

مطالعه تاثیر عدد لوئیس بر شعله های نفوذی آرام

چکیده: یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر رفتار شعله، عدد لوئیس است. هدف اصلی در این پژوهش، مطالعه تاثیر عدد لوئیس بر حد خاموشی شعله نفوذی جریان مخالف است. همچنین تاثیر رقیق سازی سوخت بر عدد لوئیس و حد خاموشی شعله به کمک دو رقیق کننده آرگون و هلیوم مورد مطالعه قرار گرفت. روش پژوهش در این تحقیق، شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار شبیه ساز احتراق کمکین است. برای تحلیل بهتر و دقیق تر نتایج از عدد لوئیس موثر به جای عدد لوئیس سوخت یا اکسید کننده استفاده گردید. نتایج نشان می دهند که افزایش کسر مولی رقیق کننده، عدد لوئیس موثر را افزایش می دهد و این به معنی نفوذ حرارتی بیشتر نسبت به نفوذ جرمی است. بیشترین مقدار افزایش عدد لوئیس موثر مربوط به سوخت بوتان است. این مقدار در حضور رقیق کننده آرگون از ۰/۴۲ به ۱/۱۶ و در حضور رقیق کننده هلیوم از ۰/۴۴ به ۱/۷۷ می رسد. افزایش نرخ کرنش منجر به کاهش ماکزیمم دما می شود و همواره ماکزیمم دما در حالت رقیق سازی با هلیوم کمتر از ماکزیمم دما در حالت رقیق سازی با آرگون است. افزایش درصد رقیق کننده نیز ماکزیمم دما را کاهش می دهد.

واژه های راهنما: عدد لوئیس موثر، حد خاموشی، شعله نفوذی جریان مخالف، نفوذ حرارتی، نفوذ جرمی، رقیق سازی

علی اسدی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه بزرگمهر قائنات،
قائن

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

The study of the effect of Lewis number on the laminar diffusion flames

Ali Asadi*

Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering,
Bozorgmehr University of
Qaenat,
Qaen

Abstract: One of the most important and influential parameters on flame behavior is the Lewis number. The main goal of this research is to study the effect of Lewis number on the Extinction limit of counterflow diffusion flame. Also, the effect of fuel dilution on Lewis number and flame extinction limit was studied with the help of two diluents, argon and helium. The research method in this study is numerical simulation with the help of the CHEMKIN combustion simulator software. For a better and more accurate analysis of the results, an effective Lewis number was used instead of the Lewis number of fuel or oxidizer. The results show that the increase in the mole fraction of the diluent increases the effective Lewis number, and this means more thermal diffusion than mass diffusion. The largest increase in the effective Lewis number is related to butane fuel. This value increases from 0.42 to 1.16 in the presence of argon diluent and from 0.44 to 1.77 in the presence of helium diluent. An increase in the strain rate leads to a decrease in the maximum temperature, and the maximum temperature in the dilution state with helium is always lower than the maximum temperature in the state of dilution with argon. Increasing the diluent percentage also decreases the maximum temperature.

Keywords: Effective Lewis number, Extinction limit, Counterflow diffusion flame, Thermal diffusion, Mass diffusion, Dilution

۱- مقدمه

سی و همکاران به شبیه‌سازی دو بعدی شعله‌های جریان مخالف آرام با شیمی یک مرحله‌ای پرداختند. آن‌ها اثرات نرخ کرنش و عدد لوئیس بر توسعه‌ی هسته‌ی احتراق و شرایط بحرانی احتراق را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که موقعیت احتراق بهینه در نزدیکی شرایط استوکیومتری رخ می‌دهد و به عدد لوئیس و نسبت هم ارزی کلی بستگی دارد [۷].

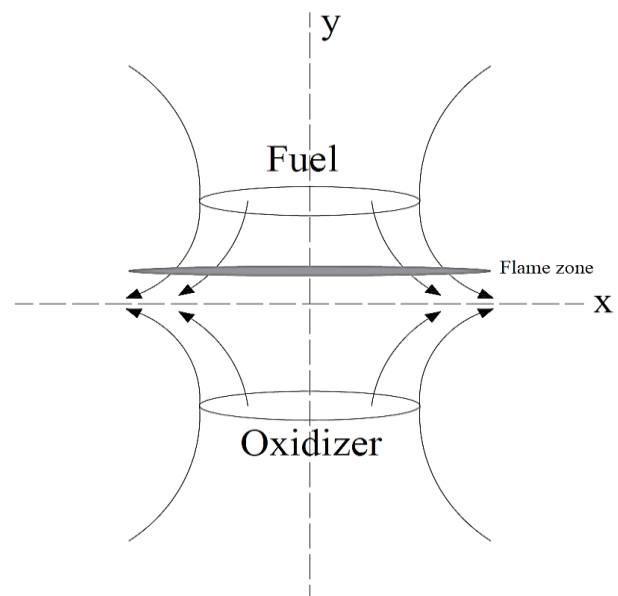
اکبری و همکاران به مدل‌سازی شعله‌های نفوذی با سوخت زیست توده در آرایش جریان مخالف غیر پیش آمیخته پرداختند و اثرات اعداد لوئیس و زلدویچ را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد لوئیس، پارامتر اصلی کنترل‌کننده‌ی رفتارهای نوسانی و ضربانی شعله است. علاوه بر این به نظر می‌رسد که عدد زلدویچ اثرات عدد لوئیس را تشدید می‌کند [۸].

فن و همکاران به مطالعه‌ی جامع احتراق هیدروترمال هیدروژن/اکسیژن با استفاده از مدل شعله‌ی جریان مخالف آرام یک بعدی پرداختند. آن‌ها اثرات نرخ کرنش، فشار، دمای ورودی، عدد لوئیس و غلظت سوخت بر ساختار شعله و حد خاموشی آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که افزایش نرخ کرنش و فشار، حداکثر دما و ضخامت شعله را کاهش می‌دهد، در حالی که دمای ورودی و غلظت سوخت اثر معکوس دارند. همچنین فرض واحد برای عدد لوئیس، در هر نرخ کرنش، حداکثر دمای شعله را کمتر پیش بینی می‌کند [۹].

کومار و کومار در پژوهشی به بررسی عددی تاثیر عدد لوئیس سوخت بر روی شعله پخشی در یک محیط ریز گرانش ساکن پرداختند. آن‌ها از یک مدل عددی سه‌بعدی استفاده کردند که در آن عدد لوئیس سوخت به اجزای جهتی در امتداد و عمود بر سطح سوخت تقسیم شد تا اثر جهتی انتشار بخار سوخت بر روی شعله، سرعت، پخش و خاموش شدن آن مشخص گردد. بر اساس نتایج آن‌ها برای عدد لوئیس سوخت کمتر از یک شعله خاموش شد و برای عدد لوئیس سوخت بزرگتر از یک شعله رفتار نوسانی داشت [۱۰].

تأثیر نابرابری در نفوذ حرارتی و جرمی که با عدد لوئیس نشان داده می‌شود و به صورت نسبت نفوذ حرارتی مخلوط به نفوذ جرمی تعریف می‌شود، توسط پانتیس و همکاران در شعله‌ی جریان مخالف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تجربی آن‌ها بیانگر آن است که برای نرخ کرنش‌های پایین، دامنه‌ی نوسان نرخ کرنش مورد نیاز برای خاموش شدن شعله آن قدر زیاد است که جریان به طور موقت، جهت خود را تغییر می‌دهد و منجر به اعوجاج میدان جریان مخالف، بی‌ثبات شدن شعله و صرف نظر از مقدار عدد لوئیس، منجر به خاموش شدن نهایی شعله می‌شود [۱۱].

شعله‌ی جریان مخالف نفوذی یکی از انواع شعله‌های غیر پیش آمیخته است. در این نوع شعله، شکل ناحیه‌ی شعله به دلیل سرعت متغیر در دهانه‌ی خروجی نازل‌ها و برخی تأثیرات فرعی دیگر، اغلب صاف نیست. ناحیه‌ی تخت شعله در این مدل، عمود بر محور نازل است. شماتیک مدل شعله‌ی جریان مخالف نفوذی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیک متقارن محوری مدل شعله‌ی جریان مخالف نفوذی

مطالعات مختلفی به صورت عددی و آزمایشگاهی توسط محققان بر روی مدل شعله‌های جریان مخالف نفوذی انجام شده است. از جمله موضوعات مهمی که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است، پایداری و حد خاموشی شعله می‌باشد [۳-۱]. افزودن گونه‌های بی اثر به سوخت علاوه بر اینکه حد خاموشی شعله را تغییر می‌دهد، ممکن است خواص حرارتی و نفوذی جریان‌های سوخت و اکسید کننده مانند عدد لوئیس که تأثیر زیادی بر دما و حد خاموشی شعله دارد را نیز تغییر دهد [۴].

با توجه به اینکه در نزدیکی حد خاموشی شعله ممکن است واکنش دهنده‌ها از طریق ناحیه‌ی واکنش نشت کنند و منجر به ایجاد شعله‌ی پیش آمیخته شوند، ساختار و دمای شعله‌های نفوذی را نمی‌توان با در نظر گرفتن اعداد لوئیس سوخت و اکسید کننده به طور جداگانه مطالعه نمود [۵]. بنابراین نیاز به عدد لوئیس موثر^۱ است تا بتوان تحلیل صحیحی از شعله‌های نفوذی در نزدیکی حد خاموشی شعله داشت [۶].

^۱ Effective Lewis number

سوختن، دمای شعله، موقعیت جلوی شعله، دمای واکنش دهنده، و توزیع جرم با در نظر گرفتن تأثیرات مؤثر عدد لوئیس، تابش حرارتی و نرخ کرنش ارائه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که بی‌ثباتی ضربان‌دار شعله با سوخت زیست‌توده در مدل جریان مخالف به طور قابل توجهی نه تنها به عدد لوئیس مؤثر بلکه به تابش حرارتی منتقل شده از منطقه واکنش مربوط است. علاوه بر این، مشخص شد که نرخ کرنش، علاوه بر عدد لوئیس و تابش حرارتی، می‌تواند حالت‌های نوسان شعله را کنترل کند [۱۵].

مطالعه‌ی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که بررسی عدد لوئیس در فرایندهای احتراقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی ممکن است بررسی اعداد لوئیس سوخت و اکسید کننده به صورت جداگانه منجر به درک صحیحی از شعله و حدود خاموشی آن نشود. بنابراین نیاز است تا فرایند احتراق به کمک یک عدد لوئیس مؤثر در نزدیکی و دور از حد خاموشی شعله مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین نیاز است تا تأثیر این عدد لوئیس مؤثر در سوخت‌های مختلف بررسی و تحلیل گردد تا علاوه بر مطالعه‌ی رفتار شعله سوخت‌های مختلف، درک صحیحی از این تأثیر به دست آید.

در همین راستا در پژوهش حاضر، تأثیر عدد لوئیس مؤثر در نزدیکی و دور از حد خاموشی شعله‌های جریان مخالف نفوذی چهار سوخت هیدروکربنی متان^۲، اتان^۳، پروپان^۴ و بوتان^۵ که همگی از خانواده‌ی آلکان‌ها^۶ با فرمول عمومی یکسان^۷ هستند، مطالعه گردید. همچنین برای مطالعه‌ی تأثیر رقیق‌سازی بر حد خاموشی شعله و عدد لوئیس مؤثر از دو رقیق‌کننده‌ی گاز بی‌اثر آرگون^۸ و هلیوم^۹ که دارای ظرفیت حرارتی یکسانی هستند، استفاده گردید. علاوه بر آن برای مقایسه‌ی دقیق‌تر، نتایج شعله‌ی سوخت‌های مورد مطالعه در این تحقیق با عدد لوئیس سوخت نیز ارائه شد.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر شعله‌ی جریان مخالف نفوذی که در شکل (۱) نشان داده شد، به صورت زیر است [۱۶]:
معادله‌ی بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) = 0 \quad (1)$$

سوارز جونیور و لیروز شعله‌های نفوذی را با در نظر گرفتن نفوذ شیمیایی بی‌نهایت سریع^۱ و همچنین اثرات نفوذ جرم و حرارت مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اثرات نفوذ را در یک جریان راکتیو محدود متقارن محوری با استفاده از فرمول شواب-زلدوویچ بر حسب اعداد لوئیس گونه‌های واکنش‌دهنده ارزیابی کردند. نتایج برای اعداد لوئیس مختلف سوخت و اکسید کننده به دست آمد که امکان تجزیه و تحلیل دمای شعله غیر آدیاباتیک و تغییرات ارتفاع و عرض شعله را فراهم می‌کند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برای شعله‌های بیش از حد تهویه شده، عدد لوئیس اکسید کننده نسبت به عدد لوئیس سوخت، تأثیر بیشتری بر فرآیند احتراق دارد [۱۲].

نوسانات ناشی از مکانیزم نفوذ حرارتی برای شعله‌های آرام که عدد لوئیس بزرگتر از یک دارند توسط بهات و چاکراواری به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها تأثیر اعداد لوئیس سوخت و اکسید کننده را به صورت جداگانه برای مخلوط استوکیومتری بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که تعریف عدد لوئیس مؤثر می‌تواند شروع نوسانات و همچنین بزرگی آن‌ها را در ساختار شعله تعیین کند [۱۳].

آکیبا و همکاران به منظور درک رفتارهای شعله‌ی شبه پایدار در میدان جریان مخالف شامل مخلوط‌هایی با عدد لوئیس پایین نزدیک به حد رقیق، آنالیزهای تجربی و عددی برای شعله‌های پراکنده انجام دادند. این آزمایش‌ها با مخلوطی با عدد لوئیس ۰/۳ و ۰/۵ تحت شرایط محیطی میکروگرانش برای حذف اثر شناوری برای شرایط کم کشش انجام شد. مشاهدات تجربی تغییر در شرایط شعله‌های پراکنده با تغییرات عدد لوئیس را نشان داد. شعله‌های پراکنده با عدد لوئیس ۰/۳ را می‌توان در شرایط مخلوط رقیق‌تر مشاهده کرد و در مقایسه با موارد مشاهده شده با عدد لوئیس ۰/۵، کشش بیشتری را تحمل کرد [۱۴].

فراهانی و همکاران برای درک بهتر رفتار شعله، یک مدل انتشار حرارتی با استفاده از یک تابع سینوسی ارائه کردند. این مدل برای ارزیابی رفتار ضربانی در یک شعله جریان مخالف با ابر ذرات زیست توده با در نظر گرفتن عدد لوئیس و اثرات تابش حرارتی استفاده گردید. به منظور بررسی دقیق ویژگی‌های ضربان‌دار یک شعله، معادلات حاکم مرتبط با زمان برای سیستم چند ناحیه‌ای فرضی، نوشته شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب به صورت تحلیلی حل شد. ویژگی‌های وابسته به زمان سرعت

⁶ Alkanes

⁷ C_nH_{2n+2}

⁸ Argon (Ar)

⁹ Helium (He)

¹ Infinitely fast chemistry diffusivity

² Methane (CH₄)

³ Ethane (C₂H₆)

⁴ Propane (C₃H₈)

⁵ Butane (C₄H₁₀)

و همچنین \bar{W} و $X, D_{jk}, D_{km}, D_k^T, D_{kj}$ به ترتیب ضرایب چند جزئی، نفوذ حرارتی، میانگین ترکیب، دوتایی، کسر مولی گونه‌ها و وزن مولکولی متوسط می‌باشند.

با توجه به اینکه F, G, T, ρ, Y_k و u توابعی فقط از x می‌باشند. شرایط مرزی برای جریان‌های سوخت (F) و اکسیدکننده (O) در نازل‌ها به صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} x = 0: F = \frac{\rho_F u_F}{2}, G = 0, T = T_F, \rho u Y_k + \\ \quad \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F \\ x = L: F = \frac{\rho_O u_O}{2}, G = 0, T = T_O, \rho u Y_k + \\ \quad \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_O \end{cases} \quad (11)$$

نرخ کرنش توسط شادری و ویلیامز [۱۸] به صورت زیر تعریف شده است.

$$a = \frac{2V_{ox}}{L} \left(1 + \frac{V_F \sqrt{\rho_F}}{V_{ox} \sqrt{\rho_{ox}}} \right) \quad (12)$$

که در آن L فاصله‌ی بین دهانه‌ی دو نازل و V_F و V_O سرعت‌های سوخت و اکسیدکننده هستند. ρ_F و ρ_O نیز چگالی سوخت و اکسیدکننده هستند.

عدد بی بعد لوئیس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad (13)$$

که در آن α و D به ترتیب نفوذ حرارتی و نفوذ جرمی هستند. عدد لوئیس موثر نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$Le_e = \frac{Le_F + A Le_O}{1 + A} \quad (14)$$

که در آن Le_O, Le_F و A به ترتیب عدد لوئیس سوخت، عدد لوئیس اکسید کننده و نسبت هم ارزی هستند. نسبت هم ارزی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = u \frac{Y_F}{Y_O} \quad (15)$$

که در آن u, Y_F و Y_O به ترتیب نسبت جرمی اکسید کننده به سوخت، کسر جرمی سوخت و کسر جرمی اکسید کننده هستند.

انفصال معادلات دیفرانسیلی به روش‌های شناخته شده صورت می‌گیرد. جمله‌ی نفوذ به کمک روش تفاضل مرکزی با خطای مرتبه‌ی دو در فاصله‌ی مش‌بندی منفصل می‌گردد. برای ایجاد همگرایی بیشتر در انفصال جمله جابجایی از روش بالا

که در آن u و v مولفه‌های سرعت شعاعی و محوری و چگالی ρ است. با در نظر داشتن فرضیه‌ی ون کارمان [۱۷] که $\frac{v}{r}$ و سایر متغیرها باید فقط تابعی از x باشند، داریم:

$$G(x) = -\frac{\rho v}{r}, \quad F(x) = \frac{\rho u}{2} \quad (2)$$

با جایگذاری F و G در معادله‌ی پیوستگی و ساده‌سازی داریم:

$$G(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (3)$$

معادله‌ی مومنتم شعاعی با مقدار ویژه‌ی زیر ارضا می‌شود:

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \text{const} \quad (4)$$

که در آن P فشار می‌باشد. معادله‌ی مومنتم شعاعی به صورت زیر است:

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{FG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left[\mu \frac{d}{dx} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

که در آن μ لزجت دینامیکی است. معادلات انرژی و بقای گونه‌ها نیز به شکل زیر می‌باشند:

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{C_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{C_p} \sum_k C_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{C_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k = 0 \quad (6)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (7)$$

که در آن $T, C_p, \lambda, C_{pk}, Y_k, V_k, h_k, \dot{\omega}_k$ و W_k به ترتیب دما، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فشار ثابت، هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فشار ثابت گونه‌ی k ام، کسر جرمی گونه‌ی k ام، سرعت نفوذی گونه‌ی k ام، آنتالپی گونه‌ی k ام، نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی k ام و وزن مولکولی گونه‌ی k ام می‌باشد. سرعت‌های نفوذی به شکل زیر هستند:

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j=1}^K W_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

یا به شکل فرمولاسیون میانگین برای ترکیب داریم:

$$V_k = \frac{1}{X_k} D_{km} \frac{dX_k}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

که

$$D_{km} = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k}^K X_j / D_{jk}} \quad (10)$$

دست^۱ که قادر به تشخیص جهت جریان است، استفاده می‌شود. دقت این طرح از مرتبه‌ی یک است اما از ایجاد نوسانات در طول حل روی شبکه درشت جلوگیری می‌کند. حل معادلات با استفاده از OPPDIF^۲ [۱۹] که یک کد عددی به زبان فرترن است، انجام شد. حل کننده‌ی مقدار مرزی دو نقطه‌ای^۳ معادلات گسسته را حل می‌کند. حلگر دو نقطه‌ای از روش نیوتن برای حل معادلات حالت پایدار استفاده می‌کند و زمانی که تکرار نیوتن همگرا نیست به ادغام زمانی می‌پردازد. پس از اینکه ادغام زمانی، راه حل را به سمت حالت پایدار تغییر می‌دهد، حلگر به روش نیوتن باز می‌گردد تا به سرعت در حل ثابت، همگرا شود. در محاسبه اولین حل یک شعله جدید، حلگر ممکن است چندین بار قبل از همگرا شدن بین ادغام زمانی و روش نیوتن به عقب و جلو بپرد. با این حال، هنگامی که یک شعله حل شد، شعله‌های دیگر را می‌توان با تغییر یک شرط مرزی و راه اندازی مجدد از راه حل قبلی بسیار موثرتر حل کرد.

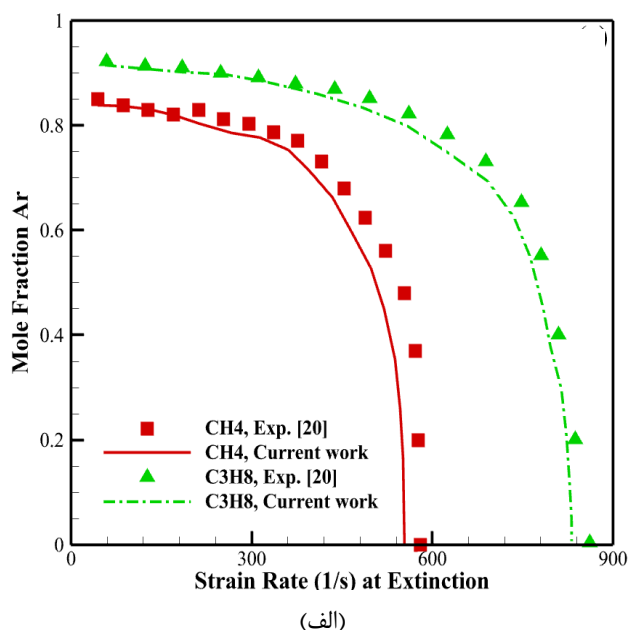
به منظور سرعت بخشیدن به همگرایی، ابتدا یک محاسبات جدید بر روی یک مش درشت شروع می‌شود. هنگامی که حل روی اولین مش همگرا شد، حلگر با افزودن نقاط جدید به مناطق گرادیان، راه حل را اصلاح می‌کند. معیار همگرایی به صورت رسیدن مقادیر باقی مانده‌ها به کمتر از 10^{-5} می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی اعتبار نتایج

برای بررسی اعتبار نتایج به مقایسه‌ی منحنی کسر مولی رقیق کننده بر حسب نرخ کرنش در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۰] پرداخته شد. برای رسیدن به نقطه‌ی خاموشی، سرعت‌های خروجی را به تدریج افزایش داده تا شعله خاموش شود. با استفاده از این سرعت می‌توان نرخ کرنش خاموشی در یک کسر مولی خاص رقیق کننده را محاسبه نمود. ماکزیمم دما نیز در این نقطه، ماکزیمم دما در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی است.

شکل (۲) منحنی کسر مولی رقیق کننده‌های آرگون و هلیوم را بر حسب نرخ کرنش (که معیاری برای سنجش حد خاموشی است) برای دو سوخت متان و پروپان نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، افزایش کسر مولی رقیق کننده به کاهش نرخ کرنش می‌انجامد. به طوری که مقدار نرخ کرنش از حدود



³ Twopnt (two-point boundary value solver)

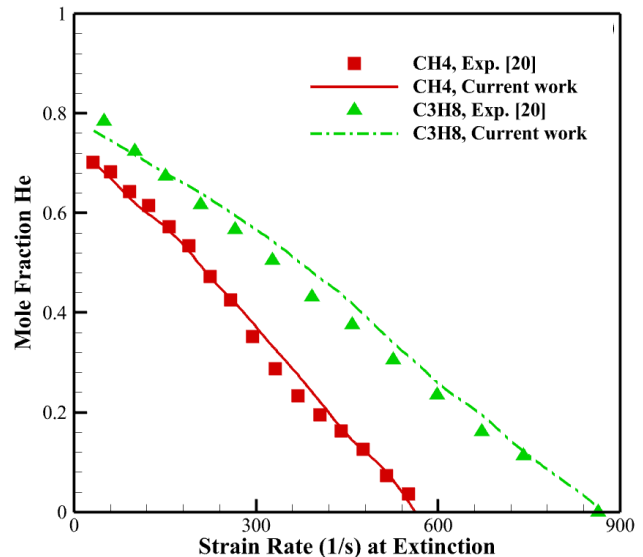
¹ Upwind

² Opposed-flow diffusion flames

حرارتی بالاتری دارد، در شرایط یکسان رقیق‌سازی، دمای ماکزیمم بیشتری را نشان می‌دهد.

جدول (۱) ارزش حرارتی بالایی و پایینی سوخت‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

نکته‌ی دیگری که در شکل (۳) باید به آن توجه داشت آن است که در یک کسر مولی خاص رقیق‌کننده، ماکزیمم دما در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون بیشتر از دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم است (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب را مقایسه کنید). ویژگی‌های شیمیایی، نقطه‌ی ذوب پایین و سبکی هلیوم نسبت به آرگون باعث می‌شود که رقیق‌سازی با هلیوم منجر به کاهش بیشتر دمای ماکزیمم شود.



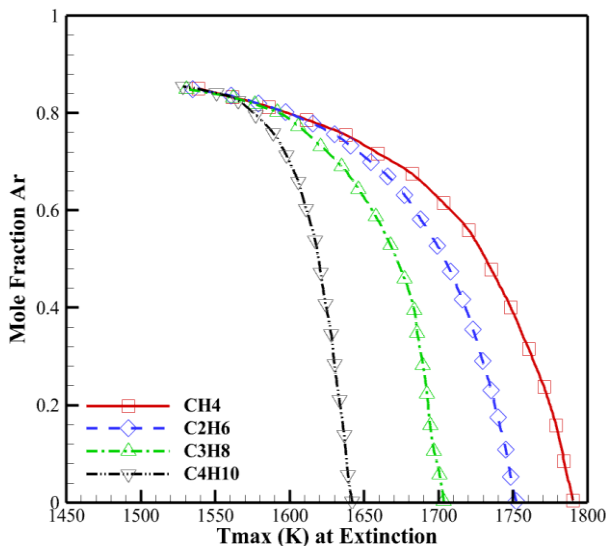
(ب)

شکل ۲ منحنی کسر مولی رقیق‌کننده بر حسب نرخ کرنش در نقطه‌ی خاموشی؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم

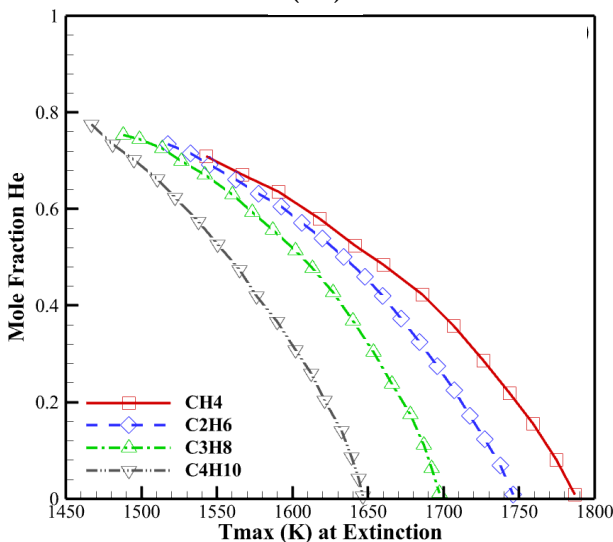
۲-۲- اثر عدد لوئیس و حد خاموشی شعله

شکل (۳) منحنی کسر مولی رقیق‌کننده‌های آرگون و هلیوم بر حسب دمای ماکزیمم در نزدیکی حد خاموشی چهار سوخت متان، اتان، پروپان و بوتان را نشان می‌دهد. در هر یک از سوخت‌های مورد مطالعه، افزایش کسر مولی هر کدام از رقیق‌کننده‌ها باعث کاهش دمای ماکزیمم می‌شود. بیشترین میزان کاهش دمای ماکزیمم برای سوخت متان برابر ۱۶/۴٪ و کمترین میزان کاهش دما برای سوخت بوتان برابر ۷/۴٪ در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون است. این مقادیر در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم به ترتیب مقدار ۱۵/۸٪ برای سوخت متان و ۱۲/۳٪ برای سوخت بوتان است. علت این پدیده کاهش غلظت گونه‌های حاضر در احتراق و کاهش شدت واکنش‌ها می‌باشد که منجر به کاهش دمای ماکزیمم می‌گردد. از طرفی رقیق‌سازی باعث کاهش ارزش حرارتی سوخت رقیق‌شده می‌شود که منجر به کاهش دمای ماکزیمم می‌گردد.

در یک کسر مولی خاص رقیق‌کننده (به عنوان مثال آرگون در شکل (۳-الف)) سوخت متان، دمای ماکزیمم بیشتری نسبت به اتان و سوخت اتان دمای ماکزیمم بیشتری نسبت به پروپان و همچنین سوخت پروپان دمای ماکزیمم بیشتری نسبت به بوتان را نشان می‌دهد. ارزش حرارتی بالاتر متان نسبت به اتان باعث می‌شود که شعله‌ی این سوخت، ماکزیمم دمای بیشتری را در یک کسر مولی یکسان ایجاد کند. این مطلب در مورد سایر سوخت‌های مورد مطالعه نیز صادق است و سوختی که ارزش



(الف)



(ب)

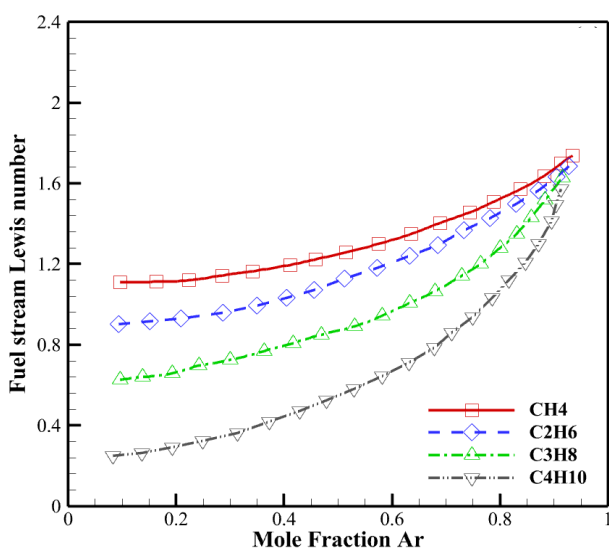
شکل ۳ منحنی کسر مولی رقیق‌کننده بر حسب دمای ماکزیمم در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم

جدول ۱ ارزش حرارتی بالایی و پایینی سوخت‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

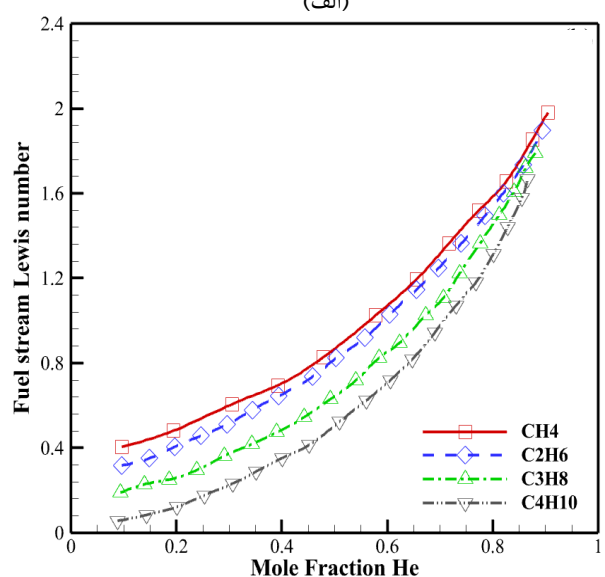
ردیف	نام سوخت	فرمول شیمیایی	ارزش حرارتی	
			بالایی MJ/kg	پایینی MJ/kg
۱	متان	CH ₄	۵۵/۵۰	۵۰/۰۰
۲	اتان	C ₂ H ₆	۵۱/۹۰	۴۷/۶۲
۳	پروپان	C ₃ H ₈	۵۰/۳۵	۴۶/۳۵
۴	بوتان	C ₄ H ₁₀	۴۹/۵۰	۴۵/۷۵

نفوذی نزدیک به خاموشی دارند. از طرفی عدد لوئیس سوخت در دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم در شرایط یکسان رقیق‌سازی اختلاف زیادی دارد. برای درک بهتر عدد لوئیس سوخت را در حالت حداقل مقدار رقیق‌سازی برای شکل‌های ۴- الف و ۴- ب مقایسه کنید. عدد لوئیس سوخت با حداقل رقیق‌سازی با آرگون بین ۰/۳ تا ۱/۲ و با حداقل رقیق‌سازی با هلیوم در حدود کمتر از ۰/۴ است. بنابراین نیاز به بررسی فرایند احتراق به کمک یک عدد لوئیس موثر (رابطه‌ی (۱۴)) است تا بتوان درک صحیحی از رفتار شعله و حد خاموشی آن داشت.

شکل (۵) تغییرات عدد لوئیس موثر را بر حسب کسر مولی رقیق‌کننده در دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم برای سوخت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

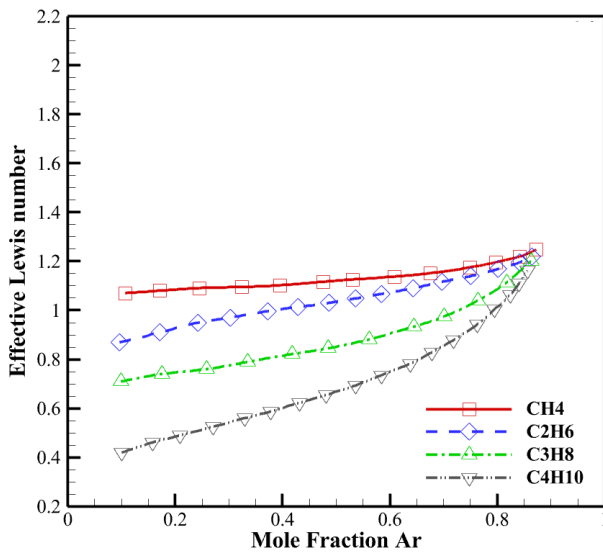
شکل ۴ منحنی‌های عدد لوئیس سوخت بر حسب کسر مولی رقیق‌کننده؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم

همه منحنی‌های موجود در شکل (۳) با افزایش درصد رقیق‌سازی به سمت هم متمایل می‌شوند که به دلیل آن است که افزایش درصد رقیق‌سازی تا مقادیر بالا باعث می‌شود که سوخت‌ها به مقدار زیادی رقیق شده و دمای ماکزیمم سوخت‌های مختلف مورد مطالعه تا حدی از نوع سوخت مستقل شده و رفتار مشابهی را نشان دهند. این موضوع در حالت رقیق‌سازی با آرگون بیشتر به چشم می‌خورد (شکل ۳- الف).

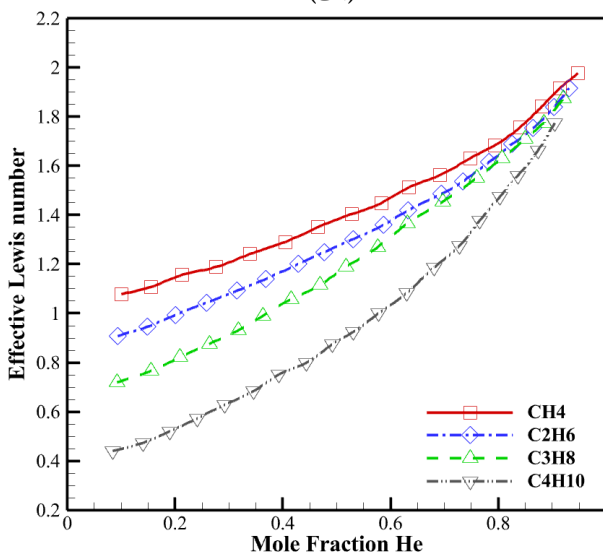
عدد لوئیس سوخت به دلیل تفاوت در خواص نفوذی حرارتی و جرمی رقیق‌کننده‌ها، در دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم متفاوت است. اما با توجه به اینکه در طول کل آزمایش‌ها اکسید کننده هوا است و رقیق‌سازی برای آن اتفاق نمی‌افتد، عدد لوئیس اکسید کننده ثابت و برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

منحنی تغییرات عدد لوئیس سوخت بر حسب کسر مولی رقیق‌کننده برای دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم در شکل (۴) نشان داده شده است. در هر دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم، عدد لوئیس سوخت با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده افزایش می‌یابد و این به معنی آن است که با افزایش درصد رقیق‌کننده نفوذ حرارتی نسبت به نفوذ جرمی در حال افزایش است. عدد لوئیس کمتر، از طریق افزایش دما به خاطر افزایش نفوذ جرمی، شعله را در برابر خاموشی تقویت می‌کند و برعکس عدد لوئیس بیشتر، شعله را در برابر خاموشی ضعیف می‌کند. بیشترین میزان افزایش عدد لوئیس سوخت مربوط به سوخت بوتان است که در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون از ۰/۲۵ به ۱/۵۷ و در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم از ۰/۰۶ به ۱/۶۷ می‌رسد.

هنگامی که شعله‌های نفوذی به شرایط خاموشی نزدیک می‌شوند، ممکن است احتراق ناقص صورت گیرد و برخی واکنش دهنده‌ها تا حدی از منطقه واکنش نشت کنند. بنابراین قبل از سوختن، اختلاط سوخت و اکسید کننده رخ می‌دهد. این امر منجر به احتراق پیش آمیخته می‌شود. در این حالت، عدد لوئیس واکنش دهنده‌های نشت یافته، اثرات قابل توجهی بر شعله‌های

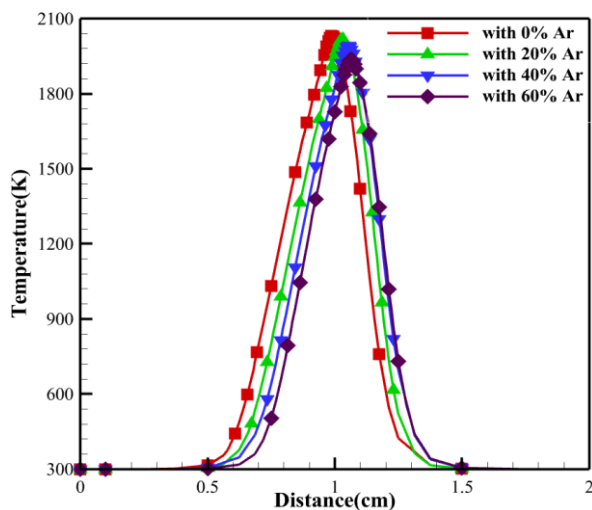


(الف)



(ب)

شکل ۵ منحنی‌های عدد لوئیس موثر برحسب کسر مولی رقیق‌کننده؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم



شکل ۶ منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دهانه‌ی دو نازل برای سوخت متان با رقیق‌سازی آرگون

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، برای هر دو حالت رقیق‌سازی و برای سوخت‌های مورد مطالعه، عدد لوئیس موثر با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده، افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش عدد لوئیس موثر مربوط به سوخت بوتان است که در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون از ۰٫۴۲ به ۱٫۱۶ و در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم از ۰٫۴۴ به ۱٫۷۷ می‌رسد. با افزایش درصد رقیق‌سازی، منحنی‌های سوخت‌های مورد مطالعه به سمت همدیگر متمایل می‌شوند که این موضوع و علت آن در شکل (۳) نیز اشاره شده است.

روند تغییرات منحنی‌ها در شکل (۵) مشابه با شکل (۴) است. اما باید دقت داشت که بر خلاف شکل (۴)، مقدار عدد لوئیس موثر در حداقل رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم برای هر سوخت مورد مطالعه با دقت خوبی برابر است و این نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب عدد لوئیس موثر در تحلیل شعله است. برای هر سوخت به طور جداگانه، در کل بازه‌ی کسر مولی رقیق‌کننده، عدد لوئیس موثر در حالت رقیق‌سازی با هلیوم، بزرگتر از عدد لوئیس موثر در حالت رقیق‌سازی با آرگون است. این به معنی دمای پایین‌تر شعله‌های رقیق‌شده با هلیوم است و نرخ کرنش خاموشی کمتر این شعله‌ها را نیز توجیه می‌کند.

افزایش کسر مولی رقیق‌کننده برای یک سوخت خاص باعث می‌شود که اختلاف میان عدد لوئیس موثر سوخت رقیق‌شده با آرگون و عدد لوئیس موثر سوخت رقیق‌شده با هلیوم، رفته رفته افزایش یابد. این روند به خوبی، روند تغییرات منحنی‌های شکل (۲) را تایید می‌کند که در آن اختلاف نرخ کرنش خاموشی بین شعله‌های رقیق‌شده با آرگون و هلیوم با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده برای هر دو شعله‌ی متان و پروپان افزایش می‌یابد. این روند با عدد لوئیس موثر شکل (۵) نیز قابل توضیح است، زیرا شعله‌های با مقادیر کم عدد لوئیس موثر، منجر به دمای شعله بالاتر می‌شوند و بنابراین برای خاموش شدن به نرخ کرنش بیشتری نیاز دارند.

شکل (۶) منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دهانه‌ی دو نازل در هندسه‌ی جریان مخالف برای سوخت متان در مقادیر مختلف درصد رقیق‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیمم دما با افزایش درصد رقیق‌سازی به میزان ۹۴K (معادل ۰٫۵٪) کاهش می‌یابد. همچنین موقعیت ماکزیمم دما به سمت اکسیدکننده حرکت می‌کند که به دلیل کاهش واکنش‌های شکست زنجیره‌های اتم سوخت و متعاقب آن کاهش تولید رادیکال‌های فعال H و OH است. با کاهش این رادیکال‌های فعال، سوخت کمتر تحت تاثیر آن‌ها قرار گرفته و نفوذ بیشتری در سمت اکسیدکننده دارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر عدد لوئیس و رقیق سازی سوخت بر حد خاموشی شعله‌ی جریان مخالف نفوذی، مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا از چهار سوخت متان، اتان، پروپان و بوتان و دو رقیق کننده‌ی آرگون و هلیوم استفاده گردید. نرخ کرنش در حالت افزودن هلیوم به جریان سوخت همواره کمتر از حالت افزودن آرگون به جریان سوخت با درصد رقیق سازی یکسان است.

در مقایسه با تحقیقات قبلی، برای تحلیل بهتر و دقیق تر نتایج، از عدد لوئیس موثر برای ارائه‌ی نتایج استفاده گردید. عدد لوئیس موثر با افزایش کسر مولی رقیق کننده، افزایش می‌یابد که منجر به کاهش دمای ماکزیمم خواهد شد و حد خاموشی شعله را تضعیف می‌کند. بیشترین مقدار افزایش عدد لوئیس مربوط به سوخت بوتان است. این مقدار در حضور رقیق کننده‌ی آرگون از ۰/۴۲ به ۱/۱۶ و در حضور رقیق کننده‌ی هلیوم از ۰/۴۴ به ۱/۷۷ می‌رسد. عدد لوئیس موثر برای سوخت‌های مختلف مورد مطالعه همواره در کل سطح رقیق سازی با آرگون کمتر از حالت رقیق سازی با هلیوم است و این موضوع دمای ماکزیمم بالاتر شعله در حالت رقیق سازی با آرگون را توجیه می‌کند. افزایش نرخ کرنش، ماکزیمم دما را کاهش می‌دهد. حد خاموشی شعله در حضور رقیق کننده‌ی هلیوم، کمتر از حد خاموشی شعله در حضور رقیق کننده‌ی آرگون است و به طور کلی ماکزیمم دما در شرایط یکسان در حضور رقیق کننده‌ی آرگون بیشتر از ماکزیمم دما در حضور رقیق کننده‌ی هلیوم است.

۵- فهرست علائم و اختصارات

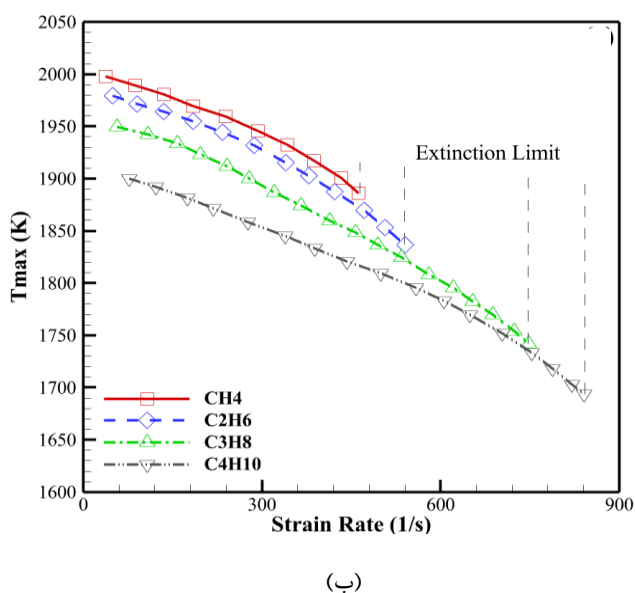
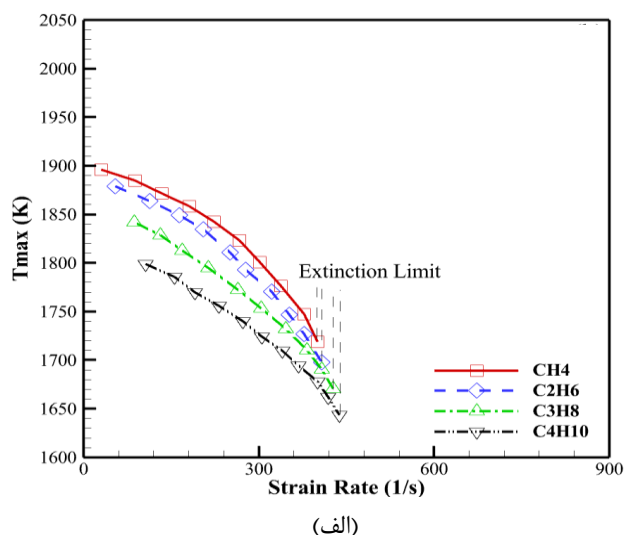
فهرست علائم و اختصارات مورد استفاده در روابط و معادلات پژوهش حاضر به شرح زیر است.

علائم انگلیسی

A	نسبت هم ارزی (Kg/Kg)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فشار ثابت (J/kg.K)
D	نفوذ جرمی (m^2/s)
D_{kj}	ضریب نفوذ چند جزئی (m^2/s)
D_k^T	ضریب نفوذ حرارتی (Kg/m.s)
D_{km}	ضریب نفوذ میانگین ترکیب (m^2/s)
D_{jk}	ضریب نفوذ دوتایی (m^2/s)
h	آنتالپی (J/Kg)
Le	عدد لوئیس (بدون بعد)
P	فشار (Pa)
T	دما (K)
u	مولفه‌ی سرعت شعاعی (m/s)

در ادامه به بررسی دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در حد خاموشی شعله برای سوخت‌های مورد مطالعه در حالت‌های رقیق سازی با آرگون و هلیوم پرداخته می‌شود (شکل ۷). مقدار رقیق سازی در منحنی‌های این شکل ۴۰٪ در نظر گرفته شده است.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیمم دما با افزایش نرخ کرنش، کاهش می‌یابد. برای هر سوخت به طور جداگانه، منحنی ماکزیمم دما با رقیق سازی هلیوم، مقادیر کمتری را نسبت به منحنی ماکزیمم دما با رقیق سازی آرگون نشان می‌دهد. این موضوع حتی در نرخ کرنش‌های کم نیز به چشم می‌خورد. نرخ کرنش خاموشی برای سوخت‌های مختلف مورد مطالعه، در حالت رقیق سازی با هلیوم کمتر از نرخ کرنش خاموشی در حالت رقیق سازی با آرگون است که به این موضوع در تحلیل نتایج شکل (۵) نیز اشاره شده بود.



شکل ۷ منحنی‌های دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش؛ الف- با رقیق کننده‌ی آرگون ب- با رقیق کننده‌ی هلیوم

numbers," *Combustion Theory and Modelling*, vol. 3, no. 1, p. 123, 1999, doi: [10.1088/1364-7830/3/1/007](https://doi.org/10.1088/1364-7830/3/1/007).

- [7] S. Xie, Z. Lu, and Z. Chen, "Effects of strain rate and Lewis number on forced ignition of laminar counterflow diffusion flames," *Combustion and Flame*, vol. 226, pp. 302-314, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.12.027>.

- [8] S. Akbari, M. F. Farahani, S. Sadeghi, M. Hajivand, F. Xu, E. Mohtarami, and M. Bidabadi, "Pulsating diffusion flames fed with biomass particles in counter-flow arrangement: Zeldovich and Lewis numbers effects," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101263, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101263>.

- [9] M. Fan, S. Shao, H. Wang, and Y. Lu, "Numerical analysis of hydrogen-oxygen hydrothermal combustion: Laminar counterflow diffusion flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 278-292, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.214>.

- [10] P. Kumar and A. Kumar, "Effects of fuel Lewis number on self-propagating flame spread over thin solid fuels in microgravity," *Combustion and Flame*, vol. 219, pp. 293-311, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.05.021>.

- [11] A. Potnis, V. R. Unni, H. G. Im, and A. Saha, "Extinction of non-equidiffusive premixed flames with oscillating strain rates," *Combustion and Flame*, vol. 234, p. 111617, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111617>.

- [12] R. L. Soares-Júnior and A. J. Leiroz, "A numerical study on preferential diffusion effects in coflowing laminar reacting jets," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 1, p. 12, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03309-6>.

- [13] D. Bhatt and S. Chakravarthy, "Nonlinear Flame Dynamics for Laminar Flame in a Co-flow Mixing Layer with Widely Varying Premixedness: Preferential Diffusion and Stoichiometry Effects," *Combustion Science and Technology*, vol. 194, no. 7, pp. 1321-1339, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1811699>.

- [14] T. Akiba, A. Tsunoda, T. Tezuka, Y. Morii, H. Nakamura, and K. Maruta, "DMD analysis on sporadic flame behaviors in low-Lewis-number counterflow under microgravity," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 40, no. 1-4, p. 105233, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105233>.

v مولفه‌ی سرعت محوری (m/s)

V سرعت نفوذی (m/s)

W وزن مولکولی ($Kg/Kmol$)

\bar{W} وزن مولکولی متوسط ($Kg/Kmol$)

X کسر مولی ($Kmol/Kmol$)

Y کسر جرمی (kg/kg)

علائم یونانی

ρ چگالی (kg/m^3)

μ لزجت دینامیکی ($N.s/m^2$)

λ ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.K$)

$\dot{\omega}$ نرخ تولید یا مصرف گونه ($Kmol/s.m^3$)

α نفوذ حرارتی (m^2/s)

u نسبت جرمی اکسید کننده به سوخت (KgO/KgF)

زیرنویس‌ها

e مؤثر

F سوخت

k گونه‌ی

O اکسیدکننده

۶- مراجع

- [1] R.-H. Chen, J. F. Driscoll, J. Kelly, M. Namazian, and R. Schefer, "A comparison of bluff-body and swirl-stabilized flames," *Combustion science and Technology*, vol. 71, no. 4-6, pp. 197-217, 1990, doi: <https://doi.org/10.1080/00102209008951632>.
- [2] J. Khadem and A. Asadi, "Numerical Study on Counterflow Diffusion Flames of Natural Gas with CO2 Dilution," *Fuel and Combustion*, vol. 4, no. 2, pp. 17-28, 2011, [In Persian], doi: https://www.jfnc.ir/article_46151_da9790e10f9d9af62e7c685c28ef336e.pdf.
- [3] A. Asadi and J. Khadem, "The Numerical Study of Extinction Limits and Structure of H2/O2 Counterflow Diffusion Flame with Ar and He Dilution," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 24, no. 2, pp. 57-66, 2013, [In Persian], doi: [10.22067/fum-mech.v24i2.27189](https://doi.org/10.22067/fum-mech.v24i2.27189).
- [4] C. Chen and S. Sohrab, "Simultaneous effects of fuel/oxidizer concentrations on the extinction of counterflow diffusion flames," *Combustion and flame*, vol. 86, no. 4, pp. 383-393, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90131-T](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90131-T).
- [5] M. Chaos and R.-H. Chen, "An experimental study of pulsating instability in near-limit laminar nonpremixed flames," *Combustion science and technology*, vol. 176, no. 8, pp. 1191-1215, 2004, doi: <https://doi.org/10.1080/00102200490457394>.
- [6] J. Kim and S. Lee, "Diffusional-thermal instability in strained diffusion flames with unequal Lewis

- high Reynolds number," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 21, no. 2, pp. 251-253, 1978, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90230-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(78)90230-2).
- [19] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, and F. M. Rupley, "OPPDIF: A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames," Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States), 1997, <https://doi.org/10.2172/568983>.
- [20] R.-H. Chen, M. Chaos, and A. Kothawala, "Lewis number effects in laminar diffusion flames near and away from extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, no. 1, pp. 1231-1237, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.101>.
- [21] <https://creckmodeling.chem.polimi.it/menu-kinetics/menu-kinetics-detailed-mechanisms/>.
- [15] M. F. Farahani, S. Akbari, and K. Hosseinzadeh, "Evaluation of thermal radiation and Lewis number effects on oscillatory thermal-diffusive instabilities of counterflow premixed flame fed with moisty biomass particles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 58, p. 104369, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104369>.
- [16] R. Stephen, "Turns. An introduction to combustion: concepts and applications," *Mechanical Engineering Series. McGraw Hill*, p. 51, 2000, doi: [OCLC: 660161844](https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104369).
- [17] T. V. Kármán, "Über laminare und turbulente Reibung," *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 1, no. 4, pp. 233-252, 1921, <https://doi.org/10.1002/zamm.19210010401>.
- [18] K. Seshadri and F. Williams, "Laminar flow between parallel plates with injection of a reactant at

ردیابی مسیر خودروی خودران جهت انجام مانور حفظ خط با استفاده از روش کنترل پیش بین مدل تطبیقی (AMPC)

چکیده: خودروهای خودران با هدف بهبود ایمنی جاده ها، مشکلات ترافیکی و راحتی مسافران طراحی شده اند. برای این منظور، سیستم های حفظ خط (LK) راهکارهای مهم و مناسبی هستند. وظیفه اصلی این قبیل از خودروها، پیش بینی فعالیت ها و اهداف عابران پیاده و سایر وسایل نقلیه می باشد. این پژوهش به پیاده سازی مدلی جهت توسعه عملکرد حفظ خط برای یک خودروی خودران می پردازد. در واقع مدل سازی و تشخیص خط با جعبه ابزار سیستم رانندگی خودکار در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۲۲ انجام شده است که امکان توسعه خودروهای خودران را با ارائه الگوریتم های بینایی کامپیوتری فراهم می کند. همچنین با استفاده از اطلاعات به دست آمده از فاز تشخیص خط، مسیر لازم برای مکانیزم حفظ خط ایجاد خواهد شد. در این پژوهش به منظور دنبال کردن مسیر، از یک کنترلر با استفاده از تئوری کنترل پیش بینی مدل (MPC) استفاده شده است، به طوریکه پس از محاسبه مقادیر زاویه فرمان، خودروی خودران مسیر پیش بینی شده را دنبال خواهد نمود. در نهایت نتایج روش کنترلی پیشنهادی یعنی روش کنترل پیش بینی مدل تطبیقی (AMPC) با نتایج حاصل از روش کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) صحت سنجی و ارزیابی می شوند.

واژه های راهنما: خودروی خودران، حفظ خط (LK)، روش کنترل پیش بینی مدل (MPC)، زاویه فرمان

علی ریزهوندی
دانشجوی دکتری

شهرام آزادی*

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی خواجه
نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

Ali Rizehvandi
PhD Student

Shahram Azadi*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, K. N.
Toosi University of
Technology, Tehran,
Iran

Tracking of autonomous vehicle path to perform the lane keeping maneuver using the Adaptive Model Predictive Control (AMPC) method

Abstract: Autonomous vehicles are designed to improve road safety, traffic problems and passenger comfort. For this purpose, lane keeping (LK) systems are important and suitable solutions. The main task of such cars is to predict the activities and goals of pedestrians and other vehicles. This research deals with the implementation of a model to develop the lane keeping (LK) function for an autonomous car. In fact, modeling and lane detection have been done with the automatic driving system toolbox in MATLAB R2022a software, which enables the development of self-driving cars by providing computer vision algorithms. Also, by using the information obtained from the lane detection phase, the necessary path for the lane keeping mechanism will be created. In this research, in order to follow the path, a controller using Model Predictive Control (MPC) theory has been used, so that after calculating the values of the steering angle, the self-driving car will follow the predicted path. Finally, the results of the proposed control method, i.e., the adaptive model predictive control method (AMPC) are verified and evaluated with the results of the proportional-integral-derivative (PID) control method.

Keywords: Autonomous vehicle, Lane keeping, Model predictive control (MPC), Steering angle

۱- مقدمه

بر این اساس شش سطح تعریف شده است، از وضعیتی که در آن همه چیز توسط انسان کنترل می‌شود (سطح ۰) تا اتوماسیون کامل خودرو تحت هر شرایط خاصی از رانندگی (سطح ۵).

جدول ۱ دسته‌بندی سیستم‌های خودران

سطح ۰	نیازمند تسلط و کنترل کامل راننده و فاقد هرگونه تجهیزات کنترل خودکار
سطح ۱	دارای یک یا دو سیستم کنترل هوشمند مانند سیستم کروز کنترل
سطح ۲	دارای دو یا چند سیستم کنترل هوشمند مانند سیستم حفظ مسیر و سیستم کروز کنترل تطبیقی که در کار مشترک با یکدیگر، از دقت مورد نیاز راننده می‌کاهند- مانند سیستم اتوپایلوت تسلا
سطح ۳	در این سطح خودرو به تجهیزاتی مجهز است که این امکان را برای راننده فراهم می‌سازد که در طی زمان مشخصی خودرو را به حال خود رها سازد و خودرو بدون نیاز به راننده به مسیر خود ادامه دهد و سپس راننده در یک موعد مناسب کنترل خودرو را مجدداً به دست گیرد- مانند خودروی لکسوس گوگل
سطح ۴	در این سطح خودرو تمام خودکار بوده که بدون حضور راننده در جاده حرکت کرده و کلیه وظایف رانندگی را بی نیاز از عامل انسانی به‌طور مستقیم انجام می‌دهد.
سطح ۵	در این سطح خودرو کاملاً خودران بوده و دیگر نیازی به تجهیزات رانندگی مانند پدال گاز و فرمان نبوده و راننده عملاً به یک مسافر تبدیل می‌شود.

در سرتاسر جهان، بسیاری از مردم زمان زیادی را صرف رانندگی و فعالیت‌های مرتبط با آن می‌کنند. در واقع تصادفات رانندگی عامل اصلی مرگ و میر و جراحات در اکثر کشورها است. طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO) بیش از ۱ میلیون نفر در جاده‌ها جان خود را به دلیل تصادفات رانندگی از دست می‌دهند. به همین دلیل، در چند سال اخیر بسیاری از تحقیقات دانشگاهی و شرکت‌های خودروسازی بر توسعه سیستم‌های کمک راننده پیشرفته (ADAS) و سطوح مختلف سیستم‌های خودران متمرکز شده‌اند.

با توجه به رصدخانه ایمنی جاده اروپا (ERSO)، سیستم کمک راننده پیشرفته (ADAS) را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: «سیستم‌های ایمنی هوشمند مبتنی بر وسیله نقلیه که می‌تواند ایمنی جاده را از نظر اجتناب از تصادف، کاهش شدت تصادف و حفاظت و مراحل پس از تصادف بهبود بخشد [۱]. در واقع این سیستم را می‌توان به عنوان سیستم‌های یکپارچه درون خودرو تعریف کرد که وظیفه اصلی آن کمک به راننده در هنگام وقوع تصادف می‌باشد.

خودروهای خودران را می‌توان وسایل نقلیه‌ای در نظر گرفت که بدون دخالت انسان، با استفاده از الگوریتم‌های اجرا شده توسط پردازنده برای شبیه‌سازی رفتار راننده و تصمیم‌گیری، وظیفه حمل‌ونقل را انجام می‌دهند. برای دستیابی به خودروهای خودران، نیاز به کسب اطلاعات محیطی از انواع حسگرها مانند لیدار، رادار، دوربین و GPS می‌باشد. الگوریتم‌های ادراک امکان تحقق برنامه‌ریزی مسیر و مرحله کنترل را می‌دهند. آنها عملکردهای مختلفی مانند حفظ خطوط، توقف اضطراری، پارک خودرو و اجتناب از موانع را انجام می‌دهند. این توابع سیگنال لازم را برای محرک‌هایی که به خودروی خودران فرمان می‌دهند، ارائه می‌کنند.

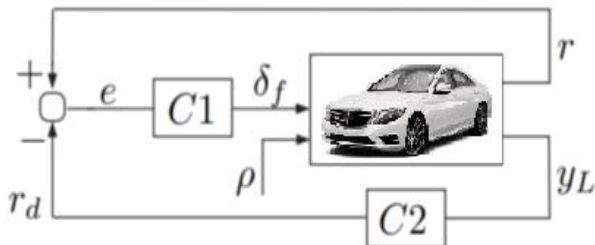
در سال ۲۰۱۴ انجمن مهندسان خودرو (SAE) یک طبقه-بندی را برای سیستم‌های خودران، مطابق جدول (۱) معرفی کرد. طبقه‌بندی بر اساس میزان مسئولیت و دقت مورد نیاز راننده است.

این پژوهش به توسعه عملکردهای تشخیص خط و حفظ خطوط می‌پردازد؛ به طوری که به یک خودروی خودران اجازه می‌دهد تا خط جلوی اتومبیل را تشخیص دهد و یک مسیر خاص تولید شده با اطلاعات محیط جاده را دنبال کند. سیستم رانندگی خودکار با استفاده از نرم افزار متلب و سیمولینک نسخه ۲۰۲۲ پیاده‌سازی شده است و به دو قسمت بلوک تشخیص خط و بلوک کنترل نگهدارنده خط متصل به یکدیگر تقسیم شده است (مطابق شکل (۱)).



شکل ۱ بلوک‌های تشخیص خط و حفظ خط

پارامتر اول توسط یک ژيروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که پارامتر دوم توسط سنسور بینایی محاسبه می‌شود. در حقیقت کنترلر اول برای رد اغتشاشات ثابت و تأثیر تغییرات پارامتر در طول محاسبه زاویه فرمان استفاده، در حالی که کنترلر دوم با هدف کنترل اغتشاشات به کار برده شده است (مطابق با شکل (۲)).



شکل ۲ سیستم کنترلی مورد استفاده در خودروی خودران

بوجاربارو و همکاران حل مسائل مربوط به حفظ خط را با یک کنترلر پیش‌بینی مدل تطبیقی پیشنهاد کردند [۱۱]. در این پژوهش کنترلر طولی داده شده و سرعت طولی ثابت در نظر گرفته شده است. به همین دلیل، کار فقط بر روی توسعه کنترل حرکت جانبی خودرو متمرکز شده بود. هدف کنترلر پیشنهادی - بینی مدل (MPC) به حداقل رساندن انحراف جانبی از خط مرکزی و خطای زاویه انحراف خودرو بوده است. به‌طوریکه قیدها به تعدیل زاویه فرمان موجود در سیستم فرمان مربوط می‌شدند. نتایج گویای عملکرد مناسب کنترلر برای سناریوهایی با انحنای شدید در سرعت بالا است. همچنین یک استراتژی کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) غیرخطی برای کنترل فرمان خودروی خودران توسط لیوننت ارائه شد که الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده، زاویه فرمان چرخ جلو را محاسبه کرده و در نهایت تابع هزینه را به حداقل می‌رساند [۱۲].

در این پژوهش از روش کنترلر پیش‌بینی مدل تطبیقی (AMPC) برای ردیابی مسیر خودروی خودران جهت انجام مانور حفظ خط استفاده می‌شود؛ به‌طوریکه روش کنترلی پیشنهاد شده به خوبی و به‌طور بهتری نسبت به [۱۲] خودروی خودران را جهت انجام مانور یاد شده، کنترل می‌نماید.

نوآوری مطالعه حاضر نسبت به تحقیقات پیشین، از جمله [۱۲] کنترلر طولی و عرضی همزمان خودروی خودران با استفاده از روش کنترلر پیش‌بینی مدل تطبیقی (AMPC) جهت مانور حفظ خط و در نظر گرفتن انحنای مسیر در هنگام کنترل خودروی خودران همچنین پیاده‌سازی سیستم تشخیص خط با استفاده از جعبه ابزار سیستم رانندگی خودکار (Automated Driving System) در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۲۲ می‌باشد.

در ادامه اطلاعاتی در مورد بلوک کنترلی نگهدارنده خط که در این پژوهش استفاده می‌شود، ارائه خواهد شد. سپس، مدل دینامیکی مورد استفاده برای عملکرد کنترلی معرفی می‌شود و

در شکل (۱) کنترلر نگهدارنده خط از روش کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) برای کنترل عملکرد حفظ خط استفاده می‌کند. به‌طوریکه با کنترلر زاویه فرمان چرخ‌های جلو، سبب می‌شود که خودروی خودران مسیر منحنی را دنبال کند. برای محاسبه زاویه فرمان، کنترلر کننده پیش‌بینی مدل (MPC) تابع هزینه را که انحراف جانبی و زاویه انحراف نسبی را محاسبه می‌کند، به حداقل می‌رساند. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای توسعه سیستم حفظ خط انجام شده است.

سیستم حفظ خط نوعی فناوری ایمنی فعال است که به طور پیشگیرانه به راننده کمک می‌کند تا وسیله نقلیه را در مسیر خود نگه دارد [۳]. با حمایت از راننده با وظایف کنترلر جانبی، آسایش و ایمنی را ارتقا می‌دهد [۴]. سیستم کمکی حفظ خط (LKAS) با تنظیم فرمان برای نگه داشتن خودرو در خط خود، جابجایی ناخواسته خط را شناسایی می‌کند [۵]. همچنین دوربین به عنوان ورودی حسگر برای LKAS عمل می‌کند و خطوط و ویژگی‌های خطوط را تشخیص می‌دهد. اطلاعات از صحنه رانندگی خودرو مانند افست جانبی، زاویه سمت، انحنای خط و غیره، بازیابی شده و به کنترلر کننده LKAS [۶] ارسال می‌شود. این اطلاعات برای انجام تنظیمات برای حفظ وسیله نقلیه در وسط خط شناسایی شده استفاده می‌شود. ورودی‌های اضافی مانند فعال‌سازی چراغ‌های کناری و فرمان برای جلوگیری از مداخله غیرمجاز وسیله نقلیه بررسی می‌شوند [۷].

همچنین شو و همکاران بر روی یک کنترلر کننده برای پیاده‌سازی یک سیستم حفظ خط با استفاده از تئوری کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) مطالعاتی را انجام دادند [۸]. به‌طوریکه خروجی زاویه فرمان چرخ جلو است که عملکرد کنترلر کننده پیش‌بینی مدل (MPC) را به حداقل می‌رساند. تولید مسیر مرجع بر اساس پنج نقطه پیش‌نمایش از سنسورها انجام می‌گیرد. همچنین یک کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) خطی که سیستم‌های حفظ خط و اجتناب از مانع را برای جاده‌های با انحنای کم تشخیص می‌دهد توسط توری و همکاران ارائه شده است [۹]. کنترلر توسعه یافته در این کار به دو مرحله متوالی تقسیم شده است: مرحله اول پروفیل‌های ترمز یا دریچه گاز را بر اساس افق پیش‌بینی محاسبه می‌کند، سپس در مرحله دوم کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) را با استفاده از مدل‌های خطی متغیر با زمان که توسط پروفیل‌های مرحله اول به دست می‌آید، محقق می‌کند؛ به عبارت دیگر دستورات زاویه فرمان را بر اساس دستور بهینه شکست یا دریچه گاز تخمین می‌زند.

یک رویکرد متفاوت دیگر برای پیش‌بینی یک مسیر برای خودرو خودران توسط مارینو و همکاران در سال ۲۰۰۹ پیشنهاد شد [۱۰]. در این پژوهش به مطالعه یک کنترلر تناسبی-مشتقی-انتگرالی (PID) که از سیستم بینایی استفاده می‌کند پرداخته شد، به‌طوریکه ورودی کنترلر زاویه فرمان چرخ جلو است که بر اساس نرخ انحراف و افست جانبی طراحی شده است.

در این پژوهش، مدل سینماتیکی خودرو به عنوان یک فرمان و فقط چرخ جلو در نظر گرفته شده است؛ بنابراین مقدار زاویه فرمان چرخ عقب یا δ_r صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نقطه C در شکل (۳)، مرکز جرم (C.M) خودرو را نشان می‌دهد. فواصل این نقطه تا نقاط A و B به ترتیب با l_f و l_r نشان داده شده است. مجموع این دو عبارت طول خودرو می‌باشد که با L نشان داده می‌شود.

$$L = l_f + l_r$$

از آنجایی که خودرو دارای حرکت مسطح است، سه مختصات برای توصیف حرکت خودرو لازم است: یعنی X، Y و Ψ . مختصات اینرسی مرکز جرم خودرو و Ψ جهت خودرو را نشان داده که به آن زاویه انحراف (یاو) می‌گویند. همچنین بردار V سرعت مرکز جرم خودرو را نشان می‌دهد. این بردار با محور طولی خودرو زاویه β یا زاویه لغزش ایجاد می‌کند. نقطه O مرکز چرخش خودرو است. خط OC نیز همان شعاع مسیر خودرو (R) است و عمود بر بردار سرعت V می‌باشد. معادلات کلی مدل سینماتیکی خودرو را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

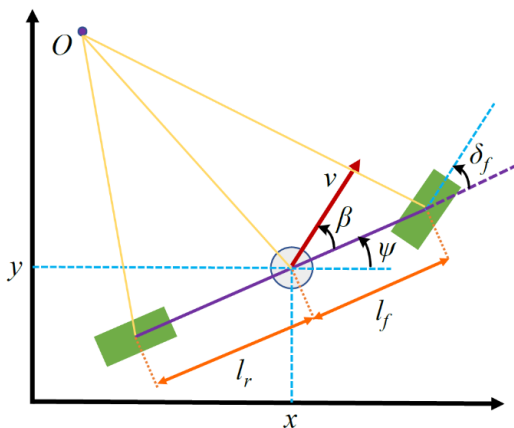
$$\dot{X} = V \cos(\Psi + \beta) \quad (1)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\Psi + \beta) \quad (2)$$

$$\dot{\Psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} \tan(\delta_f) \quad (3)$$

۲-۲- مدل دینامیکی خودرو

هنگامی که سرعت خودرو افزایش می‌یابد و انحنای مسیر متناسب با زمان تغییر می‌کند به دلیل ایجاد لغزش‌های جزئی دیگر بردار سرعت هر چرخ با صفحه تقارن چرخ موازی نمی‌باشد.



شکل ۴ مدل دینامیکی خودرو

سپس به تئوری کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) برای اجرای مانور حفظ خط پرداخته می‌شود. پس از آن نحوه شبیه‌سازی مسئله در نرم افزار متلب مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفته و با کنترلر PID مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

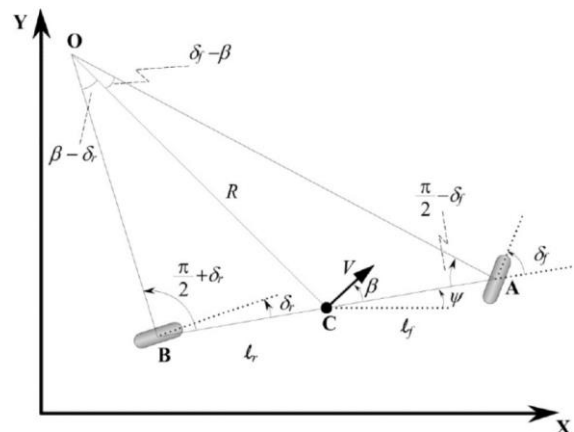
۲- مدل سازی

معرفی دینامیک جانبی خودرو در داخل کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) سبب می‌شود که عملکرد کنترلر با دقت بیشتری برای مانور حفظ خط انجام پذیرد. در واقع در طول طراحی کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) در نظر گرفتن مدل دینامیک خودرو برای انجام مانور رانندگی مستقل و پیش‌بینی دقیق تغییرات حرکت خودرو بسیار مهم و ضروری می‌باشد. از این‌رو در ادامه، هر دو مدل سینماتیکی و دینامیکی خودرو با مفروضات و قیده‌های آن‌ها ارائه می‌شوند.

۲-۱- مدل سینماتیکی خودرو

سینماتیک شاخه‌ای از مکانیک کلاسیک است که حرکت نقاط، اجسام و گروه‌های اجسام را بدون در نظر گرفتن نیروهایی که بر حرکت تأثیر می‌گذارند توضیح می‌دهد. معادلات حرکت توصیف شده توسط یک مدل سینماتیکی صرفاً به روابط هندسی که سیستم را کنترل می‌کنند اشاره دارد. در حقیقت، شروع یک مسئله سینماتیک شامل توصیف هندسه سیستم و تعیین مقادیر اولیه موقعیت، سرعت و شتاب نقاط سیستم می‌باشد.

در این پژوهش مطابق شکل (۳) مدل سینماتیکی برای خودرو در نظر گرفته شده است. این شکل یک مدل دو چرخه را نشان می‌دهد که در آن دو چرخ جلو و دو چرخ عقب به ترتیب با یک تاپر مرکزی در نقاط A و B نشان داده شده‌اند. زاویه فرمان برای چرخ جلو با δ_f نشان داده شده است، در حالی که δ_r زوایای فرمان برای چرخ عقب را نشان می‌دهد.



شکل ۳ مدل سینماتیکی خودرو

با اعمال قانون دوم نیوتن برای حرکت خودرو در امتداد محور y و محور z ، روابط (۷) و (۸) حاصل می‌شوند.

$$m\ddot{e}_1 = 2C_{\alpha f}\delta_f + \dot{e}_1 \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f} - \frac{2}{V_x}C_{\alpha r} \right] + e_2 \left[2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r} \right] + \dot{e}_2 \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f + \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r \right] + \Psi_{des} \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f + \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r \right] \quad (۷)$$

$$I_z\ddot{e}_2 = 2C_{\alpha f}l_f\delta_f + \dot{e}_1 \left[-\frac{2}{V_x}l_fC_{\alpha f} + \frac{2}{V_x}l_rC_{\alpha r} \right] + e_2 \left[2C_{\alpha f}l_f + 2C_{\alpha r}l_r \right] + \dot{e}_2 \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f^2 - \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r^2 \right] - I_z\dot{\Psi}_{des} + \Psi_{des} \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f^2 + \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r^2 \right] \quad (۸)$$

در نهایت، معادلات فضای حالت بر حسب متغیرهای خطا به صورت زیر باز تعریف می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \ddot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \ddot{e}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} & 0 & \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{I_zV_x} & \frac{-2C_{\alpha f} - 2C_{\alpha r}}{I_z} & \frac{2l_f^2C_{\alpha f} + 2l_r^2C_{\alpha r}}{I_zV_x} \\ 0 & \frac{-2C_{\alpha f}l_f + 2C_{\alpha r}l_r}{mV_x} - V_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2L_fC_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} -2C_{\alpha f}l_f + 2C_{\alpha r}l_r - V_x \\ 0 \\ -2C_{\alpha f}l_f^2 - 2C_{\alpha r}l_r^2 \\ 0 \end{bmatrix} \Psi_{des} \quad (۹)$$

۳- طراحی کنترلر

در این بخش تئوری روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC) مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا، ایده اصلی روش کنترل پیش‌بین مدل و معماری مورد استفاده برای خودروهای خودران مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس کنترلر مورد استفاده در این پژوهش مورد تبیین قرار می‌گیرد.

۳-۱- روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC)

کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) یک تکنیک پیشرفته است که برای خودکارسازی فرآیندهای کنترل صنعتی با در نظر گرفتن

بنابراین، به جای اتخاذ یک مدل سینماتیکی، یک مدل دینامیکی برای مطالعه حرکت جانبی خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این پژوهش از مدل دو درجه آزادی یا مدل دوچرخه برای بیان دینامیک خودرو (مطابق با شکل ۴) استفاده شده است. همچنین معادلات فضای حالت دینامیک خودرو مطابق زیر می‌باشند:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} & 0 & V_x + \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{I_zV_x} & 0 & \frac{2l_f^2C_{\alpha f} + 2l_r^2C_{\alpha r}}{I_zV_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \Psi \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2L_fC_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (۴)$$

این معادله طبق [۱۱] یک مدل دینامیکی از حرکت جانبی و انحرافی خودرو را با در نظر گرفتن اثرات نیروهای تایلر، جرم خودرو، سرعت طولی و ورودی فرمان را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، معادله (۴) مدل دینامیکی یک خودرو را از نظر حرکت جانبی و انحرافی آن نشان می‌دهد که در آن $C_{\alpha r}$ و $C_{\alpha f}$ به ترتیب نشان‌دهنده سفتی پیچیدگی لاستیک‌های جلو و عقب است. همچنین m جرم خودرو، V_x سرعت طولی خودرو، همچنین L_f و L_r به ترتیب فاصله از مرکز جرم تا محورهای جلو و عقب است.

در این پژوهش، هدف پیاده‌سازی یک سیستم کنترل فرمان با استفاده از روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) برای مانور حفظ خط می‌باشد. بدین منظور، اتخاذ یک مدل دینامیکی برای خودرو بسیار حائز اهمیت است.

حال در ادامه انحراف جانبی e_1 و زاویه انحراف نسبی e_2 ، دوباره مدل‌سازی می‌شوند. به‌منظور تعریف مجدد مدل دینامیکی، سرعت طولی (V_x) و شعاع (R) ثابت در نظر گرفته شده‌اند. شعاع (R) را به‌صورت معکوس انحنای مسیر و همچنین نرخ انحراف خودرو را می‌توان به عنوان تابعی از انحنا مطابق زیر تعریف نمود:

$$\Psi_{des} = kV_x \quad (۵)$$

بنابراین شتاب مورد نظر خودرو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Psi_{des} \cdot V_x = kV_x^2 \quad (۶)$$

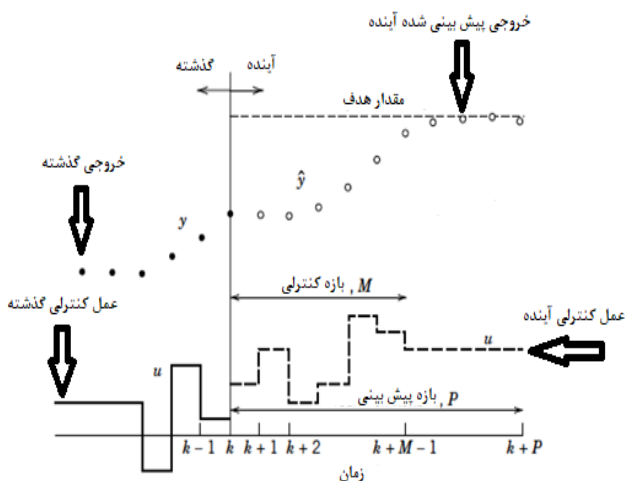
وضعیت خودرو را برای ایجاد شرایط اولیه جدید در هر گام زمانی را ارائه می‌کند. وظیفه سنسورها نیز دادن اطلاعات محیطی مانند مرزهای خطوط و موقعیت موانع می‌باشد.

کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) بر اساس یک افق محدود و با استفاده از یک رویکرد تکراری خروجی بهینه را به خودرو ارسال می‌کند. در واقع هدف اصلی آن محاسبه دنباله‌ای از حرکات کنترلی ناشی از تغییرات ورودی است، به طوری که خروجی پیش‌بینی شده بهینه به سمت نقطه تنظیم میل کند.

مطابق شکل (۶)، y خروجی واقعی، \hat{y} خروجی پیش‌بینی شده و u ورودی قابل تنظیم می‌باشد. در زمان نمونه‌گیری فعلی k ، مقدار اولیه سیستم است و کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) مجموعه‌ای از مقادیر ورودی $u(k+i-1)$ ، $i = 1, 2, \dots, M$ را محاسبه می‌کند که در آن M افق کنترلی نامیده می‌شود. در حقیقت، ورودی‌ها طوری محاسبه می‌شوند که مجموعه‌ای از خروجی‌های پیش‌بینی شده $\hat{y}(k+i)$ ، $i = 1, 2, \dots, P$ به صورت بهینه به نقطه تنظیم برسند. P افق پیش‌بینی می‌باشد و شامل تعداد گام‌های پیشرو برای نگاه کردن به آینده است.

معمولاً مقادیر افق کنترلی (M) و افق پیش‌بینی (P) با هم برابرند. در موقعیت‌های عملی، تنها اولین مقدار از کل مجموعه مقادیر P به عنوان ورودی سیستم پیاده‌سازی می‌شود، زیرا مدل فرآیند ساده‌سازی شده و دقیق نیست. علاوه بر این، وجود اغتشاشات را در فرآیند سبب می‌شود بین خروجی واقعی و پیش‌بینی شده خطا ایجاد شود.

به همین دلیل، حالت سیستم باید دوباره سنجیده شود تا به عنوان حالت اولیه برای مرحله بعدی اتخاذ شود. از این رو اطلاعات سیستم با یک بازخورد به بهینه‌ساز دینامیکی کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) گزارش شده و در نهایت سبب مقاوم شدن کنترلر می‌شود [۱۲]. به عبارت دیگر، هنگامی که حالت سیستم مجدداً نمونه‌برداری می‌شود، کل فرآیند محاسبات دوباره با شروع از حالت فعلی جدید مطابق شکل (۶) به‌روزرسانی می‌شود.



شکل ۶ مفهوم روش کنترل پیش‌بین مدل

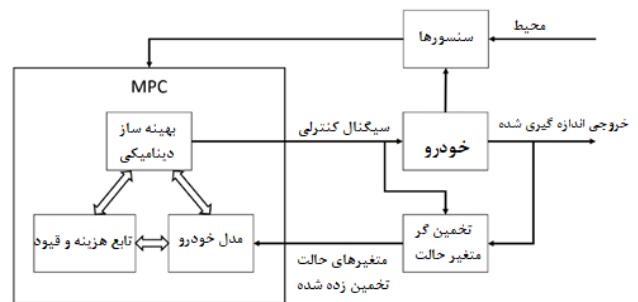
یک سری قیده‌های عملیاتی توسعه یافته است [۹]. کنترل‌کننده‌ای که توسط ریچالت پیاده‌سازی شده است، مدل کنترل ابتکاری پیش‌بینی‌کننده (MPHC) نامیده می‌شود، در حالی که فناوری توسعه‌یافته توسط کاتلر به عنوان کنترل ماتریس پویا (DMC) شناخته می‌شود. در دهه اخیر، استفاده از روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) در زمینه‌های الکترونیک و خودروهای خودران بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

این به این دلیل است که، مزیت اصلی روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC) بهینه‌سازی شکاف زمانی فعلی است در حالی که شکاف‌های زمانی آینده نیز در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) مزایای دیگری را نیز دارد؛ از جمله توانایی پیش‌بینی رویدادهای آینده و امکان انجام اقدامات کنترلی بر اساس آن و همچنین عملکرد بهتر در مسائل زمان واقعی نسبت به روش‌های دیگر.

- اهداف کلی یک کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) عبارتند از:
۱. جلوگیری از نقض قیده‌های ورودی و خروجی.
 ۲. بهینه‌سازی برخی از متغیرهای خروجی، در حالی که خروجی‌های دیگر در یک محدوده مشخص نگهداری می‌شوند.
 ۳. جلوگیری از حرکت بیش از حد متغیرهای ورودی.
 ۴. کنترل متغیرهای فرآیند در هنگام خاموشی یا در دسترس نبودن حسگرها.

سه مرحله اصلی در فرآیند یک کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) عبارتند از: مدل پیش‌بین، راه حل بهینه‌سازی و اصلاح بازخورد.

ساختار کلی یک کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) مورد استفاده برای خودروی خودران در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵ دیگرام بلوکی روش کنترل پیش‌بین مدل

در این پژوهش روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC) مورد استفاده دارای سه بلوک عملکردی اصلی است: بهینه‌ساز دینامیکی، مدل خودرو، تابع هزینه و قیده‌ها.

در این تحقیق خروجی کنترلر زاویه فرمان چرخ جلو بوده که ورودی کنترلی می‌باشد. همچنین وظیفه بهینه‌ساز دینامیکی، یافتن ورودی بهینه‌ای است که حداقل مقدار تابع هزینه را برآورده سازد. مدل خودرو نیز همان مدل دینامیکی خودرو است که در بخش قبل توضیح داده شد. همچنین برآوردگر حالت،

۳-۲- پیاده‌سازی روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC)

کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) پیشنهاد شده در این پژوهش مبتنی بر روش بهینه‌سازی چند مرحله‌ای و تصحیح بازخورد می‌باشد.

هدف کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) محاسبه زاویه فرمان بهینه برای انجام مانور حفظ خط می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، کنترلر، زاویه فرمان را با کمینه‌کردن تابع هزینه محاسبه می‌کند. مدل خطی توسعه‌یافته در کنترلر روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC)، سرعت طولی را ثابت فرض می‌کند. به همین دلیل، کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) برای تبدیل شدن به یک کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) تطبیقی، اصلاح شده تا بتواند مدل را به‌روزرسانی کرده، خروجی را پیش‌بینی و زاویه فرمان بهینه را در هر نمونه زمانی محاسبه نماید.

در واقع مسئله کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) به دو بخش تقسیم می‌شود:

- معادلات ریاضی مسئله: که در آن توضیح داده شده که چگونه مسئله کنترل پیش‌بین مدل (MPC) فرموله شده است.
- پیش‌بینی خروجی: که در آن نحوه محاسبه خروجی پیش‌بینی شده تعریف شده است. مدل فضای حالت کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) مطابق ذیل می‌باشد:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(x) + B_1 u(k) + B_2 v(k) \\ z(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (10)$$

که A ، B_1 ، B_2 و C به ترتیب ماتریس‌های حالت، ورودی و خروجی می‌باشند. ورودی‌ها عبارتند از: u و v که u زاویه فرمان خودرو (δ) است (ورودی کنترل شده)، در حالی که v حاصلضرب سرعت طولی در انحنای به‌دست آمده از سیستم تشخیص خط را نشان می‌دهد. در این پژوهش، سرعت طولی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین خروجی Z مربوط به انحراف جانبی e_1 و زاویه انحراف نسبی e_2 می‌باشد.

با توجه به مدل خطی تعریف شده در معادله (۱۰)، الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل در واقع حل مسئله بهینه‌سازی زیر (۱۱) در هر مرحله زمانی می‌باشد:

$$\begin{aligned} \min_u J &= \sum_{j=0}^N \|Z(k+j|k)\|_{R_{zz}} \\ &+ \|u(k+j|k)\|_{R_{uu}} \\ \text{s.t. } x(k+j+1|k) &= Ax(k+j|k) + \\ &B_1 u(k+j|k) + B_2 v(k+j|k) \\ x(k|k) &= x(k) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} z(k+j|k) &= Cx(k+j|k) \\ |u(k+j|k)| &\leq u_m \end{aligned}$$

این مسئله بهینه‌سازی در واقع به یافتن مقدار ورودی u می‌پردازد تا مجموع مقادیر وزنی بردار خروجی پیش‌بینی شده Z و بردار ورودی u را برای افق پیش‌بینی تعریف شده N به حداقل برساند.

بردار وزنی Z به صورت زیر (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\|Z(k+j|k)\|_{R_{zz}} = [z_1 \ z_2] \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن وزن‌های r_{11} و r_{22} تنظیم شده‌اند تا میرایی لازم را در خروجی مربوطه فراهم کنند.

پیش‌بینی خروجی

مقادیر خروجی پیش‌بینی شده $z(k+j|k)$ ، $j = 1, 2, \dots$ ، N ، که در آن N افق پیش‌بینی است با استفاده از مدل فضای حالت خطی طبق رابطه (۱۰) محاسبه شده‌اند. برای انجام محاسبات، مقادیر زیر باید شناخته شود:

- خروجی فعلی $z(k|k) = z(k)$
- ورودی اعمال شده $u(k|k) = u(k)$
- مقادیر ورودی پیش‌بینی شده $v(k+j|k)$ ، $j = 0, 1, 2, \dots, N$.

متغیرهای حالت پیش‌بین به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= Ax(k) + B_1 u(k|k) + B_2 v(k|k) \\ x(k+2|k) &= Ax(k+1|k) + B_1 u(k+1|k) + B_2 v(k+1|k) \\ &= A^2 x(k) + AB_1 u(k|k) + AB_2 v(k|k) + B_1 u(k+1|k) + B_2 v(k+1|k) \\ &\vdots \\ x(k+N|k) &= Ax(k+N-1|k) + B_1 u(k+N-1|k) + B_2 v(k+N-1|k) \\ &= A^N x(k) + A^{N-1} B_1 u(k|k) + A^{N-1} B_2 v(k|k) + A^{N-2} B_1 u(k+1|k) + A^{N-2} B_2 v(k+1|k) + \dots + B_1 u(k+N-1|k) + B_2 v(k+N-1|k) \end{aligned} \quad (13)$$

همچنین معادلات خروجی پیش‌بین مطابق (۱۴) می‌باشند:

$$\begin{aligned} z(k|k) &= Cx(k) \\ z(k+1|k) &= Cx(k+1|k) \\ z(k+2|k) &= Cx(k+2|k) \\ &\vdots \\ z(k+N|k) &= Cx(k+N|k) \end{aligned} \quad (14)$$

برای اینکه رابطه بین معادلات (۱۳) و (۱۴) واضح‌تر شود، خروجی پیش‌بینی آینده را می‌توان به صورت رابطه (۱۵) تعریف کرد:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ CB_2 & 0 & 0 & \dots \\ CAB_2 & CB_2 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N-1}B_2 & CA^{N-2}B_2 & CA^{N-3}B_2 & \dots \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$Z(k) = Gx(k) + HU(k) + EV(k) \quad (15)$$

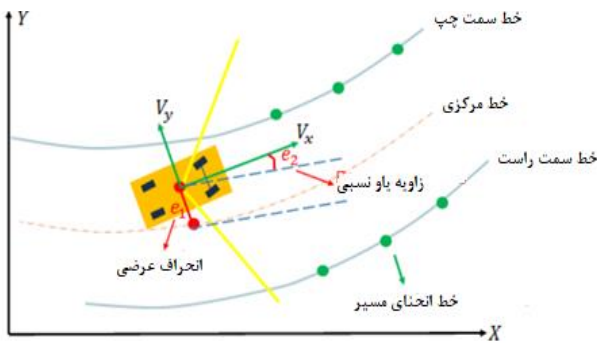
که $Z(k)$ بردار افزوده شده خروجی‌های پیش‌بینی شده، $U(k)$ بردار افزوده شده ورودی‌های آینده و $V(k)$ بردار افزوده شده اغتشاشات پیش‌بینی شده می‌باشند. بردارهای مذکور مطابق ذیل (۱۶) تعریف می‌شوند:

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این پژوهش، عامل (خودروی خودران) مجهز به سیستم کمکی حفظ خط (LKA) و همچنین حسگر دوربین است که انحراف جانبی و زاویه انحراف نسبی بین خط مرکزی و خودروی خودران را اندازه‌گیری می‌کند. این سنسور همچنین انحنای خط و مشتق انحنای آن را نیز اندازه‌گیری می‌کند. بسته به طول منحنی که سنسور مشاهده می‌کند، انحنای جلوی خودروی خودران را میتوان از انحنای فعلی و مشتق انحنای محاسبه کرد. در حقیقت سیستم حفظ خط (LKA) با تنظیم زاویه فرمان جلویی خودروی خودران، آن را در امتداد خط مرکزی در جاده حفظ می‌کند.

$$Z(k) \equiv \begin{bmatrix} z(k|k) \\ z(k+1|k) \\ \vdots \\ z(k+N|k) \end{bmatrix}; \quad U(k) \equiv \begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N|k) \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad V(k) \equiv \begin{bmatrix} v(k|k) \\ v(k+1|k) \\ \vdots \\ v(k+N|k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

همچنین ماتریس‌های G ، H و E مطابق (۱۷) می‌باشند:

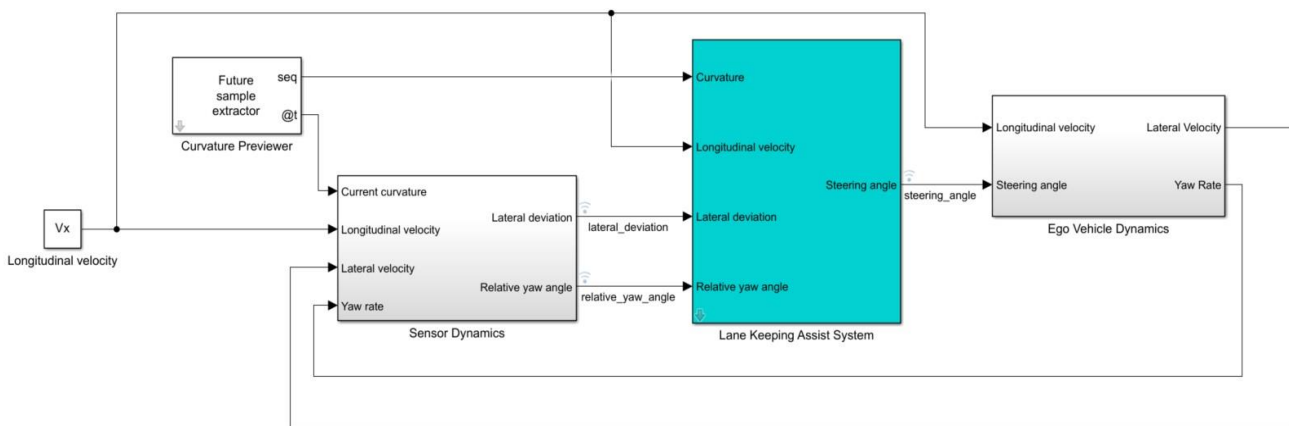


شکل ۷ هندسه حاکم بر مساله

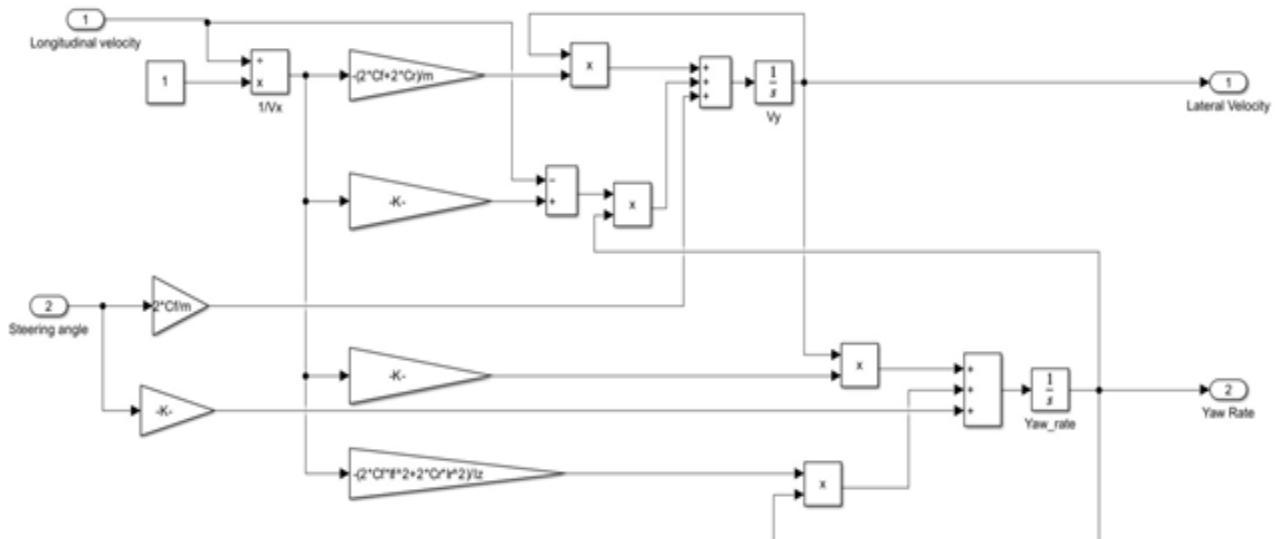
$$G = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB_1 & CB_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N-1}B_1 & CA^{N-2}B_1 & CA^{N-3}B_1 & \dots & CB_1 \end{bmatrix}$$

دیاگرام بلوکی سیستم حفظ خط در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین دیاگرام بلوکی سیستم دینامیکی خودرو (مدل دوچرخه) مطابق شکل (۹) می‌باشد.

در حقیقت هدف سیستم حفظ خط (LKA)، صفر شدن انحراف جانبی و تغییرات زاویه انحراف می‌باشد.



شکل ۸ دیاگرام بلوکی سیستم حفظ خط



شکل ۹ مدل دینامیکی ۲ درجه آزادی خودرو

در مطالعه حاضر، دینامیک طولی خودرو از دینامیک عرضی جدا شده است. بنابراین سرعت طولی ثابت فرض می‌شود. در حقیقت بلوک سیستم کمک راننده حفظ خط (Lane Keeping Assist System) برای کنترل دینامیک عرضی خودرو استفاده شده است.

بلوک مدل‌سازی سنسور (Sensor Dynamics) نیز انحراف جانبی و تغییرات زاویه انحراف را خروجی می‌دهد. دینامیک انحراف جانبی به صورت $\dot{e}_1 = V_x e_2 + V_y$ می‌باشد. دینامیک تغییرات زاویه انحراف نیز به صورت $\dot{e}_2 = r - V_x k$ است که k نشان‌دهنده انحنا می‌باشد که انحنای استفاده شده در این پژوهش بر اساس مانور تغییر خط دوگانه شبیه‌سازی شده است.

سیستم حفظ خط در محیط سیمولینک با استفاده از بلوک سیستم حفظ خط (LKA) مدل‌سازی شده است. ورودی‌های بلوک سیستم حفظ خط (LKA) عبارتند از:

- انحنای پیش‌نمایش شده (از تشخیص‌های خط)
- سرعت طولی عامل
- انحراف جانبی (از تشخیص خط)
- زاویه انحراف نسبی (از تشخیص خط)

خروجی سیستم سیستم حفظ خط (LKA) نیز زاویه فرمان چرخ‌های جلوی خودروی خودران می‌باشد.

نمودارهای سرعت جانبی، تغییرات زاویه انحراف و زاویه فرمان در مدت زمان ۵۰ ثانیه با استفاده از دو روش کنترلی کنترل پیش‌بین مدل (MPC) و تناسبی- مشتقی- انتگرالی (PID) به ترتیب در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) قابل مشاهده می‌باشند.

مطابق شکل (۱۱) عملکرد کنترلر AMPC در کنترل خودروی خودران در مانور حفظ خط بسیار بهتر از کنترل‌کننده

همانطور که گفته شد، برای توصیف دینامیک جانبی خودرو، در این پژوهش از مدل دو درجه آزادی خودرو (مطابق شکل ۴) با پارامترهای زیر استفاده شده است. مقادیر عددی مدل دینامیکی خودرو در جدول (۲) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۲ مقادیر عددی مدل دینامیکی خودرو

مقدار	نماد	پارامتر
۱۵۸۰ kg	m	جرم کلی خودرو
۲۸۸۵ kgm ²	I _z	ممان اینرسی خودرو
۱/۲ m	l _f	فاصله طولی مرکز ثقل تا لاستیک‌های جلو
۱/۶ m	l _r	فاصله طولی مرکز ثقل تا لاستیک‌های عقب
۱۹۰۰۰ N/rad	C _f	سختی پیچشی لاستیک‌های جلو
۳۳۰۰۰ N/rad	C _r	سختی پیچشی لاستیک‌های عقب

در این پژوهش متغیرهای حالت، سرعت جانبی (V_y) و تغییرات زاویه انحراف (dr/dt) بوده، همچنین متغیر ورودی زاویه فرمان چرخ جلو (δ_f) و متغیرهای خروجی همان متغیرهای حالت می‌باشند.

پارامترهای کنترلر و مقادیر قیود نیز به این صورت انتخاب شده‌اند که مقادیر مینیمم و ماکزیمم زاویه فرمان به ترتیب ۰.۲۶ - ۰.۲۶ می‌باشند. و زمان نمونه‌گیری ۰/۱ ثانیه و بازه پیش‌بینی ۱۰ استپ زمانی می‌باشند.

زمان بهینه کند که منجر به بهبود عملکرد در مقایسه با فرآیند تنظیم اکتشافی که معمولاً برای کنترل کننده PID استفاده می‌شود، می‌شود. عملکرد مناسب کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی یا AMPC در کنترل نرخ زاویه یاو خودروی خودران و زاویه فرمان چرخ‌های جلو خودروی خودران ناشی از همین موضوع می‌باشد. شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) گویای عملکرد خوب و پربازده کنترلر پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) طراحی شده می‌باشد که سبب کنترل پایدار خودروی خودران در مانور طراحی شده حفظ خط شده‌اند. به‌طوریکه هر سه پارامتر سرعت عرضی، نرخ زاویه یاو و زاویه فرمان چرخ‌های جلو خودروی خودران در روش کنترلر پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) نسبت به روش تناسبی- مشتقی- انتگرالی (PID) بهتر کنترل شده‌اند و خودروی خودران مانور حفظ خط را بهتر و با کارایی بهتر انجام داده است.

۶- نتیجه‌گیری

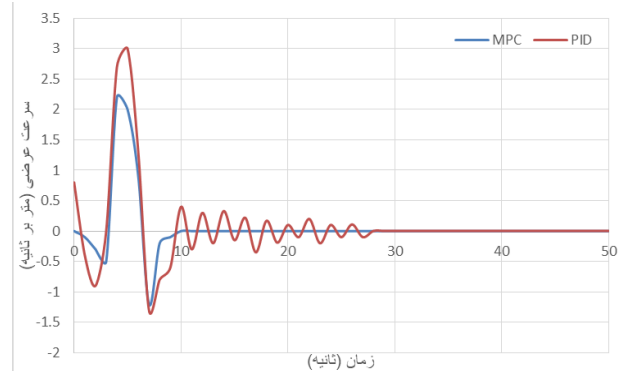
در این پژوهش سیستمی توسعه یافته برای انجام وظیفه تشخیص خط و حفظ خط برای خودروهای خودران ارائه شده است.

عملکرد سیستم تشخیص خط توسعه یافته در چهار مرحله تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از: پیش پردازش، تشخیص خط، تولید مسیر و محاسبه پارامترهای دینامیکی مدل خودرو. برای پیاده سازی سیستم تشخیص خط از جعبه ابزار سیستم رانندگی خودکار (Automated Driving System) در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۲۲ استفاده شده است.

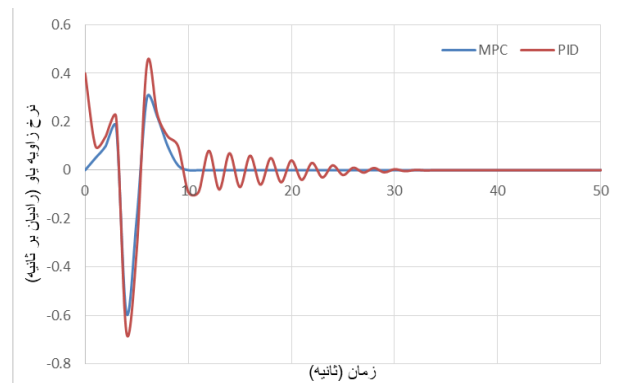
این جعبه ابزار یک روش مدرن است که قادر به انجام تشخیص خط پربازده و کم هزینه از نظر محاسباتی و زمانی بوده که با همه نوع دوربین نیز کار می‌کند. سیستم دیگری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، سیستم حفظ خط می‌باشد. این عملکرد با استفاده از یک کنترل کننده پیش‌بین مدل (MPC) تطبیقی که قادر به کنترل دینامیک جانبی خودرو می‌باشد، پیاده‌سازی شده است. همچنین مدل ریاضی خودرو بر حسب خطای جاده محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی گویای عملکرد بسیار خوب و پربازده کنترلر پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) نسبت به کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) در مانور حفظ خط می‌باشد.

برای تحقیقات آینده می‌توان مدل کلی را با یک شبیه‌ساز آزمایش کرد به‌طوریکه تصاویر ورودی را ارائه کرده و محیط واقعی جاده را شبیه‌سازی نماید. علاوه بر این، به منظور غلبه بر محدودیت عملکرد تشخیص خط می‌توان با ایجاد ترکیب سنسور

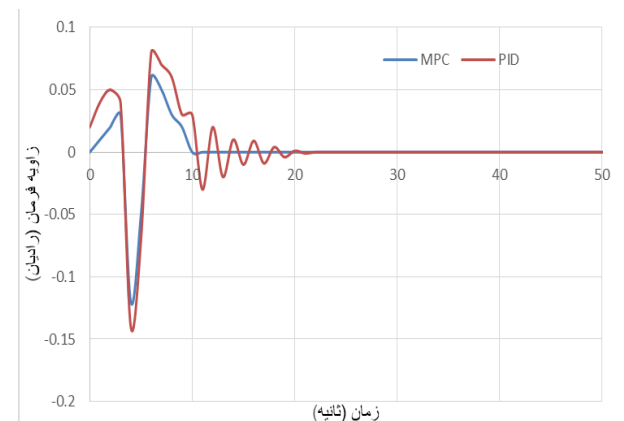
PID است که این امر ناشی از قابلیت‌های پیش‌بینی، استحکام در برابر اغتشاشات و رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی کنترلر AMPC است که سبب عملکرد برتر آن در کنترل سرعت جانبی خودرو در مقایسه با کنترلر کننده PID شده است.



شکل ۱۱ سرعت عرضی خودروی خودران



شکل ۱۲ نرخ زاویه یاو خودروی خودران



شکل ۱۳ زاویه فرمان چرخ‌های جلو خودروی خودران

با توجه به اینکه روش کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی یا AMPC مسئله کنترلی را به عنوان یک روند بهینه‌سازی فرموله می‌کند، جایی که ورودی‌های کنترل با حل یک مسئله بهینه‌سازی مشروط به دینامیک، قیدها و اهداف عملکرد سیستم محاسبه می‌شوند. این رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی به MPC اجازه می‌دهد تا به طور سیستماتیک اقدامات کنترلی را در طول

Applications (PESA), IEEE, pp. 1–5, 2017, <https://doi.org/10.1109/PESA.2017.8277758>.

[9] V. Turri, A. Carvalho, H. E. Tseng, K. H. Johansson, and F. Borrelli, “Linear model predictive control for lane keeping and obstacle avoidance on low curvature roads,” *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, The Hague, The Netherlands, pp. 378–383, Oct. 2013, <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728261>.

[10] R. Marino, S. Scalzi, G. Orlando, and M. Netto, “A nested PID steering control for lane keeping in vision-based autonomous vehicles,” *Proceedings of the 2009 Conference on American Control Conference*, St. Louis, Missouri, USA, pp. 2885–2890, 2009, <https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5160343>.

[11] M. Bujarbaruah, X. Zhang, H. E. Tseng, and F. Borrelli, “Adaptive MPC for autonomous lane keeping,” *14th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, Beijing, China, Jul. 2018, arXiv:1806.04335.

[12] R. C. Rafaila and G. Livint, “Nonlinear model predictive control of autonomous vehicle steering,” *19th International Conference on System Theory, Control, and Computing (ICSTCC)*, Cheile Gradistei, Romania, pp.466–471, Oct. 2015, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2015.7321337>.

[13] MATLAB, “Visual perception using monocular camera,” [Online], 2018. Available: <https://it.mathworks.com/help/driving/examples/visual-perception-using-monocular-camera.html>.

[14] “Focal length definition,” [Online]. Available: http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/concepts/orthoengine_c/Chapter_44.html, Verified: 25/09/2018.

[15] “Principal point definition,” [Online]. Available: http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/concepts/orthoengine_c/Chapter_45.html, Verified: 25/09/2018.

[16] MATLAB, “Single Camera Calibrator App,” [Online], 2018. Available: <https://it.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>.

[17] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000, <https://doi.org/10.1109/34.888718>.

[18] J. Heikkila and O. Silven, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” *IEEE International Conference on*

دوربین با حسگرهای دیگر مثل لیدار، رادار و ... تشخیص در سناریوهای پیچیده‌تر بهبود یابد. همچنین از سایر سیستم‌های تشخیص مانند تشخیص وسایل نقلیه، عابران پیاده، علائم راهنمایی و رانندگی جهت تشخیص محیط رانندگی نزدیک به شرایط واقعی استفاده نمود.

۷- مراجع

[1] European Road Safety Observatory (ERSO), “Advanced driver assistance systems,” European Commission, 2018, [Online]. Available: www.erso.eu.

[2] A. Assidiq, O. Khalifa, R. Islam, and S. Khan, “Real time lane detection for autonomous vehicles,” *ICCCE 2008: International Conference on*, pp. 82–88, 2008, <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2008.4580573>.

[3] X. Xu, J. W. Grizzle, P. Tabuada, and A. D. Ames, “Correctness guarantees for the composition of lane keeping and adaptive cruise control,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 1216–1229, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2760863>.

[4] S. Dai and X. Koutsoukos, “Safety analysis of integrated adaptive cruise and lane keeping control using multi-modal port-Hamiltonian systems,” *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 35, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.nahs.2019.100816>.

[5] J. Liang, Y. Yang, X. Zhu, and K. Sheng, “Realization of emergency lane keeping system by adaptive control based on the finite state machine,” *Proceedings of the 5th CAA International Conference on Vehicular Control Intelligence (CVCI)*, pp. 1–6, Oct. 2021, <https://doi.org/10.1109/CVCI54083.2021.9661249>.

[6] S. Xu, H. Peng, P. Lu, M. Zhu, and Y. Tang, “Design and experiments of safeguard protected preview lane keeping control for autonomous vehicles,” *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 29944–29953, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972329>.

[7] C. Sentouh, A.-T. Nguyen, M. A. Benloucif, and J.-C. Poupieul, “Driver-automation cooperation-oriented approach for shared control of lane keeping assist systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 27, No. 5, pp. 1962–1978, Sep. 2019, <https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2842211>.

[8] Y. Xu, B. Y. Chen, X. Shan, W. H. Jia, Z. F. Lu, and G. Xu, “Model predictive control for lane keeping system in autonomous vehicles,” *International Conference on Power Electronics Systems and*

[20] S. Urban, J. Leitloff, and S. Hinz, "Improved wide-angle, fisheye, and omnidirectional camera calibration," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 108, pp. 72–79, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.06.006>.

Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, <https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609468>.

[19] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, "A toolbox for easy calibrating omnidirectional cameras," *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Beijing, China, Oct. 7–15, 2006, <https://doi.org/10.1109/IROS.2006.282372>.

بررسی عددی انتقال حرارت در لایه های اختلاطی جریان آشفته سیال تراکم پذیر در هندسه مکعبی با استفاده از روش گردابه های بزرگ

چکیده: در این مقاله تمرکز بر روی سیال تراکم پذیر می باشد که تا کنون در هندسه با ابعاد خیلی بزرگ و سرعت بالا شبیه سازی صورت نگرفته است. همچنین روش گردابه های بزرگ نسبت به روش های شبیه سازی عددی دیگر، دقت بالاتری در مدل سازی جریان آشفته دارد. هندسه مورد نظر یک مکعب است که در ابعاد ۳۰ متر می باشد، و شبیه سازی در دو حالت مکانی و زمانی به صورت جداگانه برای ۱۰۰ ثانیه انجام شده است. ورودی ها در حالت های مختلف متفاوت است؛ به این صورت که برای حالت مکانی دو ورودی هم جهت با سرعت های متفاوت، و برای حالت زمانی دو ورودی با جهت های مخالف و با سرعت های یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج کلی که از این شبیه سازی به دست آمد، نشان داد که در حالتی که ورودی ها کنار یکدیگر هستند و گرادیان سرعت بیشتر است، شاهد آشفته گی، انرژی جنبشی و قدرت بیشتر گردابه ها و اندازه بزرگتر آنها هستیم. اما در حالت زمانی به علت اینکه ورودی ها از یکدیگر فاصله دارند، تقابل به خوبی صورت نگرفته بنابراین قدرت گردابه ها کمتر و گردابه های کوچکتر و پخش کمی نسبت به حالت مکانی مشاهده گردید.

واژه های راهنما: جریان آشفته، شبیه سازی گردابه های بزرگ، لایه اختلاطی، انتقال حرارت، جریان تراکم پذیر، مکعب

اکبر اجاقلو

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمدباقر

محمدصادقی آزاد*

استاد

فرزاد چوبدار رحیم

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه شهید مدنی

آذربایجان، تبریز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

Akbar Ojaghlou
M.Sc. Student

Mohammad Bagher
Mohammad
Sadeghi Azad*
Professor

Farzad
Choobdar Rahim
Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Shahid Madani
Azarbaijan University,
Tabriz

Numerical investigation of heat transfer in mixing layers of turbulent flow of compressible fluid in cubic geometry using large eddy simulation

Abstract: In this article, the focus is on compressible fluid, which has not been simulated in geometry with very large dimensions and high speed. Also, the method of large eddies has higher accuracy in turbulent flow modeling than other numerical simulation methods. The desired geometry is a cube with dimensions of 30 meters, and we have performed the simulation in two spatial and temporal modes separately for 100 seconds. The inputs are different in different modes so for the spatial mode, we have considered two inputs in the same direction with different speeds, and for the time mode, we have considered two inputs in opposite directions and with the same speeds. The general results obtained from this simulation showed that when the inlets are next to each other and the vortices' opposition is greater, we see more turbulence, kinetic energy and strength of the vortices and their larger size. But in the temporal mode, because the inputs are far from each other, the confrontation was not done well, so we observed less strength of eddies and smaller eddies and little spread compared to the spatial mode.

Keywords: Turbulent flow, Large eddy simulation, Mixing layers, Heat transfer, Compressible flow, Cubic

۱- مقدمه

توسعه اولیه (LES) از دهه ۱۹۶۰ تا حدود اواسط دهه ۱۹۸۰ کند بود و برنامه‌ها عمدتاً ساده بودند. با افزایش قدرت محاسباتی و توسعه سریع آن به ویژه پس از دهه ۱۹۹۰ با رشد قابل توجه جامعه (LES) و تغییر طیف گسترده‌ای از کاربردهای آن، از جریان‌های ساده به جریان‌های پیچیده از جمله جریان چند فازی، انتقال حرارت، احتراق، آکوستیک هوا و غیره. بیشتر شد و جدای از افزایش قدرت محاسباتی یکی از عوامل مهم در توسعه سریع روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ این است که روش‌های $RANS^3$ ذاتاً نمی‌تواند چالش‌ها و مسائل و روش‌های خاصی از جریان‌های پیچیده را اداره کنند [۶].

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در لایه‌های اختلاطی جریان‌های آشفته سیال تراکم‌پذیر با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام شده است [۷].

ورمن و همکاران در مطالعه‌ای تکنیک شبیه‌سازی گردابی بزرگ جریان‌های تراکم‌پذیر و تأثیر تراکم‌پذیری بر اختلاط لایه‌ها انجام داده‌اند که در آن تحقیق شبیه‌سازی‌های عددی مستقیم (DNS) و شبیه‌سازی‌های گردابی بزرگ (LES) لایه اختلاط تراکم‌پذیر زمانی در اعداد مختلف ماخ و رینولدز برای بررسی این موضوعات انجام شده است که با توجه به تکنیک، شبیه‌سازی‌های گردابی بزرگ با اعداد ماخ همرفتی ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ انجام شده‌اند و نتایج با داده‌های (DNS) فیلتر شده مقایسه شده که به نظر می‌رسد که مدل‌های زیرشبکه پویا منجر به نتایج نسبتاً دقیقی در مقایسه با سایر مدل‌های آزمایش شده می‌شوند. روش پویا نتایج قابل‌قبولی را در (LES) یک‌لایه مخلوط که در حال حاضر نمی‌توان با استفاده از (DNS) شبیه‌سازی کرد، به دست آورد [۸].

مدستی و همکاران در مطالعه‌ای شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان کانال آشفته مافوق صوت را بر روی المان‌های مکعبی زبری با اعداد ماخ ۰/۳ تا ۴ انجام دادند. تجزیه و تحلیل انتقال حرارت نشان می‌دهد که افزایش درگ نسبی همیشه بزرگ‌تر از افزایش انتقال حرارت نسبی است، با این حال، افزایش عدد ماخ به دلیل افزایش ارتباط گرمایش آیرودینامیکی، داده‌ها را به خط قیاس رینولدز نزدیک می‌کند [۹].

دی استفانو و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ای بر شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تطبیقی مبتنی بر موجک جریان کانال مافوق صوت انجام داده‌اند که روش شبیه‌سازی گردابی بزرگ تطبیقی مبتنی بر موجک برای مدل‌سازی محاسباتی جریان‌های آشفته متصل به دیوار تراکم‌پذیر گسترش یافته است.

انتقال حرارت در لایه‌های اختلاطی، پدیده‌ای رایج در بسیاری از سامانه‌های مهندسی و پدیده‌های طبیعی است. این پدیده در فرایندهای مختلفی از جمله احتراق، مبدل‌های حرارتی، اختلاط سیالات، و جریان‌های ژئوفیزیکی نقش حیاتی دارد. درک و پیش‌بینی دقیق انتقال حرارت در این سامانه‌ها، برای طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها ضروری است [۱].

جریان در لایه‌های اختلاطی، غالباً آشفته است. جریان آشفته به دلیل نوسانات تصادفی و غیرخطی، از نظر شبیه‌سازی عددی بسیار چالش‌برانگیز است. روش‌های سنتی شبیه‌سازی عددی، مانند روش‌های تفاضلی محدود برای حل معادلات ناویراستوکس در جریان آشفته، به مش‌های بسیار ریز و در نتیجه به منابع محاسباتی عظیمی نیاز دارند [۲].

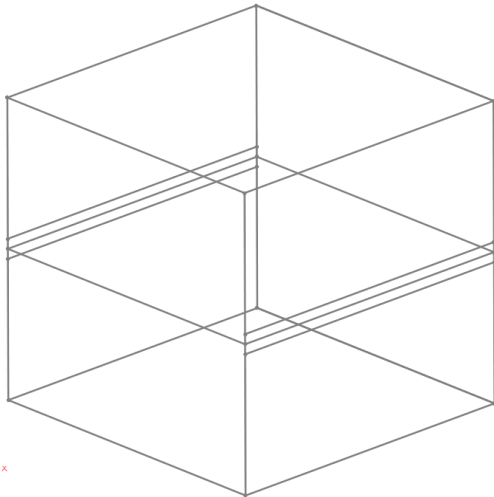
روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ LES^1 به‌عنوان یک روش کارآمد برای شبیه‌سازی جریان آشفته، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. این روش کوچک‌ترین مقیاس طولی را حل نمی‌کند، اما آنها را با استفاده از مدل SGS^2 تقریب می‌زند این روش با فیلترکردن معادلات ناویراستوکس، قادر است مقیاس‌های کوچک آشفتنگی را مدل‌سازی کند و درعین حال، نیاز به مش‌های ریز را کاهش دهد [۳].

هدف این مقاله، بررسی عددی انتقال حرارت در لایه‌های اختلاطی جریان آشفته سیال تراکم‌پذیر در هندسه مکعبی بزرگ با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است. در این مقاله، به دنبال پاسخ به این سؤالات هستیم:

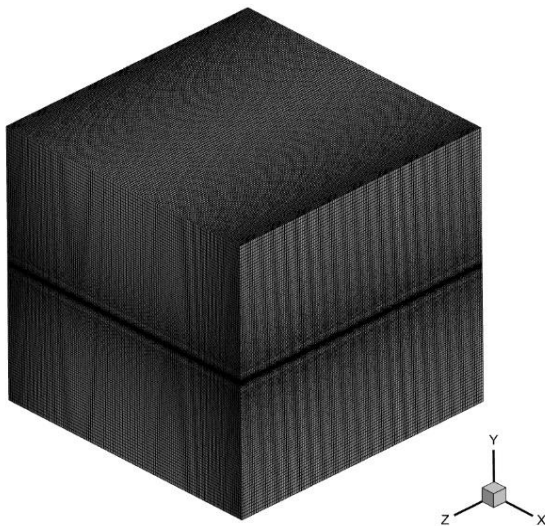
- چگونه روش گردابه‌های بزرگ می‌تواند برای شبیه‌سازی انتقال حرارت در لایه‌های اختلاطی جریان آشفته سیال تراکم‌پذیر به کار رود؟
- چه پارامترهایی بر انتقال حرارت در این سامانه‌ها تأثیر می‌گذارند؟
- نتایج شبیه‌سازی عددی با چه داده‌های تجربی قابل مقایسه هستند؟

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ توسط اسماکورینسکی برای پیش‌بینی جریان اتمسفر کره زمین پیشنهاد شد و کاربردهای اولیه آن نیز در این حوزه بود [۴]. و برای اولین بار توسط دیردوف در سال ۱۹۷۰ و شومن در سال ۱۹۷۵ در زمینه مهندسی جریان استفاده شد [۵].

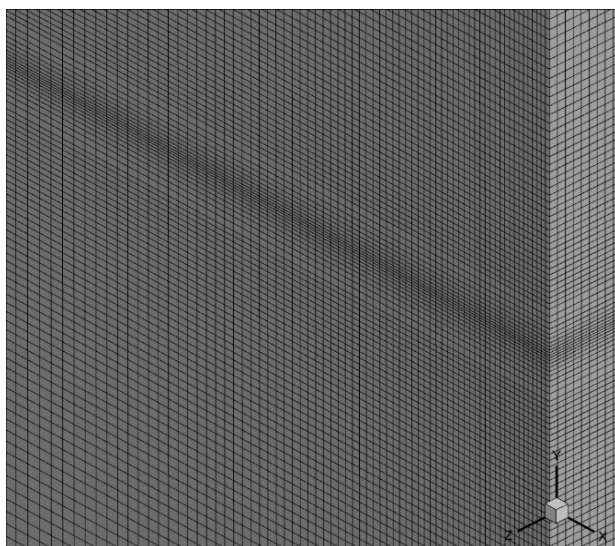
³ Reynolds Averaged Navier-Stokes¹ Large eddy simulation² Sub grid scale



شکل ۱ هندسه مسئله



شکل ۲ مش‌بندی هندسه



شکل ۳ مش‌بندی مرز بالا و پایین مکعب

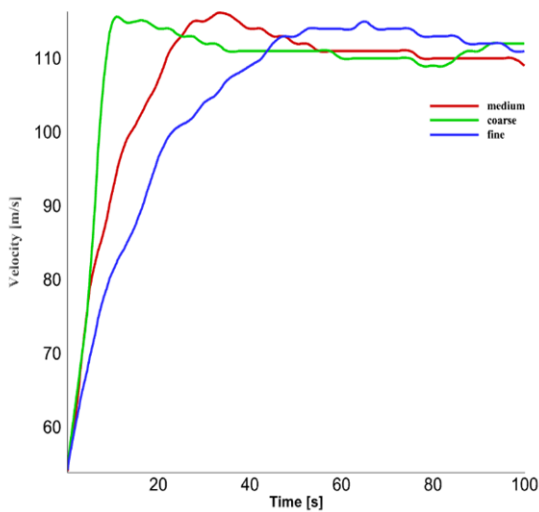
عملکرد روش با انجام شبیه‌سازی‌های عددی تطبیقی جریان مافوق صوت کاملاً توسعه‌یافته در یک کانال صفحه با دیواره‌های همدم‌ارزیابی می‌شود، که نشان‌دهنده یک معیار خوب برای جریان‌های تراکم‌پذیر آشفته محدود به دیوار است. نتایج حاضر هم امکان‌سنجی و هم اثربخشی روش تطبیقی مبتنی بر موجک را در رژیم تراکم‌پذیر با سرعت بالا نشان می‌دهد، که تطابق خوبی با راه‌حل‌های عددی مرجع نشان می‌دهد [۱۰].

ساید و همکاران در سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ای دیگر شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت در یک حفره مکعبی با تفاوت با استفاده از شبیه‌سازی گردابی بزرگ نوشته‌اند که دو مدل مقیاس زیرشبکه‌ی پرکاربرد به نام‌های: مدل استاندارد و اسماکورینسکی پویا در شبیه‌سازی جریان در یک حفره سه بعدی حرارتی در عدد ریلی آشفته $Ra = 109$ مورد آزمایش قرار گرفتند. حفره مکعبی 0.7 متر طول جانبی تنظیم شده است. برای داشتن اختلاف دمای 39 کلوین بین دو دیوار عمودی سرد و گرم رو به رو. پروفیل‌های دمایی اندازه‌گیری شده تجربی برای دیواره‌های بالا و پایین به عنوان شرایط مرزی دیریکله اعمال شد تا به طور ضمنی اثرات تشعشع دیوار به دیوار را در نظر بگیرد. تمرکز این تحقیق، پاسخ مدل‌های مقیاس زیرشبکه و توانایی آن‌ها برای پیش‌بینی جریان در حفره سه‌بعدی حرارتی هنگامی که وضوح مش درشت و زیر استاندارد‌های LES بهینه است، است. انگیزه این تحقیق بررسی یک استراتژی مدل‌سازی امکان‌پذیر برای جریان‌های ذرات در حفره متفاوت گرم شده است [۱۱].

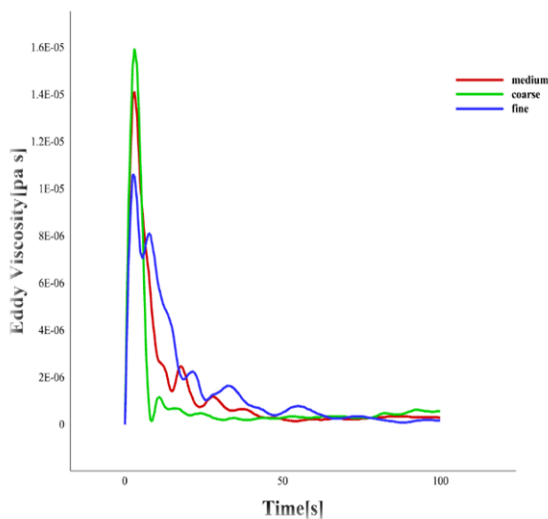
۲- هندسه مسئله و مش‌بندی

برای هندسه مسئله، مکعبی به ابعاد 30 متر در نظر گرفتیم و دو محل تزریق، که هر کدام به ابعاد 1×30 متر در وسط مکعب ایجاد کردیم که این ناحیه را به دو حالت بالا دستی و پایین دستی تقسیم کرد. هدف از ایجاد این ناحیه، تسریع در آشفتگی و تشکیل شدن لایه‌های اختلاطی در دو بخش بالا و پایین است. برای مش‌بندی هندسه، از انسیس مشینگ استفاده کردیم که در سه جهت X, Y, Z ، هندسه را به 150 قسمت تقسیم نمودیم، در جهت X از بایاس فاکتور 3 از نوع (ریز-درشت-ریز) استفاده کردیم اما در جهت Z اندازه مش ثابت ماند، همچنین در جهت Y قسمت بالا و پایین مکعب به 60 قسمت با بایاس فاکتور 3 که به سمت مرکز هندسه ریز شده است اعمال نمودیم و در آخر نیز دو قسمت ورودی و خروجی را به 15 قسمت با بایاس فاکتور 3 که به سمت مرکز ریز شده تقسیم نمودیم.

انسیس مشینگ رسم گردید. شبیه‌سازی در سه شبکه طبق جدول (۱) برای حالت زمانی انجام گردید. نمودار ادی ویسکوزیته و سرعت در این سه مش‌بندی به دست آمده، با هم مقایسه شدند و طبق شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده شد که نتایج سرعت و ادی ویسکوزیته برای شبکه متوسط و ریز به هم نزدیک هستند و اختلاف کمی با یکدیگر دارند. بنابراین به جهت دقت کافی در محاسبات از شبکه ریز برای شبیه‌سازی حالت اصلی پروژه استفاده شده است.



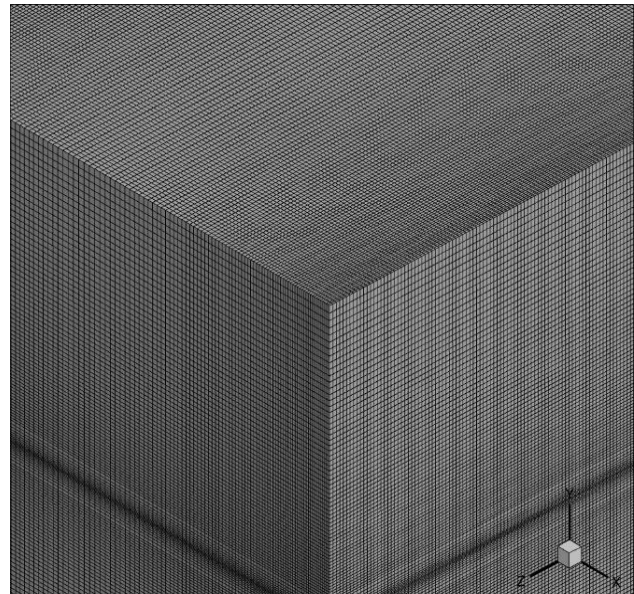
شکل ۶ منحنی سرعت



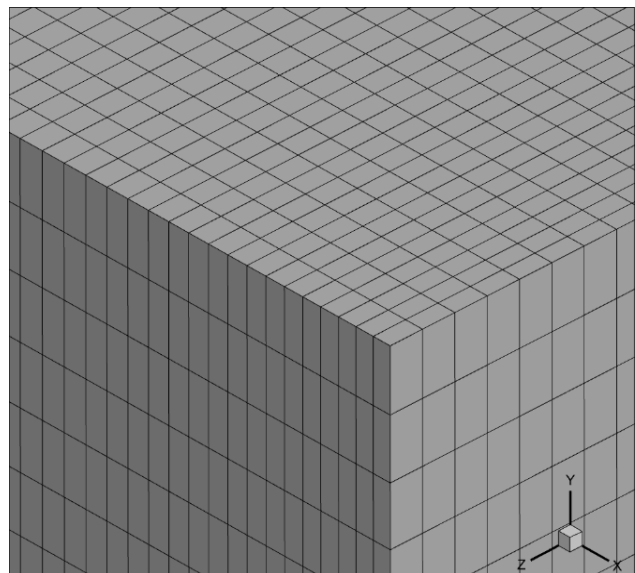
شکل ۷ منحنی ادی ویسکوزیته

۲-۲- شرایط مرزی مسئله و تنظیمات انسیس

شرط مرزی برای ورودی سیال، سرعت و برای خروجی سیال، فشار در دو حالت مکانی و زمانی است. در حالت مکانی، ورودی‌ها



شکل ۴ مش‌بندی گوشه مکعب



شکل ۵ مش‌بندی گوشه مکعب از نمای نزدیک

جدول ۱ شبکه‌بندی‌های مختلف

Number	Size	Number of cells
1	130×130×130	2,197,000 (coarse)
2	140×140×140	2,744,000 (medium)
3	150×150×150	3,375,000 (fine)

۲-۱- استقلال حل از شبکه‌بندی

برای بررسی استقلال حل از شبکه، سه شبکه‌بندی با شکل‌های یکسان ولی با تعداد سلول‌های مختلف مطابق جدول (۱) در

جدول ۵ گسسته‌سازی معادلات

Solution Methods	Space mode	Time mode
Formulation	Implicit	Implicit
Gradient	Least squares cell based	Least squares cell based
Flow	Second order upwind	Second order upwind
Flux Type	Roe-FDS	Roe-FDS
Transient formulation	Second order upwind	Second order upwind
Courant Number	1	1
Initialization methods	Hybrid	Hybrid

۲-۳- معادلات حاکم بر جریان

در شبیه‌سازی ادی های بزرگ، معادلات حاکم به صورت عددی حل می شوند. تمامی شبیه‌سازی‌ها در این تحقیق با استفاده از روش گسسته‌سازی حجم محدود انجام شده است [۱۲]. معادلات (۱)، (۲) و (۳) که بیانگر بقای جرم، مومنتوم و انرژی است:

$$\partial_t \rho + \partial_j (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t (\rho u_i) + \partial_j (\rho u_i u_j) + \partial_i p - \partial_j \sigma_{ij} = 0 \quad (2)$$

$(i = 1, 2, 3)$

$$\partial_t e + \partial_j ((e + p) u_j) - \partial_j (\sigma_{ij} u_i) + \partial_j q_j = 0 \quad (3)$$

معادله (۴) چگالی انرژی کل و معادله (۵) تانسور تنش ویسکوز است.

$$e = E(\rho, u, p) = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho u_i u_i \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = F_{ij}(u, T) = \frac{\mu(T)}{Re} S_{ij}(u) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

هر دو از سمت چپ و با سرعت‌های متفاوت و خروجی سیال در سمت راست هندسه در نظر گرفته شده است. برای حالت زمانی، ورودی‌ها و خروجی‌ها مقابل هم و با سرعت های یکسان است و از سیال هوا برای هر دو حالت استفاده شده است. خواص هوا مطابق خواصی که در انسیس است، به صورت گاز ایده آل می- باشد و جریان در حالت تراکم‌پذیر و با استفاده از روش اسمگورینسکی با $C_s = 0.1$ حل شده است و برای شبیه‌سازی در این مسئله از انسیس فلوننت استفاده گردیده است.

جدول ۲ تنظیمات اولیه انسیس

Name	Set
Type	Density-based
Time	Transient
Gravty	-9.81
Energy	On
Viscous	LES, Smagorinsky-Lilly
C_s	0.1
Δt	0.01 [s]

جدول ۳ تنظیمات خواص و مواد

Name	Set
Material type	Fluid
Name	Air
Density (kg/m3)	Ideal-gas
Cp (Specific heat) (j/kg-k)	1006.43
Thermal conductivity (w/m-k)	0.0242
Viscosity (kg/m-s)	Sutherland
Molecular weight (kg/kg mol)	28.966

جدول ۴ شرایط مرزی

Boundary condition	Space mode	Time mode
$Inlet_1$	$u_1 = 110 \left(\frac{m}{s}\right)$	$u_1 = 110 \left(\frac{m}{s}\right)$
$Inlet_2$	$u_2 = 220 \left(\frac{m}{s}\right)$	$u_2 = 110 \left(\frac{m}{s}\right)$
$Interface$	Coupled wall	Coupled wall

که در آن

$$\partial_t(\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \partial_j(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \partial_i \bar{p} - \partial_j \bar{\sigma}_{ij} = -\partial_j(\bar{\rho} \tau_{ij}) + R_i \quad (13)$$

$$\partial_t \bar{\epsilon} + \partial_j((\bar{\epsilon} + \bar{p}) \tilde{u}_j) - \partial_j(\bar{\sigma}_{ij} \tilde{u}_i) + \partial_j \bar{q}_j = R_e \quad (14)$$

عملیات فیلتر، بخش بزرگ مقیاس \bar{f} را از متغیر جریان f استخراج می‌کند. در این مقاله از فیلتر کلاهدک بالایی با عرض فیلتر Δ استفاده می‌کنیم که نشان‌دهنده اندازه کوچک‌ترین گردابه‌های حل‌شده در LES است. برای جریان‌های تراکم‌پذیر، فاوور^۱ یک عملیات فیلتر مرتبط، معادله (۱۵) را معرفی کرده است [14].

$$\bar{f} = \frac{\bar{\rho} f}{\bar{\rho}} \quad (15)$$

در مورد متغیرهای جریان، بردار سرعت فیلتر شده فاوور با \tilde{u} نشان داده می‌شود، در حالی که $\bar{\rho}$ چگالی فیلتر شده و \bar{p} فشار فیلتر شده است. علاوه بر این، $\bar{\epsilon}$ چگالی انرژی کل^۲ متغیرهای فیلتر شده است:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\bar{p}}{(\gamma - 1)} + \frac{1}{2} \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i \quad (16)$$

دمای فیلتر \bar{T} به چگالی و فشار فیلتر شده توسط قانون گاز ایده‌آل،

$$\bar{\rho} \bar{T} = \gamma M^2 \bar{p} \quad (17)$$

به شکل غیر بعدی مرتبط است. نسبت گرمای ویژه C_p به C_v با γ نشان داده می‌شود و مقدار $1/4$ داده می‌شود. تانسور تنش ویسکوز بر اساس متغیرهای فیلتر شده به صورت معادله (۱۸) تعریف می‌شود.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \left(\frac{\bar{\mu}}{Re} \right) \bar{S}_{ij} \quad (18)$$

ویسکوزیته از قانون ساترلند برای هوا محاسبه می‌شود.

$$\bar{\mu} = \left(\mu(\bar{T}) \right) \quad (19)$$

بر اساس مقادیر مرجع معرفی شده در بالا و رابطه (۲۰)

$$\bar{S}_{ij} = \partial_j \tilde{u}_i + \partial_i \tilde{u}_j - \frac{2}{3} \delta_{ij} \partial_k \tilde{u}_k \quad (20)$$

$$S_{ij}(u) = \partial_j u_i + \partial_i u_j - \frac{2}{3} \delta_{ij} \partial_k u_k \quad (6)$$

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

تانسور نرخ کرنش است. برای ویسکوزیته دینامیکی هوا قانون ساترلند تقریب خوبی ارائه می‌دهد.

$$\mu(T) = T^{\frac{3}{2}} \frac{1 + C}{T + C} \quad (7)$$

علاوه بر این، q نشان‌دهنده بردار شار حرارتی است که توسط

$$q_j = Q_j(T) = -\frac{\mu(T)}{(\gamma - 1) Re Pr M^2} \partial_j T \quad (8)$$

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

که دمای T با چگالی و فشار قانون گاز ایده‌آل مرتبط است.

$$T = G(\rho, p) = \gamma M^2 \frac{p}{\rho} \quad (9)$$

این معادلات با طول مرجع L_R ، سرعت u_R ، چگالی ρ_R ، دمای T_R و ویسکوزیته μ_R بی بعد شده‌اند.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.4$$

$$Pr = 1$$

که در دمای مرجع $273/15$ کلین می‌باشد و عدد رینولدز و عدد ماخ با فرمول (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{\rho_R u_R L_R}{\mu_R} \quad (10)$$

و عدد ماخ

$$M = \frac{u_R}{a_R} \quad (11)$$

این معادلات به منظور کاهش تعداد مقیاس‌های قابل‌حل، فیلتر می‌شوند [۱۳].

در نتیجه معادله‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) فرم فیلترگیری شده معادله بقای جرم، مومنتوم و انرژی حاکم بر جریان آشفتة سیال تراکم‌پذیر می‌باشد.

$$\partial_t \bar{\rho} + \partial_j(\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (12)$$

² Total energy density¹ Favre

که $-\tau_{ij}\bar{D}_{ij}$ به عنوان نرخ تولید انرژی در نظر گرفته می-شود. می توان تعادل محلی را به صورتی در نظر گرفت که نرخ اتلاف انرژی مقیاس زیر شبکه ε_{SGS} :

$$\varepsilon_{SGS} = \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{GS} = v \frac{\overline{\partial u_i \partial u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - v \frac{\overline{\partial u_i \partial u_i}}{\partial x_j \partial x_j} \quad (24)$$

با نرخ تولید در تعادل باشد تا رابطه (۲۵) حاصل شود.

$$\varepsilon_{SGS} = -\tau_{ij}\bar{D}_{ij} \quad (25)$$

۲-۵- استخراج مدل اسماگورینسکی

ویسکوزیته گردابی^۲ دارای بعد حاصل ضرب سرعت q و طول l است و مطابق رابطه (۲۶) معرفی می شود:

$$v_e = C_v q l \quad (26)$$

با در نظر گرفتن بعد نرخ اتلاف^۳، می توان رابطه (۲۷) را با مقیاس های q و l تنظیم کرد:

$$v_e \bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij} = \frac{C_3 q^3}{l} \quad (27)$$

با حذف q و استفاده از معادلات (۲۵) و (۲۶) و تنظیم l به اندازه عرض فیلتر Δ ، ضریب ویسکوزیته گردابی مقیاس زیر شبکه مطابق رابطه (۲۸) معرفی می-شود.

$$V_e = (C_s \Delta)^2 |\bar{D}| \quad (28)$$

این مدل، مدل اسماگورینسکی نامیده می شود. در اینجا $|\bar{D}|$ نشان دهنده ترم تانسور نرخ کرنش است.

$$|\bar{D}| = \sqrt{\bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij}} \quad (29)$$

ثابت C_s تحت عنوان ثابت اسماگورینسکی نامیده شده و تنها ثابت بدون بعدی است که باید ارائه شود. با فرض تعادل محلی گفته شده در بالا، رابطه (۳۰) حاصل می شود.

$$\varepsilon_{SGS} = (C_s \Delta)^2 |\bar{D}|^3 \quad (30)$$

سپس با در نظر گرفتن تئوری آماری آشفته، لایلی^۴ رابطه (۳۱) تعریف شده است [۱۵].

$$\frac{1}{2} |\bar{D}|^2 = \int_0^{\frac{\pi}{\Delta}} K^2 E(k) dk = \frac{3}{4} \alpha \varepsilon^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\pi}{\Delta}\right)^{\frac{4}{3}} \quad (31)$$

نرخ کرنش بر اساس سرعت فیلتر شده با فاور است که در آن δ_{ij} دلتای کرونیگر است. نماد \bar{q} در معادله انرژی نشان دهنده بردار شار حرارتی متناسب با گرادیان دمای فیلتر شده است، جایی که عدد پرانتل برابر با ۱ است. مهمترین زیر شبکه ترم در معادله مومنتوم (۱۳) رخ می دهد و حاوی تانسور تنش آشفته است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j, \quad (21)$$

عبارت زیر شبکه R_i ، ناشی از غیر خطی بودن در تانسور تنش ویسکوز و اصطلاحات زیر شبکه در معادله انرژی (۱۴) که با R_e نشان داده شده است را می توان برای این جریان نادیده گرفت.

۲-۴- مدل اسماگورینسکی

مدل اسماگورینسکی یکی از مدل های پر کاربرد LES است که از عرض فیلتر Δ به عنوان طول مشخصه استفاده می کند. برای حل هر گردابه در میدان جریان با توجه به اینکه جریان سه بعدی است، نیاز به چهار سلول می باشد، بنابراین گردابه هایی که سایز آنها کوچکتر از چهار سلول باشد، قابلیت حل شدن توسط نرم افزار انسیس را نداشته و این گردابه ها توسط مقیاس های زیر شبکه^۱ مدل می شوند. با فیلتر کردن میدان جریان، انرژی جنبشی $\bar{K} = \bar{u}_k \bar{u}_k / 2$ ، به انرژی مقیاس شبکه $K_{GS} = \bar{u}_k \bar{u}_k / 2$ و رابطه بقای انرژی در مقیاس شبکه K_{GS} مطابق رابطه (۲۲) توصیف می شود.

$$\frac{\bar{D} K_{GS}}{\bar{D}_t} = \tau_{ij} \bar{D}_{ij} - \bar{\varepsilon}_{GS} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\bar{u}_i \tau_{ij} - \frac{\overline{p u_j}}{\rho} + v \frac{\partial K_{GS}}{\partial x_i} \right) \quad (22)$$

که $\tau_{ij} \bar{D}_{ij}$ نشان دهنده نرخ انتقال انرژی به انرژی در مقیاس زیر شبکه k_{SGS} است، به دنبال آن، رابطه بقای انرژی در مقیاس زیر شبکه k_{SGS} مطابق رابطه (۲۳) توصیف می شود.

$$\frac{\bar{D} K_{SGS}}{\bar{D}_t} = -\tau_{ij} \bar{D}_{ij} - \bar{\varepsilon}_{SGS} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{u}_i \tau_{ij} - \frac{1}{2} (\bar{u}_i \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{u}_j \bar{u}_i \bar{u}_i) - \frac{\overline{p u_j} - \overline{p u_j}}{\rho} + v \frac{\partial K_{SGS}}{\partial x_j} \right] \quad (23)$$

³ Dissipation rate

⁴ Lilly

¹ Subgrid scales

² Eddy viscosity

است و برای پیش‌بینی الگوی جریان از آن استفاده می‌شود و از طریق رابطه (۳۳) برای جریان‌های برشی^۵ به دست می‌آید.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (33)$$

برای حالت مکانی و زمانی عدد ماخ به صورت زیر به دست آمده است:

$$M = \frac{u}{a}$$

$$M_1 = \frac{110}{347.3} = 0.317$$

$$M_2 = \frac{220}{347.3} = 0.633$$

برای حالت مکانی و زمانی عدد رینولدز به صورت زیر به دست آمده است:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad T = 300 \text{ K}, \quad p = 101.325 \text{ kPa},$$

$$D = 1 \text{ m}, \quad \mu = 18.58E - 6 \text{ pas}$$

$$Re_1 = \frac{1.176 \times 110 \times 1}{0.00001858} = 6962325$$

$$Re_2 = \frac{1.176 \times 220 \times 1}{0.00001858} = 13924650$$

۳- بررسی نتایج

در این بخش ابتدا به بررسی اعتبار سنجی مقاله ورمن که در سال ۱۹۹۷ انجام شده است، سپس نتایج کانتورها در حالت‌های مختلف مکانی و زمانی، مقایسه این نتایج با یکدیگر، مقایسه نتایج به صورت نمودار پرداخته خواهد شد.

۳-۱- اعتبار سنجی

برای اعتبارسنجی از مقاله ورمن و همکاران در سال ۱۹۹۷، مرجع [۸] استفاده شده است. ورمن و همکاران شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ لایه‌های اختلاطی آشفته را بررسی کردند. شش مدل زیرشبکه برای تانسور تنش آشفته با انجام شبیه‌سازی‌های

که در آن از طیف کلموگروف $E_k = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$ استفاده شده است. می‌توان هنگامیکه Δ در زیر محدوده اینرسی^۱ است، اضمحلال ویسکوز را تقریباً برابر با اضمحلال مقیاس زیر شبکه در نظر گرفت. در این صورت خواهیم داشت:

$$C_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{3\alpha}{2}\right)^{-3/4} = \alpha^{-3/4} \quad (32)$$

با جایگزینی ثابت کولموگروف $\alpha = 1.5$ و $C_s = 0.173$ حاصل، مقدار تئوری برای ثابت کولموگروف^۲ است.

۲-۶- انتقال حرارت در جریان‌های توربولانسی

انتقال حرارت در جریان‌های توربولانسی به دلیل حرکت آشفته و غیر قابل پیش‌بینی سیال، فرایندی پیچیده‌تر از جریان آرام است. در این نوع جریان‌ها، نوسانات تصادفی سرعت و دما در مقیاس‌های مختلف وجود دارد که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود.

مهمترین کمیت‌های توربولانسی مرتبط با انتقال حرارت عبارتند از:

- **شدت توربولانسی^۳:** این کمیت نشان‌دهنده میزان نوسانات تصادفی سرعت در جریان است. شدت توربولانس با میانگین مربع نوسانات سرعت یا ضریب رینولدز تلاطمی^۴ اندازه‌گیری می‌شود.

- **طول مقیاس توربولانسی^۵:** این کمیت اندازه بزرگترین ساختارهای گردابی در جریان را نشان می‌دهد. طول مقیاس توربولانس با طول لترپوف^۶ اندازه‌گیری می‌شود.

- **ضریب نفوذ توربولانسی^۷:** این کمیت نشان‌دهنده میزان انتقال گرما و مومنتم توسط نوسانات تصادفی در جریان است. ضریب نفوذ توربولانسی با ضریب نفوذ ادی اندازه‌گیری می‌شود.

بنابراین، نرخ انتقال حرارت در جریان‌های توربولانسی به‌طور قابل توجهی به شدت توربولانس، طول مقیاس توربولانس و گرادیان دما بستگی دارد.

۲-۷- عدد ماخ و عدد رینولدز

عدد ماخ عبارت است از نسبت سرعت جریان گاز در یک سیال بر سرعت صوت که یک پارامتر بی بعد در نظر گرفته می‌شود و از رابطه (۱۱) بدست می‌آید [۱۶]. عدد رینولدز کمیتی بی‌بعد

⁵ Turbulence length scale

⁶ Length of Letter Buf

⁷ Turbulence diffusion coefficient

⁸ Shear flows

¹ Inertial subrange

² Kolmogorov's constant

³ Turbulence intensity

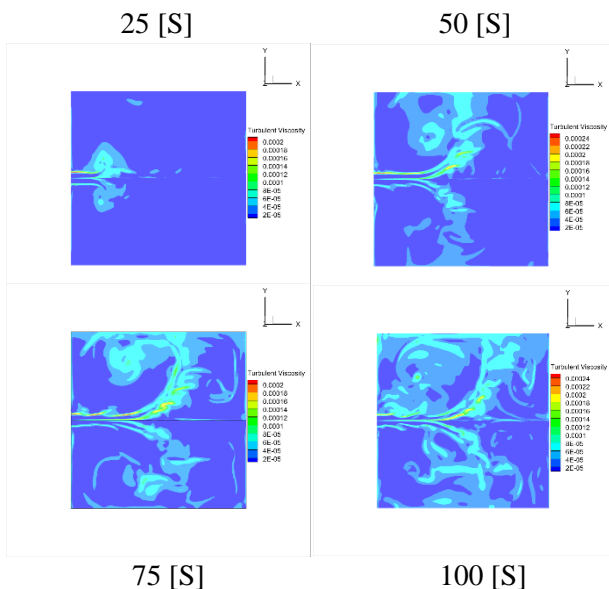
⁴ Reynolds turbulence number

ثانیه ۲۵، بالا شکل سمت راست ثانیه ۵۰، پایین شکل سمت چپ ثانیه ۷۵ و پایین شکل سمت راست ثانیه ۱۰۰ می‌باشد و همچنین مکان برش کانتورها روی محور Z به فاصله ۱۵ متر است.

جدول ۶ مشخصات کانتورها در زمان‌های مختلف

Name	Times(s)
Turbulent viscosity	25-50-75-100
Kinetic energy	25-50-75-100
Velocity magnitude	25-50-75-100
Vorticity magnitude	25-50-75-100
Pressuer	25-50-75-100
Mach number	25-50-75-100
Temperature	25-50-75-100

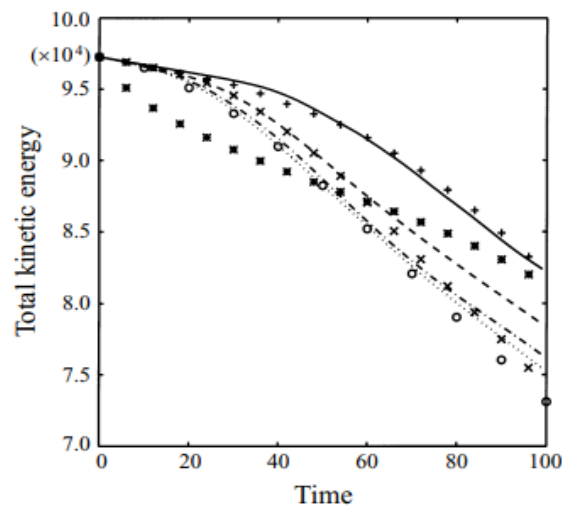
۳-۲-۱- بررسی کانتور ویسکوزیته آشفته



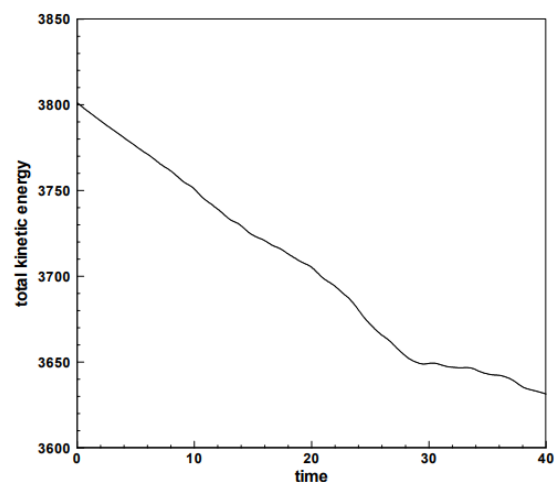
شکل ۱۰ کانتور ویسکوزیته آشفته در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط مکانی

بیشترین شدت توربلانسی در نزدیک دیواره‌ها است چون در آنجا گرادیان سرعت زیاد است. در جریان آشفته ابتدا ادی‌های بزرگ تشکیل می‌شوند. سپس در اثر کشش گردابه‌ای^۱ کشیده می‌شوند و تبدیل به کوچکترین ادی‌ها در دیواره می‌شوند و در

گردابه‌ای بزرگ از لایه ترکیب زمانی تراکم‌پذیر مورد آزمایش قرار گرفته‌است. شکل (۸) نمودار انرژی جنبشی کل در مقاله ورمن و همکاران را نشان می‌دهد و نمودار انرژی جنبشی کل به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر، در شکل (۹) دیده می‌شود. طبق انتظار، همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان انرژی جنبشی کل جریان با گذشت زمان، به دلیل فرآیند آبشار انرژی و اتلاف انرژی در گردابه‌های کوچک کاهش می‌یابد که گردابه‌های بزرگ به-دلیل کشیدگی به گردابه‌های کوچک‌تر تبدیل می‌شوند.



شکل ۸ نمودار اعتبار سنجی ورمن و همکاران



شکل ۹ نمودار انرژی کل شبیه‌سازی حاضر

۳-۲-۲- نتایج بدست آمده در حالت مکانی

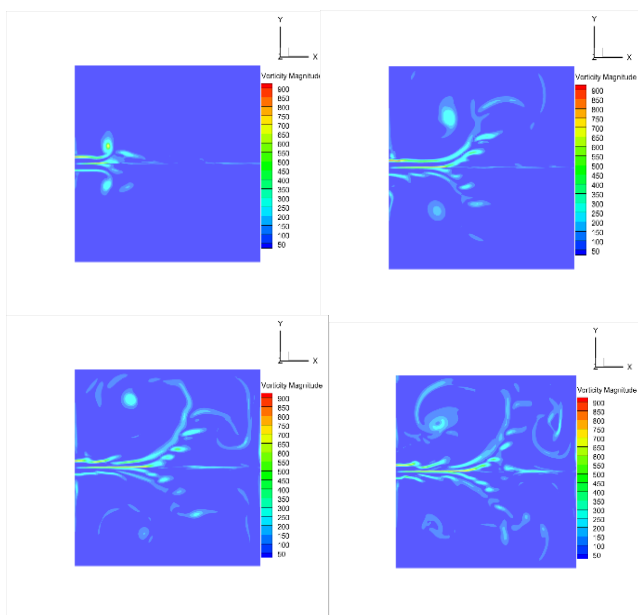
نتایج مورد نظر در چهار زمان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۶) مشخصات انواع کانتورها را نشان می‌دهد که زمان نمایش در همه کانتورها به ترتیب از بالا شکل سمت چپ

^۱ Vortex stretching

در میدان سرعت، جایی که گرادیان سرعت زیاد باشد یک جریان چرخشی (ادی) تشکیل می‌شود.

طبق شکل (۱۲) در دامنه جریان مسئله ما، بیشترین سرعت در مرز مشترک دو سیال در مرکز هندسه و همچنین در دیواره‌ها دیده می‌شود که این گرادیان ایجاد شده، دلیل تشکیل ادی در دامنه جریان می‌باشد که در شکل (۱۲) به وضوح دیده می‌شود.

۴-۲-۳- بررسی کانتور گردابه



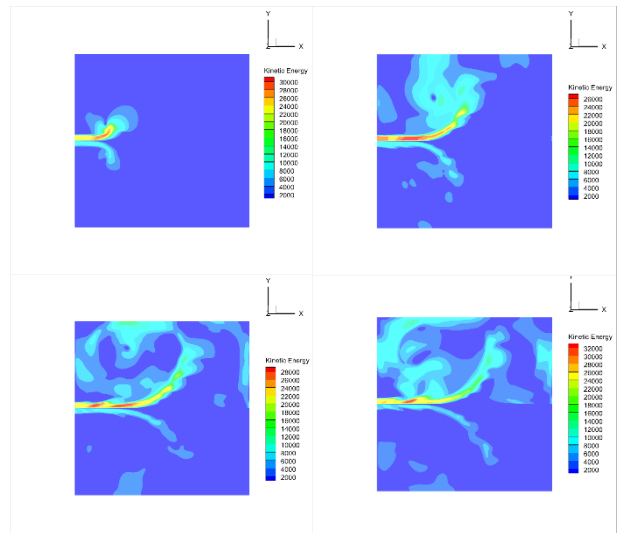
شکل ۱۳ کانتور گردابه در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط مکانی

بهترین روش بررسی و نشان دادن گردابه‌ها، بررسی ورتیسیتی عمود بر آن صفحه است. ما ورتیسیتی را در راستای Z مورد بررسی قرار دادیم. گردابه‌های ایجاد شده در بالای مکعب به صورت پاد ساعتگرد و گردابه‌های پایین مکعب، ساعتگرد می‌چرخند.

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود این گردابه‌ها هستند که کوچک و کوچکتر شده‌اند و در نزدیکی دیواره بر اثر ویسکوزیته (کار ویسکوزیته) تبدیل به گرما می‌شوند و از بین می‌روند. در واقع در شکل (۱۳) نه تنها حرکت گردابه‌ها مشاهده می‌شود؛ بلکه تقابل آنها باهم، کوچک شدن و آبشار انرژی^۱ نیز دیده می‌شود.

دیواره در اثر ویسکوزیته (کار ویسکوزیته) تبدیل به گرما شده و از بین می‌رود که این روند در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود.

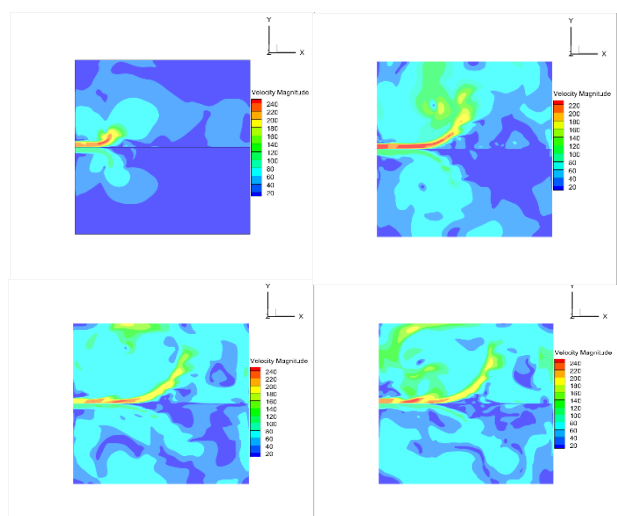
۳-۲-۳- بررسی کانتور انرژی جنبشی



شکل ۱۱ کانتور انرژی جنبشی در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط مکانی

در شکل (۱۱) در مرکز مکعب، جایی که دو جریان با هم برخورد می‌کنند، انرژی جنبشی به‌طور قابل توجهی بالا است. این امر به دلیل افزایش سرعت سیال در این ناحیه است. گوشه‌های مکعب، انرژی جنبشی به‌طور قابل توجهی پایین است. این امر به دلیل کاهش سرعت سیال در این نواحی است.

۳-۲-۳- بررسی کانتور سرعت

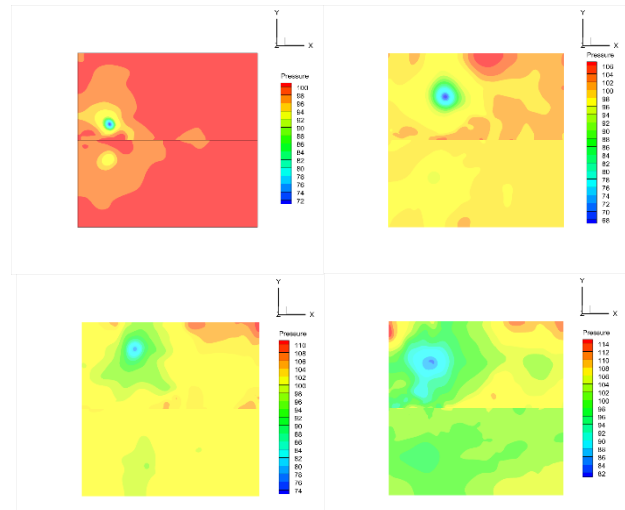


شکل ۱۲ کانتور سرعت در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط مکانی

^۱ Energy cascade

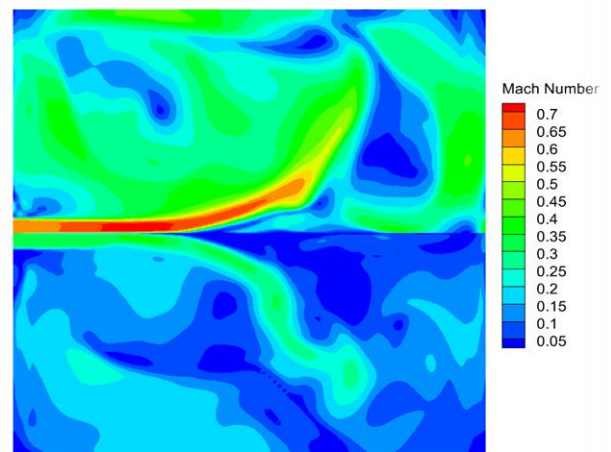
۳-۲-۵- بررسی کانتور فشار

در شکل (۱۴) نقاط آبی رنگ کمترین مقدار فشار را دارند در واقع این نقاط مرکز گردابه‌های تشکیل شده توسط گردایان سرعت می‌باشد. فشار در جهت دور شدن از مرکز انحنا خطوط جریان افزایش می‌یابد و در شکل (۱۴) این به وضوح دیده می‌شود.



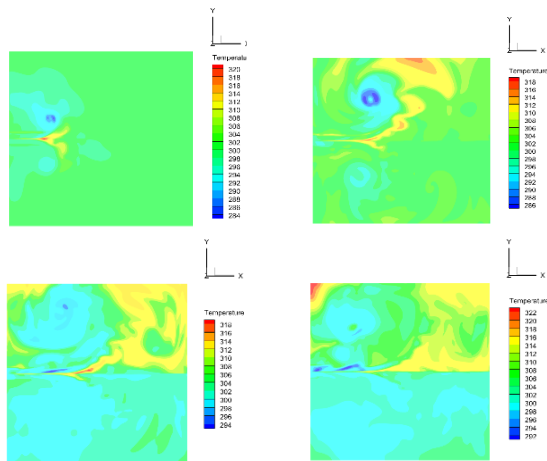
شکل ۱۴ کانتور فشار در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط مکانی

۳-۲-۶- بررسی کانتور عدد ماخ



شکل ۱۵ کانتور عدد ماخ در اختلاط مکانی

۳-۲-۷- بررسی کانتور دما



شکل ۱۶ کانتور دما در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط مکانی

شکل (۱۶) کانتور دما را در حالت اختلاط مکانی نمایش می‌دهد. در این شکل نشان داده می‌شود به علت ایجاد گردابه‌های بزرگ در ورودی‌های هندسه و افزایش انرژی جنبشی در گردابه‌های به وجود آمده ناشی از کشیدگی گردابه‌ای، این ورتکس‌ها به گردابه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند و به سمت دیواره‌ها پرتاب می‌شوند. در واقع در این مرحله، آبشار انرژی ایجاد شده است و گردابه‌های کوچک دیگر در مقابل ویسکوزیته سیال تحمل مقاومت ندارند و در این مرحله تبدیل به انرژی درونی و گرما می‌شوند و از سیستم دمپ و مستهلک می‌گردند. همانطور که در شکل (۱۶) دیده می‌شود دما در کنار دیواره‌ها بیشتر از مرکز هندسه است و در قسمت بالای هندسه به علت سرعت بیشتر سیال، بیشتر مشهود است.

۳-۳-۳- نتایج به دست آمده در حالت زمانی

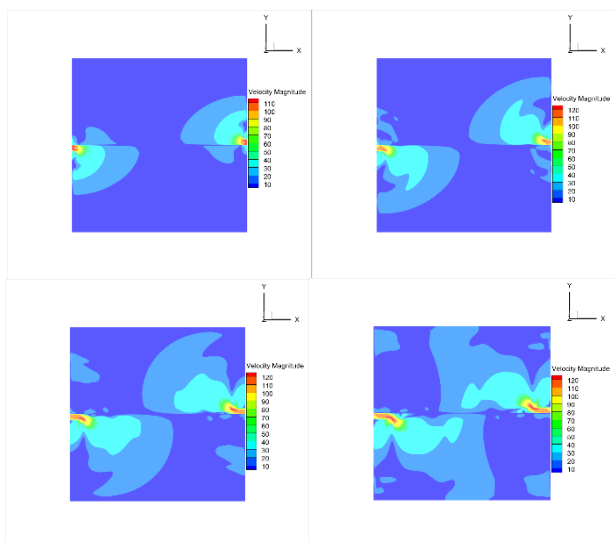
نتایج مورد نظر در ۴ زمان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۶) مشخصات انواع کانتورها را نشان می‌دهد. زمان نمایش در همه کانتورها به ترتیب از بالا سمت چپ ثانیه ۲۵، بالا سمت راست ثانیه ۵۰، پایین سمت چپ ثانیه ۷۵ و پایین سمت راست ثانیه ۱۰۰ می‌باشد و همچنین مکان برش کانتورها روی محور Z به فاصله ۱۵ متر است.

۳-۳-۱- بررسی کانتور ویسکوزیته آشفته

در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که به علت دور بودن ورودی‌های جریان سیال و نبود گردایان سرعت، اختلاط خیلی کمتر و لزجت آشفته‌گی کمتر از حالت مکانی می‌باشد.

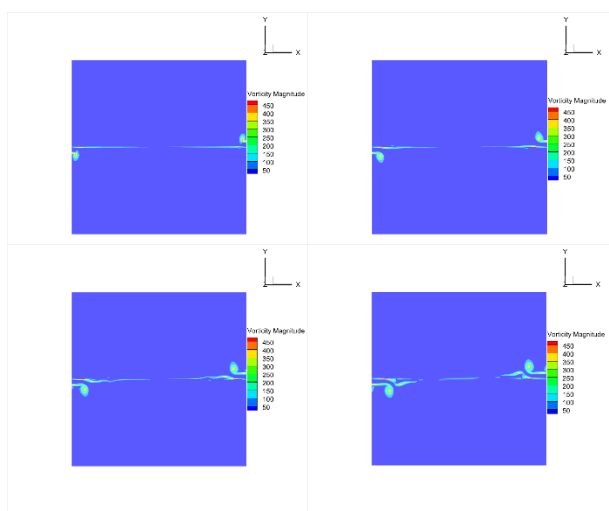
عدد ماخ معیاری از میزان تراکم‌پذیری سیال است. جریانی که ماخ آن بیشتر از ۰/۳ باشد، تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود و همچنین عدد ماخ معادل با نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی است که در شکل (۱۵) مشهود است.

۳-۳-۳- بررسی کانتور سرعت



شکل ۱۹ کانتور سرعت در زمان‌های ۰.۲۵، ۰.۷۵، ۱.۰ و ۱.۰۰ ثانیه در اختلاط زمانی

۳-۳-۴- بررسی کانتور گردابه

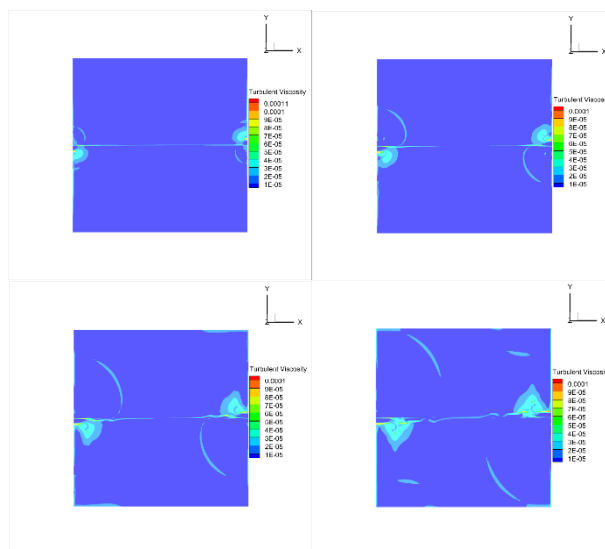


شکل ۲۰ کانتور گردابه در زمان‌های ۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵ و ۱.۰۰ ثانیه در اختلاط زمانی

در شکل (۲۰) کانتور گردابه‌های ایجاد شده دیده می‌شود که کوچک و ضعیف هستند و علت آن پایین بودن گرادیان سرعت در حالت اختلاط زمانی است.

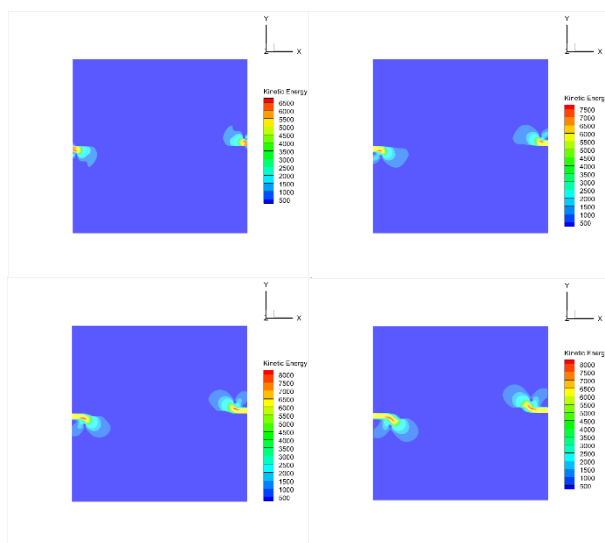
۳-۳-۵- بررسی کانتور فشار

در شکل (۲۱) نقاط آبی رنگ کمترین مقدار فشار را نشان می‌دهد؛ در واقع این نقاط مرکز گردابه‌های تشکیل شده می‌باشد.



شکل ۱۷ کانتور ویسکوزیته آشفته در زمان‌های ۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵ و ۱.۰۰ ثانیه در اختلاط زمانی

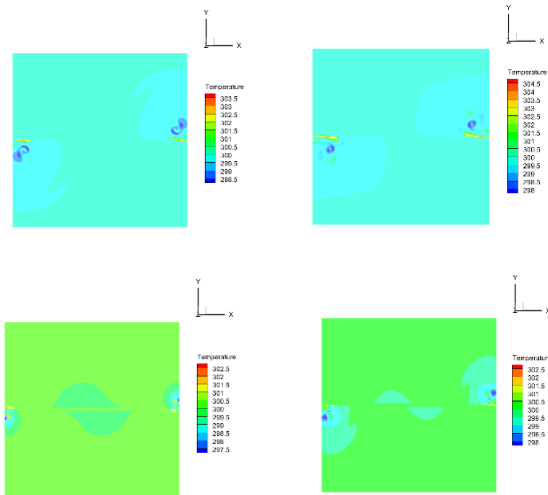
۳-۳-۲- بررسی کانتور انرژی جنبشی



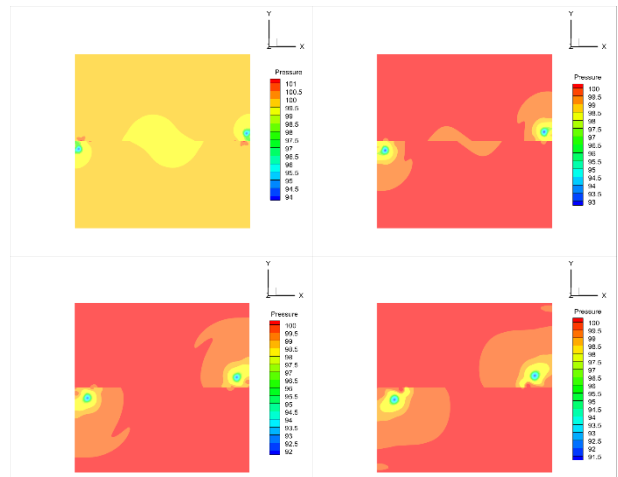
شکل ۱۸ کانتور انرژی جنبشی در زمان‌های ۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵ و ۱.۰۰ ثانیه در اختلاط زمانی

همانطور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود انرژی جنبشی در طول زمان به کندی در حال رشد و افزایش است و در ثانیه ۱.۰ هنوز به یکدیگر نرسیده است. این موضوع نشان‌دهنده کم بودن قدرت پخش انرژی جنبشی به دلیل ورودی‌های مختلف (روبروی هم) می‌باشد.

در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود که به علت پایین بودن گرادیان سرعت، نسبت به حالت اختلاط مکانی، ادی‌های کوچک و ناقصی در بالا و پایین مکعب ایجاد شده است.



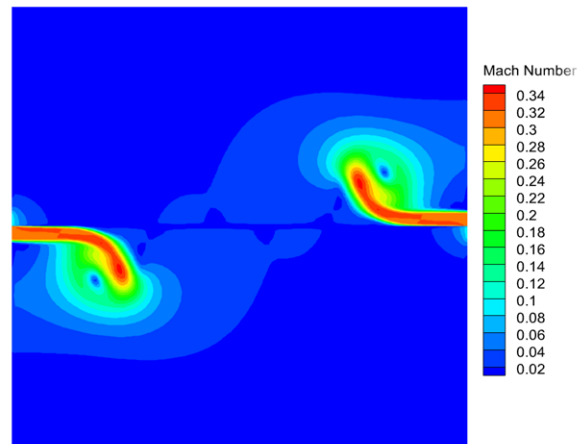
شکل ۲۳ کانتور دما در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط زمانی



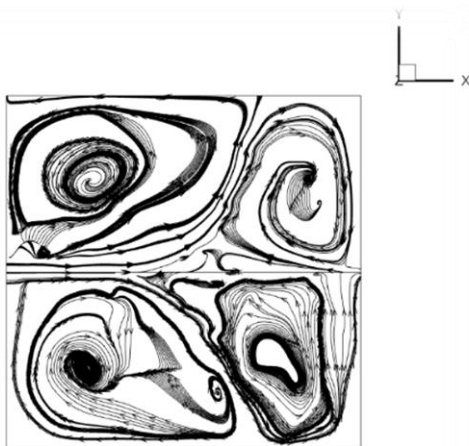
شکل ۲۱ کانتور فشار در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ثانیه در اختلاط زمانی

۳-۳-۶- بررسی کانتور عدد ماخ

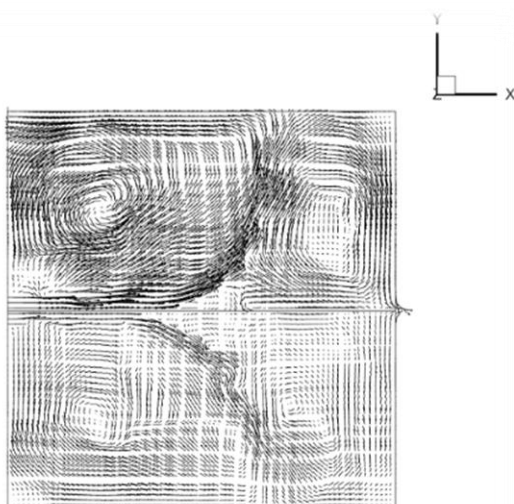
۳-۳-۴- کانتور خط جریان و بردار سرعت



شکل ۲۲ کانتور عدد ماخ در اختلاط زمانی



شکل ۲۴ خط جریان سیال در حالت اختلاط مکانی

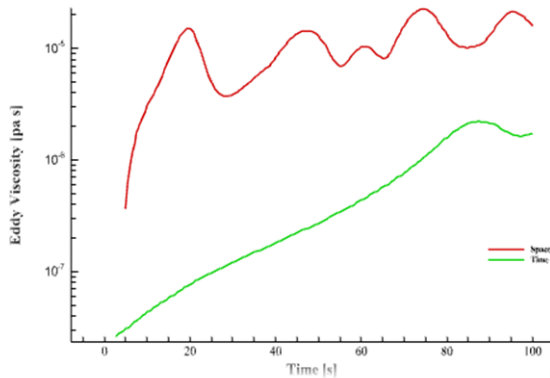


شکل ۲۵ بردار سرعت در حالت اختلاط مکانی

عدد ماخ معیاری از میزان تراکم‌پذیری سیال است. عدد ماخ در حالت اختلاط مکانی ۲ برابر حالت اختلاط زمانی است و این به دلیل دور بودن مجراهای ورودی سیال و سرعت کمتر در حالت زمانی می باشد که در شکل (۲۲) دیده می‌شود.

۳-۳-۷- بررسی کانتور دما

شکل (۲۳) کانتور دما در اختلاط زمانی را نشان می‌دهد که بر خلاف اختلاط مکانی در این حالت به علت تشکیل نشدن گردابه‌های بزرگ در دامنه سیال، انرژی درونی سیال بالا نمی‌باشد و همین امر باعث شده که دما در این نوع اختلاط کمتر قابل محسوس باشد و افزایش دما در حالت زمانی بیست و پنج درصد حالت مکانی است که این خود دلیل قانع‌کننده‌ای است که اختلاط در حالت مکانی خیلی بهتر انجام می‌شود.



شکل ۲۸ ادی ویسکوزیته در حالت مکانی و زمانی

۵- نتیجه گیری

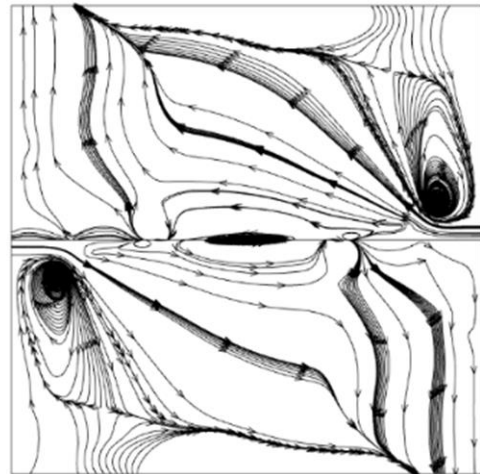
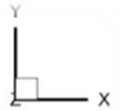
در این تحقیق، به روش عددی با نرم افزار انسیس فلونت، شبیه سازی جریان تراکم پذیر با استفاده از روش گردابه های بزرگ انجام گردید.

هندسه مسئله را یک فضای مکعبی در نظر گرفته شد و شبکه بندی با سازمان بر روی آن انجام گرفت. همچنین شبیه سازی در دو حالت مکانی و زمانی انجام گردید که در حالت مکانی دو ورودی با جهت یکسان و سرعت های ۱۱۰ و ۲۲۰ متر بر ثانیه و در حالت زمانی دو ورودی با جهت های مخالف با سرعت های برابر ۱۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. پس از انجام شبیه سازی و بررسی، نتایج زیر به دست آمد.

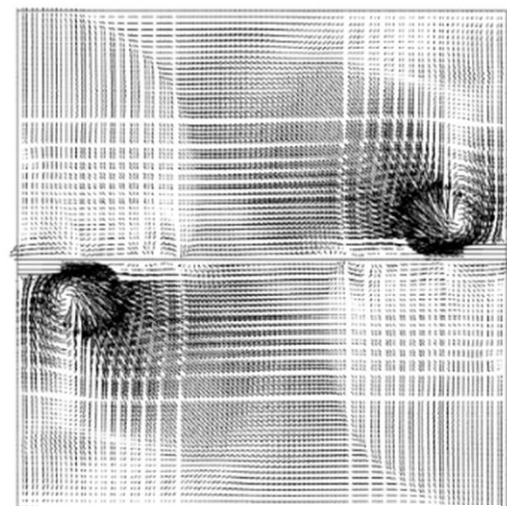
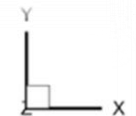
در حالت مکانی به علت وجود گرادیان سرعت بیشتر نسبت به حالت زمانی، انرژی جنبشی کل جریان، نسبت به حالت زمانی خیلی بیشتر شد.

با بررسی کانتور گردابه، گردابه ها و ادی ها متوجه شدیم که در حالت مکانی، زوج گردابه هایی که در اثر این دو جت به وجود می آیند از حالت زمانی بزرگتر هستند و انرژی بیشتری در خود دارند و با سرعت بیشتری در محیط پخش می شوند.

در حالت مکانی به علت سرعت تقابل و انرژی بیشتری که دارند باعث می شود تا حرکت آنها تصادفی تر از حالت زمانی باشد و شدت آنها در محیط نیز بیشتر باشد و این باعث می گردد که سرعت بیشتری در محیط باشد و گردابه ها شکسته شوند و تعداد گردابه های بزرگ در داخل محیط بیشتر گردند و سرعت به ناحیه های دورتر از جت ها بیشتر نفوذ کند؛ اما در حالت زمانی به دلیل ورودی های دورتر از هم، گرادیان سرعت کم، قدرت آنها بسیار کمتر است و همچنین مشاهده شد که ابعاد آنها کوچکتر است و این ابعاد کوچکتر باعث می شوند که این گردابه ها سریعتر از حالت مکانی در سیستم تلف شوند و به طور کلی پخش مومنتوم



شکل ۲۶ خط جریان سیال در حالت اختلاط



شکل ۲۷ بردار سرعت در حالت اختلاط زمانی

۴- مقایسه نتایج نمودارهای مکانی و زمانی

در این بخش نتایج مربوط به ادی ویسکوزیته بررسی شده و نتایج آنها به صورت نمودار آورده شده است.

با توجه به شکل (۲۸) در حالت مکانی گردابه ها در حال تقویت یکدیگر هستند؛ یعنی هر دو سرعت در یک راستا هستند. در صورتیکه در حالت زمانی چون سرعت ها مخالف هم می باشند، یک حالت خنثی سازی خیلی کم وجود دارد. زیرا سرعت ها مخالف جهت هم حرکت می کنند. پس در حالت مکانی بحث تقویت گردابه ها را داریم ولی در حالت زمانی خنثی سازی وجود دارد، اما به طور کلی هر دو نمودار روند افزایشی یکسانی دارند.

u بردار سرعت (m/s)

v سرعت سیال (m/s)

x_j مختصات مکانی (m)

علائم یونانی

δ_{ij} دلتای کرونیکر است که به صورت $\delta_{ij} = 1$ اگر $i = j$ و $\delta_{ij} = 0$ اگر $i \neq j$ تعریف می شود.

∂_t عملکرد دیفرانسیل جزئی $\frac{\partial}{\partial t}$

∂_j عملکرد دیفرانسیل جزئی $\frac{\partial}{\partial x_j}$

μ ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)

ρ چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)

σ_{ij} تانسور تنش ویسکوز

در حالت مکانی خیلی بیشتر از حالت زمانی است. انتقال حرارت در لایه‌های اختلاطی مکانی خیلی بیشتر از حالت اختلاط زمانی می‌باشد و دمای دامنه هندسه تقریباً ۴ برابر دمای تولید شده در حالت زمانی می‌باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

a_R سرعت صوت مرجع (m/s)

D قطر یا اندازه ورودی جت (m)

e چگالی انرژی کل

p فشار (atm)

t زمان (s)

T دما (K)

۷- مراجع

Theoretical and Applied Mechanics Letters, vol. 11, no. 1, p. 100229, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2021.100229>.

- [8] B. Vreman, B. Geurts, and H. Kuerten, "Large-eddy simulation of the turbulent mixing layer," *Journal of fluid mechanics*, vol. 339, pp. 357-390, 1997, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112097005429>.
- [9] D. Modesti, S. Sathyanarayana, F. Salvadore, and M. Bernardini, "Direct numerical simulation of supersonic turbulent flows over rough surfaces," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 942, p. A44, 2022, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.393>.
- [10] G. De Stefano, E. Brown-Dymkoski, and O. V. Vasilyev, "Wavelet-based adaptive large-eddy simulation of supersonic channel flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 901, p. A13, 2020, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.536>.
- [11] M. Sayed, M. Hadžiabdić, A. Dehbi, B. Ničeno, and K. Mikityuk, "Simulation of flow and heat transfer in a differentially heated cubical cavity using coarse Large Eddy Simulation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 183, p. 107892, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107892>.
- [12] N. Muhammad, M. M. Lashin, and S. Alkhatib, "Simulation of turbulence flow in OpenFOAM using the large eddy simulation model," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 236, no. 5, pp. 2252-2265, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/09544089221109736>.
- [13] A. W. Vreman, "Direct and large-eddy simulation of the compressible turbulent mixing layer," 1995, doi: <https://doi.org/10.3990/1.9789090088846>.
- [1] R. H. Kraichnan, "Eddy viscosity in two and three dimensions," *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 33, no. 8, pp. 1521-1536, 1976, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<1521:EVITAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<1521:EVITAT>2.0.CO;2).
- [2] D. K. Lilly, "The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments," in *Proc. IBM Sci. Comput. Symp. on Environmental Science*, 1967, pp. 195-210, doi: https://doi.org/10.2208/jscej.1999.628_97.
- [3] J. Deardorff, "The use of subgrid transport equations in a three-dimensional model of atmospheric turbulence," 1973, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3447047>.
- [4] J. Smagorinsky, "General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment," *Monthly weather review*, vol. 91, no. 3, pp. 99-164, 1963, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2).
- [5] J. W. Deardorff, "A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 41, no. 2, pp. 453-480, 1970, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112070000691>.
- [6] U. Schumann, "Subgrid scale model for finite difference simulations of turbulent flows in plane channels and annuli," *Journal of computational physics*, vol. 18, no. 4, pp. 376-404, 1975, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(75\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(75)90093-5).
- [7] W. Zhang, M. Wan, Z. Xia, J. Wang, X. Lu, and S. Chen, "Constrained large-eddy simulation of turbulent flow over inhomogeneous rough surfaces,"

- [16] K. P. Griffin, L. Fu, and P. Moin, "Velocity transformation for compressible wall-bounded turbulent flows with and without heat transfer," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 34, p. e2111144118, 2021, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2111144118>.
- [14] Q. Guan, J. Liang, M. Sun, L. Zhang, and W. Chen, "Large eddy simulation of supersonic mixing layers using a compressible filtered mass density function method," *Aerospace Science and Technology*, vol. 124, p. 107425, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107425>.
- [15] A. Leonard, "Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows," in *Advances in geophysics*, vol. 18: Elsevier, 1975, pp. 237-248.

ارزیابی فنی، اقتصادی و تعیین روش مناسب خنک سازی هوای ورودی نیروگاه سیکل ترکیبی با تکنیک‌های چند معیاره

علی اکبر قبادی
فومشی
دانشجوی دکتری

حمیدرضا طباطبایی*
استادیار

یاسر ملایی برزی
استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد کاشان، دانشگاه آزاد
اسلامی، کاشان، ایران

چکیده: در فصول گرم سال به دلیل افزایش دمای ورودی به کمپرسور توان تولیدی توربین های گاز کاهش می یابد. خنک سازی هوای ورودی توربین گاز یک فناوری است که باعث بهبود عملکرد توربین گاز می شود، که در آن با صرف هزینه کمتر توان توربین گاز به ازای هر کیلووات افزایش پیدا می کند. در این مطالعه سه روش خنک سازی هوای ورودی توربین گازی شامل فاگ، مدیا و چیلر جذبی به منظور بهبود عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان مورد ارزیابی فنی و اقتصادی قرار گرفته اند. در این مقاله با بکارگیری تکنیک چند معیاره (تاپسیس) با توجه به معیارهای تصمیم گیری، اولویت بندی روش خنک سازی هوای ورودی جهت بکارگیری در نیروگاه کاشان انجام شده است و اولویت بندی روش ها با استفاده از روش های تاپسیس مشخص شدند. با توجه به شرایط فنی و اقتصادی و شرایط محیطی منطقه کاشان با استفاده از تکنیک های چند معیاره سیستم خنک کاری مدیا به عنوان سیستمی مناسب جهت بهبود عملکرد در این نیروگاه انتخاب و معرفی می گردد. با استفاده از سیستم مدیا در نیروگاه کاشان، توان خالص خروجی از نیروگاه به میزان ۵/۱۶۶ درصد، بازده انرژی و انرژی سیکل گازی به ترتیب ۲/۲۶ و ۲/۲۵ درصد افزایش می یابد.

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

واژه‌های راهنما: توربین گاز، انرژی، انرژی، تاپسیس، خنک کاری هوای ورودی، ترموفلو

Ali Akbar
Ghobadi Fomeshi
PhD Student

Hamidreza
Tabatabaei*
Assistant Professor

Yaser
Mollaei Barzi
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Kashan
Branch, Islamic Azad
University,
Kashan, Iran

Technical, economic evaluation and determining appropriate method of cooling of inlet air of combined cycle power plant with multi-criteria techniques

Abstract: In hot seasons of year, due to increase in inlet temperature to compressor, production power of gas turbines decreases. Gas turbine inlet air cooling is a technology that improves gas turbine performance, in which gas turbine power per kilowatt is increased by spending less. In this study, three gas turbine inlet air cooling methods including fog, media and absorption chiller have been technically and economically evaluated in order to improve performance of Kashan combined cycle power plant. In this article, by using multi-criteria technique according to decision criteria, prioritization of inlet air cooling method for use in Kashan power plant has been done and prioritization of methods has been determined using TOPSIS¹ methods. Considering technical and economic conditions and environmental conditions of Kashan region, using multi-criteria techniques, Media cooling system is selected and introduced as a suitable system to improve performance in this power plant. By using media system in Kashan power plant, net power output from power plant increases by 5.166%, energy efficiency and exergy of gas cycle increases by 2.26% and 2.25%, respectively.

Keywords: Gas turbine, Energy, Exergy, TOPSIS, Inlet air cooling, Thermoflow

۱- مقدمه

همدانی و همکاران عملکرد یک سیستم خنک‌سازی هوای ورودی را برای یک نیروگاه گازی ۱۵۷ مگاواتی واقع در جنوب ایران مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک روش خنک‌سازی هیبریدی جدید، سیستم‌های خنک‌سازی ترکیبی (سیستم خنک‌سازی تبخیری غیرمستقیم+چیلر جذبی) پیشنهاد دادند. سپس با آنالیز عملکردی و حرارتی-اقتصادی افزایش توان خروجی، درآمد خالص حاصل از افزایش فروش برق و دوره بازپرداخت را نشان دادند [۲].

زیتون خنک‌سازی هوای ورودی توربین گاز تبخیری دو مرحله‌ای را برای مدل توربین گاز GE 7001EA در شرایط آب و هوایی شهر ریاض عربستان بررسی کرد. سیستم تبخیری دو مرحله‌ای از مراحل تبخیری غیر مستقیم و مستقیم تشکیل شده است. با شبیه‌سازی توربین گاز با استفاده از نرم افزار ترموفلکس^۲ مقایسه پارامترهای عملکردی مختلف توربین‌های گازی انجام شد و سود سالیانه اضافه شده و دوره بازپرداخت برای سیستم‌های مختلف خنک‌سازی هوای ورودی برآورد شد [۱].

برکات و همکارانش، مقایسه اثرات سه روش خنک کننده هوا شامل مبدل حرارتی هوایی، سیستم فاگ و سیستم کولینگ هیبریدی جدید، بر عملکرد یک توربین گازی در نیروگاه Damietta واقع در منطقه ساحلی مصر را انجام داده‌اند. آنها مشاهده کردند که سیستم هیبریدی نسبت به سایر سیستم‌ها برتر است، زیرا قادر به افزایش متوسط انرژی سالانه ۹/۹ درصد در مقابل ۸ و ۶/۶ درصد به ترتیب برای سیستم فاگ و سیستم مبدل حرارتی هوایی است. علاوه بر این، سیستم هیبریدی در مقایسه با سیستم فاگ میزان مصرف آب را تا ۵۰ درصد کاهش داده و در مناطقی که درجه حرارت بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی کمتر از ۶۰ درصد باشد، کارآمدترین روش است [۳].

ماتجانوو برای خنک کردن هوای ورودی توربین گازی ۲۸/۱ مگاواتی در تاشکند که میزان تولید آن به ۲۴/۱ مگاوات کاهش یافته بود و همچنین در حالی که دمای محیط آن به ۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسید، بازده الکتریکی از ۳۴/۲ درصد به ۳۲ درصد کاهش می‌یافت، چیلر جذبی پیشنهاد کرده است تا این کاهش را جبران نماید. برای فرآیند خنک کننده چیلر جذبی نیز از سه نوع منبع گرما، گازهای توربین گاز، گازهای HRSG و انرژی خورشیدی استفاده نمود [۴].

لین و همکارانش نیز به یک مطالعه مقایسه‌ای از ویژگی‌های عملکردی در یک کمپرسور توربین گازی قبل و بعد از تزریق آب

تاکنون روش‌های زیادی جهت بهبود عملکرد سیکل‌های ترکیبی ارائه شده است که هر کدام از این روش‌ها اثرات متفاوتی بر روی توان خروجی، بازده و مصرف ویژه سوخت، مصرف یا بازیابی آب دارند.

انتخاب یک روش خاص با توجه به نوع نیروگاه، شرایط اقلیمی منطقه کاری، نحوه تأثیر آن بر عملکرد سیکل، تجهیزات و شرایط اقتصادی طرح صورت می‌گیرد.

از مهمترین پارامترهای مؤثر بر عملکرد توربین گاز می‌توان به مواردی مانند نسبت فشار، دمای ورودی به کمپرسور، بازده کمپرسور، کار مصرفی کمپرسور، دمای ورودی به توربین، بازده توربین، کار خروجی توربین، نسبت سوخت به هوا، دبی جرمی سیال عبوری اشاره کرد. با ارائه یک سری روش‌ها و تغییر هر یک از پارامترهای گفته شده، می‌توان عملکرد توربین گاز را بهبود بخشید.

روش‌های مؤثر در بهبود عملکرد توربین گاز عبارتند از: خنک‌کاری میانی، خنک‌کاری تبخیری (مدیا و فاگ)، خنک‌کاری از راه ذخیره سازی انرژی (ذخیره سازی یخ آب سرد)، خنک‌کاری تبریدی (با استفاده از چیلر جذبی و چیلر تراکمی)، تزریق آب یا بخار به محفظه احتراق، گرم کردن هوای خروجی از کمپرسور، تولید بخار به وسیله بویلر بازیاب.

از آنجا که خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور، یک فرآیند مستقل است، بنابراین در توربین‌های گاز در حال بهره برداری عملی است و طرح و اجرای ساده‌تری دارد. خنک‌سازی هوای ورودی توربین گاز یک فناوری شناخته شده است که برای بهبود عملکرد توربین گاز استفاده می‌شود، که در آن توان توربین گاز با هزینه کمتری به ازای هر کیلووات افزایش می‌یابد [۱]. روش‌های مختلفی برای خنک‌سازی هوای ورودی توربین استفاده شده است.

توربین‌های گازی دارای حساسیت دمای محیطی هستند که در آن با افزایش دمای محیط، ظرفیت و بازده هر دو کاهش می‌یابد. تقاضای توان بخش کمپرسور متناسب با دمای مطلق هوای ورودی است. ظرفیت نرخ جریان جرمی کمپرسور متناسب با چگالی هوا در ورودی کمپرسور است که با دمای مطلق نسبت معکوس دارد. بنابراین دمای بالای محیط بر ظرفیت و کارایی توربین تأثیر منفی می‌گذارد. رویکردهای مختلفی برای خنک‌سازی هوای ورودی توربین به کار گرفته شده است.

² Thermoflex¹ IECS

کیلووات توان خروجی واحد و کل صرفه‌جویی سالیانه سوخت ۳۵۴/۶ تن در طول سال را نشان داد [۱۰].

آندری رادچنکو و همکاران یک طراحی سیستم خنک‌سازی ابتکاری برای آب و هوای معتدل پیشنهاد کردند: خنک‌سازی هوای ورودی بسته به دمای خنک‌سازی در دو مرحله اجرا می‌شود. این روش به یک مرحله خنک‌سازی با دمای بالا و یک مرحله خنک‌سازی با دمای پایین تقسیم می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که صرفه‌جویی در سوخت سالیانه یک توربین احتراقی با استفاده از سیستم خنک‌سازی هوای ورودی ترکیبی جذبی- تزریقی ۵۰ درصد بیشتر از یک توربین احتراقی است که فقط از یک سیستم چیلر جذبی لیتیوم بروماید تک اثره استفاده می‌کند [۱۱].

تولبا و همکاران یک سیستم خنک‌سازی هوای ترکیبی جدید با استفاده از سیستم خنک‌سازی تبریدی قبل از سیستم خنک‌سازی فاگ برای کاهش اندازه سیستم خنک‌سازی و بهبود عملکرد توربین گاز پیشنهاد دادند. تخریب آگزورژی، توان خالص و همه بازده‌ها (قانون اول و بازده دوم) در شرایط مختلف بررسی شد و مدل تئوری با استفاده از داده‌های عملکرد واقعی نیروگاه توربین گازی ۲۵ مگاواتی (GE GT-TM) ساخته شده توسط GE، نیروگاه هلیوپولیس-مصر اعتبارسنجی شد.

نتایج نشان داد حداکثر افزایش توان خروجی در حداکثر دمای محیط (۳۱۳ کلوین) حدود ۱۴/۳ درصد است، در حالی که تغییر راندمان قانون اول و راندمان قانون دوم بسیار کم است و می‌توان آن را نادیده گرفت. سیستم خنک‌سازی چند مرحله‌ای پیشنهادی آنها در صورت استفاده از یک سیستم چیلر، هزینه دوره برگشت را کاهش می‌دهد. این به معنای هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های کل سالیانه پایین است [۱۲].

اسپینوسا و همکاران یک تکنیک جدید برای کاهش دمای هوای ورودی به GT با بازیابی گرمای تلف شده از گازهای خروجی پیشنهاد دادند. محتوای حرارتی گاز خروجی به عنوان منبع حرارتی یک سیکل تبرید اجکتوری و ظرفیت خنک‌سازی تولید شده برای خنک کردن هوای ورودی به GT استفاده گردید. تجزیه و تحلیل آگزورژی و محیطی برای بررسی روش پیشنهادی بر بازده آگزورژی، عوامل محیطی و شاخص پایداری انجام شد. نتایج نشان داد که با روش پیشنهادی تولید توان ۶/۲۶ درصد افزایش یافت [۱۳].

اودیلوا و همکاران یک بررسی فنی بر اساس تحلیل مقایسه‌ای فن‌آوری‌های خنک‌سازی هوای ورودی توربین گازی و کاربردهای

به هوای ورودی جهت خنک‌سازی آن پرداختند. نتایج آنها نشان داد با این روش می‌توان تا رنج ۰/۵ درصد بازده سیستم را افزایش داد [۱۵].

دنگ و همکاران بررسی‌های گسترده‌ای از سیستم‌های خنک‌سازی هوای ورودی توربین گاز انجام دادند. هدف این کار ارائه یک بررسی پیشرفته از عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی بر اساس چندین سیستم خنک‌کننده هوای ورودی پیشنهادی بود. مطالعه آنها نشان داد که مصرف انرژی چیلر مکانیکی در مقایسه با سرمایه‌گذاری تبخیری زیاد است. علاوه بر این، CCPP مجهز به چیلر جذبی بهترین راه حل را برای افزایش عملکرد تا ۲۳ درصد را نشان داد [۱۶].

دیزاجی و همکاران سیستم‌های خنک‌سازی ورودی هیبریدی را بررسی کرد. آنها گزارش کردند که سیستم‌های خنک‌سازی ورودی هیبریدی معمولاً به مقادیر آب جبرانی کمتری نسبت به سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری معمولی نیاز دارند، زیرا مقدار آبی که در ابتدا باید اضافه شود به طور قابل توجهی کمتر است. در مقایسه با تراکم بخار مکانیکی، سیستم هیبریدی هوا را تا دمای متوسط خنک می‌کند و ظرفیت سرمایه‌گذاری/برودتی مورد نیاز را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. بنابراین چیلرهای مورد نیاز می‌توانند ظرفیت نسبی کمتری داشته باشند و توان نسبتاً کمتری مصرف کنند [۱۷].

میشرا و همکاران با استفاده از خنک‌سازی هوای ورودی کمپرسور یک سیکل توربین گاز را از نظر قانون اول آنالیز کردند. توربین گاز در پارامترهای مختلف عملیاتی و محیطی بررسی شده و اثر آنها را بر کار ویژه و کارایی نیروگاه سیکل توربین گاز مورد مطالعه قرار دادند [۱۸].

کمال و همکاران تأثیر خنک‌سازی هوای ورودی توربین با استفاده از چیلرهای الکتریکی بر عملکرد ژنراتور توربین گازی LM6000PD در آب و هوای مالزی را با استفاده از نرم‌افزار جی تی پرو^۱ ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که توان خالص خروجی توربین گاز و نرخ حرارت به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد و خنک‌سازی هوای ورودی توربین با استفاده از چیلرهای الکتریکی به عنوان یک فناوری افزایش توان در مالزی موثر است [۱۹].

گنگ بکارگیری یک چیلر جذبی لیتیوم بروماید دو اثره را برای خنک‌سازی ورودی توربین گاز بر اساس داده‌های اقلیمی واقعی و پارامترهای فنی توربین گاز مطالعه کرد و صرفه‌جویی در سوخت سالیانه به عنوان معیار مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج یک صرفه‌جویی مصرف سوخت ۲۶۳۵۹/۲ گرم به ازای هر ۱

^۱ GT Pro

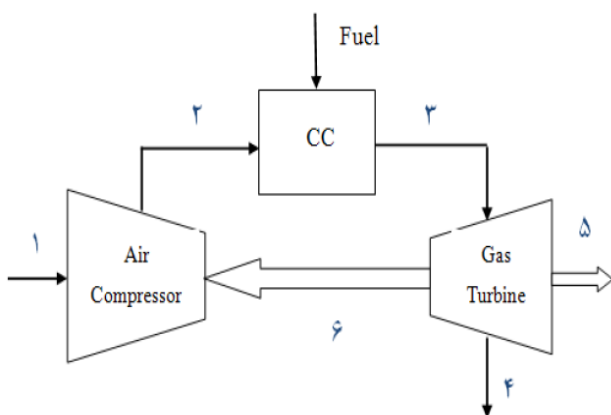
این کار بهبود عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان با رویکردی جدید مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور در کار حاضر به مدل سازی و تحلیل سیکل با استفاده از نرم افزار ترموفلو پرداخته می شود. در این کار به بررسی تأثیرگذاری سیستم های خنک سازی مختلف بر روی عملکرد نیروگاه گازی کاشان پرداخته خواهد شد.

در این مطالعه سه روش خنک سازی هوای ورودی توربین گاز؛ فاک، مدیا و چیلر جذبی دواثره از لحاظ فنی و اقتصادی مورد مطالعه قرار می گیرند و با توجه به معیارهای ارزش گذاری ارائه شده رتبه بندی شده و با توجه به معیار تصمیم گیری تاپسیس بهترین روش انتخاب می گردد.

در این مقاله برای اولویت بندی روش خنک سازی هوای ورودی جهت بکارگیری در نیروگاه کاشان از روش چند معیاره تاپسیس استفاده شده است و علاوه بر عوامل عملکردی و اقتصادی سیستم های خنک سازی پارامترهای تصمیم گیری دیگری مانند ریسک آسیب پذیری واحد، تغییرات در واحد، مصرف آب، دسترسی به قطعات یدکی، بهره برداری و نگهداری واحد و سهولت اجرای پروژه مورد استفاده قرار گرفته است و با توجه به این شاخص ها بهترین روش خنک سازی اولویت بندی شده است.

۲- مدل سازی ترمودینامیکی سیکل گازی نیروگاه کاشان

در این بخش به مدل سازی ترمودینامیکی سیکل گازی نیروگاه کاشان با استفاده از روابط ترمودینامیکی پرداخته می شود. شکل (۱) تصویری شماتیک از سیکل گازی را نشان می دهد.



شکل ۱ سیکل گازی

در جدول (۱) روابط قانون اول و دوم ترمودینامیک اجزای سیکل توربین گازی آورده شده است.

آن بر اساس شرایط اقلیمی را انجام دادند. بررسی آنها نشان داد که بیشترین سود حاصل از سرمایه گذاری تبخیری در آب و هوای گرم و کم رطوبت حاصل می شود. علاوه بر این، مقاله آنها نشان داد که کارایی کولر تبخیری عمدتاً به رطوبت موجود در هوا بستگی دارد و امکان سنجی هر برنامه خنک سازی هوای ورودی اساساً به مکان آن وابسته است [۱۴].

دابوان و همکاران یک سیستم خنک سازی هوای ورودی جدید را برای بهبود عملکرد توربین گازی در مناطق گرم پیشنهاد دادند. سیستم پیشنهادی آنها از حرارت اتلافی از اینترکولر برای خنک سازی هوای ورودی کمپرسور از طریق چیلرهای جذبی استفاده نمود. آنها عملکرد این سیستم و چهار فناوری رایج خنک سازی تبخیری، خنک سازی جذبی با انرژی خورشیدی، خنک سازی جذبی با بخار و خنک سازی تراکم بخار را مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که سیستم پیشنهادی توان خروجی را ۱۹ درصد و راندمان کلی را ۲/۳ درصد افزایش داد. نتایج نشان داد که دوره بازپرداخت سیستم آنها کوتاه تر از سیستم های خنک سازی دیگر است [۱۵].

دینس و همکاران اثر خنک سازی هوای ورودی بر انتشار گازهای گلخانه ای و عملکرد یک توربین گازی در دماهای مختلف محیط (۱۵ تا ۵۵ درجه سانتی گراد) را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک فرآیند تبرید را با یک موتور توربین گازی توربوشفت برای خنک سازی هوای ورودی ادغام کردند و نیروی مورد نیاز برای خنک سازی از توان خروجی توربین گاز استخراج شد. با خنک سازی هوای ورودی، تلفات توان خروجی به ۳/۲۸ درصد کاهش و افزایش انتشار گازهای گلخانه ای از ۵/۸۴ درصد به ۳/۴۱ درصد کاهش پیدا کرد، که نشان دهنده بهبود ۲/۴۳ درصدی در یک روز گرم با دمای ۵۵ درجه سانتی گراد بود [۱۶].

با توجه به مقالات و مطالعات گذشته، یکی از مهمترین مشکلات مربوط به توربین گاز در نیروگاه های سیکل ترکیبی و گازی کاهش توان تولیدی و راندمان آنها در فصل تابستان است. با افزایش دمای هوای محیط، دمای ورودی به کمپرسور افزایش می یابد. این امر باعث افزایش دمای خروجی کمپرسور و متعاقباً افزایش دمای ورودی به توربین می شود. این مشکل برای کشورهای که در مناطق گرمسیر قرار دارند به مراتب بیشتر است. با توجه به اینکه در کشور ما این مشکل گریبانگیر نیروگاه های گازی است، لذا بررسی دقیق و علمی این امر از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

با توجه به اینکه امکان سنجی هر برنامه خنک سازی هوای ورودی اساساً به مکان و شرایط محیطی منطقه بستگی دارد، در

جدول (۱) روابط ترمودینامیکی اجزای سیکل توربین گازی

روابط ترمودینامیکی	اجزای سیکل
$w_{AC,u} = w_{AC,a} = h_2 - h_1$ $\dot{W}_{AC,u} = \dot{W}_{AC,a} = \dot{m}_{air}(w_{AC,a})$ $w_{AC,s} = h_{2s} - h_1$ $\dot{W}_{AC,s} = \dot{m}_{air}(w_{AC,s})$ $\eta_{AC} = \frac{w_{AC,s}}{w_{AC,a}}$ $w_{AC,rev} = ex_2 - ex_1$ $\dot{W}_{AC,rev} = \dot{m}_{air} \times w_{AC,rev}$ $i_c = w_{cu} - w_{c,rev}$ $\dot{I}_c = \dot{W}_{cu} - \dot{W}_{c,rev}$ $\eta_{II,AC} = \frac{\dot{W}_{AC,rev}}{\dot{W}_{AC,u}}$	کمپرسور
$SFC = \frac{3600}{\eta_{th} LHV}$ $\overline{AFR} = \frac{n_a}{n_f}$ $AFR = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{Fuel}} = \frac{n_{air} M_{air}}{n_{Fuel} M_{Fuel}}$ $= \overline{AFR} \frac{M_{air}}{M_{Fuel}}$ $\dot{I}_{CC} = \dot{E}x_F + \dot{E}x_2 - \dot{E}x_3$ $\eta_{II,CC} = \frac{\dot{E}x_3}{\dot{E}x_F + \dot{E}x_2}$	محفظه احتراق
$\dot{W}_{GT} = \dot{W}_{GT,a} = \dot{m}_3 \times h_3 + \dot{m}_{Coolant} \times h_{Coolant} - \dot{m}_4 \times h_4$ $\dot{W}_{GT,s} = \dot{m}_3 \times h_3 + \dot{m}_{Coolant} \times h_{Coolant} - \dot{m}_{4s} \times h_{4s}$ $\eta_{GT,s} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{W}_{GT,s}}$ $\dot{W}_{GT,rev} = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_{Coolant} - \dot{E}x_4$ $\dot{I}_{GT} = \dot{W}_{GT,rev} - \dot{W}_{GT}$ $\eta_{II,GT} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{W}_{GT,rev}}$	توربین گازی
$W_{net} = \eta_{Gen} \times (W_{GT} - W_{AC,u})$ $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_F \times LHV}$ $\eta_{II,p} = \frac{W_{net}}{\dot{E}x_F}$ $HR = \frac{3600}{\eta_{th}}$ $\dot{I}_p = \dot{E}x_F - W_{net}$ $\eta_{th} = 1 - \frac{T_{4s} - T_1}{T_3 - T_{2s}}$	سیکل گازی

۳- معرفی سیکل ترکیبی نیروگاه کاشان

نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان یکی از نیروگاه‌های ایران از نوع سیکل ترکیبی با ظرفیت تولید بیش از ۴۷۰ مگاوات است که شامل ۲ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی و ۱ واحد بخار می‌باشد.

پروژه نیروگاه گازی کاشان، شامل دو واحد گازی به ظرفیت ۱۶۲ مگاوات (مجموعاً ۳۲۴ مگاوات) در شرایط ایزو می‌باشد که در آن از توربین‌های گازی V94.2 طرح نیام استفاده شده است. سوخت این نیروگاه گاز طبیعی و سوخت پشتیبان نفت گاز (گازوئیل) است که با دو مخزن ۲۰ هزار متر مکعبی ذخیره سازی می‌شود.

مشاور کارفرما شرکت مهندسی قدس نیرو و شرکت مدیریت طرح‌های نیروگاهی ایران (مپنا) به عنوان پیمانکار، وظیفه ساخت این نیروگاه را به عهده دارد.

موقعیت جغرافیایی: نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان در کیلومتر ۲۰ جاده کاشان به اردستان قرار دارد.

شرایط محیطی:

- رطوبت نسبی: ۲۰٪
- متوسط حداکثر دمای محیط: ۴۳ درجه سانتی‌گراد
- متوسط حداقل دمای محیط: ۱۲- درجه سانتی‌گراد
- ارتفاع از سطح دریا: ۹۳۷ متر

۴- شبیه‌سازی نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان در نرم افزار

ترموفلو

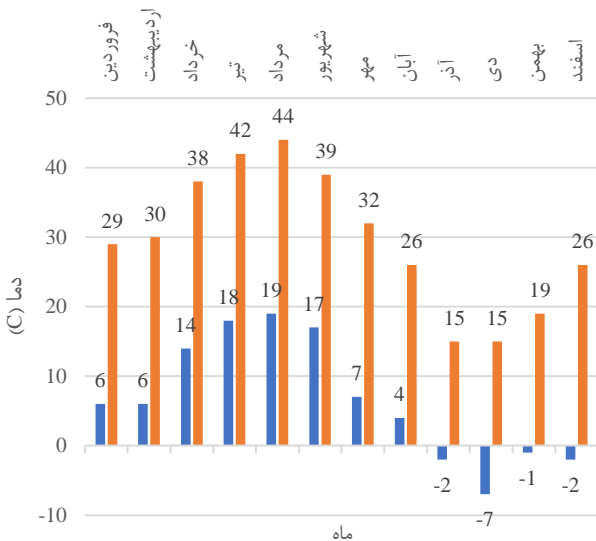
در این بخش به شبیه‌سازی سیکل گازی و ترکیبی نیروگاه کاشان در نرم افزار ترموفلو پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی سیکل ترکیبی اطلاعات مربوط به شرایط هوای محیط کاشان، با شرایط دمای ۴۳ درجه و فشار محیط ۰/۹۰۵۷ بار و رطوبت نسبی ۲۰ درصد وارد نرم افزار شده و شبیه‌سازی انجام می‌گردد.

۵- بررسی اثرات تغییر دمای محیط بر عملکرد سیکل

نیروگاه

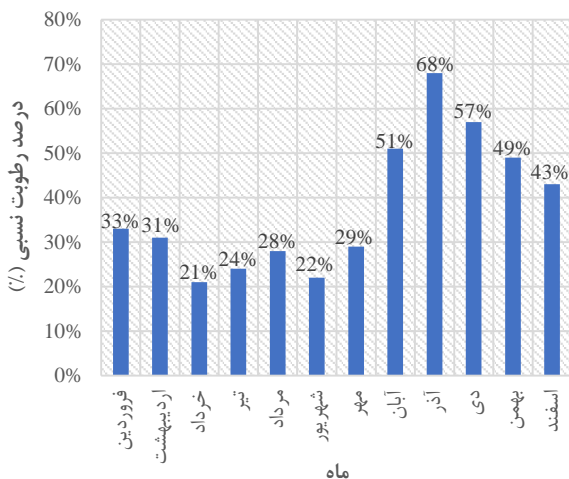
پیش‌بینی عملکرد توربین گازی در شرایط مختلف جوی، منجر به بکارگیری صحیح آن، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بهبود عملکرد و افزایش عمر مفید آن می‌شود. برای پیش‌بینی عملکرد توربین گازی باید به بررسی اثر پارامترهای محیطی بر عملکرد اجزای آن پرداخت. از جمله عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد توربین می‌توان به فشار، دما و رطوبت نسبی هوای محیط اشاره نمود.

است که آب و هوایی گرم و نیمه خشک دارد. میانگین دما در این نوع آب و هوا ۱۴ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شکل (۲) میانگین بالاترین و پایین‌ترین دما را در طول شبانه روز و برای هر یک از ماه‌های سال، برای شهر کاشان نشان می‌دهد.



شکل ۲ میانگین بالاترین و پایین‌ترین دمای محیط در شهر کاشان به درجه سانتی‌گراد

شکل (۳) میانگین رطوبت نسبی در طول شبانه روز را برای هر یک از ماه‌های سال برای شهر کاشان نشان می‌دهد.



شکل ۳ میانگین رطوبت نسبی در شهر کاشان

با گرم شدن هوا در طول تابستان و به تبع آن استفاده زیاد از تجهیزات خنک کننده در منازل و ادارات، میزان مصرف انرژی الکتریکی افزایش شدیدی پیدا خواهد کرد و کم شدن توان خروجی نیروگاه‌ها ممکن است مشکلاتی را در تأمین انرژی الکتریکی لازم در کشور ایجاد کند. بنابراین اولویت اصلی در

برای بررسی اثرات تغییر دمای محیط، دما در بازه ۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده، سپس تغییرات به ازای هر ۵ درجه افزایش دما بررسی شده و نتایج مقایسه می‌گردند. در این حالت سایر مشخصات مانند حالت پایه نیروگاه کاشان در نظر گرفته می‌شود (فشار محیط ۰/۹۰۵۷ بار، رطوبت نسبی ۰/۲۰/۱۴٪ و درصد بارگذاری ۱۰۰٪). همچنین در هر مرحله مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از دماهای مختلف و حالت پایه صورت می‌پذیرد.

دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور

توربین گازی یک سیستم تولید توان در حجم ثابت می‌باشد. با افزایش دمای هوای محیط و ثابت ماندن فشار هوای محیط، در یک حجم ثابت، دانسیته جریان هوا کاهش یافته و در نتیجه دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور کاهش می‌یابد. به ازای یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما، دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور به طور متوسط ۰/۸ کیلوگرم بر ثانیه کاهش می‌یابد.

توان و بازده نیروگاه

با افزایش دمای هوای محیط، توان توربین گاز و کمپرسور کاهش پیدا می‌کند، ولی به دلیل این که شیب کاهش توان توربین گاز بیشتر از کمپرسور می‌باشد، بنابراین توان ناخالص خروجی از سیکل گازی کاهش پیدا می‌کند. به ازای یک درجه سانتی‌گراد افزایش دمای هوای محیط، توان ناخالص خروجی از سیکل گازی به طور متوسط به میزان ۹۲۰ کیلووات کاهش می‌یابد، همچنین توان ناخالص سیکل به اندازه ۲۱۲۰ کیلووات کاهش خواهد یافت.

با افزایش دمای هوای محیط، بازده انرژی سیکل گازی کاهش می‌یابد. به ازای یک درجه سانتی‌گراد افزایش دمای هوای محیط، بازده سیکل گازی به طور متوسط به اندازه ۰/۰۶۴ درصد کاهش می‌یابد، همچنین بازده واحد نیز به ازای هر درجه افزایش دما به اندازه ۰/۰۴۸ درصد کاهش پیدا می‌کند.

۶- بهبود عملکرد سیکل گازی نیروگاه کاشان با خنک‌سازی هوای ورودی

در بخش قبل به بررسی تأثیر تغییرات دمای محیط بر روی عملکرد سیکل گازی و کل نیروگاه پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای محیط تأثیر زیادی بر روی توان خروجی از سیکل گازی و نیروگاه دارد، به طوری که در فشار و رطوبت نسبی ثابت، به ازای یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما، به طور متوسط ۰/۶۳ درصد از توان سیکل گازی (تقریباً برابر با kW ۶۸۸) و ۰/۵۳ درصد از توان نیروگاه (تقریباً برابر با kW ۱۶۳۷) کاسته می‌شود. نیروگاه کاشان در منطقه‌ای از ایران قرار گرفته

با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) از سیستم‌های خنک‌کاری در ساعات بین ۱۲/۳۰ ظهر تا ۱۸/۳۰ بعد از ظهر که بیشترین دما و کمترین رطوبت نسبی را دارند، استفاده خواهد شد.

۶-۱- تحلیل اقتصادی بکارگیری سه نوع سیستم خنک‌کاری در نیروگاه کاشان

یکی از مهمترین عوامل در تصمیم‌گیری به منظور رد یا پذیرش یک طرح صنعتی، بعد از ارزیابی‌های فنی طرح، بررسی اقتصادی طرح می‌باشد. طرح صنعتی مناسب، طرحی است که علاوه بر دارا بودن توجیه فنی و با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌ها در ساخت، تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری، از لحاظ اقتصادی نیز دارای توجیه مناسب باشد.

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی توجیه اقتصادی یک طرح صنعتی، بازگشت سرمایه است. بازگشت سرمایه از تقسیم میزان سرمایه‌گذاری برای انجام پروژه بر میزان درآمدهای دوره‌ای و با صرفه‌جویی صورت گرفته ناشی از انجام طرح، بدست می‌آید [۱۷].

$$PB = \frac{CC}{AS} \quad (30)$$

در رابطه بالا، CC نشان دهنده سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای انجام پروژه، PB مدت زمان بازگشت سرمایه برحسب سال و AS درآمد و یا صرفه‌جویی سالیانه ناشی از انجام پروژه می‌باشد.

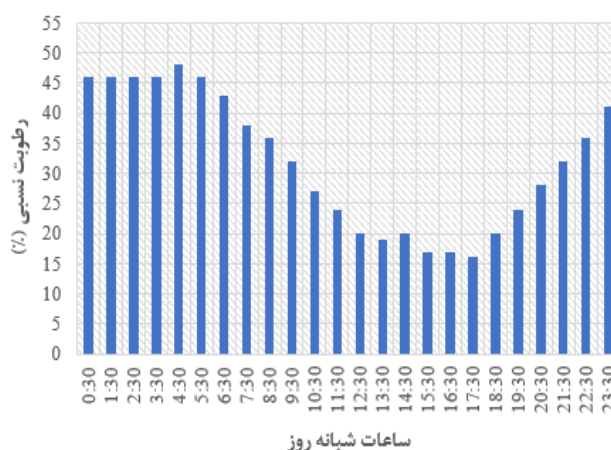
در توجیه فنی و اقتصادی سیستم‌های خنک‌کاری، باید پارامترهای زیر را مد نظر قرار داد.

- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه شامل هزینه‌های خرید و نصب تجهیزات
- هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری سالیانه
- هزینه‌های آب مصرفی
- هزینه مصرف سوخت اضافه به ازای افزایش توان تولیدی
- درآمد حاصل از افزایش توان الکتریکی خروجی از نیروگاه توسط سیستم‌های خنک‌کاری

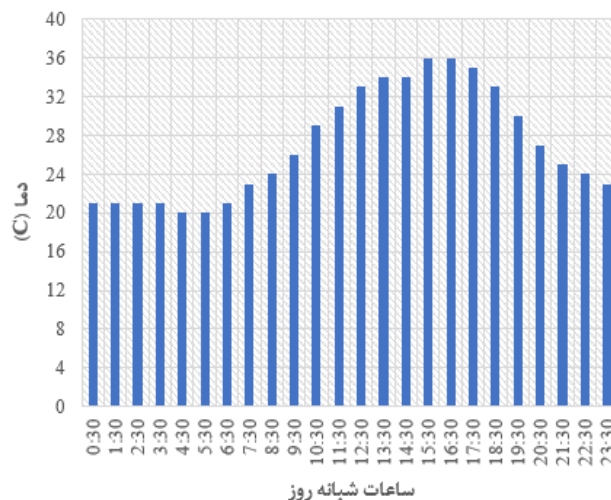
برای به‌دست آوردن میزان افزایش توان الکتریکی تولید شده توسط نیروگاه، با اضافه شدن سیستم خنک‌کاری، ابتدا میانگین دما و رطوبت هوای محیط، بین ساعات ۱۲/۳۰ ظهر تا ۱۸/۳۰ بعد از ظهر، برای هر کدام از ماه‌های گرم سال، توسط اطلاعات بدست آمده از سایت‌های هواشناسی محاسبه می‌شود. این اطلاعات در جدول (۲) آمده است.

نیروگاه‌ها، تولید توان بیشتر برای تأمین انرژی الکتریکی کشور می‌باشد. مجموع عوامل گفته شده موجب شده تا ضرورت خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور برای افزایش توان خروجی سیکل‌های گازی پیش از پیش احساس شود. در ادامه به بررسی فنی و اقتصادی استفاده از سه سیستم خنک‌کاری مرسوم در کشور شامل، سیستم‌های خنک‌کاری تبخیری مدیا و فاگ و خنک‌کاری تبریدی چیلر جذبی دو اثره، پرداخته خواهد شد. برای این کار ابتدا سه سیستم خنک‌کاری همراه با سیکل ترکیبی، در نرم افزار ترموفلو شبیه‌سازی می‌شود.

استفاده از سیستم‌های خنک‌کاری برای تمام ساعات روز و تمام سال از لحاظ فنی و اقتصادی مناسب نمی‌باشد، بنابراین از آنها فقط در ماه‌هایی که بیشترین میانگین دمایی و کمترین رطوبت را دارند، استفاده خواهد شد. از سیستم‌های خنک‌کاری از اول اردیبهشت تا آخر مهر ماه استفاده خواهد شد. شکل‌های (۴) و (۵) میانگین دما و رطوبت نسبی را در طول شبانه روز در ماه مرداد و برای شهر کاشان نشان می‌دهد.



شکل ۴ میانگین رطوبت نسبی در طول شبانه روز در ماه مرداد



شکل ۵ میانگین دما در طول شبانه روز در ماه مرداد

در ادامه با استفاده از نرم افزار ترموفلو، بلوک سیکل ترکیبی را برای هر دو حالت، بدون خنک کاری و همراه با سیستم خنک کاری، شبیه سازی کرده و میانگین توان تولید شده سیکل گازی و نیروگاه در یک ساعت و برای ۶ ماه گرم سال و برای هر دو حالت محاسبه می شود. نتایج حاصل از محاسبات برای سیستم خنک کاری فاگ در جدول (۳) و برای سیستم خنک کاری مدیا و چیلر جذبی در جدول (۴) آمده است.

جدول ۵ میزان افزایش توان یک بلوک سیکل ترکیبی با استفاده از خنک کاری فاگ

ماه	میزان افزایش توان سیکل ترکیبی	
	یک ساعت (kWh)	کل ماه (kWh)
اردیبهشت	۲۱۷۲۸	۴۰۴۱۴۰۸
خرداد	۲۶۰۳۳	۴۸۴۲۱۳۸
تیر	۲۶۷۵۱	۴۹۷۵۶۸۶
مرداد	۲۶۵۸۲	۴۹۴۴۲۵۲
شهریور	۲۷۲۱۶	۵۰۶۲۱۷۶
مهر	۲۲۶۸۴	۴۰۸۳۱۲۰
	میزان افزایش توان در ۶ ماه	۲۷۹۴۸۷۸۰

جدول ۶ میزان افزایش توان یک بلوک سیکل ترکیبی با استفاده از خنک کاری مدیا و چیلر جذبی

ماه	میزان افزایش توان سیکل ترکیبی			
	همراه با خنک کاری چیلر جذبی		همراه با خنک کاری مدیا	
	یک ساعت (kWh)	کل ماه (kWh)	یک ساعت (kWh)	کل ماه (kWh)
اردیبهشت	۲۱۸۰۰	۴۰۵۴۸۰۰	۲۳۹۲۳	۴۴۴۹۶۷۸
خرداد	۲۶۱۴۰	۴۸۶۲۰۴۰	۲۰۸۷۷	۳۸۸۳۱۲۲
تیر	۲۶۸۶۳	۴۹۹۶۵۱۸	۲۰۸۲۷	۳۸۷۳۸۲۲
مرداد	۲۶۶۹۷	۴۹۶۵۶۴۲	۲۰۸۱۰	۳۸۷۰۶۶۰
شهریور	۲۷۳۲۵	۵۰۸۲۴۵۰	۲۰۸۸۷	۳۸۸۴۹۸۲
مهر	۲۲۷۸۰	۴۱۰۰۴۰۰	۲۲۲۵۱	۴۰۰۵۱۸۰
	میزان افزایش توان در ۶ ماه	۲۸۰۶۱۸۵۰	۲۳۹۶۷۴۴۴	

جدول ۲ میانگین دما و رطوبت محیط در ۶ ماه گرم سال برای شهر کاشان

ماه	دمای حساب خشک (C)	دمای حساب تر (C)	رطوبت %
اردیبهشت	۲۳	۱۰	۲۰
خرداد	۳۰	۱۳	۱۴
تیر	۳۳/۵	۱۶	۱۷
مرداد	۳۴	۱۶	۱۸
شهریور	۳۲	۱۴	۱۴
مهر	۲۵	۱۱	۱۸

جدول ۳ میانگین توان تولید شده در یک ساعت و برای ۶ ماه گرم سال برای سیکل بدون خنک کاری و همراه با خنک کاری فاگ

ماه	بدون خنک کاری		همراه با خنک کاری فاگ	
	توان سیکل گازی (kW)	توان سیکل ترکیبی (kW)	توان سیکل گازی (kW)	توان سیکل ترکیبی (kW)
اردیبهشت	۲۸۲۹۷۲	۴۳۳۲۳۴	۳۰۴۹۱۲	۴۵۴۹۶۲
خرداد	۲۷۰۲۳۰	۴۱۷۱۷۹	۲۹۶۵۳۲	۴۴۳۲۱۲
تیر	۲۶۴۱۳۶	۴۰۸۶۹۳	۲۹۱۱۷۰	۴۳۵۴۴۴
مرداد	۲۶۳۲۸۰	۴۰۷۴۹۲	۲۹۰۱۴۴	۴۳۴۰۷۴
شهریور	۲۶۶۷۰۲	۴۱۲۲۸۶	۲۹۴۲۰۴	۴۳۹۵۰۲
مهر	۲۷۹۵۰۸	۴۲۹۱۴۴	۳۰۲۴۱۸	۴۵۱۸۲۸

جدول ۴ میانگین توان تولید شده در یک ساعت و برای ۶ ماه گرم سال برای سیکل همراه با خنک کاری مدیا و چیلر جذبی

ماه	همراه با خنک - کاری مدیا		همراه با خنک کاری چیلر جذبی	
	توان سیکل گازی (kW)	توان سیکل ترکیبی (kW)	توان سیکل گازی (kW)	توان سیکل ترکیبی (kW)
اردیبهشت	۳۰۴۹۰۴	۴۵۵۰۳۴	۳۰۷۱۳۲	۴۵۷۱۵۷
خرداد	۲۹۶۵۳۶	۴۴۳۳۱۹	۲۹۱۳۲۲	۴۳۸۰۵۶
تیر	۲۹۱۱۷۲	۴۳۵۵۵۶	۲۸۵۱۷۴	۴۲۹۵۲۰
مرداد	۲۹۰۱۴۸	۴۳۴۱۸۹	۲۸۴۳۰۰	۴۲۸۳۰۲
شهریور	۲۹۴۲۰۰	۴۳۹۶۱۱	۲۸۷۸۰۲	۴۳۳۱۷۳
مهر	۳۰۲۴۲۸	۴۵۱۹۲۴	۳۰۱۹۸۲	۴۵۱۳۹۵

ریال در نظر گرفته شده است [۲۱]. هزینه آب مصرفی برای ۶ ماه گرم سال و برای ۲ واحد سیستم فاگ برابر است با:

$$(10032.012 \times 2) \times 132000 = 2648451168 \text{ Rial} \quad (31)$$

جدول ۷ میزان مصرف آب دمین سیستم فاگ

ماه	میزان مصرف آب	
	در یک ساعت (لیتر)	در یک ماه (لیتر)
اردیبهشت	۷۲۷۵/۶	۱۳۵۳۲۶۱/۶
خرداد	۹۵۳۲/۸	۱۷۷۳۱۰۰/۸
تیر	۹۷۸۱/۲	۱۸۱۹۳۰۳/۲
مرداد	۹۷۱۲/۸	۱۸۰۶۵۸۰/۸
شهریور	۹۹۷۵/۶	۱۸۵۵۴۶۱/۶
مهر	۷۹۱۲/۸	۱۴۲۴۳۰۴
میزان مصرف آب در ۶ ماه		۱۰۰۳۲۰۱۲

سیستم مدیا

مقدار آب مورد نیاز برای ماه‌های گرم سال و برای یک سیستم خنک‌کاری مدیا با استفاده از نرم افزار ترموفلو محاسبه شده و برای یک واحد برابر با ۱۰۶۵۹۲۶۸/۸ لیتر می‌باشد. هزینه تمام شده هر متر مکعب آب، معادل با ۵۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است [۲۱]. هزینه آب مصرفی برای ۶ ماه گرم سال و برای ۲ واحد سیستم مدیا برابر است با:

$$(10659.269 \times 2) \times 5000 = 106592690 \text{ Rial} \quad (32)$$

جدول ۸ میزان مصرف آب سیستم مدیا

ماه	در یک ساعت (لیتر)	در یک ماه (لیتر)
اردیبهشت	۷۷۱۴/۸	۱۴۳۴۹۵۲/۸
خرداد	۱۰۱۲۳/۲	۱۸۸۲۹۱۵/۲
تیر	۱۰۳۸۶	۱۹۳۱۷۹۶
مرداد	۱۰۳۱۴	۱۹۱۸۴۰۴
شهریور	۱۰۵۸۷/۶	۱۹۶۹۲۹۳/۶
مهر	۸۳۹۸/۸	۱۵۱۱۷۸۴
میزان مصرف آب در ۶ ماه		۱۰۶۵۹۲۶۸/۸

۱-۱-۶- درآمد حاصل از افزایش توان الکتریکی نیروگاه

اگر قیمت هر کیلووات ساعت برق خریداری شده از نیروگاه را برابر با ۴۰۰۰ ریال در نظر بگیریم، کل درآمد حاصل از افزایش توان نیروگاه توسط سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب برابر با ۱۱۱۷۹۵/۱۲، ۱۱۲۲۴۷/۴۰ و ۹۵۸۶۹/۷۶ میلیون ریال می‌باشد.

۱-۲-۶- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم خنک‌کاری

با توجه به محاسبات قبلی حداکثر افزایش توان الکتریکی در یک سیکل گازی برابر با ۱۲MWh می‌باشد و اگر هزینه متوسط خرید و نصب تجهیزات در این حالت با توجه به مرجع [۲۰] برای سیستم فاگ و مدیا برابر با ۴۷\$/kWh و برای چیلر جذبی دو اثره برابر با ۱۲۵ \$/kWh در نظر گرفته شود، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای دلار ۵۰۰۰۰۰ ریال برای ۲ واحد با سیستم‌های خنک‌سازی مختلف محاسبه می‌شود که برای سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب برابر با ۲۸۲۰۰۰، ۲۸۲۰۰۰ و ۷۵۰۰۰۰ میلیون ریال می‌باشد.

۱-۳-۶- هزینه‌های سالیانه سیستم خنک‌کاری

هزینه‌های سالیانه برابر با مجموع هزینه‌های سوخت اضافه مصرف شده، هزینه آب مصرفی و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد که در ادامه برای سیستم‌های خنک‌کاری مختلف آورده شده است.

۱-۳-۱-۶- هزینه آب دمین مصرفی سالیانه سیستم فاگ

واحد تصفیه آب نیروگاه کاشان ظرفیت تولید روزانه ۱۰۰۰ متر مکعب آب دمین و ۲۵۰ متر مکعب آب دامستیک (نرم) را دارا می‌باشد [۲۱]. منظور از آب دمین، آب خالصی است که زبری و خوردندگی نداشته باشد و عاری از یون باشد (چه یون مثبت و چه یون منفی)، اما آب دامستیک لزوماً نباید عاری از یون باشد و فقط کافی است خاصیت خوردندگی نداشته باشد. مقدار آب دمین مورد نیاز برای ماه‌های گرم سال و برای یک سیستم خنک‌کاری فاگ با استفاده از نرم افزار ترموفلو محاسبه شده و در جدول (۷) مشخص شده است. هزینه تمام شده هر متر مکعب آب دمین، شامل هزینه‌های آب خام و فرآیندهای تصفیه معادل با ۱۳۲۰۰۰

۶-۱-۳-۲- هزینه مصرف سوخت اضافی سالیانه

میزان سوخت مصرف شده برای یک بلوک سیکل ترکیبی در حالات سیکل ترکیبی همراه با سیستم‌های خنک‌کاری مختلف و سیکل ترکیبی بدون خنک‌کاری برای هر یک از ۶ ماه گرم سال در جدول (۹) مشخص شده است.

جدول ۹ میزان مصرف سوخت یک بلوک سیکل ترکیبی

ماه	بدون خنک- کاری	همراه با فاگ	همراه با مدیا	همراه با چیلر جذبی
اردیبهشت	۹/۰۲۸	۹/۵۲۵	۹/۵۶۱	۹/۵۹۸
خرداد	۸/۷۲	۹/۳۴۱	۹/۳۸۱	۹/۲۳۵
تیر	۸/۵۸۴	۹/۲۱۵	۹/۲۵۴	۹/۰۸۹
مرداد	۸/۵۶۵	۹/۱۹۲	۹/۲۳	۹/۰۶۹
شهریور	۸/۶۳۹	۹/۲۸۶	۹/۳۲۵	۹/۱۵
مهر	۸/۹۴۳	۹/۴۶۹	۹/۵۰۸	۹/۴۸۵

میزان سوخت اضافه مصرف شده در طول یک ماه برای سیستم‌های خنک‌کاری مختلف در یک واحد سیکل گازی برای هر یک از ۶ ماه گرم سال در جدول (۱۰) مشخص شده است.

جدول ۱۰ میزان سوخت اضافه مصرف شده با استفاده از خنک‌کاری و برای یک واحد سیکل گازی

ماه	فاگ	مدیا	چیلر جذبی
اردیبهشت	۳۳۲۷۹۱/۲	۳۵۶۸۹۶/۸	۳۸۱۶۷۲
خرداد	۴۱۵۸۲۱/۶	۴۴۲۶۰۵/۶	۳۴۴۸۴۴
تیر	۴۲۲۵۱۷/۶	۴۴۸۶۳۲	۳۳۸۱۴۸
مرداد	۴۱۹۸۳۹/۲	۴۴۵۲۸۴	۳۳۷۴۷۸/۴
شهریور	۴۳۳۲۳۱/۲	۴۵۹۳۴۵/۶	۳۴۲۱۶۵/۶
مهر	۳۴۰۸۴۸	۳۶۶۱۲۰	۳۵۱۲۱۶
میزان اضافه سوخت مصرفی در ۶ ماه	۲۳۶۵۰۴۹	۲۵۱۸۸۸۴	۲۰۹۵۵۲۴

با در نظر گرفتن بهای هر متر مکعب گاز طبیعی برابر با ۷۰۰ ریال در ایران [۲۲]، هزینه مصرف سوخت اضافه برای سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی در ۲ واحد برای ۶ ماه گرم سال به ترتیب برابر با ۴۴۳۲/۴۸، ۴۷۲۰/۸۰ و ۳۹۲۷/۳۵ میلیون ریال می‌باشد.

۶-۱-۳-۳- هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه

این هزینه‌ها طبق مراجع، برای سیستم‌های فاگ و مدیا ۲٪ هزینه سرمایه‌گذاری [۱۸] و برای سیستم چیلر جذبی، حداکثر ۳٪ هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشند [۱۹]، بنابراین هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه ۲ واحد برای سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی برای دلار ۵۰۰۰۰۰ ریال به ترتیب برابر با ۵۶۴۰، ۵۶۴۰ و ۲۲۵۰۰ میلیون ریال می‌باشد.

حال مجموع هزینه‌های سالیانه که برابر با مجموع هزینه‌های سوخت اضافه مصرف شده، هزینه آب دمین مصرفی و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد، برای سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی محاسبه می‌شود که به ترتیب برابر با ۱۰۴۶۷/۸، ۱۲۷۲۰/۵۰ و ۲۶۴۲۷ میلیون ریال بدست می‌آید.

۶-۱-۴- مدت زمان بازگشت سرمایه سیستم خنک‌کاری

با تقسیم هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بر درآمد خالص سالیانه سیستم خنک‌کاری، مدت زمان بازگشت سرمایه، برای سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر به ترتیب برابر با ۲/۸۴، ۲/۷۷ و ۱۰/۸۰ سال بدست می‌آید.

همان‌طور که مشاهده شد، بیشترین زمان لازم برای بازگشت سرمایه سیستم‌های خنک‌کاری، مربوط به چیلر جذبی دو اثره و کمترین زمان لازم، مربوط به خنک‌کاری تبخیری مدیا می‌باشد. استفاده از خنک‌کاری تبریدی چیلر جذبی دو اثره با قیمت دلار ۵۰۰۰۰۰ ریال کاملاً غیر اقتصادی می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد قیمت دلار تأثیر زیادی بر اقتصادی یا غیر اقتصادی بودن استفاده از سیستم‌های خنک‌کاری دارد. همچنین به دلیل این که استفاده از سیستم‌های خنک‌کاری باعث تولید توان اضافه زیادی می‌شود، قیمت برق خریداری شده از نیروگاه نیز تأثیر زیادی بر اقتصادی یا غیر اقتصادی بودن طرح‌ها دارد.

۶-۱-۵- قیمت توان اضافه تولیدی به ازای یک کیلووات

ساعت تولیدی

قیمت توان اضافه تولیدی نیروگاه با سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیل و چیلر جذبی بدون در نظر گرفتن هزینه سرمایه- گذاری اولیه برای دلار ۵۰۰۰۰۰ ریال به ترتیب برابر با ۴۵۵/۱۴، ۳۷۳/۰۳ و ۱۱۰۲/۶۲ ریال به ازای کیلووات ساعت بدست می‌آید.

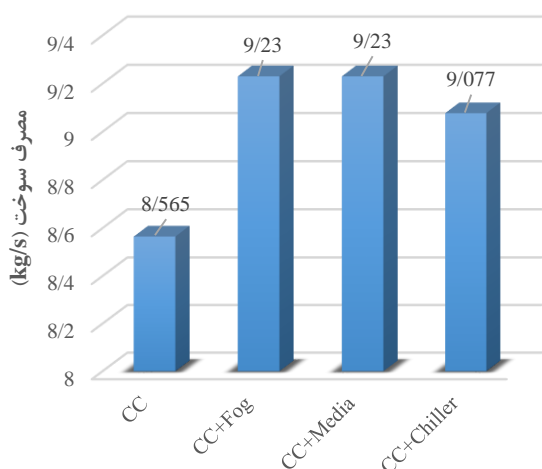
همانطور که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود، با خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور، نرخ حرارتی سیکل گازی کاهش می‌یابد. کمترین نرخ حرارتی در سیکل گازی با استفاده از فاگ و مدیا اتفاق می‌افتد.

جدول ۱۱ نرخ حرارتی سیکل گازی در سیکل‌های مختلف

سیکل	مقدار kJ/kWh	میزان کاهش kJ/kWh	درصد کاهش %
بدون خنک‌کاری	۱۰۸۴۰	-	-
همراه با چیلر	۱۰۶۴۵	۱۹۵	٪۱/۸
همراه با فاگ و مدیا	۱۰۶۰۰	۲۴۰	٪۲/۲۱

۶-۲-۴- مصرف سوخت

مطابق با شکل (۷)، با خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور، مصرف سوخت افزایش می‌یابد. کمترین مصرف سوخت مربوط به سیکل ترکیبی همراه با چیلر جذبی می‌باشد.



شکل ۷ مقایسه مصرف سوخت در سیکل‌های ترکیبی مختلف

۷- معرفی مناسب‌ترین روش جهت خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور

در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، منظور از معیار، عواملی است که تصمیم‌گیرنده به منظور افزایش مطلوبیت و رضایتمندی از انتخاب، مدنظر قرار می‌دهد. معیار در تصمیم‌گیری ممکن است به صورت شاخص یا هدف ارائه گردد. شاخص عبارت است از ویژگی‌ها یا پارامترهای عملکردی که برای انتخاب گزینه‌های

۶-۲- تحلیل فنی بکارگیری سه نوع سیستم خنک‌کاری در نیروگاه کاشان

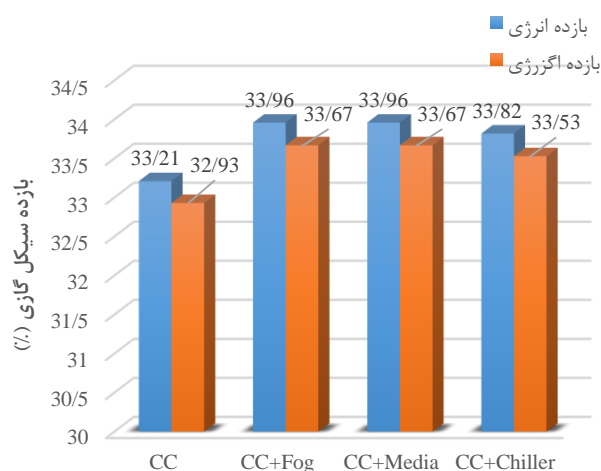
پس از محاسبات و آنالیز ترمودینامیکی توسط نرم افزار برای شرایط آب و هوای کاشان نتایج شبیه‌سازی حاصل می‌گردد. برای آنالیز بهبود عملکرد با بکارگیری نرم افزار ترموفلو، سه روش مختلف فاگ، مدیا و چیلر جذبی بررسی می‌شوند. برای مقایسه بهتر پارامترهای عملکردی خروجی مختلف مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرند.

۶-۲-۱- توان خالص خروجی

با توجه به نتایج بیشترین افزایش در توان خالص خروجی نیروگاه، مربوط به سیکل ترکیبی همراه با سیستم خنک‌کاری مدیا و بعد از آن فاگ می‌باشد. برای سیستم‌های خنک‌سازی مختلف فاگ، مدیا و چیلر جذبی میزان افزایش توان نیروگاه به ترتیب برابر با ۴۳۴/۰۷۴، ۴۳۴/۱۸۹ و ۴۲۸/۳۰۲ مگاوات محاسبه می‌گردد.

۶-۲-۲- بازده انرژی

مطابق با شکل (۶)، با خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور، بازده انرژی و انرژی سیکل گازی افزایش می‌یابد. بیشترین بازده انرژی و انرژی سیکل گازی در سیکل ترکیبی همراه با سیستم مدیا و فاگ اتفاق می‌افتد.



شکل ۶ مقایسه بازده انرژی و انرژی سیکل گازی در سیکل‌های ترکیبی مختلف

۶-۲-۳- نرخ حرارتی

در این مقاله داده‌های مربوط به معیارهای تصمیم‌گیری شامل: توان خالص خروجی، بازده انرژی، بازده انرژی، نرخ حرارتی، مصرف سوخت، بازگشت سرمایه، قیمت توان اضافه تولیدی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، ریسک آسیب‌پذیری واحد، تغییرات در واحد، مصرف آب، دسترسی به قطعات یدکی، بهره برداری و نگهداری واحد و سهولت اجرای پروژه می‌باشد و سپس نتایج اولویت‌بندی روش‌ها با استفاده از روش‌های تاپسیس مشخص می‌شود.

در جداول (۱۲) و (۱۳) به مقایسه تأثیر استفاده از سه نوع سیستم خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی بر روی برخی از پارامترهای مهم در سیکل گازی و نیروگاه پرداخته شده است. معیارهای تعریف شده در جدول (۱۴) نشان داده شده است. معیارهای یک مسئله چند معیاره با توجه به تأثیر آن‌ها به دو دسته مثبت و منفی تقسیم می‌شوند. معیارهای مثبت آن دسته از معیارها هستند که تأثیری مثبت در فرآیند تصمیم‌گیری دارند و هدف حداکثر کردن آن‌ها است و در طرف مقابل معیارهای منفی، معیارهایی هستند که باید به حداقل برسند. در جدول (۱۴) سه مورد اول معیار مثبت و مابقی معیار منفی می‌باشند.

۷-۱- گزینه‌های تصمیم‌گیری

گزینه‌های مورد بررسی در این مقاله سه روش خنک‌سازی هوای ورودی توربین گاز؛ فاگ، مدیا و چیلر جذبی دو اثره می‌باشد.

۷-۲- معیارهای تصمیم‌گیری

معیارهای تعریف شده در جدول (۱۴) نشان داده شده است. معیارهای یک مسئله چند معیاره با توجه به تأثیر آن‌ها به دو دسته مثبت و منفی تقسیم می‌شوند. معیارهای مثبت آن دسته از معیارها هستند که تأثیری مثبت در فرآیند تصمیم‌گیری دارند و هدف حداکثر کردن آن‌ها است و در طرف مقابل معیارهای منفی، معیارهایی هستند که باید به حداقل برسند. در جدول (۱۴) سه مورد اول معیار مثبت و مابقی معیار منفی می‌باشند.

۷-۳- ماتریس تصمیم‌گیری

در ماتریس تصمیم‌گیری اطلاعات مربوط به گزینه‌ها و معیارها ثبت می‌شود. در این تصمیم‌گیری، ۳ گزینه به وسیله ۱۴ معیار ارزیابی می‌شوند. تمام اطلاعات به‌دست آمده برای گزینه‌ها با توجه به معیارها در جدول (۱۴) وجود دارد. این جدول در واقع

تصمیم مطرح می‌باشد. در مسائل تصمیم‌گیری چنانچه تصمیم‌گیری بر اساس چند شاخص صورت گیرد، آن را تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌نامند. تنها در صورتی نتایج نهایی مدل استفاده شده قابل اعتماد می‌باشد که معیارهای مسائل به خوبی شناسایی شوند. در این مقاله عواملی تأثیرگذار بر اولویت‌بندی روش خنک‌سازی هوای ورودی جهت بکارگیری در نیروگاه کاشان تشریح شده است. این عوامل تأثیرگذار، شاخص‌های ارزیابی مسئله در روش تصمیم‌گیری چند شاخصه هستند.

جدول ۱۲ مقایسه تأثیر استفاده از سه سیستم خنک‌کاری بر روی پارامترهای نیروگاه

مدیا	فاگ	چیلر جذبی	پارامترها
۲۹۰/۱۴۸	۲۹۰/۱۴۴	۲۸۴/۳۰۰	توان خالص خروجی سیکل گازی (MW)
۴۳۴/۱۸۹	۴۳۴/۰۷۴	۴۲۸/۳۰۲	توان خالص خروجی نیروگاه (MW)
۳۳/۹۶	۳۳/۹۶	۳۳/۸۲	بازده انرژی سیکل گازی (%)
۳۳/۶۷	۳۳/۶۷	۳۳/۵۳	بازده انرژی سیکل گازی (%)
۱۰۶۰۰	۱۰۶۰۰	۱۰۶۴۵	نرخ حرارتی سیکل گازی (kJ/kWh)
۹/۲۳	۹/۱۹۲	۹/۰۶۹	مصرف سوخت (kg/s)
۲/۷۷	۲/۸۴	۱۰/۸۰	بازگشت سرمایه (سال)
۳۷۳/۰۳	۴۵۵/۱۴	۱۱۰۲/۶۲	قیمت توان اضافه تولیدی (Rial/kWh)

جدول ۱۳ مقایسه سه سیستم خنک‌کاری با توجه به معیارهای ارزش‌گذاری طرح‌های خنک‌کاری

پارامترها	مدیا	فاگ	چیلر جذبی
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۱	۱	۲
ریسک آسیب‌پذیری واحد به دلیل نصب سیستم خنک‌کاری	۳	۲	۱
حداقل تغییرات در واحد سیکل ترکیبی	۱	۱	۲
کمترین مصرف آب	۲	۳	۱
سهولت دسترسی به قطعات یدکی	۲	۳	۱
سهولت بهره‌برداری و نگهداری واحد	۱	۲	۳
سهولت اجرای پروژه تا زمان راه اندازی	۲	۱	۳

محاسبه نمود. در این بخش وزن معیارها توسط پرسشنامه از نظر خبرگان حوزه‌های انرژی، فنی و اقتصادی نیروگاه کاشان به دست آمده است و سناریو وزن‌دهی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

در گام بعد پس از اختصاص وزن معیارها، ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس شده موزون مطابق با جدول (۱۶) از ضرب بردار وزن‌ها در ماتریس بی‌مقیاس شده بدست خواهد آمد.

در روش تاپسیس راه حل ایده‌آل مثبت برداری متشکل از بزرگ‌ترین مقدار برای شاخص‌های مثبت و کوچک‌ترین مقدار برای شاخص‌های منفی است. به بیان دیگر راه حل ایده‌آل مثبت شامل بهترین مقادیر برای هر معیار است. راه حل ایده‌آل منفی نیز به همین بیان تعریف می‌شود.

در جدول (۱۷) راه حل ایده‌آل مثبت و منفی نشان داده می‌شود. جهت محاسبه راه حل ایده‌آل مثبت و منفی برای هر معیار به ترتیب المان ماکزیمم و مینیمم در هر سطر انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که در معیارهای از جنس سود مقدار ماکزیمم و در معیارهای از جنس هزینه مقدار مینیمم در نظر گرفته می‌شوند.

در جدول (۱۷) معیارهای (۱) تا (۳) از جنس سود و باقی معیارها از جنس هزینه هستند.

جدول ۱۵ وزن معیارها

ردیف	شاخص	وزن
شاخص ۱	توان خالص خروجی	۰/۰۵
شاخص ۲	بازده انرژی	۰/۰۵
شاخص ۳	بازده انرژی	۰/۰۵
شاخص ۴	نرخ حرارتی	۰/۰۵
شاخص ۵	مصرف سوخت	۰/۰۷۵
شاخص ۶	بازگشت سرمایه	۰/۱
شاخص ۷	قیمت توان اضافه تولیدی	۰/۱
شاخص ۸	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۰/۱
شاخص ۹	ریسک آسیب‌پذیری واحد	۰/۰۵
شاخص ۱۰	تغییرات در واحد	۰/۰۷۵
شاخص ۱۱	هزینه مصرف آب (میلیون تومان)	۰/۰۷۵
شاخص ۱۲	دسترسی به قطعات یدکی	۰/۰۷۵
شاخص ۱۳	بهره‌برداری و نگهداری واحد	۰/۱
شاخص ۱۴	سهولت اجرای پروژه	۰/۰۵

همان ماتریس تصمیم‌گیری است که سطرهای آن معیارها و ستون‌های آن گزینه‌های تصمیم‌گیری هستند.

جدول ۱۴ تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

شاخص	گزینه ۱	گزینه ۲	شاخص ۳
	فاگ	مدیا	چیلر جذبی
توان خالص خروجی	۲۹۰/۱۴	۲۹۰/۱۵	۲۸۴/۳
بازده انرژی	۳۳/۹۶	۳۳/۹۶	۳۳/۸۲
بازده انرژی	۳۳/۶۷	۳۳/۶۷	۳۳/۵۳
نرخ حرارتی	۱۰۶۰۰	۱۰۶۰۰	۱۰۶۴۵
مصرف سوخت	۹/۱۹	۹/۲۳	۹/۰۷
بازگشت سرمایه	۲/۸۴	۲/۷۷	۱۰/۸۰
قیمت توان اضافه تولیدی	۴۵۵/۱۴	۳۷۳/۰۳	۱۱۰۲/۶۲
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۲۸۲۰۰	۲۸۲۰۰	۷۵۰۰۰
ریسک آسیب‌پذیری واحد	۲	۳	۱
تغییرات در واحد	۱	۱	۲
هزینه مصرف آب (میلیون تومان)	۲۶۴/۸۵	۱۰/۶۶	۱
دسترسی به قطعات یدکی	۳	۲	۱
بهره‌برداری و نگهداری واحد	۲	۱	۳
سهولت اجرای پروژه	۱	۲	۳

۷-۴- اجرای متد تاپسیس

با توجه به اینکه اطلاعات ثبت شده در ماتریس تصمیم‌گیری با مقیاس‌های متفاوتی اندازه‌گیری شده‌اند، بنابراین قابل مقایسه با یکدیگر نیستند و در ابتدای مرحله روش تاپسیس، ماتریس تصمیم‌گیری به دست آمده از مرحله قبل (جدول (۱۴)) را با استفاده از روش‌های بی‌مقیاس‌سازی به ماتریسی که درایه‌های آن قابل مقایسه با یکدیگر تبدیل می‌کنیم. درایه‌های این ماتریس همگی اعدادی در بازه (۰ و ۱) هستند که به راحتی قابل قیاس با یکدیگر هستند. در این روش درایه‌های ماتریس بی‌مقیاس شده طبق فرمول برابر با مقادیر هر المان از ماتریس تصمیم‌گیری تقسیم بر مجذور مجموع مربعات المان‌های هم‌شاخص می‌باشد.

پس از بی‌مقیاس‌سازی درایه‌ها ماتریس بدست آمده وزن‌دهی می‌شوند. وزن معیارها را می‌توان از روش‌های مختلف

جدول ۱۶ تشکیل ماتریس بی‌مقیاس موزون

شاخص	سیستم فاگ	سیستم مدیا	چیلر جذبی دو اثره
توان خالص خروجی	۰/۰۲۹۰۶۱	۰/۰۲۹۰۶۲	۰/۰۲۸۴۷۶
بازده انرژی	۰/۰۲۸۹۰۷	۰/۰۲۸۹۰۷	۰/۰۲۸۷۸۸
بازده انرژی	۰/۰۲۸۹۰۸	۰/۰۲۸۹۰۸	۰/۰۲۸۷۸۷
نرخ حرارتی	۰/۰۲۸۸۲۷	۰/۰۲۸۸۲۷	۰/۰۲۸۹۴۹
مصرف سوخت	۰/۰۴۳۴۳۴	۰/۰۴۳۶۱۳	۰/۰۴۲۸۵۳
بازگشت سرمایه	۰/۰۲۴۶۸۴	۰/۰۲۴۰۷۵	۰/۰۹۳۸۶۷
قیمت توان اضافه تولیدی	۰/۰۳۶۴۱۶	۰/۰۲۹۸۴۶	۰/۰۸۸۲۲۲
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۰/۰۳۳۱۹۸	۰/۰۳۳۱۹۸	۰/۰۸۸۲۹۳
ریسک آسیب پذیری واحد	۰/۰۲۶۷۲۶	۰/۰۴۰۰۸۹	۰/۰۱۳۳۶۳
تغییرات در واحد	۰/۰۳۰۶۱۹	۰/۰۳۰۶۱۹	۰/۰۶۱۲۳۷
هزینه مصرف آب	۰/۰۷۴۹۳۹	۰/۰۰۳۰۱۶	۰/۰۰۰۰۲۸
دسترسی به قطعات یدکی	۰/۰۶۰۱۳۴	۰/۰۴۰۰۸۹	۰/۰۲۰۰۴۵
بهره‌برداری و نگهداری واحد	۰/۰۵۳۴۵۲	۰/۰۲۶۷۲۶	۰/۰۸۰۱۷۸
سهولت اجرای پروژه	۰/۰۱۳۳۶۳	۰/۰۲۶۷۲۶	۰/۰۴۰۰۸۹

جدول ۱۸ نتایج اجرای روش تاپسیس

نام سیستم	سیستم فاگ	سیستم مدیا	چیلر جذبی دو اثره
di+	۰/۰۹۰۳۰۸	۰/۰۳۶۱۱۳	۰/۱۲۵۷۹۱
di-	۰/۱۱۴۲۴۰	۰/۱۴۴۴۳۸	۰/۰۸۹۰۷۱
Cli	۰/۵۵۸۵۰	۰/۷۹۹۹۸	۰/۴۱۴۵۵
رتبه	۲	۱	۳

سیستم مدیا با نزدیکی نسبی ۰/۷۹۹۹۸ اولویت اول و به ترتیب گزینه‌های فاگ با ۰/۵۵۸۵۰ و چیلر جذبی دو اثره با ۰/۴۱۴۵۵ اولویت دوم و سوم در روش‌های خنک‌سازی هوای ورودی به توربین گاز را به خود اختصاص داده‌اند.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل فنی بکارگیری سه نوع سیستم خنک‌کاری در نیروگاه کاشان مشخص گردید که برای سیستم‌های فاگ، مدیا و چیلر جذبی میزان افزایش توان خالص خروجی نیروگاه به ترتیب برابر با ۴۳۴/۰۷۴، ۴۳۴/۱۸۹ و ۴۲۸/۳۰۲ مگاوات می‌باشد. همچنین بازده انرژی برای سیستم اصلی نیروگاه و این سه سیستم فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب ۳۳/۲۱ درصد، ۳۳/۹۶ درصد، ۳۳/۹۶ درصد و ۳۳/۸۲ درصد بودند که نتایج نشان می‌دهد بازده برای سیستم‌های فاگ و مدیا به میزان ۲/۲۶ درصد افزایش پیدا کرده است. با مقایسه نتایج مشاهده گردید که با خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور، نرخ حرارتی سیکل گازی کاهش می‌یابد و کمترین نرخ حرارتی در سیکل گازی با استفاده از فاگ و مدیا اتفاق می‌افتد که به میزان ۲/۲۱ درصد نسبت به سیستم اصلی کاهش پیدا کرده است. همچنین با خنک‌سازی هوای ورودی به کمپرسور، مصرف سوخت افزایش می‌یابد. کمترین مصرف سوخت مربوط به سیکل ترکیبی همراه با چیلر جذبی می‌باشد. مصرف سوخت برای سیستم اصلی نیروگاه و این سه سیستم فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب ۸/۵۶۵، ۹/۲۳، ۹/۲۳ و ۹/۰۷۷ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد.

برای بررسی اقتصادی سیستم‌های خنک‌سازی، با در نظر گرفتن قیمت هر کیلووات ساعت برق خریداری شده از نیروگاه برابر با ۴۰۰۰ ریال، کل درآمد حاصل از افزایش توان نیروگاه توسط سیستم‌های خنک‌کاری فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب ۱۱۱۷۹۵/۱۲، ۱۱۲۲۴۷/۴ و ۹۵۸۶۹/۷۶ میلیون ریال حاصل گردید. برای محاسبه مدت زمان بازگشت سرمایه، میزان سرمایه‌گذاری اولیه برای انجام پروژه بر میزان درآمدهای دوره‌ای و

جدول ۱۷ راه حل‌های ایده‌آل در روش تاپسیس

شاخص	ایده‌آل مثبت	ایده‌آل منفی
توان خالص خروجی	۰/۰۲۹۰۶۲	۰/۰۲۸۴۷۶
بازده انرژی	۰/۰۲۸۹۰۷	۰/۰۲۸۷۸۸
بازده انرژی	۰/۰۲۸۹۰۸	۰/۰۲۸۷۸۷
نرخ حرارتی	۰/۰۲۸۸۲۷	۰/۰۲۸۹۴۹
مصرف سوخت	۰/۰۴۲۸۵۳	۰/۰۴۳۶۱۳
بازگشت سرمایه	۰/۰۲۴۰۷۵	۰/۰۹۳۸۶۷
قیمت توان اضافه تولیدی	۰/۰۲۹۸۴۶	۰/۰۸۸۲۲۲
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۰/۰۳۳۱۹۸	۰/۰۸۸۲۹۳
ریسک آسیب‌پذیری واحد	۰/۰۱۳۳۶۳	۰/۰۴۰۰۸۹
تغییرات در واحد	۰/۰۳۰۶۱۹	۰/۰۶۱۲۳۷
هزینه مصرف آب	۰/۰۰۳۰۱۶	۰/۰۷۴۹۳۹
دسترسی به قطعات یدکی	۰/۰۲۰۰۴۵	۰/۰۶۰۱۳۴
بهره‌برداری و نگهداری واحد	۰/۰۲۶۷۲۶	۰/۰۸۰۱۷۸
سهولت اجرای پروژه	۰/۰۱۳۳۶۳	۰/۰۴۰۰۸۹

\dot{W}	توان (kW)
علائم یونانی	
η	بازده
γ	نسبت گرمای ویژه
زیرنویس‌ها	
1	ورودی کمپرسور
2	خروجی کمپرسور
3	ورودی توربین
4	خروجی توربین
II	قانون دوم
a	هوا
Ac	مربوط به کمپرسور
air	مربوط به هوا
c	کمپرسور
cc	محفظه احتراق
Coolant	جریان خنک‌کننده
f	سوخت
Fuel	سوخت
GT	توربین گاز
GT, a	واقعی توربین گاز
Gen	ژنراتور
net	خالص
p	کل نیروگاه
rev	برگشت‌پذیر
s	آیزنتروپیک
th	حرارتی
u	مفید

۱۰- مراجع

- [1] O. Zeitoun, "Two-stage evaporative inlet air gas turbine cooling," *Energies*, vol. 14, no. 5, p. 1382, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14051382>.
- [2] A. Moradi, M. Masoomi, G. R. Salehi, and M. H. K. Manesh, "Performance analysis of gas turbine inlet air cooling plant with hybrid indirect evaporative cooling and absorption chiller system," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 24, no. 3, pp. 248-259, 2021, doi: <https://doi.org/10.5541/ijot.840496>.
- [3] S. Barakat, A. Ramzy, A. Hamed, and S. El-Emam, "Augmentation of gas turbine performance using integrated EAHE and Fogging Inlet Air Cooling System," *Energy*, vol. 189, p. 116133, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116133>.
- [4] E. Matjanov, "Gas turbine efficiency enhancement using absorption chiller. Case study for Tashkent CHP," *Energy*, vol. 192, p. 116625, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116625>.
- [5] A. Lin, Q. Zheng, Y. Jiang, X. Lin, and H. Zhang, "Sensitivity of air/mist non-equilibrium phase transition cooling to transient characteristics in a

صرفه‌جویی صورت گرفته ناشی از انجام طرح، تقسیم می‌شود. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای دلار ۵۰۰۰۰۰ ریال برای ۲ واحد برای سیستم‌های خنک‌سازی مختلف فاگ، مدیا و چیلر جذبی برابر با ۲۸۲۰۰۰، ۲۸۲۰۰۰ و ۷۵۰۰۰۰ میلیون ریال محاسبه گردید. مجموع هزینه‌های سالیانه که عبارتند از مجموع هزینه‌های سوخت اضافه مصرف شده، هزینه آب دمین مصرفی و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد، برای سه سیستم خنک‌سازی مختلف فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب برابر با ۱۲۷۲۰/۵، ۱۰۴۶۷/۸ و ۲۶۴۲۷ میلیون ریال محاسبه شد. با توجه به درآمدها و هزینه‌های سرمایه‌گذاری، مدت زمان بازگشت سرمایه، برای سه سیستم خنک‌سازی مختلف فاگ، مدیا و چیلر جذبی به ترتیب برابر با ۲/۸۴، ۲/۷۷ و ۱۰/۸۰ محاسبه شد که نتایج نشان دهنده اقتصادی بودن سیستم‌های فاگ و مدیا را نشان می‌دهد.

در نهایت برای اولویت‌بندی روش خنک‌سازی هوای ورودی جهت بکارگیری در نیروگاه کاشان علاوه بر پارامترهای فنی و اقتصادی عوامل تأثیرگذار دیگری نیز در نظر گرفته شد که عبارتند از: ریسک آسیب‌پذیری واحد، تغییرات در واحد، مصرف آب، دسترسی به قطعات یدکی، بهره‌برداری و نگهداری واحد و سهولت اجرای پروژه. در این حالت اولویت‌بندی روش‌های خنک‌سازی با استفاده از روش‌های تاپسیس مشخص گردید. با توجه به معیارهای در نظر گرفته شده سیستم مدیا با بهترین نزدیکی نسبی اولویت اول و به ترتیب گزینه‌های فاگ و چیلر جذبی دو اثره اولویت دوم و سوم در روش‌های خنک‌سازی هوای ورودی به توربین گاز را به خود اختصاص داده‌اند.

۹- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

AFR	نسبت هوا به سوخت جرمی (-)
\overline{AFR}	نسبت هوا به سوخت مولی (-)
ex	اگرژی ویژه (kJ/kg)
h	آنتالپی ویژه (kJ/kg)
HR	نرخ حرارتی (kJ/kWh)
i	برگشت‌ناپذیری (kJ)
I	شدت برگشت‌ناپذیری (kW)
LHV	ارزش حرارتی سوخت (kJ/kg)
M	جرم مولکولی (kg/mol)
m	دبی جرمی (kg/s)
n	درصد مولی (/)
P	فشار (Pa)
SFC	مصرف ویژه سوخت (kg/kWh)
T	دما (K یا C)
w	کار (kJ)

- [14] U. Unnikrishnan and V. Yang, "A review of cooling technologies for high temperature rotating components in gas turbine," *Propulsion and Power Research*, vol. 11, no. 3, pp. 293-310, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2022.07.001>.
- [15] Y. N. Dabwan, L. Zhang, and G. Pei, "A novel inlet air cooling system to improve the performance of intercooled gas turbine combined cycle power plants in hot regions," *Energy*, vol. 283, p. 129075, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129075>.
- [16] A. Dinc *et al.*, "Effect of Refrigerated Inlet Cooling on Greenhouse Gas Emissions for a 250 MW Class Gas Turbine Engine," *Aerospace*, vol. 10, no. 10, p. 833, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace10100833>.
- [17] C. Beggs, *Energy: management, supply and conservation*. Routledge, 2010, doi: <https://doi.org/10.4324/9780080494753>.
- [18] S. M. Arabi, M. Aminy, H. Ghadamian, H. A. Ozgoli, and B. Ahmadi, "Thermo-Economic Analysis of Applying Cooling System Using Fog on GE-F5 Gas Turbines (Case Study)," *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 4, no. 2, pp. 73-81, 2017, doi: <https://doi.org/10.22075/jhmt.2017.1613.1106>.
- [19] H. Ghadamian, A. Hamidi, H. Farzaneh, and H. Ozgoli, "Thermo-economic analysis of absorption air cooling system for pressurized solid oxide fuel cell/gas turbine cycle," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, 2012, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4742336>.
- [20] A. Saadati, "Comprehensive Atlas of increasing the power and efficiency of the country's power plants by using air cooling of the inlet of gas units," Iran Energy Efficiency Organization, (in persian).
- [21] Energy Research Institute, "Energy Consumption Optimization Deputy, Office of Studies and Productivity of Production Resources of Iran Energy Efficiency Organization (SABA)," Kashan Power Plant Information Archive, (in persian).
- [22] J. Pejovian, T. Mohammadi, A. A. Ismail Nia, E. Ghafourian, "Investigating the effect of power plant fuel price modification on the financial balance of Iran's electricity industry based on providing a simulation model of the functioning of this market," *Financial Economics Quarterly*, Volume 17, Pages 277 to 316, Number 1, Spring 2023 (in persian).
- compressor of gas turbine," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 137, pp. 882-894, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.143>.
- [6] C. Deng *et al.*, "Air cooling techniques and corresponding impacts on combined cycle power plant (CCPP) performance: A review," *International Journal of Refrigeration*, vol. 120, pp. 161-177, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.08.008>.
- [7] H. S. Dizaji, E. J. Hu, L. Chen, and S. Pourhedayat, "Using novel integrated Maisotsenko cooler and absorption chiller for cooling of gas turbine inlet air," *Energy Conversion and Management*, vol. 195, pp. 1067-1078, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.064>.
- [8] A. Mishra, A. Srivastava, A. K. Mohapatra, and S. Sanjay, "Effect of ambient and operating parameters on the performance parameters of cooled gas turbine cycle," in *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2341, no. 1: AIP Publishing, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0049974>.
- [9] S. N. O. Kamal, D. A. Salim, M. S. M. Fouzi, D. T. H. Khai, and M. K. Y. Yusof, "Feasibility study of turbine inlet air cooling using mechanical chillers in Malaysia climate," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 558-563, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.159>.
- [10] Z. Geng, "Analysis of gas turbine inlet cooling system based on double-effect lithium bromide absorption chiller," 2021, doi: <https://doi.org/10.25236/IJFET.2022.041009>.
- [11] A. Radchenko, E. Trushliakov, K. Kosowski, D. Mikielwicz, and M. Radchenko, "Innovative turbine intake air cooling systems and their rational designing," *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6201, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13236201>.
- [12] H. Tolba, A. El-Maksoud, and K. Emar, "Improvement of Gas Turbine Performance Using Multi-Stage Inlet Air Cooling System," *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, v62, no. 1, pp. 2784-0735, doi: <https://www.gssrr.org/index.php/JournalOfBasicAndApplied/article/view/13887>.
- [13] [1] J. F. Espinosa-Cristia, B. M. Mrabet, J. R. N. Alvarez, S. S. Abdullaev, O. R. Kuzichkin, and M. S. Alhassan, "Exergy and environmental analysis of a novel turbine inlet air cooling technique for power augmentation in a CCPP based on waste energy," *Chemosphere*, vol. 338, p. 139402, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139402>.

آنالیز میزان کاهش دمای پنل های فتوولتائیک با استفاده از پلیمرهای شفاف به روش خنک سازی تابشی

چکیده: دانشمندان همواره بر کاهش دمای سلول های خورشیدی تأکید داشته و از روش های گوناگون با هدف کاهش دمای پنل های خورشیدی بهره گرفته اند، چرا که دمای بالا موجب خرابی و ایرادات متنوع و متعدد در ساختار پنل های فتوولتائیک می شود. از تحقیقات مؤثر و مهمی که بر روی سلول های خورشیدی با هدف کاهش دما و افزایش بازدهی آنها انجام شده است می توان به روش خنک سازی تشعشعی اشاره کرد که این تحقیقات نشان می دهد سلول فتوولتائیک پوشش دهی شده با لایه بندی شفاف نسبت به سلول خورشیدی عاری از هرگونه لایه اضافی دارای بازدهی بیشتری است. در این مطالعه ساختار معمولی (تجاری) سلول خورشیدی از لحاظ اپتیکی و دمایی با ساختارهای پوشش دهی شده مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که ساختارهای پوشش دهی شده بالاتری نسبت ساختار تجاری دارند. در این تحقیق سه ساختار سلول فتوولتائیک را کنار هم قرار داده که این سه ساختار شامل ۱- ساختار تجاری (ساده) ۲- پنل خورشیدی به همراه یک لایه PDMS ۳- پنل خورشیدی به همراه یک لایه PVB هستند. سپس به تحقیقات نرم افزاری و شبیه سازی پیرامون خواص تشعشعی و دمایی این سه ساختار پرداخته و با مقایسه آنها نشان داده شد که در ساختارهای دارای PDMS و PVB دمای لایه بندی بر حسب شدت تابش به ترتیب در حدود ۵ و ۹ کلوین نسبت به ساختار تجاری کاهش می یابد که این نشان از تأثیر خنک سازی تشعشعی مواد پلیمری شفاف بر روی این دو ساختار دارد.

واژه‌های راهنما: سلول خورشیدی، خنک سازی تشعشعی، لایه بندی شفاف، انرژی تجدیدپذیر، اپتیک

حسین معظمی‌گودرزی
دانشجوی دکتری

سعید دیناروند*
استادیار

محمد وهابی
استادیار

آرش میرعبداله لواسانی
دانشیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران
مرکزی، تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

Analysis of the temperature reduction of photovoltaic panels using transparent polymers by radiation cooling method

Abstract: Scientists have always emphasized on reducing the temperature of solar cells and have used various methods with the aim of reducing the temperature of solar panels, because high temperature causes damage and various defects in the structure of photovoltaic panels. Among the effective and important researches that have been carried out on solar cells with the aim of reducing their temperature and increasing their efficiency, we can mention the radiation cooling method, which shows that the photovoltaic cell coated with a transparent layer is better than the bare solar cell. It is more efficient than any additional layer. In this study, the conventional (commercial) structure of the solar cell was compared with the coated structures in terms of optics and temperature. This comparison showed that the coated structures have higher efficiency than the commercial structure. In this research, three solar photovoltaic structures have been put together, which include 1- commercial (simple) structure, 2- solar panel with a PDMS layer, 3- solar panel with a PVB layer. Then to software research and simulation. The radiation and temperature properties of these three structures were discussed and by comparing them, it was shown that in the structures with PDMS and PVB, the layering temperature in terms of radiation intensity is reduced by about 5 and 9 K, respectively, compared to the commercial structure, which is an indication of the effect of cooling. The radiation of transparent polymer materials has on these two structures.

Keywords: Solar cell, Radiation cooling, Transparent layering, Renewable energy, Optics

Hussein
Goodarzi Moazami
PhD Student

Saeed Dinarvand*
Assistant Professor

Mohammad Vahabi
Assistant Professor

Arash
Mirabdollah Lavasani
Associate Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Islamic Azad
University, Central Tehran
Branch, Tehran

۱- مقدمه

از متریال‌های کمیاب که بازتاب مناسبی دارند توانسته‌اند به نتایج مطلوبی دست پیدا کنند [۱۱]. برخی دیگر از تحقیقات با استفاده از متریال‌هایی که خواص اپتیکی مناسبی دارند موفق به سطح امیدوار کننده‌ای از خنک‌سازی تشعشعی در تجهیزات گوناگون صنعتی برسند [۱۲]. مطالعاتی نیز انجام گردیده که به‌همراه پلیمرها از روش فوتونیک نیز بهره برده‌اند تا به بازدهی بیشتری دست پیدا کنند [۱۳]. تحقیقات گسترده صورت گرفته بر روی سلول‌های خورشیدی معمولاً در آزمایشگاه‌های اپتیک و تحت دستگاه اسپکتروفوتومتری تست می‌گردند [۱۴]. تحقیقاتی که از روش‌های آزمایشگاهی و تجربی بهره گرفته شده است نسبت به مطالعات عددی از ضریب خطای کمتری برخوردار هستند [۱۵].

۲- انتخاب متریال و تحلیل فیزیکی

در این طرح اصلی‌ترین تحقیقات شامل خواص اپتیکی پلیمرها و نحوه تشعشعات ورودی و خروجی آن‌ها در بازه شفافیت نور مرئی می‌باشد که تحت معادلات ماکسول شبیه‌سازی می‌شود [۱۶]. معادله انرژی تمامی تشعشعات رفت و برگشتی را آنالیز کرده و در نهایت میزان جذب، بازتاب و عبور نور از سطح لایه‌بندی را محاسبه می‌نماید [۱۷]. عمده مطالعات آزمایشگاهی این طرح بر روی انتخاب و جایگیری متریال‌های مناسب برای تحقق هدف افزایش بازدهی سلول انجام گرفته است [۱۸]. چنانکه با انتخاب ماده پلی وینیل بوتیرال به دلیل شفافیت بالا و خواص اپتیکی مناسب به دنبال عبور حداکثری نور و جذب آن توسط ویفر سیلیکونی هستیم که بعد از آن بتوان با انتشار حداکثری گرما در بازه مرئی پنجره آسمان به خنک‌سازی تشعشعی رسید. سه طرح مختلف برای آزمایش و شبیه‌سازی اپتیکی و حرارتی با هدف مقایسه نتایج و تعیین میزان پیشرفت در نظر داریم. با هدف اعتبارسنجی از صحت روش تحقیق اعم از انتخاب متریال، انتخاب ماژول مناسب در نرم‌افزار و انتخاب دیتاهای ورودی و ... به مطالعه بر روی نمونه تجاری ساده و نمونه موجود در مقاله مرجع نیز می‌پردازیم و با کسب نتایج دلخواه و متناسب با نتایج بدست آمده در مقاله مرجع به مقایسه با نتایج مدل اصلی می‌پردازیم. در شکل نوع متریال و نحوه جایگیری آنان و همچنین ضخامت و مقدار هر کدام از متریال‌ها را می‌توان برای هر سه نمونه (تجاری، مقاله ژائو و مدل اصلی) مشاهده کرد.

در فاز روابط و ازدیدگاه علمی ابتدا به مفهوم خنک‌سازی تشعشعی باید پرداخت و برای ارزیابی اثرات خنک‌سازی تشعشعی لایه‌بندی اصلی را در نظر می‌گیریم و تحلیل را توسط یک مدل ریاضی همانند مطالعات گذشته که تقریباً حالت پایداری است انجام می‌دهیم. شکل لایه‌بندی مورد نظر را نشان می‌دهد و همه تشعشعات ورودی و خروجی لایه‌بندی را نشان می‌دهد. از تحلیل مقدار تغییرات دمایی در جهت افقی به دلیل ناچیز بودن مقدار آن صرف نظر کردیم.

افزایش راندمان پنل‌های فتوولتائیک همواره مورد توجه محققین و دانشمندان در زمینه انرژی بوده است چرا که پنل‌های خورشیدی دارای بازدهی محدودی هستند [۱]. این مسئله موجب کاهش عمر و فرسودگی تجهیزات نیروگاه‌های خورشیدی می‌گردد [۲]. خرابی و بازسازی نیروگاه‌های خورشیدی بسیار پر هزینه و مشکل می‌باشد به همین دلیل بحث خنک‌سازی سلول‌های خورشیدی و افزایش راندمان آنها از دیرباز تاکنون مورد توجه دانشمندان بوده است [۳]. یکی از روش‌های نو ظهور و نوین کاهش دمای اجسام، روش خنک‌سازی تشعشعی می‌باشد که با بهره‌گیری از خواص اپتیکی و حرارتی متریال گوناگون باعث جذب حداکثری نور خورشید و به تبع آن دفع حداکثری گرمای جسم به بازه شفافیت پنجره نور مرئی می‌شود؛ از این رو دانشمندان زیادی به تحقیق در مورد این مهم پرداخته‌اند [۴]. بدین صورت که دریافتند با بهره‌گیری از روش خنک‌سازی تشعشعی و همچنین با استفاده از مواد نانو می‌توان دمای اجسام را کاهش و زمینه افزایش راندمان تجهیزات را فراهم آورد [۵]. در ادامه تحقیقات پیرامون خنک‌سازی تشعشعی این بار دانشمندان بصورت متمرکز به افزایش بازدهی و کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک پرداختند [۶]. با استفاده از ماده پلی دی متیل سیلوکسان و پوشش‌دهی بر روی سلول خورشیدی دریافتند با بکارگیری این روش و مقایسه آن با مدل تجاری معمولی می‌توان به خنک‌سازی تشعشعی رسید و این روش می‌تواند در کاهش دمای سلول فتوولتائیک سودمند باشد [۷]. به‌طور کلی در روش خنک‌سازی تشعشعی با بهره‌بردن از یک یا چند لایه از متریال‌هایی با خواص اپتیکی مطلوب و با پوشش‌دهی آنها بر روی ویفر سیلیکونی ساده با هدف جذب مناسب نور و انتشار آن درمی‌یابیم که دمای سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. بطور کلی آزمایشات متعدد و ارزشمندی پیرامون خنک‌سازی سلول فتوولتائیک به روش تشعشعی انجام شده است. از ساختارهای پیچیده‌تری نیز همچون سیلیکون اکسی کربونیتريد با هدف جذب و انتشار حداکثری نور و گرمای خورشید استفاده شده است و تلاش شده تا کاهش دما با نتیجه حداکثری همراه باشد [۸]. در این راستا با هدف توسعه این روش تحقیقات متنوعی بصورت شبیه‌سازی و عددی و اکسپریمنت انجام گردیده از همین رو از اکسید آلومینیوم آندی نانو متخلخل نیز با این هدف استفاده شده [۹]. همچنین دانشمندان از پلی اتیلن گلیکول ترفتالات نیز با توجه به خواص اپتیکی مورد نظر بهره برده‌اند [۱۰]. هر کدام از این تحقیقات موجب کسب نتایج ارزشمند و توسعه فرآیند افزایش بازدهی نیروگاه‌های خورشیدی شده است. در مجموع کلیت تحقیقات پیرامون خنک‌سازی تشعشعی بدین صورت بوده که با استفاده از لایه‌بندی‌های مختلف بر روی ساختار سلول خورشیدی به بررسی خواص اپتیکی آنها با هدف کاهش دما پرداخته شده است بدین صورت که برخی از تحقیقات با استفاده

معادله انتشار گرما با توجه به فرضیات بدین صورت خواهد بود.

$$\frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

به صورت کلی قدرت خنک‌کنندگی لایه‌بندی مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_{net}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv} \quad (2)$$

اما در سلول خورشیدی حاوی لایه‌بندی مورد نظر ما ابتدا رابطه خنک‌سازی تشعشعی را در سطح بالایی به صورت زیر می‌آوریم.

$$-k \frac{dT}{dz} = P_{rad}(T_{top}) - P_{sky}(T_{amb}) + P_{non-rad}(T_{top} \cdot T_{amb}) \quad (3)$$

و سپس این رابطه را یکبار برای سطح زیرین بصورت زیر تعریف می‌کنیم.

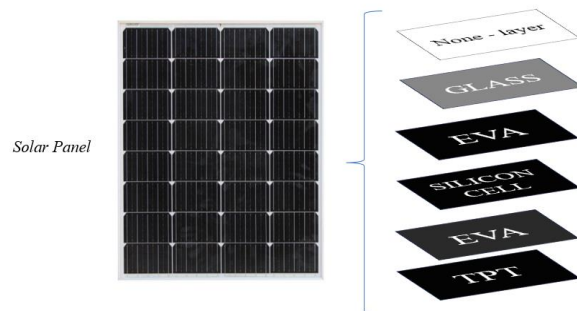
$$k \frac{dT}{dz} = P_{non-rad}(T_{bottom} \cdot T_{amb}) + P_{rad}(T_{bottom} \cdot T_{ground}) \quad (4)$$

۳- آماده‌سازی آنالیز نرم‌افزاری

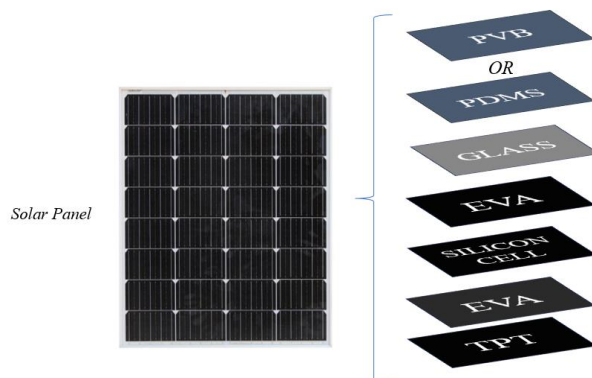
برای مدل‌سازی نمونه‌های سه گانه از نرم‌افزار تحلیلی کامسول به دلیل جامع بودن این پلتفرم از نظر تعداد ماژول‌های مهندسی از جمله ماژول حرارتی و اپتیکی و همچنین کوپل کردن روش‌های حل استفاده کردیم که بطور خلاصه میزان تابش ورودی خورشید را برابر با تابش طیفی خورشید که برگرفته از استاندارد تابش خورشید و استاندارد تابش اتمسفر است قرار دادیم. متریکال‌های ورودی در مدل‌سازی را معادل با نمونه‌های ذکر شده که خواص اپتیکی آنها از جمله ضریب شکست حقیقی و ضریب شکست موهومی وارد نرم‌افزار شده، اما بطور میانگین نیز طبق جدول ضرایب شکست مواد مشخص گردیده است. ابتدا پورت و یا درگاه خروجی را روی ویفر سیلیکونی با هدف بدست آوردن میزان عبور نور قرار داده شده است و پس از استخراج نتایج پورت خروجی با هدف بدست آوردن میزان جذب در زیر پایین‌ترین لایه قرار داده شده است. همچنین بازه طول موج مورد مطالعه برای میزان عبور از ۰/۳ تا ۲/۵ میکرومتر تنظیم گردیده و برای میزان جذب نور با هدف آنالیز دقیق‌تر بازه کوتاه‌تر ۴ تا ۲۵ میکرومتر مورد مطالعه قرار داده شده است.

۴- نتایج و بحث پیرامون مقایسه ساختارها

بعد از انجام تمامی ملاحظات شبیه‌سازی نظیر ترسیم هندسه، انتخاب متریکال، وارد کردن ضرایب اپتیکی، تنظیمات ماژول اپتیک و مش‌بندی به ریزالت‌گیری از نرم‌افزار پرداخته‌ایم.



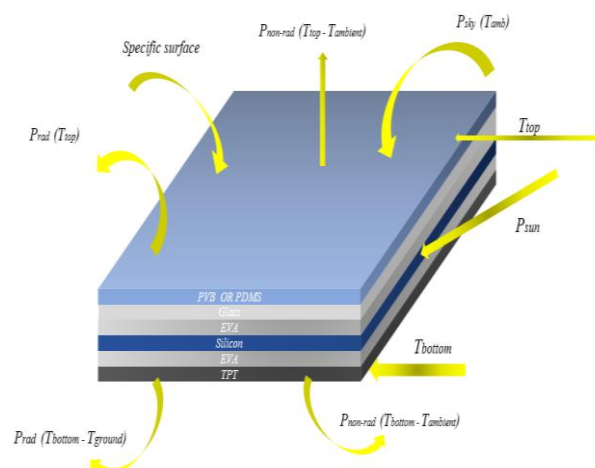
شکل ۱ لایه‌بندی ساده مدل تجاری



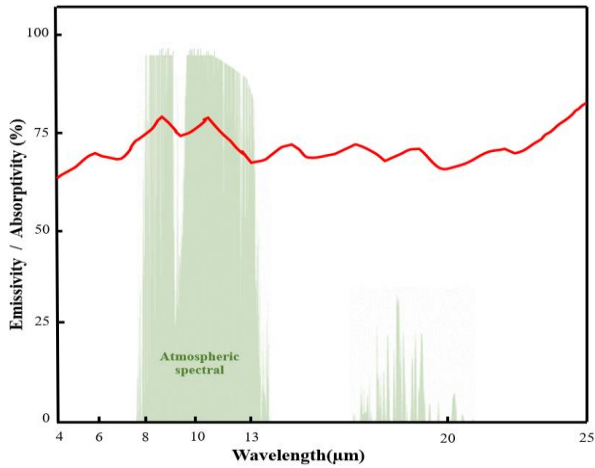
شکل ۲ لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با پلیمرهای شفاف

جدول ۱ ضخامت لایه‌های مورد مطالعه

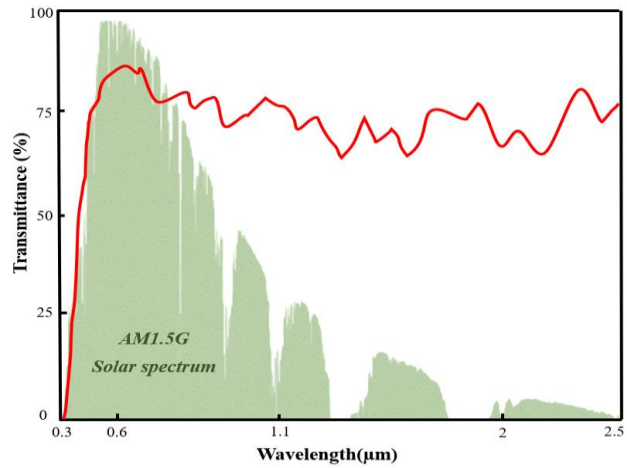
ردیف	متریال (mm)	ضخامت
۱	PVB	۳/۲
۲	PDMS	۰/۲
۳	Silicon cell	۰/۲
۴	EVA	۰/۵
۵	TPT	۰/۱
۶	Glass	۰/۳۸



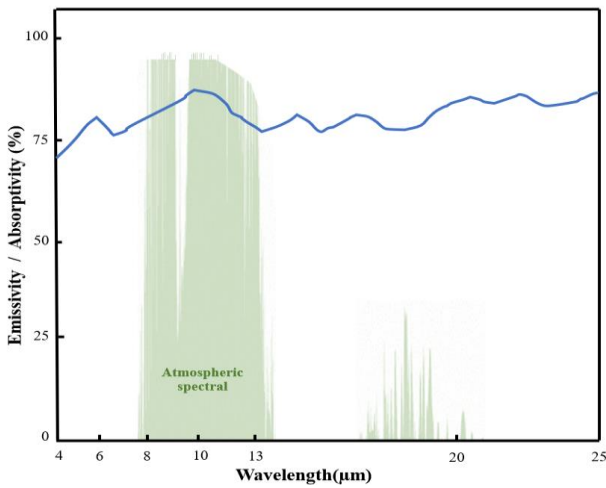
شکل ۳ شماتیک مدل ریاضی حرارتی به صورت تک بعدی



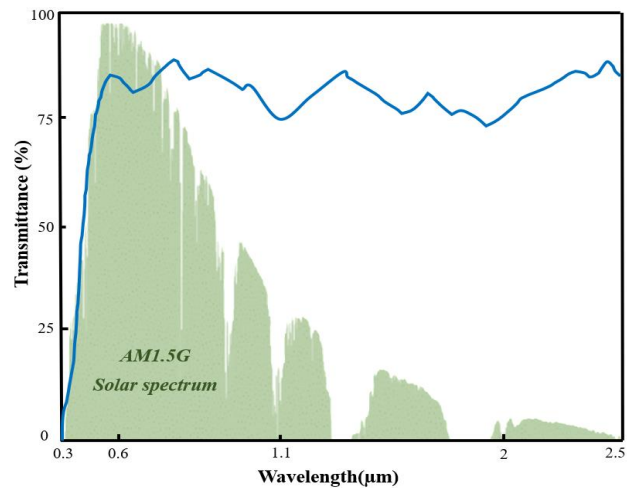
شکل ۷ میزان جذب نور از لایه‌بندی تجاری و ساده سلول خورشیدی که در آن خط قرمز نشان دهنده میزان جذب لایه‌بندی تجاری و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش اتمسفر است.



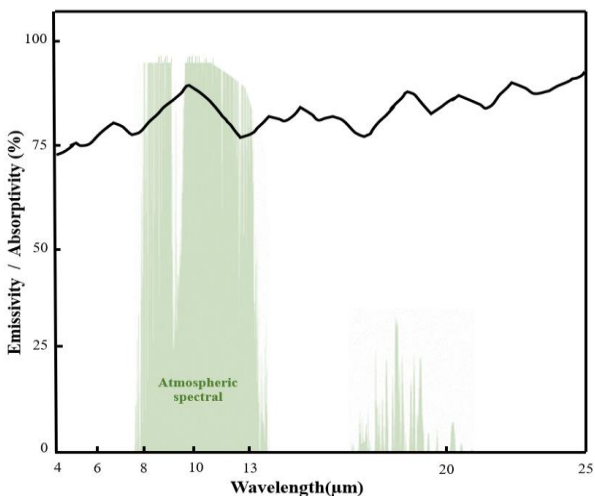
شکل ۴ میزان عبور نور از لایه‌بندی تجاری و ساده سلول خورشیدی که در آن خط قرمز نشان دهنده میزان عبور لایه‌بندی تجاری و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش خورشید است.



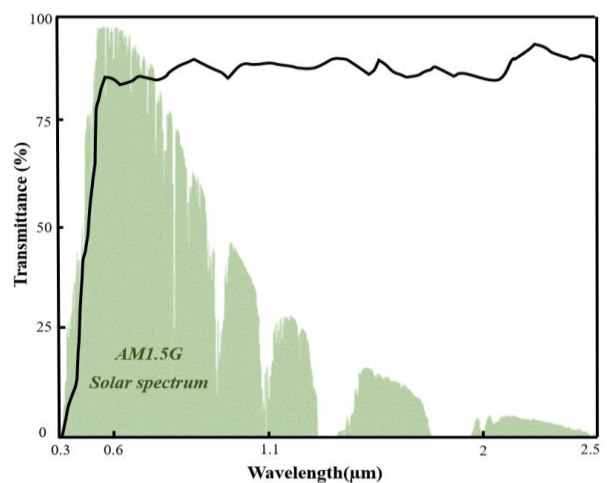
شکل ۸ میزان جذب نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PDMS که در آن خط قرمز نشان دهنده میزان جذب PDMS و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش اتمسفر است.



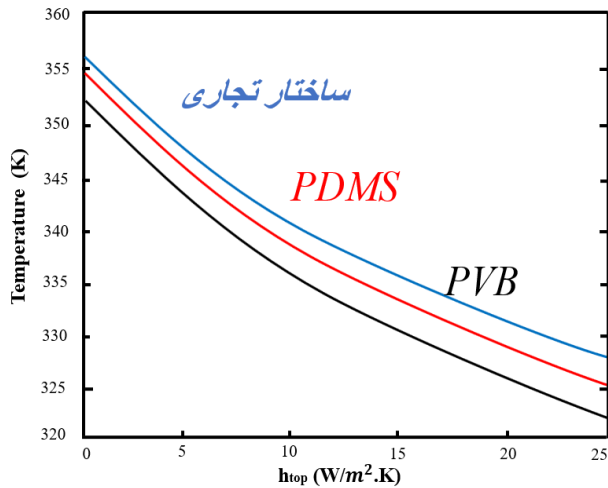
شکل ۵ میزان عبور نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PDMS که در آن خط آبی نشان دهنده میزان عبور PDMS و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش خورشید است.



شکل ۹ میزان جذب نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PVB که در آن خط آبی نشان دهنده میزان جذب PVB و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش اتمسفر است.



شکل ۶ میزان عبور نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PVB که در آن خط مشکی نشان دهنده میزان عبور PVB و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش خورشید است.



شکل ۱۱ نمودار بازدهی دمایی هر سه ساختار برحسب انتقال حرارت سطح بالایی

نتایج دمایی سطح هر سه ساختار که در شکل (۱۱) نمایان است نشان از برتری ساختار دارای پلی وینیل بوتیرال دارد؛ چرا که زمانیکه دمایی سطح بالایی هر سه ساختار به $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ می رسد دمایی ساختار حاوی پلی وینیل بوتیرال به ترتیب در حدود ۲ و ۵ کلوین از دمایی ساختارهای حاوی پلی دی متیل سیلوکسان و ساختار تجاری کمتر است که این خود نشان از برتری ماده پلی وینیل بوتیرال در امر خنک سازی تشعشعی دارد.

۵- نتیجه گیری

بطور کلی نتایج نشان داد بهره گیری از پلیمرهای شفاف و پوشش دهی آنها بر روی سطح پنل های خورشیدی می تواند دمایی ساختار را در حالتی که شدت تابش در نهایت میزان خود قرار دارد حدود ۵ کلوین کاهش دهد که این ایده دستاورد مطلوبی را در صنعت انرژی های تجدید پذیر به ارمغان می آورد. پس از اتمام شبیه سازی ها و مقایسه نتایج دریافتیم در ساختار سلول خورشیدی به همراه لایه پلی وینیل بوتیرال میزان جذب مقداری افزایش داشته که این میزان جذب بیشتر رابطه مستقیمی با میزان انتشار گرما به آسمان و در نتیجه خنک سازی هر چه بیشتر سلول خورشیدی این ساختار نسبت به ساختار تجاری آن دارد. همچنین مقایسه میزان عبور نور در هر سه ساختار نشان از برتری ساختار دارای پلی وینیل بوتیرال دارد که مشخص می کند در این لایه بندی نور به میزان حداکثر خود عبور کرده و با قدرت بیشتری به سطح لایه سیلیکونی می تابد که در نتیجه آن افزایش میزان جذب و افزایش میزان انتشار را خواهیم داشت.

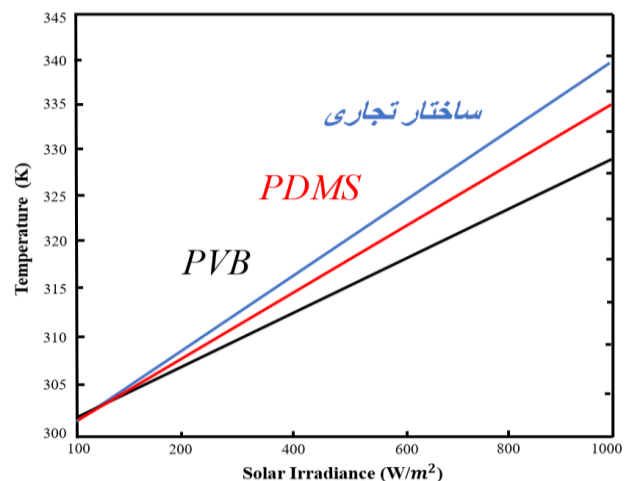
۶- مراجع

- [1] H. S. Bagiorgas and G. Mihalakakou, "Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 6,

همانطور که در قسمت تنظیمات شبیه سازی نیز گفته شد، شبیه سازی اپتیکی نمونه ها به دو صورت انجام می پذیرد. ابتدا پورت خروجی را بالای ویفر سیلیکونی قرار می دهیم تا میزان عبور نور خورشید را اندازه گیری کنیم و سپس پورت خروجی را در زیر پایین ترین لایه قرار می دهیم تا میزان جذب نور خورشید محاسبه شود. همانطور که مشاهده می شود میزان عبور لایه بندی های دارای ماده PDMS و PVB نسبت به لایه بندی ساده تجاری بیشتر است که نشان از تاثیر مواد پلیمری در گذردهی نور خورشید می باشد که به تبع آن میزان جذب نیز در ساختارهای دارای مواد پلیمری بیشتر از ساختار تجاری است که این میزان جذب باعث انتشار بیشتر گرما به پنجره آسمان شده و کاهش دما را برای سلول خورشیدی مورد نظر به ارمغان می آورد.

نتایج شبیه سازی میزان عبور نور را برای هر لایه بندی در بازه 0.3 تا 2.5 میکرومتر و همچنین میزان جذب نور را در بازه 4 تا 2.5 میکرومتر نشان می دهد که در کنار آن استانداردهای تابش خورشید و اتمسفر نیز به عنوان تابع و یا رفرنس نشان داده شده است که به ترتیب نمودارهای عبور و جذب بر روی آن ها قرار گرفته اند که این امر موجب درک صحیحی از خواص اپتیکی هر سه ساختار می گردد.

همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است دمایی سطح لایه بندی دارای ماده پلی وینیل بوتیرال نسبت به دو ساختار دیگر کاهش دمایی بیشتری را تجربه کرده است که این امر موجب افزایش راندمان الکتریکی این لایه بندی می شود چراکه با کاهش دمایی سلول خورشیدی فرآیند فرسودگی سلول با سرعت کمتری همراه می شود و کارایی سلول خورشیدی مورد نظر افزایش می یابد، همانطور که قابل مشاهده است هنگامی که شدت تابش در اوج خود و در 1000 W/m^2 قرار دارد ساختار حاوی پلی وینیل بوتیرال حدود ۵ کلوین نسبت به ساختار حاوی پلی دی متیل سیلوکسان و ۹ کلوین نسبت به ساختار تجاری، کاهش دمایی بیشتری را به خود دیده است.



شکل ۱۰ نمودار بازدهی دمایی هر سه ساختار برحسب شدت تابش

- <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.015>.
- [11] C. G. Granqvist and A. Hjortsberg, "Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films," *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 6, pp. 4205–4220, 1981, <https://doi.org/10.1063/1.329270>.
- [12] D. M. Diatezua, P. A. Thiry, A. Dereux, and R. Caudano, "Silicon oxynitride multilayers as spectrally selective material for passive radiative cooling applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 40, no. 3, pp. 253–259, 1996, [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00092-5](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00092-5).
- [13] G. Perrakis, A. C. Tasolamprou, G. Kenanakis, E. N. Economou, S. Tzortzakis, and M. Kafesaki, "Combined nano and micro structuring for enhanced radiative cooling and efficiency of photovoltaic cells," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 11552, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91061-1>.
- [14] S. Ahmed, Z. Li, T. Ma, M. S. Javed, and H. Yang, "A comparative performance evaluation and sensitivity analysis of a photovoltaic-thermal system with radiative cooling," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 221, no. 110861, p. 110861, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110861>.
- [15] B. Bhatia *et al.*, "Passive directional sub-ambient daytime radiative cooling," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 5001, 2018, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07293-9>.
- [16] Z. Huang and X. Ruan, "Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 104, pp. 890–896, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.009>.
- [17] E. M. González-Cruz and E. L. Krüger, "Applicability of a radiant-capacitive cooling and heating system in its cooling mode in Köppen-Geiger's A, B and C climate types," *Build. Environ.*, vol. 258, no. 111623, p. 111623, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111623>.
- [18] F. Ferraresso and M. Marletta, "Essential spectrum for dissipative Maxwell equations in domains with cylindrical ends," *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 536, no. 1, p. 128174, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2024.128174>.
- pp. 1220–1227, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.015>.
- [2] E. M. Lushiku and C. G. Granqvist, "Radiative cooling with selectively infrared-emitting gases," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 11, p. 1835, 1984, <https://doi.org/10.1063/1.331487>.
- [3] Y. Lu *et al.*, "A universal route to realize radiative cooling and light management in photovoltaic modules," *Sol. RRL*, vol. 1, no. 10, p. 1700084, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.050>.
- [4] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, and S. Rehman, "Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions," *Energy (Oxf.)*, vol. 59, pp. 445–453, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>.
- [5] H. S. Bagiorgas and G. Mihalakakou, "Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1220–1227, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.015>.
- [6] B. Zhao, M. Hu, X. Ao, and G. Pei, "Performance analysis of enhanced radiative cooling of solar cells based on a commercial silicon photovoltaic module," *Sol. Energy*, vol. 176, pp. 248–255, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.043>.
- [7] U. Banik *et al.*, "Enhancing passive radiative cooling properties of flexible CIGS solar cells for space applications using single layer silicon oxycarbonitride films," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 209, no. 110456, p. 110456, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110456>.
- [8] K. Gao, H. Shen, Y. Liu, Q. Zhao, Y. Li, and J. Liu, "Random inverted pyramid textured polydimethylsiloxane radiative cooling emitter for the heat dissipation of silicon solar cells," *Sol. Energy*, vol. 236, pp. 703–711, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.040>.
- [9] H. Tang *et al.*, "Radiative cooling of solar cells with scalable and high-performance nanoporous anodic aluminum oxide," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 235, no. 111498, p. 111498, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111498>.
- [10] T. Xia and H. Wang, "High reflective polyethylene glycol terephthalate package layer for passive daytime radiative cooling in photovoltaic cells," *Sol. Energy*, vol. 237, pp. 313–319, 2022,

مروری بر رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه های فلزی-الیافی GLARE

چکیده: چندلایه های فلزی-الیافی سازه هایی متشکل از لایه های نازک متوالی از ورقه های فلزی و کامپوزیت های تقویت شده با الیاف هستند که به یکدیگر اتصال داده می شوند. این سازه ها دارای وزن سبک، خواص مکانیکی بالا، مقاومت به ضربه، خستگی و سایش بالایی هستند. گلر (GLARE) نوعی از کامپوزیت - های فلزی-الیافی می باشد که از ترکیب ورقه های آلومینیومی با الیاف شیشه/اپوکسی بدست می آید و در صنایع هوافضا، دریایی و خودروسازی کاربردهای فراوانی دارد. در این مقاله مروری، ضمن آشنایی با ساختار این کامپوزیت ها، انواع آنها و مفهوم ضربه سرعت پایین، به بررسی تحقیقات گذشته در مورد رفتار ضربه سرعت پایین گلر و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده است. طبق نتایج حاصله، رفتار ورقه های فلزی-الیافی گلر در مقابل ضربه سرعت پایین تحت شرایط مختلف، متغیر است و پارامترهای مختلفی همچون ضخامت، نوع فلز، ترتیب چینش، جرم ضربه زن، هندسه ضربه زن، زاویه برخورد و کسر حجمی فلز می توانند در افزایش یا کاهش مقاومت به ضربه این نوع سازه ها دخیل باشند.

واژه های راهنما: چندلایه فلزی-الیافی، مواد مرکب، شیشه/اپوکسی، آلومینیوم، ضربه سرعت پایین، گلر

هادی رزقی ملکی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بناب، بناب

ابوالفضل توتونچی

استادیار،
گروه مهندسی مواد،
دانشگاه تبریز، تبریز

فاطمه فضلی شکوهی

دانشجوی کارشناسی ارشد،
گروه مهندسی مواد،
دانشگاه تبریز، تبریز

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

Hadi Rezghi Maleki*

Assistant Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, University
of Bonab, Bonab

Abolfazl Tutunchi

Assistant Professor,
Department of Materials
Engineering, University
of Tabriz, Tabriz

Fatemeh Fazli Shokouhi

MSc. Student,
Department of Materials
Engineering, University
of Tabriz, Tabriz

A review on low velocity impact behavior of GLARE fiber metal laminates

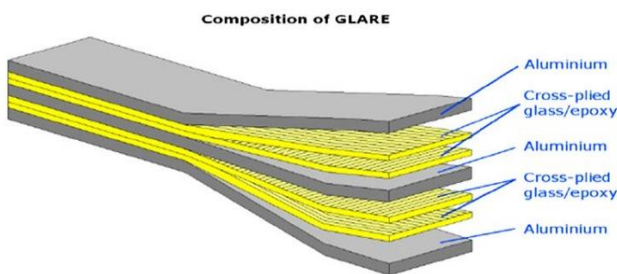
Abstract: Fiber metal laminates are composed of alternating thin layers of metal sheets and fiber-reinforced composites that are adhered to each other. These structures exhibit attributes such as lightweight construction and superior mechanical properties, as well as excellent resistance to impact, fatigue, and wear. GLARE is a type of fiber metal laminates that is manufactured from the combination of aluminum sheets with glass/epoxy fibers and finds extensive utility across the aerospace, marine, and automotive industries. In this review article, while introducing the structure and different types of Glare, the concept of low velocity impact, and the effective factors on low velocity impact behavior of glare have been investigated through previous studies. Based on the results, the behavior of Glare subjected to low velocity impact is influenced by various factors such as thickness, metal type, stacking sequence, hammer mass, impact angle and metal volume fraction. These factors can either enhance or diminish the resistance of such structures.

Keywords: Fiber metal laminates, Composites, Glass/epoxy, Aluminum, Low velocity impact, Glare

۱- مقدمه

در دانشگاه صنعتی دلفت، مطرح شد [۲]. چندلایه‌ها با توجه به الیاف مورد استفاده در ساختارشان به سه دسته اصلی شامل آرال^۲ (چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف آرامیدی)، گلر^۳ (چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه) و کارال^۴ (چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن) تقسیم‌بندی شده‌اند.

گلر یکی از پرکاربردترین چندلایه‌های فلزی-الیافی است که از لایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و ورقه‌های نازک آلومینیوم آلیاژی با استحکام بالا تشکیل شده است. شکل (۲) شماتیکی از گلر را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیکی از گلر [۳]

این سازه‌ها با توجه به زاویه چینش الیاف و نوع ورق آلومینیومی بکار رفته در آنها طبقه‌بندی می‌شوند. جدول (۱) انواع گلر و نحوه طبقه‌بندی آنها را نشان می‌دهد.

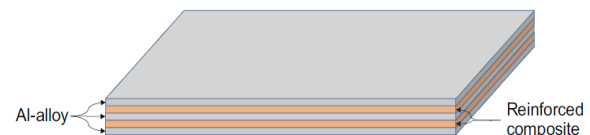
جدول ۱ انواع گلر و نحوه طبقه‌بندی آنها

نوع	زیر مجموعه	ورق آلومینیوم	ضخامت ورق	جهت‌گیری الیاف
GLARE1	-	7075-T6	0/3- 0/4	0/0
GLARE2	GLARE 2A GLARE 2B	2024-T3	0/2- 0/5	0/0 90/90
GLARE3	-	2024-T3	0/2- 0/5	0/90
GLARE4	GLARE 4A GLARE 4B	2024-T3	0/2- 0/5	0/90/0 90/0/90
GLARE5	-	2024-T3	0/2- 0/5	0/90/90/0
GLARE6	GLARE 6A GLARE 6B	2024-T3	0/2- 0/5	+45/-45 -45/+45

گلر با روش‌های مختلفی تولید می‌شود. متداول‌ترین روشی که برای تولید چندلایه‌های فلزی-الیافی از جمله گلر استفاده می‌شود، روش اتوکلاو^۵ است [۴].

روش مقرون‌به‌صرفه دیگر برای تولید گلر، روش قالب‌گیری تزریقی^۶ یا VARTM است که در آن از تکنیک‌های آماده‌سازی

در دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به دلیل ویژگی‌های خاصی همچون سبکی، استحکام و سفتی ویژه بالا، مقاومت به خوردگی خوب و مقاومت به خستگی بالا به مواد منحصر بفردی در صنایع هوافضا، دریایی، خودروسازی، حمل و نقل، ورزشی و غیره تبدیل شده‌اند. با وجود مزایای ذکر شده، یک سری محدودیت‌ها همچون مقاومت به ضربه پایین، مقاومت به سایش پایین و آسیب‌پذیری در محیط‌های خشن برای استفاده از این مواد وجود دارد. از طرفی استفاده از فلزات سبکی همچون آلومینیوم به تنهایی جوابگوی خواسته‌های مورد نیاز در صنایع مختلف نیست. چندلایه‌های فلزی-الیافی (FMLs^۱) جایگزین مناسبی برای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری و ورق‌های آلومینیومی هستند که خواصی همچون وزن کم، استحکام بالا، مقاومت در برابر ضربه بالا، مقاومت در برابر سایش و عملکرد خستگی خوب کامپوزیت‌ها را ترکیب می‌کنند. برخی از الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌ها همچون شیشه و کربن دارای مقاومت ضربه‌ای نسبتاً پایینی بوده و برخی دیگر مانند الیاف کولار حساسیت بالایی به شرایط محیطی و خوردگی دارند. از طرفی خواص خستگی آلیاژهای آلومینیوم به تنهایی پایین است. توسعه چندلایه‌های فلزی-الیافی انعکاس‌دهنده تاریخ طولانی تحقیقاتی است که در سال ۱۹۴۵ در فوکر آغاز شد. بعدها، سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده (ناسا) در برنامه شاتل فضایی به تقویت قطعات فلزی با مواد کامپوزیتی علاقه‌مند شد و از آنجا مفهوم FML متولد شد. این سازه‌ها در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ در دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی دلفت هلند توسعه یافتند و سپس توسط شرکت AKZO در سال ۱۹۸۷ تجاری شدند. شکل (۱) شماتیکی از یک چندلایه فلزی-الیافی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیکی از ساختار چندلایه‌های فلزی-الیافی [۱]

ایده استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری بصورت یک چندلایه فلزی-الیافی، برای اولین بار

^۵ Autoclave

^۶ Vacuum assisted resin transfer molding

^۱ Fiber metal laminates

^۲ Aramid Reinforced Aluminum Laminate (ARAL)

^۳ Glass Reinforced Laminate (GLARE)

^۴ Carbon Reinforced Aluminum Laminate (CARAL)

در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی مانند بدنه هواپیماها، خودروها و یا کشتی‌ها، مقاومت در برابر ضربه یکی از مسائل پراهمیت به شمار می‌رود. اثرات ناشی از ضربه می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری بر روی جان افراد و سازه‌ها داشته باشد. محققان و تولیدکنندگان همواره تلاش کرده‌اند تا به مواد و سازه‌های سبک همراه با مقاومت بالا به ضربه دسترسی پیدا کنند. تست ضربه در سازه‌ها را می‌توان به چهار نوع طبقه‌بندی کرد:

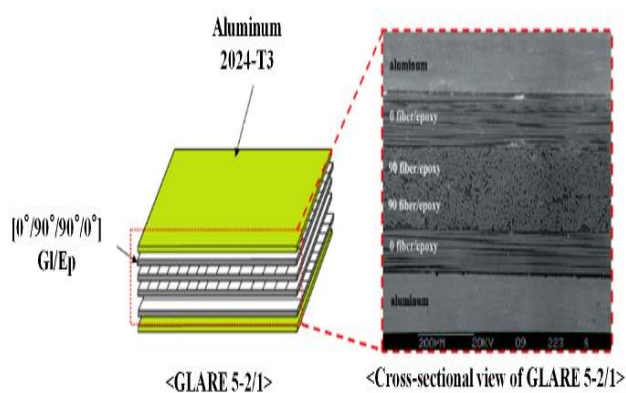
- ضربه سرعت پایین^۱
- ضربه سرعت متوسط^۲
- ضربه سرعت بالا^۳
- ضربه سرعت فوق‌العاده^۴

هر کدام از حالات در محدوده‌های مختلفی از سرعت اتفاق می‌افتند و اثرات آنها با یکدیگر تفاوت دارد. ضربه سرعت پایین در سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد [۹]. ضربه سرعت متوسط در محدوده سرعتی از ۱۰ متر بر ثانیه تا ۵۰ متر بر ثانیه رخ می‌دهد. ضربه سرعت بالا ممکن است بین ۵۰ متر الی ۱۰۰۰ متر بر ثانیه باشد، در حالی که ضربه با سرعت فوق‌العاده، دامنه‌ای از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه دارد [۱۰]. ضربه سرعت پایین یکی از حالات ضربه است که در استفاده از سازه‌ها با آن مواجه هستیم در حالیکه ضربات سرعت بالا در شرایط خاصی اتفاق می‌افتند. از نمونه‌های ضربه سرعت پایین می‌توان سقوط ابزار و وسایل مختلف روی سازه‌ها، تصادفات با سرعت پایین تر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت، برخورد سنگ، تگرگ، اشیاء و پرندگان را نام برد که ممکن است این حالت ضربه منجر به آسیب سازه در طول فرآیندهای استفاده، نگهداری و ساخت شود [۱۱]. این نوع ضربات باعث ایجاد آسیب‌های مختلفی در سازه‌ها می‌شود و اگر آسیب ناشی از ضربه و بارگذاری شدید باشد، ممکن است منجر به شکست ناگهانی ساختار کامپوزیتی شود.

نظر به ماهیت شکل‌پذیری فلزات، ضربه یک تهدید جدی برای یک سازه فلزی نیست؛ زیرا یک فلز می‌تواند مقدار زیادی انرژی ضربه را در ناحیه الاستیک تا تسلیم جذب کند و ماده ممکن است قبل از شکست دچار کرنش‌های بزرگ شود. در مقابل، بیشتر مواد کامپوزیتی شکننده هستند و انرژی ضربه را فقط در ناحیه الاستیک قبل از گذراندن حالت‌های مختلف شکست جذب می‌کنند. در غیاب تغییر شکل پلاستیک، آسیب در کامپوزیت‌ها به عنوان آسیب ضربه به سختی قابل مشاهده

سطح آلومینیوم برای افزایش مقاومت برشی بین لایه‌های استفاده می‌کند. گلر معمولاً از دو لایه خارجی آلومینیومی و لایه‌های داخلی الیاف شیشه تشکیل شده است که روش‌های آندایزینگ متفاوتی روی ورق‌های آلومینیومی اعمال می‌شود تا استحکام و چقرمگی شکست را بهبود بخشد [۵].

گلر در مقایسه با کامپوزیت‌های فلزی-الیافی تقویت شده با الیاف کربن (کارال) دارای رفتار ضربه‌ای بهتر و در مقایسه با کامپوزیت‌های فلزی-الیافی تقویت شده با الیاف کولار (آرال) دارای استحکام کششی بهتری است. کاربردهای گلر شامل پوسته بدنه اصلی، لبه‌های دم افقی و عمودی هواپیماها است [۶] و [۷]. امروزه گلر به عنوان یک ماده شناخته شده در بسیاری از کاربردهای سازه‌ای پیشرفته نظیر پوسته فوقانی بدنه هواپیمای ایرباس آ-۳۸۰ و کف اتاقک حمل بار بویینگ ۷۷۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر طبقه‌بندی نشان‌دهنده شده در جدول (۱)، یک سیستم کدگذاری مخصوص برای گلرها استفاده می‌شود. در این سیستم، بعد از کلمه GLARE چهار عدد وجود دارد که عدد اول نشان‌دهنده نوع گلر، عدد دوم نشان‌دهنده تعداد لایه‌های آلومینیوم، عدد سوم نشان‌دهنده تعداد لایه‌های کامپوزیت بکار رفته و عدد چهارم نشان‌دهنده ضخامت ورق آلومینیومی می‌باشد. برای مثال در GLARE 3-3/2-0.4 اولین عدد از سمت چپ (عدد ۳)، نوع گلر (چینش ۰/۹۰) را نشان می‌دهد، دومین عدد (عدد ۳) تعداد ورق‌های آلومینیوم بکار رفته را نشان می‌دهد. سومین عدد (عدد ۲) تعداد لایه‌های کامپوزیت (هر لایه شامل یک لایه ۰ درجه و یک لایه ۹۰ درجه) بین آلومینیوم‌ها و عدد آخر (عدد ۰/۴) ضخامت ورق آلومینیوم بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد. ضخامت نمونه تولید شده با در نظر گرفتن ۰/۲۵ میلی‌متر برای ضخامت هر لایه کامپوزیتی معادل ۱/۷ میلی‌متر خواهد بود. شکل (۳) نمایی از GLARE 5-2/1 را نشان می‌دهد.



شکل ۳ نمایی از GLARE 5-2/1 [۸]

⁴ Hyper velocity impact

^۱ Low velocity Impact

^۲ Intermediate velocity impact

^۳ High velocity impact

شکل پلاستیک لایه آلومینیوم، ترک خوردگی ماتریس و الیاف، لایه‌لایه شدن بین لایه‌های کامپوزیت و جداسدن لایه‌های فلزی و کامپوزیت.

هر مکانیزم آسیب، پیچیدگی خاص خود را دارد و اندازه-گیری مقاومت آسیب چندلایه فلزی-الیافی را دشوار می‌کند. آسیب ممکن است در لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP)^۱ در یک لایه یا بین لایه‌ها رخ دهد اما آسیب نهایی زمانی رخ می‌دهد که آسیب در لایه‌های مختلف ایجاد شود. رفتار چندلایه فلزی-الیافی تحت ضربه سرعت پایین به عوامل مختلفی از جمله نحوه چینش، ضخامت، نوع ماده، شرایط مرزی و شکل ضربه‌زن بستگی دارد [۱۵] و [۱۶]. البته در برخی پژوهش‌ها تأثیر عواملی همچون نانوذرات و شکل الیاف بر رفتار ضربه کامپوزیت‌ها نیز بررسی و اثربخشی نانوذرات و شکل الیاف در رفتار ضربه کامپوزیت‌ها اثبات شده است [۱۷-۱۹].

در این مقاله مروری، رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های گلر با جمع‌آوری نتایج مقالات مرتبط در این زمینه و بررسی عوامل تأثیرگذار بر استحکام ضربه سرعت پایین گلر همراه با نحوه ارزیابی نتایج تست ضربه مورد مطالعه قرار گرفته است.

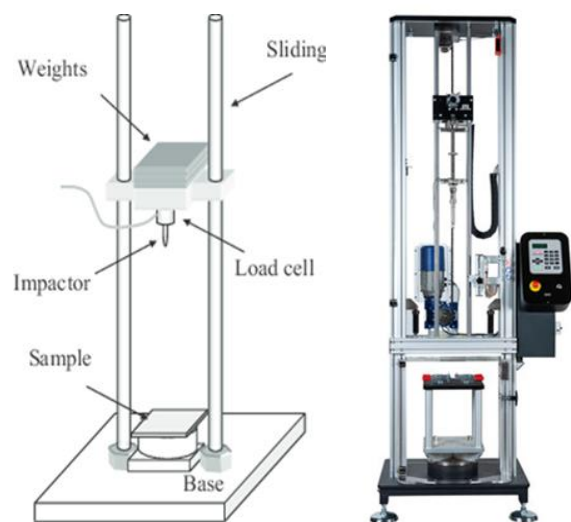
۲- مطالعات تجربی تأثیر ضربه سرعت پایین بر روی گلر

ضربه شامل برخورد دو جسم است: ضربه زننده و هدف. در هنگام برخورد، نیروی تماس با فرورفتگی ضربه‌زننده به سمت هدف ایجاد می‌شود. دانش پاسخ دینامیکی سازه و مقاومت در برابر آسیب آن، برای بهینه‌سازی سازه‌ای که نیاز به ایمنی بالا مانند کاربردهای سازه‌ای هوایی دارد، بسیار مهم است.

اکثر آزمایشات ضربه بر روی یک صفحه مسطح با مرزهای گیردار انجام می‌شود. ناتوانی در تجسم آسیب داخلی یک چندلایه کامپوزیتی، جامعه تحقیقاتی را وادار کرده تا پدیده ضربه با سرعت پایین را به طور دقیق بررسی کنند. آسیب ضربه داخلی در گلر بیشتر به یک منطقه نسبتاً کوچک اطراف نقطه برخورد محدود می‌شود. اندازه آسیب داخلی معمولاً کوچکتر از اندازه فرورفتگی توام با تغییر شکل پلاستیکی قابل مشاهده در لایه‌های آلومینیومی بیرونی برای ورقه‌های گلر می‌باشد [۲۰-۲۴]. رفتار ضربه سرعت پایین گلر، تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون ضخامت، جنس فلز، ترتیب چینش، جرم و هندسه ضربه زننده، زاویه برخورد ضربه زننده با هدف، کسر حجمی فلز قرار دارد. تکامل آسیب لایه‌های آلومینیوم و لایه‌لایه شدن در سطح مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت تحت تأثیر این عوامل

طبقه‌بندی می‌شود که یکپارچگی ساختاری قطعه را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین کامپوزیت‌ها می‌توانند انرژی را به صورت تغییر شکل الاستیک و از طریق مکانیسم‌های آسیب جذب کنند. واضح است که اکثریت قریب به اتفاق ضربه‌ها بر روی یک صفحه کامپوزیتی در جهت عرضی خواهد بود زیرا به دلیل عدم تقویت ضخامت، مقاومت در برابر آسیب عرضی به طور محسوسی ضعیف است [۱۲].

برای انجام هر تستی استانداردهای مشخصی مورد نیاز است. استاندارد ASTM D7136 مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد شده برای ارزیابی رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف است که به محققین و شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا یافته‌ها و محصولات خود را طبق دستورالعمل‌های تعیین‌شده در این استاندارد ارزیابی کنند. در این استاندارد ابعاد نمونه کامپوزیتی، جرم ضربه‌زننده، هندسه ضربه‌زننده، روش ضربه زدن به نمونه و تجزیه و تحلیل آسیب‌ها به تفصیل شرح داده شده است. این استاندارد بر اساس سقوط آزاد وزنه می‌باشد و برای اجرای آن، ماشین آلات و تجهیزات مخصوصی مورد نیاز است. مهمترین ماشین مورد نیاز، دستگاه تست ضربه سرعت پایین است که این دستگاه همراه با قسمت‌های مختلف آن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ نمایی از دستگاه ضربه سرعت پایین و اجزای آن [۱۳]

با توجه به خواص مکانیکی متفاوت لایه‌های فلزی و کامپوزیت، فرآیند ضربه با سرعت پایین می‌تواند باعث ایجاد حالت‌های آسیب مختلف بین و درون چندلایه فلزی-الیافی شود [۱۴]. چهار حالت آسیب عمده در چندلایه‌ها وجود دارد: تغییر

^۱ Glass Fiber Reinforced Plastics

همچنین به دلیل تمرکز تنش موضعی تحت انرژی‌های ضربه‌ای بالاتر، ترک‌هایی بر روی سمت آسیب‌دیده ایجاد شد. مساحت کل قسمت آسیب‌دیده با افزایش انرژی ضربه، افزایش یافت. با ضخیم‌تر شدن نمونه تحت همان انرژی ضربه، سطح قسمت آسیب‌دیده کاهش یافت و توانایی آن در جذب انرژی ضربه بیشتر شد؛ در حالیکه حداکثر انحراف مرکزی کاهش یافت. علاوه بر این، اوج نیروی تماس افزایش یافت و مدت زمان برخورد کوتاه‌تر گردید.

در مطالعه‌ای دیگر که توسط وانگ و همکاران [۳۰] انجام شد، ضخامت گِلبَر بر مقاومت ضربه با سرعت پایین آن تأثیر گذاشت و گِلبَر نازک‌تر کاهش قابل توجهی در ظرفیت تحمل بار را تجربه کرد. همچنین عباسی‌نسب و همکاران [۲۹] دریافتند که افزایش ضخامت لایه‌های الیافی و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیومی، مقاومت ضربه‌ای با سرعت پایین گِلبَر را کاهش می‌دهد. افزایش در ضخامت لایه‌های الیاف و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیومی موجب افزایش مدت زمان برخورد و کاهش سفتی سازه کامپوزیتی شد. یکی از دلایل اصلی افزایش مقاومت به ضربه در گِلبَرها استفاده از ورق‌های آلومینیومی است، هر چقدر ضخامت ورق آلومینیوم افزایش پیدا کند، مقاومت به ضربه گِلبَر افزایش پیدا می‌کند به شرطی که موضوع سبکی وزن و مدیریت هزینه‌ها لحاظ گردد.

۲-۱-۲- جنس فلز

جنس آلیاژهای فلزی بکار رفته در تهیه چند لایه‌های فلزی-الیافی یکی از دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های فلزی-الیافی است. باید توجه داشت که وقتی از گِلبَر صحبت می‌شود چندلایه مدنظر ترکیبی از ورق آلومینیوم و الیاف شیشه است، هر چند در برخی تحقیقات به جای آلومینیوم فلزاتی همچون منیزیم، تیتانیوم و فولاد آلیاژی استفاده شده و اثرات آنها در رفتار ضربه سرعت پایین بررسی شده است [۳۱-۳۳]. در گِلبَر نوع ۱ به دلیل سفتی و استحکام بالای AI ۷۴۷۵، انحراف دائمی کوچک و جدالایی کمتر اتفاق می‌افتد، اما گِلبَر نوع ۱ ماهیت شکننده، جذب انرژی کمتر و مقاومت آسیب کمتری نسبت به گِلبَر مبتنی بر AI-۲۰۲۴ دارد [۳۴].

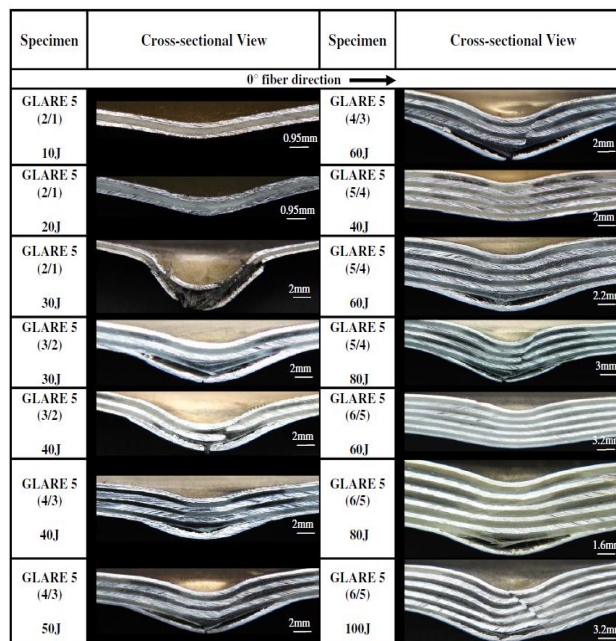
یانگ چن و همکارانش [۳۵] تأثیر نوع فلز را در میزان جذب انرژی چندلایه فلزی-الیافی تحت ضربه سرعت پایین را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که انرژی ضربه چندلایه‌های فلزی-الیافی بیشتر توسط لایه‌های فلزی تلف می‌شود؛ جاییکه انرژی اتلاف پلاستیک لایه آلومینیوم در چندلایه‌های فلزی-

است [۲۵]. میزان تأثیر هر یک از عوامل ذکر شده بر مقاومت ضربه‌ای گِلبَر در ادامه بررسی می‌گردد.

۲-۱- عوامل مؤثر بر استحکام ضربه سرعت پایین گِلبَر

۲-۱-۱- تأثیر ضخامت

ضخامت ورق‌های آلومینیومی و الیاف بکار رفته و متعاقب آن ضخامت گِلبَر تولید شده، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت به ضربه انواع گِلبَرها است. تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام گرفته است [۹] و [۲۶-۲۹]. سید یعقوبی و همکاران [۲۸] تأثیر ضخامت نمونه را در رفتار ضربه سرعت پایین گِلبَر نوع ۵ بررسی کردند. با توجه به نتایج به دست آمده که در شکل (۵) مشخص است، حالت‌های شکست با افزایش ضخامت نمونه تغییر کرد.



شکل ۵ نمای مقطعی گِلبَر ۵ با ضخامت‌های مختلف [۲۸]

برای نمونه‌های نازک‌تر گِلبَر نوع ۵ با آرایش (۳/۲) شکست عمدتاً از نوع جدالایی در سمت ضربه نخورده بود و به دنبال آن شکستگی الیاف و شکستگی لایه‌های آلومینیوم اتفاق افتاد؛ در حالیکه، برای گِلبَر نوع ۵ با آرایش (۲/۱) پس از جدالایی، شکست آلومینیوم رخ داد. برای نمونه‌های ضخیم‌تر گِلبَر نوع ۵ با آرایش (۵/۴) و (۶/۵)، لایه‌های ضربه‌خورد در نزدیکی سمت ضربه خورده در انرژی ضربه نسبتاً کمتر رخ داد. زمانی که انرژی‌های ضربه بالاتر اعمال شد، آسیب‌های شدیدتر از جمله شکست در لایه‌های آلومینیومی پایینی و شکستگی الیاف در لایه‌های کامپوزیتی پیش‌آغشته، در سمت ضربه نخورده ایجاد شد.

سایر نمونه‌ها داشت. چندلایه فلزی-الیافی تقویت شده با کولار یا آرال در هنگام ضربه آسیب شدیدی نسبت به گلر تجربه کرد؛ در حالیکه انتظار می‌رفت این نمونه‌ها به دلیل استفاده از الیاف کولار، مقاومت به ضربه بالایی داشته باشند. مقایسه پاسخ به ضربه بین گلر نوع ۳، ۴ و ۵ با آرایش (۲/۱) توسط لالیبرته [۴۰] و گلر نوع ۴ و ۵ با آرایش (۲/۱) توسط وو [۴۱] نشان داد که گلر نوع ۵ با لایه‌های پیش آغشته اپوکسی شیشه بیشتر، مقاومت خوبی در برابر آسیب نشان داد.

۲-۱-۴- جرم و هندسه ضربه‌زننده

اثر جرم و هندسه ضربه‌زننده بر مقاومت ضربه‌ای سرعت پایین گلر در چندین مطالعه بررسی شده است. سید یعقوبی و همکاران [۲۸] تأثیر جرم ضربه‌زن را در رفتار ضربه سرعت پایین گلر نوع ۵ بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های تست شده با ضربه‌زننده سبک، سریع‌تر از نمونه‌های تست شده با ضربه‌زننده سنگین به حد سوراخ می‌رسند. مطالعات کاکاتی و چاکرابورتی [۴۲] تأثیر جرم ضربه‌زننده را در رفتار ضربه‌ای صفحات گلر بررسی کردند. نتایج نشان داد که جرم ضربه‌زن به طور قابل توجهی بر نیروی تماس و لایه‌لایه شدن سطحی تأثیر می‌گذارد. افزایش جرم ضربه‌زن نسبت به صفحه هدف، منجر به نیروی تماس بالاتر و میزان بیشتری از لایه‌لایه شدگی در فصل مشترک شد. علاوه بر این، جرم ضربه‌زن همراه با عوامل دیگری مانند سرعت ضربه‌زننده و اندازه صفحه هدف، بر پاسخ ضربه صفحات گلر تأثیر می‌گذارد [۲۵]. همچنین شکل و هندسه ضربه‌زننده نیز حائز اهمیت است [۳۲] و [۴۳]. لو و همکاران [۴۳] در پژوهشی تجربی و عددی به بررسی تأثیر شکل ضربه‌زننده در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی پرداختند. نتایج نشان داد که رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های فلزی-الیافی به شدت تحت تأثیر شکل ضربه‌زننده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که هرچه سر ضربه‌زننده پهن‌تر باشد، زمان برخورد کمتر و بیشینه‌ی نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. ناحیه آسیب ضربه‌زننده در حالتی که هندسه سر ضربه‌زننده مخروطی است از سایر شکل‌ها بیشتر بود.

۲-۱-۵- زاویه برخورد

تأثیر زاویه ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه با سرعت پایین گلر در چندین مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است؛ هر چند در استاندارد مربوطه، زاویه ضربه‌زننده نسبت به صفحه هدف همیشه عمود می‌باشد. مشخص شد که انحراف زاویه ضربه‌زن به‌طور قابل

الیافی مبتنی بر آلومینیوم به طور مشخصی بالاتر از لایه منیزیم در چندلایه‌های فلزی-الیافی مبتنی بر منیزیم بود. جایگزینی آلومینیوم با منیزیم هر چند منجر به سوراخ شدن سریعتر و اتلاف انرژی شد ولی به دلیل تغییر شکل پلاستیک کوچک‌تر، آسیب لایه‌لایه شدن را در سطح مشترک بین فلز و الیاف کاهش داد. شارما و ولمورگان [۳۳] رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی مبتنی بر الیاف شیشه و فلز تیتانیوم را مطالعه کردند. چندلایه‌های فلزی-الیافی با ورق‌های $V4Al-6Ti$ آلیاژ تیتانیوم و لایه‌های شیشه/اپوکسی با استفاده از تکنیک آرایش دستی تهیه شدند. چندلایه فلزی-الیافی با بیرونی‌ترین لایه فلزی بر خلاف چندلایه فلزی-الیافی با بیشترین لایه‌های فلزی، باز-شدگی جانبی و جداییگی بیشتری را نشان دادند.

طبق نتایج به دست آمده، مقاومت به ضربه چندلایه فلزی-الیافی مبتنی بر آلومینیوم بود. از بررسی مقالات وصف شده و چندین مقاله تحقیقاتی دیگر [۳۲]، [۳۶] و [۳۷] چنین بر می‌آید که جنس فلز به عنوان یک عامل مؤثر در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی محسوب می‌شود ولی برای یک انتخاب بهینه، در نظر گرفتن تمام فاکتورها از جمله وزن، خواص مکانیکی و هزینه آن الزامی است.

۲-۱-۳- ترتیب لایه‌گذاری

همانطور که در بخش مقدمه نشان داده شد طبقه‌بندی انواع گلر بجز نوع ۱ و ۲، بر اساس چیدمان لایه‌ها انجام می‌گیرد و این موضوع در جدول (۱) به خوبی مشهود است. با توجه به ترتیب چینش، هر نوعی از گلر برای کاربرد خاصی استفاده می‌شود. گلر نوع ۳ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های کامپوزیتی آن بصورت $0/90$ و بطور ویژه گلر نوع ۵ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های آن بصورت $0/90/0/90/0$ برای کاربردهای ضربه‌ای استفاده می‌شوند [۳۸]. سید یعقوبی و همکاران [۳۹] تجزیه و تحلیل ضربه سرعت پایین نمونه‌های مختلف گلر نوع ۵ با آرایش (۳/۲) با جهت‌گیری‌های یک طرفه، لایه متقاطع، زاویه دار، شبه همسانگرد را برای سطوح مختلف انرژی ضربه انجام دادند. مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های گلر با کامپوزیت‌های تک‌جهته کم‌ترین مقدار بود. لمینت شبه همسانگرد [۹۰/۴۵/۴۵/۰] به دلیل سفتی بیشتر نمونه، مقاومت خوبی در برابر ضربه با انحراف کم نشان داد.

لیو و لیائو [۳۴] مطالعات مشابهی را برای گلر نوع $3,2,1$ (۳/۲) و آرال نوع ۳ انجام دادند. طبق نتایج حاصله، گلر نوع ۳ با پیش‌آغشته‌های شیشه‌ای متقاطع، مقاومت به ضربه بهتری نسبت به

انحاء نمونه‌های گِلر مشاهده شد. با افزایش کسر حجمی فلز، ماکزیمم بار ضربه افزایش یافت. بیباکیس و همکاران [۴۹] در پژوهشی به بررسی رفتار ضربه سرعت پایین انواع گِلر پرداختند. کاهش کسر حجمی فلز بخاطر افزایش تعداد لایه‌های شیشه/اپوکسی در یکی از نمونه‌های گِلر باعث افزایش انعطاف-پذیری نمونه شد. همچنین زمان برخورد با کاهش کسر حجمی فلز افزایش یافت. پژوهش‌های کمتری در خصوص تأثیر کسر حجمی فلز در چندلایه‌های فلزی-الیافی انجام گرفته است.

۲-۲- ارزیابی نتایج ضربه سرعت پایین

آزمایش ضربه سرعت پایین می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در قالب منحنی‌های مختلف ارائه دهد. از جمله این منحنی‌ها می‌توان به مهم‌ترین آنها یعنی منحنی نیرو-زمان، منحنی نیرو-جابجایی و منحنی انرژی جذب شده-زمان اشاره کرد.

منحنی نیرو-زمان که پس از تست نمونه‌ها از طریق کارت داده برداری دستگاه ضربه حاصل می‌شود، یک ابزار اساسی در ارزیابی پاسخ مواد به ضربه‌های سرعت پایین می‌باشد و اطلاعات مهمی را در مورد رفتار مواد و حالت‌های تخریب آن‌ها تحت شرایط بارگذاری دینامیکی، تنش‌های شکست، سفتی و مکانیزم-های آسیب ارائه می‌دهد [۵۰-۵۲]. این امر به درک ظرفیت جذب انرژی، شکل‌پذیری، شکنندگی مواد در هنگام ضربه و ارزیابی یکپارچگی سازه و تحمل آسیب کمک می‌کند [۵۳] و [۵۴]. علاوه بر این، منحنی مذکور به پیش‌بینی شروع و انتشار آسیب مانند لایه‌لایه شدن در مواد کامپوزیت کمک می‌کند که ممکن است از نظر بصری قابل تشخیص نباشد؛ اما به‌طور قابل توجهی بر عملکرد سازه تأثیر می‌گذارد.

منحنی نیرو-جابجایی با استفاده از یک سری روابط از منحنی نیرو-زمان حاصل می‌شود. این منحنی به تجزیه و تحلیل نیروی ضربه گذرا، تغییر شکل موضعی در نقطه تماس و پاسخ ساختاری ماده هدف کمک می‌کند [۵۰]. با مطالعه این منحنی، محققان می‌توانند توانایی مواد را برای تحمل بارهای ضربه‌ای، پیش‌بینی حالت‌های شکست و بهینه‌سازی طرح‌ها برای افزایش عملکرد ضربه ارزیابی کنند. در نهایت منحنی انرژی جذب شده-زمان با استفاده از یک سری روابط از منحنی نیرو-جابجایی حاصل می‌شود. این منحنی به تغییر انرژی جذب شده در طول زمان آزمایش ضربه اشاره دارد [۵۵] و [۵۶]. این منحنی نشان

توجهی بر نیروی تماس، زمان تماس و میزان لایه‌لایه شدن تأثیر می‌گذارد [۴۴]. افزایش انحراف، منجر به تاخیر لحظه‌ای و کاهش مدت زمان معکوس نیروی تماس مماسی گردید [۲۵]. زاویه مایل نیز در تعیین لحظه و مدت زمان معکوس شدن نیروی تماس مماسی نقش داشت [۴۲].

۲-۱-۶- کسر حجمی فلز

مشابه استفاده از کسر حجمی الیاف (V_f)^۱ و ماتریس (V_m)^۲ در کامپوزیت‌های پایه پلیمری، مطالعه بر روی چندلایه فلزی-الیافی پارامتر جدیدی بنام کسر حجمی فلز یا MVF^3 را معرفی کرده که مجموع ضخامت لایه فلزی را به ضخامت کل ورقه مرتبط می‌کند:

$$MVF = \frac{\sum_1^p t_{metal}}{t_{lam}} \quad (1)$$

که در آن t_{metal} معادل ضخامت یک لایه فلزی، p برابر با تعداد لایه‌های آلومینیومی و t_{lam} معادل ضخامت لمینت کل است. MVF برابر صفر، بیان می‌دارد که نمونه کاملاً کامپوزیت پایه پلیمری است در حالی که MVF برابر ۱ به این معنی است که نمونه فلز خالص است [۴۵]. با داشتن کسر حجمی فلز می‌توان با استفاده از یک رابطه خطی، ویژگی گِلر را محاسبه کرد که با معادله "قانون مخلوط‌ها" موجود در مکانیک اولیه کامپوزیت‌ها بدست می‌آید.


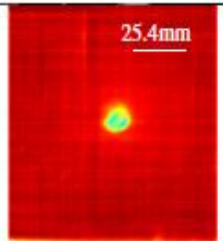

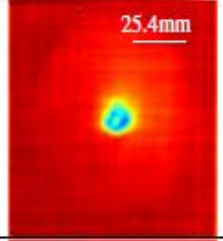

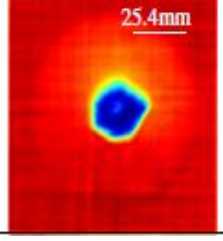
تعداد لایه‌های پیش‌آغشته $\times (1 - MVF) +$ تعداد لایه‌های فلزی $\times MVF =$ خاصیت هر ماده FML

بنابراین، کاملاً واضح است که پاسخ ضربه‌ای یک چند لایه فلزی-الیافی به کسر حجمی فلز بستگی دارد و رفتار ضربه‌ای متفاوت در گریدهای مختلف گِلر و آرال از مفهوم فوق پشتیبانی می‌کند. بسیاری از تحقیقات تجربی نشان دادند که تأثیر کسر حجمی فلز غیر قابل انکار است [۲۸]، [۴۶] و [۴۷]. افزایش محتوای شیشه/اپوکسی در گِلر باعث افزایش مقاومت آسیب و افزایش ۱۵ درصدی در حداقل انرژی ترک در سرعت پایین و حتی بیشتر (دو یا سه برابر) در ضربه با سرعت بالا نسبت به آلومینیوم خالص شد [۴۸]. بیباکیس و همکاران [۴۷] اثر کسر حجمی فلز بر رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های گِلر را بررسی کردند. تأثیر بالای کسر حجمی فلز بر بار ضربه و میزان

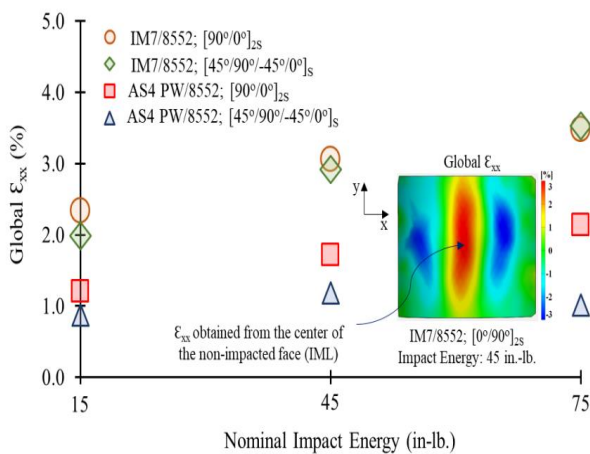
³ Metal volume fraction

¹ Fiber volume fraction

² Matrix volume fraction

Specimen	Optical View	C-scan View
GLARE 5 (2/1) 10J		
GLARE 5 (2/1) 20J		
GLARE 5 (2/1) 30J		

شکل ۶ تصاویر سی اسکن اولتراسونیک برای گلر ۵ تحت ضربه سرعت پایین [۲۸]



شکل ۷ مقایسه کلی نتایج کرنش نمونه‌های کامپوزیتی

همچنین شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود مانند ABAQUS با دستورالعمل‌های تعریف شده توسط کاربر (VUMAT) برای پیش‌بینی تکامل آسیب، استحکام باقی‌مانده و قابلیت‌های جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی که در معرض ضربه‌های سرعت پایین قرار می‌گیرند، استفاده می‌شوند [۵۹]، [۶۰] و [۶۲].

می‌دهد که چگونه ویژگی‌های جذب انرژی قبل از گسیختگی در ورقه‌های کامپوزیتی تکامل می‌یابد. عواملی مانند ضخامت لمینت، سرعت ضربه زننده و جهت قرار گرفتن الیاف بر کل انرژی جذب شده در طول آزمایش ضربه تأثیر می‌گذارد [۵۷]. این منحنی مفاهیمی را در مورد قابلیت‌های جذب انرژی مواد کامپوزیتی و ورقه‌های مختلف ارائه می‌کند که اثربخشی ورقه‌های هیبریدی را در جذب انرژی قبل از شکست در مقایسه با مواد سنتی برجسته می‌کند [۵۸]. علاوه بر این، منحنی انرژی جذب شده-زمان به درک رفتار آسیب حاصل از ضربه ورقه‌های کامپوزیت تحت نرخ بارگذاری دینامیکی کمک می‌کند و حالت‌های پیچیده شکست و قابلیت‌های حمل بار این مواد را نشان می‌دهد [۱۶].

برای بررسی آسیب در ضربه با سرعت کم، تکنیک‌های مختلفی بکار گرفته می‌شود. روش‌های آزمایشی شامل تست‌های ضربه سقوط وزنه با سطوح انرژی مختلف برای شبیه‌سازی نحوه ایجاد ضربه و ارزیابی میزان آسیب انجام می‌شود [۵۷]، [۵۹] و [۶۰]. تکنیک نشر فرا آوایی می‌تواند به‌طور مؤثری برای شناسایی و ارزیابی مکانیزم‌های آسیب در کامپوزیت‌های لایه‌ای پس از ضربه مورد استفاده قرار گیرد. این تکنیک امکان مانیتورینگ و تشخیص انواع مختلف آسیب‌ها از جمله ترک خوردگی، لایه‌لایه شدن و شکستگی فیبرها را فراهم می‌کند [۶۱]. تکنیک تصویربرداری سی اسکن اولتراسونیک برای شناسایی آسیب‌های غیرقابل مشاهده و ارزیابی شدت جدالایی در لایه‌های درونی استفاده می‌شود [۵۷] و [۶۰]. شکل (۶) نمونه‌ای از تصاویر سی اسکن اولتراسونیک را برای گلر ۵ که تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفته، نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، مساحت کل ناحیه آسیب دیده با افزایش انرژی ضربه افزایش یافته است.

دوربین‌های پرسرعت و کرنش سنج تصویری^۱ (DIC) برای ثبت شروع و پیشرفت آسیب در زمان واقعی در طول آزمایش‌های ضربه استفاده می‌شوند و بینش‌های ارزشمندی را در مورد حالت‌های خرابی و مکانیزم‌های آسیب ارائه می‌دهند. شکل (۷) مقایسه کلی کرنش نمونه‌های کامپوزیتی که توسط کرنش سنج تصویری به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، کرنش E_{xx} با افزایش انرژی ضربه افزایش یافت. همچنین سیستم کامپوزیتی IM7/8552 دارای مقادیر کرنش بالاتری در مقایسه با AS4 PW/8552 در جهت محور x است [۵۳].

^۱ Digital image correlation

۳- نتیجه‌گیری

کدام یک ابزار اساسی در ارزیابی پاسخ چندلایه‌های کامپوزیتی به ضربه‌های سرعت پایین می‌باشند.

۴- مراجع

- [1] R. Das, A. Chanda, J. Brechou, and A. Banerjee, "Impact behaviour of fibre-metal laminates," in *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures*: Elsevier, 2016, pp. 491-542, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100080-9.00017-8>.
- [2] L. B. Vogelesang and A. Vlot, "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures," *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 1, pp. 1-5, 2000, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8).
- [3] K. Dragan et al., "Damage Detection and Size Quantification of FML with the Use of NDE," *Fatigue of Aircraft Structures*, vol. 2012, no. 4, pp. 5-9, 2012, DOI: <https://doi.org/10.2478/v10164-012-0051-8>.
- [4] J. Bieniaś, "Fibre metal laminates-some aspects of manufacturing process, structure and selected properties," *Composites*, vol. 11, no. 1, pp. 39-43, 2011.
- [5] F. A. Alshamma and M. M. Kadhim, "Optimization of delamination resistance of vacuum infused glass laminate aluminum reinforced epoxy (GLARE) using various surface preparation techniques," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 361-375, 2022, DOI: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v10i1.2621>.
- [6] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," *Materials & Design*, vol. 32, no. 7, pp. 3671-3685, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.011>.
- [7] P. Sondankar and R. Arakerimath, "Stress and Failure Analysis of Aircraft Wing Using Glare Composite and Aluminum 7075," in *ICRRM 2019-System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management: Applications to Civil, Mechanical and Chemical Engineering*, 2020: Springer, pp. 33-39, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8507-0_6.
- [8] S.-E. Lee, D.-U. Kim, Y.-J. Cho, and H.-S. Seo, "Multiple impact damage in GLARE laminates: Experiments and simulations," *Materials*, vol. 14, no. 24, p. 7800, 2021, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247800>.
- [9] J. W. Wong, C. L. Tan, M. Azaman, A. Azmi, and I. W. M. Ming, "Low Velocity Impact Behaviour

در سال‌های اخیر، گلر به دلیل چگالی کم، استحکام بالا و مقاومت در برابر ضربه بهتر نسبت به آلومینیوم یکپارچه، به عنوان یک ماده برای بدنه ایرباس ۳۸۰ کاربرد فراوانی دارد. این امر جامعه تحقیقاتی را به بهبود و توسعه بسیاری از چند لایه‌های فلزی-الیافی بهینه و گسترش کاربرد آن ترغیب می‌کند. در این مقاله، رفتار ضربه با سرعت پایین گلر و عوامل تأثیرگذار بر اساس مقالات تحقیقاتی انجام گرفته، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مهم در زیر خلاصه شده است:

۱- پاسخ گلر به ضربه سرعت پایین تحت تأثیر عواملی همچون ضخامت گلر، نوع فلز استفاده شده، ترتیب چینش الیاف در قسمت کامپوزیت، جرم ضربه‌زننده، هندسه ضربه‌زننده، زاویه برخورد، کسر حجمی فلز و غیره می‌باشد.

۲- به طور کلی هر چه ضخامت ورق آلومینیومی بیشتر باشد مقاومت به ضربه گلر بیشتر خواهد بود اما با افزایش ضخامت لایه‌های الیافی و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیومی، مقاومت گلر در برابر ضربه کاهش می‌یابد.

۳- جنس فلز به عنوان یک عامل مؤثر در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی محسوب می‌شود ولی برای یک انتخاب بهینه، بایستی تمام فاکتورها از جمله وزن، خواص مکانیکی و هزینه آن را در نظر گرفت.

۴- ترتیب چینش لایه‌های کامپوزیتی یکی از مؤثرترین عوامل در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی محسوب می‌شود. گلر نوع ۳ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های کامپوزیتی آن بصورت ۰/۹۰ و به‌طور ویژه، گلر نوع ۵ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های آن بصورت متقاطع و با آرایش ۰/۹۰/۰/۹۰ برای کاربردهای ضربه‌ای استفاده می‌شوند. مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های گلر با لایه‌های کامپوزیتی تک‌جهته کمترین مقدار را نشان دادند.

۵- افزایش جرم ضربه‌زننده نسبت به صفحه هدف منجر به نیروی تماس بالاتر و میزان بیشتری از لایه‌لایه شدن در فصل مشترک شد. هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد زمان برخورد کمتر و بیشینه‌ی نیروی برخورد بیشتر خواهد بود.

۶- پاسخ ضربه‌ای یک چند لایه فلزی-الیافی به کسر حجمی فلز بستگی دارد. با افزایش کسر حجمی فلز، ماکزیمم بار ضربه افزایش می‌یابد. با کاهش کسر حجمی فلز انعطاف‌پذیری گلر و زمان برخورد ضربه افزایش یافت.

۷- آزمایش ضربه سرعت پایین اطلاعات ارزشمندی را در قالب منحنی‌های مختلف از جمله منحنی نیرو-زمان، منحنی نیرو-جابجایی و منحنی انرژی جذب شده-زمان ارائه می‌دهد که هر

- [18] S. Hoseinlghab, M. Farahani, M. Safarabadi, and S. Jalali, "Comparison and identification of efficient nanoparticles to improve the impact resistance of glass/epoxy laminates: experimental and numerical approaches," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 30, no. 4, pp. 694-709, 2023, <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.2023914>.
- [19] A. Sharei, M. Safarabadi, M. M. Mashhadi, R. S. Solut, and M. Haghghi-Yazdi, "Experimental and numerical investigation of low velocity impact on hybrid short-fiber reinforced foam core sandwich panel," *Journal of Composite Materials*, vol. 55, no. 29, pp. 4375-4385, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998321103738>.
- [20] A. Fahr, C. Chapman, D. Forsyth, C. Poon, and J. Laliberté, "Nondestructive evaluation methods for damage assessment in fiber-metal laminates," *Polymer composites*, vol. 21, no. 4, pp.568-575,2000, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10212>.
- [21] P. Straznicky, J. Laliberté, C. Poon, and A. Fahr, "Applications of fiber-metal laminates," *Polymer Composites*, vol. 21, no. 4, pp. 558-567, 2000, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10211>.
- [22] A. Vlot, "Impact loading on fibre metal laminates," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 291-307, 1996, DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(96\)89050-6](https://doi.org/10.1016/0734-743X(96)89050-6).
- [23] A. Vlot, E. Kroon, and G. La Rocca, "Impact response of fiber metal laminates," *Key Engineering Materials*, vol. 141, pp. 235-276, 1997, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.141-143.235>.
- [24] G. Wu and J.-M. Yang, "Impact behavior of GLARE laminates," in Proceedings of the 36th International SAMPE Technical Conference, 2004: SAMPE Covina, CA, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4>.
- [25] S. Kakati and D. Chakraborty, "Delamination in GLARE laminates subjected to oblique low velocity impact considering friction," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 97, p. 104817, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104817>.
- [26] A. P. Sharma, S. H. Khan, R. Kitey, and V. Parameswaran, "Effect of through thickness metal layer distribution on the low velocity impact response of fiber metal laminates," *Polymer Testing*, vol. 65, pp. 301-312, 2018, DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0014-y>.
- [27] J. Bienias, P. Jakubczak, and K. Dadej, "Low-velocity impact resistance of aluminium glass laminates—experimental and numerical investigation," *Composite structures*, vol. 152, Analysis of Different Fibre Stacking Sequences of Glass Fibre Reinforcement Composite," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2051, no. 1: IOP Publishing, p. 012014, DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2051/1/012014/meta>.
- [10] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, "Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 133, pp. 112-121, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>.
- [11] S. Heimbs, "Energy absorption in aircraft structures," in International workshop on hydraulic equipment and support systems for mining, 2012: Trans Tech Publ. Ltd. Zurich, Switzerland, pp. 1-10. DOI: http://www.heimbsonline.de/Heimbs_2012_IWHEM.pdf.
- [12] M. Richardson and M. Wisheart, "Review of low-velocity impact properties of composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 12, pp. 1123-1131,1996, DOI: [https://doi.org/10.1016/1359835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359835X(96)00074-7).
- [13] J. Carrillo and W. Cantwell, "Mechanical properties of a novel fiber–metal laminate based on a polypropylene composite," *Mechanics of materials*, vol. 41, no. 7, pp. 828-838,2009, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.002>.
- [14] L. Li, L. Sun, T. Wang, N. Kang, and W. Cao, "Repeated low-velocity impact response and damage mechanism of glass fiber aluminium laminates," *Aerospace Science and Technology*, vol. 84, pp. 995-1010, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.11.038>.
- [15] K. Beklemysheva and I. Petrov, "Numerical modeling of low-velocity impact on hybrid composite," *Matematicheskoe modelirovanie*, vol. 30, no. 11, pp. 27-43, 2018, DOI: <https://ras.jes.su/mmod/s207987840001158-2-1-en>.
- [16] H. Kumar M and N. R. Mathivanan, "Experimental investigation of Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy characteristics influences through low velocity impact test," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 689-701, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2096829>.
- [17] S. Hoseinlghab, M. Farahani, and M. Safarabadi, "Improving the impact resistance of the multilayer composites using nanoparticles," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 51, no. 6, pp. 3083-3099, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1917424>.

- laminates: analytical and experimental investigation," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 51, no. 9, pp. 5179-5212, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1992778>.
- [37] S. Kakati and D. Chakraborty, "Low velocity impact on fibre metal laminates: A review," *Journal of Composite Materials*, vol. 57, no. 30, pp. 4731-4750, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1177/00219983231212544>.
- [38] R. Wanhill, "GLARE®: A versatile fibre metal laminate (FML) concept," *Aerospace Materials and Material Technologies: Volume 1: Aerospace Materials*, pp. 291-307, 2017, DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-2134-3_13.
- [39] A. Seyed Yaghoubi, Y. Liu, and B. Liaw, "Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE 5 (3/2) fiber-metal laminates," *Journal of thermoplastic composite materials*, vol. 25, no. 2, pp. 223-247, 2012, DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705711408165>.
- [40] J. F. Laliberté, P. V. Straznický, and C. Poon, "Impact damage in fiber metal laminates, part 1: experiment," *AIAA Journal*, vol. 43, no. 11, pp. 2445-2453, 2005, DOI: <https://doi.org/10.2514/1.15159>.
- [41] G. Wu, J.-M. Yang, and H. T. Hahn, "The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates," *Journal of materials science*, vol. 42, pp. 948-957, 2007, DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0014-y>.
- [42] S. Kakati and D. Chakraborty, "Influence of impactor mass on the low energy impact response of thin GLARE plates," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 1-15, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2280725>.
- [43] L. Yao, C. Wang, W. He, S. Lu, and D. Xie, "Influence of impactor shape on low-velocity impact behavior of fiber metal laminates combined numerical and experimental approaches," *Thin-Walled Structures*, vol. 145, p. 106399, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106399>.
- [44] P. You, H. Chen, M. Li, and Y. Wu, "A simulative study on the effect of friction coefficient and angle on failure behaviors of GLARE subjected to low-velocity impact," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 30, no. 1, p. 20220194, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0194>.
- [45] A. Vlot and J. W. Gunnink, *Fibre metal laminates: an introduction*, Springer Science & Business Media, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0995-9>.
- pp.339-348,2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.056>.
- [28] A. Seyed Yaghoubi, Y. Liu, and B. Liaw, "Low-velocity impact on GLARE 5 fiber-metal laminates: influences of specimen thickness and impactor mass," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 409-420,2012, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000134).
- [29] M. Abbasinasab and M. Mirzaei, "Effect of Impactor Energy and Layers Thickness on Fiber Metal Laminates in Low Velocity Impact," *Journal of Aeronautical Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 73-82, 2014, DOI: <https://doi.org/20.1001.1.17359449.1393.16.2.6.8>.
- [30] K. Wang and F. Taheri, "Comparison of the Low-Velocity Impact Responses and Compressive Residual Strengths of GLARE and a 3DFML," *Polymers*, vol. 15, no. 7, p. 1723,2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071723>.
- [31] D.-W. Lee, B.-J. Park, S.-Y. Park, C.-H. Choi, and J.-I. Song, "Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings," *Composite Structures*, vol. 189, pp. 61-69, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.044>.
- [32] D. De Cicco, Z. Asaee, and F. Taheri, "Low-velocity impact damage response of fiberglass/magnesium fiber-metal laminates under different size and shape impactors," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 24, no. 7, pp. 545-555, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2016.1162343>.
- [33] A. P. Sharma and R. Velmurugan, "Damage and energy absorption characteristics of glass fiber reinforced titanium laminates to low-velocity impact," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 27, pp. 6242-6265, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1974618>.
- [34] Y. Liu and B. Liaw, "Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates," *Applied Composite Materials*, vol. 17, pp. 43-62, 2010, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-009-9119-1>.
- [35] Y. Chen, L. Chen, Q. Huang, and Z. Zhang, "Effect of metal type on the energy absorption of fiber metal laminates under low-velocity impact," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 25, pp. 4582-4598, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1933659>.
- [36] A. Sharma and V. Ramachandran, "Low-velocity impact perforation response of titanium/composite

- and its Applications (IICETA), 2019: IEEE, pp. 191-195, DOI: 10.1109/IICETA47481.2019.9012986.
- [55] H. Shetty, D. Sethuram, B. Rammohan, and P. Budarapu, "Low-velocity impact studies on GFRP and hybrid composite structures," *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, vol. 12, pp. 125-141, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12572-021-00287-9>.
- [56] R. K. Dundi, P. N. Amin, and N. R. Mathivanan, "Analysis of factors influencing absorbed energy in CFRP and Kevlar hybrid laminate subjected to low-velocity impact," *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 1-9, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/14488388.2023.2187953>.
- [57] A. Bhasin, S. Raju Keshavanarayana, T. Maichan, H. Ramdial, L. M. Gomez, and G. Olivares, "Low Velocity Impact on Composite Energy Absorbers: Experimental Analysis," in *AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023, p. 1262, DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2023-1262>.
- [58] H. Sun, F. Li, K. Shen, and K. Li, "Energy Absorption of carbon-fiber-reinforced composite laminates under low-velocity impacts," *Mechanics of Composite Materials*, vol. 56, pp. 389-396, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09890-6>.
- [59] K. Amirashjaee-Asalemi, F. Taheri-Behrooz, and S. Fakhreddini-Najafabadi, "Investigation of the Low-Velocity Impact and Compression after Impact Performance of CFRPs," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 149, no. 9, p. 04023066, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1061/JENMDT.EMENG-6932>.
- [60] Y. Huang et al., "Research on low-velocity impact response of novel short-fiber-reinforced composite laminates," *Polymers*, vol. 15, no. 4, p. 840, 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15040840>.
- [61] S. Hoseinlghab, M. Farahani, M. Safarabadi, and M. Nikkhah, "Tension-after-impact analysis and damage mechanism evaluation in laminated composites using AE monitoring," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 186, p. 109844, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109844>.
- [62] L. Lokesh Kumar, B. Raviteja, S. Ashish, A. Arun, A. Anilchandra, and C. Manjunatha, "Simulation Studies of Low-Velocity Impact Damage in FRPS," in *International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery*, 2021: Springer, pp. 219-236, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4721-8_15.
- [46] M. Sadighi, T. Pärnänen, R. Alderliesten, M. Sayeafabi, and R. Benedictus, "Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates," *Applied Composite Materials*, vol. 19, pp. 545-559, 2012, DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-011-9235-6>.
- [47] G. Bikakis, A. Savaidis, P. Zalimidis, and S. Tsitos, "Influence of the Metal Volume Fraction on the maximum deflection and impact load of GLARE plates subjected to low velocity impact," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 161, no. 1: IOP Publishing, p. 012054, DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/161/1/012054/meta>.
- [48] A. Vlot and M. Krull, "Impact damage resistance of various fibre metal laminates," *Le Journal de Physique IV*, vol. 7, no. C3, pp. C3-1045-C3-1050, 1997, DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:19973176>.
- [49] G. S. Bikakis, E. Karaiskos, and E. P. Sideridis, "Low-velocity impact response of fiber-metal laminates consisting of different standard GLARE grades," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 35, no. 13, pp. 1029-1040, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684416633770>.
- [50] T. Polocoşer, B. Kasal, F. Stöckel, and X. Li, "Dynamic material properties of wood subjected to low-velocity impact," *Materials and Structures*, vol. 51, pp. 1-16, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1186-z>.
- [51] Z. Khan, M. Naik, F. Al-Sulaiman, and N. Merah, "Low velocity impact of filament-wound glass-fiber reinforced composite pipes," *J Material Sci Eng*, vol. 5, no. 253, pp. 2169-0022.10002, 2016, DOI: <https://pdfs.semanticscholar.org/8c48/0a0aa0a97dd1ef2054a3476df05c26b122ae.pdf>.
- [52] O. A. Mocian, D. M. Constantinescu, M. Sandu, and Ş. Sorohan, "Low velocity impact of 6082-T6 aluminum plates," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1932, no. 1: AIP Publishing, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5024175>.
- [53] S. Syed Abdullah, "Low velocity impact testing and post-impact analysis through compression after impact (CAI) and C-scan," in *Impact studies of composite materials: Springer*, 2021, pp. 185-194, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-1323-4_12.
- [54] M. M. Idan, "Low Velocity Impact Response of Laminated Composite Cylinder," in 2019 2nd International Conference on Engineering Technology