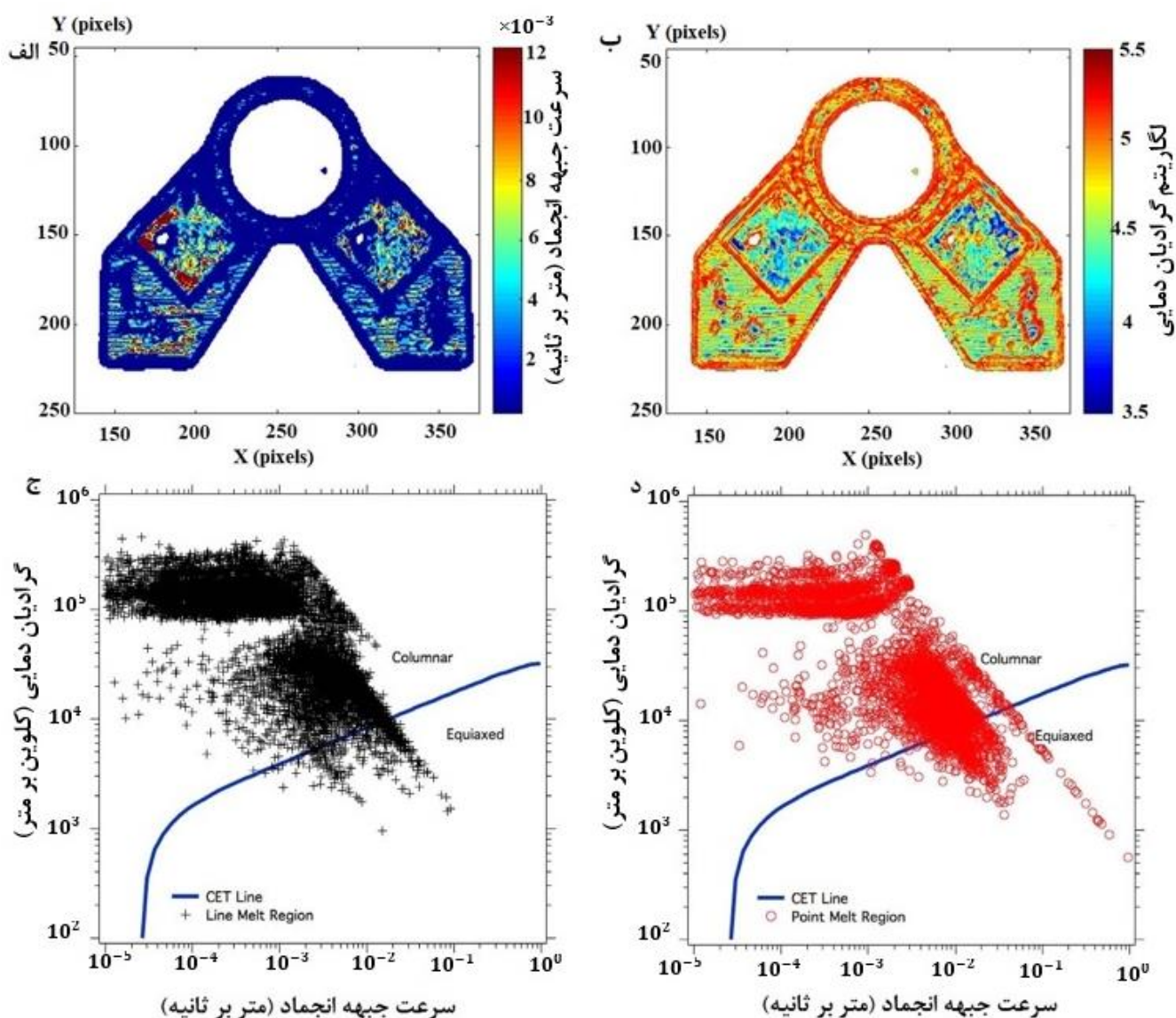
امروزه در تحقیقات به همراه روش ساخت افزایشی از تصویربرداری ترموگرافیک^۲، روش‌های گرماسنجی^۳ و همچنین قراردادن ترموکوپل در زیرلایه استفاده می‌شود. اگرچه در میان روش‌های ذکر شده استفاده از تصویربرداری ترموگرافیک با دوربین‌های مادون قرمز پرکاربردترین روش است. تصویربرداری ترموگرافیک یک روش غیرتماسی به منظور کنترل کردن دما در یک جسم با استفاده از دوربین‌های مادون قرمز می‌باشد. دوربین مادون قرمز با استفاده از یک سنسور، تابش‌های مادون قرمز که از طریق یک لنز متمرکز شده را جمع می‌کند و این اطلاعات را به تصویر دیجیتال تبدیل می‌کند. این اطلاعات خارج شده از هر منطقه (بسته به میزان شدت موج مادون قرمز) سپس به دما تبدیل خواهد شد. اگرچه شدت موج مادون قرمز خروجی به توپوگرافی سطح بازتاب‌کننده و همچنین ضریب بازتابش ماده وابسته است. لذا داده‌های خروجی می‌بایست با استفاده از توابعی کالیبره شوند. از طرفی ضریب بازتابش هم با افزایش دمای سطح ماده بازتاب‌کننده افزایش می‌یابد. این تغییرات منشأ خطاهایی در تبدیل شدت موج مادون قرمز به دما خواهد بود که سبب بروز مشکلاتی در نظارت بر فرایند ساخت افزایشی خواهد شد. سپس دماهای کالیبره شده به منظور تخمین پارامترهای انجمادی که بر ریزساختار و خواص تأثیر گذارند، استفاده خواهد شد [۹-۱۳]. از دیگر منابع خطا در این روش کنترلی می‌توان به اندازه پیکسل-های مورد بررسی اشاره کرد. همچنین قدرت تفکیک^۴ و بازه زمانی اندازه‌گیری فریم‌های دوربین، عامل محدود کننده دیگری خواهد بود. پارامترهای مشخصی مانند گرادیان دمایی (G) و سرعت پیشروی جبهه انجماد (R) با استفاده از داده‌های دوربین

مادون قرمز و روابط انجمادی محاسبه خواهد شد. با در اختیار داشتن این پارامترها امکان پیش‌بینی ریزساختار و دانه‌بندی از نوع هم محور^۵ و یا ستونی^۶ وجود خواهد داشت [۱۴].

در پژوهشی در روش ساخت افزایشی قطعات IN718 با استفاده از ذوب با پرتو الکترونی^۷ کاربرد تصویربرداری ترموگرافیک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش کاربرد این روش به منظور تأثیر دو استراتژی مختلف حرکت منبع پرتو (نقطه‌ای و خطی) بر ویژگی‌های کریستالوگرافی ریزساختار (ساختار هم محور و یا ستونی) مورد مطالعه قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، یک دوربین مادون قرمز با طول موج متوسط خارج از محفظه خلأ دستگاه و رو به پنجره شیشه‌ای محفظه قرار داده شد. با استفاده از نرم‌افزارهای موجود در پژوهش، داده‌های مبتنی بر شدت موج مادون قرمز دریافتی به دما در حین تولید تبدیل شد. مطالعات ریزساختاری نشان داده است که کاهش گرادیان دمایی و افزایش سرعت جبهه انجماد سبب تشکیل ریزساختار با دانه‌بندی هم محور خواهد شد [۱۴]. در این پژوهش گرادیان دمایی در سطح از طریق تخمین خطی تغییرات دمایی مابین دو پیکسل محاسبه شد. از طریق تخمین فاصله بین دو پیکسل در نرم‌افزارهای آنالیز تصویری، پارامتر گرادیان دمایی انجماد (G) محاسبه شد. همچنین از طریق مدلی دیگر، با استفاده از داده‌های دمایی در زمان‌های مختلف سرعت جبهه انجماد (R) محاسبه شد.

شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات مقادیر گرادیان دمایی انجماد (G) و سرعت جبهه انجماد (R) برای یک لایه خاص در هندسه مسأله می‌باشد. گرادیان دمایی در حرکت منبع پرتو به صورت خطی عموماً بیشتر از گرادیان دمایی در حرکت منبع پرتو به صورت نقطه‌ای می‌باشد. بخش‌هایی از ریزساختار که با منبع نقطه‌ای ساخته شده‌اند به علت مواجهه با گرادیان دمایی پایین‌تر با ساختار دانه‌بندی هم محور رشد خواهند کرد (شکل ۳-۵). زیرا کاهش گرادیان دمایی و افزایش سرعت جبهه انجماد سبب تشکیل ریزساختار با دانه‌بندی هم محور خواهد شد. از طرفی بخش‌هایی از ریزساختار که با منبع خطی ساخته شده‌اند به علت مواجهه با گرادیان دمایی بالاتر با ساختار دانه‌بندی ستونی رشد کردند (شکل ۳-ج). به این ترتیب تأثیر حرکت مختلف منبع پرتو بر ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج در تطابق با مشاهدات ریزساختاری و نتایج EBSD می‌باشد [۱۵]. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فناوری کلان‌داده و ایجاد بستری برای آنالیز داده‌های مادون قرمز، برای کنترل تدریجی ریزساختار در قطعات ساخته شده به روش‌های ساخت افزایشی نقشی حیاتی ایفا خواهد کرد. در این بستر با جمع‌آوری داده‌های دوربین مادون قرمز و پارامترهای حرارتی حین فرایند و با استفاده از مدل‌های ریزساختاری و یا خواص مکانیکی امکان کنترل نوع ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی وجود دارد [۱۶ و ۱۷].

⁵ equiaxed⁶ columnar⁷ Electron beam melting (EBM)¹ Near infrared image² Thermographic imaging³ pyrometry⁴ resolution



شکل ۳ الف) گرادیان دمایی انجماد ب) سرعت جبهه انجماد ج) نمودار تبدیل ریزساختار در حرکت خطی منبع پرتو و د) نمودار تبدیل ریزساختار در حرکت نقطه‌ای منبع پرتو در یک لایه [۱۵].

به منظور بهینه سازی فرایند ساخت، رصد ویژگی‌های ریزساختاری و پارامترهای فرایندی به منظور شناسایی کامل ویژگی‌های قطعات ساخته شده الزامی است. به طور مثال در فرایند تف جوشی لیزری انتخابی^۱ پارامترهای مختلفی از جمله اندازه پودر، درصد بازیافت پودر، کالیبراسیون دستگاه، نوع نرم افزار، سرعت پرینت و مسیر ساخت بسیار مؤثر است. پارامترهای فرایند باید کمی شود تا قطعات با کیفیت و با تکرارپذیری بالا تولید شود. به علاوه به یک سیستمی نیاز است که از جمع آوری، مدیریت و قابلیت ردیابی داده‌ها به طور کامل پشتیبانی کند. بدین وسیله با استفاده از مدل‌هایی، ارتباط مابین پارامترهای فرایند ساخت و ویژگی‌های عملکردی قطعه تولیدی آشکار خواهد شد تا عوامل کلیدی در تغییرات خواص مورد بررسی و

۴- استفاده از فناوری کلان داده در روش ساخت افزایشی

نتایج تحقیقات اشاره شده در این مقاله نشان داد که استفاده از فناوری کلان‌داده و ایجاد بستری برای آنالیز داده‌های مادون قرمز، برای کنترل تدریجی ریزساختار در قطعات ساخته شده به روش‌های ساخت افزایشی نقشی حیاتی ایفا خواهد کرد. در این بستر با جمع‌آوری داده‌های دوربین مادون قرمز و پارامترهای حرارتی حین فرایند و با استفاده از مدل‌های ریزساختاری و یا خواص مکانیکی امکان کنترل نوع ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی وجود دارد که در ادامه توضیحاتی در این خصوص ارائه خواهد شد.

^۱ Selective laser sintering (SLS)

materials reviews, Vol. 61, No. 5, pp.315-360, (2016).

[2] Dehoff, R.R., Kirka, M.M., Sames, W.J., Bilheux, H., Tremsin, A.S., Lowe, L.E. and Babu, S.S., Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing, *Materials Science and Technology*, Vol. 31, No. 8, pp.931-938, (2015).

[3] Clijsters, S., Craeghs, T., Buls, S., Kempen, K. and Kruth, J.P., In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 5, pp.1089-1101, (2014).

[4] Krauss, H., Eschey, C. and Zaeh, M., Thermography for monitoring the selective laser melting process. In *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, pp. 999-1014, (2012), August.

[5] Dye, D., Hunziker, O. and Reed, R.C., Numerical analysis of the weldability of superalloys, *Acta Materialia*, Vol. 49, No. 4, pp.683-697, (2001).

[6] Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I. and Smurov, I., Single track formation in selective laser melting of metal powders, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 12, pp.1624-1631, (2010).

[7] Babu, S.S., Raghavan, N., Raplee, J., Foster, S.J., Frederick, C., Haines, M., Dinwiddie, R., Kirka, M.K., Plotkowski, A., Lee, Y. and Dehoff, R.R., Additive manufacturing of nickel superalloys: opportunities for innovation and challenges related to qualification. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 49, No. 9, pp.3764-3780, (2018).

[8] Tian, Y., McAllister, D., Colijn, H., Mills, M., Farson, D., Nordin, M. and Babu, S., Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 45, No. 10, pp.4470-4483, (2014).

[9] Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K. and Clare, A.T., Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, *Materials & Design*, Vol. 95, pp. 431-445, (2016).

[10] Flir, A., The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals: A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry. FLIR AB. URL http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/FLIR/The_Ultimate_Infrared_Handbook_for_RD/112511/0, pp. 5, (2013).

تحلیل قرار گیرد. با استفاده از موارد اشاره شده امکان افزایش مدیریت و اتوماسیون حین فرایند و همچنین توانایی مانیتور کردن کلیه داده ها در فرایندهای تولید قطعات به روش ساخت افزایشی وجود خواهد داشت [۱۸]. یک سیستم اشاره شده به منظور جمع آوری، مدیریت و ردیابی داده ها لازم است که دارای ویژگی های ذیل باشد:

- جمع آوری داده های شامل اطلاعات فرایند، مواد خام، ویژگی های دستگاه و ...
- فراهم کردن دسترسی برای بهسازی و بازبینی داده ها
- حفظ قابلیت ردیابی داده ها در کل زنجیره فرایند ساخت
- اجرای مدل های کنترلی
- تولید اطلاعات ضروری به منظور بازرسی حین فرایند [۱۹ و ۲۰].

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به ناهمگونی های ریزساختاری و همچنین تغییرات ناخواسته در خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی اشاره شد. با تغییر پارامترهای فرایند ساخت افزایشی (مانند تغییر نوع حرکت منبع پرتو به حالت خطی یا نقطه ای) امکان تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی در قطعات ساخته شده وجود خواهد داشت. روش های آنالیز و شناسایی ریزساختاری مخرب (مانند روش های میکروسکوپی) بسیار پرهزینه و زمان بر می باشد. لذا در تحقیقات به روش هایی ارائه شده که با استفاده از مدل های پیش بینی کننده ریزساختار، امکان کنترل ریزساختار و اجرای فرایند نظارت درجا وجود داشته باشد. با استفاده از فناوری کلان داده از طریق ایجاد یک سیستم و جمع آوری و تحلیل داده های به دست آمده حین فرایند و همچنین مدل های پیش بینی کننده خواص ریزساختاری ذکر شده، امکان کنترل خواص ریزساختاری و خواص مکانیکی در روش های متفاوت ساخت افزایشی وجود دارد. با ایجاد یک سیستم دارای قابلیت جمع آوری، مدیریت و ردیابی داده ها و با اجرای مدل هایی، ارتباط مابین پارامترهای فرایند ساخت (مانند نوع حرکت منبع پرتو) و ویژگی های ریزساختاری قطعه تولیدی (مانند ساختار با دانه بندی هم محور و یا ستونی) آشکار خواهد شد تا نظارت درجا و بررسی و تحلیل خواص قطعات تولیدی انجام شود. این نظارت درجا از طریق استفاده از دوربین های مادون قرمز به همراه مدل های انجمادی و حرارتی میسر خواهد شد. با توسعه مدل های اشاره شده امکان پیش بینی نوع دانه بندی، جهت گیری کریستالوگرافی، تشکیل ترک و حفرات در حین فرایند ساخت برای یک لایه به خصوص وجود دارد.

مراجع

[1] Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R. and Babu, S.S., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International*

- [16] Schnell, N., Schoeler, M., Witt, G. and Kleszczynski, S., Experimental and numerical thermal analysis of the laser powder bed fusion process using in situ temperature measurements of geometric primitives. *Materials & Design*, Vol. 209, pp.109946, (2021).
- [17] Stanger, L., Rockett, T., Lyle, A., Davies, M., Anderson, M., Todd, I., Basoalto, H. and Willmott, J.R., Reconstruction of Microscopic Thermal Fields from Oversampled Infrared Images in Laser-Based Powder Bed Fusion. *Sensors*, Vol. 21, No. 14, pp.4859, (2021).
- [18] Wang, L. and Alexander, C.A., Additive manufacturing and big data. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, Vol. 1, No. 3, pp.107-121, (2016).
- [19] Big Data Management in Additive Manufacturing. (2019); Available from <https://metrology.news/big-data-management-in-additive-manufacturing/>.
- [20] Bi, K., Lin, D., Liao, Y., Wu, C.H. and Parandoush, P., Additive manufacturing embraces big data. *Progress in Additive Manufacturing*, pp.1-17, (2021).
- [11] Dinwiddie, R.B., Kirka, M.M., Lloyd, P.D., Dehoff, R.R., Lowe, L.E. and Marlow, G.S., Calibrating IR cameras for in-situ temperature measurement during the electron beam melt processing of Inconel 718 and Ti-Al6-V4. In *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII*, Vol. 9861, pp. 986107, International Society for Optics and Photonics, (2016), June.
- [12] Alldredge, J., Slotwinski, J., Storck, S., Kim, S., Goldberg, A. and Montalbano, T., In-Situ monitoring and modeling of metal additive manufacturing powder bed fusion. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1949, No. 1, pp. 020007, AIP Publishing LLC, (2018), April.
- [13] Li, D., Liu, R. and Zhao, X., Overview of in-situ temperature measurement for metallic additive manufacturing: how and then what, *Solid Free Fabr 2019 Proc 30th Annu Int*, pp.1596-1610, (2019).
- [14] Hunt, J.D., Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic. *Materials science and engineering*, Vol. 65, No. 1, pp.75-83, 1984.
- [15] Raplee, J., Plotkowski, A., Kirka, M.M., Dinwiddie, R., Okello, A., Dehoff, R.R. and Babu, S.S., Thermographic microstructure monitoring in electron beam additive manufacturing. *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, pp.1-16, (2017).

طراحی بهینه سازه سیلندر چند لایه با انطباق پرسی دوار تحت بار فشار داخلی

بهروز شهریاری*

استادیار

علیرضا علیپوری تراب

کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده: هدف این پژوهش، بهینه‌سازی حجم یک سیلندر سه‌لایه دوار، تحت فشار داخلی و بار گریز از مرکز ناشی از چرخش سیلندر است که در طراحی درام دوار کمپرسور موتورهای توربینی کاربرد دارد. در سیلندرهایی جدار ضخیم دوار تحت فشار داخلی، تنش محیطی بیشینه در شعاع داخلی سیلندر به وجود می‌آید. با چند لایه کردن سیلندر و پرسی جا زدن لایه‌ها درون یکدیگر می‌توان تنش محیطی ایجاد شده در سیلندر را کاهش داد. با اعمال پیش‌بار ناشی از انطباق پرسی، تنش محیطی کاسته شده و سبب می‌شود که از ظرفیت شعاع‌های بیرونی سیلندر جهت مقاومت در برابر تنش استفاده گردد. در این تحقیق ابتدا معادلات تنش یک سیلندر سه لایه فولادی تحت فشار داخلی و در حال چرخش، به روش جمع آثار استخراج می‌شود. سپس یک راه حل بهینه‌سازی شمارشی به منظور کمینه کردن حجم سیلندر ارائه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که تنش محیطی حاصل از برنامه بهینه‌سازی ۳۹ درصد کمتر از تنش محیطی در یک سیلندر یک‌تکه با شرایط یکسان است. برای اعتبارسنجی نتایج تحلیلی، مسئله در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس شبیه‌سازی گردید. نتایج حاکی از اختلاف ۱/۳ درصد در تنش محیطی بیشینه به دست آمده می‌باشد.

واژه‌های راهنما: سیلندر چندلایه، فشار داخلی، انطباق پرسی، بهینه‌سازی، تنش محیطی.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

Behrooz Shahriari*
Assistant professor

Alireza Alipouri
Toraab
MSc., Faculty of
Mechanics, Malek Ashtar
University of Technology

Optimum design of rotating multilayer press-fitted cylinder structure subjected to internal pressure load

Abstract: The aim of this study is to optimize the volume of a three-layer rotating cylinder under internal pressure and centrifugal load used in design of turbine engines compressor rotating drum. In thick-walled rotating cylinders under internal pressure, maximum hoop stress occurs in the inner radius. In compound cylinder, the hoop stress can be reduced by pressing the layers together that causes using the capacity of the outer radii to withstand stress. The stress equations of compound steel cylinder are extracted by the superposition method. Then a numerical optimization solution is proposed to minimize cylinder volume. The maximum hoop stress resulted from the optimization program is 39% less than single layer cylinder with the same condition. In order to validate, the problem is simulated in the Abaqus software. Maximum difference of 1.3% obtained from the analysis and simulation.

Keywords: Multilayer cylinder, Internal pressure, Press fit, Optimization, Hoop stress.

۱- مقدمه

روش المان محدود و در شرایط مختلف حرارتی مقایسه شد. جباری و همکارانش [۱۲] یک راه حل تحلیلی برای محاسبه تنش های حرارتی و مکانیکی محوری در مخزن ضخیم FGM با استفاده از معادله ی ناپیردر سال ۲۰۰۲ ارائه کردند. مجید الگوری و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۱ یک تحلیل اجزای محدود بر روی سیلندرهای ترکیبی از جنس آلومینیوم و فولاد که تحت فشار درونی و بارگذاری حرارتی و همچنین بارگذاری دورانی ناشی از نیروی گریز از مرکز است، انجام دادند و مقادیر تغییرات تنش را در دیواره ی سیلندر بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین تنش محیطی در این مسئله بین سطح تماس دو سیلندر اتفاق می افتد. سانیل [۱۴] از تنش محیطی بیشینه به منظور بهینه سازی سیلندرهای مرکب استفاده کرد و مقادیر ابعادی را برای دو سیلندر برای فشار داخلی یکسان در سال ۲۰۱۱ بهینه کرد. ماجومده و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ یک سیلندر ترکیبی سه لایه را برای یک فشار داخلی مشخص طراحی و بهینه کردند. فرض آنها برای بهینه سازی این بود که سه سیلندر، تنش شعاعی یکسان در سطح داخلی داشته باشند. آنها، مقدار تداخل و قطر خارجی را به عنوان پارامترهای بهینه سازی و بقیه پارامترها را ثابت در نظر گرفتند. کاظم زاده [۱۶] در سال ۲۰۱۸ اثر انطباق پرسی بر طراحی بهینه لوله های کامپوزیت چند لایه تحت فشار را بررسی کرد. عبدالسلام [۱۷] در سال ۲۰۱۹ طراحی استوانه های سه لایه با پرس انطباقی که تحت فشار بسیار زیاد قرار گرفته اند، را بهینه سازی کرد. کارآموز و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ یک فرمول تحلیلی برای استوانه های جداره ضخیم کامپوزیتی متقارن بر اساس نظریه الاستیسیته دوبعدی خطی که انطباق پرسی شده اند، ارائه کردند.

تحقیقات گذشته روی سیلندرهای چندلایه تحت فشار داخلی بوده است. در این تحقیق به بررسی سیلندر چندلایه تحت فشار داخلی که در حال چرخش است پرداخته شده است. این سیلندر در طراحی درام دوار کمپرسور موتور توربینی به ویژه توربین گاز هوایی که کاهش وزن در آن اهمیت ویژه ای دارد به کار می رود. بسته به سرعت دوران، جنس و توزیع جرمی این سیلندرها، علاوه بر بارگذاری فشار داخلی، تحت بارهای گریز از مرکز قرار می گیرند. نیروی گریز از مرکز سهم مهمی از تنش های ایجاد شده در سیلندر را به خود اختصاص می دهد. با چند لایه ای ساختن این سیلندرها و استفاده از فشار جازنی در شعاع های مناسب، توزیع تنش به صورتی ایجاد می شود که از ماکزیمم ظرفیت استحکامی سیلندر ترکیبی استفاده شود.

هدف این تحقیق بهینه سازی یک سیلندر ترکیبی سه لایه با جنس یکسان بوده که تحت فشار داخلی P_i و سرعت زاویه ای ω می باشد. هدف یافتن قطر سیلندرها و همچنین میزان تداخل سیلندرها درون هم می باشد به گونه ای که هم تنش محیطی σ_θ کوچکتر از تنش تسلیم شود و همراه آن حجم سیلندر ترکیبی، کمینه باشد. شکل ۱ سیلندر ترکیبی سه لایه تحت فشار داخلی و سرعت زاویه ای را نشان می دهد.

به منظور حل مسئله، اثرات هر کدام از نیروهای وارده به سیلندر ترکیبی را به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن سایر نیروها تحلیل کرده و سپس آنها را به صورت جمع آثار با یکدیگر جمع می شوند. تحلیل در سه حالت انجام می گردد. در حالت اول تنش به وجود آمده در سیلندر بر اثر جازدن پرسی بررسی

سیلندرهای ترکیبی کاربردهای گسترده ای در صنایع مختلف همچون صنایع نظامی، هسته ای، هیدرولیک، مخازن تحت فشار، خطوط انتقال سیال فشار بالا و غیره دارند. به منظور افزایش ظرفیت و فشار قابل تحمل و همچنین کاهش حجم و هزینه، سیلندرهای جدار ضخیم را به صورت چندلایه و در برخی موارد با جنس های متفاوت می سازند. روش ساخت این گونه سیلندرها به این گونه است که قطر خارجی یک سیلندر از قطر داخلی سیلندر دیگر مقداری بزرگتر می باشد که به آن تداخل می گویند و سپس آنها را به صورت پرسی یا با گرم و سرد کردن درون یکدیگر جا می زنند. این تداخل باعث ایجاد یک تنش پیش بار بر روی شعاع خارجی سیلندر داخلی و همچنین شعاع داخلی سیلندر خارجی می گردد. این تنش که بر روی شعاع خارجی سیلندر داخلی که بر اثر جازدن پرسی به وجود می آید باعث می شود به عنوان فشار خارجی بر روی سیلندر داخلی عمل کند و از میزان تنش محیطی ایجاد شده بر اثر فشار داخلی در سیلندر بکاهد.

۲- تاریخچه

پیشینه ی مباحث تحلیل توزیع تنش در سیلندرهای دوار به دهه های نخست قرن ۱۹ باز می گردد. برای مواد با رفتار الاستیک، تنش ها و جابجایی را می توان در تحلیل های آن دوره یافت. مسئله تنش در استوانه ها و دیسک های دوار در ماشین های دوار نظیر توربین ها، راکتورها و ژنراتورها، یا در هر سازه ای که برای انجام وظیفه به سرعت های دورانی بالا نیاز است، بسیار مهم می باشد. این مسئله با استفاده از فرض تنش صفحه ای یا کرنش صفحه ای در کتب الاستیسیته نظیر نادای [۱]، سچلر [۲]، لنداو و لیتز [۳]، تیموشنکو و گودیر [۴]، ولترا و گینز [۵]، بورسی و چونگ [۶] و لاو [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. حل تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای برای استوانه های توخالی جدار ضخیم در ناحیه الاستیک چندین سال پیش در کتاب های استاندارد الاستیسیته نظیر تیموشنکو و گودیر ارائه شد و در سال ۱۹۱۸ به وسیله هایل [۸] روشی تقریبی برای حالات خاصی از استوانه با ضخامت های متغیر ارائه شد.

مجدوبی و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۶ روش بهینه سازی سیلندرهای ترکیب شده از دو فلز و وزن سیلندر مرکزی به حداقل رسانده شده برای فشار خاص پیشنهاد کردند و نتیجه گرفتند که سیلندرهای فشار بالا می توانند تا حدی با مواد سبک تر و ارزان تر جایگزین شوند تا هزینه و وزن سیلندر کاهش یابد. شی و همکاران [۱۰] یک مدل تحلیلی خطی الاستیک برای تعیین توزیع تنش یک مخزن کامپوزیت چندلایه تحت فشار یکنواخت روی سطوح داخلی و بیرونی در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد کردند. فشار بین دولایه متوالی با یک الگوریتم بازگشتی محاسبه شد. ژانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ یک راه حل تحلیلی را برای تعیین توزیع تنش از یک مخزن چندلایه تحت فشار به همراه فشار مایع داخلی و بارگذاری حرارتی با توجه به تأثیر انتهای بسته بررسی کردند. توزیع تنش تحلیلی با مقادیر محاسبه شده با استفاده از

$$\sigma_r = \frac{P_i r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2}\right) - \frac{P_{s12} r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) - \frac{P_{s12} r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

در صورتی که فشار داخلی سیلندر برابر با صفر باشد تنش شعاعی و محیطی سیلندر طبق روابط ۴ و ۵ نوشته می‌شود.

$$\sigma_r = -P_{s12} \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -P_{s12} \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right) \quad (5)$$

در این صورت تنش شعاعی در شعاع بیرونی سیلندر ($r = r_2$) بیشینه بوده و برابر است با:

$$\sigma_r \max(at r_2) = -P_{s12} \quad (6)$$

همچنین تنش شعاعی در شعاع درونی سیلندر ($r = r_1$) برابر با صفر می‌باشد.

$$\sigma_r(at r_1) = 0 \quad (7)$$

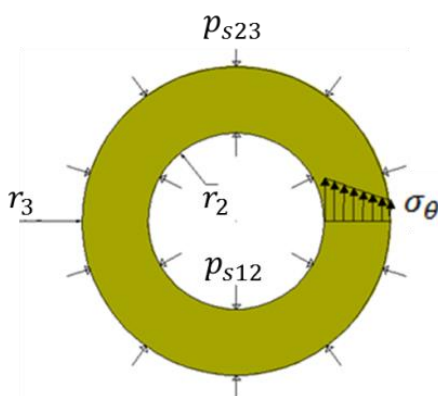
تنش محیطی در شعاع بیرونی سیلندر ($r = r_2$) برابر است با:

$$\sigma_\theta(at r_2) = -P_{s12} \left[\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right] \quad (8)$$

تنش محیطی در شعاع درونی سیلندر ($r = r_1$) بیشینه بوده و برابر است با:

$$\sigma_\theta \max(at r_1) = - \left[\frac{2P_{s12} r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right] \quad (9)$$

سیلندر شماره ۲: شکل ۳ سیلندر شماره ۲ را نشان می‌دهد که در آن فشار وارد از سیلندر ۱ به ۲ بر اثر انطباق پرسی بوده که به عنوان فشار داخلی در نظر گرفته می‌شود و همچنین p_{s23} فشار وارد از سیلندر ۳ به ۲ بر اثر انطباق پرسی می‌باشد که به عنوان فشار خارجی وارد به سیلندر ۲ در نظر گرفته می‌شود.



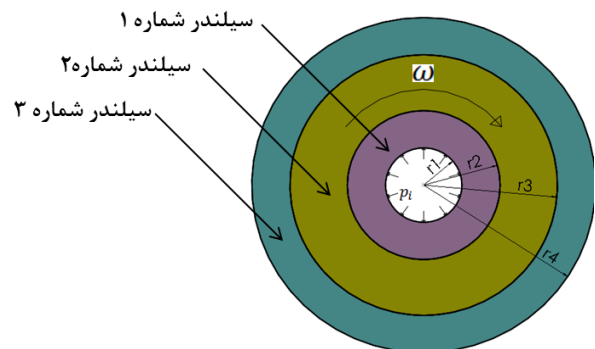
شکل ۳ سیلندر شماره ۲

با توجه به رابطه تنش شعاعی در سیلندره‌های جدار ضخیم (رابطه لامه) برای سیلندر ۲، تنش شعاعی به صورت رابطه (۱۰) نوشته می‌شود.

$$\sigma_r = \frac{P_{s12} r_2^2 - P_{s23} r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{r_2^2 r_3^2 (P_{s23} - P_{s12})}{r_3^2 - r_2^2} \frac{1}{r^2} \quad (10)$$

در این رابطه r_2 شعاع داخلی سیلندر ۲، r_3 شعاع خارجی سیلندر ۲، $P_i = P_{s12}$ فشار وارد از سیلندر ۱ به ۲ بر اثر انطباق

می‌شود. در این مرحله فشار داخلی و سرعت زاویه‌ای صفر در نظر گرفته می‌شود. در حالت دوم مسئله فقط با فرض وجود فشار داخلی بررسی می‌گردد و تنش ناشی از انطباق پرسی و همچنین سرعت زاویه‌ای صفر در نظر گرفته می‌شود. در حالت سوم فقط تنش‌های ناشی از دوران سیلندر با فرض صفر بودن فشار داخلی و تنش ناشی از انطباق سیلندرها، محاسبه می‌گردند. سپس تنش‌های به دست آمده در سه حالت با یکدیگر جمع شده و برآیند آنها به عنوان تنش نهایی وارده بر سیلندر در نظر گرفته می‌شود.



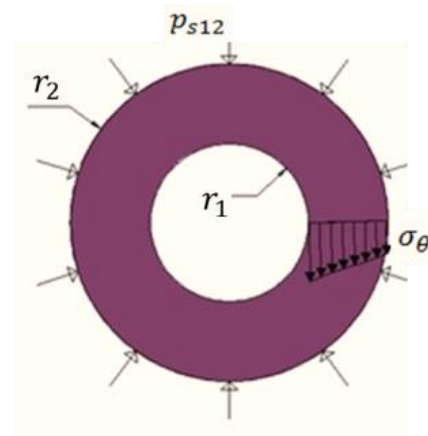
شکل ۱ سیلندر ترکیبی تحت فشار داخلی و سرعت زاویه‌ای

۳- تنش‌های ناشی از انطباق پرسی در سیلندر چند لایه دوار تحت فشار داخلی

برای حل مسئله، هر کدام از سیلندرها به صورت جداگانه تحلیل شده و فشاری که به علت انطباق پرسی در فصل مشترک‌ها ایجاد می‌شود محاسبه می‌گردد.

سیلندر شماره ۱: شکل ۲ سیلندر شماره ۱ و نیروهای وارده بر آن را نشان می‌دهد.

$$\omega = 0, P_i = 0 \quad (1)$$



شکل ۲ سیلندر شماره ۱

در شکل ۲، P_{s12} فشار وارد از سیلندر دو به سیلندر اول بوده که بر اثر انطباق پرسی به وجود می‌آید. تنش شعاعی و تنش محیطی در سیلندر یک، طبق رابطه لامه، مطابق روابط ۲ و ۳ می‌باشد.

تنش شعاعی در شعاع داخلی و خارجی سیلندر برابر است با:

$$\sigma_r(at r_3) = -P_{s23} \quad (18)$$

$$\sigma_r(at r_4) = 0 \quad (19)$$

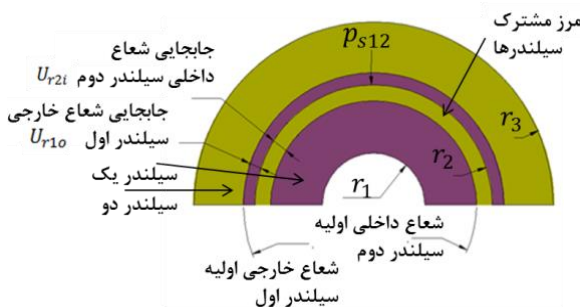
همچنین تنش محیطی در شعاع داخلی و خارجی سیلندر ۳ برابر است با:

$$\sigma_{\theta max}(at r_3) = \frac{P_{s23}(r_4^2 + r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} \quad (20)$$

$$\sigma_{\theta}(at r_4) = \frac{2P_{s23}(r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} \quad (21)$$

۴- محاسبه کرنش و جابجایی

شکل ۵ نشان دهنده جابجایی بین سیلندرهایی ۱ و ۲ به علت انطباق پرسی می باشد که در آن شعاع خارجی سیلندر ۱ پس از جا زدن در سیلندر ۲ به اندازه u_{r10} و همچنین شعاع داخلی سیلندر ۲ به اندازه u_{r2i} در راستای شعاع جابجا می شود.



شکل ۵ جابجایی ناشی از انطباق پرسی بین سیلندر ۱ و ۲

با توجه به شکل ۵، جابجایی شعاع خارجی سیلندر ۱، $\epsilon_{\theta 10}$ کرنش محیطی دیواره خارجی سیلندر ۱، E_1 مدول یانگ سیلندر ۱ و v_1 ضریب پواسون سیلندر ۱ است. در این مسئله با فرض اینکه تنش در راستای Z صفر است، مسئله به صورت تنش صفحه ای حل می گردد. با توجه به روابط تنش کرنش و همچنین رابطه کرنش در سیلندرها، جابجایی شعاع خارجی سیلندر ۱ در معادله (۲۳) آورده شده است.

$$\epsilon_{\theta 10} = \frac{u_{r10}}{r_2} = \frac{1}{E_1} [\sigma_{\theta} - v_1 \sigma_r] = \frac{1}{E_1} \left[-P_{s12} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) - v_1 (-P_{s12}) \right] \quad (22)$$

$$u_{r10} = \frac{-P_{s12} r_2}{E_1} \left[\left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) - v_1 \right] \quad (23)$$

با توجه به شکل ۵، جابجایی شعاع داخلی سیلندر ۲ به صورت معادله (۲۴) و (۲۵) به دست می آید که در آن، u_{r2i} جابجایی شعاع داخلی سیلندر ۲، $\epsilon_{\theta 2i}$ کرنش مماسی دیواره داخلی سیلندر ۲، E_2 مدول یانگ سیلندر ۲ و v_2 ضریب پواسون سیلندر ۲ می باشند.

پرسی که به عنوان فشار داخلی در نظر گرفته می شود و $P_o = P_{s23}$ فشار وارده از سیلندر ۳ به ۲ بر اثر انطباق پرسی که به عنوان فشار خارجی در نظر گرفته می شود. تنش شعاعی در شعاع داخلی $r = r_2$ و شعاع خارجی سیلندر ۲، $r = r_3$ ، با توجه به معادله (۱۵) برابر است با:

$$\sigma_r(at r_2) = -P_{s12} \quad (11)$$

$$\sigma_r(at r_3) = -P_{s23} \quad (12)$$

با توجه به رابطه تنش محیطی در سیلندرهایی جدار ضخیم (رابطه لامه)، تنش محیطی به صورت معادله (۱۳) نوشته می شود.

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{s12} r_2^2 - P_{s23} r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{r_2^2 r_3^2 (P_{s23} - P_{s12})}{r_3^2 - r_2^2} \frac{1}{r^2} \quad (13)$$

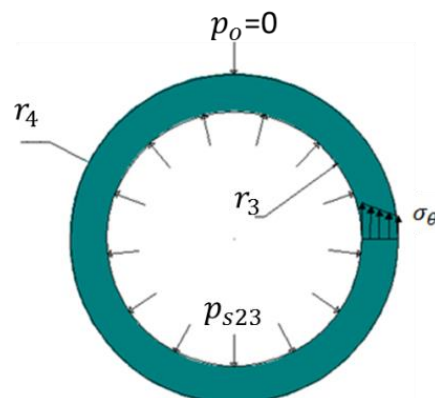
تنش محیطی در شعاع داخلی سیلندر ۲، $r = r_2$ ، بیشینه بوده و برابر است با:

$$\sigma_{\theta max}(at r_2) = \frac{P_{s12}(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{2P_{s23}(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} \quad (14)$$

تنش محیطی در شعاع خارجی سیلندر ۲، $r = r_3$ ، برابر است با:

$$\sigma_{\theta}(at r_3) = \frac{2P_{s12}(r_2^2 + r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{-P_{s23}(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} \quad (15)$$

سیلندر شماره ۳: شکل ۴ سیلندر شماره ۳ را نشان می دهد که در آن P_{s23} فشار وارده از سیلندر ۲ به ۳ بر اثر انطباق پرسی می باشد که به عنوان فشار داخلی سیلندر ۳ در نظر گرفته می شود. فشار خارجی وارده به سیلندر ۳، صفر است.



شکل ۴ سیلندر شماره ۲

در شکل ۴، $r_i = r_3$ شعاع داخلی سیلندر ۳، $r_o = r_4$ شعاع خارجی سیلندر سه، $P_i = P_{s23}$ فشار وارده از سیلندر ۲ به ۳ بر اثر انطباق پرسی که به عنوان فشار داخلی در نظر گرفته می شود و $P_o = 0$ فشار خارجی می باشند. با توجه به رابطه لامه تنش شعاعی و تنش محیطی در سیلندر ۳ به صورت رابطه های (۱۶) و (۱۷) نوشته می شود.

$$\sigma_r = \frac{P_{s23} r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r^2} \right) \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{s23} r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} \left(1 + \frac{r_4^2}{r^2} \right) \quad (17)$$

$$\varepsilon_{\theta 3i} = \frac{U_{r3i}}{r_3} = \frac{1}{E_3} [\sigma_{\theta} - \nu_3 \sigma_r] = \frac{1}{E_3} \left[\frac{P_{s23}(r_4^2 + r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} - \nu_3 (-P_{s23}) \right] \quad (29)$$

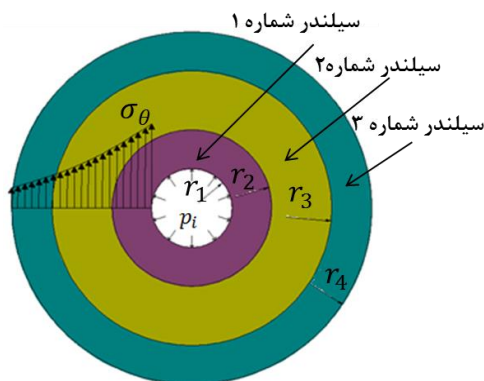
$$U_{r3i} = \frac{P_{s23} r_3}{E_3} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \nu_3 \right] \quad (30)$$

U_{r3i} جابجایی شعاع داخلی سیلندر ۳، $\varepsilon_{\theta 3i}$ کرنش محیطی دیواره داخلی سیلندر ۳، E_3 مدول یانگ سیلندر ۳ و ν_3 ضریب پواسون سیلندر ۳ است. میزان تداخل سیلندر ۲ و ۳ (تفرانس انطباق پرسی) که با δ_{23} نشان داده می‌شود از جمع جبری جابجایی شعاع خارجی سیلندر ۲، U_{r20} و جابجایی شعاع داخلی سیلندر ۳، U_{r3i} به دست می‌آید.

$$\delta_{23} = U_{r3i} - U_{r20} = \frac{P_{s23} r_3}{E_3} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \nu_3 \right] - \frac{r_3}{E_2} \left[\frac{2P_{s12}r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - p_{s23} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_2 \right) \right] \quad (31)$$

۵- تنش‌های ناشی از فشار داخلی

در این حالت با فرض اینکه سرعت دورانی و فشار تماسی بین سیلندرها صفر می‌باشد مسئله تحلیل شده و تنش‌های محیطی و شعاعی هر سه سیلندر محاسبه می‌گردند. شکل ۷ سیلندر ترکیبی تحت فشار داخلی P_i و فشار خارجی P_o را نشان می‌دهد.



شکل ۷ سیلندر ترکیبی سه لایه‌ای تحت فشار داخلی P_i

با استفاده از رابطه لامه تنش محیطی برای سیلندر به شعاع داخلی r_1 و r_4 تحت فشار داخلی P_i و خارجی P_o در معادله (۳۲) نشان داده شده است.

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left[\frac{r_4^2}{r^2} + 1 \right] - \frac{P_o r_4^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (32)$$

تنش محیطی سیلندر در شعاع r_1 و r_2 و r_3 طبق معادله (۳۲) برابر است با:

$$\sigma_{\theta 1} = P_i \left[\frac{r_4^2 + r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{2P_o r_4^2}{r_4^2 - r_1^2} \quad (33)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{P_i r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{P_o r_4^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \quad (34)$$

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{P_i r_1^2}{r_3^2} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{P_o r_4^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r_3^2} \right) \quad (35)$$

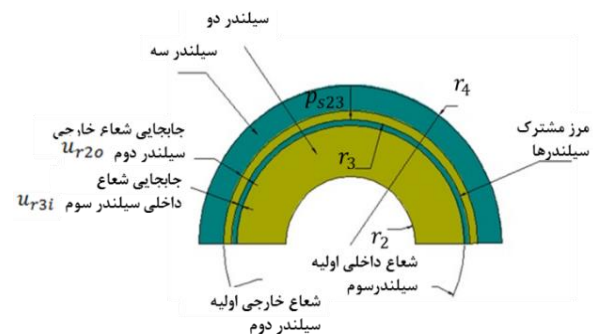
$$\varepsilon_{\theta 2i} = \frac{U_{r2i}}{r_2} = \frac{1}{E_2} [\sigma_{\theta} - \nu_2 \sigma_r] = \frac{1}{E_2} \left[\frac{P_{s12}(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{2P_{s23}(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_2 (-P_{s12}) \right] \quad (24)$$

$$U_{r2i} = \frac{r_2}{E_2} \left[P_{s12} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \nu_2 \right) - \frac{2P_{s23}(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} \right] \quad (25)$$

تداخل سیلندر ۱ و ۲ (تفرانس انطباق پرسی) که با δ_{12} نشان داده می‌شود از جمع جبری جابجایی شعاع خارجی سیلندر ۱ (U_{r10})، و جابجایی شعاع داخلی سیلندر ۲ (U_{r2i}) به دست می‌آید. معادله (۲۶) تداخل بین سیلندر ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.

$$\delta_{12} = U_{r2i} - U_{r10} = \frac{r_2}{E_2} \left[P_{s12} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \nu_2 \right) - \frac{2P_{s23}(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} \right] + \frac{P_{s12} r_2}{E_1} \left[\left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) - \nu_1 \right] \quad (26)$$

شکل ۶ جابجایی بین سیلندره‌های ۲ و ۳ به علت انطباق پرسی را نشان می‌دهد که در آن شعاع خارجی سیلندر ۲ پس از جاذب شدن در سیلندر ۳ به اندازه U_{r20} و همچنین شعاع داخلی سیلندر ۳ به اندازه U_{r3i} جابجا می‌شود.



شکل ۶ جابجایی ناشی از انطباق پرسی بین سیلندر ۲ و ۳

کرنش محیطی $\varepsilon_{\theta 20}$ و جابجایی شعاع خارجی سیلندر ۲، U_{r20} در معادلات (۲۷) و (۲۸) آورده شده است.

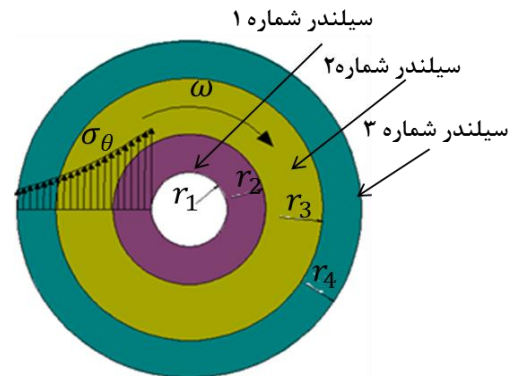
$$\varepsilon_{\theta 20} = \frac{U_{r20}}{r_3} = \frac{1}{E_2} [\sigma_{\theta} - \nu_2 \sigma_r] = \frac{1}{E_2} \left[\frac{2P_{s12}(r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{P_{s23}(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_2 (-P_{s23}) \right] \quad (27)$$

$$U_{r20} = \frac{r_3}{E_2} \left[\frac{2P_{s12}r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - p_{s23} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_2 \right) \right] \quad (28)$$

کرنش محیطی و جابجایی شعاع داخلی سیلندر ۳ در معادلات (۲۹) و (۳۰) آورده شده است.

۶- تنش های ناشی از سرعت دورانی سیلندر

در این حالت تنش ناشی از سرعت دورانی و نیروی گریز از مرکز در سیلندرهایی ۱ و ۲ و ۳ محاسبه می گردد. شکل ۸ سیلندر ترکیبی با سرعت زاویه ای ω را نشان می دهد.



شکل ۸ سیلندر ترکیبی سه لایه ای تحت سرعت زاویه ای ω

تنش محیطی برای سیلندر به شعاع داخلی r_1 و r_4 تحت سرعت زاویه ای ω در معادله (۳۶) نشان داده شده است.

$$\sigma_{\theta} = \frac{\rho\omega^2}{8} \left[(3 + \square) \left[r_1^2 + r_4^2 + \frac{r_1^2 r_4^2}{r^2} \right] - (1 + 3\square)r^2 \right] \quad (36)$$

تنش محیطی سیلندرهایی ۱ و ۲ و ۳ در شعاع داخلی برابر است با:

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_1)[r_1^2 + 2r_2^2] - (1 + 3v_1)r_1^2] \quad (37)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_2)[r_2^2 + 2r_3^2] - (1 + 3v_2)r_2^2] \quad (38)$$

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_3)[r_3^2 + 2r_4^2] - (1 + 3v_3)r_3^2] \quad (39)$$

در یک سیلندر مرکب تنش محیطی بیشینه در مرز داخلی سیلندرها اتفاق می افتد و برای به دست آوردن آنها، تنش های محیطی ناشی از انطباق پرسی، فشار داخلی و همچنین تنش محیطی ناشی از دوران، در شعاع داخلی سیلندر با یکدیگر جمع می گردد. معادلات (۴۰)، (۴۱) و (۴۲) مجموع تنش های محیطی سیلندرهایی ۱ و ۲ و ۳ را در شعاع داخلی هر کدام نشان می دهد.

$$\sigma_{\theta 1} = P_i \left[\frac{r_4^2 + r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] + \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_1)[r_1^2 + 2r_2^2] - (1 + 3v_1)r_1^2] \quad (40)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{P_i r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] + \frac{P_{s12}(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_2)[r_2^2 + 2r_3^2] - (1 + 3v_2)r_2^2] \quad (41)$$

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{P_i r_1^2}{r_3^2} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] + \frac{P_{s23}(r_4^2 + r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} + \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_3)[r_3^2 + 2r_4^2] - (1 + 3v_3)r_3^2] \quad (42)$$

۷- بهینه سازی حجم سیلندر سه لایه

به منظور طراحی بهینه سیلندرها، باید شعاع و همچنین میزان تداخل انطباق پرسی سیلندرها را به گونه ای محاسبه نمود که هم تنش های محیطی به وجود آمده در سیلندرها کمتر از تنش تسلیم سیلندرها بوده و هم حجم سیلندر، کمترین میزان باشد. لازم به ذکر است که فشار داخلی P_i و همچنین سرعت زاویه ای ω ثابت در نظر گرفته می شود. به منظور حل معادله و به دست آوردن مقدار بهینه تنش تماسی بین سیلندرها (P_{s12} و P_{s23})، تنش محیطی بیشینه سیلندرها با یکدیگر برابر قرار داده می شوند.

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta 3} \quad (43)$$

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta 2} \quad (44)$$

$$P_{s12} \left[\frac{(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} + \left[\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right] \right] + P_{s23} \left(\frac{-2(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} \right) = P_i \left[\frac{r_4^2 + r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] + \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_1)[r_1^2 + 2r_2^2] - (1 + 3v_1)r_1^2] - \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_2)[r_2^2 + 2r_3^2] - (1 + 3v_2)r_2^2] \quad (45)$$

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{P_i r_1^2}{r_3^2} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] + \frac{P_{s23}(r_4^2 + r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} + \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_3)[r_3^2 + 2r_4^2] - (1 + 3v_3)r_3^2]$$

اگر ضرایب P_{s12} و P_{s23} و همچنین ثابت معادله a و b و c فرض شود:

$$a = \frac{(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} + \left[\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right] \quad (46)$$

$$b = \frac{-2(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} \quad (47)$$

$$e = P_i \left[\frac{r_4^2 + r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] \right] + \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_1)[r_1^2 + 2r_2^2] - (1 + 3v_1)r_1^2] - \frac{\rho\omega^2}{8} [(3 + v_2)[r_2^2 + 2r_3^2] - (1 + 3v_2)r_2^2] \quad (48)$$

معادله (۴۸) به صورت معادله (۴۹) باز نویسی می شود.

$$\delta_{23} = \frac{p_{s23} r_3}{E3} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + v_3 \right] - \frac{r_3}{E2} \left[\frac{2p_{s12} r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - p_{s23} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - v_2 \right) \right] \quad (49)$$

محاسبات، جهت بهینه‌سازی ابعادی یک سیلندر سه لایه، با شعاع داخلی مشخص سیلندر اول (r_1) و همچنین سرعت دورانی (ω) و فشار داخلی (p_i) مشخص، با فرض یکسان بودن جنس سیلندرها ارائه می‌گردد. هدف مسئله، یافتن شعاع‌های بهینه سیلندرها (r_2 ، r_3 و r_4) و همچنین میزان تداخل انطباق پرسی (δ_{12} و δ_{23}) بین سیلندرها می‌باشد به گونه‌ای که تنش محیطی بیشینه سیلندرها از تنش تسلیم کوچکتر و یا مساوی بوده ($\sigma_{\theta 1} \leq \sigma_y$ و $\sigma_{\theta 2} \leq \sigma_y$ و $\sigma_{\theta 3} \leq \sigma_y$) و حجم سیلندر ترکیبی کمینه باشد. حجم سیلندر با در نظر گرفتن طول واحد برای سیلندرها (به دلیل تنش صفحه‌ای بودن مسئله از تنش‌های طولی σ_z صرف نظر شده است) برابر است با:

$$V = \pi(r_4^2 - r_1^2) \quad (50)$$

جهت بهینه‌سازی مسئله، با در نظر گرفتن نسبت شعاع سیلندرها به صورت معادلات (۶۱) حالات زیادی برای پارامترهای C_1 ، C_2 و C_3 به صورت شمارشی با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری، در نظر گرفته شده است.

$$C_1 = \frac{r_2}{r_1} \quad C_2 = \frac{r_3}{r_2} \quad C_3 = \frac{r_4}{r_3} \quad (61)$$

با جایگذاری تمامی حالات C_1 ، C_2 و C_3 در معادلات (۴۶)، (۴۷)، (۴۸)، (۵۲)، (۵۳) و (۵۴)، مقادیر a و b و c و d و e و f به دست آمده و پس از جایگذاری در معادلات (۵۶) و (۵۷)، مقادیر p_{s12} و p_{s23} به دست می‌آید. سپس با جایگذاری δ_{12} و δ_{23} در معادلات (۵۸) و (۵۹)، مقادیر تداخل δ_{12} و δ_{23} محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که هر کدام از مقادیر C_1 ، C_2 و C_3 از ۱/۱ تا ۱/۵ با گام ۰/۲ تغییر می‌کند و تمامی حالت‌های ترکیبی C_1 ، C_2 و C_3 در نظر گرفته شده است. تعداد حالت‌ها برای هر کدام از مقادیر C_1 ، C_2 و C_3 ، ۲۰ عدد و تعداد کل ترکیبات ۸۰۰۰ می‌باشد.

$$\frac{1.5 - 1.1}{0.02} = 20 \quad (62)$$

$$20 \times 20 \times 20 = 8000 \quad (63)$$

با استفاده از تمامی ترکیبات در نظر گرفته شده برای C_1 ، C_2 و C_3 ، مقادیر تنش‌های محیطی $\sigma_{\theta 1}$ ، $\sigma_{\theta 2}$ و $\sigma_{\theta 3}$ محاسبه می‌گردد و تنش‌هایی که مقادیر آنها از تنش تسلیم کمتر و یا مساوی آن هستند انتخاب می‌شوند و از بین آنها حالتی که در آن حجم سیلندر کمتر از بقیه می‌باشد به عنوان طراحی بهینه لحاظ می‌شود.

۸- تحلیل و صحه‌گذاری به کمک نرم‌افزار اجزا محدود

با اجرا کردن برنامه متلب با توجه به ورودی‌های مسئله که شامل شعاع داخلی سیلندر اول و همچنین مدول یانگ، تنش تسلیم، ضریب پواسون، چگالی، فشار داخلی و سرعت دورانی می‌باشد، تعداد زیادی ترکیبات سیلندر به دست می‌آید که شرایط مسئله

$$a \times (P_{s12}) + b \times (P_{s23}) = e \quad (49)$$

با مساوی قرار دادن رابطه (۳۸) و (۳۹) دو معادله و دو مجهول به دست می‌آید و مسئله حل می‌گردد.

$$\sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta 3} \quad (50)$$

$$P_{s12} \left[\frac{(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} \right] - P_{s23} \left[\frac{2(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{(r_4^2 + r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} \right] = \frac{P_i r_1^2}{r_3^2} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{P_i r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{\rho \omega^2}{8} [(3 + v_2)(r_2^2 + 2r_3^2) - (1 + 3v_3)r_3^2] \quad (51)$$

اگر ضرایب P_{s12} و p_{s23} و همچنین ثابت معادله را به ترتیب d و e و f فرض شود:

$$c = \frac{(r_3^2 + r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2} \quad (52)$$

$$d = \frac{2(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{(r_4^2 + r_3^2)}{r_4^2 - r_3^2} \quad (53)$$

$$f = \frac{P_i r_1^2}{r_3^2} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{P_i r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{\rho \omega^2}{8} [(3 + v_2)(r_2^2 + 2r_3^2) - (1 + 3v_3)r_3^2] \quad (54)$$

معادله (۵۱) به صورت معادله (۵۵) باز نویسی می‌شود.

$$c \times (P_{s12}) + d \times (P_{s23}) = f \quad (55)$$

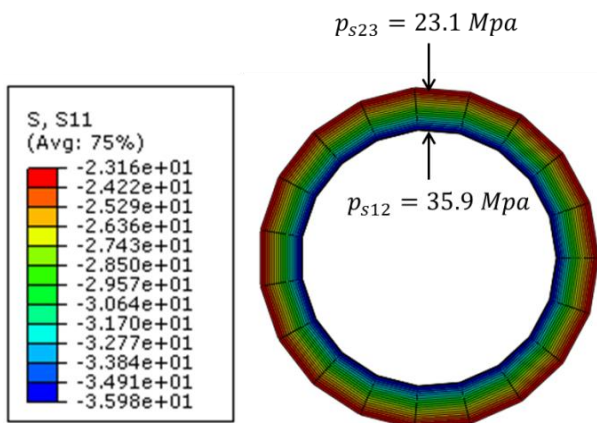
اکنون دو معادله و دو مجهول به دست می‌آید (معادلات (۴۹) و (۵۵)) که با حل آنها فشار تماسی بین سیلندرها به دست می‌آید.

$$P_{s12} = \frac{(ed - bf)}{(ad - bc)} \quad (56)$$

$$P_{s23} = \frac{(af - ec)}{(ad - bc)} \quad (57)$$

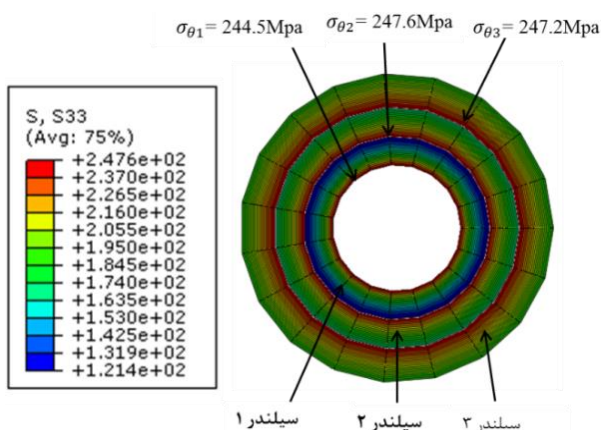
در واقع فشار تماسی بین سیلندرها (P_{s12} و P_{s23}) به گونه‌ای محاسبه شد که تنش محیطی در شعاع داخلی سیلندرها که بر اثر فشار داخلی، انطباق پرسی و دوران به وجود می‌آید با یکدیگر برابر شوند. اکنون می‌توان با استفاده از معادلات (۲۶) و (۳۱)، تداخل سیلندرها را که این فشار تماسی (P_{s12} و P_{s23}) را به وجود می‌آورد محاسبه نمود.

$$\delta_{12} = \frac{r_2}{E2} \left[P_{s12} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + v_2 \right) - \frac{2p_{s23}(r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2} \right] + \frac{P_{s12} r_2}{E1} \left[\left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) - v_1 \right] \quad (58)$$



شکل ۱۰ توزیع تنش شعاعی در سیلندر شماره ۲

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، تنش تماسی بین سیلندر ۱ و ۲، (p_{s12}) ، ۳۵/۹ MPa و تنش تماسی بین سیلندر ۲ و ۳، (p_{s23}) ، ۲۳/۱ MPa می‌باشد. حال مسئله با در نظر گرفتن فشار داخلی و سرعت دورانی به منظور به دست آوردن توزیع تنش محیطی در شعاع سیلندرها، شبیه‌سازی شده است. شکل ۱۱ نشان دهنده توزیع تنش محیطی سیلندرها، ناشی از فشار داخلی و سرعت دورانی و همچنین انطباق پرسی سیلندرها می‌باشد. در محاسبات تحلیلی تنش محیطی بیشینه در شعاع داخلی سیلندرها برابر بوده و مساوی ۲۴۹/۹ MPa می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در شبیه‌سازی تنش محیطی بیشینه در شعاع داخلی سیلندرها به وجود آمده است که بیشینه تنش محیطی در سیلندر اول ۲۴۴/۵ MPa، در سیلندر دوم ۲۴۷/۷ MPa و در سیلندر سوم ۲۴۷/۲ MPa می‌باشد. شکل ۱۲ مقایسه بین منحنی توزیع تنش محیطی در سیلندرها با استفاده از معادلات تحلیلی و شبیه‌سازی انجام شده در آباکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ توزیع تنش محیطی ناشی از دوران، فشار داخلی و انطباق پرسی

را ارضا کند از میان تعداد زیاد جواب‌های به دست آمده، جوابی قابل قبول می‌باشد که حجم سیلندر کمینه باشد. جدول ۱ پارامترهای ورودی مسئله و جدول ۲ جواب بهینه به دست آمده که در آن حجم سیلندر کمترین مقدار است را نشان می‌دهد.

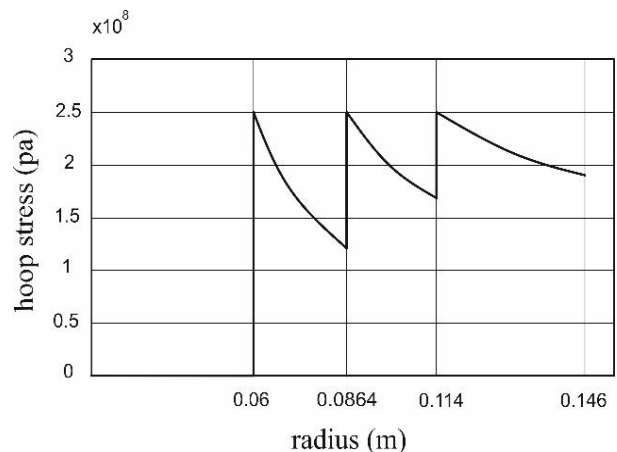
جدول ۱ پارامترهای ورودی

پارامتر ورودی	r_1 (mm)	E (GPa)	ν	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	σ_y (MPa)	P_i (MPa)	ω (RPM)
مقدار	۶۰	۲۰۰	۰/۳	۷۸۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۵۰۰۰

جدول ۲ پارامترهای خروجی

پارامتر خروجی	C1	C2	C3	r_2 (mm)	r_3 (mm)	r_4 (mm)
مقدار بهینه	۱/۴۴	۱/۳۲	۱/۲۸	۸۶/۴	۱۱۴	۱۴۶
پارامتر خروجی	δ_{12} (mm)	δ_{23} (mm)	p_{s12} (MPa)	p_{s23} (MPa)	$\sigma_{\theta 1}$ (MPa)	$\sigma_{\theta 2}$ (MPa)
مقدار بهینه	۰/۰۵۶	۰/۰۴۶	۳۶/۴	۲۳	۲۴۹/۹	۲۴۹/۹

در شکل ۹ توزیع تنش بر حسب r برای سیلندر بهینه‌سازی شده نشان داده شده است که در آن تنش در شعاع $r = 0$ تا شعاع $r = 60$ صفر است.



شکل ۹ توزیع تنش محیطی سیلندر ترکیبی بهینه

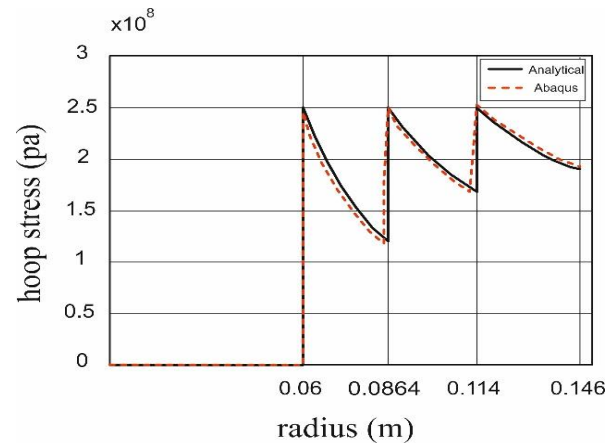
به منظور صحت‌گذاری بر نتایج تحلیلی، مسئله در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و با استفاده از داده‌های جداول ۱ و ۲ یک سیلندر سه لایه در حالت تقارن محوری مدل‌سازی گردید. نتایج فشار به وجود آمده بین سیلندرها در حالتی که فشار داخلی و سرعت دورانی صفر هنوز اعمال نشده است و تنش شعاعی بین سیلندرها فقط به دلیل انطباق پرسی است که در شکل ۱۰ آورده شده است. در این شکل به منظور نشان دادن فشار تماسی بین سیلندرها، فقط سیلندر دوم آورده شده است.

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی سیلندر چندلایه تحت فشار داخلی و در حال چرخش پرداخته شد. بسته به سرعت دوران، جنس و توزیع جرمی این سیلندرها، علاوه بر بارگذاری فشار داخلی، تحت بارهای گریز از مرکز قرار گرفت. در سیلندرهایی چندلایه با اعمال پیش بار ناشی از انطباق پرسی، از شدت تنش محیطی ناشی از فشار داخلی کاسته می گردد و باعث می گردد که از ظرفیت شعاع های بیرونی سیلندر جهت مقاومت برابر فشار داخلی استفاده گردد. این به این مفهوم است که اگر به طور مثال، سیلندری یک تکه، مطابق با ابعاد سیلندر چندتکه طراحی شده در این تحقیق، تحت فشار داخلی 250 MPa و سرعت دورانی 5000 RPM قرار گیرد، تنش محیطی در شعاع های داخلی سیلندر زیاد می باشد و از حد تنش تسلیم بیشتر می شود و در شعاع های انتهایی سیلندر از شدت آن کاسته می گردد. با این روش بهینه سازی ارائه شده، شدت تنش محیطی در تمامی نقاط سیلندر به تنش تسلیم نرسیده و همچنین تنش در تمامی شعاع سیلندر تحمل می گردد و از ظرفیت شعاع های بیرونی سیلندر استفاده بهینه می شود. روش ارائه شده در این تحقیق در طراحی درام دوار موتور توربینی هوایی کاربرد ویژه دارد.

مراجع

- [1] Nadai, A., *Theory of flow and fracture of solids*, V. 2, McGraw-Hill, New-York, (1963).
- [2] Sechler, Ernest Edwin, *Elasticity in engineering*, Dover Publications, (1952).
- [3] Landau, L., Lhitz, L., *Theory of elasticity*, Pergamon Press, New-York, (1964).
- [4] Timoshenko, S., Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York, (1970).
- [5] Volterra, E., Gaines, J. H., *Advanced strength of materials*, Prentice-Hall, (1971).
- [6] Boresi, Arthur P., Chong, K., Lee, J. D., *Elasticity in engineering mechanics*, John Wiley & Sons, (2010).
- [7] Love, Augustus Edward Hough, *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, Cambridge university press, (2013).
- [8] Haerle, H., *The strength of rotating discs*, *Engineering* 106, pp.131-134, (1918).
- [9] Majzoobi, G. H., Ghomi A., Optimization of compound pressure cylinders, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 15, No.(1-2), pp. 135-145, (2006).



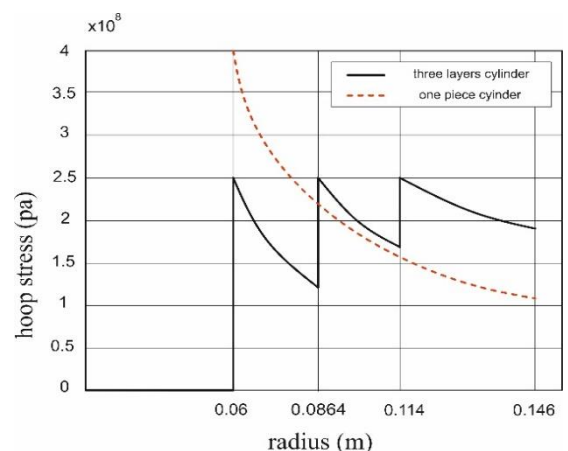
شکل ۱۲ مقایسه بین توزیع تنش محیطی تحلیلی و نتایج در آباکوس

جدول ۳ تنش های به دست آمده با استفاده از معادلات تحلیلی و شبیه سازی انجام شده در آباکوس و اختلاف آنها با یکدیگر را نشان می دهد.

جدول ۳ اختلاف بین نتایج تحلیلی و شبیه سازی شده

پارامتر ورودی	مقدار حاصل از روابط تحلیلی	مقدار حاصل از آباکوس	درصد اختلاف
$p_{s12}(\text{Mpa})$	۳۶/۴	۳۵/۹	۱/۳
$p_{s23}(\text{Mpa})$	۲۳	۲۳/۱	۰/۴
$\sigma_{\theta 1}(\text{Mpa})$	۲۴۹/۹	۲۴۴/۵	۱/۸
$\sigma_{\theta 2}(\text{Mpa})$	۲۴۹/۹	۲۴۷/۷	۰/۵
$\sigma_{\theta 3}(\text{Mpa})$	۲۴۹/۹	۲۴۷/۲	۰/۷

شکل ۱۳ مقایسه بین منحنی توزیع تنش محیطی در سیلندر چندتکه طراحی شده از یک جنس با سیلندر یک تکه از همان جنس و ابعاد با شرایط نیرویی یکسان را نشان می دهد.



شکل ۱۳ مقایسه بین منحنی توزیع تنش محیطی در سیلندر سه تکه طراحی شده با سیلندر یک تکه با همان ابعاد

- [15] Majumde, T., Sarkar, S., Mondal, S. Ch., Mandal, D. K., Optimum Design of Three Layer Compound Cylinder, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 11, No. 3, Ver. III, pp. 33-41, (2014).
- [16] Kazemzadeh Azad, S., Akis, T., A Study of Shrink-Fitting for Optimal Design of Multi-Layer Composite Tubes Subjected to Internal and External Pressure, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 43, pp. 451-467, (2018).
- [17] Abdelsalam, R. Ossama, Design optimization for a three-layers shrink-fitted pressure vessel exposed to very high pressure, *18th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, Materials Science and Engineering*, Cairo, Egypt. 9-11 April (2019).
- [18] Salehi Kolahi, M. R., Karamooz, M., Rahmani, H., Elastic analysis of Shrink-fitted Thick FGM Cylinders Based on Linear Plane Elasticity Theory, *Mechanics of Advanced Composite Structures, Department of Mechanical Engineering*, Vol. 7, pp.121-127, (2020).
- [10] Shi, Z., Zhang, T., Xiang, H., Exact solutions of heterogeneous elastic hollow cylinders, *Composite Structures*, Vol. 79, pp. 140-147, (2007).
- [11] Zhang, Q., Wang, Z. W., Tang, C. Y., Hu, D. P., Liu, P. Q., Xia, L. Z., Analytical solution of the thermo-mechanical stresses in a multilayered composite pressure vessel considering the influence of the closed ends, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 98, pp. 102-110, (2012).
- [12] Jabbari, M., Mechanical and thermal stresses in a functionally graded hollow cylinder due to radially symmetric loads, *Int. J. Pressure Vessels*, Vol. 79, pp. 493-497, (2002).
- [13] Majeed Algbory, Abdul Munium Razoki, Stress analysis of the multi-layered thick cylinders, *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, Vol. 4, No. 2, (2011).
- [14] Sunil, A. Patil, Finite element analysis of optimized compound cylinder, *Journal of Mechanical Engineering Research*, Vol. 5 No. 5, pp. 90-96, (2013).



بررسی تجربی تاثیر تابش خورشید بر روی کندانسور کولر

مجتبی مروج*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه پیام نور

چکیده: یکی از پرمصرف ترین وسایل الکتریکی، سیستم های تبرید تراکمی یا همان کولرها هستند که نوع اسپلیت آن، جزء کاربردی ترین کولر در مناطق گرم می باشد. در این گونه کولرها، کندانسور نقش کلیدی در میزان کارایی کولر دارد. در این تحقیق، هدف بررسی تاثیر تابش خورشیدی و عوامل محیطی چون دما رطوبت و سرعت باد بر روی میزان مصرف انرژی الکتریکی کولر اسپلیت است. مطالعه به صورت تجربی در فصول بهار و تابستان انجام شده است. به منظور بررسی اثر تابش خورشیدی، سه زاویه مختلف برای قرارگیری کندانسور در نظر گرفته شده که شامل جنوب جغرافیایی، ۴۵ درجه به سمت چپ و راست و همچنین به سمت شرق در صبح و به سمت غرب در بعدظهر است، می باشد. نتایج بررسی نشان می دهد هنگامی که کندانسور در حالت ۹۰ درجه یعنی به صورت شرقی-غربی قرار دارد، به دلیل کاهش تابش رسیده، میزان مصرف انرژی حداکثر تا ۶٪ در مقایسه با زاویه صفر درجه و موازی با جنوب، کاهش می یابد.

واژه های راهنما: اسپلیت، مصرف انرژی، تابش خورشیدی، عوامل محیطی.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

Mojtaba Moravej*

Assistant Professor,
Mechanical Engineering
Department,
Payame Noor University

Experimental study of the effect of solar radiation on air conditioner condenser

Abstract: One of the most widely used electrical appliances is compression refrigeration systems or air conditioners, the split type of which is one of the most used air conditioners in hot areas. In such coolers, condenser plays a key role in its efficiency. The aim of this study was to investigate the effect of solar radiation and environmental factors such as temperature, humidity and wind speed on the amount of electrical energy consumption of split air conditioners. The study was conducted experimentally in spring and summer. In order to study the effect of solar radiation, three different angles have been considered for the location of the condenser, which include south latitude, 45 degrees to the left and right, as well as east in the morning and west in the afternoon. The results show that when the condenser is in the 90 degrees position (east-west) due to reduced radiation, the amount of energy consumption is reduced by up to 6% compared to the zero degrees angle and parallel to the south.

Keywords: Split air conditioner, energy consumption, solar radiation, environmental factors.

۱- مقدمه

تابش نور خورشید در کشور ما از نظر میزان و شدت در جاهای مختلف متفاوت بوده و عمده فلات مرکزی و جنوب ایران آب و هوای گرم و بسیار گرم را در فصل تابستان تجربه می کنند. در واقع در این مناطق هم شدت و میزان دریافت انرژی خورشیدی و هم دمای هوا بالاست. بنابراین در این نقاط از سیستم های تبریدی برای تهویه مطبوع و سرمایش استفاده می گردد. در طی سالیان متعددی هر بخش از مناطق گرم کشور بر حسب فرهنگ و معماری تدابیری خاص برای خنک سازی محل سکونت و یا تولید سرما و به عبارت بهتر کاهش گرما می اندیشیده است.

چنانچه در یزد و نقاط مرکزی از بادگیرها و هوای خنک ناشی از وزش نسیم استفاده شده و در بخش هایی از خوزستان دالان های زیرزمین به عنوان محل سکونت استفاده گردید که اختلاف دمای بالایی با سطح زمین دارد. در نیم قرن اخیر و با همه گیری توزیع برق و نیز رشد فناوری تبرید بویژه کولرهای سیکل تبرید تراکمی شاهد گسترش استفاده از این دستگاه ها در بخش کثیری از مصارف خانگی صنعتی و تجاری بوده ایم. به گونه ای که در بسیاری از منازل و ادارات مناطق گرمسیری، عملاً استفاده از این کولرها اعم از کولرهای معمولی یا اسپلیت اجتناب ناپذیر است. با توجه به میزان بالای مصرف انرژی این کولرها، عملاً می توان گفت که پرمصرف ترین دستگاه در هر خانوار یا هر سازمان است و لذا بهینه سازی آن به هر طریق می تواند باعث کاهش مصرف انرژی و بهره وری انرژی به میزان قابل توجهی شود. تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص این کولرها انجام شده است [۱-۳]. چنانچه رحمتی و همکاران [۴] به بررسی اثر مبرد در سیکل های تبرید تراکمی دو مرحله ای دارای مخزن تفکیک پرداختند. نتایج بررسی ایشان نشان داد که مبرد R125 دارای بهترین ضریب عملکرد و مبرد R717 بهترین نوع مبرد از دیدگاه محیط زیست بوده است. میشر [۵] در یک پژوهش جالب در سرمایش با سیکل تراکمی، از ترکیب R134 و نانوسیال آلومینا استفاده نمود و اثبات کرد که ضریب عملکرد سیکل قریب ۲۰٪ افزایش می یابد.

آقازاده و محمودی [۶] به بررسی عملکرد سیکل تبرید تراکمی-آبشاری با استفاده از اجکتور پرداختند. ایشان بررسی خود را با استفاده از نرم افزار EES انجام دادند و نتیجه گرفتند که با فرض ظرفیت تبرید برابر برای هر دو سیکل با و بدون اجکتور، افزودن اجکتور باعث افزایش ضریب عملکرد و بازده انرژی تا حدود ۵٪ می شود.

کشکولی و همکاران [۷] تحقیقی جامع بر روی سیستم بیرونی کولر اسپلیت انجام دادند. در تحقیق ایشان جریان هوای ناشی از ۵ فن کندانسور و تأثیر پنجره مشبک به این جریان مورد مطالعه عددی قرار گرفت. نتایج بررسی حاکی از این بود که پنجره مشبک میزان جریان هوای خروجی را کاهش داده و باعث افزایش در فشار پشت پروانه و تعداد گردابه ها می شود.

بری و همکاران [۸] تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی بر روی کولرهای اسپلیت انجام دادند و ضمن بررسی مصرف انرژی، شرایط بهینه را برای آن از ترمو اقتصادی ارائه نمودند.

از گلی و نیایی [۹] عملکرد انرژی در کولر گازی اسپلیت را با یک سیستم بهبود دهنده با استفاده از لایه تبخیری مربوط در

ورودی هوا به کندانسور کولر مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی ها نشان دادند که با این روش مصرف انرژی برق بیش از ۱۲٪ و ضریب عملکرد قریب ۱۵ درصد افزایش می یابد. ولی و همکاران [۱۰] در یک پژوهش تأثیر پیش سرمایش هوای ورودی به کندانسور را بر روی عملکرد واحد تبرید مورد مطالعه قرار دارند و نشان دادند که توان مصرفی کمپرسور حتی تا ۲۰٪ نیز کاهش می یابد.

حاجی دولو و اقتداری [۱۱] به مطالعه در مورد تأثیرات محیطی بر روی کارایی کولرهای گازی اسپلیت پرداختند. در مطالعه ایشان از کندانسور تبخیری به جای کندانسور هوایی و حتی تا دمای ۴۹ درجه سلسیوس دمای محیط مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بررسی حاکی از کاهش ۲۱٪ در مصرف برق و افزایش ضریب عملکرد به بیش از ۵۰٪ بود. الساید و حریری [۱۲] به بررسی میزان جریان هوا در کندانسور و تأثیر آن بر بازده کولر اسپلیت پرداختند و نشان دادند که اگر جریان هوا در کندانسور حدود ۵۰٪ افزایش یابد، میزان برق مصرفی کمپرسور ۱۰ درصد کاهش می یابد.

یان و لیو [۱۳] تحقیقی جامع را برای پیش بینی میزان مصرف انرژی الکتریکی در کولرهای گازی مورد استفاده در ساختمان های با تراکم جمعیت بالا انجام دادند و ضمن بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله زمان و دما، مدلی بهینه را برای پیش بینی مصرف ارائه نمودند. واسیم و همکاران [۱۴] پژوهشی را پیرامون فناوری کولرها و سیستم های تهویه مطبوع و میزان مصارف بالای آنها در کاربردهای مسکونی و تجاری انجام داده و مدل ها و دستگاه های متفاوتی را بررسی نمودند. ایشان گزارش کردند بهینه سازی سیستم های تهویه مطبوع و کنترل آنها می تواند به عنوان بزرگترین برنامه کاهش مصرف انرژی در ساختمان به کار آیند. علیلی [۱۵] سیستم سرمایش هیبریدی خورشیدی را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق ایشان از یک سیستم کمکی خورشیدی و سیستم دیسکانکت استفاده شده بود و نتایج بررسی نشان داد استفاده از این سیستم کمکی باعث افزایش کارایی سیستم سرمایش می شود.

با توجه به اینکه کولرهای اسپلیت کاربرد زیادی در مناطق گرم با دریافت تابش خورشیدی بالا دارند و به نوعی بیشترین مصرف انرژی الکتریکی را در میان وسایل برقی دارند و همچنین با عنایت به عدم بررسی تأثیر تابش بر این گونه کولرها در تحقیقات پیشین، در این تحقیق تأثیر تابش خورشیدی بر میزان مصرف انرژی الکتریکی در جنوب ایران و در فصول گرما مورد بررسی تجربی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. بررسی ها شامل تأثیرات پارامترهای محیطی علاوه بر تابش و در سه زاویه مجزا برای کندانسور می باشد.

به طور کلی می توان جانمایی کولر اسپلیت را در یک اتاق معمولی در مصرف خانگی یا تجاری و اداری به صورت شکل ۱ نمایش داد. در کولرهای اسپلیت، اواپراتور در محل اتاق و لوله های رابط بین اواپراتور باعث چرخش جریان و انتقال مبرد به کمپرسور، کندانسور و شیر انبساطی است. در واقع یک کولر اسپلیت شامل یک بخش درونی و یک مجموعه بیرونی است که مجموعه بیرونی آن که شامل کندانسور است در هوای آزاد و در فضای محیط نصب می شود و در معرض تابش خورشید قرار داد. به منظور بررسی دقیق و آزمایشگاهی، از یک دستگاه کولر

جدول ۱ مشخصات دستگاه کولر گازی اسپلیت

مشخصه	واحد
نوع دستگاه	کولر گازی اسپلیت 12000 BTU/h
مدل	Hisense-HS12CVG
مبرد	R22-0.95kg
وزن	29kg

۲-۱- معادلات حاکم

همانند کلیه سیستمهای مهندسی در سیستمهای سرمایشی و کولرهای مبحث کارایی و بازدهی سیستم وجود دارد. می دانیم که سیستم های سرمایشی سیکلی از سیستمهای ترمودینامیکی هستند لذا با توجه به قانون اول ترمودینامیک داریم [۱۸-۱۶]:

$$Q_H = Q_L + W \quad (1)$$

در این رابطه Q_H گرمای کل خروجی از سیستم سرمایشی، Q_L سرمایش کسب شده و W کار داده شده به سیستم است.

$$COP = \frac{Q_L}{W} \quad (2)$$

در رابطه (۲) COP ضریب عملکرد سیستم سرمایشی که در اینجا همان کولر اسپلیت هست ارائه شده که برابر سرمایش کسب شده به کار داده شده تعریف می گردد. لذا با استفاده از رابطه (۱) رابطه (۲) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$COP = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \quad (3)$$

در کولرهای تراکمی که با برق کار می کنند در واقع کار داده شده به سیستم همان انرژی الکتریکی یا توان برقی است که برای جریان مستقیم به صورت رابطه (۴) و برای جریان متناوب به صورت رابطه (۵) ارائه می گردد.

$$P = VI \quad (4)$$

$$P = vI \cos \phi \quad (5)$$

در این روابط P توان سیستم، V ولتاژ، I جریان الکتریکی و ϕ ضریب توان شبکه است. برای محاسبه سرمای کسب شده نیز طبق آنچه در تعریف سیکل سرمایش ترمودینامیکی است برابر با اختلاف آنتالپی دو طرف اواپراتور در میزان دبی جرمی است که در رابطه (۶) نمایش داده شده است. برای یافتن دبی جرمی از رابطه (۷) یعنی دبی حجمی استفاده شده که در تحقیق حاضر مستقیماً اندازه گیری شده است.

$$Q_L = \dot{m}(\Delta h_{ev}) \quad (6)$$

$$\dot{m} = \rho A V_a \quad (7)$$

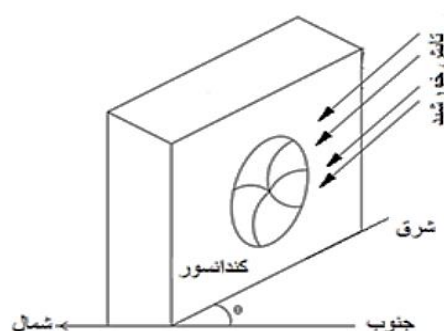
$$Q_L = \rho A V_a C_p \Delta T \quad (8)$$

در روابط فوق h آنتالپی، ρ چگالی هوا، A مساحت دریچه خروجی اواپراتور، V_a سرعت هوای خروجی، C_p گرمای ویژه هوا و T دما است.

اسپلیت با مشخصات درج شده در جدول ۱، استفاده شده که در دانشگاه پیام نور در شهرستان آغاچاری نصب گردیده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در شکل ۲ عکس صفحه آزمایش و محل نصب کولر را نمایش می دهد. آزمایشات در هوای صاف و بدون ابر انجام شده و مکرراً تکرار شده است. برای بررسی دقیق، کولر اسپلیت در محل موردنظر نصب شده و به جریان برق شهر جهت بهره برداری متصل می شود. به منظور اندازه گیری تابش کندانسور کولر که در فضای آزاد قرار دارد در سه زاویه مختلف نسبت به جنوب قرار گرفته و میزان مصرف انرژی در هر یک از این سه زاویه مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- روش انجام آزمایش



شکل ۱ شماتیک تابش خورشید به سطح کندانسور در جهت شرق

روش انجام آزمایش به این صورت است که کندانسور کولر بر اساس تعیین محل جغرافیایی بر اساس زاویه نسبت به جنوب قابل تغییر است. به این صورت که زاویه ۰ درجه در امتداد جنوب و لذا کندانسور کاملاً رو به خورشید با بیشینه دریافت روبرو خواهد شد و در زاویه ۹۰ درجه یعنی کندانسور شرقی-غربی بوده و در واقع کمترین مساحت رو به خورشید را دارد. علاوه بر این زاویه ۴۵ درجه نیز که بین این دو زاویه است نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این زوایا در شکل ۳ نمایش داده شده است. همچنین کمیت های مختلف اعم از دمای محیط، رطوبت هوا، سرعت باد، میزان تابش، زمان و میزان مصرف برق کولر اندازه گیری و مورد تحلیل قرار گرفته اند.



شکل ۲ عکس دستگاه در حین آزمایش

۲-۳- دقت اندازه گیری و آنالیز عدم قطعیت

به منظور بررسی دقیق و اندازه گیری قابل قبول از وسایل توضیح داده شده در جدول ۲ برای جمع آوری داده ها استفاده شده است. کلیه وسایل قبل از بکارگیری کالیبره شده و پاکیزه شده اند. کلیه داده برداری ها در محوطه داخل و محیط خارج به صورت مرتب و با اختلاف زمانی کمتر از ۳ دقیقه انجام گردیده است. داده برداری مرتباً انجام شده و مکرراً تکرار شده و داده ها جهت بررسی و تحلیل ارائه شده اند. از آنجایی که انجام آزمایشات علمی بدون خطا نیست در این تحقیق نیز آنالیز عدم قطعیت بر اساس رابطه زیر انجام شده است.

$$s = f(rad, wi, hu, T, E, \dots) \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\left(\frac{\Delta u_1}{u_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta u_2}{u_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta u_3}{u_3}\right)^2 + \dots} \quad (10)$$

جدول ۲ دستگاه های اندازه گیری

نام و مدل دستگاه	نام کمیت اندازه گیری	واحد اندازه گیری	دقت اندازه گیری
Voltcraft-slx-300	تابش خورشیدی	W/m ²	۱
KIMO ktt 310	دما	°C	۰٫۱
Lutron LM81AM	سرعت باد	m/s	۰٫۱
Thermoclock-TA218A	رطوبت هوا	%	۱
گونیا و متر معمولی	طول و عرض و تعیین زاویه	m	۰٫۰۰۱

با ترکیب دو رابطه ۳ و ۴ خواهیم داشت:

(۱۱)

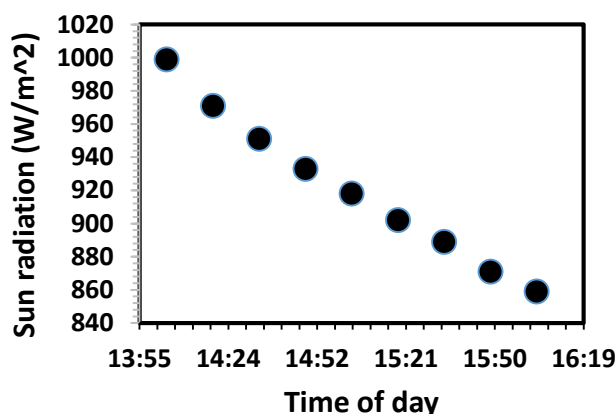
$$S = \sqrt{\left(\frac{\Delta rad}{rad}\right)^2 + \left(\frac{\Delta wi}{wi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta hu}{hu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2}$$

با توجه به اندازه گیری انجام شده عدم قطعیت داده فوق برابر ۱٫۱، ۰٫۲، ۰٫۲، ۰٫۲ و ۰٫۱/۵ به ترتیب برای تابش، سرعت باد، رطوبت، دما و انرژی مصرفی است. و لذا عدم قطعیت آزمایشات برابر ۲٫۷٪ است.

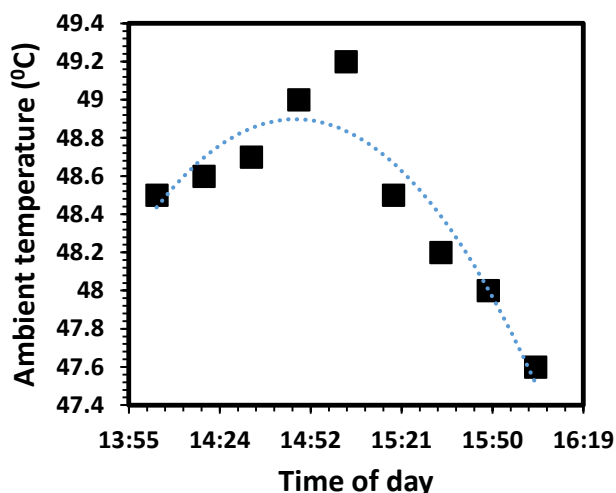
۳- نتایج و بحث

آزمایشات در بهار و تابستان ۲۰۲۱ و در شهرستان آغاچاری به صورت مکرر انجام شده است. آزمایشات در شرایط محیطی رایج و در زمانهای غیر شرجی (رطوبت نرمال) و هوای صاف و غیر ابری انجام شده و داده ها هر ۲۰ دقیقه یکبار ثبت و گزارش شده اند. میزان کمیت های محیطی شامل تابش خورشید، سرعت باد و میزان رطوبت بر اساس مدت زمان آزمایش ارائه شده است. همه این کمیت ها در هوای صاف و بدون ابر ثبت شده است.

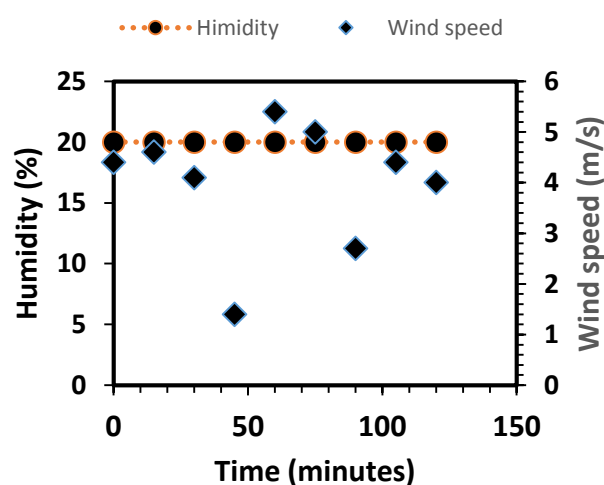
Radiation



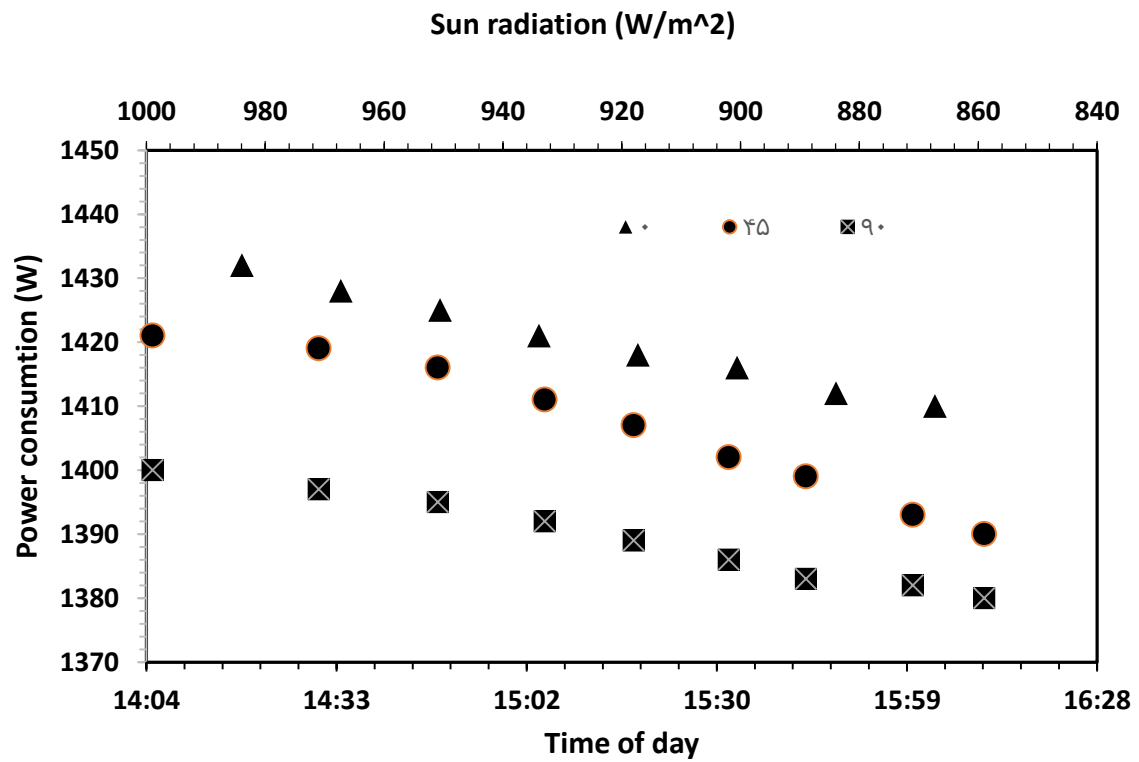
شکل ۳ نمودار میزان تابش در محل مورد آزمایش



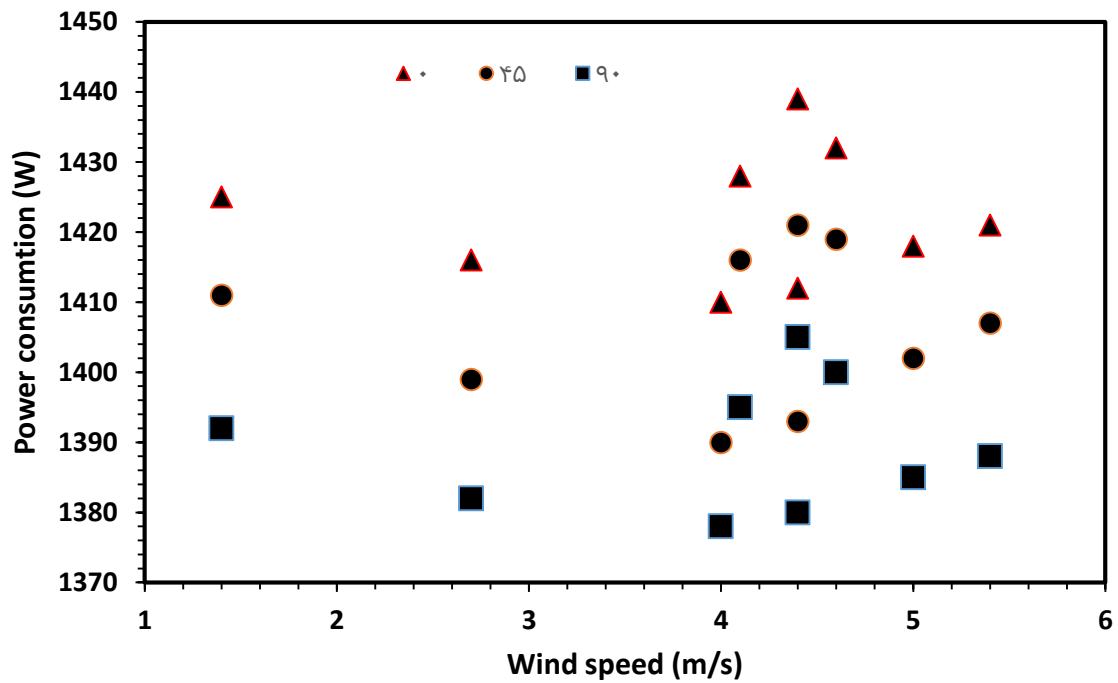
شکل ۴ نمودار تغییرات دمای محیط در بازه زمانی آزمایش



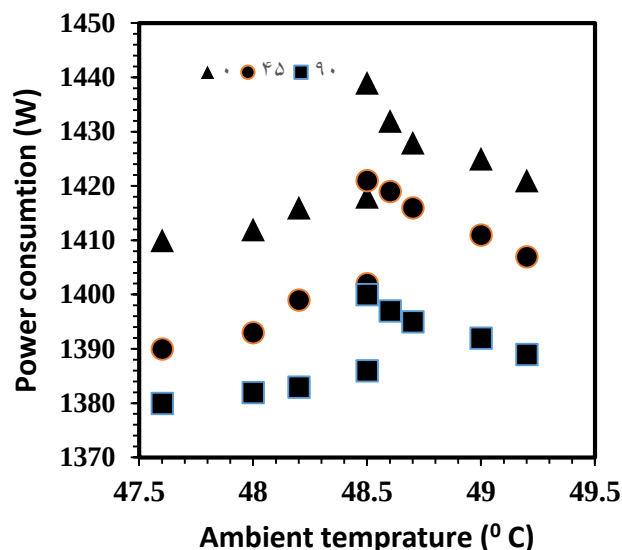
شکل ۵ نمودار تغییرات سرعت باد و رطوبت نسبی هوای محیط در بازه زمانی آزمایش



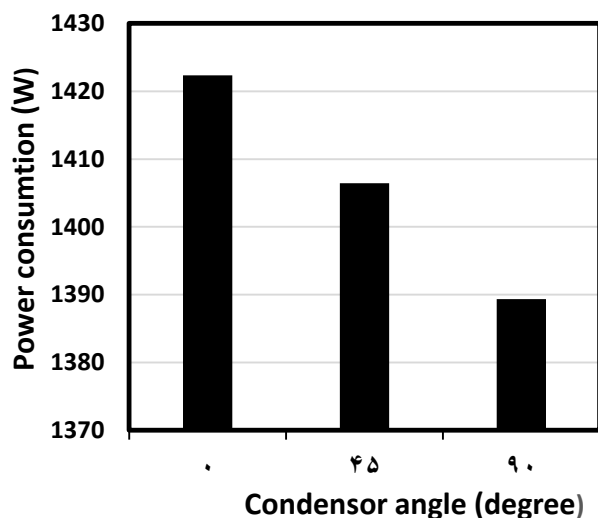
شکل ۶ نمودار میزان انرژی مصرفی کولر براساس میزان تابش خورشیدی



شکل ۷ نمودار میزان انرژی مصرفی کولر براساس سرعت باد



شکل ۸ نمودار میزان مصرف برق کولر بر اساس دمای هوای محیط



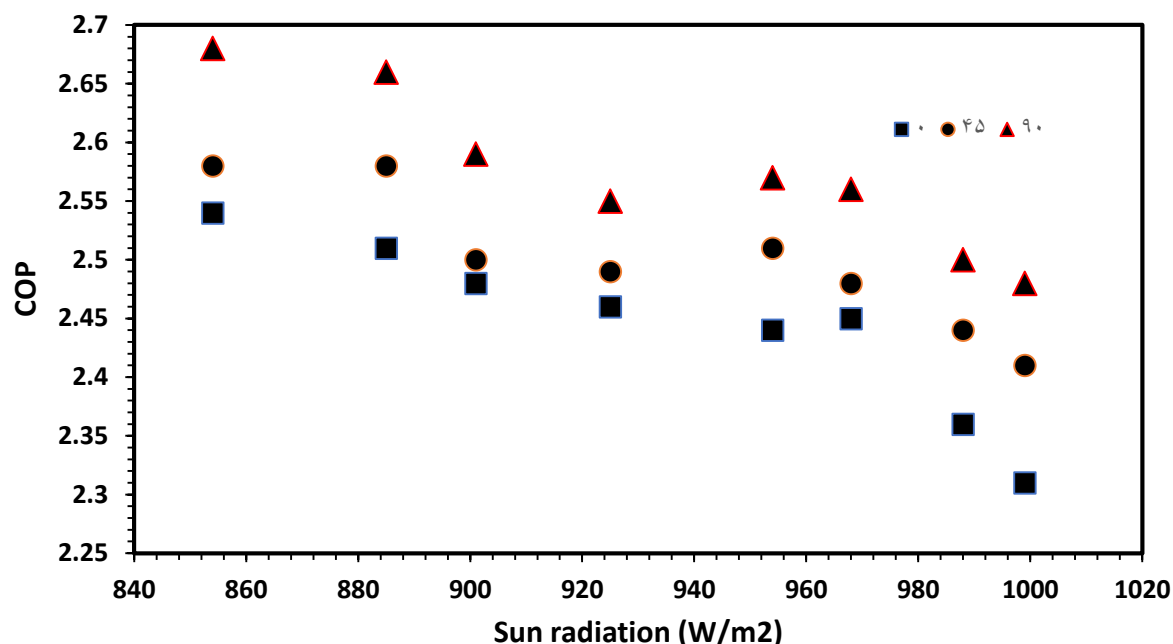
شکل ۹ نمودار میانگین مصرف انرژی الکتریکی کولر در زوایای مختلف نصب کندانسور

در شکل ۵ نمودار مربوط به تغییر در رطوبت نسبی هوای محیط و همچنین سرعت باد در بازه زمانی آزمایش در فاصل ۲ متری از کندانسور ارائه شده است. نکته مهم این نمودار این است که به دلیل گرم و خشک بودن محل آزمایش رطوبت نسبی در طول زمان داده برداری تغییر نداشته و هوای خشک و غیر قابل تحملی را گزارش می‌کند. همچنین در محور دوم عمودی این نمودار، همزمان سرعت باد ترسیم و نمایش داده شده است. با توجه به خارج از شهر بودن دانشگاه و محل تست، سرعت باد متاثر از ساختمان و یا درختان اطراف نبوده و عدد خالصی را ارائه می‌دهد. در شکل ۶ میزان انرژی مصرفی کولر بر اساس تابش خورشیدی در سه وضعیت ۰ درجه با جنوب یعنی به موازات جنوب، ۴۵ درجه با جنوب و ۹۰ درجه یعنی حالت شرقی-غربی و عمود بر راستای جنوب جغرافیایی برای کندانسور مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این نمودار می‌توان گفت که هنگامی که کندانسور در راستای جنوب و در زاویه ۰ درجه قرار دارد نسبت به حالت ۴۵ درجه و حالت عمود بر جنوب میزان انرژی الکتریکی بیشتری مصرف می‌نماید. دلیل آن نیز دریافت بیشتر تابش خورشیدی در حالت موازی با جنوب است. هرچه میزان تابش بیشتر می‌شود این میزان اختلاف مصرف انرژی بین حالت موازی و عمود بودن با جنوب نیز بیشتر می‌گردد.

در شکل ۷ میزان تاثیر سرعت باد بر انرژی مصرفی کولر ارائه شده است. با توجه به اینکه سرعت باد مانند آنچه در مورد رطوبت اتفاق افتاد، عدد ثابتی نیست و مرتباً در همه جهات در حال تغییر است. اما آنچه از این نمودار قابل درک است، اینکه در زاویه ۹۰ درجه و در سرعت بالای باد کمترین میزان مصرف انرژی نمایان می‌گردد به گونه‌ای که در سرعت‌های بالای باد میزان دفع حرارت از کندانسور سهولت می‌یابد.

در شکل ۸ نمودار مصرف انرژی کولر بر اساس کمیت دمای هوای محیط ترسیم و نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار هرچه دما بیشتر شود میزان برق مصرفی نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۹ میزان مصرف میانگین انرژی در کولر بر اساس وضعیت و زاویه قرار گیری کندانسور ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که بین حالت صفر درجه و حالت عمودی قریب ۳۳ وات اختلاف در مصرف انرژی وجود دارد به عبارت دیگر اگر صرفاً زاویه قرار گیری کندانسور در محیط نسبت به جنوب ۹۰ درجه باشد میزان مصرف انرژی الکتریکی حدود ۶٪ در مقایسه با حالت موازی با جنوب کاهش می‌یابد که در درازمدت می‌تواند هزینه برق مصرفی به نحو مطلوبی کاهش دهد. در شکل ۱۰ با استفاده از رابطه (۷) ضریب عملکرد کولر براساس داده‌های اندازه‌گیری شده، و براساس تابش خورشیدی محاسبه و نمایش داده شده است. با توجه به این شکل اگرچه در برخی حالات ضریب عملکرد در دو زاویه مشابه بوده ولی در مجموع هنگامی که کندانسور عمود بر جهت تابش یعنی در زاویه ۹۰ درجه قرار دارد، کولر ضریب عملکرد بهتری از خود نمایش می‌دهد. در جدول ۳ مقایسه‌ای از تحقیقات پیشین با پژوهش حاضر ارائه شده است.



شکل ۱۰ بررسی تاثیر تابش خورشیدی بر ضریب عملکرد کولر

جدول ۳ مقایسه نتایج تحقیقات پیشین با پژوهش حاضر

مرجع	نوع تحقیق	نتایج به دست آمده
آقازاده و سید محمودی [۶]	تاثیر افزودن اجکتور بر عملکرد سیکل تراکمی	۸٪ کاهش تلفات انرژی
ازگلی و نیاکی [۹]	استفاده از لایه تبخیری مرطوب در هوای ورودی به کندانسور	۱۲٪ بهبود مصرف انرژی الکتریکی
الساید و حریری [۱۲]	تاثیر میزان جریان هوای ورودی به کندانسور	۱۰٪ کاهش مصرف انرژی کمپرسور
امیدوار و همکاران [۱۹]	مدلسازی تاثیر تابش خورشیدی بر عملکرد کولرهای تبخیر مستقیم	اگر تابش حذف شود حدود ۵٪ افزایش راندمان
تحقیق حاضر	تاثیر تابش خورشیدی بر بازدهی کولر اسپلیت	۶٪ کاهش مصرف انرژی الکتریکی

۴- نتیجه گیری

جغرافیایی، ۴۵ بسمت چپ و راست و همچنین به سمت شرق در صبح و به سمت غرب در بعدظهر است، می‌باشد. نتایج بررسی نشان می‌دهد هنگامی که کندانسور در حالت ۹۰ درجه و شرقی-غربی قرار دارد به دلیل کاهش تابش رسیده، میزان مصرف انرژی حداکثر تا ۶٪ در مقایسه با زاویه موازی با جنوب کاهش می‌یابد.

یکی از پرمصرف ترین وسایل الکتریکی، سیستم های تبرید تراکمی یا همان کولرها هستند که نوع اسپلیت آن، جزء کاربردی ترین کولر در مناطق گرم می باشد. در این تحقیق هدف بررسی تاثیر تابش خورشیدی و عوامل محیطی چون دما رطوبت و سرعت باد بر روی میزان مصرف انرژی کولر اسپلیت است. مطالعه به صورت تجربی و در دانشگاه پیام نور در شهرستان آغاچاری در جنوب ایران در بهار و تابستان انجام شده است. به منظور بررسی اثر تابش خورشیدی، سه زاویه مختلف برای قرارگیری کندانسور در نظر گرفته شده که شامل جنوب

علائم انگلیسی

A	مساحت دریچه (m^2)
C_p	گرمای ویژه هوا ($J/m^2 K$)
COP	ضریب عملکرد کولر
E	انرژی

- [8] Barreira, E. M., Negrão, C. O., Hermes, C. J. Thermo-economic analysis and optimization of residential split-type air conditioners, *Applied Thermal Engineering*, 50(1): 629-636, (2013).

[۹] ازگلی، حسنعلی و سیدی نیکی، کیوان. ارزیابی تجربی یک سیستم بیهود دهنده عملکرد انرژی در کولر گازی اسپلیت. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۲(۲): ۳۶۵-۳۸۰، (۲۰۲۰).

- [10] Waly, M., Chakroun, W., and Al-Mutawa, N. K. Effect of pre-cooling of inlet air to condensers of air-conditioning units. *International journal of energy research*, 29(8): 781-794, (2005).

- [11] Hajidavalloo, E., and Eghtedari, H. Performance improvement of air-cooled refrigeration system by using evaporatively cooled air condenser. *International journal of refrigeration*, 33(5): 982-988. (2010).

- [12] Elsayed, A. O., Hariri, A. S., Effect of condenser air flow on the performance of split air conditioner, *Proceeding of World Renewable Energy Congress, Linköping, Sweden*, Linköping University Electronic Press, 2134-2141, (2011).

- [13] Waseem, M., Lin, Z., Ding, Y., Wen, F., Liu, S., Palu, I. Technologies and practical implementations of air-conditioner based demand response, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, (2020).

- [14] Yan, L., Liu, M. A simplified prediction model for energy use of air conditioner in residential buildings based on monitoring data from the cloud platform, *Sustainable Cities and Society*, 60, 102194, (2020).

- [15] Al-Alili, A., Hwang, Y., Radermacher, R. A hybrid solar air conditioner: Experimental investigation, *International journal of refrigeration*, 39, 117-124, (2014).

[۱۶] قاضی‌زاده احسانی، حسین و موحدی، سینا. ارزیابی عملکرد سیکل تبرید منبع زمینی انبساط مستقیم دی‌اکسید کربن. علمی مهندسی مکانیک، ۳۰(۱): ۱۲-۳، (۱۴۰۰).

- [17] Sharif, M. Z., Azmi, W. H., Mamat, R., Shaiful, A., Mechanism for improvement in refrigeration system performance by using nanorefrigerants and nanolubricants-A review, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 92, 56-63, (2018).

- [18] Phukan, M. B. J., Deb, S. K., Performance Improvement of Split Air Conditioner Using Evaporative Cooling Method in the Climatic Condition of GUWAHATI, ASSAM, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(2), (2018).

[۱۹] امیدوار، امیر، شایانی، حامد، رضایی، عباس. مدل‌سازی تأثیر تابش خورشیدی بر عملکرد کولرهای تبخیری مستقیم و ارزیابی اثربخشی سایبانهای رایج. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز (مقالات در انتظار چاپ، ۱۳۹۹).

hu رطوبت نسبی هوای محیط (/.)

I جریان الکتریکی (A)

Q گرما (J)

T دما (K)

rad تابش خورشیدی (W/m^2)

V_a سرعت هوای خروجی از اواپراتور (m/s)

P توان (W)

V ولتاژ (V)

W کار داده شده (J)

wi سرعت باد (m/s)

علایم یونانی

ρ چگالی (kg/m^3)

φ ضریب شبکه

زیرنویس

L سرما

H گرم

مراجع

- [1] Malik, A., Haghdadi, N., MacGill, I., Ravishankar, J., Appliance level data analysis of summer demand reduction potential from residential air conditioner control, *Applied energy*, 235, 776-785, (2019).

- [2] Chen, R., Wu, J., and Duan, J., Performance and refrigerant mass distribution of a R290 split air conditioner with different lubricating oils, *Applied Thermal Engineering*, 162, 114225, (2019).

- [3] Mishra, R., Chaulya, S. K., Prasad, G. M., Mandal, S. K., Banerjee, G., Design of a low cost, smart and stand-alone PV cold storage system using a domestic split air conditioner, *Journal of Stored Products Research*, 89, 101720, (2020).

[۴] رحمتی، احمدرضا، دریکوند، محمد امامی فر، آرمین. بررسی اثر میرد بر سیکل‌های تبرید تراکمی دو مرحله‌ای. مجله علمی مهندسی مکانیک ۲۸(۴): ۲۵-۴۸، (۱۳۹۸).

- [5] Mishra, R. S., Methods for Improving Thermodynamic Performance of Vapour Compression Refrigeration System, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4, 291-297, (2014).

[۶] آقازاده، دامون و سید محمودی، سید محمد. تأثیر افزودن اجکتور بر عملکرد سیکل تبرید تراکمی - آبشاری. علمی مهندسی مکانیک ۲۲(۲): ۳۲-۳۸، (۱۳۹۲).

[۷] مرادی کشکولی، فرشاد، منصوری مهریان، سید عبدالله، زارع سلطانی، محمد حسین. بررسی عددی جریان هوای خروجی واحد بیرونی کولر گازی دو تکه و مطالعه‌ی تأثیر پنجره مشبک بر شدت جریان و فاصله پرتاب هوای خروجی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۸(۳): ۲۹۱-۳۰۰، (۲۰۱۸).



بررسی آزمایشگاهی راندمان برودتی فن خانگی دارای لوله- های خنک کننده

سید شرف الدین حسینی*

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه پیام نور، تهران

چکیده: تامین انرژی سرمایشی مورد نیاز برای مصارف ساختمان و صنعت در کنار تلاش همزمان برای کاهش آلودگی محیط زیست و کاهش مصرف برق و هزینه های مربوط به آن دغدغه ایست که سالها مورد توجه محققان قرار گرفته است. نیاز بار سرمایی در بیشتر مناطق ایران از نیاز بار گرمایی بالاتر است. در مناطق گرم و مرطوب که ناچار به استفاده از سیستم های تبرید تراکمی با میزان مصرف برق بالا هستیم، یافتن روشهای جایگزین ضروری تر به نظر می رسد. در این تحقیق طرحی جدید بصورت یک سیکل آب سرد لوله مسی که قابلیت نصب بر روی فن های خانگی را دارد و می تواند کاهش مصرف برق قابل توجه داشته باشد، پیشنهاد شده است تا بتواند در زمان گرمای متوسط هوا جایگزین کولر گازی باشد. نتایج تحقیق نشان داد که در زمان گرمای متوسط هوا می توان از این سیستم جایگزین بهره برد و شرایط سرمایی مشابهی را با کولر گازی همراه با کاهش تا ۹۰ درصدی مصرف برق ایجاد نمود. همچنین بازگشت سرمایه در این طرح حدود یکسال محاسبه گردید.

واژه های راهنما: فن سرمایشی، سیستم تبرید، صرفه جویی مصرف انرژی، بار سرمایی، تبرید تراکمی.

مقاله علمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

S. Sh. Hosseini*
Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Payam Noor University,
Tehran

Experimental investigation of refrigeration efficiency by domestic fan with cooling pipes

Abstract: The supply of required cooling energy for building and industrial applications, along with simultaneous efforts to reduce environmental pollution and also reduce electricity consumption and related costs, are a concern that has been considered by researchers for years. Required cold load in most parts of Iran is higher than for heat load. In hot and humid areas where we have to use compression refrigeration systems with high power consumption, it seems more necessary to find alternative methods. In this research, a new design in the form of a cold water cycle in a copper pipe that can be installed on domestic fans has been proposed which can also significantly reduce power consumption and be able to replace the compression cooler in times of moderate temperature. The results showed that in times of moderate heat, this alternative system can be used and create similar cooling conditions with air conditioners and causes a reduction up to 90% in electricity consumption. Also, the return on investment in this project was calculated for about one year.

Keywords: Cooling Fan, Refrigeration System, Energy Consumption Saving, Cooling Load, Compression Refrigeration.

۱- مقدمه

بتوانیم میزان مصرف برق را کاهش دهیم. این سیستم شامل یک سیکل چرخش آب سرد است که می تواند روی فن های خانگی از نوع دیواری، ایستاده و رومیزی نصب شده و دمای هوای اتاق را متعادل نماید.

۲- توضیح دستگاه و روش آزمایش

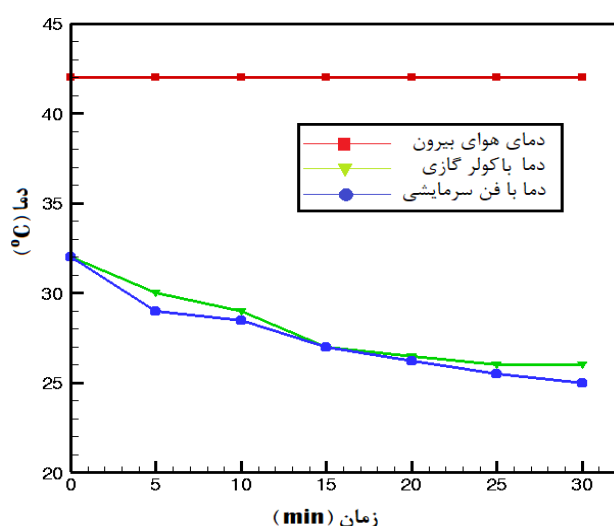
در این تحقیق تلاش شده است با مقایسه عملکرد یک سیستم تبرید تراکمی و یک سیستم تبرید پیشنهادی فن کوئلی، کارایی این دو سیستم برای ایجاد یک شرایط آسایش سنجیده شود. در سیستم پیشنهادی، یک رشته لوله مسی حاوی آب سرد در گردش در مقابل محل وزش باد پنکه قرار می گیرد و محیط را خنک می سازد. پره های محافظ پنکه های خانگی بطور معمول دارای شعاع بادهای مفید خارجی ۲۵ cm و شعاع مفید داخلی ۷ cm می باشند که هوای مکیده شده از پشت فن از این فضا به داخل اتاق وزانده می شود. در این سیستم، لوله مسی به قطر خارجی ۹/۶ mm و قطر داخلی ۶ mm و طول ۴m در ۵ دور نسبت به مرکز چرخش فن، روی حفاظ پنکه نصب می شود. یک عدد واتر پمپ که یک پمپ کولر آبی مدل الکتروژن است، آب سرد موجود در محفظه جانبی حاوی آب و یخ را توسط لوله های انعطاف پذیر درون لوله مسی ارسال نموده و از طریق خروجی لوله مسی، به محفظه آب و یخ باز می گرداند. دبی جریان واقعی آب داخل لوله ۶۰ mlilit/s است. مصرف کننده های انرژی الکتریکی در این طرح، پنکه با میزان مصرف ۵۰ w/hr با سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه و حجم باد دهی ۶۲ متر مکعب در دقیقه و واتر پمپ مورد استفاده با میزان مصرف ۵۰ w/hr، سرعت ۲۴۰۰ rpm می باشند. این سیستم مانند یک فن کوئل عمل می کند و پیش بینی می شود بعلت اینکه آب سرد در گردش مستقیماً با جریان هوا در تماس نیست و تبخیر نمی شود برای مناطق گرم و مرطوب مناسب است. از طرفی میزان مصرف انرژی این سیستم نسبت به کولر گازی بسیار پایین تر می باشد. تامین سرمایش این سیستم با تزریق یخ به محفظه آب و یخ صورت می گیرد. این دستگاه جانبی، به صورتی منعطف طراحی شده که قابلیت نصب روی انواع مدل های پنکه های رومیزی و دیواری رایج را در ساختمان را داشته باشد. دو حجم کنترل مشابه، به ابعاد ۳۰۰ cm × ۳۵۰ cm و ارتفاع ۲۸۰ cm را در نظر می گیریم. دیوار شرقی این اتاق ها به سمت هوای خارج و سه دیوار دیگر با فضای طرح داخل مشترکند. پنجره اتاق در سمت شرقی قرار دارد. سنسور های دمایی در دو نقطه از اتاق ها به ارتفاع ۱۴۰ cm از سقف قرار می گیرند. برای اندازه گیری های دمایی از ۶ دماسنج الکلی با محدوده دمایی ۵- تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است. یک سنسور دمایی دیگر در هوای خارج از اتاق قرار گرفته و دمای هوای بیرون را در طی زمان آزمایش می سنجد. یک سنسور دمایی دیگر درون محفظه آب و یخ قرار می گیرد و دمای این محفظه را کنترل می نماید. درون اتاق شماره ۱، یک کولر گازی با ظرفیت ۹۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت با مشخصات جدول ۱، مطابق شکل ۱ قرار دارد.

انرژی امروزه به عنوان یکی از مهمترین گزینه های مباحثات علمی در صنایع و ساختمان مطرح می باشد. به ویژه در مناطقی که به علت اقلیم خاص ناچار به بکارگیری سیستمهای پر مصرف انرژی هستیم، این ضرورت بیشتر به چشم می خورد. در صنعت ساختمان، تامین انرژی بیشتر با استفاده از سوخت های فسیلی صورت می گیرد. اما از طرف دیگر می دانیم افزایش سوخت های فسیلی مهمترین دلیل برای افزایش گرمای زمین است که عواقب زیست محیطی بسیار نامطلوبی از خود بجای گزارداده است [۱] و ناچاریم با روش های صرفه جویی و جایگزینی، میزان مصرف سوخت های فسیلی را کاهش دهیم. روش های مختلفی برای کاهش میزان مصرف انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد. روش های اعمالی در دیوارها همچون استفاده از پنجره های دارای هواژل، دیوارهای ترومب، دیوارهای پوسته ای، دیوار های گرمای نهان، و همچنین روش هایی که در سقف ها موجب صرفه جویی در مصرف انرژی ساختمان می شود همچون سقف های سبز، سقف های سلول خورشیدی، سقف های سرمایش تبخیری [۲]، و در کنار آنها سیستم های سرمایش خورشیدی [۳] و نیز استفاده از ذخیره ساز های سرمایی که در زمان کم باری، سرما را ذخیره و در زمان پرباری برق، آن را مصرف می کنند [۴]، از آن جمله است. تمامی این روش ها برای کاهش مصرف سوخت های فسیلی، در برقراری سیستم های گرمایش و سرمایش ساختمان و ایجاد شرایط آسایش در محیط زندگی مورد استفاده قرار می گیرد. استانداردهای محدوده دمایی که منتج به رضایت حرارتی برای حداقل ۸۰ درصد ساکنان مستقر در یک فضا می شود بیانگر شرایط آسایش حرارتی است [۵]. در ایران بعلت قرار گیری در منطقه گرم، معمولاً بار سرمایشی سالیانه از مقدار بار گرمایشی سالیانه بیشتر است [۶]. بنابراین توجه به بخش سرمایش از دیدگاه مصرف انرژی باید بیشتر باشد. سیستم های سرمایشی که در مناطق اقلیمی مختلف کشور ایران مورد استفاده قرار می گیرند از سه الگوی کلی تبرید تراکمی، تبرید جذبی و تبرید تبخیری پیروی می کنند. از سیستم تبرید تبخیری بیشتر در مناطق خشک استفاده می شود. مزایای سیستم های تبخیری هزینه مصرف برق کمتر، آلایندهی پایین تر و از همه مهمتر ارزانتر بودن آن است [۷]. بعلت اینکه این سیستم نه تنها نمی تواند رطوبت مازاد را از محیط مورد نظر کم کند بلکه رطوبت را به حجم کنترل اضافه می کند، استفاده از این سیستم در مناطق گرم و مرطوب به هیچ وجه اجرایی نیست. سیستم های تبرید جذبی نیز بیشتر در ساختمان های با مصرف یکپارچه و بالا مورد استفاده قرار می گیرند و برای واحد های مجزا و کوچکتر کارایی مطلوب و راندمان انرژی مناسب ندارند و تنها گزینه ای که می توان روی آن تمرکز کرد، سیستم تبرید تراکمی است. مخصوصاً در مناطق گرم و مرطوب که بیشتر شامل استان های اطراف دریای خزر و همچنین خلیج فارس و دریای عمان می شود، ناچاریم جهت خنک سازی و همچنین رطوبت زدایی از هوای حجم کنترل، از سیستم سرمایش تراکمی استفاده نماییم. هزینه اولیه و هزینه جاری انرژی سیستم های تراکمی بسیار بالاست. در این تحقیق تلاش شده است با یافتن راهکاری برای جایگزینی سیستم تبرید تراکمی در زمان گرمای متوسط

می ماند تا دمای اتاق با دمای هوای بیرون نزدیک شود. میانگین دمای اتاق ها $^{\circ}\text{C}$ ۳۲ اندازه گیری شد. دمای آب و یخ نیز قبل از شروع بکار سیستم $^{\circ}\text{C}$ ۱- ثبت شد. دستگاه های خنک کننده روشن شده شروع بکار می کنند. دمای هدف، دمای آسایش مطلوب بین $^{\circ}\text{C}$ ۲۴ تا $^{\circ}\text{C}$ ۲۷ درجه سانتیگراد است. دمای کولر گازی روی $^{\circ}\text{C}$ ۲۲ و دور فن متوسط تنظیم گردیده است. میزان مصرف برق دو سیستم از زمان شروع آزمایش با استفاده از ولت متر و آمپر متر به مدت ۳۰ دقیقه اندازه گیری می شود. نتایج دمایی و مصرف انرژی ثبت می گردد.

۲- نتایج و بحث

مطابق شکل ۳، نتایج آزمایش نشان داد روند کاهشی تقریباً مشابهی بین این دو سیستم برقرار می باشد. روند کاهش دما در کولر گازی کمی بیشتر از فن سرمایشی است. دمای آب سرد کننده نیز تا دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۴ افزایش می یابد و تقریباً ثابت می ماند. دمای لوله مسی فن سرمایشی نیز میانگین $^{\circ}\text{C}$ ۲۲ ثبت شد. بعد از ۳۰ دقیقه دمای اتاق ها شرایط تقریباً مشابهی می یابد اما میزان مصرف برق این دو سیستم تفاوت چشمگیری دارد.



شکل ۳ تغییرات دمایی حجم کنترل

حداقل اختلاف دما بین منبع سرد و گرم در مبدل های حرارتی نقطه پینچ نامیده می شود [۸]. مطابق شکل ۳، در مبدل فن سرمایشی اختلاف دما منبع سرمایش و هوای پایدار محیط $^{\circ}\text{C}$ ۱۲/۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شده است. هر چه نقطه پینچ در یک مبدل بالاتر باشد، راندمان آن بیشتر و هزینه های آن کمتر خواهد بود. در مبدل های حرارتی معمولاً عدد پینچ باید بالاتر از ۸ باشد [۹] که در این تحقیق این مقدار ۵۰ درصد بالاتر از حداقل مقدار بدست آمده است.

از طرف دیگر میزان مصرف برق اندازه گیری شده در سیستم فن سرمایشی، شامل ترکیب فن و پمپ آب، W/hr ۱۰۵ اندازه گیری شد. این میزان در هنگام شروع سیستم کولر گازی W/hr ۱۵۰۰ و در هنگام کار سیستم W/hr ۹۸۰ ثبت گردید. برای یک دوره گرمایشی از ابتدای خرداد تا انتهای شهریور برای یک اتاق اداری مانند دفتر کار، با ۵ روز کار در هفته و هر روز ۸



شکل ۱ پنل کولر گازی ۹۰۰۰ استفاده شده در آزمایش

جدول ۱ مشخصات سیستم تبرید تراکمی آزمایش

Power source		220-240V-50Hz,1Ph	
Standard rating conditions	Cooling	Current	4.6A
		Input	859W
	Heating	Current	4.2A
		Input	845W
Rated current		7.6 A	
Rated input		1450W	
Outdoor unit resistance class			IP 24
Cooling capacity		9000 Btu/h	
Heating capacity		10000 Btu/h	
Refrigerant		R22/540g	
Excessive operating pressure		Discharge	2.6 MPa
		Suction	1.0 MPa
Weight	Indoor	7 kg	
	Outdoor	23 kg	

در اتاق شماره ۲ سیستم تهویه پیشنهادی این تحقیق مطابق شکل ۲ قرار داده شده است.



شکل ۲ سیستم ابدائی سیکل آب سرد در فن سرمایشی

کولر گازی و سیستم تهویه آزمایش، در سمت دیوار شرقی قرار گرفته اند و جهت وزش باد به سمت دیوار غربی اتاق می باشد. آزمایش در زمان اوج گرما و ساعت ۱۳ در ماه مرداد در منطقه گرم و مرطوب در شهر ساری انجام گرفته است. دمای بیرون $^{\circ}\text{C}$ ۴۲ اندازه گیری شد. ابتدا پنجره این اتاق به مدت ۳۰ دقیقه باز

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مقایسه ای آزمایشگاهی از لحاظ کارایی سرمایشی و انرژی مصرفی بین دو سیستم کولر گازی و سیستم ابداعی فن سرمایشی که شامل یک سیکل آب سرد داخل لوله مسی دوار نصب شده روی فن خانگی است، برای فصل گرم در منطقه گرم و مرطوب شهرستان ساری انجام پذیرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که سیستم فن سرمایشی برای ایجاد شرایط آسایش در زمان گرمای متوسط هوا کارایی مشابهی با کولر گازی دارد و مصرف برق آن بسیار پایین تر از کولر گازی و حدود ۷ تا ۱۰ درصد است. با توجه به هزینه ایجاد سیکل چرخش آب سرد و اختلاف هزینه برق بها دو سیستم خنک سازی، بازگشت سرمایه متوسط یکساله قابل پیش بینی می باشد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
W	وات
hr	
°C	درجه سانتیگراد
cm	سانتیمتر
lit	لیتر
s	ثانیه
rp	دور بر دقیقه
m	متر
mm	میلیمتر

مراجع

- [1] Gani, A., Fossil fuel energy and environmental performance in an extended STIRPAT model, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 297, PP. 1-11, (2021).
- [2] Jamei, M., Ahmadianfar, I., Olumegbon, I. A., Karbasi, M., Asadi, A., On the assessment of specific heat capacity of nanofluids for solar energy applications: Application of Gaussian process regression (GPR) approach, *Journal of Energy Storage*, Vol. 33, pp. 1-16, (2021).
- [3] Subramanian, K., Krishna, B. V., Rao, T. N., Construction and characterization of a solar refrigeration system based on nano-graphene, *Journal of Physics*, Vol. 1950, pp. 1-7, (2021).
- [4] MirMohammadi, A., Rahimi, S., Technology of cold storage systems in air conditioning of buildings and examining its efficiency in a building, *mechanical Engineering*, Vol. 28, No. 126, pp. 3-9, (2019). (in Persian)

ساعت کار، محاسبه اختلاف میزان مصرف انرژی برای ۸۰ روز کار ۸ ساعته برابر با ۶۴۰ (روز ساعت) $\times ۸۷۵$ (وات بر ساعت اختلاف مصرف) = ۵۶۰ kW/hr خواهد بود. متوسط این میزان مصرف برای هر ماه ۱۶۰ kW/hr است. هزینه این اختلاف مصرف برای کاربری های مختلف طبق جدول ۲ می باشد. هزینه تجهیزات افزوده شده روی فن حدوداً ۴۰۰۰۰۰۰ ریال بوده است. برای مصرف خانگی و تجاری مقدار متوسط ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلو وات ساعت در ماه و برای مصارف اداری و آموزشی، هزینه زمان میان باری برای محاسبه در نظر گرفته شده است. پیش بینی زمان بازگشت سرمایه طبق میزان اختلاف هزینه انرژی مصرفی که در جدول ۲ آورده شده است نیز قابل محاسبه است. اِشکال سیستم فن سرمایشی تعریق رطوبت هوا روی لوله های مسی است. با توجه محل ریزش قطرات آب در پایین فن، می توان با قرار دادن یک ناودان کوچک و انتقال آب جمع آوری شده به مخزن آب و یخ این مشکل را برطرف نمود. نتیجه اینکه با جایگزینی سیستم فن سرمایشی بجای کولر گازی در زمان های با گرمای متوسط (و نه الزاماً اوج گرما)، می توان کاهش قابل ملاحظه ای در میزان مصرف برق و بهای برق برای مشترکین ایجاد نمود.

جدول ۲ میزان برق بها در منطقه ۴ گرمسیری از تاریخ ۱۴۰۰/۳/۱ [۱۰]

نوع مصرف	خانگی	تجاری	اداری	آموزشی
هزینه (ریال) برای متوسط انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات ساعت در ماه)	۰ تا ۱۰۰	۷۳۱	۱۳۱۰	۲۸۳۴
	۱۰۰ تا ۲۰۰	۸۵۱	۱۴۱۹	۵۶۶۸
	۲۰۰ تا ۳۰۰	۱۵۱۹	۱۷۴۵	۱۴۱۷
	۳۰۰ تا ۴۰۰	۲۴۲	۲۱۸	
	۴۰۰ تا ۵۰۰	۳۴۹۴	۲۴۰۱	
	۵۰۰ تا ۶۰۰	۴۵۵	۲۶۱	
	بیش از ۶۰۰	۵۴۶۹	۲۲۷۳	
اختلاف هزینه دو سیستم برای هر ماه (ریال)	۳۸۸۴۸۰	۳۴۹۷۸۰	۴۵۳۴۴۰	۸۴۰۰۰

- [8] Wang, B., Klemes, J., Gai, L., Varbanov, P. S., Liang, Y., A Heat and Power Pinch for Process Integration targeting in hybrid energy systems, *Journal of Environmental Management*, Vol. 287, pp. 1-5, (2021).
- [9] Jin, Y., Gao, N., and Wang, T., Influence of heat exchanger pinch point on the control strategy of Organic Rankine cycle (ORC), *Energy*, Vol. 207, pp.1-46, (2020).
- [10] Electricity tariffs and their general conditions from May 2021, based on the approvals of the Council of Ministers from 2018 to 2020, prepared in the Ministry of Energy, pp. 1-12, (2020).
- [5] Moalemi, N., Marefat, M., Introduction to Thermal Comfort, *mechanical Engineering*, Vol. 23, No. 96, pp. 31-38, (2014). (in Persian فارسی)
- [6] Basere, A. A., AghaNajafi, S., Performance of hybrid geothermal heat pump with cooling tower in Iranian climates, *mechanical Engineering*, Vol. 24, No. 100, pp. 46-57, (2015). (in Persian فارسی)
- [7] Sohani, A., and Sayyaadi, H., Thermal comfort based resources consumption and economic analysis of a two-stage direct-indirect evaporative cooler with diverse water to electricity tariff conditions, *Energy Conversion and Management*, Vol. 172, pp.248-264, (2018).



امکان سنجی سیستم‌های سرمایش تبخیری مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو در شهرهای ایران

امیرحسین عباسی

کارشناس ارشد

ولی محمدرزداری

دانشجوی کارشناسی ارشد

سید ابودر فنایی*

دانشیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه بیرجند، بیرجند

چکیده: این مقاله به معرفی سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم و غیرمستقیم می‌پردازد. بعد از آن نوع خاصی از سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم که بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو کار می‌کنند معرفی می‌شود. سیستم‌هایی که بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو کار می‌کنند، در حالت ایده‌آل می‌توانند دمای هوای ورودی را تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی کاهش دهند. بازدهی حباب خیس این سیستم‌ها نسبت به سایر سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم بالاتر است. در این سیستم‌ها از دو جریان هوا به جای یک جریان می‌توان استفاده‌ی مفید برد. این سیستم‌ها قادرند مصرف انرژی را تا ۹۰ درصد در مقایسه با راه‌حل‌های سنتی کاهش دهند. در ادامه با دسته‌بندی اقلیم‌های مختلف آب و هوایی ایران امکان استفاده از این سیستم در شهرهای مختلف ایران بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با توجه به شرایط مختلف آب و هوایی شهرهای ایران، استفاده از این سیستم‌ها برای شهرهای با رطوبت نسبی بالا و اختلاف دمای زیاد بین حباب خشک و نقطه‌ی شبنم مانند رشت، ساری، رامسر و اردبیل مناسب نیست.

واژه‌های راهنما: سرمایش تبخیری غیرمستقیم، چرخه‌ی مایسوتسنکو، مصرف آب، مصرف انرژی.

مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

Amirhossein
Abbasi
MSc

Vali
mohammadrazdari
MSc Student

Sayyed aboozar
fanaee*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
University of Birjand,
Birjand

Feasibility study of evaporative cooling systems based on Maisotsenko cycle in cities of Iran

Abstract: This article introduces direct and indirect evaporative cooling systems. Then a special type of indirect evaporative cooling systems working based on the Maisotsenko cycle is introduced. Systems based on the Maisotsenko cycle can ideally reduce the inlet air temperature to the dew point temperature of the inlet air. The wet-bulb efficiency of these systems is higher than other indirect evaporative cooling systems. These systems can reduce energy consumption up to 90% compared to traditional ways. In the following, by classifying the different climates of Iran, the possibility of using this system in different cities of Iran has been investigated. The obtained results show that due to the different climatic conditions of cities of Iran, using these systems is not suitable for cities with high relative humidity and large difference between dry-bulb and dew point temperatures such as Rasht, Sari, Ramsar, and Ardabil.

Keywords: Indirect evaporative cooling, Maisotsenko cycle, Water consumption, Energy consumption.

۱- مقدمه

امروزه باتوجه به پیشرفت‌های صنعتی بشر بهبود استانداردهای زندگی و در این راستا آسایش حرارتی به صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی رشد سریع مصرف انرژی، نگرانی‌های جدی در مورد تأمین منابع انرژی و تأثیرات شدید آن بر تغییر اقلیم زمین را به وجود آورده است [۱]. همچنین بر اساس بررسی‌های کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل متحد، ایران از سال ۱۹۹۰ به لیست کشورهای کم‌آب جهان اضافه شده است. در ایران محدودیت ذاتی منابع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های بخش آب است و در حال حاضر ایران در بین چهار سطح تعریف شده‌ی جهان برای تنش‌های آبی در حادث‌ترین سطح تنش قرار گرفته است [۲]. در دو دهه‌ی گذشته مصرف انرژی جهان (سوخت‌های فسیلی) ۴۹ درصد و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید ۴۳ درصد افزایش پیدا کرده است [۳]. در کشورهای پیشرفته ۵۰ درصد از انرژی مصرفی ساختمان‌ها و ۲۰ درصد از انرژی کل مصرفی مربوط به سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع است [۴]. در سال‌های اخیر باتوجه به افزایش دمای هوا در فصل تابستان، عایق‌بندی ساختمان‌ها و نیاز به سیستم‌های تهویه در ساختمان‌ها افزایش پیدا کرده است [۵]. برای پاسخ‌گویی به این امر، نیاز به تهیه‌ی لوازم تهویه مطبوع بدون مصرف زیاد انرژی الکتریکی می‌باشد که برخی از این سیستم‌ها می‌توانند بر اساس استفاده از یک منبع انرژی طبیعی، مانند تبخیر آب گسترش یابند. پیشرفت روش‌های سرمایش تبخیری در زمینه‌ی کاهش مصرف برق و همچنین عدم استفاده از مبردهای خطرناک بسیار امیدوارکننده است [۶]. سیستم‌های سرمایش تبخیری^۱ از گرمای نهان تبخیر آب برای تهویه‌ی هوای ساختمان‌ها استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها ۲۰ درصد مقدار انرژی الکتریکی استفاده‌شده در سیستم‌های تبرید تراکمی را مصرف می‌کنند که، معادل کاهش ۴۴ درصدی تولید کربن‌دی‌اکسید تولیدشده به وسیله‌ی سیستم‌های تبرید تراکمی است. از این رو سیستم‌های سرمایشی تبخیری خطرات کم‌تری را برای محیط‌زیست نیز به همراه دارند [۷]. سیستم‌های سرمایش تبخیری به دو دسته‌ی کلی سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم^۲ و غیرمستقیم^۳ تقسیم می‌شوند. باتوجه به سیستم‌های متنوع موجود برای ایجاد سرمایش در محیط، سیستم‌های مبتنی بر سرمایش تبخیری غیرمستقیم باتوجه به هزینه‌ی کم و راندمان بالا می‌توانند به صورت گسترده مورد استفاده قرار بگیرند [۸]. به لحاظ ترمودینامیکی، یک سیستم سرمایشی تبخیری غیرمستقیم هوای اولیه یا هوای تولیدی را از سمت خشک یک صفحه و هوای ثانویه یا هوای کاری را از سمت مخالف و خیس این صفحه عبور می‌دهد. سمت خیس صفحه با دریافت گرمای هوای سمت خشک و تبخیر شدن باعث سرد شدن هوای اولیه می‌شود [۹]. سیستم‌های مبتنی بر سرمایش تبخیری غیرمستقیم می‌توانند دمای پایین‌تری را تولید نمایند و علاوه بر آن هیچ گونه رطوبتی را به هوا اضافه نکنند. این سیستم‌ها در حالت ایده‌آل قادرند دمای هوا را تا دمای حباب خیس هوای ورودی کاهش دهند [۷]. در این

میان گونه‌ی جدیدی از سیستم‌های سرمایش تبخیری غیرمستقیم به نام چرخه‌ی مایوسونکو وجود دارد. این چرخه همانند یک سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم از صفحات خشک و خیس استفاده می‌کند اما با ایجاد یک جریان هوای بسیار متفاوت (پیش سرمایش هوا در کانال خشک پیش از ورود به کانال خیس) باعث ایجاد یک چرخه‌ی ترمودینامیکی جدید می‌شود [۹]. این سیستم جدید، جهش بزرگی در زمینه‌ی سیستم‌های تبخیری بوده است [۱۰]. باتوجه به آب‌وهوای خشکی که اکثر شهرهای ایران دارند، این سیستم را می‌توان جایگزین مناسبی با تولید هوای باکیفیت‌تر برای سیستم‌های سرمایشی مستقیم (کولرهای آبی) دانست [۱۱].

در این مقاله ابتدا نحوه‌ی عملکرد انواع سیستم‌های سرمایشی تبخیری بررسی شده و سپس سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم مبتنی بر چرخه‌ی مایوسونکو معرفی و با دسته‌بندی شهرهای مختلف ایران با توجه شرایط متفاوت آب‌وهوایی، امکان استفاده از این چرخه در شهرهای مختلف ایران بررسی خواهد شد.

۲- سیستم‌های سرمایش تبخیری

سرمایش تبخیری یک روش کارآمد برای ایجاد سرمایش و رطوبت در ساختمان‌های مسکونی، اداری و همچنین برخی از فضاها صنعتی هستند [۱۲]. سرمایش تبخیری مبتنی بر انتقال حرارت و جرم بین هوا و آب است [۱۳]. مبنای اصلی این سیستم ها، تبدیل گرمای محسوس به گرمای نهان است. هوای گرم و خشک موجود در فضای اطراف سیستم از طریق دیواره‌های متخلخل یا پوشال‌های خیس‌شده آن وارد محفظه‌ای بسته می‌شود. با انتقال بخشی از گرمای محسوس هوا به آب و تبدیل آن به گرمای نهان، مقداری از آب تبخیر می‌شود. تبخیر آب باعث کاهش دمای حباب خشک و افزایش رطوبت نسبی هوا می‌شود. انرژی لازم برای تبخیر آب از گرمای محسوس موجود در هوا گرفته می‌شود و هوای عبوری از محفظه‌ی بسته بدین وسیله سرد خواهد شد. به دلیل ثابت بودن مقدار آنتالپی در فرایند تبدیل گرمای محسوس به گرمای نهان، این فرایند یک فرایند آدیاباتیک هست [۱۴].

چهار عامل مهم و مؤثر بر میزان تبخیر آب در این سیستم‌ها به صورت زیر هستند [۱۴]:

(الف) رطوبت نسبی

این پارامتر به صورت نسبت درصد بخار آب موجود در هوای محیط به بیشترین ظرفیت امکان وجود بخار آب در هوا در آن دما تعریف می‌شود. هنگامی که رطوبت نسبی موجود در هوا کم

³ Indirect evaporative systems

¹ Evaporative coolers

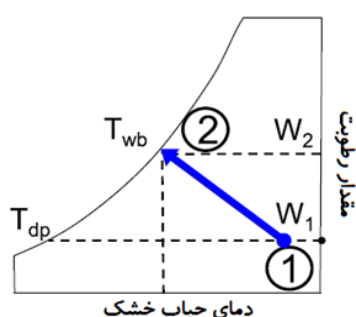
² Direct evaporative systems



شکل ۱ شماتیک سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۷]

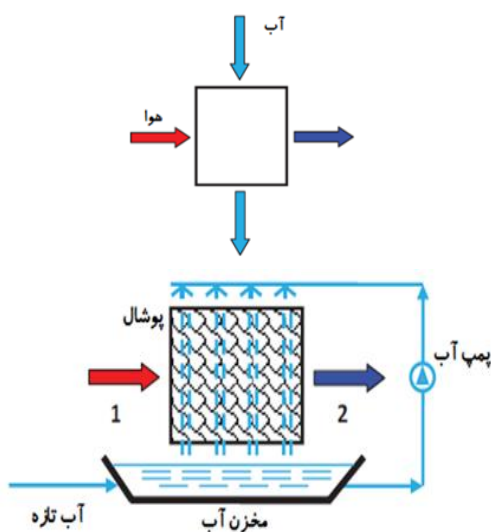
نمودار سایکومتريک اين سيستم‌ها در شکل ۲ آمده است. در اين سيستم دمای آب با دریافت انرژی حرارتی از هوا ضمن تبخیر شدن، کاهش پیدا می‌کند. گرمای تبخیر Q_v مطابق با رابطه‌ی زیر با اختلاف دمای هوا در ارتباط است [۱۵]:

$$C_{p,da}(T_{amb}-T_{out})=Q_v (W_{out}-W_{amb}) \quad (2)$$



شکل ۲ نمودار سایکومتريک سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۷]

در شکل ۳ می‌توان نحوه‌ی عملکرد یک سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم را مشاهده نمود. در این سیستم‌ها جریان هوا به طور مستقیم در تماس با جریان آب می‌باشد و همین موضوع باعث افزایش رطوبت هوا بعد از تبخیر آب می‌شود. برای گردش آب، از یک پمپ و برای افزایش سطح تبخیر آب، از پوشال‌های مخصوص این سیستم‌ها استفاده می‌شود [۱۵].



شکل ۳ نحوه‌ی عملکرد سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۵]

است، در این شرایط هوا می‌تواند رطوبت بیشتری را دریافت کند.

(ب) دمای هوا

آب با دریافت مقدار کافی انرژی جهت تغییر فاز، تبخیر می‌شود و هوای با دمای نسبتاً زیاد قادر به انجام این فرایند و نگهداری مقدار نسبتاً زیادی بخار آب می‌باشد؛ بنابراین میزان سرمایش یک سیستم تبخیری، متناسب با دمای هوای محیط اطراف آن خواهد بود.

(ج) جابجایی هوا

جابجایی هوا یک عامل مهم برای تبخیر می‌باشد. هم‌زمان با تبخیر آب روی سطح، میزان رطوبت هوا افزایش می‌یابد. چنانچه هوای مرطوب در نزدیکی سطح باقی بماند، میزان تبخیر کم می‌شود. از طرف دیگر اگر هوای تازه جایگزین هوای مرطوب نزدیک سطح شود، میزان تبخیر افزایش می‌یابد.

(د) مساحت سطح

هر چه سطح آب موجود برای تبخیر بیشتر شود، میزان تبخیر نیز افزایش می‌یابد. این بدان معناست که میزان تبخیر آب رابطه‌ی مستقیمی با مساحت سطح تبخیر دارد. بازدهی سیستم‌های تبخیری به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

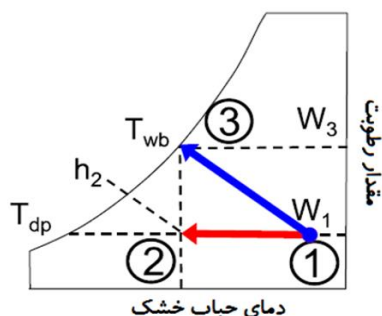
$$\eta = \frac{t_{amb}-t_{out}}{t_{amb}-t_{amb,wb}} \quad (1)$$

به طور کلی سیستم‌های سرمایش تبخیری به دو دسته‌ی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند.

۱-۲- سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم

استفاده از سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم، رایج‌ترین شیوه برای تهویه مطبوع در ساختمان‌ها است [۱۶]. سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم به منظور کاهش درجه‌ی حرارت و افزایش رطوبت هوا با استفاده از گرمای نهان تبخیر، ضمن تبدیل آب مایع به بخار آب استفاده می‌شوند. این سیستم‌ها از یک فن برای وارد کردن هوا به سطوح متخلخل یا پوشال‌های خیس شده که مساحت زیادی را برای تبخیر آب فراهم می‌سازند، استفاده می‌کنند. در این فرایند، هوای گرم و خشک تبدیل به هوای خنک و مرطوب می‌شود [۱۴]. این سیستم‌ها عملکرد رضایت‌بخشی در کاهش دمای هوا دارند، اما با توجه به ساختار آن‌ها رطوبت قابل توجهی را به هوا اضافه می‌کنند [۱۵].

شماتیک کلی یک سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود هوای ورودی به این سیستم به طور مستقیم با آب موجود بر روی سطوح متخلخل در تماس است و با یکدیگر تبادل حرارت انجام می‌دهند.



۲-۲- سیستم سرمایشی، تبخیری غیرمستقیم

سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم هم‌زمان با بهره‌گیری از سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم، از یک مبدل حرارتی برای انتقال انرژی سرمایشی به هوا استفاده می‌کنند. هوای مرطوب و خنک‌شده حاصل از فرایند سرمایش تبخیری مستقیم، هرگز در تماس مستقیم با هوای ورودی به ساختمان نخواهد بود. هوای مرطوب به فضای بیرون تخلیه می‌شود و یا برای خنک‌کردن یک دستگاه خارجی مانند یک سلول خورشیدی استفاده می‌شود [۱۴]. از آنجایی که در این سیستم‌ها دو جریان هوای قابل استفاده تولید می‌شود، توسعه‌ی این سیستم‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۵]. شکل ۴ شماتیک کلی یک سیستم سرمایشی تبخیری غیرمستقیم را نشان می‌دهد.

① → ②
کانال خشکی

③ ← ①
کانال تر

شکل ۴ شماتیک سیستم سرمایش تبخیری غیر مستقیم [۱۷]

مطابق با شکل ۴ هوای ورودی به محفظه‌ی خشک، گرمای خود را از طریق سطوح به محفظه‌ی خیس منتقل می‌کند و در نهایت هنگام خروج دارای دمای کم‌تری نسبت به حالت اولیه می‌باشد. ضمن این تبادل گرما، رطوبت هوای خروجی از محفظه‌ی خشک تغییری نمی‌کند. فرایند رخ داده در محفظه‌ی خیس مانند یک سیستم سرمایش تبخیری مستقیم است. مزیت این سیستم ثابت نگه داشتن رطوبت هوای ورودی به ساختمان است، اما نمی‌تواند

دمای هوا را به خوبی سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم کاهش دهد. تعادل حرارتی بین دو جریان هوا در این سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

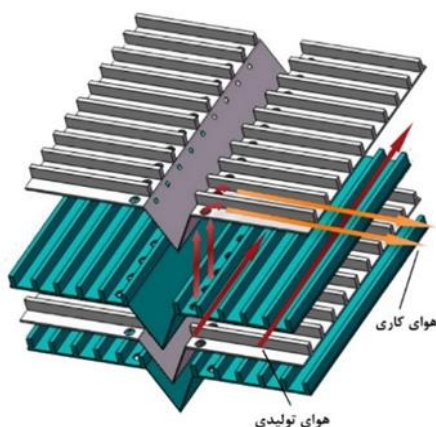
$$Q_{wc,s} = \dot{m}_{dc}(h_{amb} - h_{out}) = \dot{m}_{wc}[c_{p,da}(t_{amb} - t_{out}) + r(w_{out} - w_{amb})] \quad (r)$$

نمودار سایکومتریک این سیستم‌ها در شکل ۵ آمده است. در این شکل خط آبی نشان‌دهنده جریان هوای محفظه‌ی خیس و خط قرمز نشان‌دهنده‌ی جریان هوای محفظه‌ی خشک است.

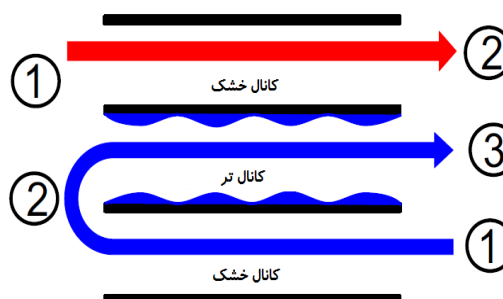


نمودار سایکومتریک چرخه‌ی مبنای مایوسنسکو در شکل ۷ آمده است.

در این سیستم‌ها می‌توان از یک مبدل حرارت و جرم جریان متقاطع و هم از مبدل حرارت و جرم جریان متقابل استفاده کرد. مبدل جریان متقابل دارای کارایی سرمایشی بیشتری نسبت به مبدل جریان متقاطع است [۲۰]. سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم جریان متقاطع بر اساس چرخه‌ی مایوسونکو در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هوای کاری که بخشی از هوای ورودی است، از طریق سوراخ‌های توزیع شده در امتداد محفظه‌های کاری خشک به محفظه‌های کاری خیس منحرف می‌شود. همچنین هوای محصول که بخش دیگری از هوای ورودی است، در محفظه‌های خشک در جهت عمود بر هوای کاری جریان می‌یابد.



با توجه به شکل ۷، هوای خروجی از کانال خشک (خط قرمز) با ثابت ماندن مقدار رطوبت با دمای کمتری نسبت به حالت ورودی، وارد ساختمان می شود و جریان هوای ورودی به کانال خیس (خط آبی) با افزایش رطوبت بر روی خط اشباع حرکت می کند. با جداسازی هوای پیش سرد شده برای ورود به کانال تر و ایجاد یک دسته جریان هوای متفاوت، چرخه ی معرفی شده ی اولیه مایسوتسنکو اصلاح و کارایی آن افزایش می یابد. شماتیک کلی چرخه ی اصلاح شده در شکل ۸ آمده است.



شکل ۱۱ نقشه‌ی یک مبدل جریان متقابل بر اساس چرخه‌ی مایوسنکو را نشان می‌دهد. هوای محصول و هوای کاری از سمت راست مبدل وارد محفظه‌های خشک می‌شوند. بخشی از جریان (هوای کاری) با عبور از سوراخ‌های تعبیه‌شده در انتهای محفظه‌های کاری خشک به محفظه‌های کاری خیس مجاور منتقل می‌شود. هوای کاری در جهت مخالف با هوای تولیدی جریان می‌یابد.

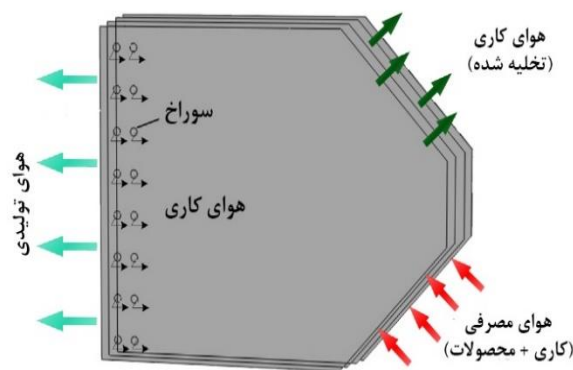
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تمام هوای ورودی به محفظه‌ی خشک با کاهش دما و ثابت ماندن مقدار رطوبت از سیستم خارج می‌شود. نمودار سایکومتريک این سیستم در شکل ۹ آمده است.

دادند. آن‌ها سه سیستم مختلف مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو (سیستم‌های I و III برق مصرفی خود را مستقیماً از یک شبکه‌ی توزیع برق در ساختمان تهیه می‌کنند، در حالی که سیستم II از پنل‌های خورشیدی نصب‌شده بر روی خود سیستم برای تهیه‌ی برق استفاده می‌کنند) را مورد بررسی قرار دادند. برای هر سه سیستم سرعت جریان، جرم ورودی و آنتالپی هوای خشک یکسان است. نتایج این کار نشان می‌دهد ظرفیت سرمایه‌ی چرخه‌ی حاضر به نرخ جریان جرم هوای خشک و اختلاف آنتالپی هوای ورودی و خروجی بستگی دارد.

ثقفی و گادالا [۲۷] استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو در یک توربین گازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با استفاده از این چرخه بازدهی سیستم موردنظر در مقایسه با Air Bottoming Cycle، ۳/۷ درصد افزایش می‌یابد که همین امر باعث صرفه‌جویی ۲۶۰۰ تن سوخت گاز طبیعی در سال می‌شود. ژاو و همکاران [۲۸] و ژان و همکاران [۲۹] در مقالاتی یک چرخه‌ی مایسوتسنکو با جریان متقاطع را به‌صورت عددی بررسی کردند و نتایج زیر را گزارش دادند:

- ۱- بازدهی مبدل انتقال جرم و حرارت بر پایه‌ی چرخه‌ی مایسوتسنکو ۱۶/۷ درصد بیش‌تر از مبدل‌های غیرمستقیم معمولی است.
- ۲- با افزایش سرعت هوا در محفظه‌ها، بازدهی حباب خیس و ضریب عملکرد مبدل کاهش می‌یابد.
- ۳- کاهش سرعت جریان، باعث بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی مبدل و افزایش هزینه‌ی ساخت می‌شود.
- ۴- کاهش ارتفاع محفظه‌ها، باعث افزایش بازدهی حباب خیس و ضریب عملکرد می‌شود.
- ۵- افزایش طول محفظه‌ها به ترتیب باعث افزایش و کاهش بازده و ضریب عملکرد دستگاه می‌شود.
- ۶- افزایش دمای هوای ورودی باعث افزایش بازده و ضریب عملکرد سیستم می‌شود.
- ۷- با افزایش رطوبت ورودی بازده و ضریب عملکرد سیستم به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.
- ۸- عملکرد سیستم وابستگی زیادی به شرایط هوای ورودی دارد.

قربانی و همکاران [۲۲] نحوه‌ی عملکرد چرخه‌ی مایسوتسنکو را برای نقاط مختلف ایران بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برخلاف سیستم‌های سرمایه‌ی تبخیری مستقیم متداول (کولر آبی) که به علت افزایش رطوبت هوا تنها در نقاط گرم و خشک استفاده می‌شوند، سیستم‌های سرمایه‌ی مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو به علت ثابت نگه‌داشتن رطوبت هوا علاوه بر نقاط گرم و خشک در نقاط گرم و مرطوب نیز می‌توانند استفاده شوند. همچنین با بررسی انجام‌شده برای شهرهای مختلف ایران دریافتند که، استفاده از این سیستم در اکثر مناطق ایران (به علت پایین بودن نسبت رطوبت) می‌تواند شرایط آسایش را فراهم کند. همچنین نتایج این کار نشان می‌دهد که در شهرهای با دمای بالا و نسبت رطوبت پایین، ضریب عملکرد این سیستم بسیار بالا است. استفاده از این سیستم برای مناطق گرم



شکل ۱۱ شماتیک یک مبدل جریان متقابل بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو [۲۱]

۳-۱- تحقیقات گذشته

گیلان در سال ۲۰۰۸ کارایی چرخه‌ی مایسوتسنکو را بدون استفاده از روش تحلیل اگزرژی بیان کرد. در حالت ایده‌آل این چرخه قادر خواهد بود دمای هوای ورودی را تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی کاهش دهد [۹]. عملکرد این سیستم به پارامترهایی همچون دما و رطوبت هوا بستگی دارد. به‌طوری‌که با افزایش دمای هوای ورودی، ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایه‌ی سیستم افزایش می‌یابند و با افزایش نسبت رطوبت هوای ورودی، ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایه‌ی کاهش می‌یابد [۲۲]. استفاده از خنک‌کننده‌های نقطه‌ی شبنم در کاربردهای مختلفی به‌ویژه تهویه مطبوع و پیش‌سرمایش هوای ورودی به کمپرسور در واحدهای تولید توان رایج است. باتوجه‌به مسائلی که در مورد سوخت‌های فسیلی، منابع آب و آلاینده‌های زیست‌محیطی وجود دارد پیش‌بینی می‌شود این سیستم‌ها در آینده سهم بیش‌تری از بازار را به خود اختصاص داده و در آینده بیش‌تر از آن‌ها شنیده شود [۲۳]. گیلان و مایسوتسنکو در سال ۲۰۰۳ چرخه‌ی با خنک‌کننده‌ی نقطه‌ی شبنم را برای استفاده در یک توربین قدرت گازی مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد که اکسیدهای نیتروژن تولیدی و هزینه‌ی تجهیزات هنگام استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو نسبت به هر چرخه قدرت دیگری کم‌تر است [۲۴]. مایسوتسنکو و ری زین در سال ۲۰۰۵ عملکرد مبدل‌های حرارتی موجود در وسایل سرمایه‌ی الکترونیکی را هنگام استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این کار نشان می‌دهد محدوده‌ی وسیعی از ظرفیت سرمایه‌ی در بازه‌ی ۱۰ وات تا ۵۰ کیلووات یا حتی بیش‌تر با استفاده از این چرخه برای وسایل سرمایه‌ی قابل دست‌یافتن است [۲۵]. ژان و همکاران در سال ۲۰۱۱ تحلیلی عددی از کاربرد چرخه‌ی مایسوتسنکو را در یک مبدل حرارتی جریان متقاطع برای به‌دست‌آوردن کارایی ترمودینامیکی این چرخه بدون تحلیل اگزرژی انجام دادند. در این تحلیل نتایج روش المان محدود با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی تأثیر بسزایی بر عملکرد این سیستم دارد [۶]. کالیسکان و همکاران [۲۶] تحقیقی در مورد استفاده از این سیستم‌ها در ساختمان‌ها انجام

۳- استفاده از این سیستم در مناطق گرم و خشک با تولید کمترین میزان آلاینده‌گی همراه است و کارایی بسیار بالایی دارد [۲۲].

۴- به علت ثابت نگه‌داشتن رطوبت هوا علاوه بر نقاط گرم و خشک در نقاط گرم و مرطوب نیز می‌توانند استفاده شوند [۲۲].

۵- استفاده از این سیستم در مناطق گرم و خشک نیاز به مصرف آب کمتری نسبت به مناطق معتدل یا مرطوب دارد [۲۶]. این امر استفاده از این سیستم برای کشور ایران را مناسب‌تر می‌کند.

۶- استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو در مقایسه با راه‌حل‌های سنتی می‌تواند مصرف انرژی را تا ۹۰ درصد کاهش دهد [۳۱].

۷- علاوه بر سیستم‌های تهویه مطبوع، چرخه‌ی مایسوتسنکو می‌تواند برای آب‌شیرین‌کن‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد و باعث افزایش کارایی توربین‌های گازی و پیل‌های فتوولتائیک شود [۳۱].

۸- بازدهی حباب خیس این چرخه حداکثر ۱/۸ است درحالی‌که برای سایر سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم این عدد ممکن است نهایتاً به عدد ۱ برسد [۱۷].

۹- مبدل گرمایی جریان متقاطع این چرخه در مقایسه با مبدل گرمایی سرمایش تبخیری غیرمستقیم معمولی، دارای بازدهی تولید سرمایش بالاتری هست، اما هنوز با محدودیت‌های زیادی روبرو است که برخی از این موارد عبارت‌اند از:

الف) باتوجه‌به اینکه درصد زیادی از هوای موجود در کانال خشک به کانال‌های مرطوب مجاور تغییر مسیر می‌دهد، کاملاً خشک نمی‌شود [۳۲].

ب) باتوجه‌به ساختار مبدل گرمایی، جریان هوای تولید شده یک جریان هوای عمودی است که برای تبادل گرمایی مناسب نیست [۳۲].

۳-۳- تحلیل انرژی

راندمان حباب خیس را به‌عنوان یکی از معیارهای کارایی این چرخه، می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد [۳۳]:

$$\eta_{wb} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{wb,in}} \quad (4)$$

باتوجه‌به راندمان بالای چرخه‌ی مایسوتسنکو، این چرخه قابلیت کاهش دمای هوای ورودی تا زیر دمای حباب خیس با کمترین افزایش رطوبت در هوای ورودی را دارد [۳۳]. همچنین راندمان نقطه‌ی شبنم می‌تواند برای محاسبه‌ی توانایی این چرخه در سردسازی دمای هوای ورودی تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی به‌صورت رابطه‌ی زیر مورد استفاده قرار گیرد [۳۳]:

و خشک در مقایسه با سایر سیستم‌های تبرید با تولید کمترین میزان آلاینده‌گی همراه است و کارایی بسیار بالایی نیز دارد. فراستی و همکاران [۳۰] استفاده از مبدل‌های مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو برای خنک‌سازی هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد برای شرایط آب‌وهوایی تهران در صورتی‌که این سیستم برای دمای بالای ۱۵ درجه‌ی سلسیوس شروع به کار کند، راندمان حرارتی مجموعه را ۴/۰۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از این مبدل به‌عنوان سیستم سرمایش هوای ورودی توربین گاز نسبت به حالتی که هیچ‌گونه تجهیزات سرمایشی استفاده نشده است، توان توربین را چیزی نزدیک به ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.

۳-۲- کاربردها و مزایا

به دلیل نحوه‌ی عملکرد چرخه‌ی مایسوتسنکو، این چرخه در صنایع بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱۲ می‌توان به‌صورت جامع کاربردهای این چرخه را مشاهده کرد [۱۷].



شکل ۱۲ طیف گسترده‌ای از کاربردهای چرخه‌ی مایسوتسنکو [۱۷]

از مزایای استفاده از این سیستم‌ها به‌طور کلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- در این سیستم‌ها از دو جریان هوا به‌جای یک جریان می‌توان استفاده‌ی مفید برد.
- ۲- در این سیستم‌ها هیچ‌گونه رطوبتی به هوای ورودی اضافه نمی‌شود.

علاوه بر این بازدهی انرژی و ضریب عملکرد انرژی به ترتیب به صورت رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ تعریف می‌شوند [۳۶]:

$$\eta_{ex} = \frac{EX_{out}}{EX_{in}} = \frac{e_{total}}{e_{da} + w_{in}e_{water}} \quad (12)$$

$$COP_{ex} = COP \left(1 - \frac{t_{ds}}{t_{in}}\right) \quad (13)$$

۴- بررسی استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو در اقلیم ایران

برای بررسی امکان استفاده از سیستم سرمایشی مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو ابتدا جغرافیای ایران بر اساس شرایط آب‌وهوایی به اقلیم‌های مختلف تقسیم می‌شود. سپس باتوجه به مشخصات دمایی شهرهای مهم هر اقلیم، معیار استفاده از این چرخه در نواحی مختلف بررسی می‌شود. مطابق با مرجع [۳۶] معیار مشخص کننده برای قابلیت استفاده از این چرخه مرتبط با اختلاف دمای بین حباب خشک و نقطه‌ی شبنم است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FI_{dp} = t_{db} - t_{dp} \quad (14)$$

باتوجه به این معیار، برای استفاده از این چرخه، اختلاف دمای بیان شده همواره باید مقداری بیش‌تر از ۶ درجه‌ی سلسیوس داشته باشد. همچنین مصرف آب این سیستم را نیز می‌توان به عنوان یکی از معیارهای دیگر این سیستم در نظر گرفت. در شرایط مشابه مقدار اختلاف دما (FI_{dp}) کم‌ترین میزان تبخیر آب (به دلیل کم‌ترین میزان مصرف انرژی) ترجیح داده می‌شود. ایران در نیم کره شمالی بین عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه قرار داشته و بیش‌تر مناطق آن در ارتفاع بالاتر از ۴۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این شرایط جغرافیایی لزوماً به ایجاد شرایط آب و هوایی معتدل برای ایران منجر می‌شود، اما به دلیل وجود کوه‌های البرز و زاگرس، منطقه‌ی خشک و بایر در مرکز و شرق ایران ایجاد می‌شود. تفاوت عرض جغرافیایی ۱۵ درجه و بیش از ۲۵۰۰ متر اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف ایران منجر به ایجاد شرایط مختلف آب و هوایی در ایران می‌شود [۳۶]. به طور کلی با توجه به این توضیحات جغرافیای ایران به ۱۱ اقلیم در جدول ۱ تقسیم می‌شود.

$$\eta_{dp} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{dp,in}} \quad (5)$$

در این رابطه $t_{dp,in}$ دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی است. دمای حباب خشک، دمایی است که یک دماسنج استاندارد در معرض جریان هوا نشان می‌دهد. دمای حباب خیس، نوعی از اندازه‌گیری دما است که مشخصه‌های فیزیکی یک سیستم مخلوط متشکل از هوا و بخار آب را نشان می‌دهد که مقدار آن با کم‌ترین دمایی که هوا می‌تواند فقط به وسیله‌ی تبخیر آب به دست آورد، برابر است [۳۴]. دمای حباب خشک و دمای حباب خیس برای به دست آوردن مقدار رطوبت هوا به کار می‌روند. دمای نقطه‌ی شبنم، دمای هوایی است که در حال تغییر فاز از بخار به مایع است. دمای نقطه‌ی شبنم، پایین‌ترین دما بین سه دمای گفته شده است [۳۵].

نرخ ظرفیت سرمایشی سیستم را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۳۳]:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{out}(h_{in} - h_{out}) \quad (6)$$

نسبت گرمای گرفته شده از مخزن سرد به کار ورودی را ضریب عملکرد این سیستم خنک کننده گویند [۳۳]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{\dot{W}_{blower}} \quad (7)$$

۳-۴- تحلیل انرژی

تبادل انرژی برای چرخه‌ی مایسوتسنکو در یک حجم کنترل به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$\dot{EX}_{in} = \dot{EX}_{out} + \dot{EX}_{dest} + \dot{EX}_{loss} \quad (8)$$

جایی که نرخ انرژی ورودی به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۳]:

$$\dot{EX}_{in} = \dot{EX}_{in,da} + \dot{EX}_{in,water} \quad (9)$$

باتوجه به روابط ۸ و ۹ رابطه‌ی مربوط به تبادل انرژی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳۶]:

$$\dot{m}_{da}e_{da} + \dot{m}_{da}w_{in}e_{water} = \dot{m}_{da}e_{total} + \dot{EX}_{dest} + \dot{Q}_{cooling}\left(1 - \frac{t_{ds}}{t_{in}}\right) \quad (10)$$

همچنین نرخ تولید آنتروپی از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود [۳۶]:

$$\dot{S} = \frac{\dot{EX}_{dest}}{t_{ds}} \quad (11)$$

جدول ۱ اقلیم‌های دسته‌بندی شده ایران [۳۶]

شماره‌ی اقلیم	موقعیت	دمای متوسط سالیانه
		°C
۱	منطقه‌ی بین کوه‌های البرز و دریای خزر	۱۵-۱۸
۲	شمال استان خراسان و قسمت‌هایی از سمنان و استان گلستان	۱۲-۱۵
۳	شمال غربی ایران شامل اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی	۱۱-۱۳
۴	غرب ایران، ارتفاعات غربی رشته‌کوه‌های زاگرس شامل استان‌های چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و قسمت‌هایی از استان خوزستان	۱۱-۱۷
۵	جنوب غربی ایران شامل استان‌های خوزستان و ایلام که تحت تأثیر هوای گرم و خشک عربستان سعودی هستند.	۱۹-۲۵
۶	قسمت‌های نزدیک دریای جنوب ایران شامل استان‌های بوشهر، هرمزگان، جنوب سیستان و بلوچستان	۲۳-۲۸
۷	استان سیستان و بلوچستان به جز قسمت‌های جنوبی و جنوب استان کرمان	۱۸-۲۷
۸	جنوب استان خراسان و قسمت‌هایی از استان سمنان با بارش کم و دمای تقریباً بالا	۱۴-۱۷
۹	استان‌های سمنان، تهران، قزوین، زنجان، مرکزی، اصفهان و چهارمحال و بختیاری که در جنوب رشته‌کوه‌های البرز و شرق رشته‌کوه‌های زاگرس قرار گرفته‌اند.	۱۲-۱۸
۱۰	غرب، شمال و جنوب صحرا که دارای اقلیم بسیار گرم و خشک است.	۱۶-۲۰
۱۱	کفه‌های نمکی مرکزی ایران که دارای شرایط آب‌وهوایی خشک است.	۱۹-۲۳

جدول ۲ اطلاعات آب‌وهوایی برخی از شهرهای مهم ایران [۳۶]

شماره - شهر	ی اقلیم	نسبی رطوبت	t_{dp}	t_{wb}	t_{db}
		%	□	□	□
آبادان	۵	۶۱	۲۳/۹	۲۸	۴۷/۷
اصفهان	۹	۲۵	۵/۷	۱۹/۷	۳۸/۳
اهواز	۵	۲۴	۱۲/۶	۲۸/۴	۴۸/۵
بندرعباس	۶	۶۸	۲۷/۱	۳۰	۳۹/۸
تهران	۹	۲۶	۷/۴	۱۸/۹	۳۹
تبریز	۳	۳۶	۸/۲	۱۸/۹	۳۶/۵
شهرکرد	۴	۳۱	۵/۸	۱۶/۸	۳۴/۸
شیراز	۴	۲۴	۵/۸	۱۹/۵	۳۹/۱
زاهدان	۷	۲۱	۳/۴	۱۹/۷	۳۹/۵
کرمان	۱۰	۱۹	۱/۱	۱۷/۹	۳۸
کرمانشاه	۴	۲۳	۳/۶	۱۸/۸	۳۹/۸
گرگان	۲	۶۵	۲۰	۲۴	۳۶
مشهد	۲	۳۵	۸/۷	۱۸/۸	۳۷/۳
ایلام	۵	۱۹	۲/۹	۱۷	۳۰/۳
ساری	۱	۷۵	۲۱/۳	۲۴	۲۶/۴
سنندج	۴	۲۵	۴/۶	۱۸	۲۷/۸
یاسوج	۴	۲۵	۴/۶	۱۶	۲۷/۱
اراک	۹	۲۸	۶	۱۷	۲۷/۵
ارومیه	۳	۴۸	۱۱/۲	۱۸/۳	۲۳/۹
اردبیل	۳	۶۸	۱۲/۲	۱۸	۱۹
بیرجند	۸	۲۲	۳/۷	۱۶/۳	۲۸/۵
زنجان	۹	۴۱	۸/۷	۱۷/۸	۲۴/۴
سمنان	۱۱	۲۶	۹/۹	۲۰	۳۲
قزوین	۹	۳۸	۱۰	۱۹	۲۷/۳
قم	۹	۲۳	۷	۱۸/۴	۳۲/۲
همدان	۴	۳۶	۷/۸	۱۷/۳	۲۵/۵
رامسر	۱	۸۰	۲۱/۴	۲۴/۱	۲۵/۳
رشت	۱	۷۶	۲۰/۷	۲۴	۲۵/۹

با کمک اطلاعات جدول ۱، میزان تبخیر آب و شاخص امکان-سنجی چرخه‌ی مایسوتسکو در جدول ۳ آمده است.

همچنین شرایط آب‌وهوایی برخی از شهرهای مهم ایران در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج مقدار آب تبخیری و شاخص چرخه‌ی مایسوتسنکو [۳۶]

شماره اقلیم	شهر	Fl_{dp}	V_{water} Lit/h
۵	آبادان	۲۳/۸	۰/۶۶
۹	اصفهان	۳۲/۶	۰/۴۶
۵	اهواز	۳۵/۹	۰/۶۶
۶	بندرعباس	۱۲/۷	۰/۴۴
۹	تهران	۳۱/۶	۰/۴۴
۳	تبریز	۲۸/۳	۰/۲۹
۴	شهرکرد	۲۹	۰/۳۲
۴	شیراز	۳۳/۳	۰/۳۴
۷	زاهدان	۳۶/۱	۰/۳۴
۱۰	کرمان	۳۶/۹	۰/۳۳
۴	کرمانشاه	۳۶/۲	۰/۳۳
۲	گرگان	۱۶	۰/۲۹
۲	مشهد	۲۸/۶	۰/۳
۵	ایلام	۲۷/۴	۰/۲۱
۱	ساری	۵/۱	۰/۲
۴	سنندج	۲۴/۲	۰/۲۱
۴	یاسوج	۲۲/۵	۰/۲
۹	اراک	۲۱/۵	۰/۲
۳	ارومیه	۱۲/۷	۰/۱۴
۳	اردبیل	۶/۸	۰/۲۱
۸	بیرجند	۲۴/۸	۰/۱۴
۹	زنجان	۱۵/۷	۰/۲۱
۱۱	سمنان	۲۲/۱	۰/۲۲
۹	قزوین	۱۷/۳	۰/۲۳
۹	قم	۲۵/۲	۰/۲۲
۴	همدان	۱۷/۷	۰/۲۳
۱	رامسر	۳/۹	۰/۲۳
۱	رشت	۵/۲	۰/۲۲

استفاده از سیستم سرمایشی مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو برای شهرهای رامسر، رشت، ساری و اردبیل به دلیل رطوبت نسبی بسیار بالا (تقریباً ۸۰ درصد) و اختلاف دمای زیاد بین حباب خشک و نقطه‌ی شبنم (کم‌تر از ۶ درجه‌ی سلسیوس) مناسب نیست، از طرفی شهرهای آبادان، اصفهان، اهواز، تهران، تبریز، شهرکرد، شیراز، کرمان، کرمانشاه، مشهد، ایلام، سنندج، یاسوج، اراک، بیرجند، سمنان و قم از شرایط مناسبی برای استفاده از این سیستم برخوردار هستند. شهرهای گرگان، ارومیه، زنجان و قزوین در برخی ساعات روز شرایط مناسبی برای استفاده

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نحوه‌ی عملکرد انواع سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم و غیرمستقیم بررسی شد. در این میان چرخه‌ی جدیدی به نام چرخه‌ی مایسوتسنکو وجود دارد که قادر است در حالت ایده‌آل دمای هوای ورودی را تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی کاهش دهد. نحوه‌ی عملکرد، معرفی انواع این سیستم و همچنین امکان استفاده از آن برای شهرهای مختلف ایران بررسی شد. استفاده از چرخه‌ی جدید مایسوتسنکو به دلایل زیادی اعم از استفاده‌ی مفید از دو جریان هوا به‌جای یک جریان، ثابت نگه‌داشتن رطوبت هوا که می‌تواند برای کاربردهای مخصوص خود استفاده شود، استفاده در مناطق گرم و خشک با تولید کم-ترین میزان آلاینده‌ی و کارایی بسیار بالا، استفاده در نقاط گرم و خشک علاوه بر نقاط گرم و مرطوب، نیاز به مصرف آب کم‌تر برای مناطق گرم و خشک نسبت به مناطق معتدل یا مرطوب (که این امر استفاده از این سیستم برای کشور ایران را مناسب‌تر می‌کند) کاهش مصرف انرژی تا ۹۰ درصد در مقایسه با راه‌حل‌های سنتی، کاربردهای گسترده‌ی این چرخه در صنایع مختلف که باعث افزایش کارایی سیستم‌هایی مانند توربین‌های گازی، پنل‌های فتوولتائیک و ... می‌شود و میزان بالاتر بازدهی حباب خیس نسبت به سایر سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم، توصیه می‌شود. همچنین استفاده از این چرخه برای اقلیم ایران با دسته‌بندی آب‌وهوایی جغرافیای ایران مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که استفاده از این سیستم برای اکثر شهرهای ایران مناسب می‌باشد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

COP	ضریب عملکرد
C_p	حرارت مخصوص ($kJ/kg.K$)
e	انرژی مخصوص (kJ/kg)
EER	نسبت بازدهی انرژی
$\dot{E}X$	نرخ انرژی (kW)
Fl_{dp}	معیار نقطه‌ی شبنم (K or $^{\circ}C$)
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kg)
$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی (kg/s)
Q	انرژی، حرارت (kJ/kg)
$\dot{Q}$	نرخ ظرفیت سرمایشی (kW)
$\dot{S}$	نرخ تولید آنتروپی (kW/K)
t	دما (K)

A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory, Energy, Vol. 35, No. 6, pp. 2448-2454, (2010).

[9] Gillan, L., Maisotsenko cycle for cooling processes, International Journal of Energy for a Clean Environment, Vol. 9, No. 1-3, (2008).

[10] Cui, X., Chua, K. J., Yang, W. M., Ng, K. C., Thu, K., Nguyen, V. T., Studying the performance of an improved dew-point evaporative design for cooling application, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 624-633, (2014).

[۱۱] نوری، س.، نوری، س.، فرایند انتقال جرم و حرارت در چرخه مایسوتسنکو، مجموعه مقالات دومین همایش ملی تکنولوژی‌های نوین در شیمی پتروشیمی، مرکز پژوهش‌های صنعتی و معدنی هم‌اندیشان چرخه علم و صنعت، تهران، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۵.

[12] Kavaklioglu, K., Koseoglu, M. F., Caliskan, O., Experimental investigation and radial basis function network modeling of direct evaporative cooling systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 139-150, (2018).

[13] Porumb, B., Ungureşan, P., Tutunaru, L. F., Serban, A., Balan, M., A review of indirect evaporative cooling technology, *Energy Procedia*, Vol. 85, pp. 461-471, (2016).

[14] Kumar, M., Sharma. A., Evaporating Cooling System: A Review, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Vol. 6, (2018).

[15] Rogdakis, E. D., Koronaki, I. P., Tertipis, D. N., Experimental and computational evaluation of a Maisotsenko evaporative cooler at Greek climate, *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 497-506, (2014).

[16] Dhamneya, A. K., Rajput, S. P. S., Singh, A., Thermodynamic performance analysis of direct evaporative cooling system for increased heat and mass transfer area, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 2951-2960, (2018).

[17] Mahmood, M. H., Sultan, M., Miyazaki, T., Koyama, S., Maisotsenko, V. S., Overview of the Maisotsenko cycle—A way towards dew point evaporative cooling, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 66, pp. 537-555, (2016).

[۱۸] ذوالفقاری، ح.، تحلیل سیکل میسوتسنکو و امکان‌سنجی آن برای اقلیم ایران، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۲.

[19] Maisotsenko, V., Gillan, L., The Maisotsenko cycle for air desiccant cooling & The 4th international Symposium on HVAC, Beijing, China, Vol. 9, No. 11, (2003).

V میزان تیخیر آب (Lit/h)

$\dot{W}$ توان دمنده (kW)

علائم یونانی

η بازده

ω میزان رطوبت

زیر نویس‌ها

amb محیط

da هوای خشک

dc کانال خشک

$dest$ نابودی

dp نقطه‌ی شبنم

ds حالت مرده

ex آگزرژی

in ورودی

$loss$ تلفات

out خروجی

s محسوس

$Water$ آب

WC کانال خیس (تر)

مراجع

[1] Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., A review on buildings energy consumption information, *Energy and buildings*, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398, (2008).

[۲] قربانی، م.، اهمیت و کاربردهای آب خاکستری در مدیریت مصرف آب، مجموعه مقالات اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدر رفت آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، آذر ماه ۱۳۹۶.

[3] Petroleum, B., BP statistical review of world energy, June, London, UK, (2009).

[4] Yi, J., Chinese building energy consumption situation and energy efficiency strategy, *New architecture*, (2008).

[5] Pandelidis, D., Anisimov, S., Worek, W. M., Performance study of the Maisotsenko Cycle heat exchangers in different air-conditioning applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 81, pp. 207-221, (2015).

[6] Zhan, C., Zhao, X., Smith, S., Riffat, S. S. B., Numerical study of a M-cycle cross-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 3, pp. 657-668, (2011).

[7] Duan, Z., Investigation of a novel dew point indirect evaporative air conditioning system for buildings (Doctoral dissertation, University of Nottingham), (2011).

[8] Chen, Q., Yang, K., Wang, M., Pan, N., Guo, Z. Y.,

- [28] Zhao, X., Li, J. M., Riffat, S. B., Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 14-15, pp. 1942-1951, (2008).
- [29] C. Zhan, X. Zhao, S. Smith, S. B. Riffat, Numerical study of a M-cycle cross-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 3, pp. 657-668, (2011).
- [۳۰] فراستی، ی.، سوهانی، ع.، و صیادی، ح.، استفاده از مبدل های نقطه شبنم مایسوتسنکو در راستای خنک سازی هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین علوم و تکنولوژی، مرکز مطالعات و تحقیقات اسلامی سروش حکمت مرتضوی، قم، ایران، دی ماه ۱۳۹۵.
- [31] Pandelidis, D., Pacak, A., Anisimov, S., Energy Saving Potential by Using Maisotsenko-Cycle in Different Applications, *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, (2018).
- [۳۲] م. ابراهیمی، م. بشیرنژاد ک.، و ابراهیمی، ا.، بررسی انواع سیستم های سرمایش تبخیری مستقیم و غیرمستقیم، مجموعه مقالات دومین کنفرانس سراسری دانش و فناوری مهندسی مکانیک و برق ایران، موسسه برگزار کننده همایش های توسعه محور دانش و فناوری سام ایرانیان، تهران، ایران، شهریور ماه ۱۳۹۵.
- [33] Caliskan, H., Hepbasli, A., Dincer, I., Maisotsenko, V., Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle, *international journal of refrigeration*, Vol. 34, No. 4, pp. 980-990, (2011).
- [34] Hosoz, M., Ertunc, H. M., Ozguc, A. F., Modelling of a direct evaporative air cooler using artificial neural network, *International Journal of Energy Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 83-89, (2008).
- [35] Qiu, G. Q., Riffat, S. B., Novel design and modelling of an evaporative cooling system for buildings, *International Journal of Energy Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 985-999, (2006).
- [36] Rezaee, V., Houshmand, A., Feasibility study of Maisotsenko indirect evaporative air cooling cycle in Iran, *GeoScience Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 23-36, (2015).
- [20] Zhan, C., Duan, Z., Zhao, X., Smith, S., Jin, H., Riffat, S., 2011. Comparative study of the performance of the M-cycle counter-flow and cross-flow heat exchangers for indirect evaporative cooling—paving the path toward sustainable cooling of buildings, *Energy*, Vol. 36, No. 12, pp. 6790-6805, (2011).
- [21] Cui, X., Chua, K. J., Yang, W. M., 2014. Numerical simulation of a novel energy-efficient dew-point evaporative air cooler, *Applied energy*, Vol. 136, pp. 979-988, (2014).
- [۲۲] قربانی فعال، ص.، یاری، م.، و افتخاری یزدی، م.، بررسی امکان استفاده از کولر تبخیری میسوتسنکو در شهرهای مختلف ایران، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی علوم مهندسی، ایده های نو، موسسه آموزش عالی آیندگان تنکابن، مازندران، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳.
- [۲۳] سوهانی، ع.، صیادی، ح.، معرفی سیستم های سرمایش تبخیری نقطه شبنم و کاربردهای آنها، مجموعه مقالات مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دوره ۲۷، شماره ۱- شماره پیاپی ۱۸، صفحه ۳-۶، ایران، فروردین و اردیبهشت ماه ۱۳۹۷.
- [24] Gillan, L., Maisotsenko, V., Maisotsenko open cycle used for gas turbine power generation. In ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference, pp. 75-84, (2003).
- [25] Maisotsenko, V., Reyzin, I., The Maisotsenko cycle for electronics cooling, In ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems collocated with the ASME 2005 Heat Transfer Summer Conference, pp. 415-424, (2005).
- [26] Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A., A comparative study on energetic, exergetic and environmental performance assessments of novel M-Cycle based air coolers for buildings, *Energy Conversion and Management*, Vol. 56, pp. 69-79, (2012).
- [27] Saghaififar, M., Gadalla, M., Analysis of Maisotsenko open gas turbine bottoming cycle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 82, pp. 351-359, (2015).



آشنایی، کاربرد و خواص مواد حافظه دار مغناطیسی

امین اسکندرزاده ثابت

دانشجوی دکتری

امیر نجیبی*

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه
سمنان، سمنان

مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

چکیده: آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی زیر مجموعه ای از مواد محرک می باشند که شکل ماده و سایر ویژگی های مکانیکی آن در پاسخ به میدان های مغناطیسی و مکانیکی تغییر می کند. آلیاژهای حافظه دار در سال های اخیر به دلیل ویژگی های منحصر به فردشان از جمله مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً بالا، خواص مکانیکی نسبتاً خوب، خستگی طولانی، شکل پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن در طیف گسترده ای از صنایع مورد توجه قرار گرفته اند. این آلیاژها مواد هوشمندی هستند که پس از تغییر شکل می توانند شکل اولیه خود را به یاد آورند. هدف از ارائه این مقاله آشنایی، کاربرد و بررسی خواص مواد حافظه دار مغناطیسی می باشد. در واقع با ارائه چند مدل مطالعه شده، معادلات ساختاری، خواص، کاربرد آن ها در حوزه های مختلف و نمودارها سعی در بررسی این مواد داشته ایم و به چالش های موجود از جمله وجود هیستریزیس وابسته به نرخ نامتقارن همراه با اشباع های بزرگ و ارائه راهکار آن پرداخته ایم.

واژه های راهنما: مواد حافظه دار مغناطیسی، آلیاژ، کاربرد، خواص.

A review of Introduction, application and properties of magnetic shape memory materials

Amin
Eskandarzadeh
Sabet
PhD student

Amir Najibi*
Assistant Professor,
Faculty of
Mechanical Engineering,
Semnan University,
Semnan

Abstract: Magnetic shape memory alloys are a subset of excitatory materials whose material shape and other mechanical properties change in response to magnetic and mechanical fields. Memorable alloys in recent years due to their unique properties such as high corrosion resistance, relatively high electrical resistivity, relatively good mechanical properties, long fatigue, high ductility and adaptability to the body in a wide range of Industries have been considered. These alloys are smart materials that can recall their original shape after deformation. The purpose of this paper is to introduce, apply and study the properties of magnetic memory materials. In fact, by presenting several studied models, structural equations, properties, their application in different fields and diagrams, we have tried to study these materials and we have discussed the existing challenges, such as the existence of asymmetric rate-dependent hysteresis with large saturations and its solution.

Keywords: Magnetic shape memory materials, alloy, application, properties.

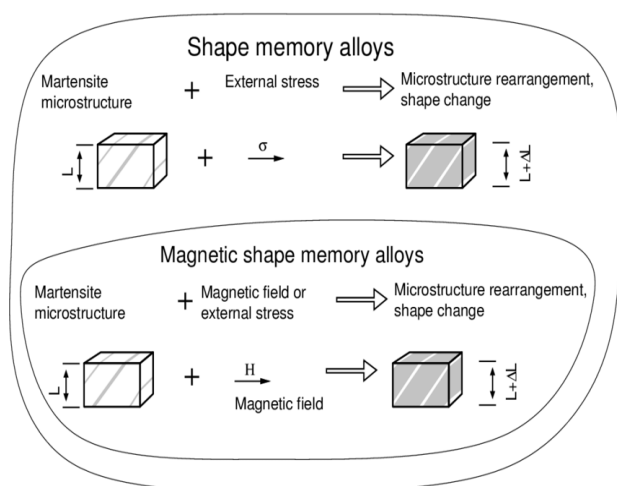
۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی دسته جدیدی از مواد هوشمند به شمار می‌آیند که خواصی همچون کرنش‌های برگشت پذیر بزرگ و فرکانس عملکرد بالا از خود نشان می‌دهند. مشابه با آلیاژهای حافظه‌دار پاسخگو به حرارت، به آلیاژهای حافظه‌دار که در پاسخ به میدان مغناطیسی اعمالی خارجی، دچار تغییر شکل و ایجاد تنش می‌شوند، آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی می‌گویند.

این مواد، همانند مواد مغناطوکشسان (magnetostrictive) بوده و عموماً آلیاژی از نیکل، منگنز و گالیوم می‌باشند. در مواد فرو مغناطیس، بازآرایی مجدد مغناطیسی در نتیجه هم‌راستا شدن ممان‌های مغناطیسی میکروسکوپی، در جهت میدان اعمالی می‌باشد. آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، هنگامی که حرکات دقیق و سریع نیاز باشد، مانند ربات‌ها، ابزارهای بیومدیکال، سوپاپ‌های حساس، دمپ کننده‌ها و ... کاربرد دارند. امروزه انواع زیادی از آلیاژهای حافظه‌دار کشف شده و توسعه پیدا کرده‌اند، بدون شک آلیاژهای حافظه‌دار جلوه‌ای از پیشرفت علم مواد همگام با صنعت و نیازهای روز جامعه است، به طوری که هم‌اکنون آلیاژهای حافظه‌دار در بسیاری از زمینه‌ها، از کاربردهای زیست پزشکی تا کاربردهای فضایی، استفاده‌های فراوانی پیدا کرده‌اند.

مواد حافظه‌دار مغناطیسی برای اولین بار در سال ۱۹۹۶، هنگامی که اوکالا و همکاران [۱] توانستند کرنش‌هایی تا میزان ۰/۲٪ را تحت میدان مغناطیسی متوسط و در غیاب تنش مکانیکی در تک کریستال Ni_2MnGa مشاهده کنند، به عنوان نوع جدیدی از مواد هوشمند شناخته شدند. تا به امروز، بیشترین کرنش برگشت پذیر مشاهده شده در این آلیاژها، تا میزان ۱۲٪ توسط سوزینوف و همکاران [۲] گزارش شده است، که این میزان کرنش یک یا حتی دو مرتبه بزرگتر از کرنشی است که در اثر میدان مغناطیسی در مواد مغناطوکشسان معمولی ایجاد می‌شود. این میزان کرنش حتی خیلی بزرگتر از کرنش ناشی از میدان الکتریکی در پیزوالکتریک‌ها می‌باشد. در آلیاژهای حافظه‌دار معمولی، سرعت فرآیند استحاله مارتنزیتی به واسطه مدت زمان نسبتاً زیاد لازم برای انتقال حرارت محدود شده است اما از آنجاکه عملگری در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی بر اثر بازچینی واریانت‌های مارتنزیتی انجام می‌گیرد. فرکانس عملکرد این آلیاژها بسیار بالاتر از فرکانس عملکرد آلیاژهای حافظه‌دار معمولی و در حدود چند کیلوهرتز می‌باشد. کرنش‌های برگشت پذیر بزرگ به همراه فرکانس عملکرد بالا، این آلیاژها را به عنوان گزینه‌ای مناسب در طراحی عملگرها، حسگرها و برداشت کننده‌های انرژی مطرح کرده است. کرنش ناشی از میدان مغناطیسی در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، غیر خطی، وابسته به میزان تنش اعمالی، همراه با هیستریزیس و در نتیجه وابسته به تاریخچه بارگذاری است، پدیده غیرخطی هیستریزیس در این آلیاژها یک چالش اساسی در استفاده از آنها می‌باشد [۳]. در کنار کرنش غیرخطی و تکرارپذیر ناشی از اعمال بارگذاری مکانیکی و میدان مغناطیسی به طور همزمان، در خواص مغناطیس شوندگی ماده

تغییرات غیر خطی صورت می‌گیرد. به طور کلی آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ممکن است بر اثر اعمال میدان مغناطیسی، تنش یا تغییرات دمایی دچار تغییر شکل شوند [۳]. در حالتی که تغییرات دمایی مورد نظر نباشند، در دماهای پایین و نزدیک دمای اتاق، ساختار این آلیاژها کریستالی مارتنزیتی است و با اعمال تنش و یا میدان مغناطیسی دچار تغییر شکل می‌شوند [۴]. خواص جالب و منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی از یک طرف و رفتار پیچیده آنها از طرف دیگر نیاز به مدل سازی رفتار این آلیاژها را روشن می‌سازد [۴]. تا کنون مدل‌های متعددی برای مدل‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ارائه شده است. رویکرد به کار گرفته شده در اکثر این مدل‌ها کمینه کردن تابع انرژی آزاد سیستم به منظور یافتن ساختار تعادلی می‌باشد [۵]. مطابق شکل (۱) آنچه آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را از آلیاژهای حافظه‌دار معمولی متمایز می‌کند و آن را در بین هر ماده‌ای کاملاً منحصر به فرد می‌کند این است که می‌توان با قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی، ریز ساختار مارتنزیت را دستکاری کرد، این پدیده می‌تواند منجر به کرنش‌های بزرگ ماکروسکوپی چندین درصد شود که فقط توسط میدان مغناطیسی القا می‌شوند [۶].



شکل ۱ آلیاژهای حافظه‌دار و رابطه آن با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی [۴]

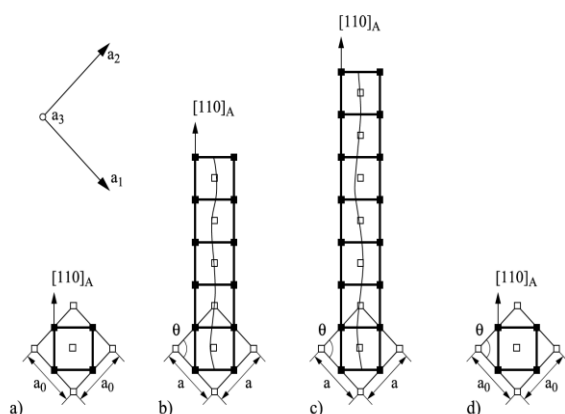
۲- تعدادی مدل ترمومکانیکی مغناطیسی مواد MSMA (حافظه‌دار مغناطیسی)

مدل سازی MSMA در ۲ انجمن مورد بررسی قرار گرفته است. ۱: تیم متخصصان مغناطیس به ویژه مواد مغناطوکشسان. ۲: تیمی متشکل از فیزیکدان‌ها و مهندسين [۷]. جنبه اصلی مطالعه ما در پیوستگی نیروها می‌باشد، در انستیتو FEMTO-ST فرانسه یک تیم از مهندسان مکانیک روی این موضوع کار نمودند. تمایز بین مدل‌های مغناطیسی و مکانیکی را می‌توان در انتخاب نوع مقیاس بررسی کرد [۷]. در مقیاس میکروسکوپی بررسی کریستالوگرافی اطلاعات مکانیکی، چرخشی و مغناطیسی را به همراه دارد [۸]. در مقیاس موزوسکوپی، مرزهای بین فاز و نوع، همراه با مطالعه ریزساختار

۵-۱- انواع فازها

در اینجا نیکل، منگنز- گالیوم با ترکیبی مشابه ترکیب استوکیومتری $\text{Ni}_2 - \text{Mn} - \text{Ga}$ مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴]. در دمای بالا، فاز آستنیت A یک ساختار هسلر $L2_1$ را که مجموعه‌ای از هشت شبکه مکعب می‌باشد را نشان می‌دهد [۱۴]. یک نمایش ساده را در نظر می‌گیریم: یک مکعب با طول ضلع a_0 در پی خنک شدن یا اعمال تنش این ماده می‌تواند به ۳ مرحله اصلی دیگر تبدیل گردد (شکل ۲) [۱۴].

- مارتنزیت درجه ۲، با تعدیل اتمی از یک دوره تناوبی، ۵ لایه اتمی 5M نامیده می‌شود، که به وسیله ۲ پارامتر شبکه a مربوط به ۲ محور طولانی و c مربوط به محور کوتاه مشخص شده است [۱۵].
- مارتنزیت مونوکلینیک مرکزی همراه با یک مدولاسیون اتمی، با تناوبی از ۷ لایه، 7M نامیده می‌شود. که به وسیله ۴ پارامتر a و b مرتبط با ۲ محور طولانی، c مرتبط با محور کوتاه و یک زاویه اعوجاج مشخص شده است [۱۵].
- مارتنزیت درجه دوم غیرمدولاسیون، همچنین به عنوان NMT (برای ساختار چهارضلعی غیرمدولاسیون) شناخته می‌شود، با ۲ پارامتر شبکه‌ای a مربوط به ۲ محور کوتاه و c محور طولانی مشخص می‌گردد [۱۵].



شکل ۲ ساختار کریستالوگرافی (a) NiMnGa آستنیت $L2_1$ (b) مارتنزیت درجه ۲ (5M) (c) مارتنزیت مونوکلینیک مدوله شده (7M) (d) مارتنزیت درجه ۲ غیرمدوله شده (NMT) [۴]

مقادیر پارامترهای شبکه‌ای بسته به ترکیب آلیاژ موردنظر متفاوت است. با این حال، حداکثر مقادیر تغییر شکل با بازآرایی مارتنزیتی به ترتیب ۶٪، ۵٪، ۱۱٪، ۱۰٪ و ۱۹٪-۱۵٪ برای مارتنزیت 5M، 7M و NMT می‌باشد [۱۶]. فعال سازی میدان مغناطیسی اکنون در دو مورد اول امکانپذیر است [۱۶]. با این حال در مورد مارتنزیت NMT فقط بازآرایی توسط تنش مکانیکی در آزمایشات مشاهده شده است [۱۶]. جزئیات بیشتری در خصوص مارتنزیت 7M و NMT توسط سوزینو و همکاران بررسی گردیده است [۱۶]. از این پس ما بر روی مارتنزیت 5M تمرکز بیشتری خواهیم نمود زیرا در حال حاضر این ساختار پرکاربردترین ماده

انواع جفت و حوزه‌های Weiss مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا مروری بر تعدادی مدل ارائه می‌نماییم. مدل‌هایی که در این قسمت ارائه شده در واقع شامل بازآرایی مارتنزیت بشقابی می‌باشد [۹]. چرنکو و همکاران، پونز و همکاران و هیرسینگر و همکاران به تحول فاز شبه الاستیک پرداخته‌اند. از آنجاکه جهت گیری مجدد مارتنزیت بشقابی توسط یک میدان مغناطیسی نیروی اصلی تحریک می‌باشد بر روی این اثر تمرکز شده است [۱۰].

۳- مدل هندلی، موری و همکاران

در مدل تک بعدی آنها، نویسندگان ۲ شکل از انرژی را در نظر گرفتند. منشاء یکی مکانیکی با یک عملکرد ترکیبی از تنش اعمال شده و دیگری با منشاء مغناطیسی $M_s H$ متناسب با H . پارامترهای M_s و ϵ_0 و σ_0 ثابت می‌باشند. به علاوه فرض می‌شود کرنش دارای ۲ مقدار ϵ_0 و ۰ میباشد، مرز بین این ۲ مقدار از رابطه تعادل انرژی $M_s H = (\sigma + \sigma_0) \epsilon_0$ به دست می‌آید [۱۰]. همان نویسندگان رویکرد دومی را بر اساس ترمودینامیک با بیان انرژی آزاد با در نظر گرفتن انرژی Zeeman، انرژی ناشی از ناهمسانگرد مغناطیسی، انرژی الاستیک و یک انرژی ناشی از تنش خارجی ارائه نمودند [۱۱]. با به حداقل رساندن انرژی آنها کسر حجمی از مارتنزیت را به عنوان تابع میدان مغناطیسی و تنش به دست آوردند [۱۱]. آنها یک میدان اجباری مغناطیسی (منفی یا مثبت بستگی به جهت تغییرات میدان دارد) که بستگی به تنش داشته را به جهت محاسبه هیستریزس مکانیکی ایجاد شده اضافه نمودند [۱۲].

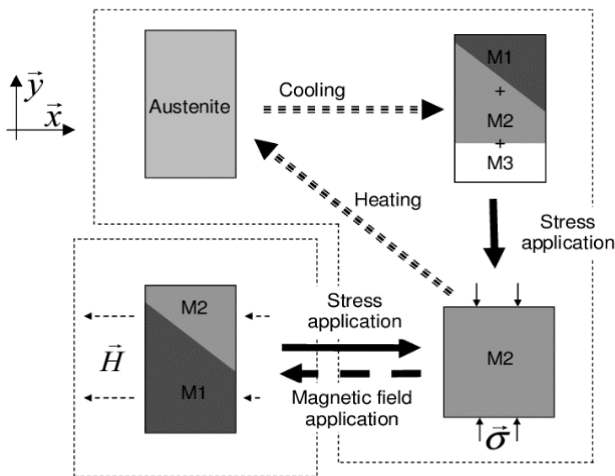
۴- ریز مغناطیسی

تیکل و جیمز یک مدل ۳ بعدی که در آن ۳ گونه مارتنزیتی برای تبدیل مکعب به درجه دوم می‌باشد را در نظر گرفتند [۱۳]. با اضافه نمودن اثر میدان مغناطیسی زدایی، مقدار تغییرات با حداقل نمودن انرژی به دست می‌آید. دسیمور و جیمز تئوری ریز مغناطیسی که برای مواد مغناطوکشسان و مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گرفت را به MSMA بسط دادند [۱۳]. هدف از چنین مدلی توصیف تغییرات ریز ساختار مغناطیسی به عنوان تابع میدان مغناطیسی اعمال شده و استنباط روابط ماکروسکوپی بین تغییر شکل و میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۳].

۵- کریستالوگرافی Ni_2MnGa

در روش مورد بررسی توسط مولنر و همکاران خصوصیات مکانیکی به ریزساختارهای ماده وابسته می‌باشد [۱۳]. با استفاده از اندازه گیری پراش اشعه X همراه با میکروسکوپ الکترونی عبوری، میتوان شبکه‌های آستنیتی و مارتنزیتی را شناسایی نمود و بررسی کرد که چه تحول کریستالوگرافی در حال انجام می‌باشد، همچنین پارامترهای شبکه اندازه گیری می‌گردد. این کار روی یک نمونه NiMnGa توسط Ga و همکاران انجام گرفت [۱۴].

تغییر می‌دهد. استفاده از میدان مغناطیسی گزینه‌ایست که محور مغناطیسی ساده (یکسان با محور کوتاه) در امتداد جهت میدان می‌باشد (M_1 در شکل ۵) و سبب تغییر شکل می‌گردد. از تعادل بین این ۲ اثر می‌توان برای ایجاد محرک استفاده کرد [۱۷].



شکل ۵ تبدیل و بازآرایی مارتنزیتی [۱۷]

۵-۳- محاسبه میکروساختارها

در اینجا به طور خلاصه تعدادی المان را بررسی می‌کنیم. F_k تانسور گرادیان تبدیل آستنیت A به نوع مارتنزیت M به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷].

$$dx(M) = F_k \cdot dX(A)$$

(۱) تانسور کرنش لاگرانژ گرین به صورت رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$E_k^{tr} = \frac{1}{2} (F_k^T F_k - 1) = \frac{1}{2} (u_k^2 - 1) \quad (2)$$

با تنوع سه گانه برای مکعب (تبدیل درجه ۲) [۱۷]

$$U_1 = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

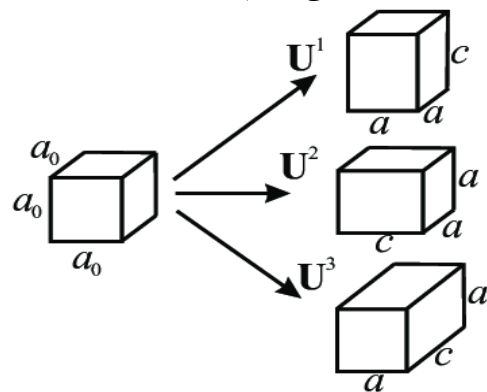
$$U_3 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}$$

$$\text{و } \beta = \frac{c}{a_0}, \alpha = \frac{a}{a_0} \text{ (مطابق شکل ۳)}$$

برای تغییر جهت مجدد M_k به M_L تانسور کرنش به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$E_{kl}^{re} = \frac{1}{2} (U_1^2 - U_2^2) \quad (4)$$

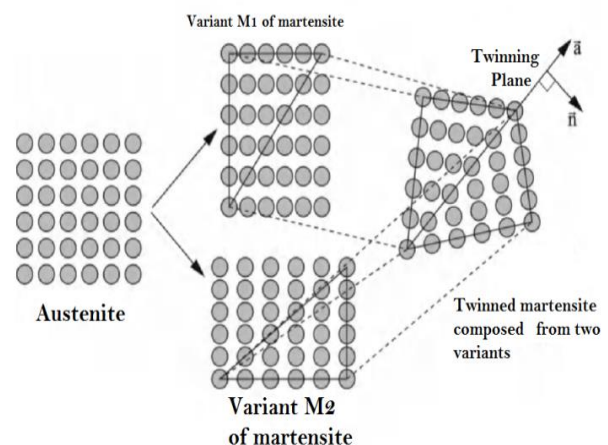
مارتنزیتی می‌باشد، در نتیجه آزمایشات بیشتری در این خصوص وجود دارد و مواد به راحتی در دسترس هستند [۱۶]. با این وجود ابزارهای مورد استفاده به اندازه کافی عمومی بوده که در انواع مختلف MSMA قابل استفاده هستند [۱۶]. یک مارتنزیت 5M ممکن است در ۳ فرم وجود داشته باشد. این بدلیل ساختار درجه دوم آن می‌باشد. این اقسام در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. از علامت‌های M_1 ، M_2 و M_3 برای نشان دادن انواع مختلفی از مارتنزیت که به ترتیب محور کوتاه خود را در امتداد محورهای x ، y و z دارند استفاده می‌نماییم [۱۷].



Austenite

Martensite

شکل ۳ ۳ نوع مارتنزیت با تغییر شکل از شبکه مکعبی به شبکه درجه ۲ [۲۶]



شکل ۴ موقعیت دو بعدی: یک مکعب (چپ) و دو نوع مارتنزیت M_2 و M_1 کنار هم [۱۷]

۵-۲- تبدیل و بازچینی

شکل ۵ رفتار کلی یک MSMA را نشان می‌دهد. در دمای بالا، آلیاژ در حالت آستنیتی قرار دارد. پس از خنک شدن، نمونه شامل ۳ نوع مارتنزیت با نسبت مساوی است. در نتیجه هیچ تغییر شکل ماکروسکوپی رخ نمی‌دهد. استفاده از تنش فشاری باعث ایجاد آن می‌شود که محور کوتاه آن در جهت آن تنش قرار داشته باشد (M_2 در شکل ۵) و در نتیجه شکل هندسی نمونه را

(۲) برای پیدا کردن راه حل، محاسبه می نماییم:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2}{\delta}} \right) \quad (۱۳)$$

$$\beta = \frac{c}{a_0} = \alpha = \frac{a}{a_0} = 1.0188 \text{ Ni}_2 - \text{Mn} - \text{Ga} \text{ برای}$$

$$\lambda = 0/3083, 0/9589$$

- برای M_1 به M_2 :

$$E_{12}^{re} = \frac{1}{2} (U_2^2 - U_1^2) = \text{diag}(0/0593, -0/593, 0) \quad (۱۴)$$

- برای A به (M_2, M_1) :

$$E^{tr} = \frac{1}{2} (U_{tw}^2 - 1) \quad (۱۵)$$

برای $U_{tw} = \lambda U_2 + (1 - \lambda) U_1$ و نهایتاً

$$E^{tr} = \text{diag}(-0/0224, 0/0004, 0/0190)$$

۶- خصوصیات و کاربردها

در اینجا به بررسی خصوصیات آلیاژ حافظه دار مغناطیسی تولیدی شرکت GoodFellow می پردازیم:

۱-۶- خواص

- اثر حافظه دار بودن مغناطیسی تا ۶٪ ازدیاد طول در یک میدان مغناطیسی [۱۹].
- این مواد اثر معکوس مغناطوکشسان یا ویلاری را به نمایش می گذارند [۱۹].
- اثر آلیاژ حافظه دار با تغییر شکل ناشی از اعمال میدان مغناطیسی همانند تغییر شکل ناشی از دما می باشد [۱۹].
- اگر ماده کاملاً کشیده یا فشرده شود تغییری در مقاومت ایجاد می شود [۲۰].
- خواص فنر کنترل شده را به نمایش می گذارد [۲۰].

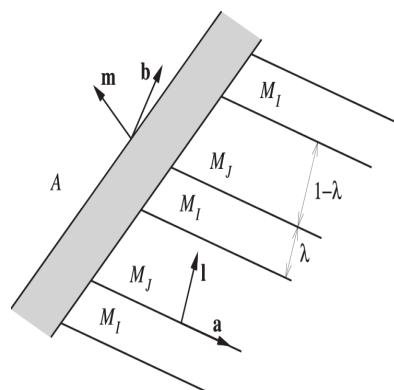
خصوصیات ماده در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خصوصیات ماده حافظه پذیر مغناطیسی

ماده	NiMnGa تک کریستال
افزایش طول در میدان مغناطیسی	تا ۶٪ - غالباً ۵٪ - ۳٪
پاسخ	۱-۲ KHZ
چگالی نیرو	حدود ۲ Mpa
میدان مغناطیسی	< ۰.۸ T
دمای کوری	۹۵ - ۱۰۵ C
حد دمای بالا	تبدیل مارتنزیت به آستنیت در ۷۰ C

توجه داشته باشید که رابطه بین آستنیت و مارتنزیت فقط در قالب دو قلو در مقابل آستنیت می تواند وجود داشته باشد (شکل ۶). در واقع، CTM (تئوری کریستالوگرافی مارتنزیت) راه حل معادله دوقلوسازی را ارائه می دهد [۱۷]:

$$QU_i - U_j = a \otimes \hat{n} \quad (۵)$$



شکل ۶ مارتنزیت دوقلو و تشکیل یک رابط با آستنیت [۲۵]

اجازه دهید این را برای مکعب به کار ببریم، ما باید اقسام ۱ و ۲ را مشابه محاسبات زیر به دست آوریم. در اینجا R چرخش ۱۸۰ درجه ماتریس حول محور $\hat{e}$ بوده که به صورت زیر به دست می آید [۱۷]:

$$\hat{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۶)$$

به راحتی $R^T U_1 R = U_2$ و به دست می آوریم [۱۷]:

$$a = \frac{\sqrt{2}(\beta^2 - \alpha^2)}{\beta^2 + \alpha^2} \begin{pmatrix} -\beta \\ \alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۷)$$

$$a = \frac{\sqrt{2}(\beta^2 - \alpha^2)}{\beta^2 + \alpha^2} \begin{pmatrix} -\beta \\ -\alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۸)$$

توجه شود که تمام این محاسبات در شکل ۴ نشان داده شده است. در صورت لزوم Q از معادله ۵ به دست می آید. معادله سازگاری بین آستنیت و چند نوع مارتنزیت M_i/M_j به ترتیب $1 - \lambda$ و λ به صورت زیر است [۱۷]:

$$Q'(\lambda QU_j - (1 - \lambda) U_i) = 1 + b \otimes m \quad (۹)$$

ما فرض خواهیم کرد که معادله دوقلو برای انواع i و j یک راه حل دارد. بال و جیمز روشی را برای دستیابی به راه حل معادله رابط آستنیت / مارتنزیت ارائه داده اند [۱۸].

(۱) محاسبه

$$\delta = a \cdot U_i (U_i^2 - 1)^{-1} \hat{n} \quad (۱۰)$$

$$\eta = \text{tr}(U_i^2) - \det(U_i^2) - 2 + \frac{\|a\|^2}{2\delta} \quad (۱۱)$$

معادله برای رابط آستنیت / مارتنزیت راه حلی دارد اگر و تنها

اگر:

$$\delta \leq -2 \quad \text{و} \quad \eta \geq 0 \quad (۱۲)$$

۶-۲- کاربرد ها

مغناطیسی متغیر تحت تنش متفاوت می باشد، که می تواند برای برداشت کننده های انرژی ارتعاشی استفاده شود [۲۶].

۶-۲-۱- عملگر ها

۶-۲-۴- دمپر های ارتعاشی

از همان خصوصیتی که برای ایجاد برداشت کننده های انرژی استفاده شده است می توان برای کاهش ارتعاشات مکانیکی استفاده نمود [۲۶].

۶-۲-۵- سنسورها

سنسور (sensor) یا حس کننده می تواند کمیت هایی مانند سرعت، میدان مغناطیسی، کرنش، فاصله، فشار، حرارت، رطوبت، دما، و ... را به کمیت های الکتریکی پیوسته (آنالوگ) یا غیر پیوسته (دیجیتال) تبدیل کند و آن ها را محاسبه کند بنابراین می توان با استفاده از خصوصیات مواد آن ها را ساخت [۲۶].

۷- دسترسی پذیری

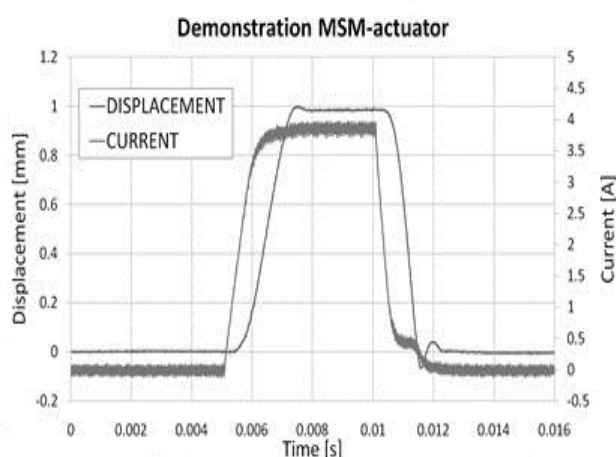
به جهت به حداقل رساندن انرژی مغناطیسی مورد نیاز برای کشیدن مواد، یک مقطع عرضی نازک و گسترده ترجیح داده می شود و از آنجا که کشش یک مضر بی از طول می باشد یک نوار نسبتاً طولانی ترجیح داده می شود. به عنوان مثال شرکت GoodFellow موادی با ابعاد زیر پیشنهاد می دهد:

- $1T \times 2/5W \times 20L$ in mm
- $1T \times 5W \times 20L$ in mm
- $2T \times 5W \times 20L$ in mm

این ابعاد استاندارد شرکت های تولیدی می باشد [۱۹]. در جدول ۲ به مقایسه کرنش، فرکانس و چگالی انرژی مواد هوشمند پرداخته شده است.

۸- نمودار

در زیر اشکال ۷-۹ بررسی عملکرد مواد حافظه دار مغناطیسی را نشان می دهند [۱۹]:



شکل ۷ پاسخ آلیاژ حافظه دار مغناطیسی به سیگنال کنترلی [۱۹]

وظیفه عملگر، یا Actuator که نوعی موتور است در شیرهای کنترل، تأمین نیروی لازم جهت باز و بسته کردن شیر و قراردادن آن در موقعیت مطلوب و متناسب با سیگنال ارسالی از طرف کنترلر ... است [۲۰]. عملگر ها در انواع مختلف پنوماتیکی، الکتریکی یا خود عملگر (Self Acting) موجود بوده و با توجه به وضعیت سیستم انتخاب و استفاده می گردند [۲۰]. در واقع از اثر مواد حافظه پذیر مغناطیسی برای طراحی عملگر هایی استفاده می گردد که آن عنصر بر اساس یک میدان مغناطیسی کشیده می شود [۲۱]. کشیدگی می تواند با استفاده از میدان مغناطیسی در زاویه ۹۰ درجه نسبت به میدان اصلی، یا به طور موثر با استفاده از فنر معکوس گردد [۲۱]. تغییر شکل بسیار سریع بوده و سیکل آن ۱ تا 3 KHZ می باشد [۲۲]. در طول آزمایش عمر خستگی چندین میلیون چرخه بوده است [۲۲]. این مواد دارای خروجی کرنش بیشتری نسبت به مواد دیگر می باشند (۱۰ تا ۱۰۰ برابر) [۲۲]. آن ها همچنین تراکم انرژی بالاتری را به طور معمول تا $100 \frac{KJ}{m^3}$ در مقایسه با $14-30 \frac{KJ}{m^3}$ مواد مغناطو کشسان و $2-8 \frac{KJ}{m^3}$ مواد پیزو دارا می باشند [۲۳].

۶-۲-۲- سوئیچ های مدار شکن / فیوز ها

این قطعه که به آن مدار شکن یا قطع کننده مدار گفته می شود، یک کلید قطع و وصل (سوئیچ) اتوماتیک است که از مدار الکتریکی در برابر آسیب های ناشی از اضافه جریان که معمولاً به خاطر اضافه بار یا اتصال کوتاه ایجاد می شود، محافظت می کند [۲۴].

۶-۲-۳- برداشت کننده های انرژی

برداشت انرژی یا جمع آوری انرژی به معنای جمع آوری انرژی های کوچکی است که ممکن است به هر شکلی هدر رود. می تواند به صورت نور، صدا، گرما، لرزش و یا حرکت باشد [۲۵]. از این انرژی جمع آوری شده در موارد زیر استفاده می شود [۲۵]:

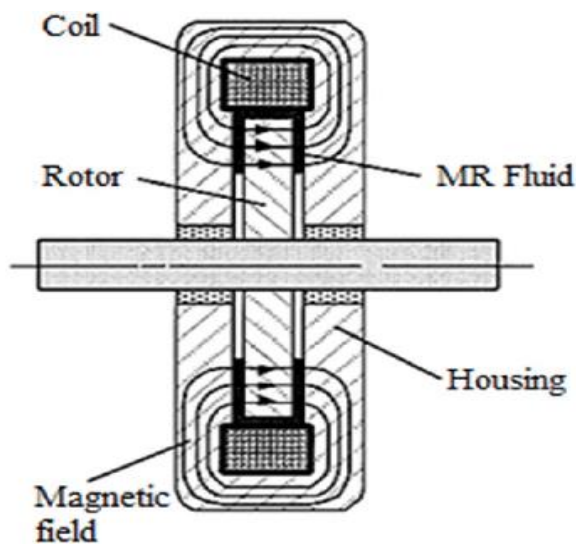
- افزایش کارایی یا راندمان مانند استفاده از گرمای کامپیوتر برای تأمین بخشی از انرژی خود کامپیوتر
- به وجود آمدن تکنولوژی های جدید مانند شبکه سنسور های بی سیم

همچنین در این روش می توان برای وسایل الکترونیکی از باتری های بسیار کوچک تری استفاده کرد. که این امر خود مزایای بسیاری دارد، از قبیل:

- عدم نیاز به نگهداری و تعمیر باتری
- مناسب با محیط زیست
- استفاده در تجهیزات جدید مانند استفاده از سنسور های زیر آب
- کشش یا فشردن سازی مواد موجب تغییر هر میدان مغناطیسی که در آن قرار گرفته است می گردد، که معروف به نفوذ پذیری

این آلیاژها موارد استفاده وسیعی در صنعت، هنر، پزشکی، مهندسی و ... دارند که در زیر به کاربرد آنها اشاره گردیده است: اتصال لوله، فعال کننده نیرو در مدارهای الکتریکی، شیر اطمینان، شیر کنترل سیال، قاب عینک، شیشه‌های فوتوکرومیک، دندانپزشکی، ایمپلنتهای پزشکی، فیلتر خونی از جنس سیمهای NiTi، ظروف ترموستاتیک قهوه، stent های جراحی، نگهدارنده‌ها (clamps)، مجسمه‌ها، اجزای دمپرها سازها برای جلوگیری از خسارات ناشی از زلزله، اتصال تاندون به استخوان در پزشکی، پینها و سیمهای راهنما در پزشکی، ابزارهای جراحی خمشو، آنتن ماهواره، کنترل تعادل تیغه‌های روتور هلی کوپترها، کاهنده صدای موتور هواپیما، رباتیک، کلاچ و ترمز خودرو، سیستم تعلیق و

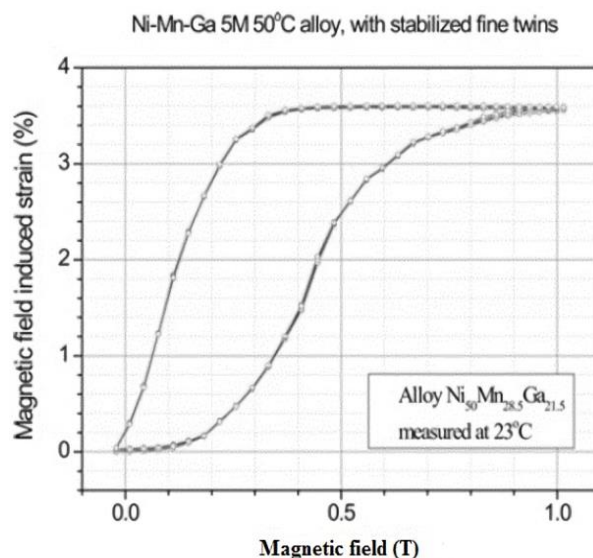
به عنوان مثال یک روش نوین در سیستم ترمز خودرو استفاده از سیال مغناطیسی می‌باشد در واقع وظیفه اصلی سیستم ترمز کاهش سرعت یا توقف کامل مکانیزم در حال حرکت یا خودرو است. از ترمز برای تنظیم یا محدود کردن سرعت خودرو استفاده می‌شود. از فواید ترمزهای سیال مغناطیسی میتوان به کنترل گشتاور ترمزی مورد نیاز به کمک تنظیم قدرت میدان مغناطیسی، کاهش ارتعاش و نویز، پاسخ سریع، کاهش سایش و انرژی مصرفی پایین و ساختار ساده اشاره کرد. در شکل ۱۰ ساختار متداول این ترمزها را می توان مشاهده کرد. همان طور که مشخص است، در این کاربرد از مود برشی سیال مغناطیسی استفاده شده است. برای استفاده گسترده سیال مغناطیسی در کاربردهای متنوع مهندسی باید ثبات و پایداری این مواد بررسی شود.



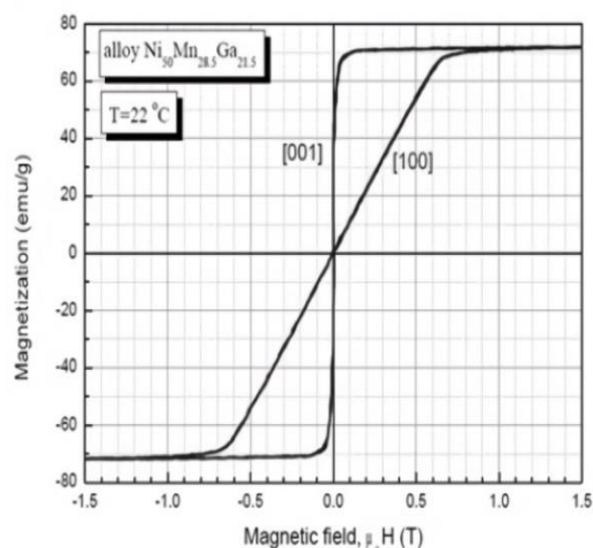
شکل ۱۰ شماتیک ترمز سیال مغناطیسی [۲۴]

۱۰- نتیجه گیری

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی Ni-Mn-Ga موادی با کاربرد در حوزه‌های سنسور، محرک و ... با چشم انداز بسیار خوبی می‌باشند. هدف از ارائه این مقاله آشنایی، کاربرد و خواص مواد حافظه‌دار مغناطیسی می‌باشد. در واقع با ارائه چند مدل مطالعه شده، معادلات ساختاری، خواص، کاربرد و نمودارها سعی در



شکل ۸ وابستگی کرنش به رفتار سطح [۱۹]



شکل ۹ میدان مغناطیسی در حالت‌های فشاری و کششی [۱۹]

جدول ۲ مقایسه مواد

نوع ماده	کرنش	فرکانس	چگالی انرژی
حافظه‌دار مغناطیسی	<۶٪	<۲ KHZ	<۱۰۰ $\frac{KJ}{m^3}$
ماده حافظه‌دار حرارتی	<۸٪	<۳ HZ	۱۰۰۰۰ $\frac{KJ}{m^3}$
ماده پیزوالکتریک	۰/۰۴ - ۰/۰۷٪	۱۰۰S KHZ	۰/۸ - ۲ $\frac{KJ}{m^3}$
ماده مغناطوکشسان	۰/۱۴ - ۰/۲٪	۱۰۰S KHZ	۱۴ - ۳۰ $\frac{KJ}{m^3}$

۹- نمونه‌های کاربردی

مراجع

- [1] Chen, Xue, and Yongjun, He., Thermo-magneto-mechanical coupling dynamics of magnetic shape memory alloys, *International Journal of Plasticity* 129 (2020): 102686.
- [2] Sozinov, A., Lanska, N., Soroka, A., Zou, W., 12% magnetic fieldinduced strain in Ni-Mn-Ga-based non-modulated martensite, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 2, pp. 021902, (2013).
- [3] Golub, V., et al., "Magnetism of nanotwinned martensite in magnetic shape memory alloys." *Journal of Physics: Condensed Matter* 32.31 (2020): 313001.
- [4] Yan, Hai-Le., et al. "Impact of B alloying on ductility and phase transition in the Ni-Mn-based magnetic shape memory alloys: Insights from first-principles calculation." *Journal of Materials Science & Technology* 74 (2021): 27-34.
- [5] D'Silva, Glen J., Heidi P. Feigenbaum, and Constantin Ciocanel., Visualization of magnetic domains and magnetization vectors in magnetic shape memory alloys under magneto-mechanical loading, *Shape memory and superelasticity* 6.1: 67-88, (2020).
- [6] MOOSAVI, M. R., & Arghavani, J. (2017). A thermodynamically consistent two-dimensional constitutive model for magnetic shape memory alloys.(2017).
- [7] Gauthier, J., Modélisation des alliages à mémoire de forme magnétiques pour la conversion d'énergie et leur commande, PhD thesis, University of Franche Comté, (2007).
- [8] Chernenko, V., L'vov, V., Cesari, E., Rudenko, A., Date, H., Matsumoto, M., Kanomatad, T., Stress-strain behaviour of Ni-Mn-Ga alloys: experiment and modelling, *Mat. Sc and Eng. A*, vol. 378, pp. 349-352, (2004).
- [9] Pons, J., Cernenko, V., Cesari, E., L'vov V., Stress – strain-temperature behavior for martensitic transformation for Ni-Mn-Ga single crystal compressed along $\langle 001 \rangle$ and $\langle 110 \rangle$ axes, *J. de Phys. IV*, vol. 112, pp. 939-942, (2003).
- [10] Hirsinger, L., Creton, N., Lexcellent, C., Stress-induced phase transformations in Ni-Mn-Ga alloys: experiments and modelling, *Mat. Sc and Eng. A*, vol. 378, pp. 365-369, (2004).
- [11] Caputo, Matthew P., et al., 4D printing of net shape parts made from Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys. *Additive Manufacturing* 21, pp. 579-588, (2018).

بررسی این مواد داشته‌ایم. یکی از مهمترین چالش‌ها در استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی وجود هیستریزیس وابسته به نرخ نامتقارن و همراه با اشباع‌های بزرگ می‌باشد. برای رفع این مشکل، رفتار هیستریزیس موجود در این مواد را مدل‌سازی می‌کنند. مدل پرنتل-ایشلینسکی بدلیل سادگی و دارا بودن معکوس تحلیلی، یکی از مدل‌های پرکاربرد در این حوزه می‌باشد. این مدل در دو نوع مستقل از نرخ و وابسته به نرخ ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک، هیستریزیس موجود در رفتار آلیاژهای مغناطیسی افزایش می‌یابد. بنابراین مدل مستقل از نرخ پرنتل-ایشلینسکی نمی‌تواند این تغییرات را در نظر بگیرد. برای حل این مشکل با استفاده از تست تجربی، ولتاژ ورودی در فرکانس‌های تحریک $0.5/0$ تا $0.4/0$ هرتز به عملگر آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی اعمال شده و خروجی موقعیت عملگر نیز بوسیله سنسور القایی اندازه‌گیری می‌شود. مدل‌سازی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی با مدل تعمیم یافته پرنتل-ایشلینسکی وابسته به نرخ ارائه شده و مدل اصلاح شده آن نیز پیشنهاد شده است. برای افزایش توانایی مدل در توصیف رفتار هیستریزیس اشباع و نامتقارن آلیاژهای مغناطیسی مدل اصلاح شده جدیدی با به کار بردن تابع تانژانت هیپربولیک در خروجی مدل ارائه شده است. برای آموزش مدل‌های مذکور دو فرکانس تحریک $0.5/0$ و $0.2/0$ هرتز انتخاب شده و پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با این مجموعه داده بدست آمده است. اعتبارسنجی مدل‌ها نیز در فرکانس $0.1/0$ ، $0.3/0$ و $0.4/0$ هرتز انجام گرفته است. که نتایج نشان می‌دهد مدل اصلاح شده بدلیل استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک بهتر توانسته هیستریزیس‌های نامتقارن و بسیار اشباع شده در رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را توصیف کند.

کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، هنگامی که حرکات دقیق و سریع نیاز باشد، مانند ربات‌ها، ابزارهای بیومدیکال، سوپاپ‌های حساس، دمپ‌کننده‌ها و... دوجندار می‌گردد. حوزه‌های بررسی شده در خصوص این مواد در مراحل ابتدایی بوده و یکی از اولویت‌های اصلی صنایع مختلف به واسطه نرخ کرنش، فرکانس و چگالی انرژی مناسب می‌باشد.

۱۱- علائم و اختصارات

M	فاز مارتنزیت
A	فاز آستنیت
F_k	تانسور گرادیان تبدیل آستنیت A به نوع مارتنزیت M
E_k^{tr}	تانسور کرنش لاگرانژ گرین
dx	المان خط در پیکربندی مرجع
dX	المان خط در پیکربندی جاری
U_k	تغییر مکان ذره
R	تانسور چرخش متعامد
$\otimes$	ضرب کرونگر
diag	ماتریس قطری
tr	جمع عنصرهای قطر اصلی ماتریس
$\hat{n}$	بردار نرمال
a و C	ابعاد در فاز مارتنزیت
a_0	ابعاد در فاز آستنیت
Q	دوران

- [19] <https://www.azom.com/> Magnetic Shape Memory Alloy – Introduction, Properties and Applications, Azo Materials, 2014.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_shape-memory_alloy, (2020).
- [21] Kők, Medika, S., Burcu Durğun, and Ecem Özen., Thermal analysis, crystal structure and magnetic properties of Cr-doped Ni–Mn–Sn high-temperature magnetic shape memory alloys." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 136.3, pp. 1147-1152, (2019).
- [22] Shi, Hu, et al., Design and performance analysis of magnetic shape memory alloy actuator with a compact electromagnetic coil configuration, *IEEE Transactions on Magnetics*, 56.8, pp. 1-13, .(2020).
- [23] Rameš, M., et al., Magnetic properties of Ni-Mn-Ga-Co-Cu tetragonal martensites exhibiting magnetic shape memory effect, *Scripta Materialia*, 142, pp. 61-65, (2018).
- [24] Ahamed, Raju., Md Meftahul Ferdous., and Yancheng Li., Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review, *Korea-Australia Rheology Journal* 28.4, pp. 355-379, (2016).
- [25] Maciejewski, G., Stupkiewicz, S., and Petryk, H., Elastic micro-strain energy at the austenite-twinned martensite interface, *Archives of Mechanics* 57.4, pp. 277-297, (2005).
- [26] Awan, Iqra Zubair., and Abdul Qadeer Khan., Fascinating Shape Memory Alloys, *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 40.1, (2018).
- [12] Benguerine, O., et al. Structural, elastic, electronic, and magnetic properties of Ni₂MnSb, Ni₂MnSn, and Ni₂MnSb_{0.5}Sn_{0.5} magnetic shape memory alloys, *Revista mexicana de física* 66.2, pp. 121-126, (2020).
- [13] Wei, Z. Y., et al., Elastocaloric effect of all-d-metal Heusler NiMnTi (Co) magnetic shape memory alloys by digital image correlation and infrared thermography, *Applied Physics Letters* 114.10 (2019): 101903.
- [14] Richard M., Feuchtwanger J., Schanel, D., Lograsso, T., Allen, S., O'handley, R., Crystal structure and transformation behavior of Ni-Mn-Ga martensites, *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 1797-1801, (2006).
- [15] Sun, X. M., et al., Giant negative thermal expansion in Fe-Mn-Ga magnetic shape memory alloys, *Applied Physics Letters* 113.4 (2018): 041903.
- [16] Haldar, Krishnendu., and Dimitris C. Lagoudas., Dynamic magnetic shape memory alloys responses: Eddy current effect and Joule heating. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 465, 278-289, (2018).
- [17] Lexcellent, Christian., Shape-memory alloys handbook. John Wiley & Sons, (2013).
- [18] Emre, Baris, et al., Martensitic transformation and magnetocaloric properties of NiCoMnSn magnetic shape memory alloys, *Intermetallics* 106, pp. 65-70, (2019).



مدیریت الکترونیک کلاچ راه حلی برای افزایش راحتی در وسیله نقلیه

مجتبی بیگ زاده عباسی*

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان

راضیه بیگ زاده عباسی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی

خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده: سیستم انتقال قدرت وسایل نقلیه به دلیل غیر یکنواختی فرایندهای احتراق به نوسانات پیچشی واداشته می شود که باید آن را کاهش داد و از انتشار آن به تمامی واحدهای خط انتقال قدرت جلوگیری کرد. جعبه دنده های دستی در خودشان سیستم کاهش ارتعاش ندارند، لذا باید منشأ ارتعاش را قبل از ورود به جعبه دنده کاهش داد. خودروسازان تا کنون توانسته اند این غیر یکنواختی ها را به طور نسبی در کلاچ کاهش داده و از انتقال آن به جعبه دنده و دیگر اجزای خط انتقال قدرت جلوگیری کنند. یکی از روش های جدیدی که این عیب را تا حد بسیار زیادی برطرف می کند، مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش محدود است که حاصل تفکر و ارائه طرحی نوین توسط پژوهشگران این مقاله می باشد و می تواند پایه بسیاری از کارهای تحلیلی نیز قرار گیرد. راه حل مطرح شده که اساس آن ایجاد لغزش محدود بر پایه سیستم الکترونیکی کلاچ است، مانع ورود غیر یکنواختی به جعبه دنده و در نتیجه عدم انتقال آن به سازه و بدنه خودرو می گردد که باعث افزایش راحتی و آرامش راننده و سرنشینان می شود. قابل ذکر است که تمامی نتایج درج شده با آزمایشات و تحقیقات انجام گرفته در مرکز تحقیقات و توسعه کارخانه فولکس واگن آلمان غربی توسط نگارنده صحت گذاری شده اند.

واژه های راهنما: موتور احتراق داخلی، مدیریت الکترونیکی کلاچ، لغزش محدود، سکوی آزمایش اونیورسال.

مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

Mojtaba Beigzadeh

Abbassi*

Assistant Professor,

Faculty of Mechanical

Engineering,

Sirjan University of

Technology, Sirjan

Rasieh Beigzadeh

Abbassi

PhD Student, Faculty of

Automotive Engineering,

Iran University of Science

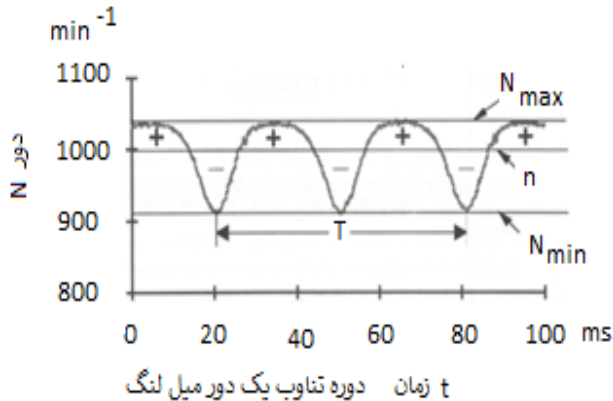
and Technology, Tehran

On the electronic control of a clutch, increasing the comfort of vehicle passengers

Abstract: The power transmission system of vehicles is due to torsional fluctuations due to non-uniformity of combustion processes, which should be reduced and prevented from spreading to all units of the power transmission line. The manual transmissions do not have a vibration reduction system in themselves, so the source of the vibration must be reduced before entering the gearbox. Automakers have so far been able to partially reduce these non-uniformities in the clutch and prevent it from being transmitted to the gearbox and other transmission line components. One of the new methods that eliminates this defect to a great extent is the electronic management of the limited slip clutch, which is the result of thinking and presenting a new design by the researchers of this article, and can be the basis of many analytical works. The proposed solution, which is based on creating a limited slip based on the electronic clutch system, prevents uneven entry into the gearbox and thus does not transfer it to the structure and body of the car, which increases the comfort and relaxation of the driver and passengers. It is noteworthy that all the results recorded by the experiments and research conducted at the Research and Development Center of the Volkswagen plant in West Germany have been validated by the author.

Keywords: Internal Combustion Engine, Electronic Control of Clutch, Two-mass Flywheel, Universal Test Platform.

۱- مقدمه



شکل ۱ غیر یکنواختی دور موتور $N(t)$ برای یک موتور توربو دیزل ۱/۹ لیتری ۴ سیلندر برای به دست آوردن درجه غیر یکنواختی در بار کامل با دنده ۲ و سرعت متوسط موتور $n = 1000$ (دور بر دقیقه)

برای بررسی این موضوع دور متوسط n که از طریق انتگرال گیری از دور لحظه ای $N(t)$ به دست می آید، معرفی می گردد.

$$n = \frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt \quad (1)$$

که در آن T دوره تناوب و حداکثر تغییرات در یک دوره تناوب عبارت زیر است:

$$\Delta N = N_{\max} - N_{\min} \quad (2)$$

به طور متداول مقدار غیر یکنواختی های دورانی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\delta = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{n} \quad (3)$$

تحقیقات نشان داده است که انحراف معیار σ_N مربوط به دور $N(t)$ برای نشان دادن معیار غیر یکنواختی مناسب است. لذا در این کار برای مشخص کردن درجه غیر یکنواختی δ ، شاخص نایکناختی K با استفاده از انحراف معیار تعریف می گردد:

$$K = \frac{\sigma_N}{n} \quad (4)$$

هنگامی که تغییرات متناوب دور حول مقدار متوسط n هماهنگ باشد، می توان برای $N(t)$ نوشت:

$$N(t) = n + \hat{n} \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (5)$$

در چنین حالتی مقدار انحراف معیار با مقدار مؤثر تغییرات هماهنگ برابر است و لذا برای مقدار K می توان نوشت:

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\hat{n}}{n} \quad (6)$$

در رابطه فوق t زمان، f فرکانس، $\hat{n}$ دامنه و n دور متوسط است. با توجه به اینکه در یک تغییرات متناوب هماهنگ تفاضل $N_{\max}$ و $N_{\min}$ دو برابر مقدار دامنه می شود، معادله (۳) به صورت زیر در می آید:

$$\delta = 2 \frac{\hat{n}}{n} \quad (7)$$

موتورهای احتراقی به دلیل فرآیندهای نامتناوب احتراق یا تغییرات موقعیت کار کرد، مثلاً تغییر بار ناگهانی یا تحریکات قوی در سیستم انتقال قدرت، باعث ایجاد غیر یکنواختی های پیچشی در خط انتقال قدرت می شوند. افزایش بازده موتور با احتراقی حادث تر سبب افزایش بیشتر این غیر یکنواختی ها می گردد. این غیر یکنواختی ها در وسیله نقلیه باعث ضربه زدن، ایجاد صدای جغجغه ای و بَم، لرزش بدنه و سرنشینان همچنین واکنش های دیگری می شود. علاوه بر این چون به منظور کاهش مصرف سوخت، موتور باید در دورهای پائین و بار بالا راه اندازی شود، تأثیر غیر یکنواختی های یاد شده به مراتب بیشتر می گردد. مدیریت الکترونیکی کلاچ (Elektronisches Kupplungs Management) که در آن لغزش کلاچ در بازه ای محدود کنترل می شود، راه حلی نوین است. در این روش، مدیریتی نوین در سیستم انتقال قدرت توسعه یافته و به عنوان راه حلی نو مخصوصاً قابل تأمل برای آینده، مدنظر قرار می گیرد [۱-۳]. این روش، روشی مهم در نمایش سیستم های انتقال قدرت نوین به شمار می آید. برای اینکه خواسته های آینده، مثل افزایش راحتی و حذف مواد آلاینده به تحقق بپیوندند، تمایل رو به رشدی برای به کارگیری الکترونیک در وسایل نقلیه وجود دارد. مدیریت الکترونیکی کلاچ از این منظر که کنترل بهینه سیستم انتقال قدرت، نیاز مبرم به تلاشی بسیار گسترده از لحاظ سیستم کنترلی دارد، نیز حائز اهمیت است. در ادامه ابتدا روش هایی که برای کاهش غیر یکنواختی ها تاکنون معمول و مرسوم بوده است، معرفی و معایب آن ها شمرده می شود.

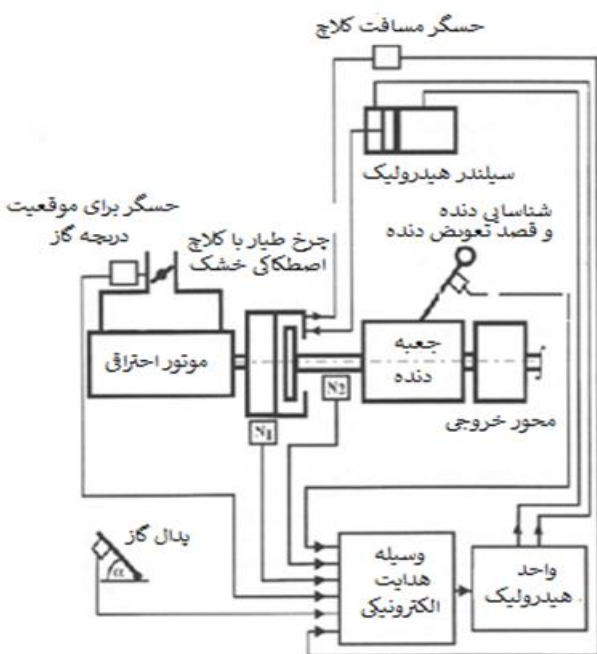
افزایش تعداد سیلندر موتور از چهار به شش سیلندر یا بیشتر، ضمن ثابت ماندن حجم موتور، به مفهوم کارهای کمتر سیلندر و یک فرکانس بالاتر جرقه و در نتیجه کاهش غیر یکنواختی پیچشی است [۴].

کاهش غیر یکنواختی های پیچشی را می توان از طریق افزایش گشتاور لختی جرمی چرخ طیار نیز به دست آورد. این راه حل اگر چه ممکن است، ولی باعث بزرگ شدن چرخ طیار و در نتیجه افزایش حجم، وزن و شتاب موتور و عبور از مرزهای تعریف شده می شود. استفاده از نصب سامانه میراکن/فدر در کلاچ خشک اصطلاحی، روشی شناخته شده است، به شرطی که با یک انتخاب خوب انطباق یافته همراه باشد، نیز روشی است که غیر یکنواختی ها را کاهش می دهد. تحولی بزرگ به منظور کاهش قوی نوسانات پیچشی، استفاده از چرخ طیار دو جرمی است [۵، ۶] که از دو جرم دوآر متصل به هم تشکیل می شود و مابین آن ها سامانه میراکن/فدر قرار می گیرد.

۲- تعریف معیار غیر یکنواختی های دورانی

حذف غیر یکنواختی های گشتاور و سرعت دورانی در سیستم انتقال قدرت موتور احتراق داخلی بسیار مطلوب است [۷-۹]. در عمل اما همین گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، به علت احتراق متناوب موتور احتراقی این خواسته تحقق نمی پذیرد.

الکترونیکی کلاچ بسنده می گردد. محاسنی که مدیریت الکترونیکی کلاچ در ارتباط با کاهش وزن و حجم کلاچ دارد همچنین کاهش هزینه‌ای که به دلیل کنترل الکترونیکی خودکار تحقق می‌پذیرد، سبب شده است که کنترل الکترونیکی به یک زیر بنای مهم برای کاهش غیر یکنواختی تبدیل گردد [۴، ۱۰]. مدیریت الکترونیکی کلاچ بدین معناست که هرگاه گشتاور موتور در نقطه ماکزیمال خود قرار داشته باشد، امکان ایجاد حرکت نسبی محدودی، یا به عبارتی لغزش محدود بین دور خروجی موتور و دور ورودی جعبه دنده بوجود می‌آید، بدون اینکه این حرکت نسبی (لغزش محدود) در تمامی دوره دور، به‌طور مستمر وجود داشته باشد. این سیستم در مقابل با جعبه دنده خودکار یا به عبارتی اتوماتیک کم هزینه‌تر است و کمک قابل توجهی به کاهش غیر یکنواختی‌ها می‌کند. برای خودکار سازی این روش ضرورت دارد که کنترل الکترونیکی به‌قدر کافی سریع باشد، تا نیروی فشاری وارد بر کلاچ به‌خوبی با شرایط حاکم تطبیق داده شود. وقتی این امر تحقق پذیرد، صحبت از مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش محدود EKM/LS به میان می‌آید. سیستم تشریح شده در شکل (۳) طرز کار مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش محدود را نشان می‌دهد. این سیستم می‌تواند در تمامی وسایل نقلیه، از ماشین‌های کوچک شهری تا ماشین‌های باری نصب گردد [۱۱].



شکل ۳ مدیریت الکترونیکی کلاچ (EKM) به‌صورت نمادین

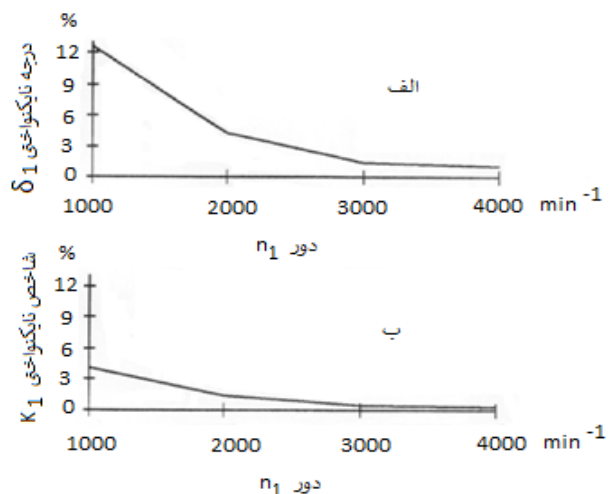
برای تحقق این سیستم علاوه بر کلاچ وسیله نقلیه، به یک موتور خودسامان خاص کلاچ گیری که با انرژی کمکی

در نهایت با جایگزین کردن معادله (۷) در معادله (۶) شاخص نایکنواختی K به دست می‌آید.

$$K = \frac{1}{2\sqrt{2}} \delta \quad (۸)$$

به‌منظور مقایسه سیستم‌های متفاوت انتقال قدرت، استفاده از شاخص غیر یکنواختی K در مقابل درجه غیر یکنواختی δ گویاتر است و برای ارزیابی خیلی دقیق‌تر است، زیرا به‌جای تعداد کمی از نقاط ماکزیمم و مینیمم که در زمان کوتاه و محدود اندازه‌گیری می‌شود، در شاخص غیر یکنواختی K تعداد زیادی از نقاط ماکزیمم و مینیمم منحنی، اندازه‌گیری و ارزیابی می‌گردند.

شکل (۲) به‌طور مثال نتایج آزمایش را برای درجه غیر یکنواختی δ و شاخص غیر یکنواختی K نشان می‌دهد. در این رابطه نشان داده می‌شود که شاخص غیر یکنواختی K_1 فقط حدوداً یک سوم درجه غیر یکنواختی δ_1 است، وقتی K با درجه غیر یکنواختی δ مقایسه گردد. اندیس ۱ مربوط به خروجی موتور است.



شکل ۲ مقایسه بین درجه نایکنواختی δ_1 (الف) و شاخص نایکنواختی K_1 (ب) موتور احتراقی برای سیستم انتقال قدرت مرسوم (موتور توربو دیزل ۴ سیلندری ۱/۹ لیتر) تحت بار کامل در دنده ۴

۳- مدیریت الکترونیکی کلاچ

در کنار روش‌هایی نظیر افزایش تعداد سیلندر، افزایش گشتاور لختی چرخ طیار، نصب سامانه میراکن/فتر، ایجاد اجزاء میراکن هیدرولیکی و به‌ویژه به‌کارگیری سیستم‌های فتر/جرم مثل به‌کارگیری چرخ طیار دو جرمی، امکان کارساز دیگری هم برای تأثیرگذاری در دینامیک سیستم انتقال قدرت وسیله نقلیه وجود دارد، یعنی مدیریت الکترونیکی کلاچ اصطکاک خشک که از این به بعد به عبارت مدیریت الکترونیکی کلاچ اصطکاک یا مدیریت

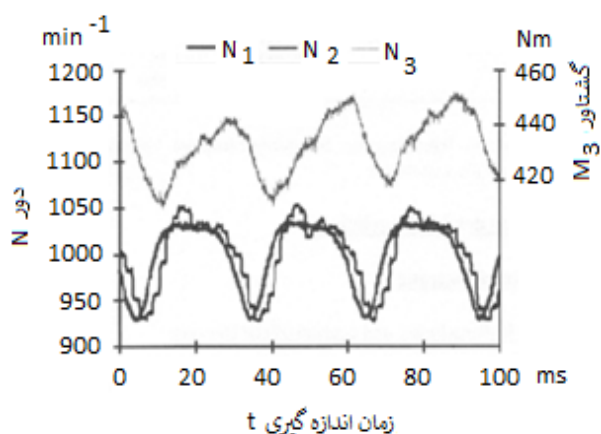
^۱ Elektronisches Kupplungs Management mit Limited Slip

۵- ارزیابی نتایج آزمایش

۵-۱- سیستم انتقال قدرت مرسوم

ارزیابی نتایج آزمایش یکبار برای موقعیتی که سیستم انتقال قدرت مرسوم وجود دارد و یکبار هم برای موقعیتی که سیستم انتقال قدرت از سامانه مدیریت الکترونیکی کلاچ برخوردار است، انجام می‌گیرد. این بدان منظور است که بتوان دو سیستم را با یکدیگر مقایسه و نتایج لازم را بدست آورد.

در سیستم انتقال قدرت مرسوم که در آن میراکن و فنر با یکدیگر به‌خوبی تطبیق شده‌اند و از لغزش هم خبری نیست، نمودار غیر یکنواختی‌های دور خروجی موتور $N_1(t)$ ، دور ورودی جعبه دنده $N_2(t)$ و گشتاور خروجی جعبه دنده $M_3(t)$ برای موتور توربو دیزل ۴ سیلندر ۱/۹ لیتری در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵ سیستم انتقال قدرت مرسوم در بار نیمه‌کامل، N_1 دور خروجی موتور، N_2 دور محور ورودی به جعبه دنده، M_3 گشتاور خروجی از جعبه دنده

اندازه‌گیری‌ها بعد از اینکه چرخه‌های کاری پایدار می‌شود، به مدت ۱۰۰ میلی ثانیه انجام می‌گردد. هر افزایش مثبت در منحنی دور موتور $N_1(t)$ ، بیانگر احتراق در یکی از سیلندرها است. علاوه بر فرکانس فرآیند احتراق، فرکانس‌های دیگری نیز ظاهر می‌شوند که بیانگر مراتب بالاترند. مقدار دامنه دور ورودی جعبه دنده $N_2(t)$ در موقعی که سیستم انتقال قدرت مرسوم وجود دارد، حداقل با دامنه دور صفحه کلاچ، یعنی با دامنه دور $N_1(t)$ برابر است.

دورهای خروجی موتور و ورودی جعبه دنده $N_1(t)$ و $N_2(t)$ همچنین گشتاور $M_3(t)$ نسبت به هم تغییر فاز دارند. این تغییر فاز به نوع سامانه انتقال قدرت بستگی دارد و ربطی به روش اندازه‌گیری ندارد.

۵-۲- مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش کنترل شده

مدیریت الکترونیکی کلاچ این وظیفه را به عهده دارد که در موقع راه‌اندازی موتور، جعبه دنده را به‌صورت بهینه به موتور احتراقی

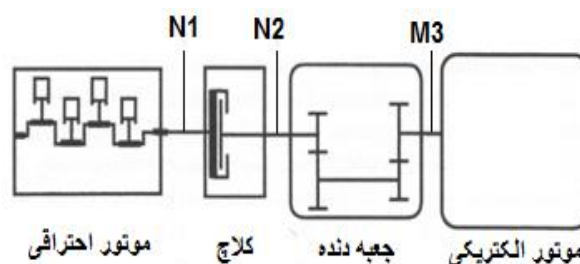
(هیدرولیکی، پنوماتیکی یا الکتریکی) کار می‌کند [۱۲]، ضمن اینکه به حسگرهای مختلف و یک واحد الکترونیک فرمان نیز نیاز است. در این واحد الکترونیک فرمان برنامه‌هایی وجود دارد که راه‌اندازی کلاچ و تغییر دنده را انجام می‌دهد همچنین میزان و حد لغزش مورد نیاز کلاچ را در وابستگی به سیستم انتقال قدرت موجود تأمین می‌کند.

به عنوان مثال هرگاه نقاط اوج گشتاور یا لرزش‌های نامناسبی که مخل راحتی سرنشینان هستند، ظاهر شوند، نیروی فشاری وارد بر کلاچ به مقدار اندکی کاهش یافته و باعث کاهش گشتاور مورد انتقال می‌شود. این کار سبب می‌شود که بین محور خروجی موتور و محور ورودی جعبه دنده، مقدار معینی سرعت نسبی (لغزش) ایجاد گردد و از انتقال نقاط اوج گشتاور به جعبه دنده و بقیه خط انتقال قدرت همچنین از ورود غیر یکنواختی‌های پیچشی و نوسانات به سازه خودرو جلوگیری و در نتیجه راحتی و آرامش سرنشینان تأمین گردد. آزمایش‌های فراوانی که این نگارنده انجام داده است، نشان می‌دهد که از این طریق همچنین دیگر عوامل، ضربات پیچشی نظیر نوساناتی که بر اثر گاز دادن سریع ایجاد می‌شود، نیز حذف می‌گردند.

به‌طور کلی مدیریت الکترونیکی کلاچ سبب می‌شود که موتور بتواند در بار بالا و دور خیلی پائین به‌راحتی کار کند، بدون اینکه راحتی و آرامش سرنشینان به خطر بیفتد. از مزایای این روش می‌توان به کاهش تکرار تعویض دنده و مصرف کم سوخت اشاره کرد. علاوه بر این، بارهای بالای دینامیکی بر سیستم انتقال قدرت اعمال نمی‌گردند و در نتیجه سیستم انتقال قدرت از طول عمر بیشتری بهره‌مند خواهد شد.

۴- چیدمانی سکوی آزمایش

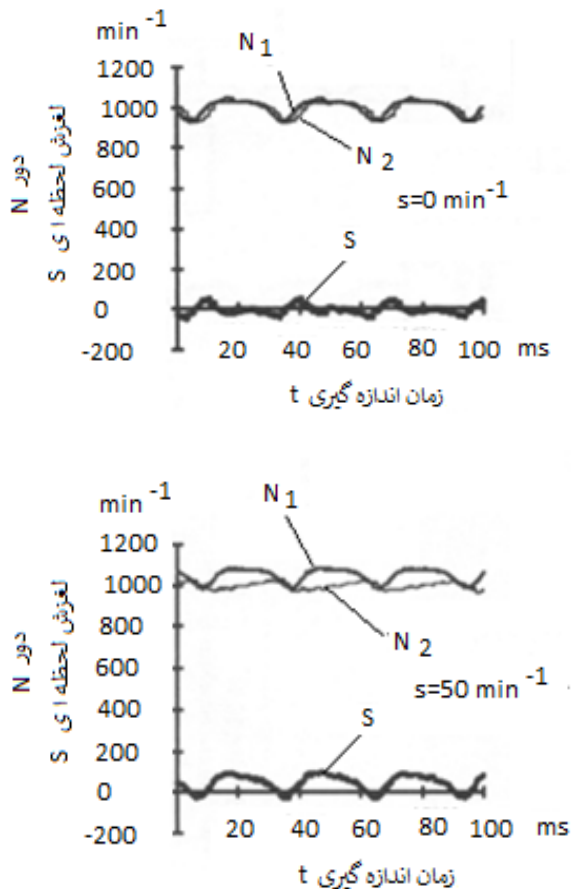
موتور احتراقی همراه با چرخ طیار، کلاچ و جعبه دنده معمولی در کنار یکدیگر روی سکوی مدرنی از کارخانه فولکس واگن که مجهز به ابزار اندازه‌گیری دقیق و پیچیده‌ای است، قرار می‌گیرند [۱۳]، تا بتوان آزمایش‌های عملی را انجام داد (شکل ۴).



شکل ۴ چیدمانی سکوی آزمایش، N_1 دور موتور، N_2 دور ورودی جعبه دنده، M_3 گشتاور خروجی از جعبه دنده

اندازه‌گیری‌ها به این سبک انجام می‌شود که مقدار گشتاور موتور احتراقی با موقعیت پدال گاز تنظیم می‌گردد. همچنین تنظیم و کنترل دور موتور روی مقدار مطلوب توسط موتور الکتریکی انجام می‌گردد [۱۴].

$N_2(t)$ ، مقدار ثابتی ندارد، بلکه لغزش لحظه‌ای کلاچ حول لغزش متوسط، وابسته به زمان و فرکانس احتراق تغییر می‌کند. این نشان می‌دهد که علی‌رغم اینکه لغزش متوسط کلاچ S افزایش می‌یابد، لغزش لحظه‌ای هنوز تا $s = 50$ دور بر دقیقه در محل فرکانس احتراق صفر است. در موقع گذر از صفر، صفحه کلاچ زمان کوتاهی نسبت به چرخ طیار، ثابت می‌ماند. در این حالت نایکخواختی‌های موتور قویاً انتقال می‌یابند. محدودیت لحظه‌ای و مدت تناوب تحریک، مانع تأثیرات نامناسب می‌شوند. منحنی‌های شکل $N_2(t)$ در ابتدا بالای $s = 50$ دور بر دقیقه کاملاً صاف می‌شود، به‌طوری‌که پس از آن کلاچ همواره در حال لغزش است.



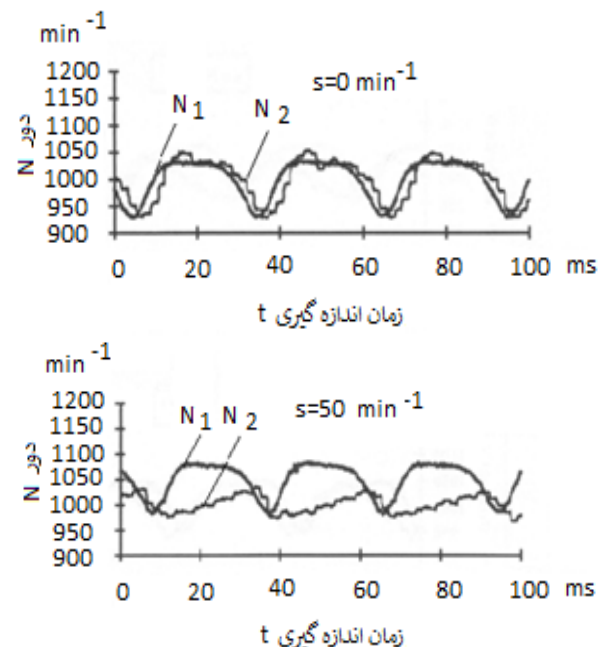
شکل ۷ لغزش لحظه‌ای $S(t)$ در رابطه با لغزش متوسط کلاچ $s = 0, 50$ دور بر دقیقه، $n_2 = 1000$ دور بر دقیقه، دنده ۲، بار نیمه کامل)

۶- شاخص‌های نایکخواختی

شاخص غیر یکنواختی K_2 را که مربوط به محور ورودی جعبه دنده است، برای سه دور مختلف ورودی جعبه دنده $n_2 = 3000$ و 2000 و 1000 دور بر دقیقه و موقعی که موتور تحت بار نیمه کامل است به دست آمده و در شکل (۸) به نمایش گذاشته شده است.

وصل کند و هنگام تغییر دنده، جریان نیرو را به‌طور کنترل شده قطع و وصل نماید. در این روش، دیگر به پدال کلاچ نیاز نیست. کلاچ و وسیله نقلیه همواره آن‌گونه عمل می‌کنند که راننده انتظار دارد. نیروی فشاری وارد بر کلاچ به‌گونه‌ای کنترل می‌گردد که گشتاور موتور با لغزش تعریف شده (s) از چرخ طیار به صفحه کلاچ انتقال یابد.

استفاده از مدیریت الکترونیکی کلاچ تأثیر مثبتی در راحتی، توسط کاهش غیر یکنواختی محور ورودی جعبه دنده می‌گذارد. شکل (۶) این مطلب را به‌طور واضح در بازه لغزش $s = 0$ و 50 (دور بر دقیقه) برای موقعی که دنده دو و بار نیمه کامل حاکم است، نشان می‌دهد. با افزایش لغزش علی‌رغم اینکه تحریک ناشی از موتور همواره یکسان است، غیر یکنواختی دور ورودی جعبه دنده کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که لغزش کنترل شده در کلاچ باعث جلوگیری از تحریکات نشأت گرفته از موتور به جعبه دنده و بقیه خط انتقال قدرت می‌شود.



شکل ۶ تأثیر لغزش کلاچ s در منحنی دور $N_1(t)$ و $N_2(t)$

$n_2 = 1000$ دور بر دقیقه، دنده ۲، بار نیمه کامل، $S =$

۵۰ و ۰ دور بر دقیقه

دور متوسط موتور n_1 از دور متوسط محور ورودی جعبه دنده n_2 همواره به مقدار لغزش s بیشتر است، به‌طوری‌که برای ارقام متوسط و لحظه‌ای می‌توان روابط زیر را نوشت: $S = n_1 - n_2$ و $S(t) = N_1(t) - N_2(t)$.

در شکل (۶) مشاهده می‌شود، اگر چه منحنی نایکخواختی $N_1(t)$ باز دارای برآمدگی قابل ملاحظه‌ای است، ولی منحنی $N_2(t)$ با افزایش لغزش s همواره صاف‌تر و دندانه‌آرهای است و دامنه‌ها کوچک‌تر می‌شوند. متعاقباً نشان داده می‌شود که لغزش لحظه‌ای $S(t)$ حالتی متناوب را با فرکانس احتراق نشان می‌دهد. این تمایل در تمامی دنده‌ها صدق می‌کند، اما در دنده‌های بالاتر به مقدار کمتری ظاهر می‌گردد.

شکل (۷) نشان می‌دهد که لغزش $S(t)$ مثل $N_1(t)$ و

با توجه به افزایش مصرف سوخت ناشی از تلفات لغزش همچنین به علت نتایج آزمایشات دیگر، می‌تواند این‌گونه بیان گردد که با امکان انتخاب دنده‌های بالاتر و یک سیستم انتقال قدرت آرام شده از لحاظ نوسان، به‌طور محسوس سوخت بیشتری می‌تواند صرفه‌جویی شود، نسبت به مقداری که لغزش باعث افزایش سوخت می‌گردد. علاوه بر این امکان نوع رانندگی با تعویض کم دنده نیز وجود دارد، زیرا نیاز به تعویض دنده با انتخاب دنده پایین‌تر برای افزایش راحتی سیستم انتقال قدرت دیگر نیازی نیست.

۷- بهبودی راحتی ناشی از اعمال لغزش

تأثیر ایجاد لغزش محدود در کلاچ در کاهش غیر یکنواختی‌های سیستم انتقال قدرت، به‌ویژه در حوزه‌ای که از نظر دور و بار مناسب است، با عیب تلفات لغزش و استهلاک کلاچ همراه است. این بدان معناست که باید لغزش را حتی‌الامکان کم نگهداشت و مقدار آن برای به‌کارگیری مدیریت الکترونیکی کلاچ، پیشنهاد می‌شود که با بهبودی راحتی مورد نیاز تطبیق داده شود. لذا در کنار تجهیز کردن کلاچ با حسگرهای مورد نیاز برای اعمال لغزش محدود، یک یا چندین حسگر که شاخصی برای راحتی حرکت در وسیله نقلیه یا سیستم انتقال قدرت قلمداد می‌گردند، اضافه شوند. این حسگرهای اضافی می‌توانند از قرار زیر باشند.

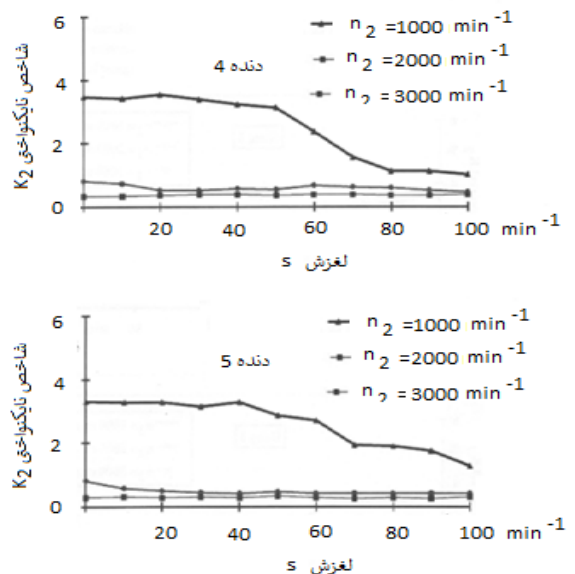
- نصب حسگر دور با حساسیت بالا در چرخ دنده ورودی جعبه دنده با امکان اندازه‌گیری دور $N_2(t)$ در ورودی جعبه دنده - نصب حسگر شتاب در جعبه دنده، میل کاردان یا موتور احتراقی که مخصوصاً بر اساس نوسانات حوزه تقلیل دهنده آرامش (مثلاً برای حذف سیگنال) تنظیم می‌گردد. در اینجا همچنین امکان نصب آن در کابین سرنشینان وجود دارد.

- نصب حسگر صوتی در کابین سرنشینان به‌ویژه در محل‌های مناسب، مثلاً در ارتفاع گوش راننده (تکیه‌گاه سر).

در مورد پارامترهای بسیار موثر می‌توان به بار موتور و انتخاب دنده اشاره کرد. پیشنهاد می‌گردد، چگونگی تأثیرگذاری در مقادیر یاد شده و روابط مورد نیاز در بسته‌ای که می‌توان آن را مدول آرامش نامید، ذخیره و اعمال گردند. این مدول هم مثل مدول تنظیم کننده لغزش مورد نیاز، باید در واحد مرکزی محاسبه‌گر مدیریت الکترونیکی کلاچ نصب شود. روی این پیشنهاد توسط مؤلف تاکنون تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است که با اتمام آن امید می‌رود به‌صورت ثبت اختراع ارائه گردد.

۸- نوآوری مقاله و اختلاف نتایج این مقاله با نتایج کارهای گذشته

مقاله حاضر از این جهت دارای نوآوری نوین و طرحی نو است که تا کنون در هیچ سیستم و یا حتی در هیچ مقاله علمی تأثیرات ایجاد لغزش محدود در کلاچ را در کاهش غیر یکنواختی‌های



شکل ۸ کاهش شاخص غیر یکنواختی K_2 مربوط به محور ورودی جعبه دنده با افزایش لغزش s برای سه دور مختلف ورودی جعبه دنده در این اندازه‌گیری‌ها که برای تنظیم لغزش انجام گرفته است، باید دور ورودی جعبه دنده در مقداری معین، مثلاً $n_2 = 1000$ دور بر دقیقه با موتور الکتریکی تنظیم گردد، سپس دور موتور n_1 به مقدار لغزش، مثلاً $s = 50$ دور بر دقیقه بیشتر از $n_1 = 1050$ دور بر دقیقه دوران یابد. به علت ارقام متغیری که برای لغزش s (مثل شکل ۶) در نظر گرفته می‌شود، دور n_2 دقیق تنظیم می‌گردد.

آزمایش‌ها را با لغزش مرسوم، یعنی $s = 0$ و موقعی که دور موتور در بازه $n = 1000$ دور بر دقیقه قرار دارد شروع می‌کنیم. افزایش لغزش، کاهش K_2 را به دنبال دارد و البته به این‌که کدام دنده فعال است، نیز بستگی دارد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر $n_2 = 1000$ دور بر دقیقه باشد، لغزش مورد نیاز به ۸۰ دور بر دقیقه خواهد رسید. البته لغزش مورد نیاز اگر در حدی باشد که باعث کاهش محسوس K_2 بشود، به دنده حاکم نیز وابسته است. از دور موتور حدوداً ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به بعد با افزایش لغزش، K_2 به مقدار کمی کاهش می‌یابد، ضمن این‌که در این دور، حتی در حالتی که هیچ لغزشی وجود ندارد، K_2 کوچک است. لذا به این نتیجه می‌رسیم که لغزش زیر $n_1 = 3000$ دور بر دقیقه باید پایان یابد.

لغزش همچنین از نقطه نظر خساراتی که به کلاچ وارد می‌شود نیز محدود می‌گردد. بیشتر شدن لغزش در بار بالای موتور، تمهیدات خاصی را برای جلوگیری از تحریک کلاچ می‌طلبد، وقتی توان تلفاتی لغزش بر اساس محاسبات انجام گرفته شده حدوداً ۰/۵ کیلو وات باشد و برای مدت طولانی وجود داشته باشد، باعث استهلاک غیر مجاز کلاچ می‌گردد. از این لحاظ محدودیت مقدار لغزش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید برای اعمال آن تمهیداتی در نظر گرفت.

(ZMS/DFC) چرخ طیار دو جرمی	ΔN
حداکثر تغییرات در یک دوره تناوب (min^{-1})	علائم یونانی
δ	درجه غیر یکنواختی
σ_N	انحراف معیار

تشکر و قدردانی

بسی شایسته است نویسندگان مقاله حاضر، مراتب سپاس و قدردانی خود را از تلاش مستمر و زحمات ارزنده سردبیر محترم جناب آقای دکتر علی نوری بروجردی، اعضای هیأت تحریریه و کارشناس مجله سرکار خانم شیما امینی در راستای اعتلاء و پیشبرد اهداف متعالی مجله وزین علمی مهندسی مکانیک (ISME) ابراز نمایند.

مراجع

- [1] International Colloquium Fuels, Esslingen, 25 - 26 Juni (2019).
- [2] Beigzadeh AM. Reduzierung der Torsionsungleichförmigkeit im Kraftfahrzeugantriebsstrang mit neuartigen Systemen. Berlin, Dissertation, (1997).
- [3] Abbassi MB. Steigerung des Antriebsstrangkforts im Kfz durch elektronisches Kupplungsmanagement. ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift, 1:101 (2):118-26, (1999 Feb).
- [4] Aachener Kolloquium 2015, Hartmut Koenig, January 3, (2017).
- [5] Dresig H, Fidlin A. Beispiele zur dynamischen Analyse von Antriebssystemen.
- [6] InSchwingungen mechanischer Antriebssysteme, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 243-345, (2020).
- [7] بیگ زاده عباسی، مجتبی، بررسی آزمایشی و تئوری تأثیر چرخ طیار دو جرمی در کاهش نوسانات سیستم انتقال قدرت وسیله نقلیه، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۲.
- [8] Aktuelle Veranstaltung, 9. Regionalforum Saar, Chris Eberl, die Digitale Transformation in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Michael Hecht, Universität des Saarlandes, (2019).
- [9] Biomechanisches System, Kinematische Analyse und Synthese, Getriebetechnik,

سیستم انتقال قدرت به منظور افزایش راحتی سرنشینان به ویژه در حوزه مناسب دور و بار مورد بررسی و کنکاش قرار نداده است. در این رابطه که قاعداً تلفات لغزش و استهلاک کلاچ نیز باید مورد آزمایش و در نتیجه منجر به پیشنهادات اساسی برای هدف موردنظر گردد، نیز هیچ گونه گزارشی مشاهده نشده است. نتایج بدست آمده در این مقاله در رابطه با لغزش محدود نتایج منحصر به فرد آزمایش شده ای هستند که می توانند مینا و معیار بسیاری از تحقیقات آینده که موضوع اصلی آن تلاش برای بهبودی راحتی سرنشینان خودرو است، قرار گیرند و مینای بسیاری از تحلیل ها و آزمایشات پیش رو باشند. در کارهای پیشین و تحقیقات انجام گرفته فقط کوتاه در مورد مدیریت الکترونیکی کلاچ بدون تأثیر لغزش محدود در آرام سازی خودرو سخن به میان آمده است. لذا می طلبد تا این تفکر دنبال شود و این ایده نو با توجه به پیشنهادات ارائه شده که ناشی از نتیجه آزمایشات طولانی با مدرن ترین دستگاه های آزمایشی در سکوها های آزمایش نوین بدست آمده است، پی گیری گردد.

۹- نتیجه گیری

مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش محدود که طراحی و در سکوی آزمایش مورد بررسی و تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفته است، ضمن اینکه طرز کار کلاچ را خودکار می کند، هم زمان باعث افزایش راحتی سیستم انتقال قدرت می گردد. راحتی سرنشینان به علت کاهش نوسانات بدنه خودرو که ناشی از اجرای طرح مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش محدود است، از دستاوردهای اصلی این مقاله می باشد. البته این نکته نیز قابل تأمل است که به دلیل وجود لغزش، گرمای بیشتری در کلاچ ایجاد که با تمهیدات طراحی مورد نیاز به راحتی می توان آن را کاهش داد. به این دلیل باید لغزش کم و محدود باشد و به بیانی بهتر باید در مواقعی که آرامش بشدت کاهش می یابد، مدیریت الکترونیکی کلاچ به منظور ایجاد لغزش محدود فعال گردد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
EKM/LS مدیریت الکترونیکی کلاچ با لغزش محدود	
f فرکانس (s^{-1})	
K شاخص غیر یکنواختی	
$M_3(t)$ گشتاور لحظه ای خروجی از جعبه دنده (Nm)	
$N_1(t)$ دور لحظه ای موتور (min^{-1})	
n_1 دور متوسط موتور (min^{-1})	
$N_2(t)$ دور لحظه ای جعبه دنده (min^{-1})	
$N_{\max}$ دور ماکزیمم (min^{-1})	
$N_{\min}$ دور مینیمم (min^{-1})	
$\hat{n}$ دامنه (min^{-1})	
T دوره تناوب (s)	
t زمان (s)	

- [13] *Kolloquium Mobilhydraulik, Tagung, Tagungsort: Karlsruhe, Datum: 10./11. September* (2020).
- [14] *Kriegsreporter berichten*/Konstantin Flemig. - 1. Auflage. - Essen: Klartext, Oktober (Reclams Universal-Bibliothek; Nr. 8788), (Sonderdrucke und Sonderveröffentlichungen/Deutscher Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, (2019) .
- [15] *Regelungstechnik 1, Zusammenfassung der Vorlesung, Kapitel 11+12.2 Reglerauslegung*, Küttel, M. Reinders, L. Guzzella, 151-0591-00, (2019).
- Regelung von Mechanismen, Tagungsband, (2017).
- [10] Stier C. Ein Beitrag zur Validierung von Antriebssystemen mit Bezug auf kupplungs- und motorinduzierte Schwingungen (Doctoral dissertation, Verlag nicht ermittelbar).
- [11] *Antriebsstrang, Getriebe und Getriebesteuerung*, Reif, Konrad, (2018).
- [12] Studie zur EU-weiten Migration eines Digitalen Automatischen Kupplungssystems (DAK), Schlussbericht: DAK-Studie (deutsche Version), Anlage zur DAK-Studie (deutsche Version), (2019).