

طراحی، ساخت و کنترل مقاوم تطبیقی ربات شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی به روش طراحی مبتنی بر مدل

چکیده: در این مقاله، کنترل مقاوم تطبیقی یک ربات شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی، به منظور تست سخت افزار در حلقه واحدهای سنسوری با ابعاد و جرم مشخص مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، ساختار کلی ربات معرفی گردیده و سپس معادلات الکترومکانیکی حاکم بر سیستم به روش تکراری نیوتن-اویلر استخراج شده است. در ادامه با توجه به مدل الکترومکانیکی و در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، یک کنترلر تطبیقی فازی مد لغزشی برای شبیه ساز حرکت طراحی شده و پس از شبیه سازی، روی سیستم پیاده سازی شده است. نتایج پیاده سازی، نشان از عملکرد مناسب کنترلر در دنبال کردن فرمان های مطلوب در حضور عدم قطعیت ها دارد. همچنین نتایج نشان می دهند که اضافه کردن یک سیستم فازی جهت تعیین حد اشباع عملگرهای مفصلی، لرزش ناشی از ساختار کنترلر مد لغزشی را کاهش می دهد.

واژه های راهنما: تست سخت افزار در حلقه، شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی، کنترل مد لغزشی، کنترل فازی، طراحی مبتنی بر مدل

حسن صیادی*

استاد

محسن ذوالفقاری

دانشجوی کارشناسی ارشد

مریم هویت طلب

مربی،

دانشکده مهندسی

مکانیک،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

Hassan Sayyaadi*
Professor

Mohsen Zolfaghari
M.Sc. Student

Maryam Hoviattalab
Instructor,
Faculty of Mechanical
Engineering
Sharif University of
Technology, Tehran

Design, fabrication and robust adaptive control of a 3_axis motion simulator using model based design approach

Abstract: In this work, robust adaptive control of a 3_Axis Motion Simulator robot for Hardware-in-the-Loop testing of sensor units with specified dimensions and mass are investigated. Initially, 3_Axis Motion Simulator robot is introduced, followed by extracting electromechanical equations governing the system using the iterative Newton-Euler method. Subsequently, considering the electromechanical model and taking uncertainties into account, a fuzzy sliding mode controller is designed for motion simulator, and after simulation, it is implemented on the system. The implementation results demonstrate the controller's satisfactory performance in tracking desired commands in the presence of uncertainties. Also, the results show that adding a fuzzy system to determine the saturation limits of actuators reduces the chattering caused by the sliding mode control structure.

Keywords: Hardware in the loop, 3_Axis Motion Simulator, Sliding mode control, Fuzzy control, Model based design

۱- مقدمه

دارند. واضح است که بسیاری از آزمایشات سخت افزار در حلقه را می‌توان بدون شبیه‌سازهای شرایط محیطی انجام داد اما وجود شبیه‌سازهای شرایط عملکردی در آزمایشات سخت افزار در حلقه امری ضروری است. یکی از انواع شبیه‌سازهای شرایط عملکردی در آزمایشات سخت افزار در حلقه، شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی^۲ است. این شبیه‌ساز وظیفه دارد که حرکات دورانی جسم پرنده را برای سنسورها و واحدهای هدایت و ناوبری به صورت فیزیکی شبیه‌سازی کند. این شبیه‌سازی بر اساس برنامه حرکتی که مکانیزم از کامپیوتر دریافت می‌کند، صورت می‌گیرد. با انجام حرکات مشابه واقعیت توسط شبیه‌ساز برای واحد سنسوری، عملکرد واحد سنسوری در تست سخت افزار در حلقه راستی آزمایی می‌گردد [۱].

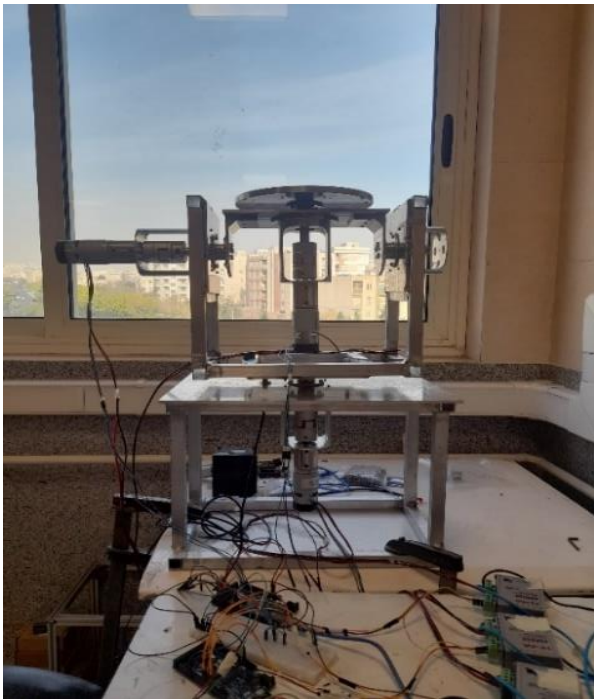
پژوهش‌هایی که در زمینه مدل‌سازی و طراحی سیستم کنترل شبیه‌ساز حرکت چند درجه آزادی و مکانیزم‌های مشابه مانند پلتفرم‌های پایدارساز، سرومکانیزم‌ها و ... انجام شده است را می‌توان بطور کلی در دو حوزه شبیه‌سازی و پیاده‌سازی تقسیم‌بندی کرد. در پژوهش‌های مرتبط با شبیه‌سازی، روش‌های کنترلی مختلفی مانند جدول‌بندی بهره، کنترل بهینه، کنترل غیر خطی، کنترل‌کننده پی‌آی دی‌فازی و ... مورد بررسی قرار گرفته است، اما باید توجه داشت که اولاً در اکثر مدل‌سازی‌های بکار رفته مدل عملگرهای مفاصل، عدم قطعیت‌های مرتبط با خواص جرمی، مدل اصطکاک و ... در نظر گرفته نشده است و این موضوع در کاربردهای پیاده‌سازی تأثیر نامطلوبی دارد ([۲]-[۷]). ثانیاً، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی پیشنهادی با توجه به زیاد بودن حجم محاسباتی و همچنین سریع بودن دینامیک سیستم، قابلیت اجرای زمان حقیقی در کاربردهای عملی را ندارند. در پژوهش‌های مرتبط با پیاده‌سازی، کنترلرهای کلاسیک و تلفیق روش‌های کنترل کلاسیک و هوشمند مورد تست و آزمایش قرار گرفته است. در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با پیاده‌سازی، مدل دینامیکی سیستم محاسبه نشده است و برای کنترل از روش‌های کنترل مستقل از مدل (مانند پی‌آی دی، پی‌آی دی‌فازی و ...) استفاده شده است ([۸]-[۱۶]). در برخی دیگر از پژوهش‌های مرتبط با پیاده‌سازی، مدل‌سازی ربات سه درجه آزادی نیز صورت گرفته است که با توجه به تفاوت آرایش قاب‌های شبیه‌سازهای مختلف، هندسه قاب‌ها، تعداد درجات آزادی، نوع عملگرهای مورد استفاده و ... به مدل‌های دینامیکی متفاوتی منتج شده است.

هدف از این مقاله، طراحی یک سیستم کنترل مقاوم تطبیقی برای ربات شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی است. بدین منظور، ابتدا به مدلسازی‌سازی الکترومکانیکی سیستم پرداخته می‌شود. در ادامه یک ساختار کنترل فازی مد لغزشی برای سیستم طراحی می‌گردد. این ساختار نسبت به پژوهش‌های قبلی سه مزیت دارد. اول آنکه مدل کامل سیستم در قانون کنترل تأثیر

سامانه‌ها و سیستم‌های دینامیکی معمولاً از چندین زیرسیستم تشکیل می‌شوند. این زیر سیستم‌ها در تعامل با یکدیگر باعث عملکرد مناسب سیستم اصلی می‌گردند. عدم عملکرد صحیح هر کدام از زیر سیستم‌ها موجب تأثیر نامطلوب در عملکرد سیستم اصلی خواهد شد. اطمینان از عملکرد هر کدام از زیرسیستم‌ها قبل از پیاده‌سازی نهایی روی سیستم اصلی، موجب پیدا کردن منشاء خطاهای احتمالی و کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی می‌شود. اهمیت این امر در سیستم‌هایی مانند هواپیما، ماهواره، زیرسطحی و بطور کلی سیستم‌هایی که به طور مستقیم به آن‌ها دسترسی نداریم بیشتر است. جهت تست زیرسیستم‌های یک سیستم از مفهومی تحت عنوان تست سخت‌افزار در حلقه^۱ استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش به قرار دادن یک یا چند قسمت از زیرسیستم‌های یک سیستم به صورت سخت‌افزار واقعی در حلقه شبیه‌سازی مربوط می‌شود. ایده سخت‌افزار در حلقه این امکان را به ما می‌دهد که بدون ساخت تمام اجزای یک سیستم، عملکرد یک زیر سیستم را مورد بررسی قرار دهیم. همچنین از آنجا که در این روش به جای برخی از زیرسیستم‌ها، سخت‌افزار واقعی داخل حلقه شبیه‌سازی قرار گرفته است، نتایج شبیه‌سازی‌ها قابل اعتمادتر بوده و به نتایج نهایی نزدیک‌تر خواهد بود. یکی از اصلی‌ترین کاربردهای روش سخت‌افزار در حلقه، تست سنسورها و واحدهای هدایت و ناوبری در صنایع هوافضا است. عملکرد اشتباه سنسورهای هدایت و ناوبری موجب بروز اشتباه، تحمیل هزینه و حتی بروز فاجعه می‌شود. بنابراین باید به نحوی قبل از پیاده‌سازی نهایی، از عملکرد صحیح این سنسورها اطمینان حاصل کرد. در نتیجه برای اطمینان از عملکرد سنسورهای ناوبری از تست سخت‌افزار در حلقه بهره گرفته می‌شود. برای قرار دادن سنسورها در حلقه شبیه‌سازی در حالتی که فرآیند به صورت نرم‌افزاری مدل شده باشد، لازم است تا آنچه توسط سنسورها اندازه‌گیری می‌شود، برای آنها شبیه‌سازی شود. علاوه بر آن، به منظور تست اثر شرایط محیطی بر عملکرد سنسورها در آزمایش سخت‌افزار در حلقه، می‌توان شرایط محیطی را نیز شبیه‌سازی نمود. بر همین اساس، نیاز به وجود شبیه‌سازهایی که بتوانند شرایط اجرای آزمایشات سخت‌افزار در حلقه را فراهم کنند، احساس می‌شود. این شبیه‌سازها بسته به نوع کاربرد به دو نوع شبیه‌سازهای شرایط عملکردی و شبیه‌سازهای شرایط محیطی تقسیم می‌شوند. شبیه‌سازهای شرایط عملکردی وظیفه شبیه‌سازی شرایطی را که یک زیرسیستم برای عملکرد صحیح به آن نیاز دارد، بر عهده دارند. شبیه‌سازهای شرایط محیطی، وظیفه شبیه‌سازی شرایطی را که محیط بر یک زیرسیستم در طول کار اعمال می‌کند بر عهده

² 3_Axis motion simulator¹ Hardware in the loop

اتصال هر عملگر به قاب مربوطه از طریق یک فلنج واسط صورت می‌گیرد. عملگر هر محور به وسیله یک کوپلینگ و شفت واسط، قدرت را از عملگر مربوطه به قاب مربوط به آن محور منتقل می‌کند. برای اندازه‌گیری زاویه و سرعت زاویه‌ای هر محور، از سه انکودر افزایشی که محور آن متصل به محور عملگر است، استفاده می‌شود. همچنین برای رفرنس کردن محورها هنگام شروع به کار مکانیزم، از سه سنسور مجاورتی استفاده شده است.



شکل ۲ شبیه‌ساز حرکت ساخته‌شده در آزمایشگاه مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های هوشمند دانشگاه صنعتی شریف

دارد. دوم آنکه کنترلر نسبت به عدم قطعیت‌های پارامتری مقاوم است و عواملی مانند نامعلوم بودن جرم واحد تحت تست، نادقیق بودن پارامترهای مدل و ... تأثیری بر عملگر مطلوب کنترلر ندارد و سوم آنکه سیستم کنترل قابلیت اجرا به صورت زمان حقیقی را دارد. برای رفع لرزش ناشی از ساختار کنترل مد لغزشی، از دو سیستم فازی استفاده شده است. یک سیستم فازی وظیفه تعیین حد سازی سطح لغزش و یک سیستم فازی دیگر وظیفه تعیین حد اشباع عملگرها در طول عملکرد سیستم را بر عهده دارد. در انتها، نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

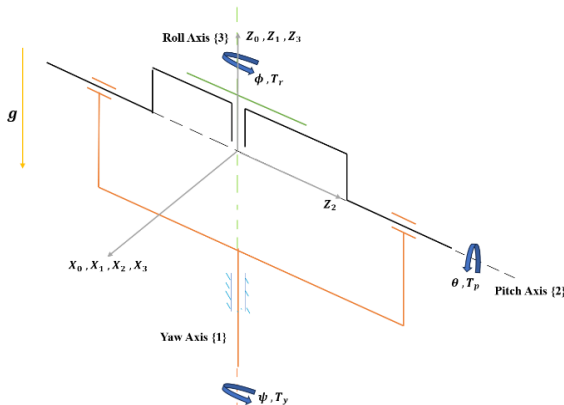
۲- معرفی شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی

شکل (۱) شماتیک طراحی مفهومی مکانیزم و شکل (۲) شبیه‌ساز ساخته شده و مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد. این شبیه‌ساز دارای سه قاب است که در مجموع سه درجه آزادی دورانی را برای سیستم فراهم می‌کند. مطابق با شکل (۱)، قاب اول (قرمز رنگ) قابلیت دوران حول محور سمت $^1(\psi)$ ، قاب دوم (بنفش رنگ) قابلیت دوران حول محور فراز $^2(\theta)$ و قاب سوم (آبی رنگ) قابلیت دوران حول محور چرخش $^3(\phi)$ را تأمین می‌کند.

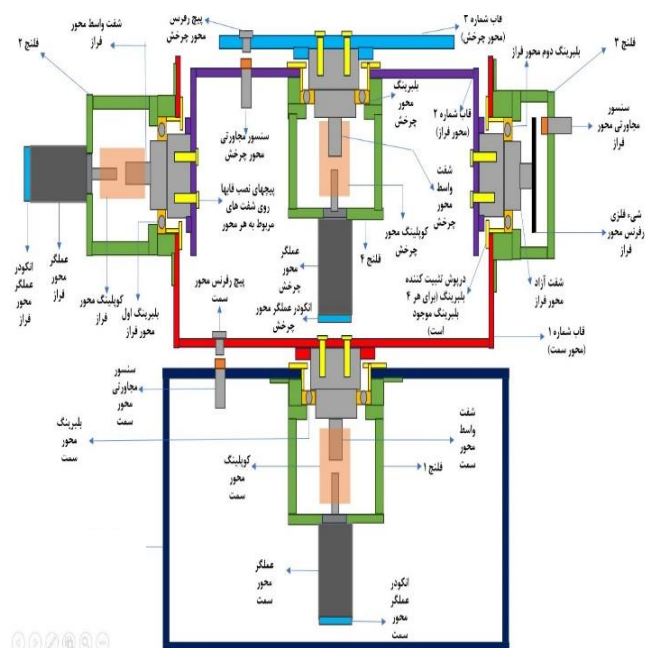
وظیفه دوران هر قاب بر عهده عملگر مربوط به آن قاب است. عملگر محور سمت متصل به پایه ربات، عملگر محور فراز متصل به قاب شماره (۱) و عملگر محور چرخش متصل به قاب شماره (۲) است.

۳- مدل‌سازی دینامیکی

آرایش قاب‌های شبیه‌ساز مطابق شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳ شماتیک آرایش قاب‌های شبیه‌ساز نسبت به یکدیگر



شکل ۱ شماتیک طراحی مفهومی مکانیزم

³ Roll axis

¹ Yaw axis

² Pitch axis

زمین شروع کرده و به ترتیب به سمت قاب آخر حرکت می‌کنیم. برای در نظر گرفتن شتاب جاذبه، فرض می‌شود دستگاه $\{0\}$ با شتاب خطی g به سمت خلاف جاذبه زمین حرکت می‌کند. ادامه نوشتار، منظور از ${}^j X_i$ ، بردار X_i بیان شده در دستگاه Z است. به عنوان مثال، ${}^1\omega_1$ به معنای سرعت دورانی قاب (۱) بیان شده در دستگاه مختصات $\{1\}$ است. سرعت‌ها و شتاب‌ها هر قاب مطابق با روابط (۴) تا (۱۳) بدست می‌آید:

$${}^0\omega_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^0\dot{\omega}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^0\dot{V}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$${}^1\omega_1 = {}^0R {}^0\omega_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \Rightarrow {}^1\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$${}^2\omega_2 = {}^1R {}^1\omega_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\psi}s\theta \\ -\dot{\psi}c\theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$${}^3\omega_3 = {}^2R {}^2\omega_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\psi}s\theta c\phi + \dot{\theta}s\phi \\ \dot{\psi}s\theta s\phi + \dot{\theta}c\phi \\ \dot{\psi}c\theta + \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

$${}^1\dot{\omega}_1 = {}^0R {}^0\dot{\omega}_0 + {}^0R {}^0\omega_0 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = {}^1R {}^1\dot{\omega}_1 + {}^1R {}^1\omega_1 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\psi}s\theta - \dot{\psi}\dot{\theta}c\theta \\ -\ddot{\psi}c\theta + \dot{\psi}\dot{\theta}s\theta \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

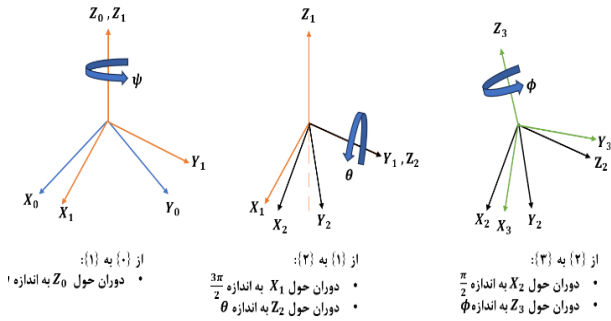
$${}^3\dot{\omega}_3 = {}^2R {}^2\dot{\omega}_2 + {}^2R {}^2\omega_2 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\psi}s\theta c\phi + \ddot{\theta}s\phi - \dot{\psi}\dot{\theta}c\theta c\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}s\theta s\phi + \dot{\theta}\dot{\phi}c\phi \\ \ddot{\psi}s\theta s\phi + \ddot{\theta}c\phi + \dot{\psi}\dot{\theta}c\theta s\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}s\theta c\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}s\phi \\ \ddot{\phi} + \dot{\psi}c\theta - \dot{\psi}\dot{\theta}s\theta \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

$${}^1\dot{V}_1 = {}^0R {}^0\dot{V}_0 \Rightarrow {}^1\dot{V}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$${}^2\dot{V}_2 = {}^1R {}^1\dot{V}_1 \Rightarrow {}^2\dot{V}_2 = \begin{bmatrix} -gs\theta \\ -gc\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$${}^3\dot{V}_3 = {}^2R {}^2\dot{V}_2 \Rightarrow {}^3\dot{V}_3 = \begin{bmatrix} -gs\theta c\phi \\ gs\theta s\phi \\ gc\theta \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

دستگاه $\{0\}$ متصل به زمین (پایه ربات)، دستگاه $\{1\}$ متصل به قاب محور سمت، دستگاه $\{2\}$ متصل به قاب محور فراز و دستگاه $\{3\}$ متصل به قاب محور چرخش است. شکل (۴) نحوه تبدیل دستگاه‌های متصل به قاب‌ها را به یکدیگر بیان می‌کند.



شکل ۴ تبدیل دستگاه‌های متصل به قاب‌ها به یکدیگر

با توجه به شکل (۴)، پارامترهای دناویت هارتنبرگ

مطابق با جدول (۱) بدست می‌آید:

جدول ۱ پارامترهای دناویت_هارتنبرگ

i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	ψ	0
2	$\frac{3\pi}{2}$	0	θ	0
3	$\frac{\pi}{2}$	0	ϕ	0

با توجه به جدول (۱)، ماتریس‌های دوران به صورت روابط

(۱) تا (۳) است.

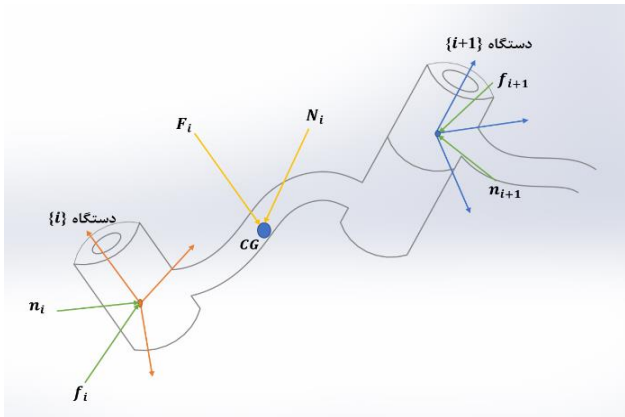
$${}^0R = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1R = {}^0R^T \quad (۱)$$

$${}^2R = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -s\theta & -c\theta & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^1R = {}^2R^T \quad (۲)$$

$${}^3R = \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ s\phi & c\phi & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^2R = {}^3R^T \quad (۳)$$

در معادلات (۱) تا (۳)، jR به معنای دورانی است که بیان را از دستگاه j به دستگاه i می‌برد. با توجه به الگوریتم تکرار بیرونی نیوتن اولیه، برای بدست آوردن سرعت‌ها و شتاب‌ها، از

$${}^i n_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i N_i \quad (18)$$



شکل ۶ نمودار جسم آزاد برای یک لینک بازوی رباتیک

نیروها و گشتاورهای اینرسی هر قاب مطابق با روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شوند:

$${}^i F_i = m_i \dot{V}_{C_i}, i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

$${}^i N_i = {}^c I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^c I_i \omega_i, i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

در روابط (۱۹) و (۲۰)، m_i جرم قاب $\{i\}$ ام است. همچنین ${}^c I_i$ تانسور لختی قاب $\{i\}$ ام نسبت به دستگاهی که محورهای آن موازی با محورهای دستگاه $\{i\}$ ام و مرکز آن منطبق بر مرکز جرم قاب $\{i\}$ ام است، می‌باشد. تانسور لختی قاب‌ها مطابق با رابطه (۲۱) است:

$${}^c I_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_i} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (21)$$

با محاسبه نیروها و گشتاورهای اینرسی و مطابق با شکل (۶)، تعادل نیرویی و گشتاوری برای قاب سوم مطابق با روابط (۲۲) و (۲۳) می‌باشد:

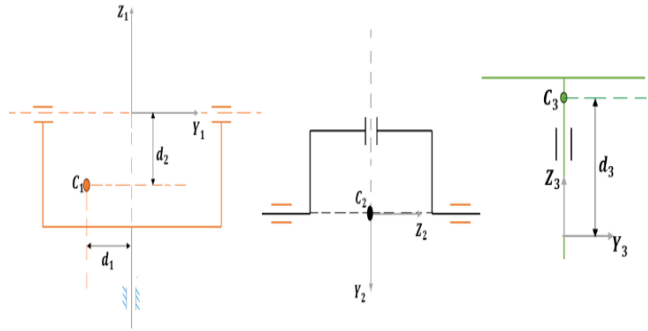
$${}^3 f_3 = {}^3 F_3 \quad (22)$$

$${}^3 n_3 = {}^3 P_{C_3} \times {}^3 F_3 + {}^3 N_3 \quad (23)$$

گشتاوری که باید توسط عملگر محور چرخش ایجاد شود برابر با سطر سوم بردار ${}^3 n_3$ است:

$$T_r = I_{zz_3} \dot{\psi} c\theta + I_{zz_3} \ddot{\phi} - I_{zz_3} \dot{\psi} \dot{\theta} s\theta \quad (24)$$

برای بدست آوردن شتاب خطی مرکز جرم هر قاب، لازم است که مکان قرارگیری مرکز جرم هر قاب را نسبت به مبدأ دستگاه متصل به آن قاب معلوم باشد. شکل (۵) مکان قرارگیری مرکز جرم قاب‌ها نسبت به مرکز دستگاه‌های مختصات متصل به قاب‌ها را نشان می‌دهد:



شکل ۵ مکان قرارگیری مرکز جرم هر قاب

با توجه به محل قرارگیری مرکز جرم قاب‌ها، شتاب خطی مرکز جرم هر قاب مطابق با روابط (۱۴) تا (۱۶) بدست می‌آید:

$${}^1 \dot{V}_{C_1} = \begin{bmatrix} d_1 \dot{\psi} \\ d_1 \dot{\psi}^2 \\ g \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^2 \dot{V}_{C_2} = \begin{bmatrix} -gs\theta \\ -gc\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3 \dot{V}_{C_3} = \begin{bmatrix} d_3(\dot{\psi}s\theta s\phi + \dot{\theta}c\phi - \dot{\psi}^2 c\theta s\theta c\phi + 2\dot{\psi}\dot{\theta}c\theta s\phi) - gs\theta c\phi \\ d_3(\dot{\psi}s\theta c\phi - \dot{\theta}s\phi + \dot{\psi}^2 c\theta s\theta s\phi + 2\dot{\psi}\dot{\theta}c\theta c\phi) + gs\theta s\phi \\ -d_3\dot{\psi}^2 s^2\theta - d_3\dot{\theta}^2 + gc\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

در ادامه، ابتدا با استفاده از روابط نیوتن-اولر، نیرو و گشتاور اینرسی وارد بر مرکز جرم هر قاب را محاسبه نموده و سپس با استفاده از تعادل نیرو و گشتاور برای هر قاب، گشتاورهای مفصلی را بدست می‌آید. بر اساس الگوریتم تکرار درونی نیوتن-اولر، از لینک آخر شروع کرده و به سمت زمین حرکت می‌کنیم. شکل (۶) نمودار جسم آزاد لینک $\{i\}$ ام یک بازوی ربات مفصلی را در حالت کلی نشان می‌دهد. در این شکل، f_i بیانگر نیروی وارد شده از لینک $\{i-1\}$ به لینک $\{i\}$ ، n_i بیانگر گشتاور وارد شده از لینک $\{i-1\}$ به لینک $\{i\}$ ، F_i بیانگر نیروی اینرسی لینک $\{i\}$ و N_i بیانگر گشتاور اینرسی لینک $\{i\}$ است. با توجه به شکل (۶)، رابطه تعادل نیرو و گشتاور مطابق با روابط (۱۷) و (۱۸) است:

$${}^i f_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \quad (17)$$

در روابط (۳۱) و (۳۲)، L اندوکتانس سیم پیچ موتور، R مقاومت سیم پیچ موتور، ω سرعت خروجی محور موتور، i جریان موتور، V_M ولتاژ اعمالی به موتور، K_e ثابت $BEMF$ ، K_t ثابت گشتاور و T_M گشتاور روی محور خروجی موتور است. از طرف دیگر، گشتاور روی محور موتور از رابطه (۳۳) نیز قابل محاسبه است:

$$T_M = I_M \dot{\omega} + b_M \omega + \frac{T_G}{N} \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)، I_M ممان اینرسی محور موتور، b_M ضریب اصطکاک ویسکوز روی محور موتور، T_G گشتاور روی محور گیربکس و N نسبت تبدیل گیربکس است. با تلفیق روابط (۳۲) و (۳۳) می توان گشتاور خروجی محور گیربکس را به محور موتور انتقال داد و سپس با استفاده از رابطه (۳۱)، رابطه ای بین ورودی V و خروجی زاویه موتور بدست آورد. عملگرهای مورد استفاده در هر سه محور شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی مورد بحث، موتور گیربکس دی سی است. بنابراین با استفاده از (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) و اضافه کردن اثرات اصطکاک و عدم قطعیت، معادلات الکترومکانیکی حاکم به صورت (۳۴) است:

$$V_M = [V_{M1} \quad V_{M2} \quad V_{M3}]^T = M(\bar{X})\ddot{\bar{X}} + D(\bar{X})\dot{\bar{X}}\dot{\bar{X}} + E(\bar{X})\dot{\bar{X}}^2 + B(\dot{\bar{X}}) + G(\bar{X}) + V_D \quad (34)$$

در رابطه (۳۴)، V_D بردار شامل جمله های اصطکاک، ناحیه مرده عملگرها و اغتشاش است. بردار V_M شامل ولتاژهای اعمالی به سه عملگر است و بقیه بردارها و پارامترها به صورت زیر می باشد:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix}, \quad \dot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad \ddot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix}, \quad \dot{\bar{X}}\dot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}\dot{\theta} \\ \dot{\psi}\dot{\phi} \\ \dot{\theta}\dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad \dot{\bar{X}}^2 =$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}^2 \\ \dot{\theta}^2 \\ \dot{\phi}^2 \end{bmatrix}, \quad M(\bar{X}) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & M_{13} \\ 0 & M_{22} & 0 \\ M_{31} & 0 & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$D(\bar{X}) = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{13} \\ 0 & D_{22} & 0 \\ D_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad E(\bar{X}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B(\dot{\bar{X}}) = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}, \quad G(\bar{X}) = \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = \frac{R}{K_t} \left(NI_M + \frac{I_{zz1} + I_{xx2} + I_{yy3} + m_1 d_1^2 + m_3 d_3^2 s^2 \theta + (I_{yy2} - I_{xx2} - I_{yy3} + I_{zz3}) c^2 \theta}{N} \right)$$

$$M_{13} = \frac{RI_{zz3}}{K_t N} c \theta, \quad M_{22} = \frac{R}{K_t} \left(NI_M + \frac{I_{xx3} + I_{zz2} + m_3 d_3^2}{N} \right), \quad M_{31} = \frac{RI_{zz3}}{K_t N} c \theta, \quad M_{33} = \frac{R}{K_t} \left(NI_M + \frac{I_{zz3}}{N} \right)$$

تعداد نیرویی و گشتاوری برای قاب دوم مطابق با روابط (۲۵) و (۲۶) می باشد:

$${}^2f_2 = {}^2_3R \quad {}^3f_3 + {}^2F_2 \quad (25)$$

$${}^2n_2 = {}^2_3R \quad {}^3n_3 + {}^2P_{C_2} \times {}^2F_2 + {}^2N_2 \quad (26)$$

گشتاوری که باید توسط عملگر محور فراز ایجاد شود برابر با سطر سوم بردار 2n_2 است:

$$T_p = (I_{xx3} + I_{zz2} + m_3 d_3^2) \ddot{\theta} + I_{zz2} \dot{\psi} \dot{\phi} s \theta + \frac{1}{2} (I_{yy2} - I_{xx2} + I_{zz3} - I_{yy3} - m_3 d_3^2) \dot{\psi}^2 s^2 \theta - m_3 d_3 g s \theta \quad (27)$$

تعداد نیرویی و گشتاوری برای قاب اول مطابق با روابط (۲۸) و (۲۹) می باشد:

$${}^1f_1 = {}^1_2R \quad {}^2f_2 + {}^1F_1 \quad (28)$$

$${}^1n_1 = {}^1_2R \quad {}^2n_2 + {}^1P_{C_1} \times {}^1F_1 + {}^1N_1 \quad (29)$$

گشتاوری که باید توسط عملگر محور سمت ایجاد شود برابر با سطر سوم بردار 1n_1 است:

$$T_y = [I_{zz1} + I_{xx2} + I_{yy3} + m_1 d_1^2 + m_3 d_3^2 s^2 \theta + (I_{yy2} - I_{xx2} - I_{yy3} + I_{zz3}) c^2 \theta] \ddot{\psi} + I_{zz3} \dot{\phi} c \theta + (I_{xx2} - I_{yy2} + I_{yy3} - I_{zz3} + m_3 d_3^2) \dot{\psi} \dot{\theta} s^2 \theta - I_{zz3} \dot{\theta} \dot{\phi} s \theta \quad (30)$$

روابط (۲۴)، (۲۷) و (۳۰) مجموعه معادلات دینامیکی حاکم بر شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی هستند.

۴- مدل سازی الکترومکانیکی

مجموعه معادلات الکترومکانیکی حاکم بر یک موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم به صورت روابط (۳۱) و (۳۲) است:

$$V_M = L \frac{di}{dt} + K_e \omega + Ri \quad (31)$$

$$T_M = K_t i \quad (32)$$

۵- طراحی کنترلر

بردار حالت مطلوب X_d مطابق (۴۳) و بردار خطا \tilde{X} مطابق (۴۴) است. هدف آن است تا بردار حالت X بردار حالت مطلوب X_d را دنبال کند.

$$X_d^T = [\psi_d \quad \dot{\psi}_d \quad \theta_d \quad \dot{\theta}_d \quad \phi_d \quad \dot{\phi}_d] \quad (۴۳)$$

$$\tilde{X}^T = (X - X_d)^T = [\tilde{\psi} \quad \dot{\tilde{\psi}} \quad \tilde{\theta} \quad \dot{\tilde{\theta}} \quad \tilde{\phi} \quad \dot{\tilde{\phi}}] \quad (۴۴)$$

سطوح لغزش سه گانه به صورت (۴۵) تا (۴۷) تعریف می شود:

$$s_1 = \dot{\tilde{\psi}} - \dot{\psi}_d + \lambda_1 \tilde{\psi} \quad , \quad \lambda_1 > 0 \quad (۴۵)$$

$$s_2 = \dot{\tilde{\theta}} - \dot{\theta}_d + \lambda_2 \tilde{\theta} \quad , \quad \lambda_2 > 0 \quad (۴۶)$$

$$s_3 = \dot{\tilde{\phi}} - \dot{\phi}_d + \lambda_3 \tilde{\phi} \quad , \quad \lambda_3 > 0 \quad (۴۷)$$

در نهایت، فرم کلی سیگنال کنترل مد لغزشی مطابق با روابط (۴۸) و (۴۹) است:

$$\begin{bmatrix} V_{M1} \\ V_{M3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{33} & -\hat{h}_{13} \\ \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} & \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} \\ -\hat{h}_{31} & \hat{h}_{11} \\ \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} & \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} -\hat{f}_1 \\ -\hat{f}_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\psi}}_d \\ \dot{\tilde{\phi}}_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_1 \dot{\tilde{\psi}} \\ \lambda_3 \dot{\tilde{\phi}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \text{sat}\left(\frac{s_1}{p_1}\right) \\ k_3 \text{sat}\left(\frac{s_3}{p_3}\right) \end{bmatrix} \quad , \quad p_1, p_3 > 0 > 0 > 0 \quad (۴۸)$$

$$V_{M2} = \frac{1}{\hat{h}_{22}} \left(-\hat{f}_2 + \dot{\tilde{\theta}}_d - \lambda_2 \dot{\tilde{\theta}} - k_2 \text{sat}\left(\frac{s_2}{p_2}\right) \right) \quad , \quad p_2 > 0 \quad (۴۹)$$

در روابط (۴۸) و (۴۹)، ضرایب k_1 و k_2 و k_3 باید به نحوی انتخاب شوند تا سطوح لغزش جاذب باشند. شرط جاذب بودن سطوح لغزش مطابق رابطه (۵۰) است:

$$s_i \dot{s}_i \leq -\eta_i |s_i| \quad , \quad i = 1, 2, 3 \quad , \quad \eta_i > 0 \quad (۵۰)$$

با انتخاب ضرایب k_1 و k_2 و k_3 مطابق با روابط (۵۱) و (۵۲)، دستگاه نامعادلات (۵۰) برقرار می گردد:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_3 \end{bmatrix} = \alpha^{-1} \begin{bmatrix} F_1 + L_{11}A_1 + L_{13}A_3 + \eta_1 \\ 1 - L_{11} \\ F_3 + L_{31}A_1 + L_{33}A_3 + \eta_3 \\ 1 - L_{33} \end{bmatrix} \quad (۵۱)$$

$$k_2 = \beta(F_2 + \eta_2) + (\beta - 1) \left| \hat{f}_2 - \dot{\tilde{\theta}}_d + \lambda_2 \dot{\tilde{\theta}} \right| \quad (۵۲)$$

$$D_{11} = \frac{R}{K_t N} (I_{xx2} - I_{yy2} + I_{yy3} - I_{zz3} + m_3 d_3^2) s_2 \theta \quad ,$$

$$D_{13} = -\frac{R I_{zz3}}{K_t N} s \theta$$

$$D_{22} = \frac{R I_{zz3}}{K_t N} \quad , \quad D_{31} = -\frac{R I_{zz3}}{K_t N} s \theta \quad , \quad E_{21} =$$

$$\frac{R}{2K_t N} (I_{yy2} - I_{xx2} - I_{yy3} + I_{zz3} - m_3 d_3^2) s_2 \theta$$

$$G_2 = -\frac{R}{K_t N} m_3 d_3 g s \theta \quad , \quad B_1 = (b_1 + N K_e) \dot{\psi} \quad , \quad B_2 = (b_2 + N K_e) \dot{\theta} \quad , \quad B_3 = (b_3 + N K_e) \dot{\phi}$$

در نهایت، فرم فضای حالت معادلات الکترومکانیکی حاکم مطابق (۳۵) است:

$$\dot{\tilde{X}} = f(X) + H(X) V_M \quad (۳۵)$$

در رابطه (۳۵)، f و H مطابق (۳۶) است:

$$\begin{aligned} X^T &= [\psi \quad \dot{\psi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \phi \quad \dot{\phi}] \\ f(X) &= -M^{-1} [D \dot{\tilde{X}} \dot{\tilde{X}} + E \dot{\tilde{X}}^2 + B + G + V_D] \\ &= [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T \end{aligned} \quad (۳۶)$$

$$H(X) = M^{-1} = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & h_{13} \\ 0 & h_{22} & 0 \\ h_{31} & 0 & h_{33} \end{bmatrix}$$

برای معرفی عدم قطعیت‌ها و استفاده از آنها در طراحی کنترلر، حدود بالا و پایین هر پارامتر را مشخص نموده و بر این اساس، حداکثر خطاهای ممکن محاسبه می شود. تقریب بردار f و باند بالای بردار f :

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \\ \hat{f}_3 \end{bmatrix} \quad , \quad F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (۳۷)$$

تقریب ماتریس H :

$$H = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & 0 & \hat{h}_{13} \\ 0 & \hat{h}_{22} & 0 \\ \hat{h}_{31} & 0 & \hat{h}_{33} \end{bmatrix} \quad (۳۸)$$

ماتریس L :

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{13} \\ L_{31} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (۳۹)$$

ماتریس Δ :

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{13} \\ \Delta_{31} & \Delta_{33} \end{bmatrix} < L \quad (۴۰)$$

ضریب β :

$$\beta = \sqrt{\frac{h_{22\max}}{h_{22\min}}} \quad (۴۱)$$

عدم قطعیت‌های المان‌های ماتریس H :

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{13} \\ h_{31} & h_{33} \end{bmatrix} = (I + \Delta) \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{13} \\ \hat{h}_{31} & \hat{h}_{33} \end{bmatrix} \quad , \quad \beta^{-1} < \frac{\hat{h}_{22}}{h_{22}} < \beta \quad (۴۲)$$

با استفاده از سه سیستم فازی مطابق با مطالب بیان شده برای سه درجه آزادی سیستم، ضرایب p_1 و p_2 و p_3 موجود در معادلات (۴۸) و (۴۹) با زمان تغییر پیدا می‌کنند.

۶- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

پارامترهای تقریبی ربات شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی، پس از انجام آزمون شناسایی سیستم به صورت روابط (۵۴) بدست آمده اند (تمامی واحدها در سیستم واحدهای SI هستند):

$$\begin{aligned} \hat{I}_{xx_1} &= 0.15, \hat{I}_{yy_1} = 0.2, \hat{I}_{zz_1} = 0.56, \hat{m}_1 = 4 \\ \hat{I}_{xx_2} &= 0.03, \hat{I}_{yy_2} = 0.023, \hat{I}_{zz_2} = \\ &0.011, \hat{m}_2 = 2.5 \\ \hat{I}_{xx_3} &= 0.005, \hat{I}_{yy_3} = 0.005, \hat{I}_{zz_3} = \\ &0.01, \hat{m}_3 = 1.5 \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \hat{d}_1 &= 0.04, \hat{d}_2 = 0.075, \hat{d}_3 = 0.08, N = 49 \\ \hat{I}_m &= 0.0001 \\ g &= 9.8, \hat{R} = 1.85, \hat{K}_t = 0.033, \hat{K}_e = 0.033 \\ \hat{b}_1 &= 0.19, \hat{b}_2 = 0.23, \hat{b}_3 = 0.17 \end{aligned}$$

از آنجا که یکی از اهداف این پژوهش، بررسی مقاوم بودن کنترلر نسبت به عدم قطعیت‌ها و عدم دقت در مدل‌سازی است، برخی پارامترها در محیط شبیه‌سازی متفاوت با پارامترهای بدست آمده از شناسایی سیستم در نظر گرفته می‌شود. برخی دیگر از پارامترها (مانند نسبت تبدیل گیربکس) ثابت هستند و عدم قطعیتی در آنها وجود ندارد. پارامترهای سیستم در شبیه‌سازی مطابق با (۵۵) است (واحدها در سیستم واحدهای SI هستند):

$$\begin{aligned} I_{xx_1} &= 0.18, I_{yy_1} = 0.2, I_{zz_1} = 0.6, m_1 = 4 \\ I_{xx_2} &= 0.04, I_{yy_2} = 0.03, I_{zz_2} = 0.015 \\ m_2 &= 2.5 \\ I_{xx_3} &= 0.008, I_{yy_3} = 0.006 \\ I_{zz_3} &= 0.018, m_3 = 4 \\ d_1 &= 0.04, d_2 = 0.075, d_3 = 0.08 \\ N &= 49, I_m = 0.0001 \\ g &= 9.8 \frac{m}{s^2}, R = 2 \\ K_t &= 0.033, K_e = 0.033 \\ b_1 &= 0.25, b_2 = 0.25, b_3 = 0.25 \end{aligned} \quad (55)$$

پارامترهای در نظر گرفته شده برای کنترلر در شبیه‌سازی عبارتند از:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 8, \eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 1 \quad (56)$$

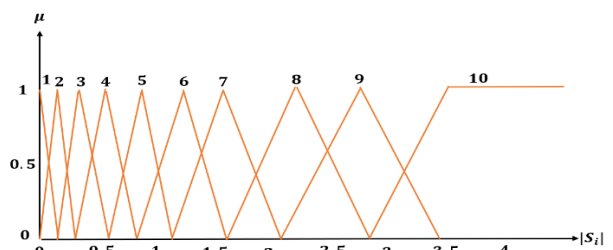
سایر پارامترهای استفاده شده در کنترلر، مانند خواص جرمی پلنت و ... همان مقادیر تقریبی بدست آمده (روابط (۵۴)) هستند. شکل‌های (۹) الی (۱۴) تعقیب زاویه مطلوب توسط هر محور در یک سناریوی شبیه‌سازی با ورودی سینوسی به هر سه محور را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که هر سه محور توانسته‌اند فرمان‌های مطلوب زاویه و سرعت زاویه‌ای را به خوبی دنبال کنند.

در روابط (۵۱) و (۵۲)، α و A_1 و A_3 بصورت زیر تعریف می‌شوند:

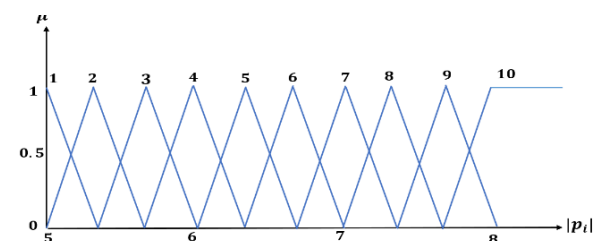
$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_{13}}{1-L_{11}} \\ -\frac{L_{31}}{1-L_{33}} & 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \left| -\hat{f}_1 + \hat{\psi}_d - \lambda_1 \hat{\psi} \right|, A_3 \\ &= \left| -\hat{f}_3 + \hat{\phi}_d - \lambda_3 \hat{\phi} \right| \end{aligned}$$

سیگنال‌های کنترل اعمالی به سیستم مطابق با روابط (۴۸) و (۴۹) می‌باشند. در تولید این سیگنال‌ها، عامل $sat(\frac{\hat{x}_i}{p_i})$ نقش دارد. هر چه p_i بزرگتر باشد، لرزش کنترلی کاهش، ولی خطای حالت ماندگار افزایش می‌یابد. در مقابل، هر چه p_i کوچکتر باشد، تابع اشباع به تابع علامت میل کرده و لرزش کنترلی افزایش، ولی خطای حالت ماندگار کاهش می‌یابد. برای ایجاد تعادل بین پدیده لرزش کنترلی و خطای ماندگار، می‌توان از یک p_i دینامیک استفاده نمود، بدین صورت که p_i بر اساس حالت‌های سیستم، در طول زمان تغییر کند. بدین منظور، وظیفه تعیین p_i در طول عملکرد شبیه‌ساز حرکت را به یک سیستم فازی می‌سپاریم. با انجام سعی و خطا، بهترین سیستم فازی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصلضرب، فازی زدای میانگین مراکز طراحی می‌شود. ورودی سیستم فازی $|s_i|$ و خروجی آن p_i است. توابع عضویت روی محور ورودی مطابق با شکل (۷) و توابع عضویت روی محور خروجی مطابق با شکل (۸) است:



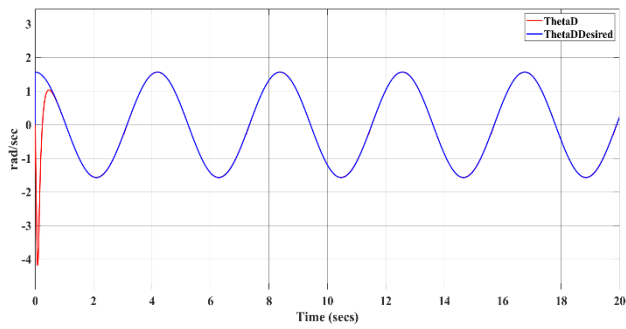
شکل ۷ توابع عضویت روی محور ورودی $|s_i|$ به منظور فازی کردن سطوح لغزش (برای هر سه درجه آزادی یکسان است)



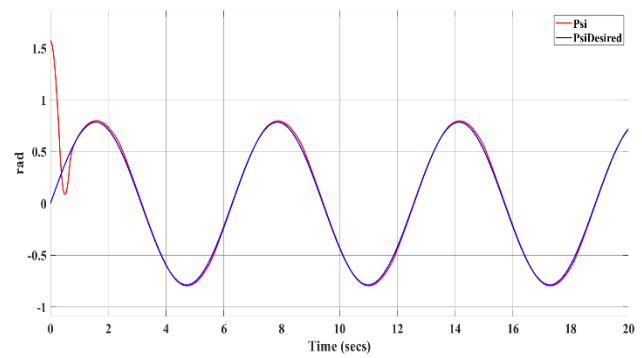
شکل ۸ توابع عضویت روی محور خروجی p_i به منظور فازی کردن سطوح لغزش (برای هر سه درجه آزادی یکسان است)

بر اساس شکل‌های (۷) و (۸)، مجموعه قوانین سیستم فازی مطابق زیر است:

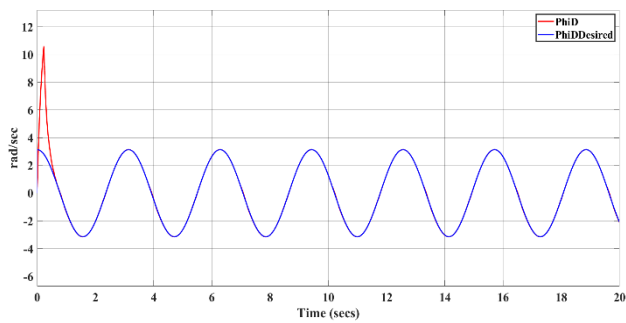
$$\text{Rule: IF } |s_i| \text{ is } \{j\} \text{ THEN } p_i \text{ is } \{j\}, i = 1,2,3, j = 1,2, \dots, 10$$



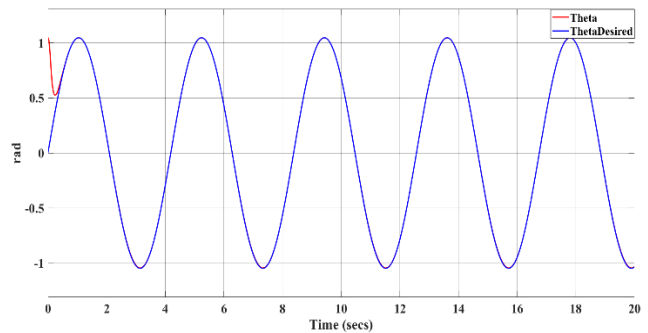
شکل ۱۳ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور فراز ($\dot{\theta}_d$) توسط محور فراز ($\dot{\theta}$) در سناریوی شبیه‌سازی



شکل ۹ تعقیب زاویه فرمان سمت (ψ_d) توسط محور سمت (ψ) در سناریوی شبیه‌سازی



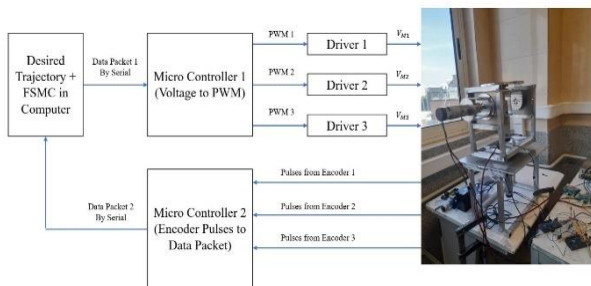
شکل ۱۴ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور چرخش ($\dot{\phi}_d$) توسط محور چرخش ($\dot{\phi}$) در سناریوی شبیه‌سازی



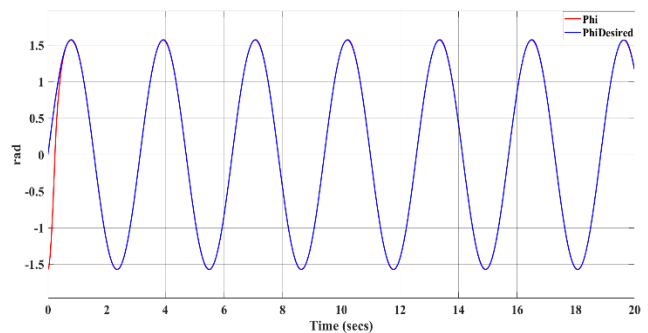
شکل ۱۰ تعقیب زاویه فرمان محور فراز (θ_d) توسط محور فراز (θ) در سناریوی شبیه‌سازی

۷- پیاده‌سازی، اصلاح کنترلر و بررسی نتایج

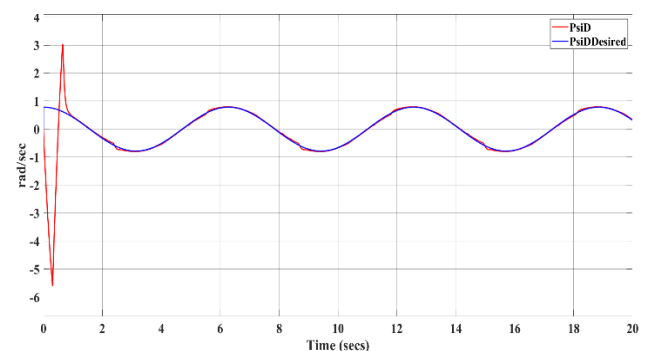
پیاده‌سازی سیستم کنترل بر اساس مراحل روش طراحی مبتنی بر مدل صورت گرفته است [۱۷]. مزیت این کار، انجام اصلاحات لازم و عیب‌یابی سیستم کنترل به صورت مرحله به مرحله است. گام اول، نمونه‌سازی سریع سامانه کنترل (RCP^1) است. هدف از نمونه‌سازی سریع سیستم کنترل، بررسی توانایی سیستم کنترل طراحی شده در کنترل سیستم واقعی و اعتبار سنجی آن است. در این مرحله، سیستم کنترل داخل کامپیوتر، شبیه‌ساز حرکت واقعی را کنترل می‌کند. شماتیک ساختار پیاده‌سازی شده در این مرحله مطابق شکل (۱۵) است:



شکل ۱۵ شماتیک تست RCP (نمونه‌سازی سریع سامانه کنترل). سیستم کنترل داخل کامپیوتر، پلنت اصلی را کنترل می‌کند.



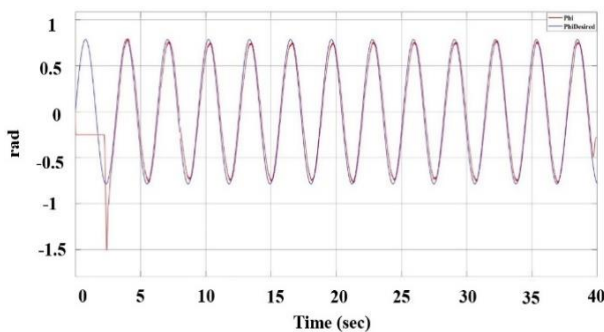
شکل ۱۱ تعقیب زاویه فرمان چرخش (ϕ_d) توسط محور چرخش (ϕ) در سناریوی شبیه‌سازی



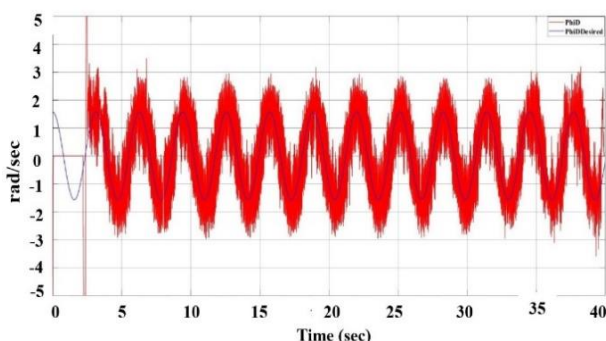
شکل ۱۲ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور سمت ($\dot{\psi}_d$) توسط محور سمت ($\dot{\psi}$) در سناریوی شبیه‌سازی

¹ Rapid Control Prototyping

اینگونه نیست و صرفاً توانایی اعمال یک سری ورودی‌ها وجود دارد و به مقادیر بین آنها دسترسی نیست. بدیهی است هرچه رزولوشن پایه‌های میکروکنترلر بالاتر باشد، هم لرزش کنترلی کمتر شده و هم دقت سیستم کنترل بالاتر خواهد رفت، اما در کار حاضر، به میکروکنترلری با رزولوشن بیشتر کاربرد دسترسی نبوده است. بنابراین باید با امکانات موجود کار کرده و با روش‌های دیگر، می‌توان پدیده لرزش را تا حد مطلوبی از بین برد. برای حل مشکل، یک سیستم فازی دیگر به سیستم کنترل طراحی شده در بخش قبل اضافه می‌گردد. ایده اصلی، تعیین حد اشباع عملگرها متناسب با فاصله حالت‌های سیستم از سطوح لغزش است. هنگامیکه حالت سیستم از سطح لغزش دور است، حدود اشباع عملگرها همان حد اشباع اصلی آنها یعنی ۲۴ ولت است، اما هر چه به سطح لغزش نزدیکتر شویم، سیستم فازی حد بالا و پایین اشباع را کاهش می‌دهد. بنابراین در نزدیکی سطح لغزش، عملگر نمی‌تواند سیگنال‌های کنترلی خیلی قوی اعمال کند و لرزش کمتر خواهد شد. با انجام سعی و خطا، بهترین سیستم فازی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصلضرب، فازی زدای میانگین مراکز و بر اساس مفهوم کلی ذکر شده طراحی می‌شود. ورودی سیستم فازی $|s_i|$ و خروجی آن ولتاژ اشباع عملگر است.



شکل ۱۶ تعقیب زاویه فرمان چرخش (ϕ_d) توسط محور چرخش (ϕ) در یک سناریو پیاده‌سازی سه محوره



شکل ۱۷ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور چرخش ($\dot{\phi}_d$) توسط محور چرخش ($\dot{\phi}$) در یک سناریو پیاده‌سازی سه محوره. لرزش کنترلی در محور چرخش کاملاً مشهود است.

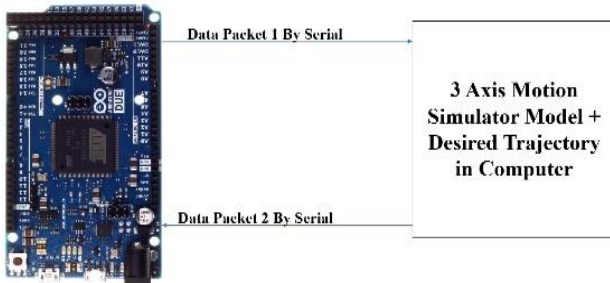
با توجه به شکل (۱۵)، کامپیوتر در هر گام کنترلی و به صورت زمان حقیقی، داده زاویه سه محور را در قالب یک بسته داده (بسته داده ۲) از خروجی سریال دریافت کرده و اگر داده درست بود، بر اساس داده دریافتی و فرمان‌های مطلوب، با انجام الگوریتم کنترل، ولتاژهای کنترلی سه گانه را محاسبه نموده و سیگنال‌های کنترل را در قالب یک بسته داده، روی خروجی پورت سریال کامپیوتر قرار می‌دهد. در این آزمایش، از دو میکروکنترلر واسط استفاده شده است. کنترل عملگرها به وسیله سیگنال^۱ PWM صورت می‌گیرد، این در حالی است که کامپیوتر توانایی تولید سیگنال PWM ندارد و فقط می‌تواند به صورت سریال داده دریافت کند یا داده بفرستد. میکروکنترلر ۱، وظیفه دریافت فرمان کنترلی از کامپیوتر و تبدیل آن به سیگنال‌های PWM مناسب را دارد. زاویه هر محور توسط انکودر افزایشی متصل به آن محور محاسبه می‌شود. خروجی انکودرها، دو پالس دارای اختلاف فاز هستند که با رمزگشایی پالس‌ها، می‌توان زاویه محورها را مشخص نمود. برای خواندن پالس‌های خروجی انکودرها سه گانه و تبدیل آن به یک بسته داده برای کامپیوتر، از میکروکنترلر شماره ۲ استفاده شده است. این میکروکنترلر با توجه به پالس‌های انکودرها و انجام محاسبات، در هر گام کنترلی، زوایای سه گانه را در قالب یک بسته داده (بسته داده شماره ۲) به کامپیوتر می‌فرستد. با نمونه‌سازی سریع سیستم کنترل بر اساس کنترل طراحی شده در بخش گذشته، مشاهده شد که سیستم می‌تواند زوایای سه گانه را به خوبی دنبال کند اما در این حالت، وجود لرزش در هنگام کارکرد سیستم مشهود است. با بررسی نمودارها، مشاهده می‌شود که لرزش، اثر خود را بیشتر در نمودار سرعت زاویه‌ای محورها نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، نتایج خروجی محور چرخش در یک سناریو شبیه‌سازی حرکت سه محوره توسط شبیه‌ساز مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۶) تعقیب زاویه مطلوب محور چرخش و شکل (۱۷)، تعقیب سرعت زاویه‌ای مطلوب محور چرخش را نشان می‌دهد.

مطابق شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، مشاهده می‌شود که محور چرخش توانسته زاویه مطلوب را به خوبی دنبال کند، اما پدیده لرزش در نمودار سرعت زاویه‌ای به وضوح قابل مشاهده است. در این حالت سوالی که به وجود می‌آید آن است که چرا در بخش شبیه‌سازی، لرزش از بین رفت اما هنگام پیاده‌سازی، لرزش همچنان وجود دارد؟ این موضوع دو علت اصلی دارد. عامل اول، نویزی بودن داده‌های سنسوری است و از آنجا که سیستم کنترل بر اساس داده‌های سنسور تصمیم می‌گیرد، این موضوع در لرزش اهمیت می‌یابد.

عامل دوم و مهمترین عامل در مسئله، رزولوشن خروجی پایه‌های میکروکنترلر است. در هنگام شبیه‌سازی، سیستم کنترل هر سیگنالی که تولید کند، قابل اعمال است، اما در واقعیت

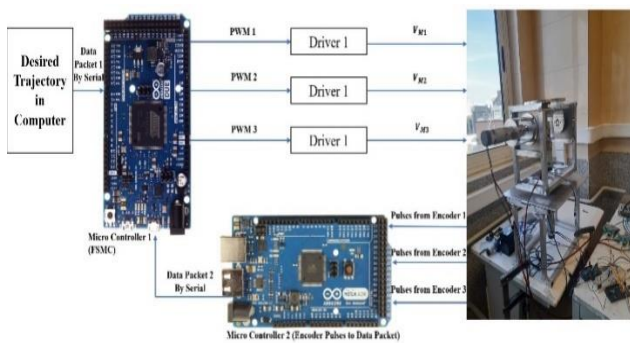
¹ Pulse Width Modulation

آزمایش سخت افزار در حلقه مورد بررسی قرار می گیرد. در این مرحله، الگوریتم کنترل داخل میکروکنترلر، وظیفه کنترل مدل سیستم داخل کامپیوتر را بر عهده دارد. شماتیک تست سخت افزار در حلقه کنترلر مطابق با شکل (۲۱) است:



شکل ۲۱ شماتیک تست سخت افزار در حلقه کنترلر

با انجام تست سخت افزار در حلقه و اطمینان از قابلیت میکروکنترلر در پیاده سازی زمان حقیقی الگوریتم کنترلی، نوبت به پیاده سازی نهایی می رسد. شکل (۲۲) شماتیک پیاده سازی نهایی را نشان می دهد:

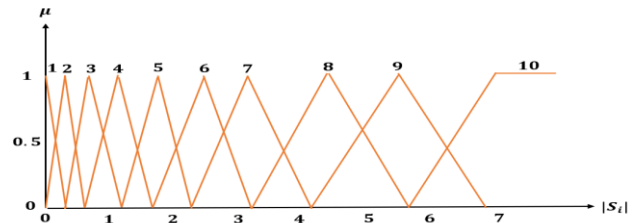


شکل ۲۲ شماتیک پیاده سازی نهایی

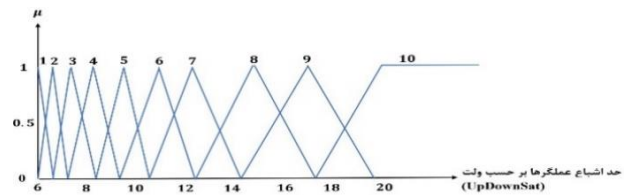
مطابق با شکل (۲۲)، وظیفه کنترل سیستم بر عهده میکروکنترلر ۱ و وظیفه رمزگشایی پالس های انکودرها بر عهده میکروکنترلر شماره ۲ است. در هنگام شروع به کار ربات، قابها به آرامی در جهت ساعتگرد حرکت می کنند تا به مکان اولیه خود برسند. با رسیدن هر قاب به مکان اولیه خود، سنسور مربوط به آن قاب یک سیگنال برای کنترلر صادر می کند و سپس هر سه قاب کنترلر آماده اجرای فرامین است. در هر گام کنترلی (۴ میلی ثانیه)، میکروکنترلر ۱ مقادیر فرمان مطلوب را از کامپیوتر و مقادیر زوایای سه گانه را از میکروکنترلر شماره ۲ دریافت می کند. سپس کنترلر، با انجام پردازش کنترلی، سیگنال های کنترل مناسب را صادر می کند.

شکل های (۲۳) الی (۲۸)، نتایج پیاده سازی سیستم کنترل در یک سناریوی حرکت سه محوره را نشان می دهند. مشاهده می شود متغیرهای حالت سیستم توانسته اند به خوبی فرمان های مطلوب را دنبال کنند.

توابع عضویت روی محور ورودی مطابق با شکل (۱۸) و توابع عضویت روی محور خروجی مطابق با شکل (۱۹) است.



شکل ۱۸ توابع عضویت روی محور ورودی $|S_i|$ به منظور فازی کردن حد اشباع عملگرهای هر سه محور

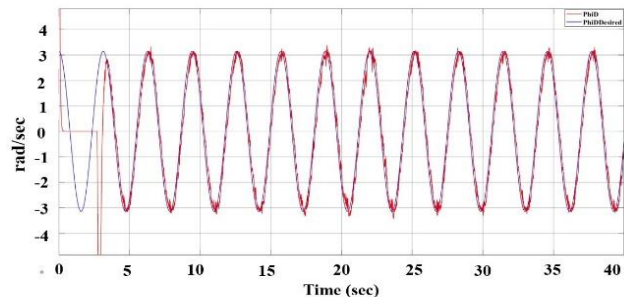


شکل ۱۹ توابع عضویت روی محور خروجی حدود اشباع به منظور فازی کردن حد اشباع عملگرهای هر سه محور

بر اساس شکل های (۱۸) و (۱۹)، مجموعه قوانین سیستم فازی مطابق زیر است:

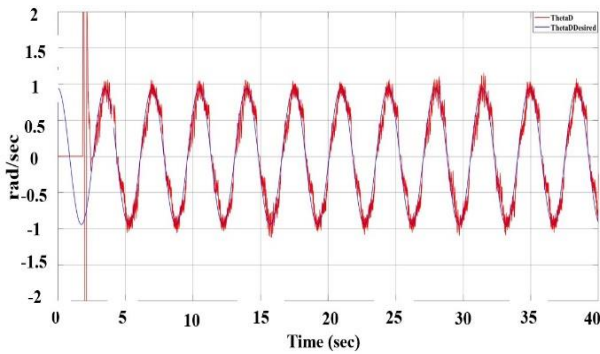
$$\text{Rulej: IF } |s_i| \text{ is } \{j\} \text{ THEN UpDownSat}_i \text{ is } \{j\}, i = 1,2,3, j = 1,2, \dots, 10$$

شکل (۲۰) تعقیب سرعت زاویه ای محور چرخش را با اضافه کردن سیستم فازی بالا، در یک سناریوی شبیه سازی سه محوره نشان می دهد. مقایسه شکل (۲۰) با شکل (۱۷) نشان می دهد لرزش کنترلی در نمودارهای سرعت بسیار کمتر شده است:

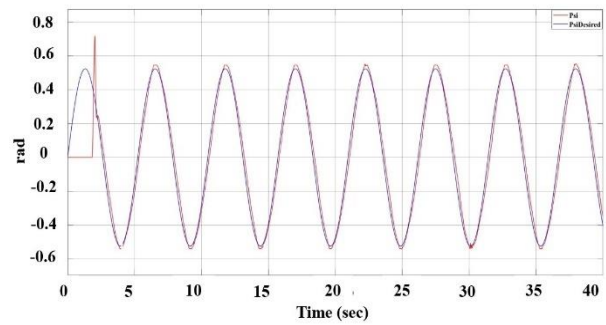


شکل ۲۰ تعقیب سرعت زاویه ای فرمان محور چرخش $(\dot{\phi}_d)$ توسط محور چرخش $(\dot{\phi})$ در تست RCP

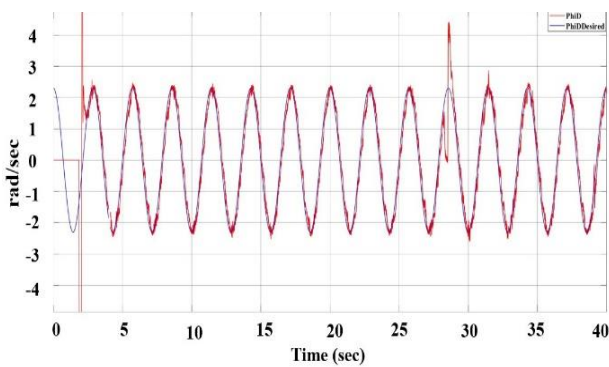
گام بعدی پیاده سازی بر اساس مراحل روش طراحی مبتنی بر مدل، تست سخت افزار در حلقه کنترلر است. برای صحت-سنجی کد تولید شده برای میکروکنترلر توسط کامپیوتر و اطمینان از عملکرد میکروکنترلر در اجرای صحیح الگوریتم کنترلی به صورت زمان حقیقی، عملکرد میکروکنترلر در یک



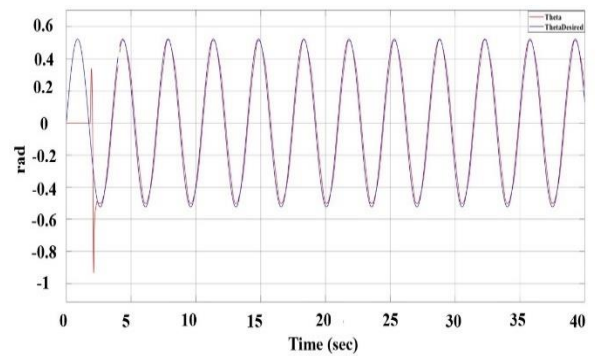
شکل ۲۷ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور فراز ($\dot{\theta}_d$) توسط محور فراز ($\dot{\theta}$) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی



شکل ۲۳ تعقیب زاویه فرمان سمت (ψ_d) توسط محور سمت (ψ) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی



شکل ۲۸ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور چرخش ($\dot{\phi}_d$) توسط محور چرخش ($\dot{\phi}$) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی

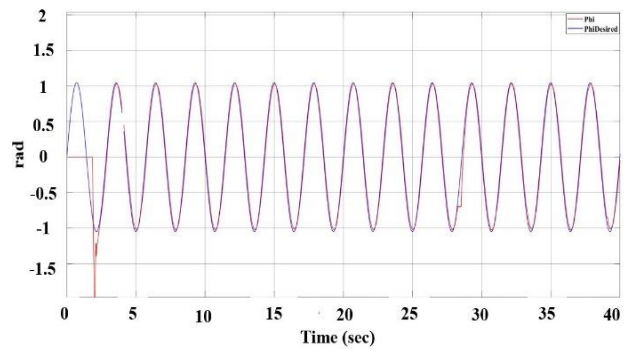


شکل ۲۴ تعقیب زاویه فرمان فراز (θ_d) توسط محور فراز (θ) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی

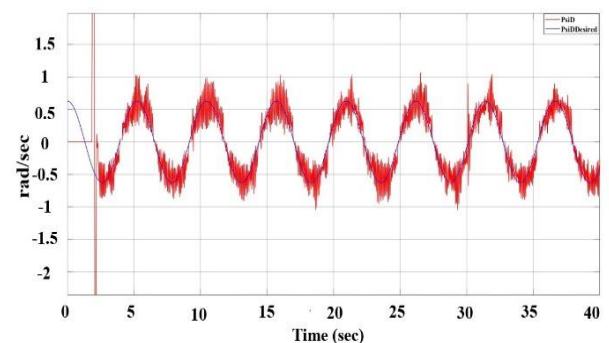
۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به طراحی و پیاده‌سازی یک ساختار کنترل مقاوم تطبیقی برای یک شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی ساخته شده در آزمایشگاه مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های هوشمند دانشگاه صنعتی شریف، برای کاربردهای سخت افزار در حلقه، پرداخته شد. بدین منظور ابتدا سیستم ساخته شده معرفی گردیده و مجموعه معادلات الکترومکانیکی حاکم بر آن استخراج شد. در ادامه، یک کنترلر مد لغزشی با سطح لغزش تطبیقی فازی برای سیستم طراحی شد.

با انجام شبیه‌سازی‌ها، مشاهده شد که سیستم بدون لرزش، می‌تواند مسیر مطلوب را دنبال کند. در مرحله پیاده‌سازی، مشاهده شد که لرزش همچنان وجود دارد. لرزش کنترلی چند علت داشت که مهمترین عامل آن، بحث‌های سخت افزاری است. از آنجاییکه تغییر سخت افزار امکان‌پذیر نبود، سعی شد با انجام تغییراتی در ساختار سیستم کنترل، لرزش بهبود یابد. بدین منظور، یک سیستم فازی برای تعیین حدود اشباع عملگرهای سه گانه سیستم طراحی شد. با اضافه کردن این سیستم فازی، مشاهده شد که عملکرد سیستم به طرز محسوسی بهتر شده است. در انتها نتایج پیاده‌سازی و عملکرد مطلوب کنترلر در دنبال کردن فرمان‌ها مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲۵ تعقیب زاویه فرمان چرخش (ϕ_d) توسط محور چرخش (ϕ) در سناریوی پیاده‌سازی



شکل ۲۶ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور سمت ($\dot{\psi}_d$) توسط محور سمت ($\dot{\psi}$) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی

- [9] Y. Xie, D.M. Vilathgamuwa, T. King-Jet, Robust adaptive control of a three-axis motion Simulator with state observers, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 10(4) (2005) 437-448, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2005.852499>.
- [10] W. Feng, X. Zhang, Controller Design for Three-Axis Stabilized Platform Using Adaptive Global Fast Terminal Sliding Mode Control with Non-Linear Differentiator, *Energies* 14(20) (2021), <https://doi.org/10.3390/en14206532>.
- [11] H. Saputra, A. Nurhakim, S. Utomo, Position Control of 1-DOF High-Precision Rotary Table using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Controller, *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 7(2), (2019), 511-523, <https://doi.org/10.24003/emitter.v7i2.399>.
- [12] M. Zarei, M. Arvan, A. Vali, F. Behazin, Back-stepping sliding mode control of one degree of freedom flight motion table, *Asian Journal of Control* 22(4) (2020) 1700-1713, <https://doi.org/10.1002/asjc.2085>.
- [13] D. Haibin, W. Daobo, Y. Xiufen, Realization of nonlinear PID with feed-forward controller for 3-DOF flight simulator and hardware-in-the-loop simulation, *Journal of Systems Engineering and Electronics* 19(2) (2008) 342-345, <https://doi.org/10.1002/asjc.2085>.
- [14] C. Yu *et al*, Research on High Precision Permanent Magnet Servo Control System of Airborne Stable Platform, 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2020, pp. 413-416, <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141862>.
- [15] Xiangyang Liu, Jianliang Mao, Jun Yang, Shihua Li, Kaifeng Yang, Robust predictive visual servoing control for an inertially stabilized platform with uncertain kinematics, *ISA Transactions*, Volume 114, 2021, Pages 347-358, ISSN 0019-0578, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.039>.
- [16] Li, B.; Xie, X.; Liao, Y.; Fan, D. Research on High-Precision Dynamic Modeling and Performance Evaluation of Inertially Stabilized Platforms. *Appl. Sci.* 2024, 14, 6074, <https://doi.org/10.3390/app14146074>.
- [17] M. Alras, P. Caspi, A. Girault, P. Raymond, Model-Based Design of Embedded Control Systems by Means of a Synchronous Intermediate Model, 2009 International Conference on Embedded Software and Systems, 2009, pp. 3-10, <https://doi.org/10.1109/ICSS.2009.36>.
- [1] M.C. John, E.W. Kenneth, History of flight motion simulators used for hardware-in-the-loop testing of missile systems, *Proc.SPIE*, 1998, <https://doi.org/10.1117/12.316388>.
- [2] H. Dong, X. Yang, H. Gao and X. Yu, "Practical Terminal Sliding-Mode Control and Its Applications in Servo Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 1, pp. 752-761, Jan. 2023, <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3152018>.
- [3] M. Dorosti, J. Nobari, Kinematic and dynamic analysis of 3-DOF Rotary Table manipulator, *Control and Decision Conference*, 2009, <https://doi.org/10.1109/CCDC.2009.5195224>.
- [4] G. Singh, M.P. Nandakumar, S. Ashok, Adaptive Fuzzy-PID and Neural Network Based Object Tracking Using a 3-Axis Platform, 2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH), 2016, pp. 1012-1017, <https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.7569402>.
- [5] X. Zhang, Y. Zhao, K. Guo, G. Li, N. Deng, An Adaptive B-Spline Neural Network and Its Application in Terminal Sliding Mode Control for a Mobile Satcom Antenna Inertially Stabilized Platform, *Sensors* 17(5) (2017), <https://doi.org/10.3390/s17050978>.
- [6] Zunfeng Du, Xiangyu Chen, Qingwei Zhang, Yuan Yang, An extended state observer-based sliding mode control method for hydraulic servo system of marine stabilized platforms, *Ocean Engineering*, Volume 279, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114386>.
- [7] Mingzhe Zhao, Hengxiang He, A method for improving the tracking accuracy of photoelectric stabilized platform, *Proc. SPIE* 13231, 4th International Conference on Laser, Optics, and Optoelectronic Technology (LOPET 2024), 1323123 (16 August 2024), <https://doi.org/10.1117/12.3040304>.
- [8] Y. Xie, M. Vilathgamuwa, K.J. Tseng, N. Nagarajan, Modeling and robust adaptive control of a 3-axis motion simulator, *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, 2001, pp. 553-560 vol.551, <https://doi.org/10.1109/IAS.2001.955475>.

تأمین بار حرارتی و برودتی ساختمان ها به کمک انواع سامانه های ترکیبی با مبدل زمین به هوا

چکیده: به دلیل افزایش و رشد ناگهانی جمعیت، تقاضای انرژی جهانی بالا رفته است. بنابراین تمایل به استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر نیز افزایش یافته است. یکی از راه های کاهش مصرف انرژی، استفاده از انرژی زمین گرمایی کم عمق بوده که در فصول گرم با عبور هوای محیط از لوله های مدفون در عمقی از خاک می توان هوای ورودی به ساختمان را سرد یا پیش سرد و در فصول سرد نیز می توان آن را گرم یا پیش گرم کرد. با توجه به اینکه این سامانه در بسیاری از موارد جوابگوی بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان نیست به همین دلیل می توان این سامانه را به صورت ترکیبی با دیگر سیستم های حرارتی استفاده کرد. در این مقاله آخرین تحقیقات و پیشرفت های انجام شده بر روی سامانه های ترکیبی مبدل حرارتی زمین به هوا با هواساز، پمپ زمین گرمایی هوایی، بازیاب حرارتی، سیستم سرمایش تبخیری، بادگیر، سقف گنبدی، سیستم سرمایش دسیکنت، سیستم های فتوولتائیک/ فتوولتائیک حرارتی، هواکش خورشیدی و مواد تغییر فازدهنده بررسی شده است. بررسی نتایج این تحقیقات نشان می دهد که به کار بردن مبدل حرارتی زمین به هوا با سایر سیستم های فعال و غیرفعال می تواند کارایی حرارتی کلی سامانه ترکیبی را نسبت به استفاده از مبدل حرارتی در حالت تکی به صورت محسوسی افزایش دهد.

واژه های راهنما: مبدل حرارتی زمین به هوا، سامانه های ترکیبی، پیش گرم / پیش سرد کردن هوا، مصرف انرژی، انرژی زمین گرمایی

علی علیخانی
کارشناسی ارشد

مهدی معرفت*

استاد،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس،
تهران

عسگر مینایی

دانشیار،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه محقق اردبیلی،
اردبیل

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

Ali Alikhani
M.Sc.

Mehdi Maerefat*

Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Tarbiat
Modares University,
Tehran

Asgar Minaei

Associate Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, University
of Mohaghegh Ardabili,
Ardabil

Providing heating and cooling loads using of various hybrid systems with Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE)

Abstract: Due to growth of the population, the global energy demand has increased drastically. Therefore, the desire to use renewable energy sources has also increased. One of the ways to reduce energy consumption is to use shallow geothermal energy. In the hot seasons of the year, the inlet air of the building can be cooled/pre-cooled by passing the warm ambient air through the tubes, tunnels or channels buried deep in the soil, where the soil temperature is lower than the ambient air, and in the cold seasons, it can be heated/preheated. This system in many cases does not respond to the cooling and heating load of the building, therefore, this system can be used in combination with other thermal systems. The latest researches and developments on the hybrid systems of earth-to-air heat exchanger (EAHE) with air handling unit, air geothermal heat pump, heat recovery, evaporative cooling system, wind tower, dome roof, desiccant cooling system, solar chimney photovoltaic/thermal photovoltaic systems, solar air heating and phase change materials have been investigated. Studying the results shows that using these hybrid systems can significantly increase the overall thermal efficiency of the system compared to using the EAHE in a single mode.

Keywords: Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE), Hybrid systems, Preheating/Precooling of air, Energy consumption, Geothermal energy

۱- مقدمه

کلی سامانه ترکیبی را افزایش می‌دهد، همچنین می‌تواند مصرف انرژی مورد نیاز برای تهویه مطبوع ساختمان‌ها را نیز کاهش دهد [۶]. محققین در سال‌های اخیر بسیاری از این نوع سیستم‌ها را با یکدیگر ترکیب نمودند با این حال مطالعات بیشتری برای شناخت پارامترهای طراحی بهینه، عملکرد و کارایی حرارتی این نوع سامانه‌های ترکیبی مورد نیاز است.

۲-۱- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - هواساز^۴

مبدل حرارتی زمین به هوا می‌تواند با هواسازها ترکیب گردد و علاوه بر پیش سرد/پیش گرم کردن هوای ورودی به هواسازها به بهبود رطوبت‌زدایی در اقلیم‌های گرم و مرطوب کمک کند؛ زیرا با استفاده از این سامانه ترکیبی در مقایسه با روش‌های مرسوم افزایش رطوبت‌زدایی^۵ که شامل افزایش ظرفیت سرمایشی سپس افزودن بازگرمایش است، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که این سامانه ترکیبی برای گرمایش ۶۰-۷۰ درصد و برای سرمایش ۴۰-۵۵ درصد توان حرارتی کویل‌های هواساز را کاهش می‌دهد [۷].

۲-۲- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - پمپ زمین گرمایی هوایی^۶

پمپ زمین گرمایی هوایی را می‌توان با جابه‌جایی کندانسور و اواپراتور^۷ با توجه به نیاز حرارتی سرمایشی و گرمایشی استفاده نمود. از جمله کاربرد پمپ‌های زمین گرمایی هوایی می‌توان به سرد و گرم کردن هوای محیط داخل مانند کولر گازی اشاره نمود [۸]. تا سال ۲۰۵۰ تعداد کولر گازی رشدی حدود ۲۵۰ درصدی خواهند داشت که منجر به افزایش ۳۰۰ تا ۴۰۰ درصدی تقاضای مصرف انرژی می‌گردد [۵]. با توجه به شکل (۱)، در اثر تبادل حرارتی بین هوای خنک شده خروجی از لوله مبدل حرارتی زمین به هوا و بخش‌های کندانسور و کمپرسور کولر گازی دمای قسمت کندانسور کاهش و نسبت فشار در کمپرسور نیز به دلیل خنک شدن هوای اطراف آن، افزایش می‌یابد و در نهایت ظرفیت سرمایشی کلی سامانه ترکیبی افزایش می‌یابد. مطالعات انجام شده پیرامون این سامانه ترکیبی نشان می‌دهد که به کارگیری مبدل حرارتی می‌تواند ۱۸ درصد از توان الکتریکی مصرفی کمپرسور را کاهش دهد [۹]. مطالعات محققین نشان می‌دهد

کمبود منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و سوخت‌های فسیلی و تغییرات اقلیم آب و هوایی به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای موضوعات اصلی نگران‌کننده جهان امروز می‌باشد [۱]. ساختمان‌ها در مجموع به ترتیب حدود ۳۶ درصد از کل مصرف انرژی جهان و ۳۹ درصد از تولید گاز کربن دی‌اکسید را تشکیل می‌دهند [۲]. بنابراین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند مصرف سوخت‌های فسیلی و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. انرژی زمین گرمایی گونه‌ای از انرژی تجدیدپذیر و فراوانی است که محدود به فصل و زمان و مکان خاصی نیست و می‌تواند برای پیش سرمایش/سرمایش و پیش گرمایش/گرمایش هوای ورودی به ساختمان‌ها استفاده شود [۳]. یکی از راه‌های بهره‌مندی از انرژی زمین گرمایی کم عمق^۱ استفاده از سامانه مبدل‌های حرارتی زمین به هوا^۲ است. این نوع سامانه‌ها از لوله‌ها، تونل‌ها و کانال‌هایی تشکیل شده‌اند که در عمق حدود ۵-۱ متری از سطح زمین دفن می‌شوند. به دلیل اینرسی و ظرفیت حرارتی بالای خاک، دمای آن نسبت به دمای هوای محیط بیرون دارای تأخیر زمانی بوده و در زیر سطح زمین نسبت به هوای محیط در تابستان خنک‌تر و در زمستان گرم‌تر است [۴]. این نوع سامانه‌ها با به‌کارگیری فن (دمنده) و یا به‌طور طبیعی، جریان هوا در داخل لوله مدفون را به گردش درآورده و به دلیل اختلاف دمای موجود بین خاک اطراف لوله و جریان هوا، باعث تبادل حرارتی و در نهایت ایجاد هوای مطبوع برای محیط کاربر می‌گردد. به طوریکه دمای هوای خروجی از مبدل در فصول گرم، خنک‌تر و در فصول سرد، گرم‌تر از هوای محیط می‌شود [۵]. به دلیل اینکه این نوع سامانه ممکن است به تنهایی نتواند بار سرمایشی/گرمایشی ساختمان را تأمین کند، بهتر است با دیگر سیستم‌های حرارتی ترکیب شود.

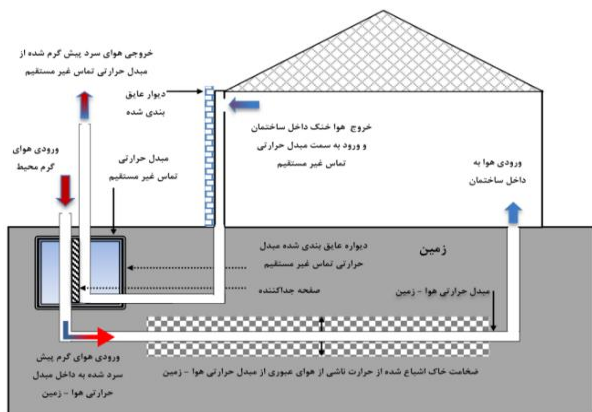
در این مقاله سعی شده است که مهم‌ترین و جدیدترین سامانه‌های ترکیبی با مبدل حرارتی زمین به هوا معرفی شود.

۲- سامانه‌های ترکیبی با مبدل حرارتی زمین به هوا

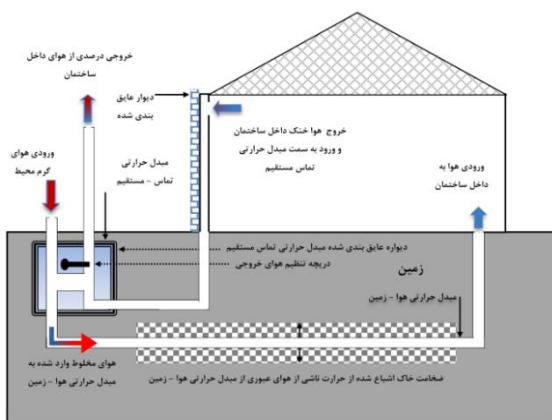
یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده مبدل حرارتی زمین به هوا قابلیت ترکیب با انواع سیستم‌های فعال و غیرفعال^۳ می‌باشد. استفاده از این نوع مبدل‌های حرارتی کارایی و عملکرد حرارتی

⁵ Dehumidification⁶ Air Source Heat Pump (ASHP)⁷ Evaporator¹ Shallow Geothermal System (SGS)² Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE)³ Passive and Active systems⁴ Air Handling Unit (AHU)

در این نوع سامانه‌های ترکیبی لوله‌های زمینی در قسمت بالادست به بازیاب حرارتی متصل می‌گردد و با پیش گرم و پیش سرد کردن هوا در نهایت هوای مطبوع وارد محیط کاربر می‌گردد. بازیاب‌های حرارتی به دو دسته بازیاب‌های تماس مستقیم و غیرمستقیم^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۲]. در بازیاب‌های تماس غیرمستقیم با توجه به شکل شماتیک (۳) هیچ تماس مستقیمی بین سیال سرد و گرم اتفاق نمی‌افتد و به جای خروج و هدررفت هوای خنک داخل ساختمان از در و پنجره‌های داخلی، جریان هوا به سمت مبدل حرارتی هدایت می‌گردد. در حالی که در حالت تماس مستقیم سیال سرد و گرم با یکدیگر تماس پیدا کرده و هوای محیط کاربر با درصد مشخصی از هوای تازه مخلوط و سپس هوای ترکیب شده که دمای آن چندین درجه کاهش یافته به داخل لوله‌های مبدل زمین به هوا هدایت و در نهایت مجدد وارد محیط کاربر می‌گردد که شماتیک آن در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۳].

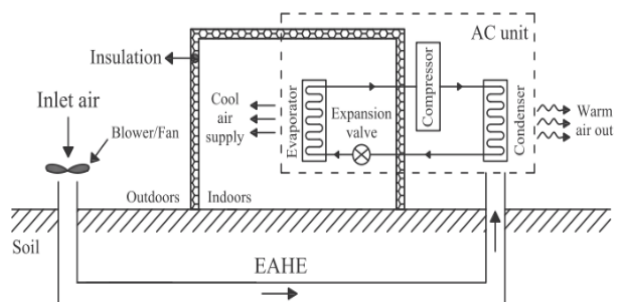


شکل ۳ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بازیاب حرارتی غیرمستقیم در فصل تابستان [۱۳]

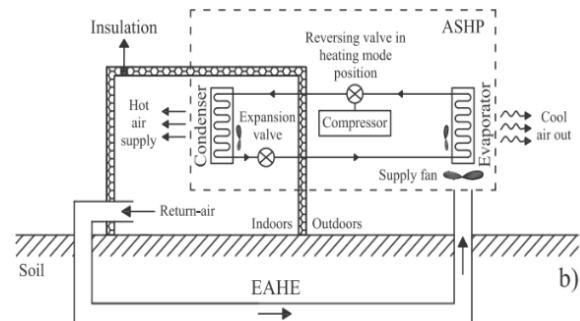


شکل ۴ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بازیاب حرارتی مستقیم در فصل تابستان [۱۳]

که به کارگیری این نوع سیستم ترکیبی می‌تواند به ترتیب ۹/۶ و ۱۳/۸ درصد از مصرف انرژی سرمایشی سالانه محیط کاربر را برای شهرهای هوستون و دالاس آمریکا کاهش دهد [۱۰]. همچنین می‌توان از پمپ حرارتی هوا به آب با انتقال حرارت از هوا به سیال آب به ترتیب آب گرم مصرفی (دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس برای سیستم‌های گرمایش از کف و فن کویل) و آب سرد مصرفی (دمای ۶ درجه سلسیوس برای چیلر) را در فصول زمستان و تابستان تأمین کرد [۸]. با توجه به شکل‌های شماتیک (۲) این سامانه ترکیبی را می‌توان در فصول زمستان برای گرم نمودن هوای داخل ساختمان نیز استفاده نمود.



شکل ۱ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - کولر گازی در فصل تابستان [۵]



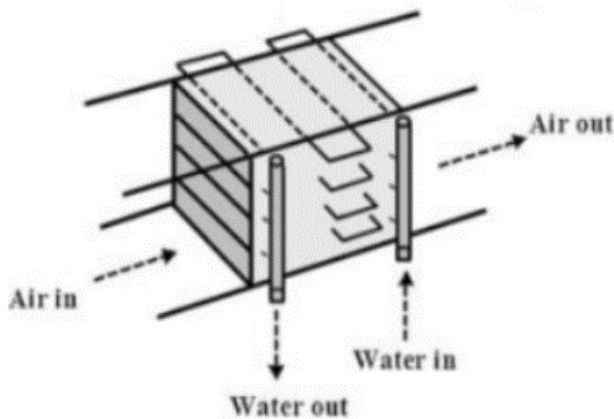
شکل ۲ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - پمپ زمین گرمایی هوایی در فصل زمستان [۵]

۲-۳- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بازیاب حرارتی^۱

بازیاب‌های حرارتی یکی از نوین‌ترین سیستم‌های تهویه مطبوعی است که برای بخشی از انرژی از دست رفته در اثر تهویه هوای داخل محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. به طور کلی بازیاب‌ها نوعی از مبدل‌های حرارتی هستند که از فن و کانال‌های مکش و دمش (تخلیه) تشکیل شده‌اند.

² Direct/Indirect Heat Recovery Unit

¹ Heat Recovery Unit (HRU)



شکل ۶ شماتیک نمونه‌ای از سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۸]

در سامانه ترکیبی مبدل حرارتی زمین به هوا - تبخیری غیرمستقیم از مبدل حرارتی تشکیل شده که دو گذرگاه عمود بر هم داشته و هوا در یکی از گذرگاه‌ها به صورت جداگانه عبور می‌کند؛ به طوری که هوای پیش سرد شده خروجی از لوله مبدل زمین به هوا به صورت غیرمستقیم در تماس با گذرگاهی که با اسپری کردن آب در بالای لوله مبدل قرار دارد خنک شده و یا هوا با لوله‌های سرد آب تماس پیدا کرده و دمای آن را کاهش می‌دهد. یکی از مزیت‌های این سیستم نسبت به خنک‌کننده‌های مستقیم کاهش حدود ۴۵ درصد مصرف آب می‌باشد همچنین این نوع سیستم می‌تواند حدود ۶۲ درصد از مصرف انرژی سالیانه محیط کاربر را کاهش دهد [۱۹].

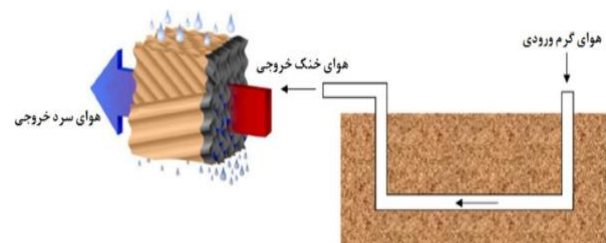
۲-۵- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - سیستم سرمایش دسیکنت^۴

یکی از سیستم‌های جدید و نوین، ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا با سیستم سرمایش دسیکنت برای تأمین بار سرمایشی در مناطق گرم و مرطوب می‌باشد. در این نوع خنک‌کننده‌ها، هوا رطوبت‌گیری شده و سپس در حد قابل قبول به وسیله سیستم-های تبخیری سرد می‌گردد. مواد خشک کن رطوبت هوا را تا جایی که با هوا به تعادل رطوبتی برسند، از آن جذب می‌کنند. رطوبت جذب شده توسط ماده خشک کن را می‌توان با گرم کردن و قرار دادن آن در معرض جریان هوای احیا کننده^۵ از ماده خشک کن حذف کرد تا بتواند دوباره رطوبت را جذب کرد [۲۰]. همان‌طور که شکل شماتیک (۷) مشخص است، در ابتدا هوای محیط وارد چرخ دسیکنت می‌شود که در آن رطوبت مخصوص

در برخی موارد در بازتاب حرارتی از یک دریچه استفاده می‌شود که می‌تواند جهت مسیر جریان هوای خروجی تنظیم شود که به آن دریچه کنارگذر^۱ گفته می‌شود [۱۴] و هوای خروجی از محیط می‌تواند با تنظیم این شیر به انتهای مبدل و یا به هوای محیط بیرون تخلیه گردد.

۲-۴- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - سیستم‌های سرمایش تبخیری^۲

اساس سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری بدین صورت است که قطرات آب با دریافت گرما و حرارت به بخار تبدیل شده و با کاهش دمای هوا آن را خنک می‌سازد. این نوع سیستم‌ها به طور کلی به دو دسته تبخیری مستقیم و غیر مستقیم^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۵]. عملکرد سامانه ترکیبی مبدل زمین به هوا و سرمایش تبخیر مستقیم که در شکل (۵) شماتیکی از آن ترسیم شده، بر این اساس است که هوای گرم محیط در ابتدای لوله به داخل مبدل حرارتی زمین به هوا وارد می‌شود و در اثر تبادل حرارتی بین خاک اطراف لوله و هوای گرم قسمتی از حرارت خود را به خاک می‌دهد و از این طریق پیش سرد می‌شود. سپس این هوای پیش سرد شده با ورود به خنک‌کننده تبخیری مستقیم که در شکل (۶) مشخص است، با استفاده از مفاهیم انتقال جرم و حرارت و تماس غیرمستقیم با لوله‌های آب علاوه بر افزایش رطوبت، دچار کاهش دما می‌شود. تحقیقات انجام شده بر روی این نوع سامانه ترکیبی نشان می‌دهد که راندمان آن در مقایسه با سامانه سرمایش تبخیری مستقیم به صورت تنها مانند کولر آبی حدود ۴۵ درصد بیشتر است [۱۶]. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این نوع سیستم ترکیبی نسبت به لوله‌های مبدل زمین به هوای خشک می‌تواند تا ۹۳/۵ درصد از طول مبدل زمین به هوا بکاهد [۱۷].



شکل ۵ شماتیک ترکیب مبدل زمین به هوا- سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۶]

² Desiccant Cooling System (DCS)

³ Regeneration Air Stream

³ Bypass valve

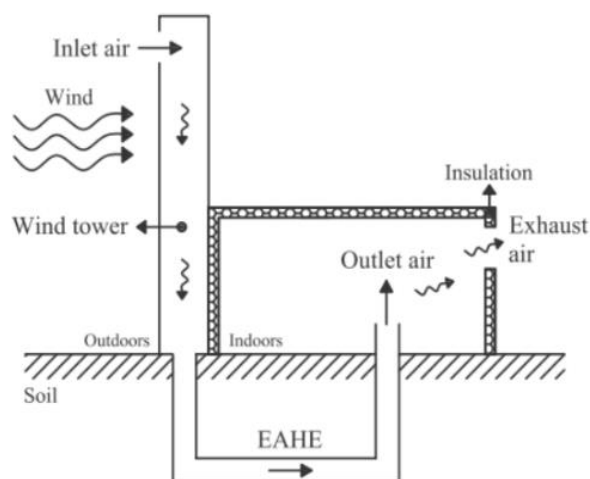
⁴ Evaporation Cooling systems (ECS)

¹ Direct/Indirect Evaporation Cooling (DEC/IDEC)

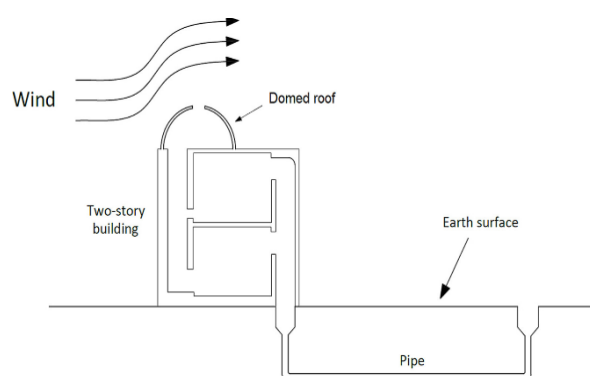
افزایش راندمان این نوع سامانه‌های ترکیبی می‌توان آن را با سیستم‌های سرمایش تبخیری نیز ترکیب نمود [۵]. در ارائه نتایج تحقیقات انجام شده بر روی این سامانه‌های ترکیبی (ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بادگیر - سرمایش تبخیری) تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد دمای هوای محیط بیرون را کاهش و ۲۳ درصد به رطوبت نسبی آن اضافه شده است [۲۲].

۲-۷- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - سقف گنبدی^۳

می‌توان این نوع مبدل‌ها را با سقف گنبدی که معمولاً در سقف بازارها و مساجد قدیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد ترکیب نمود. بدین صورت که با عبور هوا از روی سطح منحنی (نیم‌کره) سرعت هوا در بالاترین نقطه منحنی به حداکثر مقدار می‌رسد و در مقابل فشار آن کاهش می‌یابد. در اثر این اختلاف فشار هوای بالا و پایین، هوا از دریچه بالا سقف گنبدی خارج می‌گردد که در شکل شماتیک (۹) قابل مشاهده است [۲۳].

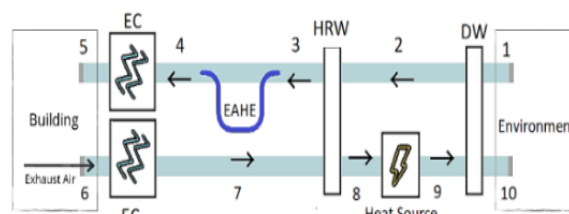


شکل ۸ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بادگیر [۵]



شکل ۹ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - سقف گنبدی [۲۳]

هوا کاهش می‌یابد. سپس هوا از چرخ احیای حرارتی عبور می‌کند و دمای آن با نسبت رطوبت ثابت کاهش می‌یابد. پس از آن هوا وارد مبدل حرارتی زمین به هوا شده و پیش سرد گردیده و وارد کولر آبی (نوعی از سیستم سرمایش تبخیری مستقیم) شده و در نهایت به محیط کاربر می‌رسد. هوای برگشتی در کولر دوم خنک شده و وارد چرخ احیای حرارتی شده و دمای آن طی یک فرایند نسبت رطوبت ثابت افزایش می‌گردد. سپس وارد گرمکن شده و دمای آن تا دمای احیای چرخ دسیکنت افزایش و وارد چرخ دسیکنت شده و مواد جاذب را تقویت می‌کند، در نهایت نیز این هوا به محیط بیرون هدایت می‌شود [۲۱]. مطالعه مینایی و همکاران نشان می‌دهد این نوع سامانه ترکیبی می‌تواند دمای هوای ورود به اتاق را $5/3$ درجه سلسیوس نسبت به کولر آبی به تنهایی کاهش دهد.



شکل ۷ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - سیستم سرمایش دسیکنت [۲۱]

۲-۶- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بادگیر^۱

با توجه به شکل شماتیک (۸) در این نوع سیستم ترکیبی، مبدل حرارتی زمین به هوا به بادگیر متصل می‌گردد. از جمله مزیت‌های این سیستم این است که هوای داخل ساختمان به‌طور طبیعی^۲ و غیرفعال خنک و تهویه می‌شود همچنین هزینه نگه داری آن کم و نصب آن نیز ساده می‌باشد. بر این اساس که با اثر شناوری و ایجاد فشار مثبت در ورودی بادگیر و خروجی اتاق‌ها هوا به داخل ساختمان مکیده می‌شود. در طی روز هوای گرم و خشک ورودی به بادگیر با دیواره‌های خنک که در شب قبل خنک شده‌اند تماس پیدا کرده و پیش سرد شده و وارد مبدل حرارتی زمین به هوا می‌شوند و در نهایت وارد محیط کاربر می‌گردد. از آنجایی که هوای سرد و خنک سنگین و چگال‌تر می‌باشد به طرف پایین حرکت کرده و پس از گرم شدن به بالا حرکت می‌کند. این هوای گرم محیط را می‌توان با استفاده از دریچه‌های تخلیه هوا، هواکش خورشیدی و ... خارج نمود. برای

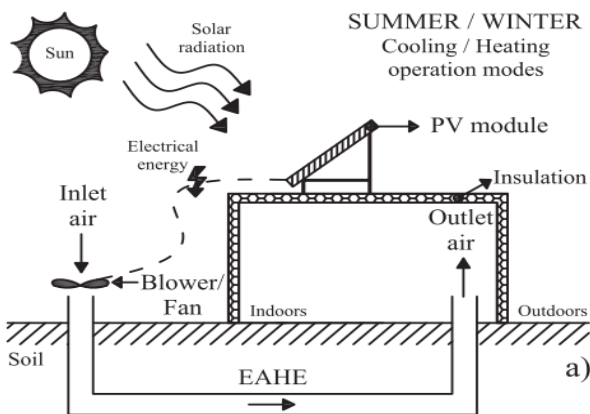
¹ Wind tower/Wind catcher

³ Dome roof

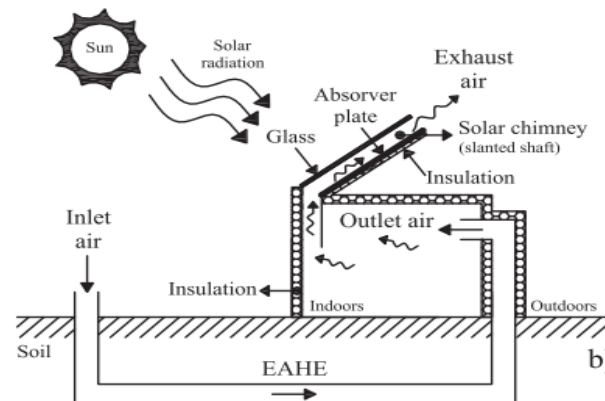
⁴ Solar chimney

۲-۸- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - هواکش خورشیدی^۱

در این روش که شماتیکی از آن در شکل (۱۰) رسم شده است. با ترکیب مبدل زمین به هوا با هواکش خورشیدی برای تأمین آسایش حرارتی، تهویه طبیعی ایجاد شده و سرمایه‌های حاصل می‌گردد. در این سامانه انرژی ناشی از حرارت خورشیدی سبب گرم شدن هوای داخل هواکش و متعاقباً کاهش چگالی آن می‌شود. سپس با توجه به اثر نیروی شناوری ناشی از تفاوت چگالی میان هوای داخل و خارج هواکش، هوای داخل اتاق به درون هواکش کشیده شده و در نتیجه عبور هوا به داخل لوله مبدل حرارتی زمین به هوا می‌گردد. برای ایجاد مکش طبیعی در هواکش خورشیدی از یک دیواره با شیشه مشرف به جنوب و دیوارهای فلزی و تیره رنگ به عنوان سطح جذب حرارت برای جذب تشعشع خورشید می‌شود. همچنین پشت سطح جذب حرارت نیز عایق می‌گردد [۵].



شکل ۱۱ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - فتوولتائیک/فتوولتائیک حرارتی [۵]



شکل ۱۰ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - هواکش خورشیدی [۵]

۲-۱۰- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - گرم کن هوایی خورشیدی^۲

در این روش که شماتیکی از آن در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در مناطق خیلی سرد و خشک می‌توان از این نوع سامانه‌های ترکیبی برای گرمایش محیط کاربر استفاده نمود. بدین صورت که هوای سرد با پیش گرم شدن به وسیله لوله‌های مبدل زمین به هوا وارد گرم کن هوایی خورشیدی می‌گردد. گرم کن خورشیدی از شیشه شفاف، صفحه جذب و عایق تشکیل شده است تا بتواند حرارت و گرمای خورشید را به هوای پیش گرم شده منتقل کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این نوع

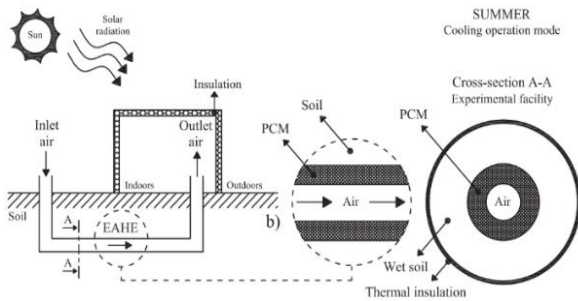
۲-۹- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - فتوولتائیک / فتوولتائیک حرارتی

در حال حاضر برای معماران و طراحان یکی از جدیدترین و بهترین روش‌های تولید و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک / فتوولتائیک حرارتی است که به طور یکپارچه در پوشش ساختمان نصب می‌شوند و یا با بخشی از اجزای ساختمان مانند نماها، سقف‌ها یا پنجره‌ها ادغام می‌شوند. یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای ترکیب این نوع سیستم‌ها با مبدل حرارتی زمین به هوا، استفاده از سلول‌های فتوولتائیک

¹ Solar Air Heating (SAH)

² Natural ventilation

مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در لوله منجر به افزایش بین ۲۹ تا ۴۰ درصدی ظرفیت سرمایش می‌گردد [۲۵].



شکل ۱۴ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - مواد تغییر فاز دهنده در لوله مبدل زمین به هوا [۵]

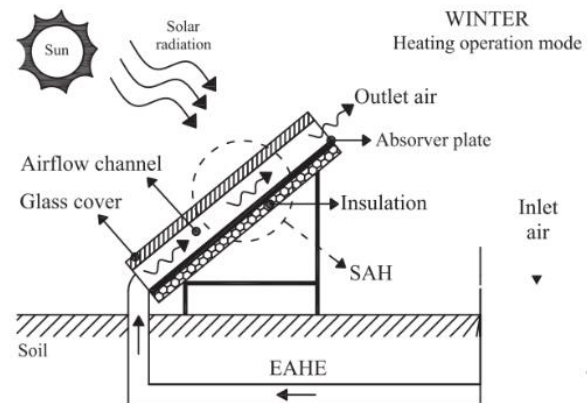
۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله آخرین تحقیقات و پیشرفت‌های انجام شده بر روی سامانه‌های ترکیبی مبدل حرارتی زمین به هوا مطالعه گردید. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد این نوع سامانه‌های ترکیبی توانایی و پتانسیل خوبی برای کاهش مصرف انرژی ناشی از پیش گرم/گرم و پیش سرد/سرد کردن ساختمان‌ها دارند. با این حال تحلیل‌های زیست محیطی و انتخاب نوع سامانه ترکیبی با توجه به شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی منطقه مورد نظر به منظور دست یافتن به بهترین عملکرد حرارتی باید لحاظ شود. همچنین انتخاب صحیح و بهینه پارامترهای مؤثر طراحی برای هر کدام از این نوع سامانه‌های ترکیبی موجب صرفه‌جویی در مواد و مصالح مورد استفاده و در نتیجه هزینه‌های اجرا و راندمان بهینه می‌گردد که باید حتماً در مطالعات آتی در نظر گرفته شود.

۴- مراجع

- [1] S. V. V. Raman, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of climate change, mitigation and adaptation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 878-897, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>.
- [2] E. Piaia, B. Turillazzi, R. Di Giulio, and R. Sebastian, "Advancing the Decarbonization of the Construction Sector: Lifecycle Quality and Performance Assurance of Nearly Zero-Energy Buildings," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3687, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16093687>.
- [3] N. Soares *et al.*, "A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment,"

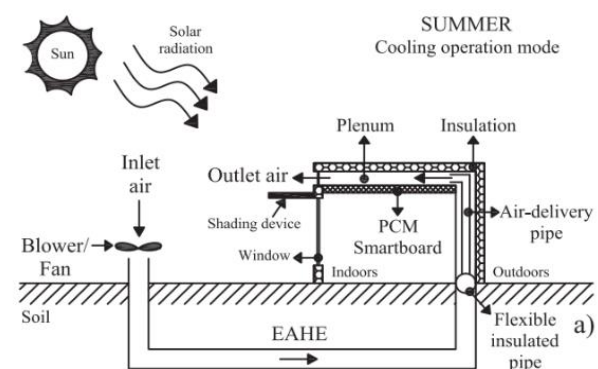
سامانه ترکیبی می‌تواند تا حدود ۳ برابر دمای هوای محیط را گرم کند. این نوع سامانه‌های ترکیبی علاوه بر گرمایش محیط می‌توانند در خشک کردن محصولات کشاورزی و دیگر اهداف صنعتی مورد استفاده قرار گیرند [۵].



شکل ۱۲ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - گرم‌کن هوایی خورشیدی [۵]

۱۱-۲ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌کردن/آزاد کردن انرژی حرارتی در بیشتر بخش‌های ساختمان‌ها استفاده می‌شود. استفاده از مبدل‌های زمین به هوا با مواد تغییر فاز دهنده در اجزای ساختمان (شکل ۱۳) و یا داخل لوله‌های مبدل زمین به هوا (شکل ۱۴) می‌تواند به بهبود شرایط آسایش حرارتی کمک کند. بدین صورت که اگر دمای هوای داخل محیط بیشتر از دمای مورد نظر باشد، حرارت را ذخیره نموده (فرایند شارژ) و به حالت مایع تبدیل می‌شود اگر دمای هوای داخل محیط کمتر باشد از دمای مورد نظر باشد حرارت به محیط داده می‌شود (فرایند تخلیه) و جامد می‌شود.



شکل ۱۳ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - مواد تغییر فاز دهنده در اجزای ساختمان [۵]

- no. 2, pp. 1241-1255, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026>.
- [13] A. O. Iman Shayegh, Amir Vadiee, "Study on Transient Thermal Performance and Recovery of an Earth to Air Heat Exchanger," Government - Ministry of Science, Research, and Technology - Shiraz University of Technology - Faculty of Mechanical Engineering [in persian], 1394. [Online]. Available: <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/72b5eec236b82e6eb3d92aaa025aae0c/fulltext>.
- [14] A. Lapertot, M. Cuny, B. Kadoch, and O. Le Métayer, "Optimization of an earth-air heat exchanger combined with a heat recovery ventilation for residential building needs," *Energy and Buildings*, vol. 235, p. 110702, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110702>.
- [15] G. Heidarinejad, V. Khalajzadeh, and S. Delfani, "Performance analysis of a ground-assisted direct evaporative cooling air conditioner," *Building and Environment*, vol. 45, no. 11, pp. 2421-2429, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.009>.
- [16] S. Ahmadi, M. Irandoost Shahrestani, S. Sayadian, M. Maerefat, and A. Haghighi Poshtiri, "Performance analysis of an integrated cooling system consisted of earth-to-air heat exchanger (EAHE) and water spray channel," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 143, pp. 473-483, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09268-9>.
- [17] V. Bansal and J. Mathur, "Performance enhancement of earth air tunnel heat exchanger using evaporative cooling," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 150-158, 2009, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp017>.
- [18] V. Khalajzadeh, M. Farmahini-Farahani, and G. Heidarinejad, "A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler," *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 604-610, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.009>.
- [19] N. Nemati, A. Omidvar, and B. Rosti, "Performance evaluation of a novel hybrid cooling system combining indirect evaporative cooler and earth-air heat exchanger," *Energy*, vol. 215, p. 119216, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119216>.
- [20] F. E. Nia, D. Van Paassen, and M. H. Saidi, "Modeling and simulation of desiccant wheel for air conditioning," *Energy and buildings*, vol. 38, no. 10, pp. 1230-1239, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.020>.
- [21] A. Minaei, M. Ghanizadeh, and H. Ghaebi, "Simulation and Performance Evaluation of Desiccant Cooling System Coupled to an Earth-to-Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 77, pp. 845-860, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.027>.
- [4] Z. Liu *et al.*, "A state-of-the-art review on shallow geothermal ventilation systems with thermal performance enhancement system classifications, advanced technologies and applications," *Energy and Built Environment*, vol. 4, no. 2, pp. 148-168, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.003>.
- [5] N. Soares, N. Rosa, H. Monteiro, and J. Costa, "Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (EAHE) systems for buildings: A review," *Energy and Buildings*, vol. 253, p. 111532, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111532>.
- [6] S. K. Soni, M. Pandey, and V. N. Bartaria, "Hybrid ground coupled heat exchanger systems for space heating/cooling applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 724-738, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.125>.
- [7] D. D'Agostino, F. Esposito, A. Greco, C. Masselli, and F. Minichiello, "Parametric analysis on an earth-to-air heat exchanger employed in an air conditioning system," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2925, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13112925>.
- [8] P. M. Congedo, C. Baglivo, S. Bonuso, and D. D'Agostino, "Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ASHP) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (EAHX) in different climates," *Geothermics*, vol. 87, p. 101845, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101845>.
- [9] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agarwal, J. Mathur, and T. Aseri, "Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger," *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 531-535, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.049>.
- [10] S. L. Do, J.-C. Baltazar, and J. Haberl, "Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates," *Energy and Buildings*, vol. 103, pp. 206-215, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.043>.
- [11] H. Li, L. Ni, G. Liu, and Y. Yao, "Performance evaluation of Earth to Air Heat Exchange (EAHE) used for indoor ventilation during winter in severe cold regions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, p. 114111, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114111>.
- [12] A. Mardiana-Idayu and S. Riffat, "Review on heat recovery technologies for building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16,

- [24] N. A. Elminshawy, A. Mohamed, K. Morad, Y. Elhenawy, and A. A. Alrobaian, "Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climatic," *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1-9, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.027>.
- [25] T. Zhou, Y. Xiao, H. Huang, and J. Lin, "Numerical study on the cooling performance of a novel passive system: Cylindrical phase change material-assisted earth-air heat exchanger," *Journal of Cleaner Production*, vol. 245, p. 118907, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118907>.
- Air Heat Exchanger," *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 46-63, 2023, doi: <https://doi.org/10.52547/jrenew.10.2.46>.
- [22] F. Jomehzadeh *et al.*, "A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 736-756, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>.
- [23] A. M. Akbarpoor, A. H. Poshtiri, and F. Biglari, "Performance analysis of domed roof integrated with earth-to-air heat exchanger system to meet thermal comfort conditions in buildings," *Renewable Energy*, vol. 168, pp. 1265-1293, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.110>.

مطالعه تأثیر رقیق سازی سوخت در شعله های نفوذی متان/هوا بر میزان انتشار آلاینده های زیست محیطی

چکیده: هرگاه احتراق غیر پیش آمیخته، حاصل دو جریان مختلف الجهد سوخت و اکسیدکننده باشد به آن شعله جریان مخالف نفوذی گفته می شود. هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی اثر گاز آرگون به عنوان رقیق کننده بر شعله جریان مخالف نفوذی متان و میزان انتشار آلاینده هایی مانند NO_x ، CO و دوده است. شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار شبیه ساز احتراق کمکین انجام گردید. جمله نفوذ به کمک روش تفاضل مرکزی با خطای مرتبه دو منفصل گردید. برای ایجاد همگرایی بیشتر در انفصال جمله جابجایی از روش بالا دست که قادر به تشخیص جهت جریان است، استفاده شد. معادلات منفصل شده به کمک حلگر دو نقطه ای با انتگرال گیری زمانی حل گردید. نتایج نشان می دهند که افزایش میزان رقیق کننده منجر به کاهش ماکزیمم دما و کسر مولی رادیکال های فعال از جمله رادیکال H می شود. کاهش رادیکال فعال H باعث می شود که سوخت، کمتر تحت تأثیر این گونه قرار گرفته و بنابراین نفوذ بیشتری در سمت اکسید کننده داشته باشد. انتشار گونه های NO ، NO_2 ، C_2H_2 و CO که جزء آلاینده های زیست محیطی می باشند و برای سلامتی مضر هستند، با افزایش درصد رقیق کننده به طور میانگین تا ۳۲/۲۵٪ کاهش می یابند که این موضوع از دیدگاه کنترل آلودگی هوا و موضوعات مربوط به راندمان احتراق دارای اهمیت فراوانی است.

واژه های راهنما: شعله های جریان مخالف نفوذی، آلاینده زیست محیطی، رقیق کننده، متان

علی اسدی*

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

میترا یادگاری

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده مکانیک و عمران،
دانشگاه صنعتی اسفراین،
اسفراین

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

The study of the effect of fuel dilution in methane/air counterflow diffusion flames on the emission of environmental pollutants

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

Mitra Yadegari
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Faculty of
Mechanics and Civil
Engineering, Esfarayen
University of Technology,
Esfarayen

Abstract: When the non-premixed combustion is the result of two different streams of fuel and oxidizer, it is called a counterflow diffusion flame. The main goal of the current work is to investigate the effect of Argon gas as a diluent on the counterflow diffusion flame and the amount of emission of pollutants such as NO_x , CO and soot. Numerical simulation was done with the help of CHEMKIN combustion simulator software. The diffusion term was discretized using the central difference method with a second-order error. In order to more convergence in the discretization of convection term, the upwind method, which is able to detect the flow direction, was used. The discretized equations were solved using a two-point solver with time integration. The results show that increasing the amount of diluent leads to a decrease in the maximum temperature as well as a decrease in the maximum mole fraction of active radicals, including H radical. The reduction of the active radical H makes the fuel less affected by this species and therefore has more diffuses on the oxidizing side. The emission of NO , NO_2 , C_2H_2 and CO species, which are part of environmental pollutants and are harmful to health, are reduced by an average of 25.32% with the increase of diluent percentage, which is very important from the point of view of air pollution control and issues related to combustion efficiency.

Keywords: Counterflow diffusion flames, Environmental pollutants, Diluent, Methane

۱- مقدمه

شکل‌گیری NO_x در شعله‌های جریان مخالف نفوذی متان/هوا روش آن‌ها را برای هر دو حالت فرایند پایدار و گذرا تایید کرد. ژنگ و همکاران [۷] حساسیت تشکیل دوده به تغییرات نرخ کرنش را به صورت تجربی و عددی برای شعله‌های جریان مخالف چهارده آلکان و الکل C3-C5 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش نرخ کرنش منجر به کاهش کسر حجمی دوده در تمام شعله‌های آزمایش می‌شود. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که به جز ترت بوتانول و ترت پنتانول، حساسیت کسر حجمی دوده به نرخ کرنش برای سوخت‌هایی با تمایل دوده‌گیری بالاتر، کمتر است.

فنگ و همکاران [۸] اثرات افزودن آمونیاک در جریان سوخت یک شعله‌ی جریان مخالف نفوذی اتیلن بر ویژگی‌های تشکیل دوده را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از روش جداسازی متعامد برای مطالعه‌ی کامل اثرات رقیق‌سازی، شیمیایی و حرارتی آمونیاک اضافه شده استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کسر حجمی دوده‌ی شعله، تحت تأثیر رقیق‌سازی، شیمیایی و حرارتی آمونیاک کاهش می‌یابد. بیشترین تأثیر به ترتیب مربوط به اثر شیمیایی و رقیق‌سازی و کمترین تأثیر مربوط به اثر حرارتی است.

با توجه به نقش‌های ساختمانی شیمی مرتبط با متان در مکانیزم‌های ساختاری سلسله مراتبی فعلی، جیانگ و همکاران [۹] مطالعه‌ای در ارتباط با شیمی تشکیل آروماتیک در شعله‌های متان انجام دادند. مدل پیشنهادی آن‌ها پیش‌بینی مناسبی از آروماتیک‌ها ارائه می‌کند و تا حد قابل توجهی تشکیل بنزن را در شعله‌های جریان مخالف نفوذی متان نشان می‌دهد.

ونگ و همکاران [۱۰] اثرات افزودن پرنول و ایزوپرنول بر هیدروکربن آروماتیک چند حلقه‌ای و تشکیل دوده در شعله‌های اتیلن/متان جریان مخالف را به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توزیع کسر حجمی دوده و هیدروکربن آروماتیک چند حلقه‌ای در شعله‌های احتراق را به ترتیب از طریق تابش ناشی از لیزر و فلورسانس ناشی از لیزر اندازه‌گیری کردند. چنگ و همکاران [۱۱] ویژگی‌های انتشار NO و CO شعله‌های گاز هیدروژن غنی شده/هوا را به صورت آرام و مغشوش به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند.

نتایج آن‌ها نشان داد که برای شعله‌های آرام و مغشوش، ماکزیمم کسر مولی NO با افزایش نسبت هم ارزی از ۰/۶ به ۱ افزایش و با افزایش نرخ کرنش، کاهش یافت. در سرعت جریان یکسان، شعله‌های مغشوش در مقایسه با شعله‌های آرام، ماکزیمم کسر مولی NO کمتر و منطقه‌ی تشکیل NO گسترده‌تری را نشان دادند.

یکی از انواع شعله‌های غیر پیش آمیخته، شعله‌ی جریان مخالف نفوذی می‌باشد. در این مدل شعله، جریان‌های سوخت و اکسید کننده از طریق دو نازل به صورت عمودی و در امتداد یک محور به همدیگر برخورد کرده و ناحیه‌ی شعله در حد فاصل بین دو نازل تشکیل می‌شود.

مطالعات مختلفی به صورت عددی و آزمایشگاهی توسط محققان برای کنترل آلاینده‌های زیست محیطی [۱] در فرایندهای احتراقی از جمله مدل شعله‌های جریان مخالف نفوذی انجام شده است.

ساه و آتريا [۲] تأثیر بخار آب بر جریان‌های مخالف نفوذی را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که به جز دو اثر فیزیکی بخار آب یعنی خنک‌کاری جامد مشتعل و خاموش‌کنندگی به وسیله‌ی رقیق‌سازی اکسیدکننده یا سوخت، اثر سوئی نیز وجود دارد که هنوز ناشناخته است و آن افزایش واکنش‌های شیمیایی در داخل ناحیه‌ی شعله با بخار آب است. آن‌ها ساختار جزئی شعله‌های جریان مخالف با بخار آب را اندازه‌گیری کردند تا دریابند که چه اتفاقی در داخل شعله رخ می‌دهد و چگونه واکنش‌ها افزایش می‌یابند.

ریبرت [۳] تأثیر محدوده‌ی فشار ۱Mpa تا ۲۵Mpa و دمای ورودی اکسیژن ۱۰۰K تا ۳۰۰K را روی شعله‌های رقیق شده و رقیق نشده‌ی هیدروژن-هوا مطالعه کرد. وی دریافت که افزایش فشار و دمای ورودی هر دو منجر به افزایش دمای ماکزیمم و نرخ حرارت آزاد شده می‌شوند. مطالعه‌ی ساختار شعله و انتشار NO در شعله‌های جریان مخالف هیدروژن/هوا رقیق شده با CO_2 توسط چنگ و همکاران [۴] انجام شده است. در این تحقیق تغییرات ماکزیمم دما در مقابل دمای اکسیدکننده بررسی گردید. ماکزیمم دما با افزایش دمای اکسیدکننده، افزایش یافته و حضور رقیق‌ساز CO_2 منجر به کاهش ماکزیمم دما می‌شود.

ژنگ و همکاران [۵] تشکیل دوده‌ی n-هپتان را به صورت تجربی و عددی در مقادیر نرخ کرنش کم شعله‌ی جریان مخالف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بیانگر آن است که دمای شعله‌ی بالاتر در منطقه‌ی دوده منجر به ذرات و سنگدانه‌های دوده می‌شود که با اندازه‌های بزرگ‌تر و بی‌هیدروژنه‌تر تولید می‌شوند. بنابراین دمای بالا در شعله یکی از عوامل تشکیل و انتشار دوده می‌باشد.

یو و همکاران [۶] در تحقیقی به بررسی انتشار NO_x در احتراق پرداختند. مطالعه‌ی آن‌ها بر ساختار سلسله مراتبی مینیفولدهای واکنش-نفوذ تمرکز داشت. محاسبات نمونه برای

درخشندگی شعله و توزیع غلظت دوده دارد. هر دو رقیق کننده‌ی N_2 و CO_2 تشکیل دوده و اکسیداسیون را محدود می‌کنند اما اثر CO_2 به دلیل خواص حرارتی و شیمیایی آن بیشتر است.

تحقیقی با هدف بررسی اثرات افزودن آمونیاک بر شعله‌های جریان مخالف نفوذی اتیلن با رقیق کننده‌های مختلف در سمت سوخت یا اکسیدکننده، با استفاده از تحلیل‌های سینتیکی توسط شو و همکاران [۱۶] انجام شد. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی اثرات شیمیایی NH_3 و CO_2 در احتراق C_2H_4 بود. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن NH_3 باعث کاهش کسر مولی و نرخ تولید پیش‌سازهای کلیدی دوده مانند استیلن، پروپینیل و بنزن می‌شود. همچنین با افزودن CO_2 در سمت اکسیدکننده، کسر مولی رادیکال‌های H ، O ، OH ، استیلن، پروپینیل و بنزن کاهش یافت.

ونگ و همکاران [۱۷] اثر افزودن هیدروژن در سوخت موتور در حالت دوگانه سوز مبتنی بر گاز طبیعی و گازوئیل را که پتانسیل زیادی برای بهبود راندمان موتور و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، مطالعه کردند. شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی تشکیل دوده‌ی موتورهای دوگانه سوز گاز طبیعی-دیزلی انجام شد و اثرات افزودن H_2 به عنوان رقیق کننده بر تشکیل دوده در شعله‌های نفوذی آرام مطالعه گردید. نتایج نشان می‌دهد که اثرات رقیق‌کنندگی و حرارتی H_2 تشکیل دوده را مهار می‌کند، در حالی که اثرات شیمیایی H_2 باعث تشکیل دوده، تحت فشارهای مختلف می‌شود.

مطالعه‌ی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که بررسی انتشار آلاینده‌ها و کاهش آن‌ها در فرایندهای احتراقی، اهمیت ویژه‌ای دارد. اما تا کنون اثر گاز آرگون^۲ به عنوان یک رقیق کننده بر شعله‌های جریان مخالف نفوذی متان بررسی نشده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی احتراق متان/هوا با استفاده از مدل شعله‌ی جریان مخالف نفوذی با رقیق کننده‌ی گاز آرگون به عنوان یک عنصر شیمیایی بی اثر، فراوان‌ترین گاز موجود در پوسته زمین و پر استفاده‌ترین گاز در صنعت انجام شده است. در همین راستا ابتدا اثر نرخ کرنش و رقیق کننده بر دمای احتراق و میزان تولید گونه‌های H و OH بررسی شد و در ادامه اثر افزودن رقیق کننده بر میزان انتشار گونه‌های آلاینده مانند NO ، NO_2 ، CO و C_2H_2 مطالعه گردید. در این پژوهش از مکانیزم [۱۸] GRI3.0 به عنوان سینتیک شیمیایی استفاده شده است که این مکانیزم شامل ۳۲۵ واکنش برگشت‌پذیر و ۵۳ گونه است.

سورش و همکاران [۱۲] به مطالعه‌ی تأثیر تغلیظ آمونیاک و احتراق افزایش یافته به کمک اکسیژن بر میزان انتشار NO_x در شعله‌های نفوذی اتیلن پرداختند. آن‌ها شبیه‌سازی خود را با استفاده از نرم افزار کمکین^۱ انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغلیظ آمونیاک در شعله‌های اتیلن، منجر به افزایش قابل توجه NO_x می‌شود، در حالی که اکسیژن‌سازی، تأثیر ناچیزی بر انتشار NO_x دارد.

تأثیر هیدروژن بر تولید دوده و ساختار شعله‌های جریان مخالف آرام متان/هوا توسط خار و همکاران [۱۳] مورد مطالعه قرار گرفت. محدوده‌ی تشکیل دوده با استفاده از روش پراکندگی نور لیزر برای مخلوط CH_4/H_2 با غلظت‌های متفاوت H_2 از ۰ تا ۲۰ درصد حجمی در مخلوط سوخت برای نرخ‌های کرنش مختلف بررسی گردید. در این پژوهش، دمای شعله با استفاده از یک ترموکوپل سیم نازک نوع S اندازه‌گیری شد و منحنی گونه‌ها با استفاده از تکنیک کروماتوگرافی گازی، ترسیم گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش غلظت H_2 ، مقادیر هیدروکربن‌های بالاتر مانند بنزن و نفتالین که از پیش‌سازهای مهم دوده در نظر گرفته می‌شوند، به طور قابل توجهی کاهش یافت.

شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی اثرات افزودن CO_2 به سمت سوخت در شعله‌های نفوذی آرام اتیلن/هوا در فشارهای ۱، ۵ و ۹ اتمسفر در محدوده کسر مولی ۰ تا ۰٫۲ بر روی تشکیل دوده و ساختار شعله توسط ونگ و همکاران [۱۴] انجام شد. هدف از این تحقیق، ایجاد پایه‌ای برای تحقیقات آینده در مورد ویژگی‌های تولید دوده در شرایط عملیاتی احتراق واقعی است. نتایج نشان داد که فشار بالا، ساختار شعله را تغییر داده و بار دوده را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد که باعث کاهش ماکزیمم کسر مولی رادیکال‌های H ، O و OH و همچنین پیش‌سازهای دوده شد. افزودن CO_2 در فشارهای ۱، ۵ و ۹ اتمسفر به طور قابل توجهی، کسر حجمی دوده را کاهش داد. این در حالی است که افزودن CO_2 در فشارهای ۵ و ۹ اتمسفر منجر به افزایش ماکزیمم کسر مولی OH در شعله شد.

ژنگ و همکاران [۱۵] تأثیر رقیق کننده‌های N_2 و CO_2 به اکسیدکننده را برای مطالعه‌ی رفتار دوده در شعله‌های نفوذی آرام n-هپتان تحت دماهای پیش گرمایش مختلف بررسی کردند. شبیه‌سازی‌های عددی آن‌ها با بررسی اثر این افزودنی‌ها بر روی گونه‌های کلیدی برای تشکیل هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در دماهای مختلف پیش گرم انجام شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن N_2 و CO_2 تأثیر قابل توجهی بر

^۲ Argon^۱ CHEMKIN-Pro

۲- هندسه و معادلات حاکم

که در آن فشار است. 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 ، λ ، C_{pk} ، Y_k ، V_k ، h_k ، $\dot{\omega}_k$ و W_k به ترتیب دما، ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت، هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه 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

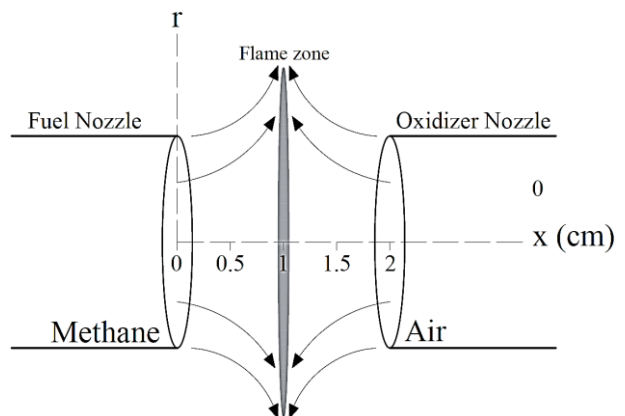
$$D_{km} = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k}^K X_j / D_{jk}} \quad (10)$$

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

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

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

شکل (۱) شماتیک هندسه متقارن محور شعاعی جریان مخالف را نشان می‌دهد. دما و فشار محیط به ترتیب $298K$ و 1 atm در نظر گرفته شد. ضریب نرخ واکنش گازی برابر ۱ و مقدار گرادیان شعاعی در سرعت‌های ورودی برابر ۰ اعمال گردید. سرعت و دمای ورودی برای جریان‌های سوخت و اکسیدکننده به ترتیب برابر 100 cm/s و $300K$ در نظر گرفته شد. فاصله‌ی بین دهانه‌ی نازل‌های سوخت و اکسیدکننده 2 cm می‌باشد. کسر مولی گونه‌ها در دهانه خروجی نازل‌ها نیز معلوم است. جریان، پایدار، آرام و یک بعدی در نظر گرفته شده است. بنابراین خواص سیال و غلظت گونه‌ها، تابع فاصله‌ی محوری هستند.



شکل ۱ شماتیک مدل شعاعی جریان مخالف نفوذی پژوهش حاضر

معادلات حاکم برای شعاعی جریان مخالف نفوذی که شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده است، به صورت زیر است [۱۹]: معادله‌ی بقای جرم:

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

که در آن u و v مولفه‌های سرعت شعاعی و محوری بوده و ρ چگالی است. با در نظر گرفتن فرضیه‌ی ون کارمان [۲۰] که در آن $\frac{v}{r}$ و سایر متغیرها بایستی 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 ارضاء می‌شود:

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

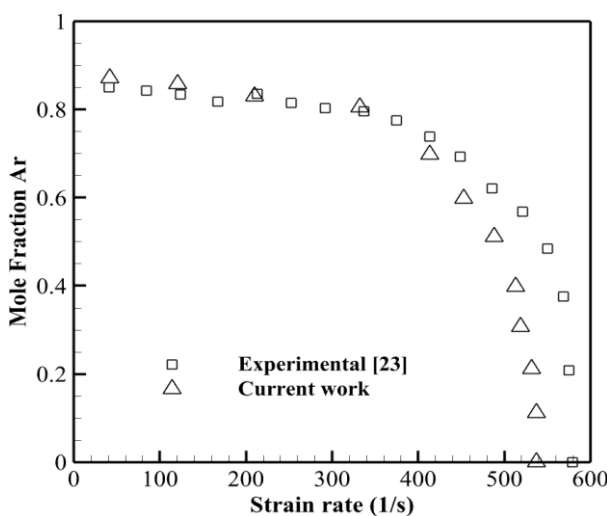
تصحیح می‌کند. معیار همگرایی به منظور رسیدن مقادیر باقی‌مانده‌ها به کمتر از 10^{-5} می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی اعتبار نتایج

برای بررسی اعتبار نتایج به مقایسه‌ی منحنی کسر مولی رقیق‌کننده بر حسب نرخ کرنش در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۳] و همچنین منحنی ماکزیمم کسر مولی گونه‌های H_2O و OH بر حسب نرخ کرنش با نتایج عددی مرجع [۲۴] 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 رقیق‌کننده را محاسبه نمود. ماکزیمم دما نیز در این نقطه، ماکزیمم دما در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی است.

شکل (۲) منحنی کسر مولی رقیق‌کننده را بر حسب نرخ کرنش خاموشی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزودن رقیق‌کننده به سوخت باعث تغییر خواص گرمایی سوخت شده و بنابراین در احتراق آن موثر است و در نتیجه باعث کاهش نرخ کرنش (که معیاری برای سنجش حد خاموشی است) می‌شود. در ابتدای افزایش رقیق‌کننده که کسر مولی آن کم است، اختلاف بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی زیاد است. اما با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده، اختلاف بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی کم شده و با دقت خوبی بر هم منطبق می‌شوند.



شکل ۲ منحنی کسر مولی رقیق‌کننده بر حسب نرخ کرنش در نقطه‌ی خاموشی

نرخ کرنش توسط شادری و ویلیامز [۲۱] 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_{ox} سرعت‌های سوخت و اکسیدکننده هستند. ρ_F و ρ_{ox} نیز چگالی سوخت و اکسیدکننده می‌باشند.

حل معادلات با استفاده از OPPDIF^۱ [۲۲] که یک کد عددی به زبان فرترن است، انجام پذیرفت. 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 دست^۲ که قادر به تشخیص جهت جریان است، استفاده می‌شود. به عنوان مثال اگر $u_i > 0$ باشد، ترم جابجایی در معادله‌ی انرژی به صورت زیر منفصل می‌شود:

$$\rho u \frac{dT}{dx} \approx \rho_i u_j \frac{T_j - T_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \quad (13)$$

خطای برشی این تقریب در فاصله‌ی مش‌بندی از مرتبه‌ی یک می‌باشد که باعث نفوذ مصنوعی^۳ می‌شود، اما از ایجاد نوسانات در طول حل روی یک شبکه‌ی درشت، جلوگیری می‌کند.

معادلات منفصل شده به کمک حلگر دو نقطه‌ای^۴ حل می‌شود. حلگر دو نقطه‌ای از روش نیوتن برای حل معادلات پایدار استفاده می‌کند و هنگامی که تکرار نیوتن، همگرا نمی‌شود از انتگرال‌گیری زمانی استفاده می‌کند. بعد از انتگرال‌گیری زمانی، حل را به حالت پایدار نمو می‌دهد و برای همگرایی سریع به روش‌های نیوتن بر می‌گردد. در محاسبه‌ی اولین حل یک شعله‌ی جدید، حلگر ممکن است قبل از همگرایی، در بین انتگرال‌گیری زمانی و روش نیوتن چند بار به عقب و جلو پرش کند. با این وجود یک شعله که برای اولین بار حل می‌شود، حل‌های بعدی می‌توانند به طور موثرتر با استفاده از تغییر شرایط مرزی و حل قبلی انجام شوند. تجربیات نشان می‌دهند که به منظور سرعت همگرایی بهتر است که حل با یک مش‌بندی درشت آغاز شود. پس از همگرایی اولین حل، حلگر، حل را بوسیله‌ی اضافه‌کردن نقاط جدید در مناطق دارای گرادیان شدید یا منحنی‌کردن حل،

³ Artificial diffusion

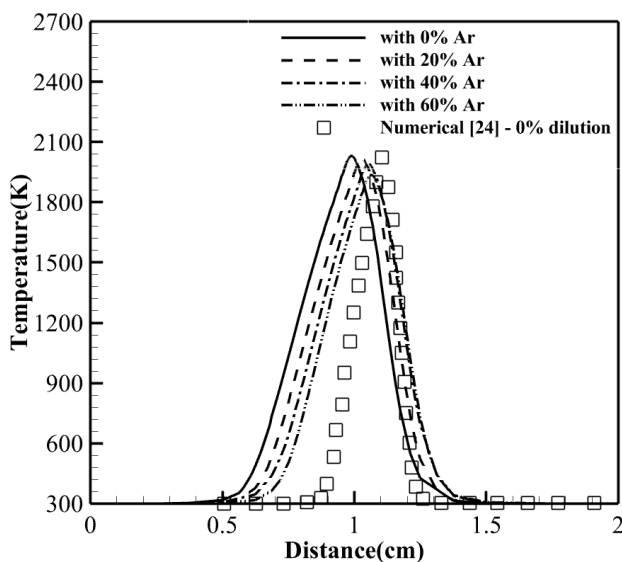
⁴ Twopnt (two-point boundary value solver)

¹ Opposed-Flow Diffusion Flames

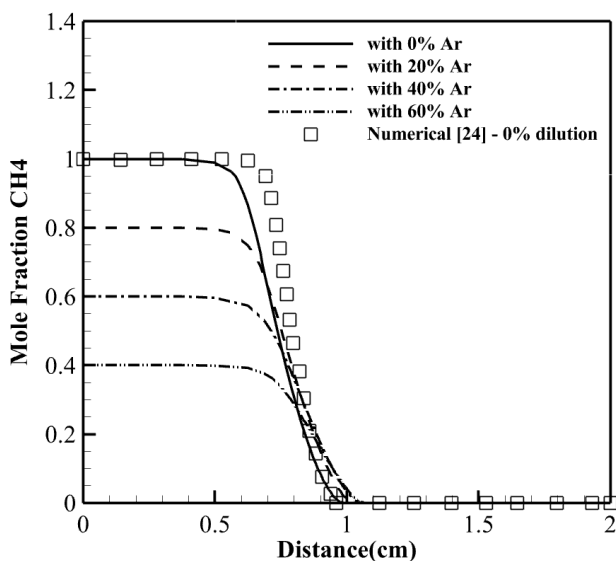
² Upwind

با یکدیگر، مطابقت خوبی دارند. اما موقعیت حداکثر دما در مرجع [۲۴] به میزان کمی با مقدار متناظر آن در پژوهش حاضر متفاوت است که می‌تواند به دلیل اختلاف در نرخ کرنش اولیه باشد.

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش درصد رقیق کننده، منحنی‌های کسر مولی گونه‌ی CH_4 به سمت اکسید کننده متمایل می‌شوند. با افزایش درصد رقیق کننده و نیز کاهش دما، واکنش‌های شکست بین زنجیره اتم‌های سوخت که منجر به تولید رادیکال H می‌شود کاهش یافته و در نتیجه از مقدار این رادیکال کاسته می‌شود. نتیجه آن است که سوخت، کمتر تحت تأثیر رادیکال H قرار گرفته و می‌تواند در سمت اکسید کننده، نفوذ بیشتری داشته باشد.

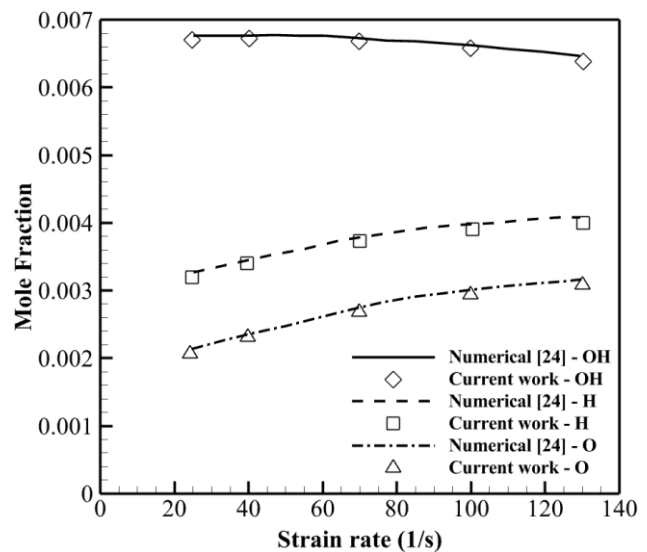


شکل ۴ منحنی دما بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق سازی



شکل ۵ منحنی کسر مولی CH_4 بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق سازی

شکل (۳) منحنی ماکزیمم کسر مولی گونه‌های H ، O و OH بر حسب نرخ کرنش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین نتایج دو حل عددی وجود دارد. افزایش نرخ کرنش باعث افزایش ماکزیمم کسر مولی گونه‌های O و H و همچنین کاهش ماکزیمم کسر مولی گونه‌ی OH می‌شود. به عبارتی افزایش نرخ کرنش به عنوان یک پارامتر کلیدی باعث مصرف بیشتر گونه‌ی OH برای تشکیل رادیکال‌های آزاد O و H می‌شود.



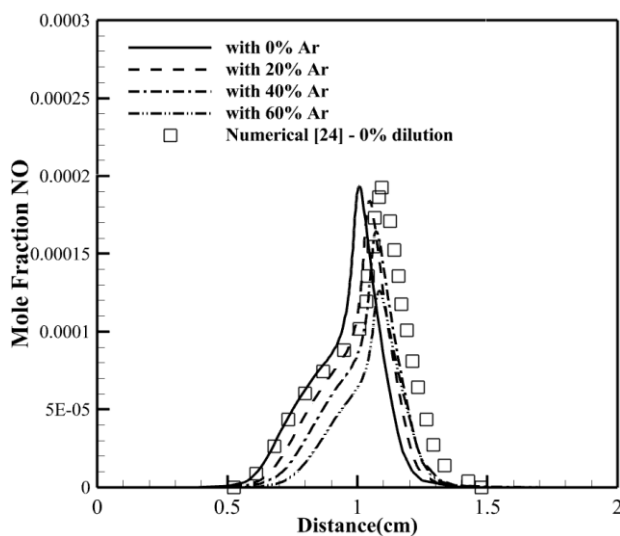
شکل ۳ منحنی ماکزیمم کسر مولی گونه‌های H ، O و OH بر حسب نرخ کرنش

۳-۲- احتراق متان و اثر رقیق کننده بر آن

مدل سازی برای چهار شعله با درصد رقیق سازی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ انجام شده است. شکل (۴) منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دو نازل را در درصدهای مختلف رقیق سازی با آرگون نشان می‌دهد. افزایش درصد رقیق کننده‌ی آرگون باعث کاهش غلظت‌های گونه‌های حاضر در واکنش می‌شود و بنابراین شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد. با کاهش شدت واکنش‌ها، شدت واکنش کلی کاهش یافته و در نتیجه ماکزیمم دما کاهش می‌یابد. با دقت در شکل (۴) در می‌یابیم که با افزایش درصد رقیق کننده از ۰٪ تا ۶۰٪ دما حدود ۹۴K کاهش یافته و موقعیت ماکزیمم دما به سمت اکسید کننده حرکت می‌کند و این یعنی سوخت بیشتر به سمت اکسید کننده نفوذ می‌کند. شکل (۵) که کسر مولی سوخت متان بر حسب فاصله را نشان می‌دهد، موید این مطلب است.

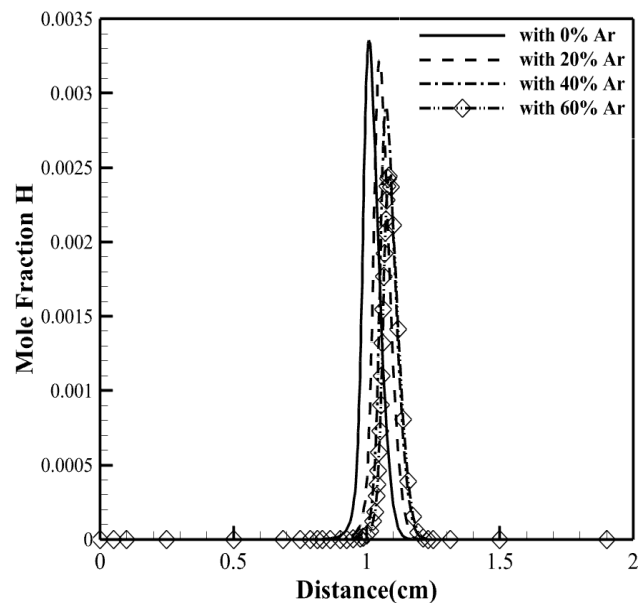
نتایج منحنی دما در حالت بدون رقیق سازی در شکل (۴) با نتایج عددی مرجع [۲۴] نیز مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار حداکثر دما در این مرجع و پژوهش حاضر

افزایش رقیق کننده علاوه بر اینکه از طریق رقیق سازی، کاهش NO_x را باعث می شود، با کاهش دما باعث کاهش تولید NO حرارتی نیز می شود. زیرا سرعت تشکیل NO حرارتی کم بوده و در نواحی پس شعله تشکیل می شود. با کاهش دما انرژی لازم برای شکست پیوند سه گانه N_2 کاهش یافته و NO_x کمتری تولید می شود. به مکانیزم تولید NO از طریق مکانیزم حرارتی که در زیر آمده است، توجه کنید.

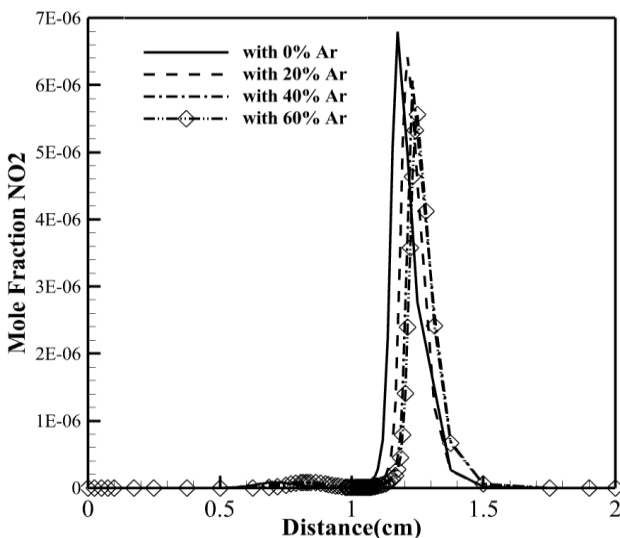


شکل ۷ منحنی کسر مولی NO بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق سازی

نتایج منحنی کسر مولی گونه CH_4 در حالت بدون رقیق سازی در شکل (۵) با نتایج عددی مرجع [۲۴] نیز مقایسه شده است و همانطور که پیداست با نتایج پژوهش حاضر مطابقت خوبی دارد. اختلاف کم بین نتایج پژوهش مذکور و پژوهش حاضر در ابتدای ناحیه شعله که در آن مصرف گونه CH_4 آغاز می شود به دلیل تفاوت در نرخ واکنش های تشکیل دهنده رادیکال های آزاد H و OH است که رفته رفته با شدت گرفتن واکنش ها، این اختلاف به حداقل رسیده و منحنی ها بر هم منطبق می شوند.



شکل ۶ منحنی کسر مولی H بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق سازی



شکل ۸ منحنی کسر مولی NO_2 بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق سازی

نتایج منحنی کسر مولی گونه NO در حالت بدون رقیق سازی در شکل (۷) با نتایج عددی مرجع [۲۴] نیز مقایسه شده

۳-۳- اثر رقیق کننده بر تولید آلاینده ها

در این بخش، اثر رقیق کننده را بر تولید گونه های NO ، NO_2 ، CO و C_2H_2 بررسی می کنیم. NO و NO_2 گازهایی از خانواده NO_x هستند و CO یک گاز سمی و مضر برای سلامت انسان است. C_2H_2 یک پیش ماده مهم در تولید دوده است. اشکال (۷) و (۸) منحنی کسر مولی گونه های NO و NO_2 را بر حسب فاصله نشان می دهند. همانطور که در این شکل ها مشخص است، ماکزیمم تولید این گونه با افزایش درصد رقیق کننده، کاهش می یابد که مطلوب است. میزان کاهش گونه های NO و NO_2 در شکل های (۷) و (۸) بر اثر افزایش ۶۰٪ رقیق کننده نسبت به حالت بدون رقیق سازی به ترتیب ۳۴٫۸٪ و ۱۸٫۲٪ می باشد. افزایش درصد رقیق کننده همچنین حرکت ماکزیمم کسر مولی گونه به سمت اکسید کننده را نیز منجر می شود که این به دلیل تغییر خواص حرارتی و نفوذی گونه ها بر اثر دما است.

شکل (۱۰) منحنی کسر مولی گونه‌ی C_2H_2 بر حسب فاصله را نشان می‌دهد. همانطور که پیداست، ماکزیمم کسر مولی این گونه با افزایش درصد رقیق‌کننده، کاهش می‌یابد و علت آن کاهش شدت واکنش $CH+CH_2 \rightarrow H+C_2H_2$ است که در آن C_2H_2 به میزان زیادی تولید می‌شود. افزایش رقیق‌سازی باعث تغییر مکان موقعیت ماکزیمم کسر مولی گونه‌ی C_2H_2 به سمت اکسید کننده شده است که همانطور که پیش‌تر گفته شد به دلیل تغییر خواص حرارتی و نفوذی گونه‌ها بر اثر دما می‌باشد. بر اثر افزایش ۶۰٪ رقیق‌کننده، کسر مولی این گونه ۵۲٪ کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی شعله‌های جریان مخالف نفوذی متان انجام شد. بر خلاف تحقیقات قبلی، در این تحقیق از گاز آرگون که یک عنصر شیمیایی بی اثر، فراوان‌ترین گاز موجود در پوسته زمین و پر استفاده‌ترین گاز در صنعت است به عنوان رقیق‌کننده استفاده گردید. شبیه‌سازی‌ها برای چهار شعله با درصدهای رقیق‌سازی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ انجام گردید و نتایج زیر به دست آمد:

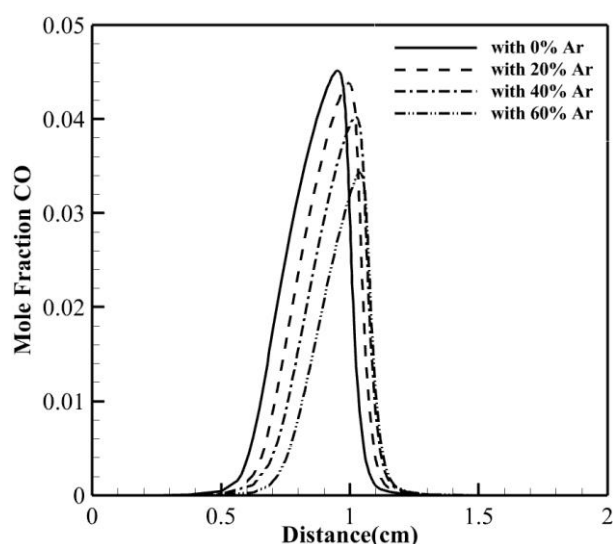
- رقیق‌کننده با کاهش غلظت گونه‌ها باعث کاهش شدت واکنش‌ها و در نتیجه کاهش شدت واکنش کلی می‌شوند که منجر به کاهش ماکزیمم دما نیز می‌گردد.
- اثر رقیق‌سازی و در کنار آن کاهش دما باعث کاهش واکنش‌های شکست بین زنجیره‌های اتم‌های سوخت می‌شود و در نتیجه رادیکال‌های فعال H و OH کاهش می‌یابند. بنابراین سوخت کمتر تحت تأثیر این گونه‌ها قرار گرفته و بیشتر در سمت اکسیدکننده نفوذ می‌کند.
- موقعیت ماکزیمم کسر مولی گونه‌های مختلف به دلیل نفوذ سوخت، به سمت اکسید کننده جابجا می‌شود.
- تولید گونه‌های NO ، NO_2 ، CO و C_2H_2 که همگی جزء آلاینده‌های زیست محیطی هستند با افزایش درصد رقیق‌کننده کاهش می‌یابد.
- افزایش ۶۰٪ رقیق‌کننده به سوخت به طور میانگین میزان تولید آلاینده‌ها را به میزان ۳۲/۲۵٪ کاهش می‌دهد.

۵- فهرست علائم و اختصارات

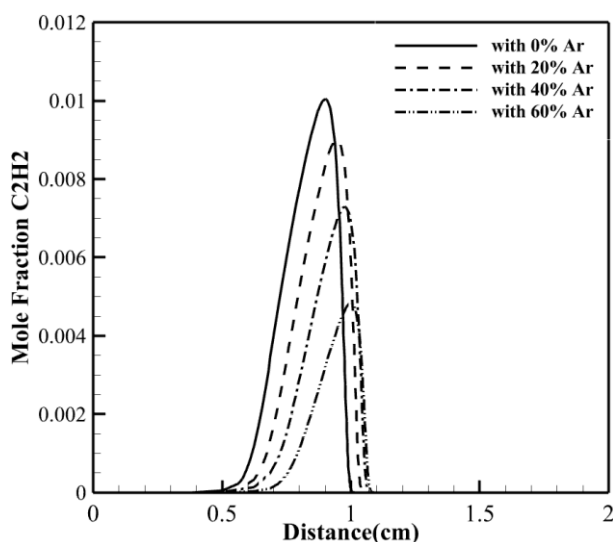
فهرست علائم و اختصارات مورد استفاده در روابط و معادلات پژوهش حاضر به شرح زیر است.

است و همانطور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی میان نتایج دو پژوهش وجود دارد.

شکل (۹) کسر مولی گونه‌ی CO در سطوح مختلف رقیق‌سازی را بر حسب فاصله نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تولید این گونه نیز با افزایش درصد رقیق‌کننده، کاهش می‌یابد و دلیل آن کاهش غلظت گونه‌ها از طریق رقیق‌سازی، کاهش دما و متعاقب آن کاهش شدت واکنش‌ها است. در نمودارهای این شکل نیز با افزایش رقیق‌سازی، موقعیت ماکزیمم کسر مولی گونه‌ی CO به سمت اکسید کننده حرکت کرده است که به دلیل تغییر خواص حرارتی و نفوذی گونه‌ها بر اثر دما است. میزان کاهش این گونه بر اثر افزایش ۶۰٪ رقیق‌کننده برابر ۲۴٪ می‌باشد.



شکل ۹ منحنی کسر مولی CO بر حسب فاصله در درصد‌های مختلف رقیق‌سازی



شکل ۱۰ منحنی کسر مولی C_2H_2 بر حسب فاصله در درصد‌های مختلف رقیق‌سازی

علائم انگلیسی

طرفیت گرمایی ویژه ی فشار ثابت ($J/kg.K$)	C_p
ضریب نفوذ چند جزئی (m^2/s)	D_{kj}
ضریب نفوذ حرارتی ($Kg/m.s$)	D_k^T
ضریب نفوذ میانگین ترکیب (m^2/s)	D_{km}
ضریب نفوذ دوتایی (m^2/s)	D_{jk}
آنتالپی (J/Kg)	h
فشار (Pa)	P
دما (K)	T
مؤلفه ی سرعت شعاعی (m/s)	u
مؤلفه ی سرعت محوری (m/s)	v
سرعت نفوذی (m/s)	V
وزن مولکولی ($Kg/Kmol$)	W
وزن مولکولی متوسط ($Kg/Kmol$)	\bar{W}
کسر مولی ($Kmol/Kmol$)	X
کسر جرمی (kg/kg)	Y

علائم یونانی

چگالی (kg/m^3)	ρ
لزجت دینامیکی ($N.s/m^2$)	μ
ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.K$)	λ
نرخ تولید یا مصرف گونه ($Kmol/s.m^3$)	$\dot{\omega}$

زیرنویس ها

گونه ی k	k
------------	-----

۶- مراجع

- counterflow diffusion flames: Two-dimensional and oxygen effects," *Combustion and Flame*, vol. 258, p. 112441, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112441>.
- [6] C. Yu, P. Shrotriya, X. Li, and U. Maas, "Reduced modeling of the NO_x formation based on the reaction-diffusion manifolds method for counterflow diffusion flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 2, pp. 1587-1596, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.08.010>.
- [7] J. Zhang, F. Yan, and Y. Wang, "Sensitivity of soot formation to strain rates in counterflow diffusion flames of various C3-C5 alkanes and alcohols," *Fuel*, vol. 333, p. 126321, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126321>.
- [8] W. Feng, L. Qiu, Y. Hua, S. Meng, Y. Zhang, and Y. Qian, "On the soot formation characteristics of an ammonia-ethylene counterflow diffusion flame based on the orthogonal decoupling method," *Fuel*, vol. 352, p. 129012, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129012>.
- [9] P. Jiang, L. Xu, Q. Wang, Z. Wang, S. H. Chung, and Y. Wang, "Experimental and kinetic study on aromatic formation in counterflow diffusion flames of methane and methane/ethylene mixtures," *Fuel*, vol. 354, p. 129304, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129304>.
- [10] B. Wang, Y. Xu, Z. Jiang, Y. Liu, K. Zhang, X. Cheng, and J. Yao, "Effects of prenil and isoprenol addition on soot and PAH formation in ethylene/methane counterflow diffusion flames," *Fuel*, vol. 331, p. 125783, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125783>.
- [11] L. Cheng, Y. Chen, Y. Pei, G. Sun, J. Zou, S. Peng, and Y. Zhang, "NO and CO Emission Characteristics of Laminar and Turbulent Counterflow Premixed Hydrogen-Rich Syngas/Air Flames," *Processes*, vol. 12, no. 3, p. 475, 2024, <https://doi.org/10.3390/pr12030475>.
- [12] R. Suresh, K. C. Kalvakala, and S. K. Aggarwal, "A numerical study of NO_x and soot emissions in ethylene-ammonia diffusion flames with oxygen enrichment," *Fuel*, vol. 362, p. 130834, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130834>.
- [13] R. Khare, P. Vlavakis, T. Von Langenthal, A. Loukou, M. Khosravi, U. Kramer, and D. Trimis, "Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on the sooting limit and structure of methane/air laminar counterflow diffusion flames," *Fuel*, vol. 324, p. 124506, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124506>.
- [1] M. Yadegari and M. Ghassemi, "Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber," *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, vol. 23, no. 1, pp. 122-146, 2022, doi: [10.30506/JMEE.2022.547922.1282](https://doi.org/10.30506/JMEE.2022.547922.1282).
- [2] J. Suh and A. Atreya, "The effect of water vapor on counterflow diffusion flames," in *International Conference on Fire Research and Engineering*, 1995, vol. 103: Citeseer, doi: [9449561370e41b3302d1a0dc8bb6c7c07717c49](https://doi.org/10.1145/9449561370e41b3302d1a0dc8bb6c7c07717c49).
- [3] G. Ribert, N. Zong, V. Yang, L. Pons, N. Darabiha, and S. Candel, "Counterflow diffusion flames of general fluids: Oxygen/hydrogen mixtures," *Combustion and Flame*, vol. 154, no. 3, pp. 319-330, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.04.023>.
- [4] J. Park, K. T. Kim, J. S. Park, J. S. Kim, S. Kim, and T. K. Kim, "A study on H₂- air counterflow flames in highly preheated air diluted with CO₂," *Energy & fuels*, vol. 19, no. 6, pp. 2254-2260, 2005, <https://doi.org/10.1021/ef050152l>.
- [5] D. Zheng, A. Nobili, A. Cuoci, M. Pelucchi, X. Hui, and T. Faravelli, "Soot formation from n-heptane

- Series. McGraw Hill*, p. 51, 2000, doi: [OCLC: 660161844](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109422).
- [20] 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>.
- [21] K. Seshadri and F. Williams, "Laminar flow between parallel plates with injection of a reactant at 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).
- [22] 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>.
- [23] 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, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.101>.
- [24] F. Ren, L. Xiang, H. Chu, and W. Han, "Effects of strain rate and CO₂ on NO formation in CH₄/N₂/O₂ counter-flow diffusion flames," *Thermal Science*, vol. 22, no. Suppl. 2, pp. 769-776, 2018, doi: <https://doi.org/10.2298/TSCI170922062R>.
- [14] D. Wang, J. Yao, R. Hong, W. Dong, B. Qiu, and H. Chu, "Effects of pressure and CO₂ dilution on soot formation in coflow ethylene/air laminar diffusion flames by numerical simulation," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 107, p. 109422, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109422>.
- [15] Z. Zhang, C. Zhang, Y. Wu, J. Zhang, X. He, and L. Zhou, "Effects of N₂ and CO₂ addition to oxidizer on soot formation in n-heptane laminar diffusion flame at preheating temperatures," *Fuel*, vol. 374, p. 132480, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132480>.
- [16] Z. Shu *et al.*, "Comprehensive kinetic study on ammonia/ethylene counter-flow diffusion flames: influences of diluents," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 11, no. 1, p. 15, 2024, doi: [10.1007/s40789-024-00663-3](https://doi.org/10.1007/s40789-024-00663-3).
- [17] D. Wang, J. Yao, W. Dong, Z. Rui, W. Pan, and H. Chu, "Numerical investigation of soot formation in methane/n-heptane laminar diffusion flame doped with hydrogen at elevated pressure," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 79, pp. 1237-1249, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.082>.
- [18] <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/releases.html>.
- [19] R. Stephen, "Turns. An introduction to combustion: concepts and applications," *Mechanical Engineering*



ارزیابی معکوس توزیع ضرایب جذب و پراکندگی در محیط های تابشی با ضریب شکست متغیر

چکیده: در این پژوهش، ارزیابی معکوس توزیع ضرایب جذب و پراکندگی درون محیط های تابشی با توزیع ضریب شکست متغیر دلخواه مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله مستقیم شامل انتقال حرارت تابشی گذرا در معرض تابش تک جهته لیزر می باشد که با روش انتقال مجزا در حالت های یک بعدی و دو بعدی حل گردید. به منظور حل مسائل معکوس و به حداقل رساندن تابع هدف، که به صورت مجموع مربعات باقیمانده های مقادیر ارزیابی شده و مقادیر مطلوب می باشد، تکنیک بهینه سازی گرادینان مزدوج مورد استفاده قرار گرفت. سپس مسائل یک بعدی و دو بعدی که در آن ها از یک روش ساده و مستقیم برای به دست آوردن ضرایب حساسیت استفاده شده است، مورد بررسی قرار گرفت. دقت بالای مقادیر ارزیابی شده، حتی با وجود خطاهای اندازه گیری، نشان دهنده عملکرد مطلوب روش حل معکوس می باشد. اگرچه با افزایش میزان خطای مقادیر اندازه گیری شده، انحراف مقادیر ارزیابی شده از مقادیر دقیق افزایش یافت، شناسایی موقعیت ناخالصی ها درون محیط، با دقتی مناسب مشاهده گردید.

واژه های راهنما: ارزیابی معکوس، ضرایب جذب و پراکندگی، ضریب شکست متغیر، روش بهینه سازی گرادینان مزدوج، ضرایب حساسیت

امیر دهقانیان*

استادیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی شیراز،
شیراز

سید مسعود

حسینی سروری

استاد،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه شهید باهنر کرمان،
کرمان

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

Amir Dehghanian*

Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Shiraz
University of
Technology, Shiraz

Seyed Masoud Hosseini Sarvari

Professor,
Mechanical Engineering
Department,
Shahid Bahonar
University of Kerman,
Kerman

Inverse estimation of absorption and scattering coefficients distribution through variable index radiative media

Abstract: In this research, inverse estimation of absorption and scattering coefficients in variable index media is investigated. Forward problem is transient radiative transfer exposed to collimated laser pulse that is solved by discrete transfer method for one and two-dimensional problems. For solving the inverse problems and minimizing the objective function, which is expressed by the sum of square residuals between estimated and desired values, Conjugate gradient method is used. Then, different one and two-dimensional inverse samples with a simple and straightforward way for obtaining the sensitivity coefficients are investigated. The high accuracy of the recovered values even by adding the measurement errors to the exact values, shows the desirable performance of the inverse method. Although with increasing the measurement errors, the deviation of the evaluated values from the exact values increases, but identifying the position of impurities in the environment is evident with proper accuracy.

Keywords: Inverse estimation, Absorption and scattering coefficients, Variable index, The conjugate gradient method, Sensitivity coefficients

۱- مقدمه

و جهات مجزا در حل مستقیم و گرادیان مزدوج^۱ در حل معکوس، بازیابی کردند. ضرایب جذب و پراکندگی با دقت قابل قبولی بازیابی شدند، با این حال مقادیر تخمین زده شده ضریب پراکندگی دارای خطای کمتری بود. استفاده از روش SQP^{۱۱} در یافتن خواص حرارتی محیط‌های تابشی توسط قی و همکاران [۳۰] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده توسط ایشان، نشان‌دهنده قابلیت بالای روش استفاده شده در تخمین توزیع ضرایب جذب و پراکندگی در محیط‌های تأثیرگذار می‌باشد. حسینی سروری و دهقانان [۳۱، ۳۲] از روش‌های انتقال مجزا و گرادیان مزدوج جهت بازیابی توزیع ضریب جذب در محیط‌های تأثیرگذار خاکستری و غیر خاکستری در مسائل پایا استفاده کرد. ژنگ و همکاران [۳۳] با استفاده از روش بهینه سازی ACO^{۱۲} توانستند عمق اپتیکی و ضریب آبدوی^{۱۳} محیط را بازیابی کنند. قی و همکاران [۳۴] با در نظر گرفتن داده‌های تجربی مربوط به سیگنال‌های تابشی و استفاده از روش SQP در حل معکوس، به بازیابی خواص اپتیکی محیط تابشی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش مورد استفاده، در مسائل تجربی نیز کارایی بسیار بالایی دارد.

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس گرادیان مزدوج در کنار روش انتقال مجزا در حل مستقیم، مسئله پرتونگاری با تابش گرمایی در محیط‌های یک بعدی و دو بعدی با تغییرات دلخواه ضریب شکست بررسی می‌گردد و توزیع ضرایب جذب و انحراف درون محیط بازیابی می‌شوند. در صورت وجود ناخالصی و یا ناهمگنی درون محیط، موقعیت و شکل آن نیز بازیابی می‌شود که عملاً خواسته اصلی در مسائل پرتونگاری با تابش گرمایی می‌باشد.

۲- روابط و معادلات

ابتدا حل مستقیم مسئله انتقال تابش گذرا درون محیط تأثیرگذار با ضریب شکست متفاوت ارائه می‌گردد و برای حل آن نیز از روش انتقال مجزا استفاده می‌شود. روش انتقال مجزا مبتنی بر ردیابی مسیر پرتوها از سطحی به سطح دیگر در میدان حل می‌باشد و تأثیرات ضریب شکست درون محیط نیز اعمال می‌گردد (شکل ۱).

بررسی اثر تابش لیزرهای پالس کوتاه در محیط‌های تابشی در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱، ۲]. به دلیل ماهیت گذرای پرتوهای تابشی لیزر، سیگنال‌های تابشی در مباحث پرتونگاری با تابش گرمایی^۱ مورد توجه زیادی قرار گرفته است. پرتونگاری با تابش گرمایی یک روش پرتابل^۲ و غیر مخرب^۳ در بازیابی خواص تابشی بافت‌های بیولوژیکی می‌باشد [۳-۵].

تمامی روش‌های انتقال حرارت معکوس در بازیابی خواص تابشی نیازمند یک مدل مناسب مربوط به روش مستقیم برای حل معادله انتقال تابش و یافتن سیگنال‌های تابشی می‌باشد. روش‌های عددی متفاوتی برای یافتن سیگنال‌های تابشی گذرا توسط محققین به کار برده شده‌اند [۶-۲۱]. در سالیان اخیر، روش‌های متفاوتی که تغییرات ضریب شکست در محیط‌های تابشی را برای حل معادله انتقال تابش در نظر می‌گیرد، به کار رفته است. ونگ و وو [۲۲] از روش جهات مجزا^۴ (DOM) برای حل معادله انتقال تابش در محیط‌های با توزیع پیوسته ضریب شکست استفاده کردند. روش VDOM^۵ توسط دهقانان و سروری [۲۳] برای حل مسئله انتقال تابش گذرا در محیط‌های یک بعدی با توزیع دلخواه ضریب شکست به کار برده شد. ونگ و همکاران [۲۴] روش نمونه کارلو^۶ (MCM) را برای حل معادله انتقال تابش گذرا در چنین محیط‌هایی به کار بردند. روش DRESOR^۷ در تحلیل مسائل انتقال تابش گذرا در محیط‌های با ضریب شکست متغیر نیز توسط ونگ و همکاران [۲۵] مورد استفاده قرار گرفت. یملی و همکاران [۲۶] نیز از روش LBM^۸ برای حل معادله انتقال تابش گذرا در محیط‌های با ضریب شکست متغیر استفاده کردند. اخیراً دهقانان و سروری [۲۷] روش انتقال مجزا^۹ را برای حل معادله انتقال تابش گذرا در محیط‌های یک بعدی و چند بعدی با توزیع پیوسته و ناپیوسته ضریب شکست، گسترش دادند. روش‌های متفاوت انتقال حرارت معکوس برای بازیابی خواص تابشی در محیط‌های یک بعدی و چند بعدی ارائه شده است. کیائو و همکاران [۲۸، ۲۹] خواص تابشی در محیط‌های دو بعدی را با کمک روش‌های حجم محدود

⁸ Lattice Boltzmann method⁹ Discrete transfer method¹⁰ Conjugate gradient method¹¹ Sequential quadratic programming¹² Ant Colony optimization¹³ Albedo¹ Optical Tomography² Portable³ Noninvasive⁴ Discrete ordinates method⁵ Variable discrete ordinates method⁶ Monte Carlo method⁷ Distributions of ratios of energy scattered or reflected method

جهته شدت تابشی بر مجذور ضریب شکست به صورت زیر به- دست می آید.

$$\mathcal{G}_c = \mathcal{G}_p \left(t - \int_0^x n(x) dx / C_0 \right) \exp^{-\int_0^x \beta dx} \quad (5)$$

اینک با ادغام روابط (۱)، (۳) و (۴) و مقداری ساده سازی خواهیم داشت:

$$\frac{1}{C} \frac{\partial \mathcal{G}_d}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}_d}{\partial s} = -\beta \mathcal{G}_d + \psi_t \quad (6)$$

که ψ_t برابر مجموع مؤلفه های تک جهته و دیفیوز است و مطابق روابط زیر تعیین می شوند.

$$\psi_d = n^2 \kappa I_b + \frac{\sigma}{4\pi} \int \mathcal{G}_d \phi d\Omega \quad (7\text{-الف})$$

$$\psi_c = \frac{\sigma}{4\pi} \int \mathcal{G}_c \phi d\Omega \quad (7\text{-ب})$$

با گسسته سازی عبارت مشتق زمانی معادله (۶) و همین طور با انتگرال گیری از آن حول نقاط ورود و خروج پرتو به سلول، با فرض خواص تابشی ثابت درون آن، رابطه زیر به دست می آید.

$$\mathcal{G}_{d,t}^{out} = \mathcal{G}_{d,t}^{in} \exp\left(-\frac{\beta \Delta s}{B}\right) + \left[\frac{B\psi_t}{\beta} + \frac{\mathcal{G}_{d,t-\Delta t}^{ave}}{1 + \beta C \Delta t} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta \Delta s}{B}\right) \right] \quad (8)$$

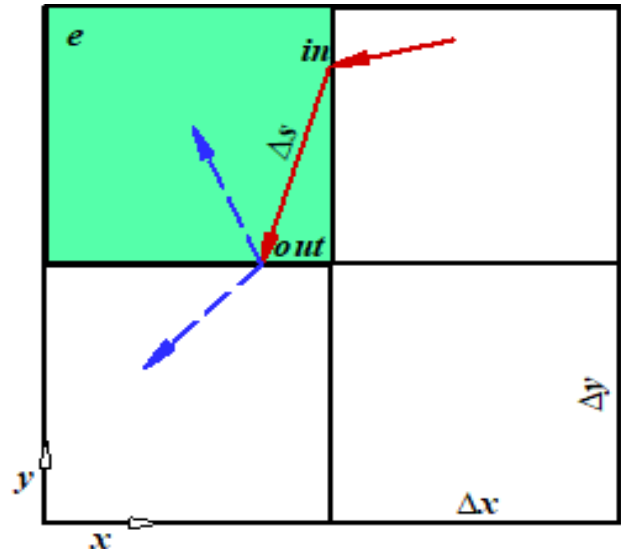
بالانویس های in و ave به ترتیب معرف مقدار ورودی، خروجی و متوسط کمیت مورد نظر در حجم کنترل است. مقدار B نیز عبارت است از:

$$B = \frac{\beta C \Delta t}{1 + \beta C \Delta t} \quad (9)$$

برای یافتن شار حرارتی بر مجذور ضریب شکست روی دیواره ها رابطه زیر به کار می رود [۳۵].

$$\Theta_{d,w} = \varepsilon_w \left(\pi I_{bw} - \sum_{r'=1}^{R'} \mathcal{G}_{d,r',w} \bar{\omega}_{r',w} \right) \quad (10)$$

که $\bar{\omega}_{r',w}$ وزن در نظر گرفته شده برای شار حرارتی مرتبط با جهت r' روی سطح می باشد. برای دسترسی به توضیحات بیشتر مربوط به این روش می توان به [۲۷، ۳۵] رجوع کرد.



شکل ۱ حرکت پرتو درون یک المان نمونه در محیط با ضریب شکست متغیر

معادله انتقال تابش گذرا در محیط های تأثیرگذار با ضریب شکست متغیر به صورت زیر است [۲۵].

$$\frac{1}{C} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial s} + \beta \mathcal{G} = \psi \quad (1)$$

که C معرف سرعت پرتو درون محیط و ضریب اضمحلال β نیز برابر با مجموع ضریب جذب κ و ضریب پراکندگی σ است. $\psi = \frac{I}{n^2}$ معرف شدت تابشی بر مجذور ضریب شکست و $\frac{S}{n^2}$ برابر با ترم تولید بر مجذور ضریب شکست می باشد و با رابطه زیر بیان می گردد.

$$\psi = \kappa I_b + \frac{\sigma}{4\pi} \int \mathcal{G} \phi d\Omega \quad (2)$$

در رابطه بالا I_b شدت تابش جسم سیاه مربوط به محیط و ϕ تابع فاز انحراف می باشد. هنگامیکه مرز محیط در معرض تابش تک جهته قرار گیرد، عبارت شدت تابش محیط برابر با مجموع مؤلفه های تک جهته ψ_c و دیفیوز ψ_d می باشد.

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_c + \mathcal{G}_d \quad (3)$$

تغییرات مؤلفه تک جهته تابش در محیط مورد نظر، با حل رابطه زیر حاصل می شود.

$$\frac{d\mathcal{G}_c}{ds} = -\beta \mathcal{G}_c \quad (4)$$

در پژوهش حاضر برای شدت تابش تک جهته از پالس گوسی [۲۳] استفاده شده است. با حل معادله (۴)، تغییرات مؤلفه تک

در ادامه گفته می‌شود، محاسبه می‌گردند. اینک گرادیان تابع هدف، ضریب مزدوج، جهت کاهش و اندازه گام جستجو محاسبه می‌شوند. سپس با کمک رابطه (۱۱) بردار پارامترهای مجهول به‌روز می‌شود. این فرآیند تکرار می‌گردد تا معیار توقف مربوط به تابع هدف برقرار شود. با قرار دادن ضرایب جذب یا انحراف در بردار مقادیر مجهول $\vec{P} = \vec{\kappa}(\vec{\sigma})$ و در نظر گرفتن شارهای حرارتی روی دیواره‌ها به عنوان مقادیر ارزیابی شده $\vec{Z}_{ev} = \vec{q}_{ev,w}$ ، مسئله معکوس قابل حل می‌باشد. بدین‌صورت که برای محاسبه درایه‌های ماتریس حساسیت نیاز است که از مقادیر ارزیابی شده نسبت به مجهولات مسئله، مشتق‌گیری شود.

$$J_{mn} = (\partial q_{ev,d,w})_m / \partial \kappa_n(\sigma_n) \quad (15)$$

که m و n به ترتیب شمارنده مجهولات و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند. همین روند را برای قسمت تک جهت نیز باید انجام داد و سپس مقادیر متناظر ترم‌های دیفیوز و تک جهت جمع کردند تا درایه‌های ماتریس حساسیت به‌دست آیند.

ذکر این نکته ضروری است که بازبایی خواص تابشی در محیط‌های تأثیرگذار در مسئله گذرا، به دسته مسائل انتقال حرارت معکوس غیرخطی که در آن‌ها ضرایب ماتریس حساسیت وابسته به مجهولات مسئله است و باید در هر تکرار محاسبه کردند که این امر موجب طولانی شدن روند حل مسئله می‌گردد.

۳- نتایج

در ابتدا به اعتبارسنجی روش انتقال مجزا در حل مستقیم پرداخته می‌شود. محیط یک بعدی که دیواره سمت چپ در معرض تابش تک‌جهته لیزر می‌باشد و محیط و دیواره مقابل بدون تابش و سرد می‌باشند را در نظر بگیرید. مسئله برای سه توزیع متفاوت خطی ضریب شکست مطابق روابط (۱۶) تا (۱۸) حل می‌گردد. محیط به ۵۰۰ المان یکنواخت تقسیم می‌شود و ۹۰ زاویه قطبی برای حل مسئله در نظر گرفته می‌شود، تلاش شده‌است تا در این حالت نتایج به صورت مقادیر بی‌بعد شده نرخ انتقال حرارت تابشی روی دیواره بر بیشینه شدت تابشی لیزر، رفلکتانس^۱ و ترنس‌میتانس^۲، در زمان‌های بی‌بعد $(t^* = BC_0 t)$ متفاوت در شکل (۲) ارائه شوند. در حالت کلی رفلکتانس مرتبط با دیواره‌ای می‌باشد که تحت تابش لیزر است و مقدار آن برابر است با $R = Q_a / I_0$ و ترنس‌میتانس مرتبط با دیواره یا دیواره-های دیگر می‌باشد که رابطه آن نیز برابر با $T = (Q_a + Q_c) / I_0$

در پژوهش حاضر از روش گرادیان مزدوج برای بازبایی توزیع ضرایب جذب و انحراف درون محیط تأثیرگذار با ضریب شکست متغیر استفاده شده است. فرآیند تکراری جهت کمینه کردن تابع هدف F در روش حاضر به صورت زیر ارائه می‌گردد [۳۶].

$$\vec{P}^{k+1} = \vec{P}^k - \gamma^k \vec{d}^k \quad (11)$$

که در آن اندازه گام جستجو، \vec{d}^k جهت کاهش، \vec{P} بردار مجهولات و بالانویس k شمارنده تکرار است. جهت کاهش با کمک رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$\vec{d}^k = \nabla F(\vec{P}^k) + \alpha^k \vec{d}^{k-1} \quad (12)$$

در رابطه بالا ∇F همان گرادیان تابع هدف می‌باشد و ضریب مزدوج نیز مطابق روابط زیر تعیین می‌گردد.

$$\alpha^k = \begin{cases} 0 & k = 0 \\ \frac{\sum_{n=1}^N [\nabla F_n(\vec{P}^k)]^2}{\sum_{n=1}^N [\nabla F_n(\vec{P}^{k-1})]^2} & k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (13)$$

که N معرف تعداد مجهولات است.

اندازه گام جستجو که در معادله (۱۱) به کار رفته است نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\gamma^k = \frac{[\vec{J}^k \vec{d}^k]^T [\vec{Z}_{ev}(\vec{P}^k) - \vec{Z}_{me}]}{[\vec{J}^k \vec{d}^k]^T [\vec{J}^k \vec{d}^k]} \quad (14)$$

در رابطه بالا J ماتریس حساسیت است، \vec{Z}_{me} بردار مقادیر مطلوب یا همان شارهای تابشی دیواره‌های محیط در حل دقیق است و \vec{Z}_{ev} نیز بردار مقادیر ارزیابی شده یا همان شارهای حرارتی دیواره‌های محیط در هر تکرار است.

روند مسئله انتقال حرارت معکوس حاضر بدین‌صورت است که ابتدا برای پارامترهای مجهول یک حدس اولیه در نظر گرفته می‌شود و با کمک آن بردار مقادیر ارزیابی شده به دست می‌آید. سپس تابع هدف مسئله که برابر با مجموع تفاضل مربعات مقادیر ارزیابی شده و دقیق است، محاسبه می‌گردد و در صورتیکه از مقدار بسیار کوچک مربوط به معیار توقف پیشرفت مسئله، کمتر نباشد، مقادیر ماتریس حساسیت در هر تکرار مطابق روشی که

² Transmittance

¹ Reflectance

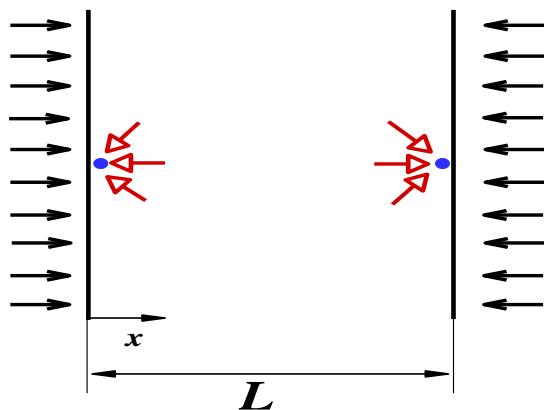
که روش انتقال مجزا دارای دقت مناسبی می‌باشد. میزان خطاهای متوسط رفلکتانس و ترنس‌میتانس برای روش انتقال مجزا نسبت به روش DRESOR در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ خطاهای متوسط رفلکتانس و ترنس‌میتانس برای روش انتقال مجزا نسبت به روش DRESOR

شماره معادله	E_R (%)	E_T (%)
۱۶	۱/۳۳۷	۳/۲۷۰
۱۷	۱/۳۸۰	۳/۹۴۱
۱۸	۱/۰۷۲	۴/۷۵۳

در ادامه به ارائه مسائل انتقال حرارت معکوس پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

در ابتدا محیط یک بعدی تأثیرگذار با عمق یک متر در نظر گرفته می‌شود. محیط و دیواره‌ها همگی سرد می‌باشند. هر دو دیواره در معرض تابش تک جهته لیزر مطابق شکل (۳) قرار دارند.



شکل ۳ مدل فیزیکی استفاده شده برای مسائل یک بعدی

در مسئله اول خواص تابشی محیط به صورت ناپیوسته به دو قسمت مطابق روابط (۱۹) تا (۲۱) تقسیم می‌شود. در مسئله دوم یک توزیع خطی برای خواص تابشی این بار مطابق روابط (۲۲) تا (۲۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$K = \begin{cases} 1.0 & , 0 \leq x \leq 0.5 \\ 3.0 & , 0.5 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \quad (19)$$

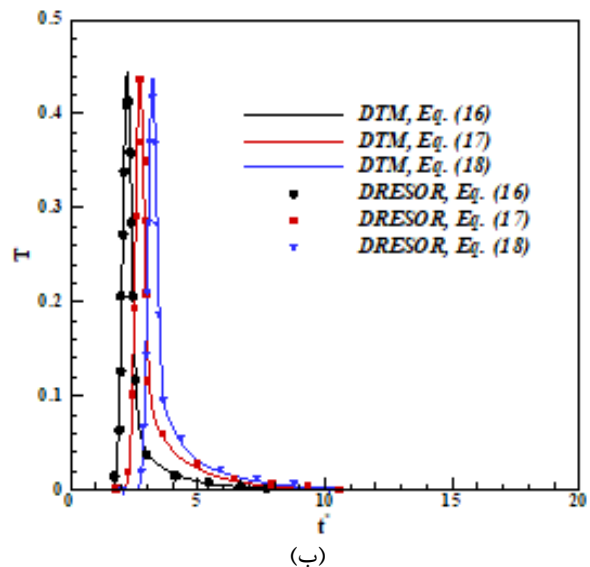
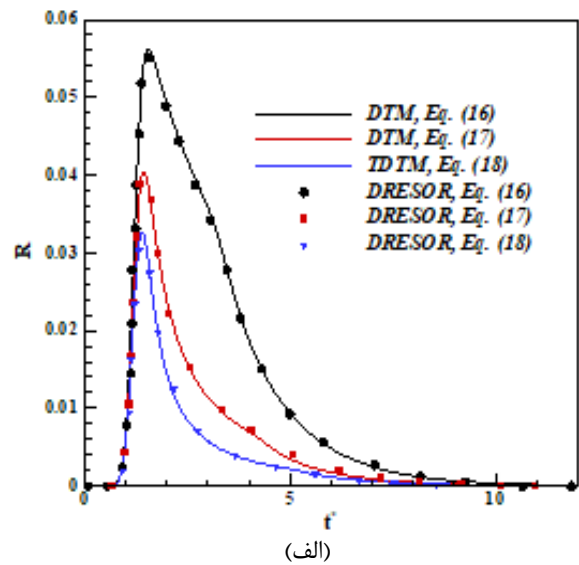
$$\sigma = \begin{cases} 2.0 & , 0 \leq x \leq 0.5 \\ 4.0 & , 0.5 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \quad (20)$$

است. مقادیر Q_c و I_0 به ترتیب عبارتند از شار حرارتی مربوط به ترم‌های دیفیوز و تک‌جهته و همین‌طور بیشینه شدت تابشی لیزر. محیط دارای انحراف ایزوتروپیک با ضریب آلبدو $\omega = 1.0$ و عمق اپتیکی $\tau_L = 1.0$ می‌باشد.

$$n = 1 \quad (16)$$

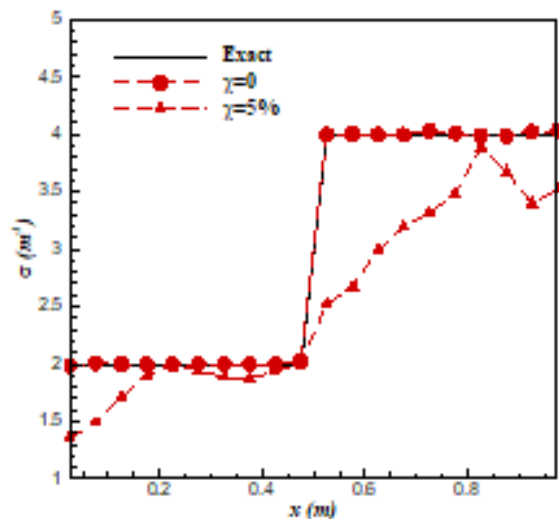
$$n = 1 + x \quad (17)$$

$$n = 1 + 2x \quad (18)$$



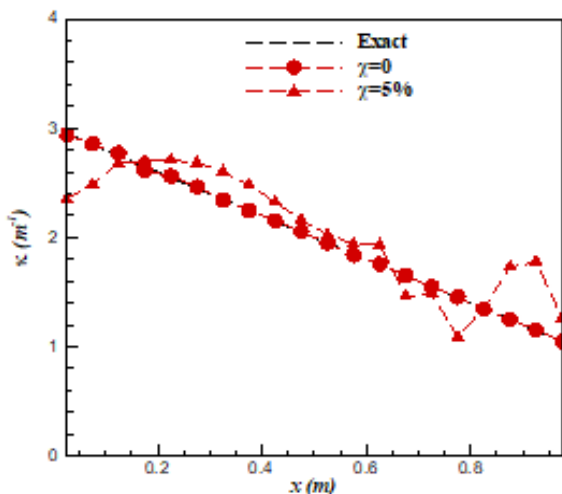
شکل ۲ تغییرات رفلکتانس و ترنس‌میتانس برای محیط ایزوتروپیک با ضریب آلبدو $\omega = 1.0$ عمق اپتیکی $\tau_L = 1.0$ و سه توزیع ضریب شکست مطابق روابط (۱۶) تا (۱۸)

همانگونه که از نمودارهای این قسمت مشخص می‌باشد، با مقایسه نتایج حاصل از انتقال مجزا و DRESOR [۲۵]، درمی‌یابیم

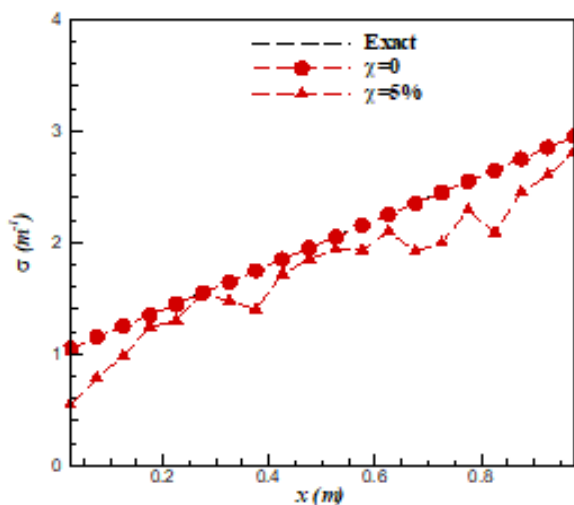


(ب)

شکل ۴ بازایی همزمان؛ الف- توزیع ضریب جذب و ب- توزیع ضریب انحراف برای مسئله یک بعدی با خواص تابشی ناپیوسته



(الف)



(ب)

شکل ۵ بازایی همزمان؛ الف- توزیع ضریب جذب و ب- توزیع ضریب انحراف برای مسئله یک بعدی با خواص تابشی پیوسته خطی

$$n = \begin{cases} 1.0 & , 0 \leq x \leq 0.5 \\ 2.0 & , 0.5 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\kappa = 3 - 2x \quad (22)$$

$$\kappa = 1 + 2x \quad (23)$$

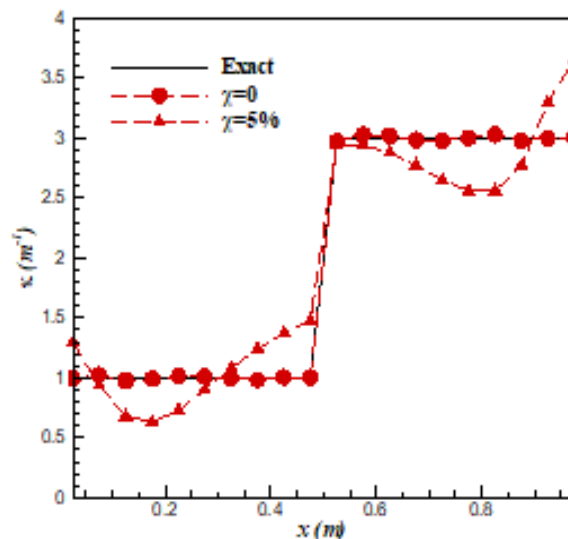
$$n = 1 + x \quad (24)$$

توزیع ضرایب جذب و انحراف بازایی شده در شکل‌های (۴) و (۵) بدون در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری و با در نظر گرفتن ۵ درصد خطای اندازه‌گیری در مقادیر دقیق نشان داده شده‌است. مشخص است که با وجود داده‌های همراه با خطا، مقادیر بازایی شده با مقادیر دقیق همخوانی خوبی دارد. دقت مسائل معکوس با محاسبه ریشه میانگین مجموع مربعات اختلاف مقادیر دقیق و تخمین‌زده شده یا معیار خطای RMS مطابق رابطه (۲۵) بیان می‌شود.

$$RMS = \frac{1}{p_{ave}} \left(\sum_{n=1}^N (p_{ex,n} - p_{e,n})^2 / N \right)^{1/2} \quad (25)$$

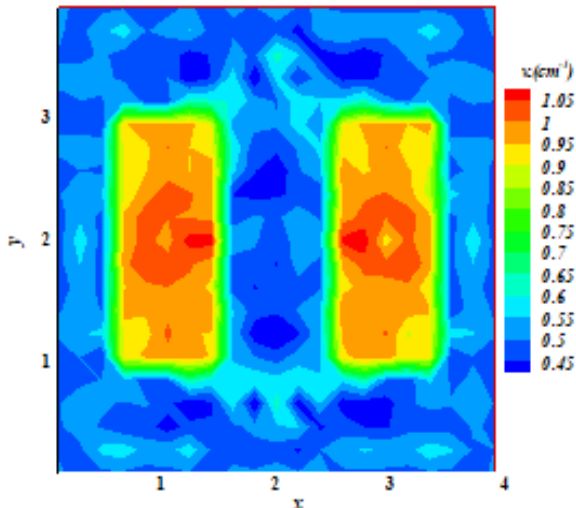
$$, \quad p = \kappa \text{ or } \sigma$$

در حالت بدون در نظر گرفتن خطاهای اندازه‌گیری، عملاً توزیع ضرایب جذب و پراکندگی به صورت دقیق و با خطای RMS کمتر از ۰/۰۱ برای مسائل اول و دوم به‌دست آمد. همچنین با در نظر گرفتن ۵ درصد خطای اندازه‌گیری، توزیع ضرایب جذب و پراکندگی با خطای RMS کمتر از ۰/۲ برای هر دو مسئله به‌دست آمد.

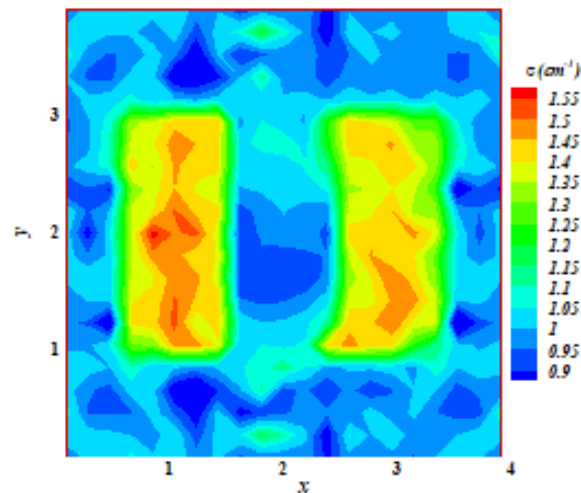


(الف)

اینک محیط دو بعدی جذب کننده و منحرف کننده با ابعاد ۴ سانتی متر در ۴ سانتی متر را مطابق شکل (۶) در نظر بگیرید.



(الف)

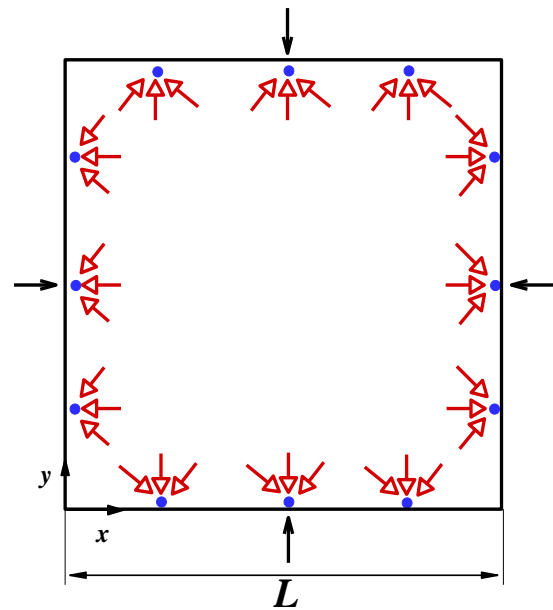


(ب)

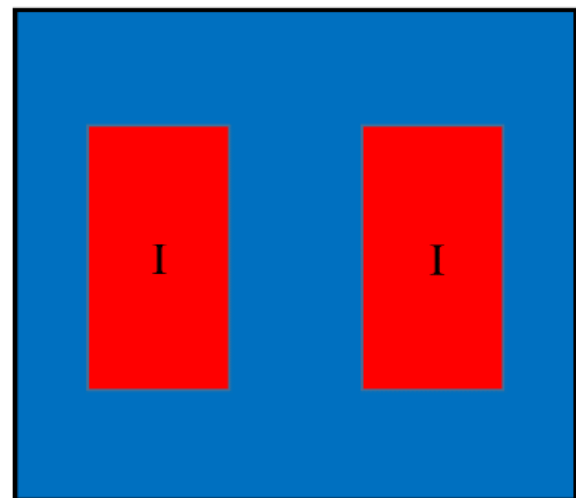
شکل ۸ نتایج بازیابی توزیع؛ الف- ضریب جذب، ب- ضریب انحراف برای مسئله دو بعدی

برای ارزیابی دقیق تر روش ارائه شده، خطای تصادفی به میزان ۵ درصد در نظر گرفته شده است که نتایج بازیابی خواص تابشی در این حالت نیز در شکل های (۹-الف) و (۹-ب) نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش میزان خطای مقادیر اندازه گیری، دقت روش حاضر در بازیابی خواص تابشی کاهش می یابد؛ به نحوی که میزان خطای RMS در بازیابی توزیع ضرایب جذب از مقدار ۰/۰۷۱ به ۰/۱۹۸ و در بازیابی توزیع ضرایب پراکندگی از ۰/۰۷۴ به ۰/۲۱۱ می رسد، با این حال، موقعیت مکان ناخالصی ها به صورت مؤثر به دست آمد.

محاسبات حل مسایل معکوس پژوهش حاضر بر روی یک سیستم Core i7 7700k انجام شده است. زمان متوسط محاسبات به ازای هر تکرار حل معکوس برای یک مسئله یک بعدی با محیط ایزوتروپیک و عمق اپتیکی واحد، حدود ۱۱ ثانیه می باشد. این مقدار برای مسئله دوبعدی، حدودا برابر با ۳۰



شکل ۶ مدل فیزیکی استفاده شده برای مسئله دو بعدی



شکل ۷ آرایش ناخالصی های موجود در محیط دو بعدی

درون محیط ناخالصی هایی مطابق شکل (۷) در نظر بگیرید. ضریب جذب و انحراف محیط پس زمینه به ترتیب برابر 0.5 cm^{-1} و 1 cm^{-1} می باشد. در حالیکه ضریب جذب و انحراف ناخالصی ها به ترتیب برابر 1.0 cm^{-1} و 1.5 cm^{-1} است. برای محیط پس زمینه و همین طور ناخالصی ها ضریب شکست های به ترتیب ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است.

نتایج مربوط به بازیابی خواص تابشی در شکل های (۸-الف) و (۸-ب) آورده شده است که دقت مناسب این روش را برای مسئله مورد نظر نشان می دهد.

ضرایب حساسیت نقش اساسی در موفقیت روش حل و دقت نتایج نهایی دارد. در مسائل ارائه شده، ضرایب حساسیت با استفاده از یک روش ساده و قابل فهم، مشابه روش مستقیم به-دست آمد. برای نشان دادن دقت روش معکوس، چند مسئله متنوع ارائه گردید. اگرچه با افزایش میزان خطای مقادیر اندازه-گیری شده، انحراف مقادیر بازیابی شده از مقادیر دقیق، افزایش یافت، اما شناسایی موقعیت ناخالصی‌ها درون محیط، با دقتی مناسب مشاهده گردید.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

C	سرعت پرتو تابشی (m/s)
\vec{d}	بردار جهت کاهش
F	تابع هدف
I	شدت تابشی (W/m^2sr)
J	ماتریس حساسیت
n	ضریب شکست
\vec{P}	بردار مجهولات
q	شار حرارتی تابشی (W/m^2)
s	جهت فضایی (K or $^{\circ}C$)
t	زمان (s)
\vec{Z}	بردار مقادیر دقیق

علائم یونانی

α	ضریب مزدوج
β	ضریب اضمحلال
ψ	تولید تابش بر مجذور ضریب شکست
ϑ	شدت تابش بر مجذور ضریب شکست (W/m^2sr)
γ	اندازه گام جستجو
Θ	شار حرارتی تابشی بر مجذور ضریب شکست (W/m^2)
ϕ	تابع فاز انحراف
Ω	زاویه فضایی

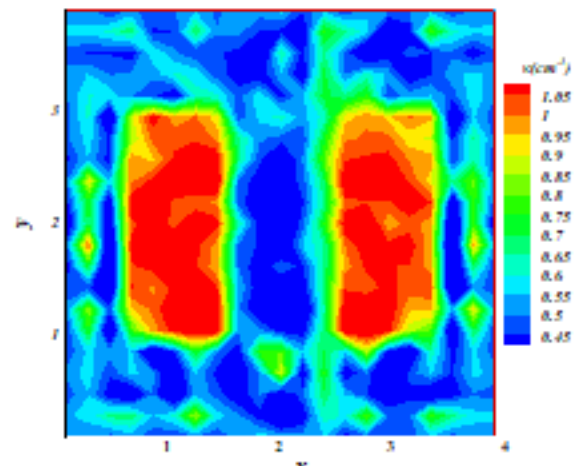
زیرنویس‌ها

b	جسم سیاه
c	تک جهته
d	دیفیوز
ev	ارزیابی شده
me	اندازه‌گیری شده
P	پالس
t	کل
w	دیواره

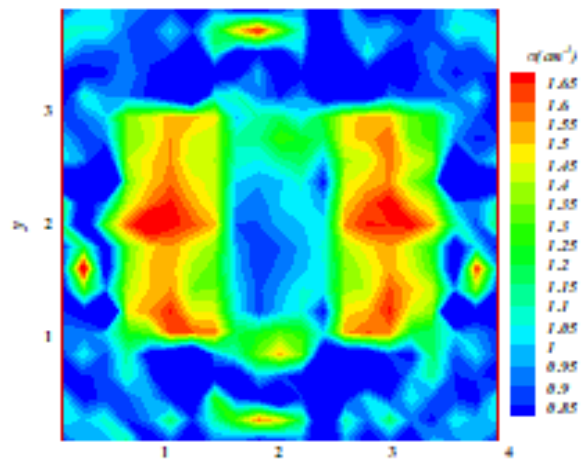
بالانویس‌ها

ave	متوسط
in	ورودی
k	شمارنده تکرار
out	خروجی

دقیقه است. ضمناً از زبان برنامه نویسی FORTRAN برای حل معادلات پژوهش حاضر استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹ نتایج بازیابی توزیع؛ الف- ضریب جذب، ب- ضریب انحراف برای مسئله دو بعدی با در نظر گرفتن ۵ درصد خطای اندازه‌گیری

۴- نتیجه‌گیری

مسئله انتقال حرارت معکوس در پژوهش حاضر، پرتونگاری با تابش گرمایی در محیط‌های تأثیرگذار تابشی می‌باشد. مسئله مستقیم در تحقیق حاضر شامل انتقال حرارت تابشی گذرا درون محیط‌های تأثیرگذار با تغییرات دلخواه ضریب شکست است. مسئله مستقیم با استفاده از روش انتقال مجزا در حالت‌های یک بعدی و دو بعدی حل گردید. دقت حل مستقیم انجام گرفته با مقایسه نتایج آن با حل‌های دیگر محققان، مورد بررسی قرار گرفت. روش بهینه‌سازی گرادیان مزدوج به عنوان الگوریتم حل مسئله معکوس مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، محاسبه

۶- تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) انجام گرفت.

۷- مراجع

- [9] J. Ma, Y. Sun, and X. Li, "Predicting radiative intensity in transient radiative transfer with an inhomogeneous medium by spectral element discontinuous Galerkin method," *Infrared Physics & Technology*, vol. 130, p. 104624, 2023/05/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104624>.
- [10] S. C. Mishra, P. Chugh, P. Kumar, and K. Mitra, "Development and comparison of the DTM, the DOM and the FVM formulations for the short-pulse laser transport through a participating medium," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 11, pp. 1820-1832, 2006/06/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.043>.
- [11] C.-H. Wang, Y.-Y. Feng, Y. Zhang, H.-L. Yi, and H.-P. Tan, "Transient/time-dependent radiative transfer in a two-dimensional scattering medium considering the polarization effect," *Opt. Express*, vol. 25, no. 13, pp. 14621-14634, 2017/06/26 2017, doi: 10.1364/OE.25.014621.
- [12] P. Sadooghi, "Transient thermal radiation heat transfer in a reinforced plastic coating with anisotropic optical properties," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 123, pp. 432-436, 2018/08/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.113>.
- [13] Y. A. Ilyushin, "Transient polarized radiative transfer in cloud layers: numerical simulation of imaging lidar returns," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 36, no. 4, pp. 540-548, 2019/04/01 2019, doi: 10.1364/JOSAA.36.000540.
- [14] F.-Z. Zhao, H. Qi, G. Yao, and Y.-T. Ren, "Efficient optical parameter mapping based on time-domain radiative transfer equation combined with parallel programming," *Opt. Express*, vol. 28, no. 1, pp. 270-287, 2020/01/06 2020, doi: 10.1364/OE.381713.
- [15] X. Liu, Y. Huang, C.-H. Wang, and K. Zhu, "Solving steady and transient radiative transfer problems with strong inhomogeneity via a lattice Boltzmann method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 155, p. 119714, 2020/07/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119714>.
- [16] Y.-Y. Feng and C.-H. Wang, "Discontinuous finite element method applied to transient pure and coupled radiative heat transfer," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 122, p. 105156, 2021/03/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105156>.
- [17] Y.-Y. Feng and C.-H. Wang, "On the performance of a MRT lattice Boltzmann algorithm for transient
- [1] Z. Zhang, W. Qiu, G. Zhang, D. Liu, and P. Wang, "Progress in applications of shockwave induced by short pulsed laser on surface processing," *Optics & Laser Technology*, vol. 157, p. 108760, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108760>.
- [2] V. H. Kiyani *et al.*, "Femtosecond Ti: Sa ultra short-pulse laser irradiation effects on the properties and morphology of the zirconia surface after ageing," *Ceramics International*, vol. 47, no. 4, pp. 4455-4465, 2021/02/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.006>.
- [3] A. Taruttis and V. Ntziachristos, "Advances in real-time multispectral optoacoustic imaging and its applications," *Nature Photonics*, vol. 9, no. 4, pp. 219-227, 2015/04/01 2015, doi: 10.1038/nphoton.2015.29.
- [4] A. P. Gibson, J. C. Hebden, and S. R. Arridge, "Recent advances in diffuse optical imaging," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 50, no. 4, p. R1, 2005/02/02 2005, doi: 10.1088/0031-9155/50/4/R01.
- [5] A. Dehghanian and S. M. Hosseini Sarvari, "Reconstruction of Absorption and Scattering Coefficients in a One-Dimensional Parallel Plane Variable Index Media," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 47, no. 2, pp. 433-452, 2023/06/01 2023, doi: 10.1007/s4099-8-00535-022-7
- [6] J. Marco, W. Jarosz, D. Gutierrez, and A. Jarabo, "Transient photon beams," presented at the ACM SIGGRAPH 2017 Posters, Los Angeles, California, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3102163.3102244>.
- [7] Q. Cheng, H.-C. Zhou, Z.-F. Huang, Y.-L. Yu, and D.-X. Huang, "The Solution of Transient Radiative Transfer With Collimated Incident Serial Pulse in a Plane-Parallel Medium by the DRESOR Method," *Journal of Heat Transfer*, vol. 130, no. 10, 2008, doi: 10.1115/1.2945906.
- [8] K. M. Katika and L. Pilon, "Modified method of characteristics in transient radiation transfer," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 98, no. 2, pp. 220-237, 2006/03/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2005.05.086>.

- [26] G. Lambou Ymeli, Y.-Y. Feng, and C.-H. Wang, "Lattice Boltzmann simulations on transient radiative transfer problems in irregular geometries with constant or graded refractive index," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 197, p. 108750, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108750>.
- [27] A. Dehghanian and S. M. H. Sarvari, "Transient radiative transfer in variable index media using the discrete transfer method," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 255, p. 107259, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107259>.
- [28] Y.-B. Qiao, H. Qi, F.-Z. Zhao, and L.-M. Ruan, "Accurate reconstruction of the optical parameter distribution in participating medium based on the frequency-domain radiative transfer equation*," *Chinese Physics B*, vol. 25, no. 12, p. 120201, 2016/10/25 2016, doi: 10.1088/1674-1056/25/12/120201.
- [29] Y. Qiao, H. Qi, Q. Chen, L. Ruan, and H. Tan, "Multi-start iterative reconstruction of the radiative parameter distributions in participating media based on the transient radiative transfer equation," *Optics Communications*, vol. 351, pp. 75-84, 2015/09/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.04.048>.
- [30] H. Qi, Y.-B. Qiao, Y.-T. Ren, J.-W. Shi, Z.-Y. Zhang, and L.-M. Ruan, "Application of the sequential quadratic programming algorithm for reconstructing the distribution of optical parameters based on the time-domain radiative transfer equation," *Opt. Express*, vol. 24, no. 21, pp. 24297-24312, 2016, doi: 10.1364/OE.24.024297.
- [31] S. M. Hosseini Sarvari, "Inverse Reconstruction of Path-Length κ -Distribution in a Plane-Parallel Radiative Medium," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 68, no. 3, pp. 336-354, 2015/08/03 2015, doi: 10.1080/10407782.2014.985999.
- [32] A. Dehghanian and S. M. Hosseini Sarvari, "Inverse Estimation of Main Parameters of Spectral Line-Based Weighted Sum of Gray Gases Model With Few Gray Gases to Simulate the Radiation in Nongray Media," *Journal of Heat Transfer*, vol. 140, no. 2, 2017, doi: 10.1115/1.4037496.
- [33] B. Zhang, H. Qi, Y. T. Ren, S. C. Sun, and L. M. Ruan, "Inverse transient radiation analysis in one-dimensional participating slab using improved Ant Colony Optimization algorithms," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 133, pp. 351-363, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.08.020>.
- radiative transfer problems," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 128, p. 105628, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105628>.
- [18] S. Mishra and R. Molinaro, "Physics informed neural networks for simulating radiative transfer," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 270, p. 107705, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107705>.
- [19] O. Korobkin *et al.*, "Axisymmetric Radiative Transfer Models of Kilonovae," *The Astrophysical Journal*, vol. 910, no. 2, p. 116, 2021/04/02 2021, doi: 10.3847/1538-4357/abe1b5.
- [20] W. Jamshed, K. S. Nisar, R. J. P. Gowda, R. N. Kumar, and B. C. Prasannakumara, "Radiative heat transfer of second grade nanofluid flow past a porous flat surface: a single-phase mathematical model," *Physica Scripta*, vol. 96, no. 6, p. 064006, 2021/04/20 2021, doi: 10.1088/1402-4896/abf5vd.
- [21] Y. Sun, Y. Yu, L. Jiang, and S. Zheng, "Transient three-dimensional radiative heat transfer analysis of a turbulent diffusion flame-with a focus on the effect of angular discretization scheme," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 137, p. 106300, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106300>.
- [22] J.-M. Wang and C.-Y. Wu, "Transient radiative transfer in a scattering slab with variable refractive index and diffuse substrate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 19, pp. 3799-3806, 2010/09/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.032>.
- [23] A. Dehghanian and S. M. H. Sarvari, "Transient radiative transfer in semi-transparent slab with arbitrary refractive index and collimated irradiation," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 117, p. 104731, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104731>.
- [24] C.-H. Wang, Q. Ai, H.-L. Yi, and H.-P. Tan, "Transient Radiative Transfer in a Graded Index Medium with Specularly Reflecting Surfaces," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 67, no. 11, pp. 1232-1252, 2015/06/03 2015, doi: 10.1080/10407782.2014.965060.
- [25] Z. Wang, Q. Cheng, and H. Zhou, "The DRESOR method for transient radiation transfer in 1-D graded index medium with pulse irradiation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 68, pp. 127-135, 2013/06/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.01.006>.

- [34] H. Qi *et al.*, "Experimental research on noninvasive reconstruction of optical parameter fields based on transient radiative transfer equation for diagnosis applications," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 222-223, pp. 1-11, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.09.032>.
- [35] S. M. Hosseini Sarvari, "Solution of multi-dimensional radiative heat transfer in graded index media using the discrete transfer method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 112, pp. 1098-1112, 2017/09/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.037>.
- [36] M. N. Ozisik, *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. Routledge, 2018.



رفتار دوشاخگی نانولوله های کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک در اثر بار هارمونیک متحرک

رضا خسروانیان

کارشناسی ارشد

رضا ابراهیمی*

استادیار،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه یاسوج، یاسوج

چکیده: یکی از مهم ترین کاربردهای نانولوله های کربنی (CNTs)، انتقال نانوذرات در سیستم های دارورسان است. در این کاربردها، نانولوله ها در معرض بار متحرک قرار می گیرند که منجر به ارتعاشات غیرخطی نانولوله می شود. بنابراین هدف اصلی این مطالعه، تحلیل رفتار دوشاخگی CNTs در اثر بار هارمونیک متحرک است. مدل سازی سیستم با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی غیرمحلّی و فنر وینکلر انجام شده است. روش های گلرکین و رانج-کوتا به ترتیب برای گسسته سازی و حل معادله حرکت به کار رفته اند. اثرات دامنه، فرکانس و سرعت نیروی هارمونیک متحرک روی پاسخ دینامیک غیرخطی سیستم، توسط نمودارهای دوشاخگی، صفحه فاز، طیف توان، مقاطع پوانکاره و ماکزیمم نمای لیاپانوف بررسی شده است. نتایج حاکی از رفتارهای غیرخطی متنوعی از جمله حرکات پریودیک، زیرهارمونیک، شبه پریودیک و آشوبناک در پاسخ سیستم است. نتایج نشان داد که در فرکانس های تحریک بالا، پاسخ سیستم با افزایش دامنه نیروی تحریک در وضعیت زیرهارمونیک باقی می ماند. ضمن اینکه با افزایش فرکانس تحریک می توان وقوع اولین رفتار نامنظم سیستم را به تأخیر انداخت.

واژه های راهنما: دوشاخگی، نانولوله های کربنی، بستر الاستیک وینکلر، تئوری الاستیسیته غیرمحلّی، بار متحرک هارمونیک

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

Reza
Khosravanian
M.Sc.

Reza Ebrahimi*
Assistant professor,
Faculty of
Engineering,
Yasouj University,
Yasouj

Bifurcations behavior of elastically embedded carbon nanotubes due to moving harmonic load

Abstract: One of the most significant applications of carbon nanotubes (CNTs) is transportation of nanoparticles in drug delivery systems. In these applications, nanotubes are subjected to moving loads, and this leads to nonlinear vibration of nanotubes. So, the main purpose of this study is to analyze bifurcations behavior of elastically embedded CNTs due to moving harmonic load. The model of the system is formulated by nonlocal Euler-Bernoulli beam theory and Winkler spring. The Galerkin and Rung-Kutta methods are used to discretize and solve the equation of motion, respectively. The effects of some parameters on the nonlinear response of the system are investigated by the bifurcation diagrams, phase plane portrait, power spectra, Poincaré map and the maximum Lyapunov exponent. The results indicated that, at high excitation frequency, the system stays in sub-harmonic motions by increasing the amplitude of the harmonic load. Occurrence of the first irregular motion can be delayed by increasing the excitation frequency.

Keywords: Bifurcation, Carbon nanotubes, Winkler elastic foundation, Nonlocal elasticity theory, Moving harmonic load

۱- مقدمه

روی بستر الاستیک را که تحت عبور نانوذرات قرار دارد، مدل-سازی کردند. در این مدل، لوله‌ها به صورت پوسته^۲ و بستر الاستیک با فنر وینکلر^۳ مدل شده است. همچنین نیروهای برهمکنش و اندروالس نیز لحاظ گردیده است. نتایج تأیید می‌کند که افزایش ضریب الاستیک بستر، منجر به کاهش تغییر شکل دینامیکی سیستم می‌شود. همچنین با افزایش سرعت نانوذرات، تأثیر پارامتر غیرمحملی روی پاسخ دینامیکی سیستم، افزایش می‌یابد. تانچوما و همکاران [۱۱] تحلیل ارتعاشات نانولوله کربنی حامل نانوذرات را بر اساس مدل تیر تیموشنکو و الاستیسیته غیرمحملی با در نظر گرفتن شرط مرزی لغزش و عدد نادسن ارائه کردند. آژمن و ایسن [۱۲] پاسخ دینامیکی یک نانولوله کربنی که تحت میدان مغناطیسی، میدان حرارتی و بار متحرک قرار گرفته است، محاسبه کرده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش پارامتر مقیاس طول دابلت^۴ منجر به کاهش سختی و نتیجتاً کاهش فرکانس بدون بعد سیستم می‌شود. ما و همکاران [۱۳] پس از استخراج معادلات حاکم بر حرکت یک نانولوله احاطه شده روی یک بستر الاستیک تحت عبور نانوذرات متحرک و تحریک پایه، نشان دادند که با افزایش جرم نانوذره و نتیجتاً افزایش اثرات اینرسی، اختلاف بین نتایج حاصل از نانو جرم عبوری با نانویروی عبوری بیشتر می‌شود. لنگ و چانگ [۱۴] با استفاده از کوپلینگ سیال - جامد و ایجاد جریان ناشی از تغییرات دما، مکانیزمی را برای انتقال نانوذرات در یک نانولوله کربنی طولانی، پیشنهاد نمودند. آنها بر اساس شبیه‌سازی‌های دینامیک ملکولی نشان دادند که یک میدان دمایی پررودیک، قادر به ایجاد یک جریان سیال پایدار و نتیجتاً انتقال نانوذرات در داخل نانولوله طویل است. کشتکار و همکاران [۱۵] پاسخ دینامیکی یک نانولوله کربنی حامل سیال و نانوذرات متحرک را با در نظر گرفتن شرایط مرزی لغزش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان سیال، فرکانس طبیعی سیستم کاهش می‌یابد. هاشمیان و همکاران [۱۶] پایداری دینامیکی یک نانوتیر را در اثر عبور نانوذرات، بر اساس تئوری گرادیان کرنش مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که ثابت برشی پاسترناک، ناحیه ناپایداری دینامیکی را به سمت سرعت‌های بالاتر تغییر می‌دهد. مطالعات بالا بر روی پاسخ ارتعاشات اجباری نانولوله‌ها در اثر بار متحرک انجام شده است. در حالیکه به دلیل وجود عوامل غیرخطی در معادلات حرکت، ممکن است پدیده‌های غیرخطی پیچیده‌ای مانند دوشاخگی^۵، حرکات شبه‌تناوبی کربنی^۶ و

نانولوله‌های کربنی^۱ (CNTs) به سبب داشتن خواص منحصر به فرد فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی در کاربردهای مختلف نانو تکنولوژی نظیر دارورسانی [۱]، بایوسنسورها [۲]، ترانزیستورها [۳] و ... استفاده می‌شوند. به کارگیری CNTs در سیستم‌های دارورسان به عنوان کانال‌های ملکولی و با هدف انتقال نانوذرات انجام می‌شود. لذا نانولوله‌های حامل نانوذرات، در معرض بارهای عرضی متحرکی قرار دارند که منجر به ارتعاشات عرضی در آنها می‌شود [۴]، [۵]. بر این اساس مطالعات زیادی روی رفتار ارتعاشی CNTs تحت بار متحرک انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

سیمسک [۶] ارتعاشات اجباری یک نانولوله کربنی با تکیه-گاه ساده را در معرض بار هارمونیک متحرک، مورد مطالعه قرار داده است. پاسخ‌های حوزه زمانی با استفاده از روش آنالیز مودال و انتگرال‌گیری مستقیم به دست آمده‌اند. تأثیر نسبت اندازه، سرعت و فرکانس تحریک بار متحرک روی پاسخ‌های دینامیکی سیستم بحث شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های دینامیکی به دست آمده از حل‌های غیرمحملی، بزرگتر از حل‌های کلاسیک متناظرشان هستند. برای مقادیر زیاد سرعت بار متحرک، تغییر شکل‌های دینامیکی، صرف‌نظر از فرکانس‌های تحریک، به سمت صفر میل می‌کند. هونگ و همکاران [۷] ارتعاشات ناشی از عبور ذرات متحرک در یک نانولوله کربنی قرار گرفته روی بستر الاستیک را مورد بررسی قرار دادند. رفتار بستر الاستیک به صورت خطی در نظر گرفته شده است. پاسخ زمانی به ازای پارامترهای مختلف، محاسبه شده است. پیرمادیان و همکاران [۸] با در نظر گرفتن اثرات اینرسی نانوذرات، نیروهای و اندروالسی و تئوری الاستیسیته غیرمحملی، مدلی را برای بررسی پایداری یک نانولوله کربنی تحت عبور نانوذرات روی بستر الاستیک پیشنهاد نمودند. نتایج حاکی از آن بود که در نظر گرفتن اثرات و اندروالسی و افزایش سختی بستر الاستیک منجر به بهبود پایداری سیستم می‌شود. سرپرست و همکاران [۹] ارتعاشات آزاد و اجباری یک نانولوله حامل سیال را در معرض بار متحرک و در محیط ترمومغناطیس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اثر سرعت بار متحرک روی رفتار دینامیکی سیستم، با افزایش تنش‌های پسماند سطحی افزایش می‌یابد. ناتساکا و همکاران [۱۰] رفتار دینامیکی یک نانولوله دوجداره

⁴ Doublet length scale parameter

⁵ Bifurcation

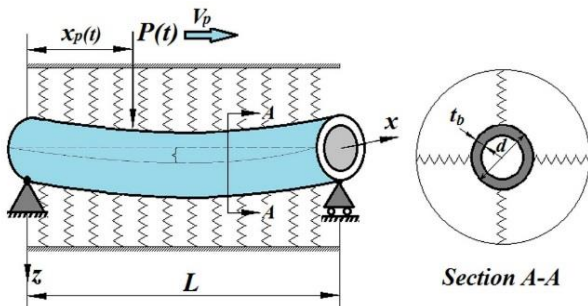
⁶ Quasi-periodic

¹ Carbon nanotubes

² Shell

³ Winkler

- شرایط مرزی در دو انتهای نانولوله به صورت ساده در نظر گرفته شده است.
- از اثرات اینرسی نیروی خارجی هارمونیک $P(t)$ صرف نظر شده است.
- شرایط اولیه برای ارتعاشات عرضی نانولوله، صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ مدل نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک، تحت نیروی متحرک

مطابق با تئوری الاستیسیته غیرمحلّی ارینگن، تنش غیرمحلّی در یک نقطه خاص، تابعی از میدان کرنش در همه نقاط جسم است. معادله تئوری الاستیسیته غیرمحلّی، می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۱]:

$$(1 - (e_0 a)^2 \nabla^2) \sigma = \tau \quad (1)$$

که e_0 ، ∇^2 ، σ و τ به ترتیب ثابت ماده (که با روش‌های تجربی تعیین می‌شود)، طول مشخصه داخلی، عملگر لاپلاسین، تانسور تنش غیرمحلّی و ماتریس تنش محلّی می‌باشند. برای نانوتیر اوپلر - برنولی، از اثرات الاستیسیته غیرمحلّی در راستای شعاعی می‌توان صرف نظر نمود. بنابراین تنش غیرمحلّی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\sigma_{xx} - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} = E \varepsilon_{xx} \quad (2)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، اگر پارامتر غیرمحلّی $e_0 a$ معادل صفر در نظر گرفته شود، تئوری الاستیسیته کلاسیک (محلّی)، حاصل می‌شود. با در نظر گرفتن تئوری تیر اوپلر - برنولی، معادله حرکت ارتعاشات عرضی (در امتداد محور z) نانولوله عبارت است از [۲۲]:

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + p(x,t) = \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

آشوبناک^۱ در پاسخ دینامیکی سیستم ایجاد شود که در مطالعات بالا بررسی نگردیده است [۱۷]. در ادامه، به برخی تحقیقات انجام شده روی رفتار غیرخطی CNTs پرداخته می‌شود. ژو و همکاران [۱۸] از نمودارهای پاسخ زمانی، صفحه فاز و مقاطع پوانکاره برای تشخیص رفتار آشوبناک یک نانولوله کربنی قرار گرفته روی بستر وینکلر استفاده کرده‌اند. سپس مقادیر آستانه-ای^۲ را برای وقوع رفتار آشوبناک در سیستم معرفی کردند. معانی میان‌دوآب [۱۹] رفتار غیرخطی یک نانولوله کربنی تحت نیروی الکترواستاتیک را براساس تئوری گرادیان کرنشی بررسی نموده است. نتایج نشان داد که بسته به مقدار ولتاژ تحریک، اثر اندازه می‌تواند حرکت آشوبناک در پاسخ نانولوله را تغییر دهد. وانگ و ژانگ [۲۰] ارتعاشات آشوبناک یک نانولوله کربنی منحنی شکل را در میدان مغناطیسی و حرارتی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که پارامترهای شدت میدان مغناطیسی و طول نانولوله می‌توانند برای جلوگیری از وقوع حرکات آشوبناک به کار گرفته شوند.

مرور و جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحلیل دوشاخگی CNTs با در نظر گرفتن همزمان اثر بار متحرک هارمونیک، اثر سختی غیرخطی بستر الاستیک و اثر مقیاس اندازه تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو در مطالعه حاضر، پس از ارائه مدلی برای CNTs تحت بار متحرک هارمونیک بر مبنای تئوری الاستیسیته غیرمحلّی، به گسسته-سازی معادله با روش گلرکین پرداخته می‌شود. سپس اثرات دامنه، فرکانس و سرعت نیروی هارمونیک متحرک روی پاسخ دینامیک غیرخطی سیستم، توسط نمودارهای دوشاخگی، صفحه فاز، طیف توان، مقاطع پوانکاره و ماکزیمم نمای لیاپانوف بررسی می‌گردد.

۲- فرمول‌بندی و تعریف مسئله

در شکل (۱) مدل یک نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک تحت نیروی متحرک، به طور شماتیک نشان داده شده است. نانولوله دارای ضخامت t_b ، طول L و مدول الاستیسیته E می‌باشد. برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- نیروی خارجی هارمونیک $P(t)$ با سرعت ثابت v_p در امتداد محور خنثی نانولوله (محور x) حرکت می‌کند.
- جهت نیروی خارجی $P(t)$ عمود بر محور محور x است.
- ساختار نانولوله ایزوتروپیک و همگن است.

² Threshold

¹ Chaotic

که $x_p = v_p t$ موقعیت بار هارمونیک متحرک، P_0 دامنه بار هارمونیک متحرک، Ω فرکانس بار هارمونیک متحرک، k_1 ضریب خطی پاسترناک، k_2 ضریب غیرخطی پاسترناک و $\delta(\cdot)$ تابع دلتای دیراک با ویژگی زیر است:

$$\int_{x_1}^{x_2} g(x) \delta^{(n)}(x - x_0) dx = \begin{cases} (-1)^n g^{(n)}(x_0) & x_1 < x_0 < x_2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

که $\delta^{(n)}(\cdot)$ مشتق مرتبه n تابع دلتای دیراک و $g(\cdot)$ یک تابع دلخواه است.

۳- گسسته‌سازی با روش گلرکین

برای تبدیل معادله دیفرانسیل پاره‌ای (۷) به معادله دیفرانسیل معمولی، از روش گلرکین استفاده شده است. بر این اساس، پاسخ ارتعاشی سیستم می‌تواند به صورت زیر تخمین زده شود:

$$w(x,t) = \varphi(x)q(t) \quad (13)$$

در رابطه بالا، $q(t)$ مختصات تعمیم یافته است. اولین تابع ویژه $\varphi(x)$ نیز برای شرایط مرزی دوسر مفصل، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi(x) = \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (14)$$

با جایگذاری معادله (۱۳) در (۷)، ضرب طرفین معادله (۷) در $\varphi(x)$ و نهایتاً انتگرال گیری در بازه $(0, L)$ ، معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت سیستم ارائه می‌شود:

$$M_0 \ddot{q}(t) + Kq(t) + \Lambda q^3(t) = F(t) \quad (15)$$

که:

$$M_0 = m \int_0^L \varphi^2(x) dx - m(e_0 a)^2 \int_0^L \varphi''(x) \varphi(x) dx \quad (16)$$

$$K = EI \int_0^L \varphi''''(x) \varphi(x) dx + k_1 \int_0^L \varphi^2(x) dx - k_1(e_0 a)^2 \int_0^L \varphi''(x) \varphi(x) dx \quad (17)$$

که $p(x,t)$ نیروی عرضی توزیع شده روی نانولوله، ρ چگالی نانولوله، A سطح مقطع، $w(x,t)$ جابجایی عرضی، t زمان و M ممان خمشی ایجاد شده در نانولوله است. ممان خمشی M به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M = - \int z \sigma_{xx} dA \quad (4)$$

که z مختصات عرضی اندازه‌گیری شده نسبت به محور x و در راستای مثبت ارتعاشات عرضی است. همچنین کرنش عرضی ϵ_{xx} برای تغییر شکل‌های کوچک، برابر است با:

$$\epsilon_{xx} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5)$$

با ترکیب معادلات (۲)، (۴) و (۵) داریم:

$$M - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (6)$$

که $I = \int z^2 dA$ ممان اینرسی دوم سطح است. با در نظر گرفتن معادلات (۳) و (۶)، معادله دیفرانسیل حاکم برای ارتعاشات عرضی نانولوله، با در نظر گرفتن مدل تیر اویلر-برنولی و تئوری الاستیسیته غیرمحملی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[w(x,t) - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] = p(x,t) - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \quad (7)$$

که m جرم بر واحد طول نانولوله است. نیروی عرضی توزیع شده $p(x,t)$ ، به صورت مجموع نیروی خارجی $F_e(x,t)$ و نیروی ناشی از بستر الاستیک $F_m(x,t)$ تعریف می‌شود. لذا:

$$p(x,y) = F_e(x,y) + F_m(x,y) \quad (8)$$

نیروی خارجی $F_e(x,t)$ ناشی از بار متحرک است. نیروی بستر الاستیک $F_m(x,t)$ نیز با مدل غیرخطی وینکلر و پاسترناک توصیف می‌شود [۲۳]. به طوریکه:

$$F_e(x,y) = P(t) \delta(x - x_p) \quad (9)$$

$$P(t) = P_0 \sin \Omega t \quad (10)$$

$$F_m(x,y) = -k_1 w(x,t) - k_2 w^3(x,t) \quad (11)$$

هستند که سیگنال مورد نظر را می‌توان به صورت مجموعه‌ای گسسته از توابع هارمونیک نشان داد. هرگاه طیف توان دارای یک خط طیف باشد، نشان دهنده حرکت تناوبی است. طیف توان رفتار شبه‌تناوبی نیز از خطوط طیف در برخی فرکانس‌های نامتناسب با یکدیگر تشکیل شده است. مقطع پوانکاره یک صفحه‌ای در فضای فاز می‌باشد که نمودار فازی ایجاد شده از حل معادلات حاکم بر حرکت سیستم را قطع می‌کند. برای حرکت‌های تناوبی، مقطع پوانکاره تنها یک نقطه است. چنانچه حرکت شبه‌تناوبی باشد، مقطع پوانکاره یک منحنی بسته از نقاط منفصل را ایجاد می‌کند یا از تعدادی نقاط به صورت توده‌ای و با نظم خاصی تشکیل می‌شود. از نمودارهای دوشاخگی برای شناسایی مسیر ورود به حرکت نامنظم استفاده می‌شود. در نمودار دوشاخگی، دامنه دائمی یک سیستم غیرخطی به صورت تابعی از پارامتر غیرخطی سیستم ترسیم می‌شود. هنگام تغییر پارامتر کنترلی، اگر حرکت به صورت زیرهارمونیک با دوره تناوب n ام باشد، در هر گام مشخص، n نقطه مجزأ روی منحنی دیده خواهد شد. در نهایت اگر حرکت شبه‌تناوبی یا آشوبناک باشد، ستونی از نقاط روی منحنی مشاهده می‌شود. در این حالت با مراجعه به مقاطع پوانکاره می‌توان حرکت شبه‌تناوبی را از حرکت آشوبناک تشخیص داد. ماکزیمم نمای لیاپانوف می‌تواند به عنوان ابزاری برای تشخیص آشوب در یک سیستم مکانیکی استفاده گردد. چنانچه ماکزیمم نمای لیاپانوف مثبت باشد حرکت آشوبناک است و در غیر این صورت حرکت منظم خواهد بود. بنابراین ماکزیمم نمای لیاپانوف صفر، مرز میان رفتار آشوبناک و منظم می‌باشد [۲۴]، [۲۵].

۵- نتایج و بحث

در این قسمت فرکانس تحریک بدون بعد، به عنوان اولین پارامتر کنترلی در بررسی رفتار دینامیکی سیستم، در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، پارامترهای بدون بعد سرعت عبور بار متحرک α و فرکانس تحریک β به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha = \frac{v_p}{v_{cr}} = \frac{\pi v_p}{\omega L} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\Omega}{\omega} \quad (21)$$

که ω فرکانس طبیعی سیستم خطی است. نمودار دوشاخگی شدن به عنوان اولین ابزار شناسایی رفتار سیستم به کار گرفته شده است. محور افقی این نمودار بیانگر پارامتر کنترلی دامنه

$$\begin{aligned} \Lambda &= k_2 \left(\int_0^L \varphi^4(x) dx \right. \\ &\quad \left. - 3(e_0 a)^2 \left(2 \int_0^L (\varphi'(x))^2 \varphi^2(x) dx \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \int_0^L \varphi''(x) \varphi^3(x) dx \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F(t) &= P(t) \cdot \int_0^L \left(\delta(x - x_p) \right. \\ &\quad \left. - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \delta(x - x_p)}{\partial x^2} \right) \varphi(x) dx \end{aligned} \quad (19)$$

۴- الگوریتم حل عددی و ابزارهای تحلیل رفتار غیرخطی

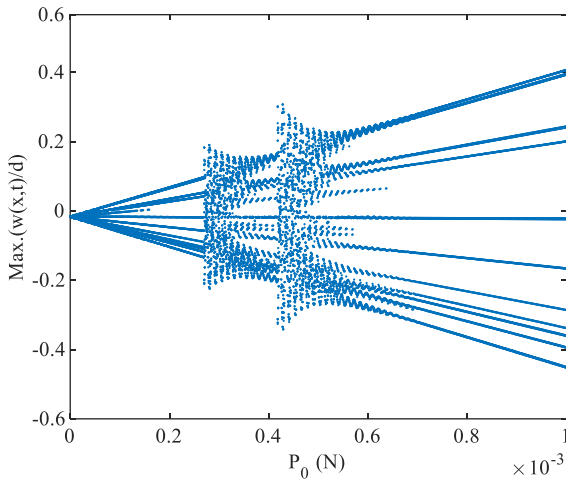
تعداد اندکی از معادلات دیفرانسیل حل تحلیلی و دقیق دارند که اغلب پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. به همین دلیل روش‌های حل عددی، به روشی کارآمد در حل معادلات دیفرانسیل تبدیل شده‌اند. در این تحقیق، حل عددی معادلات حرکت با استفاده از روش رانج - کوتا در نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. مقادیر عددی پارامترهای فیزیکی به کار رفته برای مدل‌سازی سیستم، در جدول (۱) ارائه گردیده است. تحلیل رفتار غیرخطی سیستم نیز با استفاده از ابزارهایی مانند صفحه فاز، طیف توان، مقاطع پوانکاره و نمودارهای دوشاخگی انجام شده است.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای فیزیکی نانولوله کربنی [۶]

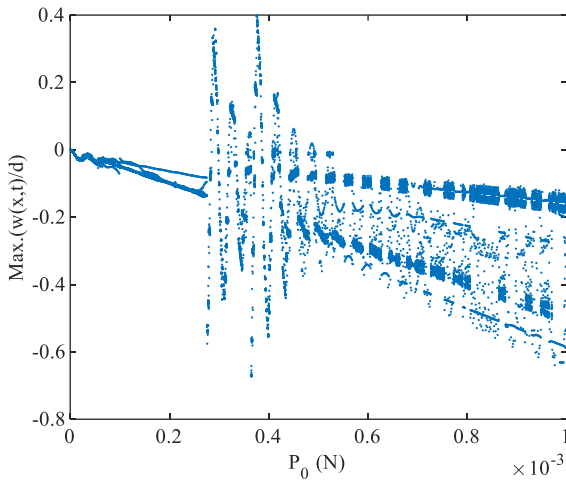
ردیف	پارامتر	نماد	مقدار
۱	مدول یانگ	E	1 T Pa
۲	قطر نانولوله	d	1 nm
۳	ضخامت نانولوله	t_b	0.35 nm
۴	طول نانولوله	L	40 nm
۵	چگالی جرمی نانولوله	ρ	2300 Kg/m ³

مسیرهای مداری فقط مشخص می‌کند که حرکت سیستم تناوبی یا غیرتناوبی است و نمی‌تواند اطلاعات کافی را برای شروع حرکت نامنظم فراهم کند. نمودار طیف توان که از تبدیل فوری گسسته متغییر خروجی به دست می‌آید، در اکثر فرایندهای پردازش سیگنال نیز به کار می‌رود. این نمودار از یک سری خطوط قائم تشکیل می‌شود و این خطوط مبین این موضوع

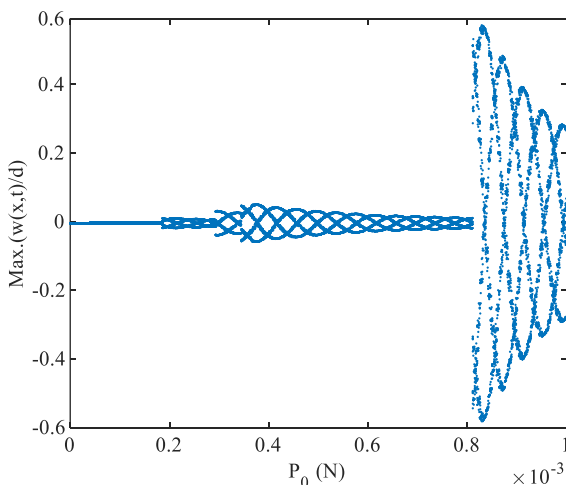
$P_0=0.00040 N$ ، و $P_0=0.00060 N$ ، $\beta=1.0$ ، $\beta=0.8$ و $\beta=1.2$ نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ رفتار دوشاخگی جابجایی بدون بعد نانولوله با تغییر دامنه نیروی تحریک به ازای $\alpha=0.2$ ، $e_0a=0.1 \text{ nm}$ ، $k_1=1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ و $k_2=4 \times 10^{14} \text{ N/m}^4$ (الف $\beta=0.8$ ، ب $\beta=1.0$ ، ج $\beta=1.2$)

نیروی تحریک و محور عمودی بیانگر جابجایی عرضی وسط نانولوله است. شکل (۲) اثر فرکانس تحریک را بر رفتار دوشاخگی پاسخ نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک تحت نیروی متحرک هارمونیک، نشان می‌دهد.

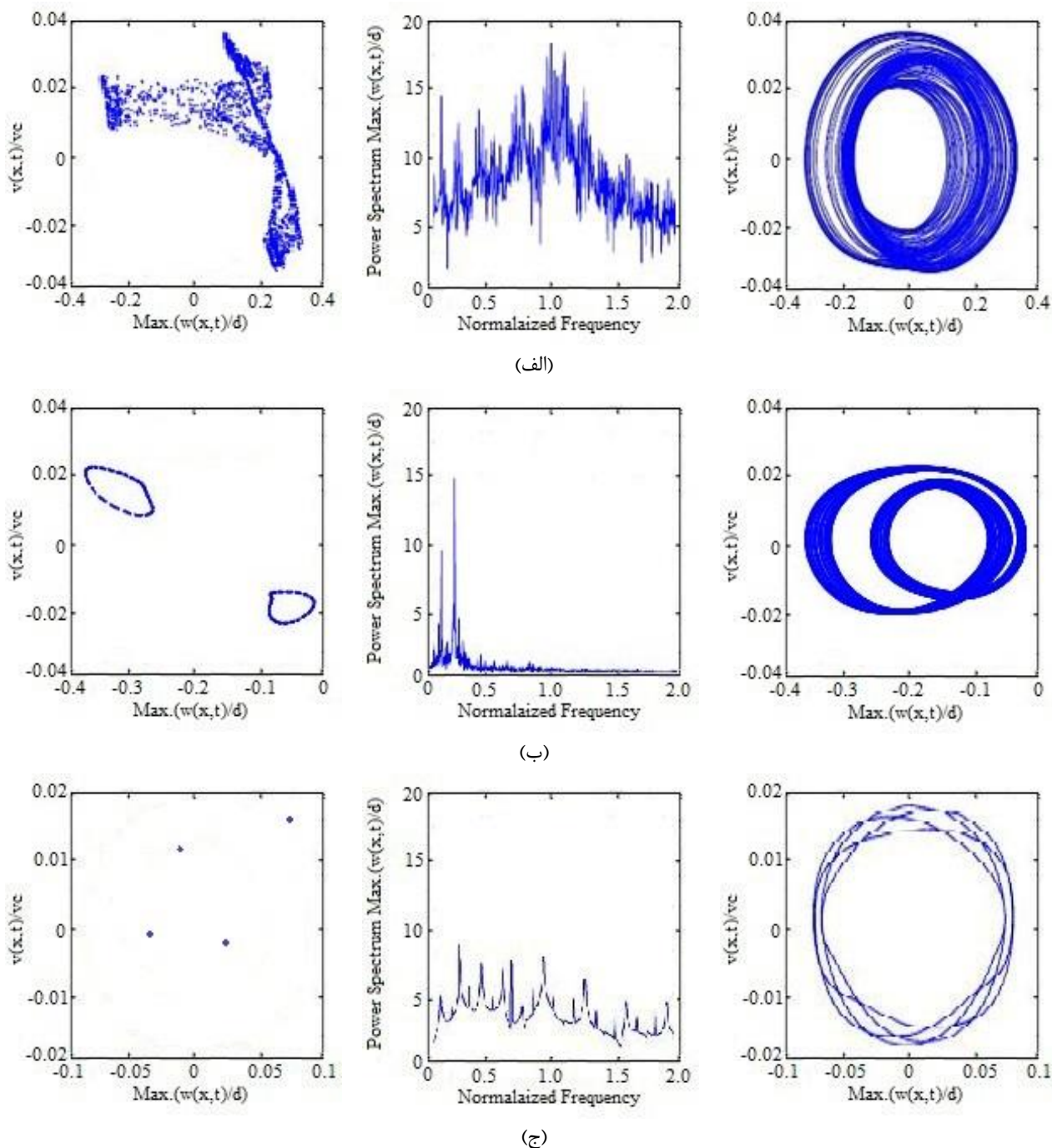
به ازای پارامتر فرکانس تحریک بدون بعد $\beta=0.8$ ، با افزایش دامنه نیروی تحریک، رفتار دینامیکی سیستم وارد حرکت زیر هارمونیک با پریود $11T$ می‌شود. این حالت تا $P_0=0.00026 N$ ادامه داشته و در $P_0=0.00027 N$ وارد یک رفتار نامنظم (شبه-پریودیک یا آشوبناک) می‌شود. تشخیص این دو نوع رفتار از هم نیاز به دیگر ابزارهای شناسایی دارد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند. با افزایش مجدد دامنه نیروی تحریک، رفتار زیرهارمونیک دیگری را در محدوده $P_0=[0.00028-0.001] N$ می‌توان مشاهده نمود.

به ازای پارامتر فرکانس تحریک $\beta=1.0$ حرکت زیرهارمونیک در محدوده $P_0=[0.0-0.00028] N$ قابل دستیابی است. پس از آن نمودار دوشاخگی شدن در محدوده نسبتاً وسیعی رفتار نامنظمی را نشان می‌دهد.

به ازای پارامتر فرکانس تحریک بدون بعد $\beta=1.2$ ، رفتار نانولوله کربنی مورد نظر، تا رسیدن به مقدار نیروی تحریک دامنه نیروی تحریک $P_0=0.00019 N$ به صورت پریودیک است. سپس در محدوده رفتار زیرهارمونیک با دوره تناوب $4T$ می‌شود. مجدداً در $P_0=[0.00082-0.001] N$ به یک رفتار زیرهارمونیک دیگری با دوره تناوب $4T$ وارد می‌شود.

با مقایسه نمودارهای دوشاخگی می‌توان نتیجه گرفت که در فرکانس‌های بالا، پاسخ سیستم با افزایش دامنه تحریک در وضعیت زیرهارمونیک باقی می‌ماند. همچنین افزایش فرکانس، وقوع اولین رفتار نامنظم سیستم را به تأخیر می‌اندازد. نکته دیگر اینکه هنگامی که فرکانس تحریک با فرکانس طبیعی سیستم خطی برابر است ($\beta=1.0$)، با افزایش دامنه تحریک، رفتار سیستم به صورت نامنظم باقی می‌ماند در حالی که در دو حالت $\beta=0.8$ و $\beta=1.2$ ، سیستم دارای یک قابلیت خودکنترلی برای گذر از رفتار نامنظم و برگشتن به رفتار زیرهارمونیک می‌باشد.

با پیگیری چگونگی رفتار سیستم از نمودارهای دوشاخگی، می‌توان یک شناخت کلی نسبت به رفتار سیستم در محدوده مشخصی از پارامتر کنترلی پیدا کرد. برای بررسی دقیق‌تر رفتار سیستم، از دیگر ابزارهای شناسایی نیز استفاده می‌شود به‌ویژه تشخیص رفتار نامنظم شبه‌پریودیک از رفتار آشوبناک، با نمودار دوشاخگی شدن عملاً ناممکن است. شکل (۳) صفحه فاز، طیف توان و مقطع پوانکاره پاسخ نانولوله را در $P_0=0.00045 N$



شکل ۳ صفحه فاز، طیف توان و مقطع پوانکاره جابجایی بدون بعد نانولوله به ازای $\alpha=0.2$ ، $e_0 a=0.1$ nm، $k_1=1 \times 10^5$ N/m² و $k_2=4 \times 10^{14}$ N/m⁴ (الف) $P_0=0.00045$ N، $\beta=0.8$ (ب) $P_0=0.00060$ N، $\beta=1.0$ (ج) $P_0=0.00040$ N، $\beta=1.2$

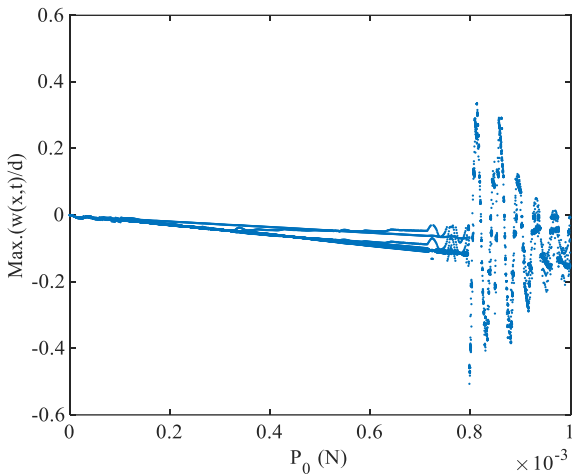
طیف توان و مقطع پوانکاره در این مرحله برای تشخیص این دو پاسخ، بسیار کارسازند.

شکل (۳-ب) مسیره‌های صفحه فاز، طیف توان و مقطع پوانکاره را در $P_0=0.00060$ N، $\beta=1.0$ نشان می‌دهد. طیف فرکانسی گسترده در نمودار طیف توان، همراه با منحنی‌های بسته موجود در مقطع پوانکاره حاکی از رفتار شبه‌پریودیک سیستم مورد نظر است.

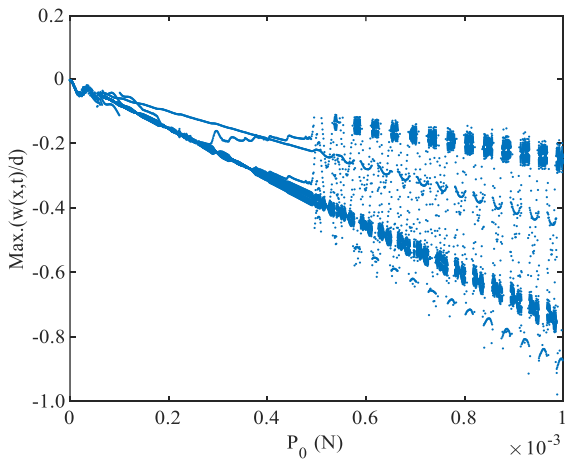
شکل (۳-ج) مسیره‌های صفحه فاز، طیف توان و مقطع پوانکاره را در $P_0=0.00040$ N، $\beta=1.2$ نشان می‌دهد. رفتار

شکل (۳-الف) صفحه فاز، طیف توان و مقطع پوانکاره را در $P_0=0.00045$ N، $\beta=0.8$ نشان می‌دهد. نشانه‌های پاسخ آشوبناک سیستم در این شکل‌ها از روی گستره وسیع فرکانس‌ها در نمودار طیف توان، مسیره‌های متعدد منحنی صفحه فاز و ساختار فراکتالی نقش بسته در نگاشت پوانکاره، به خوبی قابل تشخیص است. همانگونه که قبلاً اشاره شد، شناسایی نوع رفتار نامنظم (شبه‌تناوبی از آشوبناک) به تنهایی از روی نمودار دوشاخگی شدن مشکل بود. زیرا در این حالت نمودار یاد شده فقط به صورت یک سری خطوط پیوسته است. لذا نمودارهای

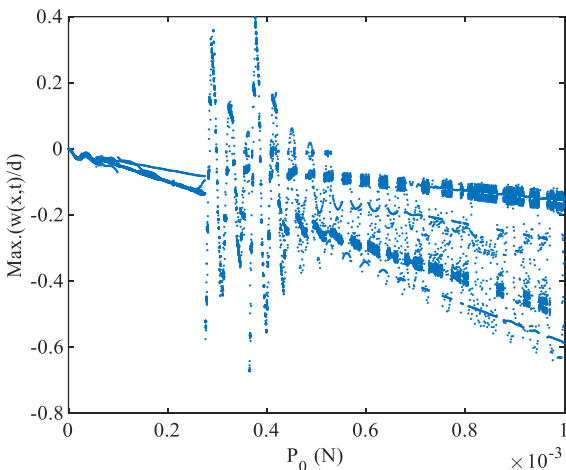
نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، مثبت شدن ماکزیمم نمای لیاپانوف، وقوع حتمی آشوب را به ازای این پارامترها نشان می دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴ رفتار دوشاخگی جابجایی بدون بعد نانولوله با تغییر دامنه نیروی تحریک به ازای $\beta=1.0$, $\epsilon\omega a=0.1$ nm, $k_I=1 \times 10^5$ N/m² و $k_2=4 \times 10^{14}$ N/m⁴ (الف) $\alpha=0.05$ (ب) $\alpha=0.1$ (ج) $\alpha=0.2$

زیرهارمونیک با پریود $4T$ را می توان به راحتی با یک قله مشخص در فرکانس $1/4$ در نمودار طیف توان و چهار نقطه مجزا در نمودار مقطع پوانکاره مشاهده کرد.

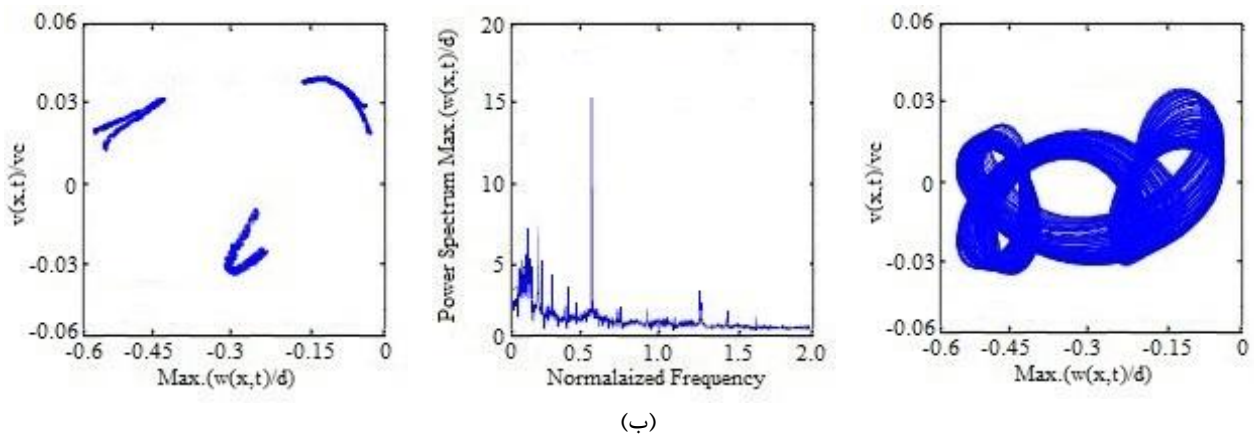
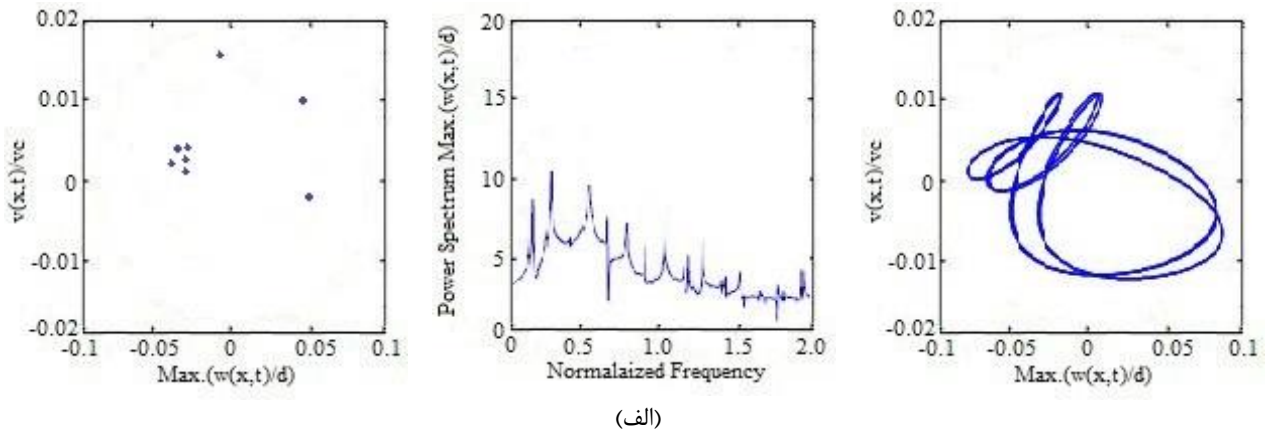
یکی دیگر از پارامترهای اثرگذار بر رفتار ارتعاشی نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک تحت نیروی متحرک هارمونیک، سرعت عبور بار متحرک است که در این مطالعه با پارامتر بدون بعد α نشان داده شده است. شکل (۴) اثر سرعت عبور بار متحرک را بر رفتار دوشاخگی پاسخ نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک تحت نیروی متحرک هارمونیک، نشان می دهد.

به ازای پارامتر سرعت عبور بار متحرک بدون بعد $\alpha=0.05$ ، حرکت زیرهارمونیک در محدوده $P_0=[0.0-0.00079]$ N قابل دستیابی است. با افزایش دامنه نیروی تحریک، سیستم وارد یک رفتار نامنظم (شبه پریودیک یا آشوبناک) شده که تا دامنه $P_0=0.001$ N ادامه می یابد.

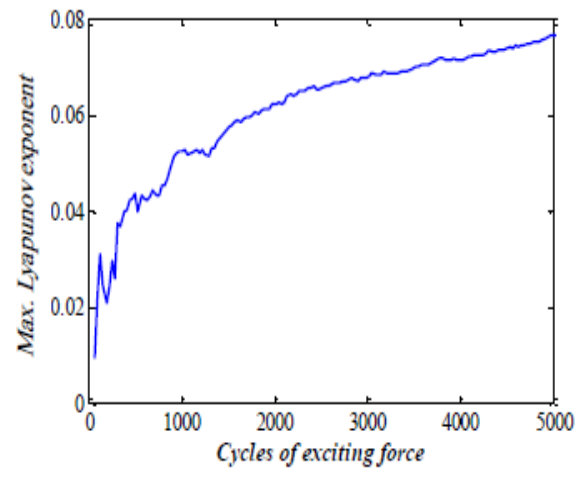
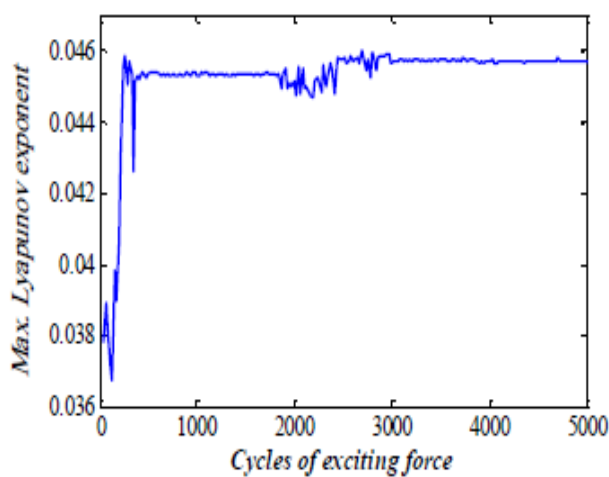
به ازای پارامتر سرعت عبور بار متحرک بدون بعد $\alpha=0.1$ ، رفتار سیستم تا دامنه نیروی تحریک $P_0=0.00048$ N به صورت زیرهارمونیک باقی می ماند. در دامنه نیروی تحریک $P_0=0.00049$ N رفتار سیستم ناگهان وارد حالت نامنظم شده و تا $P_0=0.001$ N ادامه می یابد.

با مقایسه نمودارهای دوشاخگی به دست آمده از حل عددی، می توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت عبور بار متحرک هارمونیک باعث می شود که وقوع اولین رفتار نامنظم سیستم، در دامنه های نیروی تحریک پایین تری اتفاق بیفتد. به عبارت دیگر، در سرعت های کمتر بار متحرک، گستره وسیع تری از حرکت پریودیک برای نانولوله تحت بار متحرک هارمونیک، قابل دستیابی است.

شکل (۵) مسیره های صفحه فاز، خطوط طیف توان و مقطع پوانکاره پاسخ نانولوله کربنی احاطه شده با بستر الاستیک تحت بار متحرک را در پارامترهای سرعت عبور بار و نیروی تحریک $P_0=0.00060$ N, $\alpha=0.1$ و $P_0=0.00060$ N, $\alpha=0.05$ نشان می دهد. نتایج ارائه شده در شکل (۵-الف) بیانگر ارتعاشات زیرهارمونیک با دوره تناوب $8T$ هستند. البته تشخیص حرکت زیرهارمونیک هشتم از حرکت زیرهارمونیک چهارم، در نمودار فاز و طیف توان تقریباً مشکل است. اما هشت نقطه نگاشت شده در مقطع پوانکاره، نمایانگر این رفتار به ازای این پارامتر سرعت می باشند. شکل (۵-ب) مسیره های صفحه فاز، نمودار طیف توان و مقطع پوانکاره را به ازای پارامترهای $P_0=0.00060$ N, $\alpha=0.1$ نشان می دهد. وجود نقاط پراکنده و نامنظم در مقطع پوانکاره دلیلی بر آشوبناک بودن رفتار سیستم در این مقدار از پارامتر سرعت عبور بار دارند. برای تأیید آشوبناک بودن رفتار نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک تحت نیروی متحرک هارمونیک، ماکزیمم نمای لیاپانوف نیز به ازای پارامترهای عددی نمودارهای (۳-الف) و (۵-ب) ترسیم گردیده و در شکل (۶)



شکل ۵ صفحه فاز، طیف توان و مقطع پوانکاره جابجایی بدون بعد نانولوله به ازای $k_2=4 \times 10^{14}$ و $k_1=1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ، $e_0a=0.1 \text{ nm}$ ، $\beta=1.0$ از ای $P_0=0.00060 \text{ N}$ ، $\alpha=0.1$ (ب) $P_0=0.00060 \text{ N}$ ، $\alpha=0.05$ (الف) N/m^4



شکل ۶ ماکزیمم نمای لیاپانوف به ازای $k_2=4 \times 10^{14} \text{ N/m}^4$ و $k_1=1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ، $e_0a=0.1 \text{ nm}$ ، $\beta=0.8$ ، $\alpha=0.2$ (الف) $P_0=0.00045 \text{ N}$ ، $\beta=1.0$ ، $\alpha=0.1$ (ب) $P_0=0.00060 \text{ N}$

۶- اعتبارسنجی

لذا برای اعتبارسنجی مدل پیش رو و مقایسه با تحقیقات انجام شده، لازم است ساده‌سازی‌هایی روی مدل صورت گیرد. برای این منظور با صفر در نظر گرفتن پارامتر الاستیسیته غیرمحل $e_0a=0.0 \text{ nm}$ و همچنین ضریب غیرخطی پاسترناک $k_2=0$ می‌توان به مدل ارائه شده در مرجع [۷] رسید و نتایج را

همان‌طور که گفته شد، ارتعاشات آشوبناک نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک تحت نیروی متحرک هارمونیک، با مدل الاستیسیته غیرمحل، در تحقیقات پیشین ارائه نشده است.

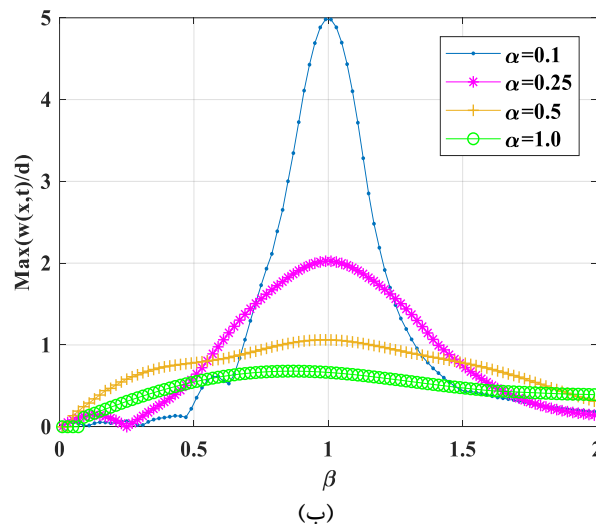
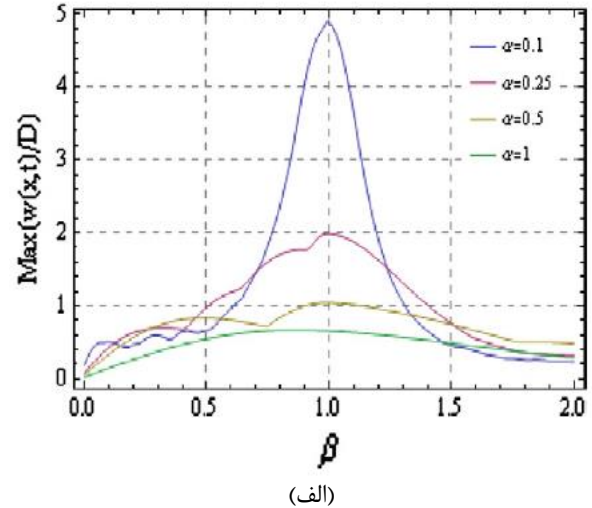
تئوری تیر اویلر-برنولی، الاستیسیته غیرمحملی و فنر وینکلر استفاده شده است. مسیرهای صفحه فاز، طیف توان، مقاطع پوانکاره، نمودارهای دوشاخگی و ماکزیمم نمای لیاپانوف برای تحلیل رفتار غیرخطی به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که دامنه، فرکانس و سرعت نیروی هارمونیک متحرک اثرات قابل ملاحظه‌ای روی نوع پاسخ دینامیکی سیستم دارند. به طوری که در فرکانس‌های تحریک بالا، پاسخ سیستم با افزایش دامنه تحریک در وضعیت زیرهارمونیک باقی می‌ماند. ضمن اینکه با افزایش فرکانس تحریک می‌توان وقوع اولین رفتار نامنظم سیستم (شبه‌پریودیک یا آشوبناک) را به تأخیر انداخت. نتیجه دیگر اینکه هنگامی که فرکانس تحریک با فرکانس طبیعی سیستم خطی برابر است (تشدید)، با افزایش دامنه تحریک، رفتار سیستم به صورت نامنظم باقی می‌ماند در حالی که در حالت کمتر یا بیشتر از فرکانس تشدید، یک قابلیت خودکنترلی برای گذر از رفتار نامنظم و برگشتن به رفتار زیرهارمونیک برای سیستم مشاهده شد. همچنین نتایج حاکی از آن است که افزایش سرعت عبور بار باعث می‌شود که وقوع اولین رفتار نامنظم سیستم، در دامنه‌های تحریک پایین‌تری اتفاق بیفتد. به عبارت دیگر، در سرعت‌های کمتر بار متحرک، گستره وسیع‌تری از حرکت پریودیک قابل دستیابی است. بنابراین با بهره‌گیری از نتایج این تحقیق و انتخاب مناسب پارامترها می‌توان از وقوع رفتار نامنظم در سیستم جلوگیری نمود.

۸- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

a	طول مشخصه داخلی
A	سطح مقطع
e_0	ثابت ماده
E	مدول الاستیسیته
F	نیروی معادل
I	ممان اینرسی دوم سطح
K	ضریب سختی خطی معادل
K_1	ضریب سختی خطی بستر الاستیک
K_2	ضریب سختی غیرخطی بستر الاستیک
L	طول نانولوله
m	جرم بر واحد طول نانولوله
M	ممان خمشی
M_0	جرم معادل
$p(x,t)$	نیروی عرضی توزیع شده روی نانولوله
P	نیروی متحرک
P_0	دامنه نیروی متحرک
t	زمان
v_p	سرعت بار متحرک
$W(x,t)$	جابجایی عرضی نانولوله

با هم مقایسه نمود. شکل (۷) اثر پارامتر فرکانس تحریک بدون بعد β را بر پاسخ دینامیکی نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک خطی تحت نیروی متحرک هارمونیک، نشان می‌دهد (مرجع و مطالعه حاضر).



شکل ۷ اثر فرکانس تحریک روی پاسخ دینامیکی نانولوله کربنی احاطه شده توسط بستر الاستیک خطی تحت نیروی متحرک هارمونیک؛ (الف) مرجع [۷] (ب) مطالعه حاضر

با مقایسه نمودارهای پاسخ فرکانسی ارائه شده در این شکل، همخوانی مناسبی بین نتایج به دست آمده و نتایج مرجع مشاهده می‌گردد. همچنین ملاحظه می‌گردد که تغییر شکل دینامیکی ماکزیمم، با افزایش پارامتر سرعت عبور بار متحرک، کاهش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تحلیل دینامیک غیرخطی نانولوله‌های کربنی احاطه شده با بستر الاستیک غیرخطی تحت نیروی متحرک هارمونیک مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل‌سازی سیستم از

nanoparticle," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 10, pp. 6940-6951, 2013/02/27/ 2013, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.020>.

[8] M. Pirmoradian, E. Torkan, and D. Toghraie, "Study on size-dependent vibration and stability of DWCNTs subjected to moving nanoparticles and embedded on two-parameter foundations," *Mechanics of materials*, vol. 142, pp. 103279, 2019/12/11/ 2020, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103279>.

[9] H. Sarparast, A. Alibeigloo, V. Borjalilou, and O. Koochakianfard, "Forced and free vibrational analysis of viscoelastic nanotubes conveying fluid subjected to moving load in hygro-thermo-magnetic environments with surface effects," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 172, pp. 1-28, 2022/07/28/ 2022, <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00489-3>.

[10] J. Natsuki, P. Wu, H. Jiang, and T. Natsuki, "Dynamic analysis of double-walled carbon nanotubes embedded in elastic medium under a nanoparticle delivery," *Diamond and Related Materials*, vol. 128, pp. 109194, 2022/07/02/ 2022, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109194>.

[11] C. Thongchom, P. Roodgar Saffari, P. Roodgar Saffari, N. Refahati, S. Sirimontree, S. Keawsawasvong, and S. Titotto, "Dynamic response of fluid-conveying hybrid smart carbon nanotubes considering slip boundary conditions under a moving nanoparticle," *Mechanics of advanced materials and structures*, vol. 30, no. 11, pp. 1447-1452, 2022/03/17/ 2023, <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2051101>.

[12] R. Özmen, and I. Esen, "Dynamic response of embedded Timoshenko CNTs exposed to magnetic and thermal fields subjected to moving load based on doublet mechanics," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, pp. 590, 2023/10/18/ 2023, <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04506-1>.

[13] X. Ma, M. Roshan, K. Kiani, and A. Nikkhoo, "Dynamic response of an elastic tube-like nanostructure embedded in a vibrating medium and under the action of moving nano-objects," *Symmetry*, vol. 15, no. 10, pp. 1827, 2023/09/26/ 2023, <https://doi.org/10.3390/sym15101827>.

[14] J. Leng, and T. Chang, "Fluid-solid coupling for microscale transport of nanoparticles in ultralong carbon nanotubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 195, pp. 111431, 2023/12/07/ 2024, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111431>.

[15] Z. Keshtkar Mizuji, M. Ghadiri, A. Rajabpour, M. Farajzadeh Ahari, A. Zajkani, and S. Yazdinia,

x	مختصات طولی
x_p	موقعیت بار متحرک
z	مختصات عرضی
α	پارامتر سرعت بار بدون بعد
β	پارامتر فرکانس تحریک بدون بعد
δ	دلتای دیراک
ϵ_{xx}	کرنش عرضی
Λ	ضریب سختی غیرخطی معادل
σ	تانسور تنش
τ	تنش محلی
φ	تابع ویژه
ω	فرکانس طبیعی سیستم خطی
Ω	فرکانس نیروی متحرک

۹- مراجع

[1] A. Bianco, K. Kostarelos, and M. Prato, "Applications of carbon nanotubes in drug delivery," *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 9, no. 6, pp. 674-679, 2005/10/17/ 2005, <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2005.10.005>.

[2] R. Chowdhury, S. Adhikari, and J. Mitchell, "Vibrating carbon nanotube based bio-sensors," *Physica E*, vol. 42, pp. 104-109, 2447-2449, 2009/09/23/ 2009, <https://doi.org/10.1016/j.physe.2009.09.007>.

[3] R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel, and P. Avouris, "Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 17, pp. 2447-2449, 1998/08/24/ 1998, <https://doi.org/10.1063/1.122477>.

[4] T. P. Chang, "Stochastic FEM on nonlinear vibration of fluid-loaded double-walled carbon nanotubes subjected to a moving load based on nonlocal elasticity theory," *Composites Part B: Engineering*, vol. 54, pp. 391-399, 2013/06/20/ 2013, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.012>.

[5] R. Ebrahimi, "Chaotic vibrations of carbon nanotubes subjected to a traversing force considering nonlocal elasticity theory," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems*, vol. 236, no. 1, pp. 31-40, 2021/11/08/ 2022, <https://doi.org/10.1177/23977914211063309>.

[6] M. Simsek, "Vibration analysis of a single - walled carbon nanotube under action of a moving harmonic load based on nonlocal elasticity theory," *Physica E*, vol. 43, no. 1, pp. 182-191, 2010/07/11/ 2010, <https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.07.003>.

[7] Z. Hong, D. Qing-tian, and L. Shao-hua, "Vibration of a single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium under a moving internal

- [20] Q. Wang, and Z. Zhang, "Chaotic vibration of a curved CNT conveying magnetic fluid in the thermo-magnetic field considering the surface effects," *Thin-Walled Structures*, vol. 202, pp. 112047, 2024/06/10/2024, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112047>.
- [21] A. C. Eringen, and D. G. Edelen, "On nonlocal elasticity," *International journal of engineering science*, vol. 10, no. 3, pp. 233-248, 2003/02/26/1972, [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(72\)90039-0](https://doi.org/10.1016/0020-7225(72)90039-0).
- [22] W. Weaver, S. P. Timoshenko, and D. H. Young, "Vibration problems in engineering," New York: Wiley, 1990.
- [23] H. Askari, and E. Esmailzadeh, "Forced vibration of fluid conveying carbon nanotubes considering thermal effect and nonlinear foundations," *Composites Part B*, vol. 113, pp. 31-43, 2016/12/28/2017, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.046>.
- [24] R. Ebrahimi, "Chaos in coupled lateral-longitudinal vibration of electrostatically actuated microresonators," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 156, pp. 111828, 2022/01/23/2022, <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111828>.
- [25] M. Molavian Jazi, S. Ziaei-Rad, and R. Ebrahimi, "Chaotic vibration of atomic force microscopes based on the modified couple stress theory," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 92, pp. 3683-3694, 2022/09/17/2022, <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02256-5>.
- "Numerical modeling of a body vessel for dynamic study of a nano cylindrical shell carrying fluid and a moving nanoparticle," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 152, pp. 362-382, 2023/04/25/2023, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.04.005>.
- [16] M. Hashemian, D. J. Jasim, S. M. Sajadi, R. Khanahmadi, M. Pirmoradian, and S. Salahshour, "Dynamic stability of the euler nanobeam subjected to inertial moving nanoparticles based on the nonlocal strain gradient theory," *Heliyon*, vol. 10, no. 9, pp. e30231, 2024/04/26/2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30231>.
- [17] H. Ramezannejad Azarboni, and S. A. Edalatpanah, "Chaotic vibrations of a harmonically excited carbon nanotube with consideration of thermomagnetic field and surface effects," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 10, pp. 3649-3658, 2019/01/10/2019, <https://doi.org/10.1177/0954406218823810>.
- [18] L. Zhou, F. Chen, and Z. Zhao, "Subharmonic bifurcation and chaos of a carbon nanotube supported by a Winkler and Pasternak foundation," *International Journal of Modern Physics B*, vol. 33, no. 19, pp. 1950207, 2019/08/06/2019, <https://doi.org/10.1142/S0217979219502072>.
- [19] E. Maani Miandoab, "Onset of chaos in nano-resonators based on strain gradient theory: Numerical analysis," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 101, pp. 105864, 2021/05/06/2021, <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.105864>.

مروری بر سوراخکاری کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی

چکیده: در این مقاله، فرایند سوراخکاری سنتی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی و تأثیر عوامل مختلف بر کیفیت سوراخکاری این نوع مواد بررسی شده است. هدف از این تحقیق، شناسایی و معرفی پارامترهای کلیدی ماشین کاری از جمله سرعت دوران، سرعت برش، نرخ پیشروی و جنس ابزار به منظور بهبود کیفیت سوراخ های حاصل و کاهش پدیده های نامطلوب مانند لایه لایه شدن و افزایش زبری سطح است. با استفاده از روش های تجربی، تأثیر این عوامل بر کیفیت ماشین کاری مواد مورد آزمایش قرار گرفته و راهکارهایی برای بهینه سازی فرایند ماشین کاری ارائه شده است. نتایج حاصله نشان می دهند که با انتخاب پارامترهای مناسب و انتخاب دقیق ابزار، می توان به کاهش قابل توجه پدیده لایه لایه شدن و بهبود کیفیت سوراخکاری به روش سنتی دست یافت. این تحقیق دیدگاه های جدیدی را در زمینه بهبود فرایندهای سوراخکاری سنتی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی ارائه می دهد و مسیری برای صنعت در راستای بهینه سازی و افزایش کیفیت محصولات نهایی فراهم می آورد.

واژه های راهنما: کامپوزیت های الیاف طبیعی، سوراخکاری، لایه لایه شدن، زبری سطح، ابزار

هادی رزقی ملکی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بناب، بناب

پویا پرونده

دانشجوی کارشناسی ارشد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تهران، تهران

محسن حامدی

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تهران، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

Hadi Rezghi Maleki*

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

Pooya Parvande

M.Sc. Student,
Faculty of Mechanical
Engineering, University of
Tehran, Tehran

Mohsen Hamedi

Professor, Faculty of
Mechanical Engineering,
University of Tehran,
Tehran

A review on drilling of natural fiber- composites

Abstract: In this paper, the conventional drilling process of natural fiber composites (NFCs) and the effect of various factors on the drilling quality of these type of materials have been investigated. The aim of research is to identify and introduce key machining parameters, including rotational speed, cutting speed, feed rate, and tool material, to enhance the quality of the drilled holes and minimize undesirable phenomena such as delamination and increasing surface roughness. Using experimental methods, the effects of the factors on the machining quality of the materials were investigated, and solutions for optimizing the machining process were proposed. The results indicate that selecting appropriate parameters and precise tool selection can significantly reduce delamination and improve drilling quality. This study provides new insights into improving traditional drilling processes for natural fiber-reinforced composites and offers a pathway for the industry to optimize and enhance the quality of final products.

Keywords: Natural fiber composites, Drilling, Delamination, Surface roughness, Tool

۱- مقدمه

در خود جای داده‌اند. این کامپوزیت‌ها توسط الیاف طبیعی تقویت شده‌اند و توانمندی‌های مثبتی را برای جایگزینی پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف مصنوعی مانند پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) ارائه می‌دهند. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی ارزان، سبک، سازگار با محیط زیست، غیر سمی، تجدیدپذیر، قابل بازیافت و زیست تخریب پذیر می‌باشند. با این حال، یکی از کاستی‌ها این مواد این است که خواص مکانیکی نسبتاً کمی دارند. یک روش برای افزایش عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی برای گسترش کاربردهای آنها، هیبریداسیون است [۷]. با توجه به روند جهانی افزایش بازیافت و استفاده مجدد از منابع، الیاف طبیعی به عنوان یک جایگزین مناسب برای الیاف مصنوعی و سایر مواد غیرقابل تجزیه در صنایع مختلف مطرح شده‌اند. این الیاف، که از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان و درختان به دست می‌آیند، در پایان عمر مفید خود می‌توانند به طور کامل بازیافت شوند و بدین ترتیب از افزایش میزان دی‌اکسید کربن خالص در جو جلوگیری کنند [۸].

الیافی که از گیاهانی مانند کتان، کنف، جوت و پنبه به عنوان الیاف تقویت‌کننده بدست می‌آیند، الیاف طبیعی اقتصادی هستند و به آسانی در دسترس هستند و دارای چگالی کمی هستند که باعث افزایش استحکام و سختی ویژه آنها می‌شود [۹]. با وجود مزایای کامپوزیت‌های الیاف طبیعی، این مواد حساسیت بیشتری نسبت به عوامل محیطی دارند و نیاز به فرایندهای پیش‌پردازش دارند که ممکن است به تعداد و هزینه تولید اضافه کند [۱۰]. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به دلیل ویژگی‌های پایدار و سبکی وزن خود، کاربردهای متنوعی در صنایع هواپیماسازی، خودروسازی و ساختمانی دارند. در هواپیماها، این مواد برای ساخت پانل‌های داخلی کابین به کار می‌روند که به بهبود تجربه مسافران و کاهش مصرف سوخت کمک می‌کند. در صنعت خودروسازی، استفاده از این کامپوزیت‌ها در قطعات داخلی و خارجی به تولید خودروهای سبک‌تر و کارآمدتر منجر شده و در ساختمان‌سازی، به دلیل مزایای عایق‌بندی و مقاومت بالا به عنوان جایگزینی برای کامپوزیت‌های سنتی رو به افزایش است [۱۱] و [۱۲].

فرآیند تولید کامپوزیت‌های الیاف طبیعی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: تولید اولیه و ثانویه. به‌طور کلی، کامپوزیت‌های الیاف طبیعی از طریق روش‌های مختلفی از جمله چینی دستی، قالب‌گیری با استفاده از کیسه‌های خلاء، قالب‌گیری با انتقال رزین و فرایند پالترژن تولید می‌شوند. این فرایندها منجر به تولید یک محصول نهایی می‌شود. با این وجود،

کامپوزیت‌های پایه پلیمری از ترکیب مختلفی از فازهای مواد تشکیل یافته‌اند. در این ترکیبات حداقل یکی از اجزا زمینه پلیمری و دیگری تقویت‌کننده از جنس الیاف است. ترکیبات این مواد با یکدیگر خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی خاصی را به وجود می‌آورند که با استفاده از یک ماده منفرد به دست نمی‌آیند. هنگامی که الیاف تقویت‌کننده به ماتریس پلیمری افزوده می‌شود، خصوصیات چگون سختی، استحکام کششی، مقاومت حرارتی، مقاومت شیمیایی، هدایت الکتریکی و مقاومت در برابر خوردگی افزایش می‌یابد. این تغییرات ناشی از تعاملات میان ماتریس و الیاف تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پایه پلیمری و رفتارهای برهمکنشی است [۱] و [۲]. کاربرد کامپوزیت‌های پایه پلیمری در صنعت هوافضا به خصوص در بدنه هواپیماها، به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این مواد به دلیل مزایای برجسته‌ای که نسبت به فلزات دارند، از جمله کاهش وزن، استحکام بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری بالا در طراحی و بهبود خواص حرارتی، به طور فزاینده‌ای جایگزین مواد فلزی سنتی شده‌اند [۳]. در صنعت هواپیماسازی مدرن، بهره‌گیری از کامپوزیت‌های پیشرفته برای ساخت بخش‌های اصلی هواپیماها، به ویژه در مدل‌های ایرباس A350 و بوئینگ ۷۸۷، به طور چشمگیری افزایش یافته است. این هواپیماها بیش از ۵۰ درصد وزنی و ۸۰ درصد حجمی خود را از مواد کامپوزیتی تشکیل داده‌اند که این نشان‌دهنده نقش به‌سزای این مواد در بهبود کارایی و کاهش مصرف سوخت است. به کارگیری کامپوزیت‌ها در ساختار بیرونی هواپیما نه تنها وزن کلی را کاهش می‌دهد بلکه مقاومت هواپیما در برابر عوامل محیطی و خستگی را بهبود می‌بخشد [۴]. تحقیقات نشان دادند که در ساخت یک بال برای ایرباس A380، حدود ۷۵۰،۰۰۰ سوراخ ایجاد می‌شود که این تعداد بیانگر پیچیدگی‌ها و نیاز به دقت فوق‌العاده بالا در فرایندهای ساخت و مونتاژ در صنعت هوافضا است [۵]. همچنین برای مونتاژ کامل یک هواپیمای معمولی، بین ۱/۵ تا ۳ میلیون سوراخ با کیفیت بالا جهت اتصالات مورد نیاز است که این نشان دهنده حجم عظیمی از کارهای دقیق و فنی است که باید با استانداردهای بسیار بالای صنعت هوافضا مطابقت داشته باشد. فرایند سوراخکاری برای این سوراخ‌ها باید با دقت بسیار زیادی انجام شود تا از بروز هرگونه خطا در اتصال قطعات جلوگیری شود چرا که خطاهایی حتی میلیمتری می‌تواند بر ایمنی پرواز تأثیر منفی بگذارد [۶]. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی (NFCs) موادی هستند که حداقل یک بخش اساسی از منابع طبیعی را

کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف به دلیل ماهیت ناهمگن و ناهمسانگرد، موادی هستند که برش سختی دارند [۲۳]. فرایندهای ماشین‌کاری نامناسب، مشکلات و آسیب‌های خاصی به ساختار کامپوزیت‌ها وارد می‌کنند. این آسیب‌ها شامل لایه‌لایه شدن، سوراخ شدن، بیرون کشیده شدن الیاف، لکه‌دار شدن ماتریس و پارگی می‌شوند که همگی بر عملکرد نهایی محصول تأثیر منفی می‌گذارند [۲۴] و [۲۵]. لایه‌لایه شدن یکی از جدی‌ترین آسیب‌ها در کامپوزیت‌ها است؛ زیرا استحکام حاصل از قطعه کامپوزیتی را به طور مستقیم کاهش می‌دهد [۲۶].

سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی شامل روش‌های سنتی و غیرسنتی در پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با اینکه روش‌های غیرسنتی مانند سوراخ‌کاری لیزری [۲۷] و [۲۸] و واترجت [۲۹] و [۳۰] به دلیل کاهش سایش ابزار، حذف ارتعاشات و افزایش دقت جایگزین روش‌های سنتی محسوب می‌شوند، ولی روش‌های سنتی همچنان به دلیل اقتصادی بودن و دسترسی آسان، کاربرد گسترده‌ای در فرآیند ماشین‌کاری این مواد دارند.

سوراخ‌کاری سنتی بویژه با استفاده از متدهای استاندارد و ابزارهای مخصوص، همچنان به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن و نیاز به تجهیزات متداول، انتخاب اصلی در تولید سوراخ‌ها در مواد کامپوزیتی است. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند مانند سرعت پیشروی، نرخ برش، قطر سوراخ و هندسه مته از اهداف اصلی در پژوهش‌ها بوده که تأثیر مستقیم بر کاهش آسیب‌های ناشی از سوراخ‌کاری و بهبود کیفیت نهایی سوراخ دارد [۳۱] و [۳۲]. علاوه بر این، کاهش تخریب و جدایش الیاف از جمله اولویت‌های تحقیقاتی است که با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، می‌توان به کیفیت بهتر و سطحی بدون تخریب دست یافت [۳۳] و [۳۴].

از سوی دیگر، روش‌های غیرمرسوم مانند سوراخ‌کاری لیزری به دلیل نبود سایش ابزار و کاهش مشکلات ناشی از حرارت، گزینه‌های مناسبی برای سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند. این روش‌ها چالش‌هایی نظیر بهینه‌سازی توان لیزر و سرعت برش را دارند تا از بروز آسیب‌های حرارتی و ایجاد منطقه متاثر از حرارت (HAZ) جلوگیری کنند [۲۸] و [۳۵]. منطقه متاثر از حرارت در سوراخ‌کاری لیزری اهمیت بالایی دارد؛ زیرا در این ناحیه الیاف بدون محافظت رزین قرار می‌گیرند و به نقاط ضعیفی در برابر بارگذاری مکانیکی تبدیل می‌شوند [۳۶]. روش واترجت به عنوان روشی بدون ایجاد حرارت و منطقه متاثر از حرارت برای کامپوزیت‌ها مناسب است و قابلیت ماشین‌کاری دقیق و سریع را با کاهش تخریب سطحی و عدم جدایش الیاف فراهم می‌آورد [۲۹]. در روش سوراخ‌کاری التراسونیک، انرژی

این اشکال نیازمند برخی عملیات ثانویه مانند ماشین‌کاری، فرز یا سوراخکاری هستند تا الزامات مونتاژ قطعات را برآورده کنند؛ بنابراین، ماشین‌کاری به‌ویژه سوراخکاری، برای تسهیل فرآیند مونتاژ قطعات ضروری است.

به‌طور کلی، فرآیند تولید کامپوزیت‌های الیافی در ابعاد بزرگ با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. یکی از این چالش‌ها، نیاز به فضای وسیع و سرمایه‌گذاری قابل‌توجه برای تولید این قطعات است. علاوه بر این، حجم بالای این اجزا محدودیت‌هایی را در حمل‌ونقل ایجاد می‌کند. بنابراین، قطعات کامپوزیتی معمولاً در ابعاد کوچک‌تر تولید شده و سپس برای ایجاد ساختارهای بزرگ‌تر با استفاده از پیچ، مهره یا پرچ به یکدیگر متصل می‌شوند [۱۳]. برای ایجاد اتصالات محکم در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، ضروری است که سوراخ‌هایی با دقت بالا و کیفیت مناسب ایجاد شوند؛ زیرا دقت در سوراخکاری مستقیماً بر استحکام و دوام اتصالات تأثیر می‌گذارد و از پایین آمدن کیفیت اجزاء مرتبط با این اتصالات جلوگیری می‌کند. این فرآیند نیازمند استفاده از تکنیک‌ها و ابزارهای مخصوص است تا از هرگونه آسیب به الیاف و ماتریس پلیمری که می‌تواند به کاهش خواص مکانیکی و ساختاری ماده منجر شود، پرهیز شود [۱۴] و [۱۵].

ماشین‌کاری یک فرآیند کاهشی است که برای حفظ شکل و ابعاد مورد نیاز قطعات نهایی، مواد ناخواسته را حذف می‌کند. به دلیل ترکیب ناهمگن کامپوزیت‌ها، ماشین‌کاری آن‌ها یک فرآیند پیچیده می‌باشد [۱۶]. تحقیقات حاضر نشان داده است که ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی با مواد همگن مثل فولادها تفاوت‌های قابل توجهی دارد [۱۷] و [۱۸]. همچنین جنس و هندسه ابزار تأثیرات زیادی بر آسیب‌های ناشی از ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها دارند. به همین دلیل، توجه ویژه به بررسی عمیق روش‌های مونتاژ بیوکامپوزیت‌ها به منظور بهینه‌سازی تولید آنها، به ویژه در فرآیند ماشین‌کاری، ضروری است [۱۸].

تولید محصولات با استفاده از کامپوزیت‌های پایه پلیمری در نقاط مونتاژ با مشکلاتی مواجه شده است [۱۹] و [۲۰]. این مشکلات شامل عدم دقت در ابعاد و کیفیت پایین داخل سوراخ است که می‌تواند به رد شدن محصولات منجر شود. در مقایسه با سوراخکاری مواد معمولی، سوراخکاری مواد مرکب پایه پلیمری با چالش‌های بیشتری همراه است. بنابراین، ممکن است الیاف در طول فرآیند سوراخکاری شکسته، جدا شده یا لایه‌لایه شوند. با این حال، در صورت دستیابی به سوراخ‌هایی با کیفیت مناسب، استحکام کلی محصول دچار افت نمی‌شود [۲۱] و [۲۲].

کاهش نیروی قائم کمک کرده و در نتیجه لایه لایه شدن را کاهش می دهد اما این تأثیر با توجه به نوع ماده و ابزار متفاوت است؛ برخی مطالعات نشان می دهند که سرعت برش بالا می تواند باعث افزایش لایه لایه شدن شود [۴۰]. به طور کلی نرخ پیشروی پایین برای کاهش لایه لایه شدن و حفظ یکپارچگی سطح توصیه می شود؛ زیرا نرخ پیشروی بالا با افزایش نیروهای قائم و خطر لایه لایه شدن همراه است. اگرچه سرعت برش بر دمای ایجاد شده تأثیر می گذارد و می تواند بر خواص حرارتی ماده اثر بگذارد، نرخ پیشروی تأثیر کمتری بر دما دارد اما به شدت بر لایه لایه شدن و نیروهای قائم در طی ماشین کاری تأثیر گذار است [۱۹].

سرعت دورانی به عنوان یکی از پارامترهای تأثیر گذار در ماشین کاری کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی معرفی شده است. افزایش سرعت دوران باعث کاهش نیروی قائم می شود که به نوبه خود احتمال لایه لایه شدن در کامپوزیت ها را کاهش می دهد [۴۱]. با این حال، تحقیقات نشان داده است که سرعت های بسیار بالا ممکن است به افزایش دمای برش منجر شوند و نتیجتاً سایش ابزار و خرابی سطحی را تشدید کنند [۴۲]. در این مطالعات، سرعت های اسپیندل بین ۵۰۰ تا ۲۸۰۰ دور بر دقیقه برای فرآیندهای سوراخ کاری معمولی پیشنهاد شده هر چند سرعت های بالاتر (۳۰۰۰ تا ۹۰۰۰ دور بر دقیقه) نیز مورد استفاده قرار گرفته اند که در آنها، سایش ابزار و دمای برش به طور قابل ملاحظه ای بیشتر بوده است [۴۳].

ناصر و همکاران [۴۱] به بررسی پارامترهای بحرانی در سوراخ کاری کامپوزیت های تقویت شده با کتان پرداختند. نتایج نشان داد که سوراخ کاری با سرعت های دورانی بالا (بین ۳۰۰۰ تا ۹۰۰۰ دور در دقیقه) می تواند به چالش هایی مانند سایش بیش از حد ابزار و افزایش دمای برش و نهایتاً سوختن رزین منجر شود. این مسائل می توانند بر دوام ابزار و کیفیت سوراخ کاری تأثیر بگذارند.

۲-۲- جنس ابزار

جنس ابزار عامل مهمی است که بر دقت سوراخ های ایجاد شده تأثیر می گذارد. برای دستیابی به دقت مورد نظر در سوراخ ها، ضروری است که جنس ابزار و هندسه آن به دقت انتخاب شود. با این حال، بررسی ها و مطالعات کافی در زمینه انتخاب مواد ابزار مناسب برای سوراخ کاری در مواد کامپوزیتی نظیر کامپوزیت های الیاف طبیعی به ندرت انجام شده است. در بیشتر موارد، از روش های تجربی برای این منظور استفاده می شود که نه تنها زمان بر است؛ بلکه هزینه های قابل توجهی را نیز در بر دارد. این

الکتریکی به کمک یک مبدل به ارتعاشات مکانیکی تبدیل شده و سپس به ابزار تمرکز دهنده انرژی منتقل می شود که به کاهش نیروهای سوراخ کاری و بهبود کیفیت سطح سوراخ کمک می کند. این روش با کاهش چشمگیر نیروی قائم و جلوگیری از ایجاد تنش های باقیمانده، کیفیت سوراخ و سطح را تا حد زیادی بهبود می بخشد. با این حال، سوراخ کاری التراسونیک به دلیل نرخ پایین برداشت مواد و هزینه بالا، اقتصادی نیست و بیشتر برای تولید چندسوراخی مناسب است [۳۷] و [۳۸].

کامپوزیت های الیاف طبیعی به دلیل خواص منحصر به فردی مانند وزن سبک، استحکام بالا و سازگاری با محیط زیست، جایگزین مناسبی برای کامپوزیت های تقویت شده با الیاف مصنوعی هستند. در این مقاله مروری، سوراخ کاری کامپوزیت های الیاف طبیعی به عنوان یکی از مراحل کلیدی ماشین کاری این مواد مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، فرآیند سوراخ کاری این کامپوزیت ها با چالش هایی مانند لایه لایه شدن، زبری سطح و کاهش دقت ابعادی همراه است که می تواند بر کیفیت نهایی محصول تأثیر منفی بگذارد. در این پژوهش، پارامترهای کلیدی سوراخ کاری از جمله سرعت دوران، سرعت برش، نرخ پیشروی و جنس ابزار با هدف بهبود کیفیت سوراخ ها بررسی شده اند. نتایج این بررسی می توانند به عنوان راهنمایی برای صنایع مختلف در جهت افزایش دقت و کیفیت ماشین کاری کامپوزیت ها و کاهش هزینه های تولید به کار گرفته شوند.

۲- پارامترهای تأثیر گذار در سوراخ کاری

۲-۱- پارامترهای برشی

در فرایند سوراخ کاری، کیفیت نهایی سوراخ های ایجاد شده به پارامترهای برشی وابسته است. این پارامترها شامل سرعت دوران، سرعت برش و نرخ پیشروی است که همگی در زمان شروع فرایند سوراخ کاری قابل تنظیم و کنترل هستند. تنظیم این متغیرها اگر به بهینه ترین شکل ممکن انجام شود امکان تولید سوراخ هایی با دقت بالا و کیفیت مطلوب را فراهم می کند. در گذشته، تحقیقات گسترده ای برای درک بهتر و دقیق تر اثرات این پارامترها بر روی نتایج سوراخ کاری انجام شده است و این تحقیقات نشان داده اند که تغییرات در این متغیرها می تواند تأثیر قابل توجهی بر روی کیفیت نهایی داشته باشد [۳۹].

در مطالعه پارامترهای سوراخ کاری در کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی، سرعت برش و نرخ پیشروی تأثیر قابل توجهی بر کیفیت نهایی کامپوزیت دارند. سرعت های برش بالا معمولاً به

می‌دهد. این یکی از چالش‌های اساسی و متداول است که در حین ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد [۵۰] و [۵۱]. در این پدیده، لایه‌های کامپوزیت تحت تأثیر عملکرد مته و نتیجتاً نیروی محوری حاصله از یکدیگر جدا می‌شوند. لایه‌لایه شدن اغلب در آغاز و انتهای فرایند ماشین‌کاری مشاهده می‌شود [۵۲]. در میان عیوب مرتبط با ماشین‌کاری، لایه‌لایه شدن از مهمترین عیوب محسوب می‌شود [۵۳-۵۵]. لایه‌لایه شدن به عنوان یک نگرانی اساسی در حین ماشین‌کاری ورق‌های کامپوزیت شناخته شده و ممکن است منجر به کاهش قابل ملاحظه تمامیت ساختاری، کیفیت سطح و استحکام باربری سازه گردد [۵۶-۵۸]. ارزیابی لایه‌لایه شدن در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی یک چالش نسبتاً دشوار محسوب می‌شود به‌ویژه در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف یه رنگ تیره که باعث مشکلات در بازرسی چشمی و روش پردازش تصویر می‌شوند.

جدول ۱ فهرست پارامترهای مشخص کننده لایه‌لایه شدن ناشی از سوراخکاری در کامپوزیت‌های پایه پلیمری [۵۹]

نام	اندازه	رابطه	منبع
فاکتور لایه‌لایه شدن معمولی	۱	$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$	چن [۶۰]
ضریب لایه‌لایه شدن اصلاح شده	%	$F'_d = \frac{(D_{max} - D_{nom})}{D_{nom}} \times 100$	گوگل و همکاران [۶۱]
ضریب لایه‌لایه شدن معکوس	۱	$F_{d,inv} = \frac{D_{nom}}{D_{max}}$	خانا و همکاران [۶۲]
حداقل ضریب لایه‌لایه شدن	۱	$F_{d,min} = \frac{D_{min}}{D_{nom}}$	خانا و همکاران [۶۲]
ضریب لایه‌لایه شدن دوبعدی	%	$DF = \left(\frac{A_{del}}{A_{nom}} \right) \%$	چن [۶۰]
ضریب لایه‌لایه شدن تنظیم شده	۱	$F_{da} = F_d + \left(\frac{A_{del}}{A_{max} - A_{nom}} \right) \cdot (F_d^2 - F_d)$	داویم و همکاران [۶۳]
ضریب لایه‌لایه شدن معادل	۱	$F_{ed} = \sqrt{\frac{4 \cdot (A_{del} + A_{nom})}{\pi}} \cdot \frac{1}{D_{nom}}$	تسائو و همکاران [۶۴]
اندازه لایه‌لایه شدن	۱	$R_d = R_{max} - R_{nom}$	خشابا [۶۵]

چالش می‌تواند با ترکیب مطالعات تجربی و تحلیل اجزای محدود برطرف شود تا درک عمیق‌تری از تأثیر مواد بر کارایی مته‌ها حاصل گردد. در مطالعات تجربی بیشتر از ابزارهای فولادی تند بر (HSS) و کاربید جامد به دلیل دسترسی آسان و کاربرد گسترده‌ای که در سوراخکاری انواع مواد دارند، استفاده شده است [۴۴]. ابزارهای تندبر به دلیل عدم سایش در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی گزینه مناسبی شناخته شده‌اند. جنس ابزار با چالش سایش در فرآیند سوراخکاری همراه است که این سایش منجر به تخریب شرایط اولیه سوراخکاری از جمله هندسه می‌شود. این تغییرات می‌تواند به افزایش احتمالی نقص در ورودی و خروجی مته‌ها منجر شود [۴۵]. سایش ابزار در فرایند سوراخکاری می‌تواند به آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه شدن منجر شود که تأثیر اقتصادی زیادی دارد به ویژه در کامپوزیت‌ها که نیاز به دقت بالا دارند. این سایش محدودیت‌هایی را در تعداد سوراخ‌های قابل ایجاد با یک ابزار خاص قبل از نیاز به تعویض یا تعمیر آن ایجاد می‌کند که باعث افزایش هزینه‌ها و کاهش بهره‌وری تولید می‌شود. همچنین، سایش بیش از حد ابزار به کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده آسیب می‌زند [۴۶] و [۴۷].

۲-۳- هندسه ابزار

هندسه مته نقش مهمی در بهبود قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی از چندین جنبه از جمله کاهش آسیب‌های ناشی از سوراخکاری و افزایش کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده ایفا می‌کند. هندسه ابزار به شکل، قطر و زاویه مته اشاره دارد. مته با هندسه‌های مختلف اثرات متفاوتی بر روی ایجاد نیروی محوری دارند. هرچه قطر مته کمتر باشد، نیروی محوری و گشتاور کمتری ایجاد می‌شود بنابراین لایه‌لایه شدن کمتری در نزدیکی سوراخ‌های ایجاد شده رخ می‌دهد. در سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، از مته‌ها با هندسه‌های مختلف و مته‌ها با نقطه انحناء متفاوتی که از جنس‌های مختلفی مثل فولاد تند بر، کاربید جامد، کاربید سیلیسیم با پوشش، کاربید سیلیسیم بدون پوشش و الماس ساخته شده‌اند استفاده می‌شود [۴۸] و [۴۹].

۳- نحوه ارزیابی کیفیت سوراخکاری

۳-۱- ارزیابی لایه‌لایه شدن

لایه‌لایه شدن به عنوان یک پدیده خرابی، در میان لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف در طول ماشین‌کاری رخ

خروجی مته بیشتر از لایه‌لایه شدن در قسمت ورودی مته است و تفاوت در نوع مته تأثیر قابل توجهی بر اندازه لایه‌لایه شدن دارد. افزایش نرخ پیشروی باعث کاهش لایه‌لایه شدن در استفاده از مته پیچشی و کورودریل ۸۵۶ شد. زبری سطح اساساً توسط نوع مته تحت تأثیر قرار گرفته و دمای برشی کمتری برای مته‌های مارپیچ مشاهده شد. رزقی ملکی و همکاران در پژوهشی دیگر [۷۰] ارزیابی لایه‌لایه شدن حاصل از سوراخکاری در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی توسط روش‌های مختلف غیر مخرب را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش پردازش تصویر با استفاده از اسکنر می‌تواند به عنوان یک روش آسان، اقتصادی و کارآمد برای ارزیابی لایه‌لایه شدن استفاده شود.

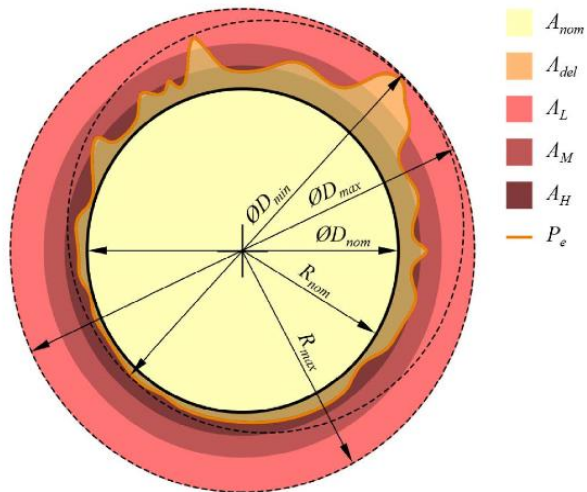
بابو و همکاران [۱۴] ضریب لایه‌لایه شدن و مقادیر زبری سطح حاصل از سوراخ شدن کامپوزیت‌های الیاف طبیعی شامل چتایی، کنف، جوت و موز را با کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مقایسه نمودند. نتایج تحقیقات نشان داد که در کامپوزیت تقویت شده با الیاف جوت، ضریب لایه‌لایه شدن و مقادیر زبری سطح بیشتر از سایر کامپوزیت‌ها می‌باشد. این مقادیر در کامپوزیت‌های طبیعی تقویت شده با الیاف کنف و موز نزدیک به کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه بود. رزقی ملکی و همکاران [۷۱] سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کتان را بررسی کردند. مته مارپیچ استاندارد در مقایسه با ابزارهای کاربردی ویژه، منجر به تولید نیروی محوری کمتر و آسیب کمتر سوراخ در کامپوزیت‌ها شد. بررسی‌ها نشان داد که هندسه ابزار به طور قابل ملاحظه‌ای بر نیروی محوری حین ماشین‌کاری و متعاقباً لایه‌لایه شدن تأثیر می‌گذارد. در مقابل، سایر پارامترها نظیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی تأثیر کمتری بر پارامترهای خروجی داشتند.

جنارتانان و جیاپاول [۷۲] دریافتند دقت ابعادی را می‌توان با کاهش زبری سطح و ضریب لایه‌لایه شدن بهبود بخشید و همچنین عملکرد کامپوزیت را بالا برد.

برای ارزیابی میزان آسیب لایه‌لایه شدن، از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود. در این میان، ضریب لایه‌لایه شدن به عنوان یک پارامتر اساسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است و در جدول (۱) خلاصه شده است لایه‌لایه شدن ناشی از سوراخکاری را می‌توان با چندین عامل ساده و پیچیده مشخص کرد.

دورائو و همکاران [۶۶] بیان کردند که کاهش لایه‌لایه شدن را می‌توان از طریق انتخاب شرایط ماشین‌کاری مناسب مانند نرخ پیشروی، سرعت برش، جنس ابزار و همچنین هندسه ابزار به دست آورد.

پالو و همکاران [۶۷] رفتار ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف جوت را تحت تأثیر پارامترهای مختلف برش و جنس مختلف مته‌ها بررسی کردند. جنس مختلف مته‌ها با تنظیمات یکسان در هندسه ماشین‌کاری، تفاوت معناداری در مقادیر نیروی محوری و ضریب لایه‌لایه شدن ایجاد کردند. از میان مته‌های استفاده شده، مته سهموی بهترین عملکرد برشی را با کمترین نیروهای ماشین‌کاری و بهترین کیفیت سوراخ‌ها نشان داد.



شکل ۱ نمودار شماتیک برای تفسیر ویژگی‌های هندسی اصلی مربوط به معیارهای لایه‌لایه شدن [۵۹] و [۶۸]

۳-۲- ارزیابی کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت سوراخکاری، میزان دایره‌ای بودن سوراخ است که به طور مستقیم به نوع ماشین‌کاری استفاده شده، نوع ماده مورد ماشین‌کاری و پارامترهای ورودی مختلف بستگی دارد. دایره‌ای بودن سوراخ‌ها می‌تواند در هر دو نقطه ورودی و خروجی سوراخ به صورت جداگانه ارزیابی و تعریف شود که نشان‌دهنده دقت و استانداردهای برش در فرایند ماشین‌کاری است. در

رزقی ملکی و همکاران [۶۹] سوراخکاری سنتی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف جوت را مطالعه کردند و در این کار به بررسی تأثیر نوع مته و نرخ پیشروی بر نیروی محوری و لایه‌لایه شدن پرداختند. نتایج نشان داد که مته مارپیچ از جنس فولاد تندبر نیروی محوری کمتری نسبت به مته‌های کورودریل ۸۵۴ و ۸۵۶ تولید می‌کند و تأثیر سرعت دورانی بر نیروی محوری ناچیز است. همچنین نتایج نشان داد که لایه‌لایه شدن در قسمت

دهد. پالانیکومار و همکاران [۷۸] افزایش لایه‌لایه شدن را با افزایش نیروی محوری مشاهده کرده‌اند.

۳-۳- ارزیابی زبری سطح

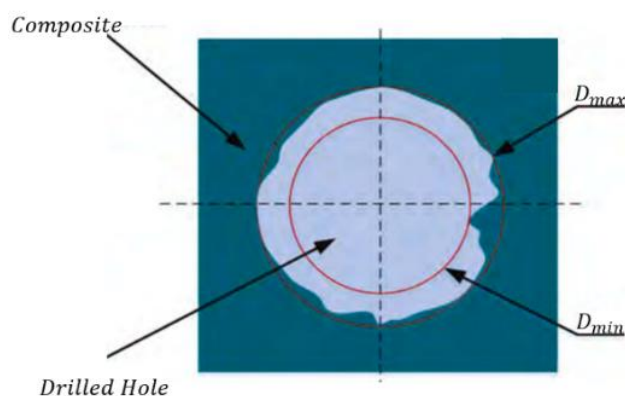
این ویژگی میزان صافی یا زبری سوراخ‌های سطح مورد نیاز را اندازه می‌گیرد. زبری سطح را می‌توان با مشاهده بی‌نظمی سطح سوراخ‌های تولید شده ارزیابی کرد [۷۹]. مقدار بالای زبری سطح در سوراخ‌ها باعث خستگی و سایش بیش از حد در محل سوراخ می‌شود. نرخ پیشروی و سرعت دورانی تأثیر عمده‌ای بر زبری سطح سوراخ‌های تولید شده توسط عملیات ماشین‌کاری دارند [۸۰]. کیفیت پرداخت سطح داخلی سوراخ‌های ایجاد شده در فرایند سوراخکاری به طور چشمگیری بر عملکرد آن‌ها در سرویس‌دهی اثر می‌گذارد. یک سطح با کیفیت بالا، افزایش قابلیت اطمینان بعد از مونتاژ را ممکن می‌سازد. تلاش‌های فراوانی برای اصلاح پارامترهای سوراخکاری جهت رسیدن به نرخ زبری سطح مطلوب صورت گرفته است. زبری سطح بیش از حد یا نوسانات شدید در زبری می‌تواند به شکست ماده در برابر بارهای خستگی منجر شود که این امر نهایتاً باعث ایجاد ناسازگاری، افزایش اصطکاک و تولید حرارت در دیواره‌های سوراخ می‌شود [۸۱]. زبری سطح در سوراخکاری کامپوزیت‌ها تحت تأثیر عواملی چون سرعت دوران، نرخ پیشروی و جنس مته قرار دارد. با افزایش دور دوران و سرعت پیشروی، زبری سطح عموماً افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از نیروهای برشی بیشتر و تنش‌های ناگهانی ایجاد شده بر سطح کامپوزیت باشد که به پراکندگی و نامنظمی سطح منجر می‌شود [۸۲]. با جپای و سینگ [۸۳] مطالعاتی در زمینه ماشین‌کاری بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی انجام دادند. آنها از انواع مته‌ها از جمله مته مارپیچ تندبر، مته مارپیچ چندساختی و انواع مته براد و خار استفاده کردند. در این آزمایشات از الیاف شیشه، سیسال و جوت به عنوان مواد تقویت‌کننده نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شد. مته‌های براد و خار آسیب کمتری در اطراف سوراخ ایجاد کردند و نیروی محوری کمتری نسبت به دیگر مته‌ها داشتند. از سوی دیگر، مته مارپیچ باعث لایه‌لایه شدن بیشتری در سطح چندلایه‌های کامپوزیتی شد.

پالانیکومار [۸۰] در مطالعه سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه نرخ پیشروی را اصلی‌ترین پارامتر تأثیرگذار در این مطالعه بر زبری و ضریب لایه‌لایه شدن دانست. قطر مته تأثیر بیشتری بر ضریب لایه‌لایه شدن و تأثیر کمتری بر مقدار زبری سطح داشت. جان و همکاران [۸۴] اثر پارامترهای

کامپوزیت‌های پایه پلیمری، حفظ دایره‌ای بودن سوراخ‌ها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد؛ زیرا این مواد به دلیل ساختار ناهمگن خود به راحتی تحت تأثیر نیروهای برشی قرار می‌گیرند که این امر می‌تواند منجر به ناهمواری‌ها و نامنظمی‌هایی در سطح و اطراف سوراخ‌ها شود [۷۳]. شکل (۲) مشکلات مربوط به دایره‌ای نبودن سوراخ‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌ها را به وضوح نمایش داده است که تأکید بر اهمیت انتخاب صحیح ابزار و تنظیمات دقیق ماشین‌کاری در جهت بهبود کیفیت نهایی محصول دارد. از نظر ریاضی، طبق معادله زیر دایروی بودن نسبت حداقل قطر به حداکثر قطر سوراخ تعریف شده است:

$$Circularity = \frac{D_{min}}{D_{max}} \quad (1)$$

که در آن D_{min} حداقل قطر و D_{max} حداکثر قطر سوراخ ایجاد شده است [۷۴].



شکل ۲ مشکل عدم دایره‌ای بودن سوراخ ایجاد شده [۷۴]

زیتون و همکاران [۷۵] از طریق آزمایش‌های عملی تأثیرات پارامترهای مختلف بر گشتاور، نیروی محوری و صافی سطح را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که انتخاب صحیح پارامترهای برش می‌تواند به بهبود کیفیت سوراخ‌ها کمک کند. فرنس و همکاران [۷۶] تجزیه و تحلیل آماری تأثیر نرخ پیشروی، سرعت برش و سایش را در کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که پیشروی و سرعت تأثیر کمی بر کیفیت سوراخ دارند.

آدا و همکاران [۷۷] بر اساس نتایج سوراخکاری بر روی کامپوزیت پلی استر تقویت‌شده با الیاف جوت مشاهده کردند که لایه‌لایه شدن به پارامترهای مختلف برش بسیار حساس می‌باشند. ترکیب نرخ پیشروی کم و سرعت دوران بالا، موجب کاهش لایه‌لایه شدن می‌شود. همچنین استفاده از قطر مته کمتر و نرخ پیشروی کمتر نیز می‌تواند ضریب لایه‌لایه شدن را کاهش

نقص در بخش ورودی و خروجی سوراخ‌ها را به دنبال دارد. این تغییرات می‌توانند به کاهش کیفیت سوراخ‌ها و افزایش هزینه‌ها منجر شود که به کاهش بهره‌وری تولید نیز می‌انجامد.

۴-۳- هندسه ابزار

هندسه مته شامل شکل، قطر و زاویه نوک ابزار نقش حیاتی در بهبود ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف طبیعی دارد. استفاده از هندسه‌های مناسب مته کمک می‌کند تا آسیب‌های ناشی از فرایند سوراخکاری کاهش یابد و در نتیجه کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده بهبود یابد. نتایج نشان دادند که ابزارهای با قطر کمتر، نیروی محوری و گشتاور کمتری تولید می‌کنند که این امر به نوبه خود باعث کاهش لایه‌لایه‌شدن در اطراف سوراخ‌های ایجاد شده می‌شود. استفاده از هندسه‌های مخصوص و جنس مته مناسب می‌تواند به شدت در کاهش خطرات مرتبط با سایش ابزار و بهبود کلی فرایند سوراخکاری کمک کند.

۴-۴- لایه‌لایه شدن

در تحقیقات اخیر در زمینه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، موضوع لایه‌لایه شدن به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی مطرح شده است. این پدیده بیشتر در ابتدا و انتهای فرایند ماشین‌کاری رخ داده و منجر به کاهش تمامیت ساختاری، کیفیت سطحی و استحکام باربری می‌گردد. تحقیقات نشان داده‌اند که این مشکل می‌تواند به‌وسیله انتخاب مناسب پارامترهای ماشین‌کاری مانند پیشروی و سرعت برش به طور قابل توجهی کاهش یابد.

از دیگر یافته‌های مهم در این زمینه، اثرات متفاوت جنس و شکل ابزارهای برشی در کاهش این پدیده است. مته‌های سهموی به دلیل طراحی خاص خود، نیروهای کمتری را در حین ماشین‌کاری ایجاد کرده و منجر به کیفیت بهتر سوراخ‌ها می‌شوند. در مقابل، استفاده از مته‌های پله‌ای نیز نتایج قابل توجهی در استحکام باقیمانده نسبت به مته‌های شمعدانی و مارپیچ به همراه داشته است. مقایسه میان کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی و الیاف شیشه نیز نکات جالب توجهی را آشکار ساخته است. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی نرخ بالاتری از لایه‌لایه شدن و زبری سطح را نشان داده‌اند که این مسئله به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این نوع الیاف باز می‌گردد. این یافته‌ها به صنعتگران کامپوزیت این امکان را می‌دهند که با

ماشین‌کاری را در زبری سطح و لایه‌لایه شدن کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با کناف، جوت و پوسته برنج مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج، کمترین آسیب لایه‌لایه شدن و بهترین کیفیت سطح در الیاف کناف مشاهده شد. علاوه بر این، تفاوت در محتوای سیلیکون و سختی سه ماده به طور قابل توجهی بر کیفیت سطح تأثیر گذاشت.

چلیک و همکاران [۸۵] گزارش کردند که افزایش تعداد شیارهای ابزار در طول ماشین‌کاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در نیروی برش، لایه‌لایه شدن و زبری سطح شود.

۴- جمع‌بندی اثر پارامترهای مختلف

۴-۱- پارامترهای ماشین‌کاری

در تحقیقات اخیر، مشخص شده است که تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری، از جمله سرعت دوران، سرعت برش و نرخ پیشروی برای دستیابی به نتایج بهینه در فرایند سوراخکاری حیاتی است. استفاده از سرعت‌های بالای دوران می‌تواند به افزایش سایش ابزار و دمای برش منجر شود که این امر نه تنها عمر ابزار را کاهش می‌دهد؛ بلکه بر کیفیت سوراخ‌کاری نیز تأثیر می‌گذارد. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی مقاومت کمتری در برابر ساییدگی دارند و به طور مؤثرتری می‌توانند با این چالش‌ها مقابله کنند. برای بهبود عملکرد و کیفیت، پیشنهاد می‌شود که از مته‌های پوشش داده شده و سیستم‌های خنک‌کننده استفاده شود تا از این طریق دمای برش کنترل شده و نتایج بهتری حاصل گردد.

۴-۲- جنس ابزار

تحلیل‌ها نشان داد که جنس ابزار تأثیر قابل توجهی بر دقت سوراخ‌های ایجاد شده دارد. همچنین نتایج نشان دادند که اگرچه مته‌های مارپیچ با جنس فولاد تندبر از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه هستند اما نرخ سایش در آن‌ها سریع‌تر از ابزارهای کاربید جامد است که دوام بیشتری و هزینه بالاتری دارند. در برخی تحقیقات مته‌های مارپیچ با جنس فولاد تندبر به عنوان مناسب‌ترین ابزار برای سوراخکاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی معرفی شد. سایش ابزار به‌عنوان یک عامل کلیدی تأثیرگذار بر شرایط اولیه فرایند سوراخکاری شناخته شد. سایش بیش از حد منجر به انحراف از ابعاد و کیفیت سطح موردنظر سوراخ شده که افزایش احتمال

مطالعات اخیر نشان دادند که انتخاب دقیق نوع مته و تنظیم پارامترهای برش می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش زبری سطح و بهبود کیفیت سوراخ‌ها داشته باشد. مته‌های براد و خار به دلیل تولید نیروی محوری کمتر و آسیب کمتر به اطراف سوراخ، در کاهش زبری سطح مؤثر هستند. علاوه بر این، تحقیقات نشان دادند که افزایش تعداد فلوت‌ها در طول فرزکاری می‌تواند به کاهش نیروی برش و بهبود کلی زبری سطح کمک کند. این نکته تأکید می‌کند که انتخاب صحیح ابزار و پارامترهای ماشین‌کاری نه تنها بر کیفیت سطحی تأثیر می‌گذارد، بلکه به بهبود عملکرد کلی و استحکام قطعات نیز کمک می‌کند. نتیجتاً مهندسان و تکنسین‌ها باید به دقت نوع مته‌ها، شرایط برش و مواد استفاده شده را انتخاب کنند تا به بهترین نتایج دست یابند. این اطلاعات می‌تواند در صنعت ماشین‌کاری برای افزایش کارایی و کیفیت تولیدات، به‌ویژه در تولید قطعات دقیق و پیچیده که نیاز به استانداردهای کیفی بالا دارند، مفید واقع شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر عوامل مختلف بر فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به دقت بررسی شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان دادند که با انتخاب دقیق متغیرهای کلیدی مانند سرعت دوران، نرخ پیشروی و انتخاب مته مناسب امکان کاهش آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه‌شدن و افزایش زبری سطح فراهم می‌شود. استفاده بهینه از ابزارهای با جنس مناسب نه تنها به کنترل دمای برش کمک می‌کند بلکه در کاهش سایش ابزار مؤثر واقع می‌شود که این عوامل به طور قابل ملاحظه‌ای کیفیت سوراخکاری را افزایش می‌دهند.

این تحقیق به‌وضوح بر اهمیت انتخاب مناسب ابزار و تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری برای بهبود عملکرد و کاهش نقص‌ها در فرایندهای تولیدی که درگیر مواد کامپوزیتی هستند، تأکید می‌کند. بهینه‌سازی فرایندهای ماشین‌کاری با در نظر گرفتن خواص خاص مواد مورد استفاده می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر کاهش هزینه‌های تولید، افزایش دوام و استحکام محصولات نهایی داشته باشد. بر این اساس توصیه می‌شود که مطالعات بیشتری برای فهم عمیق‌تر تأثیرات جنس و هندسه ابزار بر روی انواع مختلف مواد کامپوزیتی انجام گیرد تا راهنمایی‌های دقیق‌تری برای کاربردهای صنعتی ارائه شود. این دستاوردها نه تنها به پیشبرد دانش فنی در زمینه ماشین‌کاری کمک می‌کنند بلکه می‌توانند به‌عنوان مرجعی برای توسعه فناوری‌های نوین در صنایع مرتبط استفاده شوند.

انتخاب دقیق‌تر الیاف و تنظیم شرایط ماشین‌کاری، به بهبود عملکرد کامپوزیت و دقت ابعادی آن پردازند.

۴-۵- کیفیت سوراخ‌های تولید شده

کیفیت سوراخ‌های تولید شده در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف یکی از معیارهای اصلی برای سنجش کارایی فرایند ماشین‌کاری است. دایره‌ای بودن سوراخ‌ها که به‌عنوان نسبت حداقل قطر به حداکثر قطر سوراخ تعریف می‌شود نشان‌دهنده توانایی فرایند در تولید قطعات با دقت ابعادی بالا می‌باشد. تنظیم دقیق پارامترهای برش، مانند سرعت برش و نرخ پیشروی اساس بهبود این ویژگی است.

استفاده از انواع مته‌های مخصوص، مانند مته‌های براد و خار، کمک شایانی به کاهش آسیب‌دیدگی اطراف سوراخ‌ها و کاهش نیروی قائم می‌کند. این مته‌ها با کمترین تماس و فشار به ماده، سوراخ‌های دقیق‌تر و با دایره‌ای بودن بالاتر تولید می‌کنند.

۴-۶- زبری سطح

زبری سطح، به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در کیفیت ماشین‌کاری، تأثیر مستقیمی بر تولید سوراخ‌های دقیق و باکیفیت دارد. بی‌نظمی‌های روی سطح سوراخ‌ها که در اثر فرایند ماشین‌کاری ایجاد می‌شوند، می‌توانند نتیجه انتخاب مواد، نوع ابزار، پارامترهای برش و تکنیک‌های استفاده شده باشند. این ناهمواری‌ها ممکن است به شکست خستگی زود هنگام یا سایش بیش از حد در قطعات ماشین‌کاری شده منجر شوند که در نتیجه بر دوام و کارایی کلی محصول تأثیر می‌گذارند. در تحقیقات مشخص شده است که کامپوزیت‌های تقویت شده با کناف نسبت به کامپوزیت‌های دارای الیاف شیشه یا جوت، زبری سطح کمتر و کیفیت بالاتری را در سوراخ‌کاری نشان می‌دهند. این تفاوت ممکن است به دلیل سختی کمتر کناف و وجود سیلیکون در ساختار آن باشد که سبب کاهش اصطکاک و فرسایش در حین برش می‌شود. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و کنترل زبری سطح وجود دارد که هر کدام دقت و کاربردهای متفاوتی دارند. برخی از این روش‌ها شامل نمایه‌سازی زبری سطح در نقاط خاص هستند که امکان ارائه اطلاعات دقیق و موضعی را فراهم می‌کنند. دیگر روش‌ها، مانند مساحت ناهمواری سطح، به ارزیابی گسترده‌تر و سریع‌تر این ویژگی‌ها در سطح قطعه می‌پردازند. استفاده از قلم‌های مکانیکی برای ردیابی زبری خطی نیز یک روش مفید در برخی کاربردهای خاص است.

۶- فهرست علائم و اختصارات

vol. 69, p. 102112, 2021, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102112>.

[6] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, and A. Nosrati, "Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: A review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 2289-2308, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04348-z>.

[7] H. Fernandes Medeiros de Queiroz, M. D. Banea, D. Kioshi Kawasaki Cavalcanti, and J. de Souza e Silva Neto, "The effect of multiscale hybridization on the mechanical properties of natural fiber-reinforced composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, no. 41, p. 51213, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/app.51213>.

[8] L. Calabrese, E. Piperopoulos, and V. Fiore, "Arundo donax fibers as green materials for oil spill recovery," *Biofibers and biopolymers for biocomposites: Synthesis, characterization and properties*, pp. 259-283, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40301-0_13.

[9] A. A. B. Omran *et al.*, "Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: A review," *Polymers*, vol. 13, no. 2, p. 231, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13020231>.

[10] A. Kadier *et al.*, "Use of industrial wastes as sustainable nutrient sources for bacterial cellulose (BC) production: Mechanism, advances, and future perspectives," *Polymers*, vol. 13, no. 19, p. 3365, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13193365>.

[11] Y. Kim and J. Park, "A theory for the free vibration of a laminated composite rectangular plate with holes in aerospace applications," *Composite Structures*, vol. 251, p. 112571, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112571>.

[12] J. Claramunt, H. Ventura, R. D. Toledo Filho, and M. Ardanuy, "Effect of nanocelluloses on the microstructure and mechanical performance of CAC cementitious matrices," *Cement and Concrete Research*, vol. 119, pp. 64-76, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.006>.

[13] U. Khashaba, H. Sallam, A. Al-Shorbagy, and M. Seif, "Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures," *Composite Structures*, vol. 73, no. 3, pp. 310-317, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.02.004>.

[14] G. D. Babu, K. S. Babu, and B. U. M. Gowd, "Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites," *J. Adv. Mech. Eng.*, vol. 1, pp. 1-12, 2013, doi: <https://doi.org/10.7726/jame.2013.1001>.

علائم انگلیسی

قطر حداقل	D_{min}
قطر حداکثر	D_{Max}
قطر اسمی	D_{nom}
مساحت لایه لایه شده	A_{del}
مساحت اسمی	A_{nom}
فاکتور لایه لایه شدن معمولی	F_d
ضریب لایه لایه شدن اصلاح شده	F'_d
ضریب لایه لایه شدن معکوس	$F_{d,inv}$
ضریب حداقل لایه لایه شدن	F_{dmin}
ضریب لایه لایه شدن معمولی	DF
ضریب لایه لایه شدن تنظیم شده	F_{da}
ضریب لایه لایه شدن معادل	F_{ed}
اندازه لایه لایه شدن	R_d
شعاع حداکثر	R_{max}
شعاع اسمی	R_{nom}

۷- مراجع

[1] A. Pegoretti, "Recycling concepts for short-fiber-reinforced and particle-filled thermoplastic composites: A review," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, no. 2, pp. 93-104, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.03.004>.

[2] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, Y. G. T. Girijappa, S. M. Rangappa, M. K. Gupta, and S. Siengchin, "Mechanical, electrical and thermal behaviour of additively manufactured thermoplastic composites for high performance applications," *Additive and subtractive manufacturing of composites*, pp. 167-199, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3184-9_7.

[3] M. Das, S. Sahu, and D. Parhi, "Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 955-960, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.005>.

[4] D. Carrasco-Baltasar, S. García-Castillo, I. Ivañez, and C. Navarro, "Modelling of woven CFRP plates subjected to oblique high-velocity impact and membrane loads," *Composite Structures*, vol. 303, p. 116344, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116344>.

[5] B. Mei and W. Zhu, "Accurate positioning of a drilling and riveting cell for aircraft assembly," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*,

- Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 7118-7123, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.041>.
- [25] M. Monoranu, R. L. Mitchell, K. Kerrigan, J. P. A. Fairclough, and H. Ghadbeigi, "The effect of particle reinforcements on chip formation and machining induced damage of modified epoxy carbon fibre reinforced polymers (CFRPs)," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 154, p. 106793, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106793>.
- [26] D. Geng *et al.*, "Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review," *Composite Structures*, vol. 216, pp. 168-186, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>.
- [27] A. Jain, B. Singh, and Y. Shrivastava, "Reducing the heat-affected zone during the laser beam drilling of basalt-glass hybrid composite," *Composites Part B: Engineering*, vol. 176, p. 107294, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107294>.
- [28] R. Tewari, M. K. Singh, S. Zafar, and S. Powar, "Parametric optimization of laser drilling of microwave-processed kenaf/HDPE composite," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 176-187, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/0967391120905705>.
- [29] H. N. Dhakal, S. O. Ismail, S. O. Ojo, M. Paggi, and J. R. Smith, "Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: a comprehensive analysis of machining-induced damage responses," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, pp. 2833-2847, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2670-x>.
- [30] S. Kalirasu, N. Rajini, S. Rajesh, J. W. Jappes, and K. Karuppasamy, "AWJM Performance of jute/polyester composite using MOORA and analytical models," *Materials and manufacturing processes*, vol. 32, no. 15, pp. 1730-1739, 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279314>.
- [31] N. Abilash and M. Sivapragash, "Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 28, no. 1, pp. 92-102, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>.
- [32] A. KM and J. MP, "Optimization of process parameters on drilling of natural fibres reinforced in epoxy resin matrices using Taguchi-Grey relational analysis," *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, vol. 16, no. 5, pp. 937-949, 2020, doi: <https://doi.org/10.1108/mmms-06-2019-0108>.
- [15] D. Che, I. Saxena, P. Han, P. Guo, and K. F. Ehmann, "Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, no. 3, p. 034001, 2014, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4026526>.
- [16] F. Chegdani and M. El Mansori, "New Multiscale Approach for Machining Analysis of Natural Fiber Reinforced Bio-Composites," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 1, 2018, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4041326>.
- [17] A. Khan, N. Kim, J. K. Shin, H. S. Kim, and B. D. Youn, "Damage assessment of smart composite structures via machine learning: a review," *JMST Advances*, vol. 1, pp. 107-124, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s42791-019-0012-2>.
- [18] F. Ahmad, A. Manral, and P. K. Bajpai, "Machining of thermoplastic composites," *Processing of green composites*, pp. 107-123, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6019-0_8.
- [19] K. Malik, F. Ahmad, and E. Gunister, "Drilling performance of natural fiber reinforced polymer composites: a review," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 12, pp. 4761-4779, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1870624>.
- [20] R. Stone and K. Krishnamurthy, "A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, no. 9, pp. 985-1003, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(96\)00013-2](https://doi.org/10.1016/0890-6955(96)00013-2).
- [21] M. Altin Karataş, A. R. Motorcu, and H. Gökkaya, "Study on delamination factor and surface roughness in abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composites with different fiber orientation angles," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, pp. 1-29, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02741-4>.
- [22] J. Xu, "Manufacturing of fibrous composites for engineering applications," vol. 6, no. 7, p. 187, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs6070187>.
- [23] G. Hegedus, T. Sarkadi, and T. Czigany, "Self-sensing composite: reinforcing fiberglass bundle for damage detection," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 131, p. 105804, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105804>.
- [24] K. K. Panchagnula, N. V. K. Jasti, and J. S. Panchagnula, "Prediction of drilling induced delamination and circularity deviation in GFRP nanocomposites using deep neural network,"

- [42] V. Chaudhary and P. P. Gohil, "Investigations on drilling of bidirectional cotton polyester composite," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 7, pp. 960-968, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444>.
- [43] A. A. Nasir, A. Azmi, and A. Khalil, "Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites," *Measurement*, vol. 75, pp. 298-307, 2015, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444>.
- [44] M. M. Nassar, R. Arunachalam, and K. I. Alzebedeh, "Machinability of natural fiber reinforced composites: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, pp. 2985-3004, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9010-9>.
- [45] P. Mayuet, A. Gallo, A. Portal, P. Arroyo, M. Alvarez, and M. Marcos, "Damaged area based study of the Break-IN and Break-OUT defects in the dry drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)," *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 743-751, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.249>.
- [46] M.-B. Lazar and P. Xirouchakis, "Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 12, pp. 937-946, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.08.009>.
- [47] C. Tsao and H. Hocheng, "Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials," *International journal of mechanical sciences*, vol. 49, no. 8, pp. 983-988, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.01.001>.
- [48] A. Lotfi, H. Li, D. V. Dao, and G. Prusty, "Natural fiber-reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 34, no. 2, pp. 238-284, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/0892705719844546>.
- [49] S. Jayabal and U. Natarajan, "Optimization of thrust force, torque, and tool wear in drilling of coir fiber-reinforced composites using Nelder-Mead and genetic algorithm methods," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, pp. 371-381, 2010, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2605-7>.
- [50] D. Liu, Y. Tang, and W. Cong, "A review of mechanical drilling for composite laminates," *Composite structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265-1279, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>.
- [33] A. Athijayamani, M. Thiruchitrambalam, U. Natarajan, and B. Pazhanivel, "Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite," *Polymer composites*, vol. 31, no. 4, pp. 723-731, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.20853>.
- [34] K. Debnath, M. Sisodia, A. Kumar, and I. Singh, "Damage-free hole making in fiber-reinforced composites: an innovative tool design approach," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 10, pp. 1400-1408, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1140191>.
- [35] A. Solati, M. Hamed, and M. Safarabadi, "Combined GA-ANN approach for prediction of HAZ and bearing strength in laser drilling of GFRP composite," *Optics & Laser Technology*, vol. 113, pp. 104-115, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.016>.
- [36] A. Solati, M. Hamed, and M. Safarabadi, "Comprehensive investigation of surface quality and mechanical properties in CO₂ laser drilling of GFRP composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 791-808, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3164-6>.
- [37] M. Kadivar, J. Akbari, R. Yousefi, A. Rahi, and M. G. Nick, "Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composites," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 3, pp. 344-350, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.10.001>.
- [38] P. Mehbudi, V. Baghlani, J. Akbari, A. Bushroa, and N. Mardi, "Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates," *Procedia Cirp*, vol. 6, pp. 577-582, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.097>.
- [39] T. Rajmohan, R. Vinayagamoorthy, and K. Mohan, "Review on effect machining parameters on performance of natural fibre-reinforced composites (NFRCs)," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 32, no. 9, pp. 1282-1302, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>.
- [40] L. M. P. Durão, J. M. R. Tavares, V. H. C. De Albuquerque, J. F. S. Marques, and O. N. Andrade, "Drilling damage in composite material," *Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 3802-3819, 2014.
- [41] A. A. A. Nasir, A. I. Azmi, T. C. Lih, and M. S. A. Majid, "Critical thrust force and critical feed rate in drilling flax fibre composites: A comparative study of various thrust force models," *Composites Part B: Engineering*, vol. 165, pp. 222-232, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.134>.

- [60] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 8, pp. 1097-1108, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8).
- [61] S. Gaugel *et al.*, "A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)," *Composite Structures*, vol. 155, pp. 173-183, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.004>.
- [62] N. Khanna, F. Pusavec, C. Agrawal, and G. M. Krolczyk, "Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility," *Measurement*, vol. 154, p. 107504, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107504>.
- [63] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 1939-1945, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009>.
- [64] C. Tsao, K. Kuo, and I. Hsu, "Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 617-622, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3532-y>.
- [65] U. Khashaba, "Delamination in drilling GFR-thermoset composites," in *International conference on aerospace sciences and aviation technology*, 2003, vol. 10, no. 10th International Conference On Aerospace Sciences & Aviation Technology: The Military Technical College, pp. 461-481, doi: <https://dx.doi.org/10.21608/asat.2013.24453>.
- [66] L. M. P. Durão *et al.*, "Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics," in *Materials Science Forum*, 2013, vol. 730: Trans Tech Publ, pp. 301-306, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301>.
- [67] T. B. Yallem, P. Kumar, and I. Singh, "A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 230, no. 4, pp. 888-898, 2016, doi: <https://doi.org/10.1177/1464420715587750>.
- [68] N. Geier, D. I. Poór, C. Pereszlai, J. Bacs, and B. Z. Balázs, "Fúrásindukált delamináció kialakulása és mérőszámai szálerősített polimer (FRP)
- [51] A. Caggiano, "Machining of fibre reinforced plastic composite materials," *Materials*, vol. 11, no. 3, p. 442, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11030442>.
- [52] T. Rajamurugan, K. Shanmugam, and K. Palanikumar, "Analysis of delamination in drilling glass fiber reinforced polyester composites," *Materials & Design*, vol. 45, pp. 80-87, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.047>.
- [53] A. Abrao, P. Faria, J. C. Rubio, P. Reis, and J. P. Davim, "Drilling of fiber reinforced plastics: A review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, no. 1-3, pp. 1-7, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146>.
- [54] J. C. Rubio, A. Abrao, P. Faria, A. E. Correia, and J. P. Davim, "Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 6, pp. 715-720, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.015>.
- [55] M. Ganjiani, M. Safarabadi, N. Mehri-Khansari, and H. Oruji, "Effects of delamination in drilling glass/polyester composite," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 552-567, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0699-7>.
- [56] T. H. Nam, S. Ogihara, N. H. Tung, and S. Kobayashi, "Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 1648-1656, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.001>.
- [57] S. Karnik, V. Gaitonde, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. Abrão, and J. P. Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," *Materials & Design*, vol. 29, no. 9, pp. 1768-1776, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014>.
- [58] M. Safarabadi and M. Sardar, "Numerical study of GFRP joints bearing strength reduction due to drilling-induced delamination," *Journal of Composite Materials*, vol. 54, no. 16, pp. 2185-2194, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998319893075>.
- [59] T. Lukács, C. Pereszlai, and N. Geier, "Delamination measurement in glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite based on image differencing," *Composites Part B: Engineering*, vol. 248, p. 110381, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110381>.

- multiple estimators," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, pp. 2885-2907, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07628-9>.
- [78] K. Palanikumar, B. Latha, V. Senthilkumar, and J. P. Davim, "Analysis on drilling of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 3, pp. 297-305, 2012, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.577865>.
- [79] I. Cavusoglu, M. Durakbasa, and M. Cakir, "The effects of drilling operation on the surface roughness of modified GFRP composites," 2018, doi: <https://10.12693/APhysPolA.134.339>.
- [80] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, and R. Karthikeyan, "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites," *Materials & Design*, vol. 27, no. 10, pp. 862-871, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.011>.
- [81] S. Margabandu and S. Subramaniam, "An experimental investigation of thrust force, delamination and surface roughness in drilling of jute/carbon hybrid composites," *World Journal of Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 661-674, 2020, doi: <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2020-0080>.
- [82] R. Vinayagamoorthy, I. Manoj, G. Narendra Kumar, I. Sai Chand, G. Sai Charan Kumar, and K. Suneel Kumar, "A central composite design based fuzzy logic for optimization of drilling parameters on natural fiber reinforced composite," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, pp. 2011-2020, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0409-0>.
- [83] P. K. Bajpai and I. Singh, "Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 32, no. 20, pp. 1569-1576, 2013, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684413492866>.
- [84] R. John, R. Lin, K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, "Effects of machining parameters on surface quality of composites reinforced with natural fibers," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, no. 1, pp. 73-83, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1813896>.
- [85] Y. H. Çelik, E. Kilickap, and A. İ. Kilickap, "An experimental study on milling of natural fiber (jute)-reinforced polymer composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 22, pp. 3127-3137, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998319826373>.
- kompozitokban= Formation and Measures of Drilling Induced Delamination in Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites," *Gradus*, vol. 8, no. 1, pp. 254-260, 2021, doi: <https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.005>.
- [69] H. Rezghi Maleki, M. Hamed, M. Kubouchi, and Y. Arao, "Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 3, pp. 283-295, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998318782376>.
- [70] H. R. Maleki, B. Abazadeh, Y. Arao, and M. Kubouchi, "Selection of an appropriate non-destructive testing method for evaluating drilling-induced delamination in natural fiber composites," *NDT & E International*, vol. 126, p. 102567, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102567>.
- [71] H. Rezghi Maleki, M. Hamed, M. Kubouchi, and Y. Arao, "Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 3, pp. 283-292, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532584>.
- [72] M. Jenarathanan and R. Jeyapaul, "Machinability study of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites using design of experiment technique," *Pigment & Resin Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 35-44, 2014, doi: <https://doi.org/10.1108/PRT-12-2012-0088>.
- [73] G. Kumar, S. M. Rangappa, S. Siengchin, and S. Zafar, "A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites," *Composites Part C: Open Access*, vol. 9, p. 100312, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100312>.
- [74] A. Singh and A. K. Sharma, "On microwave drilling of metal-based materials at 2.45 GHz," *Applied Physics A*, vol. 126, no. 10, p. 822, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03994-5>.
- [75] R. Zitoun, V. Krishnaraj, and F. Collombet, "Study of drilling of composite material and aluminium stack," *Composite Structures*, vol. 92, no. 5, pp. 1246-1255, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.010>.
- [76] R. Furness, C. Wu, and A. G. Ulsoy, "Statistical analysis of the effects of feed, speed, and wear on hole quality in drilling," 1996, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2831038>.
- [77] B. Adda, A. Belaadi, M. Boumaaza, and M. Bourchak, "Experimental investigation and optimization of delamination factors in the drilling of jute fiber-reinforced polymer biocomposites with