



بررسی عددی تأثیر گرفتگی رگ روی تنش و دمای جریان خون تحت یک شار حرارتی ثابت

مهدی کیهانپور

دانشجوی دکتری

فاطمه السادات

میرعابدینی

کارشناس

مجید قاسمی*

استاد

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

چکیده: یکی از رایج‌ترین بیماری‌های قلبی - عروقی گرفتگی رگ‌ها می‌باشد. در این پژوهش جریان خون با مدل‌های مختلف لزجت در یک رگ دارای گرفتگی با فرض دیواره بررسی شده است. هندسه گرفتگی با رابطه کسینوسی مدل شده است. معادلات مسأله شامل پیوستگی، ممنتوم، انرژی، قانون هوک برای ماده الاستیک خطی و روش (ALE) برای برهم کنش سیال - جامد به صورت کد المان محدود تعریف و حل شده‌اند. نتایج نشان داد، دیواره رگ در نزدیکی گرفتگی بیش‌ترین جابجایی را دارد. فرض بر هم‌کنش سیال - جامد باعث کاهش تنش برشی دیواره می‌گردد. برای مثال، بیشینه مقدار تنش برشی دیواره در ناحیه گرفتگی با مدل لزجت کاریو از $2/32$ به $2/23$ و با مدل لزجت نیوتنی از $2/1$ به 2 کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید، اعمال شار حرارتی در سطح بیرونی دیواره رگ باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای دمای جریان خون و دیواره در ناحیه گرفتگی می‌شود.

واژه‌های راهنما: گرفتگی، غیر نیوتنی، جریان خون، تنش برشی دیواره، ماده الاستیک خطی.

Mahdi
Keyhanpour
PhD Student

Fatemeh Sadat
Mirabedini
BSc

Majid Ghasemi *
Professor, Department
of Mechanical
Engineering, K. N. T.
University of
Technology, Tehran

Numerical study of the effect of stenotic artery on stress and blood flow temperature under a constant heat flux

Abstract: One of the most common cardiovascular diseases is stenotic arteries. In this study, blood flow with different models of viscosity in a stenotic artery with the assumption of a wall has been investigated. Stenosis geometry is modeled by cosine relation. For the problem equations including continuity, momentum, energy, Hooke's law for linear elastic material, and the method (ALE) for fluid-solid interaction are defined and solved as finite element code. The results showed that the vessel wall had the most displacement near the stenosis region. Assuming the fluid-solid interaction reduces the wall shear stress. For example, the maximum wall shear stress in the stenotic region decreases from 2.32 to 2.23 with Carreau viscosity and from 2.1 to 2 with Newtonian viscosity. It was also observed that applying heat flux on the outer surface of the vessel wall causes a significant increase in blood flow and the wall temperature in the stenotic region.

Keywords: Stenosis, non-Newtonian, Blood Flow, Wall Shear Stress, Linear Elastic Material.

۱- مقدمه

بیماری‌های قلبی-عروقی علت بسیاری از مرگ و میرها می‌باشند. یک نمونه شایع از بیماری‌های قلبی-عروقی تجمع مولکول‌های چربی در دیواره رگ‌ها می‌باشد. این پدیده باعث سخت شدن دیواره درونی رگ و کاهش قطر آن می‌گردد. این تغییر اندازه رگ بر روی جریان خون اثر می‌گذارد که می‌تواند سلامت شخص بیمار را به خطر بیندازد. در این حوزه پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی گوناگونی برای بررسی تغییرات ناشی از گرفتگی صورت گرفته است. سرعت جریان خون درون رگ‌ها (دستگاه گردش خون) می‌تواند شاخصه مناسبی برای بررسی آسیب در نواحی قلب و عروق باشد. بدین صورت که سرعت جریان خون و تغییرات آن با اثرگذاری بر روی دیواره داخلی رگ، می‌تواند اثرات متفاوتی بر روی آن بگذارد. بر این اساس مطالعه و شبیه‌سازی بر روی جریان خون و اثرات آن بر روی سیستم گردش خون از موضوعاتی است که می‌تواند در پیش بینی آسیب به ما کمک کند [۱]. احمد و همکارانش، یک رگ دارای گرفتگی را به صورت آزمایشگاهی با استفاده از داپلر لیزری بررسی کردند. برای شرط مرزی ورودی با استفاده از یک پمپ، سرعت نوسانی را اعمال کردند. آن‌ها رژیم‌های جریان خون را در مقادیر مختلف گرفتگی با تکنیک داپلر لیزری، عکس برداری کردند. در بررسی اثر حالت-های مختلف گرفتگی بر روی جریان به این نتیجه رسیدند که پس از گرفتگی ۷۵ درصد، جریان خون دچار آشفستگی می‌شود [۲]. قالیچی و همکاران با استفاده از مدل جریان آشفته رینولدز پایین ۱، جریان خون را در یک رگ دارای گرفتگی بررسی کردند. در این پژوهش هندسه به صورت دو بعدی و خون با فرض نیوتنی بودن شبیه‌سازی شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که جریان خون در بالادست آرام می‌ماند ولی در پایین دست به صورت تابعی از رینولدز و مقدار گرفتگی ممکن است در ناحیه گذرا یا آشفته قرار داشته باشد. به عنوان مثال در حالت رینولدز ۴۰۰ و گرفتگی ۷۵ درصد، جریان خون در پایین دست آشفته می‌گردد. در نهایت آن‌ها تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی خود پیدا کردند که حاکی از آن بود که در برخی موارد مانند رینولدزهای بالا یا گرفتگی‌های شدید، به جای مدل آرام بهتر است از مدل‌های آشفته استفاده کرد [۳]. ساری‌فادین و همکارانش در حالت‌های مختلف گرفتگی رفتار جریان خون در رگ را به صورت عددی بررسی کردند. در این پژوهش گرفتگی‌های کسینوسی، نرم ۲ و

نامنظم در قالب هندسه دو بعدی و خون با مدل نیوتنی عمومی شده شبیه‌سازی گردید. آن‌ها نشان دادند که سرعت و فشار جریان خون در پایین دست تحت تأثیر نوع گرفتگی می‌باشد. آن‌ها نتیجه گرفتند که افت فشار کمتری در حالت گرفتگی نامنظم اتفاق می‌افتد. در نهایت محل‌ها جدایش جریان در پایین دست را در حالت‌های مختلف گرفتگی گزارش کردند و نشان دادند این پدیده تابعی از مدل غیرنیوتنی خون، انحنای دیواره و ناپایداری جریان می‌باشد [۴]. بهاتناگار و همکارانش، اثر شکل گرفتگی و سرعت لغزشی دیواره در ناحیه گرفتگی را بر روی جریان خون بررسی کردند. در این پژوهش لزجت خون با استفاده از مدل باکینگهام-پلاستیک و هندسه گرفتگی با معادله چند جمله‌ای شبیه‌سازی گردید. آن‌ها نتیجه گرفتند که ارتفاع و انحنای گرفتگی، سرعت لغزشی، ضریب لزجت و تنش برشی عواملی هستند که به طور کیفی و کمی بر روی رژیم جریان اثر قابل توجهی می‌گذارند. در نهایت آن‌ها محدوده‌ای را که دبی جریان خون در آن ناحیه کم می‌باشد را برای بررسی‌ها پزشکی ارائه دادند [۵]. یان و همکارانش، جریان غیرنیوتنی خون را در یک رگ دارای گرفتگی در حضور شار حرارتی از دیواره، بررسی کردند. در این پژوهش لزجت خون با مدل سیسکو با ثابت‌های مختلف شبیه‌سازی گردید. برای بررسی اثر گرفتگی آن‌ها از هندسه گرفتگی با مدل مخروطی و زاویه‌های متفاوت استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اعمال شار حرارتی دیواره بر روی سرعت جریان تأثیری نخواهد داشت. افزایش زاویه گرفتگی موجب کاهش دمای جریان خون در ناحیه گرفتگی می‌شود که نشان می‌دهد خون انرژی کمتری را در این حالت دریافت می‌کند. در حالت غیرنیوتنی دمای خون در مقایسه با حالت نیوتنی افزایش بیشتری می‌یابد. در نهایت آن‌ها نشان دادند که کوچکترین تغییری در رژیم جریان خون می‌تواند الگوی توزیع دما را دچار تغییر کند [۶]. جهان‌گیری و همکارانش، اثر شش مدل متفاوت لزجت خون را بر رژیم جریان خون در حالت نوسانی بررسی کردند. در این پژوهش هندسه گرفتگی با استفاده از معادله کسینوسی و با مقادیر گرفتگی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد گرفتگی شبیه‌سازی گردید. آن‌ها نتیجه گرفتند در حالت غیرنیوتنی توانی، ضریب اهمیت غیرنیوتنی ۴ مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. در حالت توانی و والبرن-اشنک ۵ کمترین سرعت محوری، کمترین اختلاف بین فشار ورودی و خروجی و کمترین تنش برشی دیواره اتفاق می‌افتد. همچنین آن‌ها قهמידند که در

⁴ Global Non-Newtonian Importance Factor

⁵ Walburn-Schneck

¹ Low Reynolds Turbulence Model

² Smooth

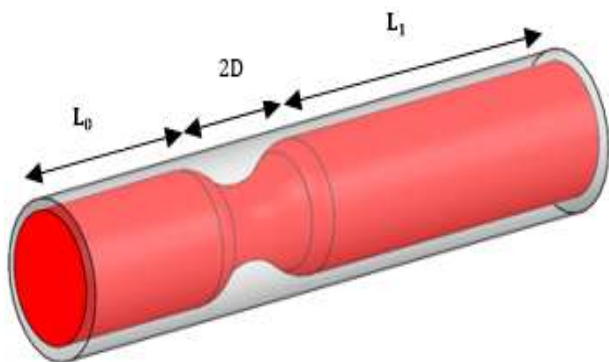
³ Generalized Newtonian Model

متفاوت لزجت خون بر غلظت نانوذرات در مویرگ و گرمادرمانی بافت سرطانی اثرگذار است [۱۱].

در این پژوهش، یک رگ دارای گرفتگی با فرض بر هم‌کنش سیال-جامد ۲ و تحت اثر شار حرارتی ثابت با استفاده از یک کد المان محدود شبیه‌سازی شده است. لزجت دینامیکی جریان خون به‌عنوان مشخصه اثرگذار در شبیه‌سازی و تحلیل رگ، با مدل‌های تابع دما، نرخ برش و هماتوکریت تعریف شده است. در پایان، عبارت‌های جابجایی رگ، تنش وارد بر دیواره، تنش برشی دیواره ۳، سرعت، فشار و دمای جریان خون به‌عنوان نتایج مسأله مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- هندسه شکل

در این پژوهش، از هندسه سه‌بعدی یک سرخرگ با گرفتگی کسینوسی مطابق شکل ۱ استفاده شده است. ابعاد هندسه مذکور و همچنین معادله مربوط به گرفتگی از کار آزمایشگاهی شعیب و همکاران به‌دست آورده شده است [۱۲]. ضخامت دیواره رگ ۱ میلی‌متر فرض شده است.



شکل ۱ هندسه سه‌بعدی مسأله

معادله کسینوسی گرفتگی رگ و همچنین اندازه عبارت‌های مشخص شده در شکل ۱ در جدول ۱ بیان شده است. معادله گرفتگی هندسه [۱]:

$$y = \left(\frac{D}{2}\right) \left(1 - \left(\frac{Sc}{2}\right) \left(1 + \cos\left(\frac{\pi x}{2D}\right)\right)\right) \quad (1)$$

دبی جریانی بالا، رفتار خون به حالت نیوتنی و در دبی‌های پایین‌تر به حالت غیرنیوتنی میل می‌کند. براین اساس مدل توانی با توجه به حساسیت بالا و مدل والبرن-اشنک به دلیل عدم حساسیت به تغییر دبی، مدل‌های مناسبی نیستند [۷]. مالوتا و همکارانش اثر دبی جریان، ضربان قلب، هندسه رگ و درجه گرفتگی را در یک رگ کرونری بررسی کردند. خون به صورت سیال نیوتنی و دیواره رگ به صورت صلب مدل‌سازی گردید. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش مقدار گرفتگی، تنش برشی دیواره در کرونر افزایش می‌یابد و همچنین پروفایل سرعت پهن‌تر می‌شود و لایه مرزی ویسکوز نیز نازک می‌گردد. در پایان در سه حالت رگ صاف، انحنا دار و شاخه‌ای تغییرات تنش برش دیواره و سرعت جریان خون با یکدیگر مقایسه و مکان‌هایی که در آن‌ها تنش برشی دیواره بیشینه می‌باشد، تعیین گردید [۸]. بیگلریان و همکارانش، تنش برشی دیواره نرمال ۱ و سرعت جریان خون را در یک رگ دارای گرفتگی به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش هندسه رگ به صورت انحنا دار و خون با لزجت نیوتنی به صورت نوسانی مدل‌سازی شده است. آن‌ها تنش برشی دیواره نرمال را برای نقاط مختلف رگ محاسبه کردند و نواحی از رگ که تنش برشی دیواره در آن بیشینه بود را گزارش دادند. همچنین مشاهده شد که در زمان‌های مختلف در سیکل سرعت نوسانی، تنش برشی دیواره بیشینه در مرکز ناحیه گرفتگی اتفاق می‌افتد [۹]. جمالی و همکارانش، انتقال حرارت در یک رگ دو شاخه دارای گرفتگی را بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش رگ را به صورت دو بعدی با دیواره صلب و خون را با فرض سیال نیوتنی شبیه‌سازی کردند. دمای ورودی رگ ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای دیواره رگ در نقاط مختلف به‌صورت یکنواخت، در مقادیر بالاتر فرض شد. در شرط مرزی ورودی، سیال به‌صورت جریان آرام و با سرعت یکنواخت قرار داده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که مکان و شکل گرفتگی بر خطوط جریان و پروفایل‌های دما و سرعت تأثیر گذار است. همچنین پروفایل‌های سرعت و دما را در حالت‌های مختلف دمای دیواره، سرعت ورودی و شکل گرفتگی گزارش کردند. در پایان پیرامون مزایای این پژوهش برای استفاده در گرما یا سرما درمانی و اثرات آن بر جریان خون بحث شد [۱۰]. کیهانپور و همکارانش، اثر نانوذرات مغناطیسی را در یک مویرگ سرطانی با فرض مدل لزجت کاریو برای خون بررسی نمودند. نتایج نشان داد، فرض مدل‌های

³ Wall Shear Stress

¹ Normalize Wall Shear Stress

² Fluid- Structure Interaction

است. در این پژوهش از مقدار چگالی ۱۰۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. در جدول ۲ نام مدل ها و معادله های مربوطه آورده شده است [۱۵، ۱۶].

جدول ۲ معادله های لزجت دینامیکی

مدل های لزجت	رابطه لزجت (Pa.s)
کاریو	$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})(1 + (\dot{\gamma}\lambda)^2)^{\frac{n-1}{2}}$
توانی	$\mu(\dot{\gamma}, T) = K e^{\left(\frac{T_0}{T}\right)} \dot{\gamma}^{n-1}$
نیوتنی	ثابت
انشتین	$\mu = \mu_p \left(\frac{1}{1 + \alpha Htc} \right)$

در جدول ۲، در معادله لزجت کاریو، λ و n به ترتیب زمان آسایش و شاخص توانی می باشند. معادله کاریو صرفاً تابع نرخ برش می باشد [۱۶]. در معادله توانی تابع دما، T_0 دمای مرجع می باشد که برای بدن انسان ۳۷ درجه سلسیوس فرض می شود. در معادله انشتین Htc و μ_p به ترتیب هماتوکریت خون و لزجت دینامیکی پلاسما می باشند. α ضریب لزجت است که به صورت ذیل محاسبه می گردد [۱۷]:

$$\alpha = 0.076 \left(e^{\left(2.49 Htc + \frac{1107}{T} e^{(-1.69 Htc)} \right)} \right) \quad (4)$$

۲-۳- انرژی

با توجه به وجود شار حرارتی در دیواره رگ، برای بررسی توزیع دما در رگ و همچنین اثر حرارت، معادله انرژی را برای جریان خون و بافت اطراف آن حل و بررسی می کنیم. معادله انرژی به صورت زیر می باشد [۱۸]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (V_f \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (5)$$

در معادله فوق، k ، C_p و T به ترتیب ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و دما می باشند [۱۹].

۳-۳- برهم کنش سیال - جامد

برای حل معادله مربوط به برهم کنش سیال و جامد، از روش ALE^۱ استفاده شده است. در این روش سلول های محاسباتی

جدول ۱ مقادیر مربوط به هندسه مسأله

اندازه	پارامتر
۱۹۰	طول رگ پیش از گرفتگی (L_0)
۹۴	طول رگ پس از گرفتگی (L_1)
۸	قطر رگ (D)
۰/۵۰	نسبت سطح مقطع گرفتگی به سطح مقطع رگ (SC)

۳- معادلات

در این بخش، معادلات حاکم بر فیزیک های مختلف مسأله شامل سیال، انتقال حرارت و دیواره رگ تعریف می گردد. عبارت های هر معادله و مقدار آن نیز مشخص می شود.

۳-۱- جریان خون و لزجت

در این قسمت معادلات حاکم بر جریان خون و لزجت دینامیکی آن بیان شده است. با فرض خون به عنوان سیال تراکم ناپذیر، برای تحلیل میدان جریان، معادلات پیوستگی و ممنتوم به صورت ذیل می باشد [۱۳]:

$$\nabla \cdot V_f = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{DV_f}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

در معادلات فوق P ، V_f ، ρ و τ به ترتیب فشار، سرعت، چگالی و تنش برشی وارد بر جریان سیال می باشند. شبیه سازی جریان خون همیشه از کارهای چالش برانگیز در کارهای عددی بوده است. خون یک سوسپانسیون غلیظ از سلول ها و مولکول های مختلف است که رفتار خون را در شرایط گوناگون، پیچیده می کنند. گلبول های قرمز و سفید، پلاکت ها، پروتئین ها و یون های محلول در پلاسما همگی بر شبیه سازی دقیق رفتار خون تأثیرگذار هستند. برای بررسی رفتار جریان خون، لزجت از ویژگی های مهم و اساسی می باشد. لزجت جریان خون به عنوان یک پارامتر مهم در شبیه سازی تابعی از موارد گوناگونی همچون گلبول های قرمز، نرخ برش، هماتوکریت، دما و ... می باشد. بدین منظور سعی شده است برای بررسی جامع رفتار خون، مدل های مختلف لزجت در نظر گرفته شود [۱۴]. از دیگر ویژگی های سیالاتی مهم خون، چگالی می باشد که تابعی از هماتوکریت خون

¹ Arbitrary Lagrangian- Eulerian

$$\sigma_s = 2G_s \varepsilon_s - \psi_s \text{tra}(\varepsilon_s) I \quad (12)$$

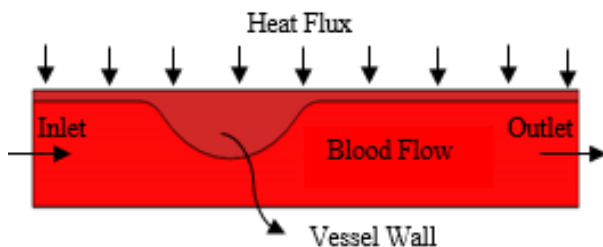
ψ_s و G_s عبارت‌های اول و دوم لامه^۸ هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$G_s = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13)$$

$$\psi_s = \frac{2G_s}{1-2\nu} \quad (14)$$

۴- شرط مرزی و روش حل

در شکل ۲، نمای دو بعدی رگ به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است. محور پایین در شکل ۲، محور تقارن هندسه می‌باشد.



شکل ۲ نمای دو بعدی هندسه مسأله

برای حل معادله پیوستگی و مومنتوم و بررسی میدان جریان خون، در ورودی رگ، شرط مرزی سرعت توسعه یافته با مقدار میانگین ۰/۰۹۵ متر بر ثانیه و در خروجی شرط مرزی فشار ثابت قرار داده شده است. برای حل معادله انرژی و بررسی توزیع دما، در ورودی رگ دمای ثابت ۳۱۰ کلوین و در خروجی رگ، شرط مرزی انتقال حرارت هدایتی برابر صفر (انتقال حرارت جابجایی غالب است) اعمال شده است. همچنین، در سطح بیرونی رگ شار حرارتی ۵ کیلو وات بر متر مربع تعیین شده است. اولیه بافت و جریان خون ۳۱۰ کلوین فرض شده است [۱۲، ۶].

۴-۱- حل عددی

معادلات مذکور، به صورت کوپل در نرم افزار حل عددی کامسول به صورت کد المان محدود تعریف و حل شده‌اند. برای بررسی استقلال از شبکه، تنش برشی دیواره^۹ با مدل لزجت نیوتنی و

آزادانه^۱ می‌توانند جابجا شوند. مهم‌ترین نتیجه امکان جابجایی شبکه‌بندی محاسباتی این است که در مختصات جدید ناشی از تغییر شکل دیواره رگ، معادلات حل می‌شوند. بنابراین برای حل سیستم معادلات سطح تماس سیال- جامد^۲ دو شرط مرزی لازم است. نخست، در سطح تماس جریان خون و دیواره رگ، سرعت هر دو یکسان می‌باشد. دوم، نیروهایی که در سطح تماس بین جریان خون و دیواره رگ وارد می‌شوند، هم‌راستا و خلاف جهت یکدیگر می‌باشند. شرط‌های مرزی مذکور به صورت زیر نوشته می‌شوند [۲۰]:

$$V_s(r^*) = V_f(r^*), (r^* \in I_{fs}) \quad (6)$$

$$F_s(r^*) = F_f(r^*), (r^* \in I_{fs}) \quad (7)$$

I_{fs} سطح تماس جریان خون و دیواره رگ و r^* یک نقطه روی این سطح می‌باشد. برای شبیه‌سازی دیواره رگ، از مدل الاستیک خطی^۳ استفاده شده است. مدول یانگ^۴ (E) دیواره ۷۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع و نسبت پواسون^۵ (ν) آن ۰/۴۹ می‌باشد [۲۱]. حرکت دیواره الاستیک رگ با معادله (۸) زیر بررسی می‌گردد [۲۲]:

$$\rho_s \frac{\partial^2 L_s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_s \quad (8)$$

در معادله فوق، ρ_s چگالی دیواره رگ، L_s بردار جابجایی و σ_s تنسور تنش آن می‌باشد. اگر تنسور تنش ایزوتروپیک^۶ فرض شود، قانون هوک به صورت رابطه زیر در می‌آید [۲۳، ۲۴]:

$$\sigma_s^* = 2G_s \varepsilon_s^* \quad (9)$$

در رابطه ۹، σ_s^* و ε_s^* به ترتیب تنسور تنش^۷ و کرنش انحراف می‌باشند که به صورت ذیل محاسبه می‌گردند:

$$\sigma_s^* = \sigma_s - \frac{1}{3} \text{tra}(\sigma_s) I \quad (10)$$

$$\sigma_s^* = \varepsilon_s - \frac{1}{3} \text{tra}(\varepsilon_s) I \quad (11)$$

در روابط ۱۰ و ۱۱، I ماتریس واحد و $1/3 \text{tra}(\sigma_s)$ میانگین تنسور تنش در نقطه و $\text{tra}(\varepsilon_s)$ تغییرات کرنش بر واحد حجم می‌باشد. با جایگذاری روابط ۱۰ و ۱۱ در رابطه ۹، رابطه ذیل به دست می‌آید:

⁶ Isotropic

⁷ Deviation Stress Tensor

⁸ Lamé parameters

⁹ Wall Shear Stress

¹ Moving Mesh

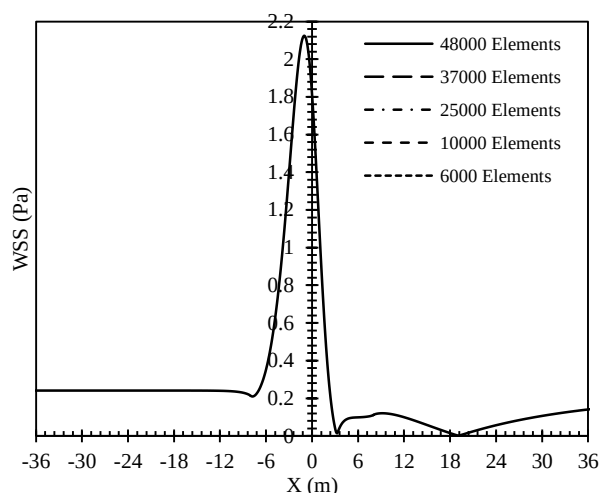
² Fluid- Structure Interface

³ Linear Elastic

⁴ Young Module

⁵ Poisson ratio

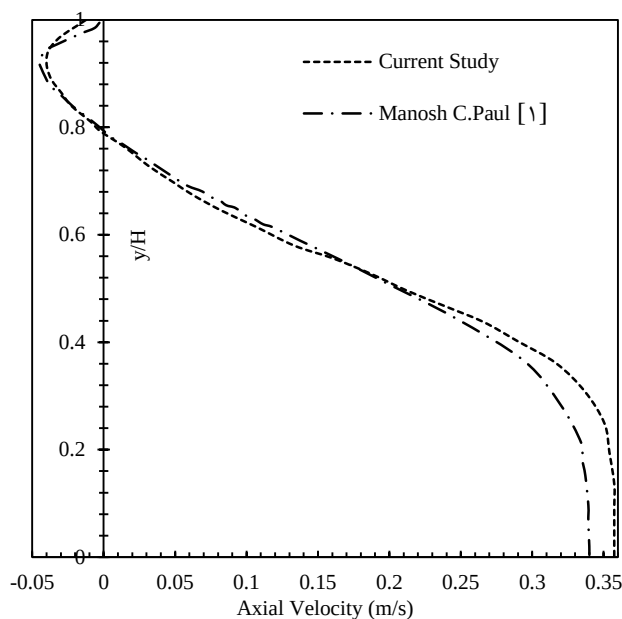
ضخامت دیواره ۱ میلی متر را در تعداد متفاوت مش، محاسبه نموده و در نمودار شکل ۳ نمایش دادیم. همانطور که در نمودار مشهود است وقتی تعداد سلول های محاسباتی از ۲۵۰۰۰ عدد فراتر می رود تقریباً نمودارها در نقاط مختلف با یکدیگر هم پوشانی دارند لذا در این پژوهش برای محاسبه خروجی های مختلف از مش با تعداد ۳۷۰۰۰ استفاده شده است.



شکل ۳ نمودار تنش برشی دیواره با تعداد سلول های محاسباتی متفاوت

۴-۲- اعتبارسنجی

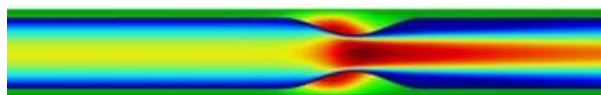
به منظور اعتبارسنجی کار مانوش پاول با نرم افزار عددی کامسول شبیه سازی شد. در پژوهش مذکور جریان خون با فرض سیال یکنواخت و نیوتنی، در یک سرخرگ دارای گرفتگی کسینوسی (انحنادار) بررسی شده است. سرعت جریان خون در ناحیه گرفتگی در دو حالت با یکدیگر مقایسه شده است و نمودار آن در شکل ۴ آمده است. همانطور که مشخص است نتایج دارای اختلاف اندکی می باشند [۱]. در کار پاول از روش کنترل محدود استفاده شده حال آنکه نرم افزار کامسول از روش المان محدود برای حل معادلات استفاده می کند.



شکل ۴ اعتبار سنجی [۱]

۵- نتایج

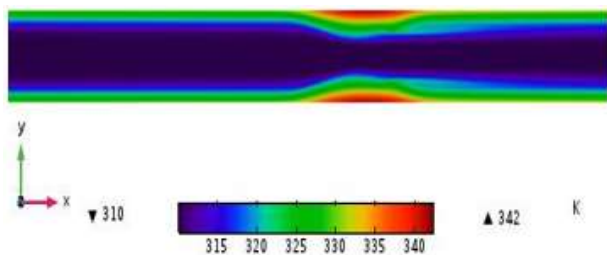
ابتدا با مدل لزجت غیرنیوتنی، جریان خون در ناحیه گرفتگی بررسی شده است.



شکل ۵ سرعت جریان خون و جابجایی دیواره رگ، با لزجت نیوتنی و ضخامت دیواره یک میلی متر

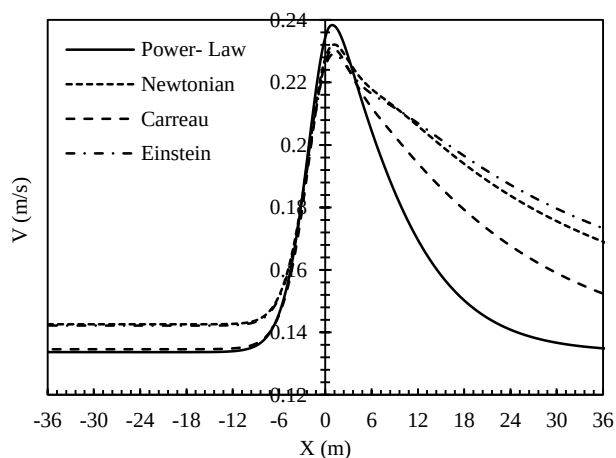
کانتور شکل ۵ نشان می دهد که سرعت در ناحیه گرفتگی با کاهش سطح مقطع به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. همچنین بیشترین جابجایی در دیواره رگ در این ناحیه رخ می دهد. افزایش سرعت جریان خون در این ناحیه طبق قانون بقای جرم، قابل پیش بینی بود و این افزایش سرعت با مومنتم بیشتر باعث ایجاد نیروی بیشتر به دیواره و در نتیجه جابجایی بیشتر آن می شود.

جریان خون نیز به دلیل تغییرات مومنتوم، افزایش انرژی در دیواره رخ می‌دهد.

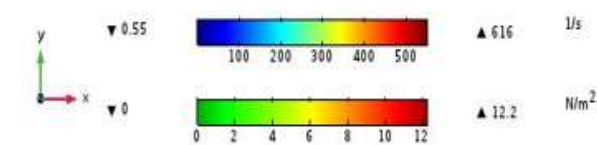
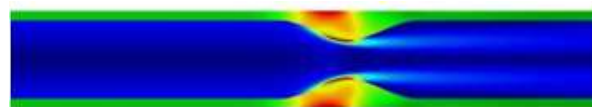


۸ تغییرات دما جریان خون و دیواره رگ با شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره و لزجت نیوتنی خون

در شکل ۸ تغییرات دما در جریان خون و دیواره رگ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در ناحیه گرفتگی به دلیل افزایش سرعت جریان خون و غلبه عبارت جابجایی^۳ در معادله انرژی، دمای خون کاهش می‌یابد ولی بلافاصله پس از گرفتگی به خصوص در نزدیکی دیواره، به دلیل تشکیل گردابه و ناحیه با سرعت کم، عبارت رسانش^۴ اثرگذاری بیشتری دارد و فرصت انتقال حرارت به جریان خون بیش‌تر است. در نتیجه دما در این نواحی بیشتر افزایش یافته است. از سوی دیگر، دمای سطح بیرونی دیواره رگ، نسبت به سایر نواحی افزایش بیشتری یافته است. این اتفاق به این دلیل است که شار حرارتی ورودی در این ناحیه، به دلیل سرعت بالای جریان خون فرصت انتقال کم‌تری به جریان خون دارد بنابراین، با تجمع بیش‌تر گرما در این ناحیه، دمای دیواره رگ به طور مشخصی افزایش می‌یابد. در شکل ۹ سرعت جریان خون در راستای طولی مرکز رگ نمایش داده شده است.

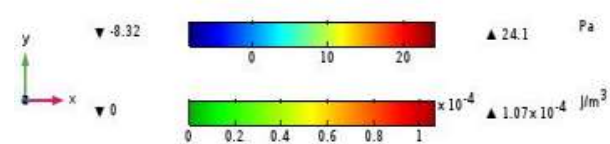
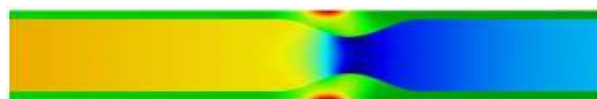


شکل ۹ نمودار تغییرات سرعت جریان خون با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره



شکل ۶ تغییرات نرخ برش در جریان خون و تنش فون میزس^۱ وارده به دیواره رگ با لزجت نیوتنی

با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود که بیش‌ترین تغییرات نرخ برش در ناحیه گرفتگی رخ می‌دهد. تغییرات گسترده نرخ برش برای مدل‌های لزجت غیرنیوتنی تابع نرخ برش اهمیت دارد چراکه لزجت خون می‌تواند در این ناحیه رفتار غیرنیوتنی اثرگذاری از خود نشان دهد. در ادامه با بررسی مدل‌های غیرنیوتنی رفتار خون در این ناحیه بررسی می‌گردد. شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد، تنش فون میزس وارده به دیواره رگ در ناحیه گرفتگی افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو و به دنبال آن افزایش تنش، می‌تواند باعث آسیب‌هایی نظیر پارگی و یا تغییر اندازه‌های جداره رگ در این ناحیه گردد.



شکل ۷ تغییرات فشار جریان خون و چگالی انرژی کرنش الاستیک^۲ با مدل لزجت نیوتنی

در شکل ۷، روند تغییرات فشار جریان خون و چگالی انرژی کرنش الاستیک، در ناحیه گرفتگی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، فشار در ناحیه گرفتگی کاهش می‌یابد که با توجه به افزایش سرعت در این ناحیه و رابطه برنولی، قابل پیش‌بینی بود. همچنین مشخص است در دیواره رگ در ناحیه گرفتگی چگالی انرژی افزایش می‌یابد که با توجه ثابت فرض شدن دیواره بیرونی رگ به دلیل تماس با بافت‌های درونی بدن، طبیعی می‌باشد. در دیواره رگ در نزدیکی سطح تماس با

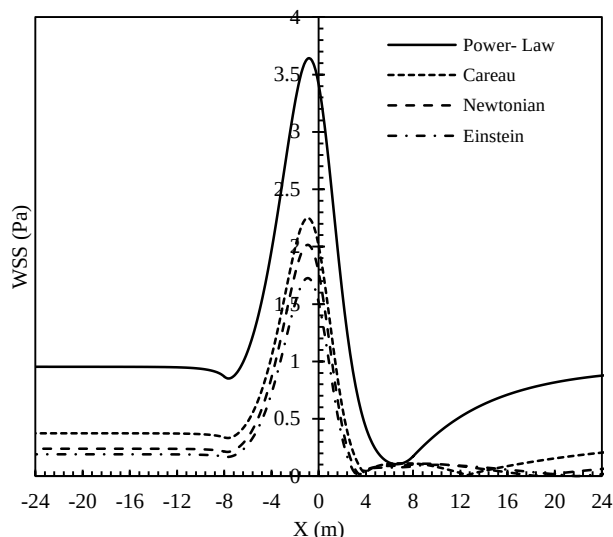
³ Convection Term

⁴ Conduction Term

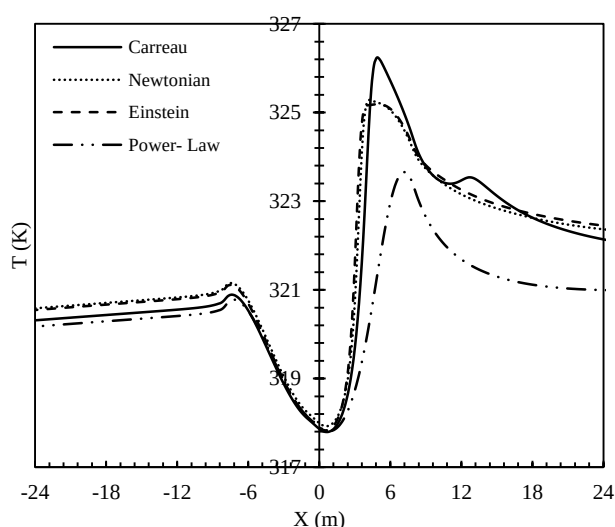
¹ Von Mises Stress

² Elastic Strain Energy Density

مدل‌های لزجت تابع نرخ برش استفاده نماییم. در شکل ۱۲، دمای سطح تماس جریان خون و دیواره رگ، نشان داده شده است.



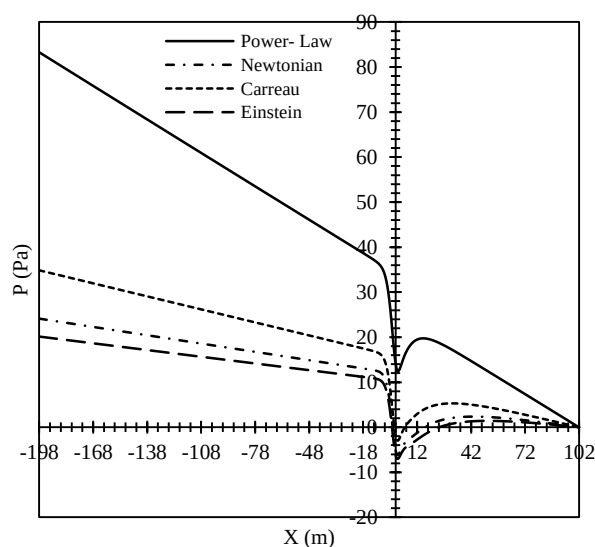
شکل ۱۱ نمودار تغییرات فشار جریان خون با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره



شکل ۱۲ نمودار تغییرات دما جریان خون در دیواره با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره

نمودار شکل ۱۲ کانتور شکل ۸ را تصدیق می‌کند. همانطور که واضح است، دمای جریان خون در ناحیه گرفتگی دچار افت محسوس در حدود ۴ درجه سانتی‌گراد می‌شود ولی بلافاصله پس از گرفتگی با کاهش سرعت جریان خون، دما افزایش می‌یابد. از روند افزایش مشاهده می‌شود که افزایش دما برای مدل توانی، کم‌ترین و در مدل کاریو بیش‌ترین است.

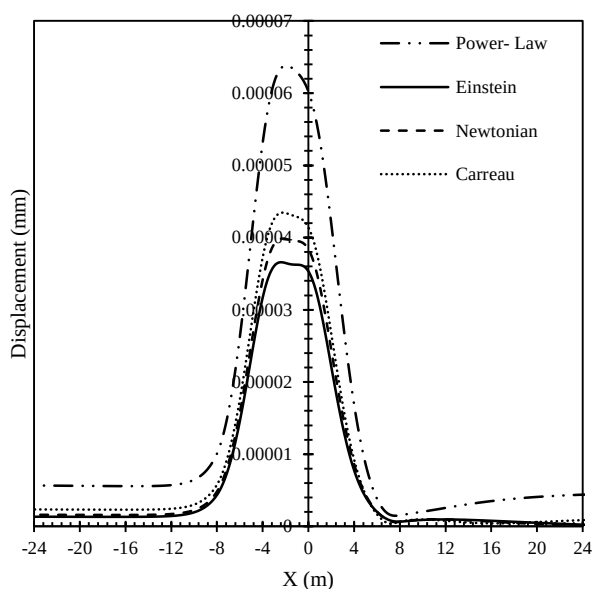
با توجه به شکل ۹، در می‌یابیم در ناحیه گرفتگی سرعت جریان خون بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌یابد که تقریباً این اتفاق با مدل‌های مختلف لزجت یکسان است. ولی پس از ناحیه گرفتگی سرعت جریان خون روندی متغیرات را با لزجت‌های مختلف دنبال می‌کند. برای مثال با مدل توانی که تابعی از دما و نرخ برش است سرعت بلافاصله به مقدار پیش از گرفتگی میل می‌کند. این اتفاق تقریباً در مدل کاریو هم رخ می‌دهد. ولی در مدل‌های نیوتنی و انشتین که مقدار لزجت تقریباً یکسان است این روند با شیب کندی پیش می‌رود. در ادامه برای درک بیش‌تر تغییرات سرعت، فشار جریان خون با مدل‌های مختلف لزجت مقایسه شده است.



شکل ۱۰ نمودار تغییرات فشار جریان خون با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره

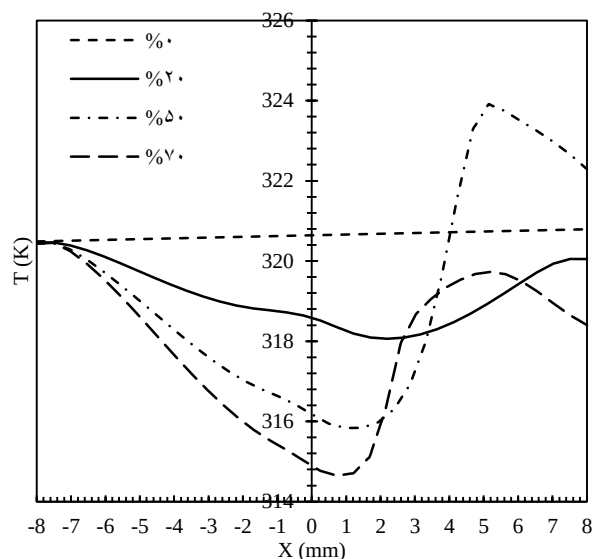
همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، فشار در ناحیه گرفتگی دچار افت ناگهانی می‌شود که با توجه به نمودار تغییرات سرعت شکل ۹ و رابطه برنولی، این اتفاق درست است. از نمودار شکل ۱۰ می‌توان دریافت که هرچه شیب تغییرات سرعت تندتر باشد بازه تغییرات فشار بیشتر است. در شکل ۱۱ روند تغییرات تنش برشی نشان داده شده است. روند تغییرات تنش برشی دیواره، نشان می‌دهد که اندازه آن در ناحیه گرفتگی با تغییرات شدید اندازه سرعت، افزایش می‌یابد. از روند افزایش تنش برشی دیواره و نمودار تغییرات سرعت می‌توان فهمید که در مدل‌های لزجی که تابع نرخ برش است هرچه شیب تغییرات سرعت پس از ناحیه گرفتگی، بیش‌تر باشد، مقدار تنش برشی دیواره نیز بیش‌تر خواهد بود. با توجه به شکل ۶ و این موضوع که در ناحیه گرفتگی تغییرات نرخ برش داریم، پس بهتر است از

برای مثال نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در ناحیه گرفتگی، دما حدود ۱۲ درجه بیش‌تر از سایر نواحی، افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت این افزایش دما با میزان گرفتگی رابطه مستقیم دارد. در ادامه اثر نیرویی حاصل از افزایش سرعت در ناحیه گرفتگی را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱۵، اندازه جابجایی سطح تماس رگ با فرض برهم کنش سیال - جامد نشان داده شده است. از شکل ۱۵، استنباط می‌گردد که افزایش ممنتم جریان خون در ناحیه گرفتگی، می‌تواند باعث جابجایی دیواره رگ بشود. در مقایسه با شکل ۹ که سرعت جریان خون با مدل لزجت توانی، بیش از سایر مدل‌هاست، جابجایی بیشتر دیواره رگ در این حالت را صحنه گذاری می‌کند.



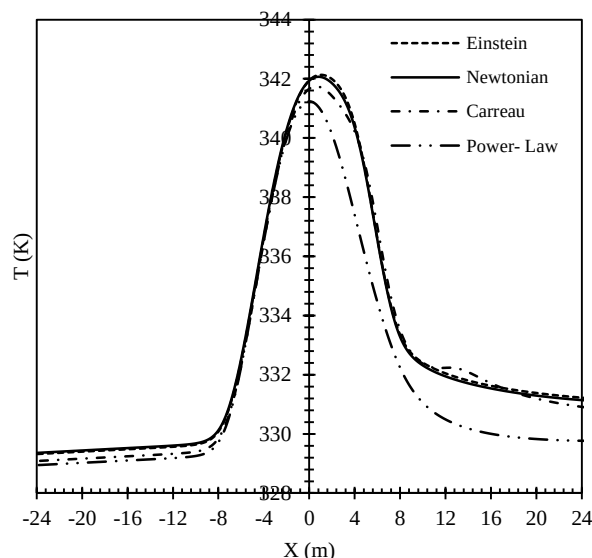
شکل ۱۵ نمودار مقدار جابجایی دیواره درونی رگ با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره

با توجه به افزایش نیروی وارده به دیواره رگ، از جنبه مهندسی، تغییرات تنش در ناحیه گرفتگی اهمیت دارد. به‌این منظور در شکل ۱۶ نمودار تغییرات تنش در دیواره رگ نشان داده شده است.



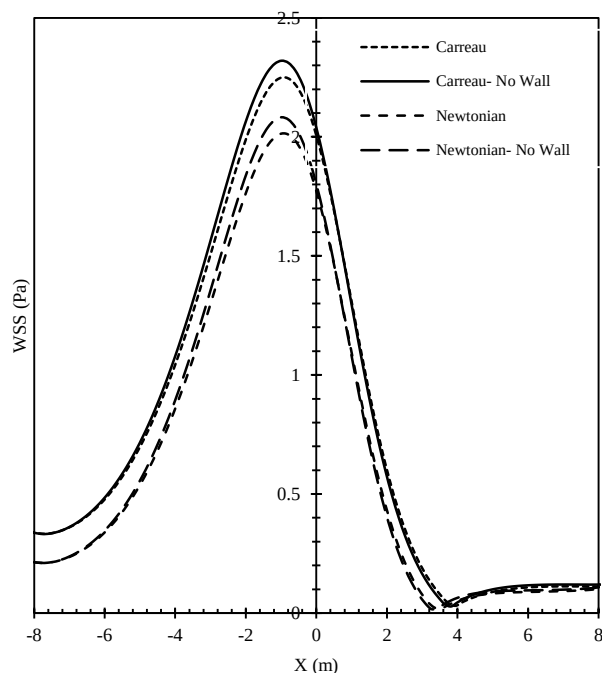
شکل ۱۳ نمودار تغییرات دمای مرز سیال - جامد با درصدهای متفاوت گرفتگی و شار حرارتی ۵ کیلو وات

در شکل ۱۳، تغییرات دمای مرز جریان خون و دیواره رگ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که تغییرات دمای جریان خون با افزایش مقدار گرفتگی رابطه مستقیم دارد. برای مثال، در گرفتگی‌های ۲۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، به‌ترتیب حدود ۲، ۸ و ۶ درجه اختلاف دما در ناحیه گرفتگی ملاحظه می‌شود.



شکل ۱۴ نمودار تغییرات دمای سطح بیرونی دیواره رگ با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره

مهم‌ترین نکته شکل ۱۴ این است که در زمان گرفتگی، وقتی شار حرارتی به دیواره رگ وارد می‌کنیم، می‌توانیم از افزایش ناگهانی در سطح بیرونی، دریابیم که در آن ناحیه گرفتگی داریم.



شکل ۱۷ نمودار تغییرات تنش برشی دیواره با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره

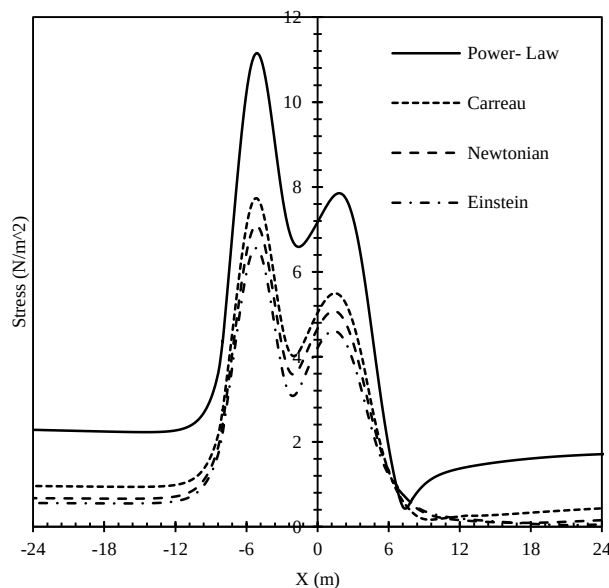
همچنین با توجه به شکل ۱۷، مشاهده می‌شود که با فرض لزجت نیوتنی، بیشینه مقدار تنش برشی دیواره از ۲/۱ به ۲ پاسکال (حدود ۵ درصد) کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان خون و دیواره اطراف آن در یک رگ دارای گرفتگی با فرض مدل‌های مختلف لزجت، تحت شار حرارتی ثابت ۵ کیلو وات بر متر مربع در دیواره و گرفتگی ۵۰ درصد، بررسی شد. مهم‌ترین دستاوردهای حاصل از پژوهش کنونی به اختصار در ذیل تشریح شده است.

دمای سطح بیرونی رگ در ناحیه گرفتگی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. افزایش دما در مدل‌های لزجت انشتین و نیوتنی بیشینه و تقریباً ۱۲ درجه و در مدل لزجت توانی کمینه و برابر ۱۱/۵ درجه می‌باشد. افزایش دمای سطح بیرونی رگ برای تشخیص و بررسی گرفتگی می‌تواند مفید باشد.

تنش در دیواره رگ در نقاط ابتدایی و انتهایی گرفتگی بیش‌ترین مقدار را دارد. بیشینه تنش ۱۱/۲ پاسکال در نقطه آغاز گرفتگی و با مدل لزجت توانی و کمینه مقدار آن ۴/۵ پاسکال در نقطه پایان گرفتگی و با مدل لزجت انشتین می‌باشد.



شکل ۱۶ نمودار تغییرات تنش با گرفتگی ۵۰ درصد، با مدل‌های مختلف لزجت و شار حرارتی ۵ کیلو وات در دیواره

از شکل ۱۶، نخست این نکته دریافت می‌شود که گرفتگی باعث افزایش تنش در دیواره رگ می‌شود. این موضوع با افزایش نیرو در این ناحیه به دلیل افزایش سرعت هم‌خوانی دارد. سپس در می‌یابیم در نقطه‌ای دقیقاً پیش از گرفتگی تنش در دیواره رگ افزایش می‌یابد سپس تا قله گرفتگی این تنش کاهش و سپس در نقطه پایانی گرفتگی، مجدداً دچار افزایش تنش می‌شود. تغییرات تنش در این نقاط نشان می‌دهد که با برخورد جریان سیال به ناحیه گرفتگی و ایجاد نیرو در آن، نقاط ابتدا و انتهای گرفتگی متحمل تنش می‌شوند. این مقادیر از آن نظر ارزشمند است که در علم پزشکی در رگ‌های دارای گرفتگی نقاط دارای تنش بالا، برای درمان‌هایی از قبیل جراحی، فنر گذاری و ... حائز اهمیت می‌باشند.

در شکل ۱۷ تنش برشی دیواره، در دو حالت حضور و عدم حضور دیواره رگ بررسی شده است. در شکل ۱۷، اهمیت فرض دیواره انعطاف‌پذیر در شبیه‌سازی‌های مرتبط با بررسی جریان خون در رگ‌های دارای گرفتگی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرض بر هم‌کنش سیال-جامد، بیشینه مقدار تنش برشی دیواره با لزجت کاریو را از ۲/۳۲ به ۲/۲۳ (حدود ۳ درصد) پاسکال کاهش می‌دهد. این اختلاف در مدل‌سازی رگ‌های دارای دیواره با ضخامت قابل ملاحظه، اهمیت دارد. به‌ویژه وقتی مشاهده می‌شود که بیش‌تر گرفتگی‌ها در رگ‌های اصلی با دیواره ضخیم ایجاد می‌شود.

artery with cone shape of stenosis in various stenosis angles, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, pp. 105434, (2020).

- [7] Jahangiri, M., Saghaian, M., Sadeghi, M. R., Effect of six non-Newtonian viscosity models on hemodynamic parameters of pulsatile blood flow in stenosed artery, *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 199-207, (2018).
- [8] Malota, Z., Glowacki, J., Sadowski, W., Kostur, M., Numerical analysis of the impact of flow rate, heart rate, vessel geometry and degree of stenosis on coronary hemodynamic indices, *BMC cardiovascular disorders*, vol. 18, no. 1, pp. 132, (2018).
- [9] Biglarian, M., Computational investigation of stenosis in curvature of coronary artery within both dynamic and static models, *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 185, pp. 105170, (2020).
- [10] Jamali, M. S. A., Ismail, Z., Simulation of Heat Transfer on Blood Flow through a Stenosed Bifurcated Artery, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 60, pp. 310-323, (2019).
- [11] Keyhanpour, M., Ghasemi, M., Numerical Analysis of Hyperthermia on the Damage of cancerous Tissue by injection of Magnetic nanoparticles under the Influence of External Magnetic Field, *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 49, no. 4, pp. 213-221, (2019). (in Persian)
- [12] Shuib, A., Hoskins, P., Easson, W., Experimental investigation of particle distribution in a flow through a stenosed artery, *Journal of mechanical science and technology*, vol. 25, no. 2, pp. 357-364, (2011).
- [13] Fox, R. W., Mc Donald, A. T., *Introduction to fluid mechanics*, John Wiley and Sons Inc., New Jersey, United States, (1985).
- [14] Bessonov, N., Sequeira, A., Simakov, S., Vassilevskii, Y., Volpert, V., Methods of blood flow modelling, *Mathematical modelling of natural phenomena*, vol. 11, no. 1, pp. 1-25, (2016).
- [15] Soulis, J. V., Giannoglou, G. D., Chatzizisis, Y. S., Seralidou, K. V., Parcharidis, G. E., Louridas, G. E., Non-Newtonian models for molecular viscosity and wall shear stress in a 3D reconstructed human left coronary artery, *Medical engineering & physics*, vol. 30, no. 1, pp. 9-19, (2008).
- [16] Hund, S. J., Kameneva, M. V., Antaki, J. F., A quasi-mechanistic mathematical representation for blood viscosity, *Fluids*, vol. 2, no. 1, pp. 10, (2017).

افزایش سرعت در ناحیه گرفتگی موجب افزایش مومنتم و جابجایی دیواره رگ در این ناحیه می‌گردد. بیشترین مقدار جابجایی ۰/۰۶۴ میکرومتر و با مدل لزجت توانی می‌باشد. مدل‌های مختلف لزجت بر تغییرات سرعت در ناحیه پس از گرفتگی اثرگذار می‌باشد. تغییرات سرعت به ترتیب از بیشترین تا کمترین در مدل‌های لزجت توانی، کاریو، نیوتنی و انشتین مشاهده می‌شود. برای مثال، تغییرات سرعت در ناحیه پس از گرفتگی با مدل لزجت توانی ۰/۱ متر بر ثانیه و با مدل انشتین حدود ۰/۰۵ متر بر ثانیه است. بیشینه دما در ناحیه پس از گرفتگی، به دلیل کاهش سرعت جریان خون مشاهده می‌شود. بیشترین افزایش دما ۵ درجه و با مدل لزجت کاریو و کمترین مقدار آن ۲/۵ درجه و با مدل لزجت توانی می‌باشد. فرض دیواره انعطاف پذیر باعث کاهش تنش برشی دیواره می‌گردد. برای مثال با مدل لزجت نیوتنی بیشینه مقدار تنش برشی دیواره از ۲/۱ به ۲ پاسکال و با لزجت کاریو از ۲/۳۲ به ۲/۲۳ پاسکال کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [1] Paul, M. C., Larman, A., Investigation of spiral blood flow in a model of arterial stenosis, *Medical engineering & physics*, vol. 31, no. 9, pp. 1195-1203, (2009).
- [2] Ahmed, S. A., Giddens, D. P., Pulsatile poststenotic flow studies with laser Doppler anemometry, *Journal of biomechanics*, vol. 17, no. 9, pp. 695-705, (1984).
- [3] Ghalichi, F., Deng, X., De Champlain, A., Douville, Y., King, M., Guidoin, R., Low Reynolds number turbulence modeling of blood flow in arterial stenoses, *Biorheology*, vol. 3, no. 4, pp. 281-294, (1998).
- [4] Sarifuddin, Chakravarty, S., Mandal, P., Layek, G., Numerical simulation of unsteady generalized Newtonian blood flow through differently shaped distensible arterial stenoses, *Journal of medical engineering & technology*, vol. 32, no. 5, pp. 385-399, (2008).
- [5] Bhatnagar, A., Shrivastav, R. K., Malli, Singh, A. K., A numerical analysis for the effect of slip velocity and stenosis shape on non-newtonian flow of blood, *International Journal of Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 440-446, (2015).
- [6] Yan, S. R., Zarringhalam, M., Toghraie, D., Foong, L. K., Talebizadehsardari, P., Numerical investigation of non-Newtonian blood flow within an

- Computational and mathematical methods in medicine*, vol. 2015, pp. 613-623, (2015).
- [22] Buriev, Kim, T. D., Seo, T. W., Fluid-structure interactions of physiological flow in stenosed artery, *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 36-49, (2009).
- [23] Nejad, A. A., Talebi, Z., Cheraghali, D., Shahbani-Zahiri, A., Norouzi, M., Pulsatile flow of non-Newtonian blood fluid inside stenosed arteries: Investigating the effects of viscoelastic and elastic walls, arteriosclerosis, and polycythemia diseases, *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 154, pp. 109-122, (2018).
- [24] Karami, F., Hossainpour, S., Ghalichi, F., Numerical simulation of low-density lipoprotein mass transport in human arterial stenosis—Calculation of the filtration velocity, *Bio-Medical Materials and Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 95-108, (2018).
- [17] Waite, L., Fine, J., *Applied biofluid mechanics*. McGraw-Hill Education, New York, United States, (2017).
- [18] Keyhanpour, M., Ghasemi, M., Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer of Magnetic Nanoparticles in a Non-Newtonian Blood Flow, under Influence of Magnetic Field, *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 19-31, (2019). (in Persian)
- [19] Keyhanpour, M., Ghasemi, M., The Influece of Magnetic Heat Sources on Damage of Cancerous Tissue, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 163-171, (2018). (in Persian)
- [20] Raback, p., Ruokolainen, J., Lyly, M., Jarvinen, E., Fluid-structure interaction boundary conditions by artificial compressibility, in *ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference*, Swansea, Wales, United Kingdom, September 2-4, (2001).
- [21] Jahangiri, M., Saghafian, M., Sadeghi, M. R., Numerical study of turbulent pulsatile blood flow through stenosed artery using fluid-solid interaction,

تحلیل آتش سوزی قطار به روش شبیه سازی دینامیکی آتش

چکیده: در این پژوهش انتشار دود، توزیع دما، میدان دید، نرخ انتقال حرارت و نحوه سرایت آتش به بخش های مختلف در یک واگن قطار مسافربری تهران به اهواز پس از شروع آتش سوزی شبیه سازی شده است. معادلات حاکم در حالت ناپایا، براساس کسر جرمی فرآورده ها و سوخت مصرف نشده به صورت لحظه ای نسبت به جرم کل در واکنش حل شده اند. تاثیر پارامترهای مختلف در سناریوی آتش سوزی مطالعه و با نتایج پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که کمتر از دو دقیقه پس از شروع حریق شرایط داخل واگن از لحاظ دما، دود و میدان دید به حالت بحرانی می رسد. جهت جلوگیری از سرایت آتش به بخش های دیگر واگن، عملیات اطفاء حریق باید کمتر از چهار دقیقه پس از توقف قطار انجام گیرد. مقایسه داده ها با نتایج جون و همکاران حداکثر اختلاف دمای ۶/۹ و میدان دید ۱۰ درصد را نشان می دهد.

واژه های راهنما: شبیه سازی عددی، آتش سوزی، دینامیک شبیه سازی آتش، انتشار دود، توزیع دما.

محمد رضا عساری*

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی جندی شاپور،
دزفول

گلشن زاده مبارک

دانشجوی کارشناسی ارشد

محسن پرور

کارشناسی ارشد،
مرکز پژوهشی جندی شاپور،
دزفول

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸

**Mohammad Reza
Assari***

Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Jundi-Shapur
University of
Technology, Dezful

**Golshan
Zadehnoarak**
MSc Student

Mohsen Parvar
MSc Jundi-Shapur
Research Institute,
Dezfu

Train fire analysis by dynamic fire simulation method

Abstract: A fire accident of a passenger train from Tehran to Ahvaz has been numerically simulated. In this study, emission patterns, temperature distribution and the other parameters have been investigated after the start of the fire. The transient governing equations have been solved by Pyrosim software for different scenario based on mass fraction of products, unused fuel and other fire parameters. The results are compared with an actual case. The results showed that less than two minutes after the start of the fire, the conditions inside the wagon reached a critical situation in terms of temperature, smoke and visibility. To prevent the fire from spreading to other parts of the wagon, firefighting operations must be performed in less than four minutes.

Keywords: Numerical simulation, Fire scenario, Dynamic fire simulation, Smoke emission, Temperature distribution.

۱- مقدمه

سوانح آتش‌سوزی در راه آهن که حجم عظیمی از بار و مسافر را به وسیله قطارهای مسافری و باری حمل می‌کند، می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی بسیار زیادی را به بار آورد. در یک مطالعه ژئ و همکاران [۱] رابطه بین سرعت جریان هوا، نرخ حرارت دهی، میدان دمایی اطراف قطار، الگوهای نفوذ آتش و دود را در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی نمودند و محدوده ایمن سرعت سیر قطار را در زمان آتش‌سوزی تعیین کردند. ژو و همکاران [۲] یک شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار پیروسیم^۱ برای آتش‌سوزی در تونل فوق طویل دو خطه‌ای که به ایستگاه‌های نجات اورژانسی مجهز بود انجام دادند. نتایج نشان داد که به ازای یک دبی تهویه معین در تونل و راهروهای عرضی می‌توان به طور موثری ضخامت لایه دود و دمای هوای درون تونل را کنترل کرد. لونرمارک و همکاران [۳] یک ماکت از سالن مترو را که در مقیاس ۱:۳ از یک واگن واقعی بود طراحی کردند. نتایج نشان مدت زمانی که طول می‌کشد تا تمام سالن به طور کامل دچار حریق شود به شدت به نوع منبع اولیه آتش (چوب یا بنزین) بستگی دارد. جون و همکاران [۴] یک مطالعه عددی مقایسه‌ای روی نرخ حرارت دهی بر واحد سطح سالن‌های قطار مسافری سریع‌السیر نسبت به زمان در شرایط مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که هندسه، فاصله بین مواد اشتعال‌پذیر در واگن (میزان بارگذاری آتش)، عملکرد احتراقی مواد تشکیل دهنده بخش‌های داخلی واگن و شرایط تهویه از عوامل موثر بر نرخ حرارت دهی سالن‌های قطار سریع‌السیر هستند. شان و همکاران [۵] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ روی خطر ناشی از تجمع دود در سالن مسافری قطار که دچار حریق شده بود مطالعه عددی انجام دادند. نتایج نشان داد که در مدت زمان ۱۰۰ الی ۲۰۰ ثانیه پس از شروع حریق دما و غلظت گاز منواکسیدکربن از میزان بحرانی بیشتر خواهد شد و میزان دید افقی به شدت کاهش می‌یابد، بنابراین عملیات تخلیه مسافران باید سریعتر از این زمان صورت پذیرد. بر اساس آمار منتشر شده توسط انجمن ملی حفاظت از آتش‌سوزی آمریکا^۳ هر ساله دو سوم تا سه چهارم از تلفات در آتش‌سوزی‌ها بعلت تنفس گازهای سمی است، که از میان آنها ۶۰ الی ۸۰ درصد افراد در مکانی دور از منبع آتش جان خود را از دست می‌دهند [۶].

تا به امروز تحقیقات زیادی برای تحلیل موردی سوانح آتش‌سوزی انجام شده است؛ در بیشتر پژوهش‌ها، آتش‌سوزی قطار در

تونل مد نظر قرار گرفته و به موضوع آتش‌سوزی قطار در فضای باز کمتر پرداخته شده است. یک نمونه از قوی‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی عددی آتش‌سوزی که بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی طراحی شده است نرم‌افزار پیروسیم، از مجموعه نرم‌افزارهای FDS است. در این مطالعه سانه آتش‌سوزی واگن مسافری قطار تهران به اهواز که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۴/۲۷ در ساعت ۴:۱۵ صبح در حدفاصل ایستگاه اندیمشک به سبزآب رخ داده با استفاده از نرم‌افزار پیروسیم ۲۰۱۲ شبیه‌سازی شده است. در این سانه بلافاصله قطار متوقف و واگنی که دچار حریق شده بود توسط مامورین از مسافران تخلیه و از بقیه قطار منفصل می‌گردد؛ حدود ۱۰ دقیقه بعد نیروهای آتش‌نشانی عملیات اطفاء حریق را آغاز کردند و طی این مدت آتش به تمام واگن سرایت کرده و واگن بطور کامل می‌سوزد. مصرف دخانیات توسط یکی از مسافری در کوپه به عنوان علت این سانه گزارش شده است. ابعاد، مشخصات هندسی، جنس مواد سازنده واگن و شرایط اولیه آتش‌سوزی مشخص هستند.

هدف اصلی از این مطالعه، بررسی الگوی انتشار دود ناشی از آتش، توزیع دما و نحوه سرایت آتش به بخش‌های مختلف واگن در زمان‌های مختلف تا شروع عملیات اطفاء حریق و تعیین زمان بحرانی برای تخلیه مسافران است. استفاده از روش شبیه‌سازی برای بررسی سوانح آتش‌سوزی نسبت به روش‌های آزمایشگاهی مزایای متعددی دارد. در روش‌های آزمایشگاهی نمونه‌ای از آنچه در سانه واقعی آتش می‌گیرد در مقیاس کوچک‌تر در آزمایشگاه مدلسازی و ساخته می‌شود. سپس مدل ساخته شده را می‌سوزانند و با تعبیه ابزارهای اندازه‌گیری و کنترل کننده‌ها متغیرهای مختلف مورد نظر را اندازه‌گیری و بررسی می‌کنند. در مقابل، روش شبیه‌سازی به دلیل ساخت مدل در نرم‌افزار، بسیار کم هزینه است؛ علاوه بر این چون فرایند آتش‌سوزی نیز در نرم‌افزار انجام می‌شود نسبت به روش آزمایشگاهی، بی‌خطر است. مهمترین مزیت روش شبیه‌سازی، عدم وجود محدودیت در آن است چراکه امکان شبیه‌سازی سانه در ابعاد واقعی، ساختن مدل‌ها و اشیاء موجود در سانه با شکل‌های هندسی مختلف و جابجایی و تغییر عناصر در مدلسازی به آسانی وجود دارد.

۲- معادلات حاکم

^۱ Large Eddy Simulation (LES)^۲ National Fire Protection Association (NFPA)^۳ Pyrosim

جدول ۱ معادلات حاکم

شماره	شرح
(۴)	معادله بقای جرم
	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b'''$
(۵)	معادله بقای مومنتوم (قانون دوم نیوتن)
	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}$
(۶)	معادله بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)
	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}_b''' - \dot{q}_b'' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon$
(۷)	معادله حالت گاز کامل
	$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}}$

در مدل سازی احتراق در نرم افزار امکان تعریف سوخت مورد نظر به طور کامل با مشخص کردن فرمول شیمیایی آن وجود دارد. در معادله ۳ در نرم افزار فقط فرآورده های نهایی مد نظر نیست بلکه چون احتراق فرآیندی پویا است که طی زمان اتفاق می افتد و در هر لحظه فرآورده های مختلفی تولید می کند روش حل استفاده شده در نرم افزار روشی ناپایا و بر اساس کسر جرمی هر یک از فرآورده ها و سوخت مصرف نشده واکنش در هر لحظه نسبت به جرم کل موجود در واکنش است [۸].

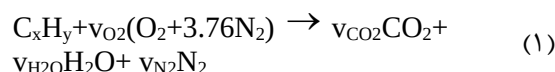
بر اساس قانون پایستگی جرم، بدیهی است که مجموع کسر جرمی های مواد موجود در واکنش (هوا، سوخت و فرآورده ها) در هر لحظه، برابر با یک است. شکل دیفرانسیلی معادلات حاکم برای سیال نیوتنی در این مدل سازی در جدول ۱ آمده است.

در این معادلات $u = (u, v, w)$ سرعت در همه جهتها و h آنتالپی محسوس (تابعی از دما) است. کمیت های برداری، بصورت پررنگ نشان داده شده اند [۸]. کمیت های پرنرنگی که با اندیس ۱ و ۲ نشان داده شده اند تانسور هستند [۸]. τ_{ij} در معادله ۵، تانسور تنش را نشان می دهد و f_b نیروهای خارجی از جمله نیروی درگ وارد شده بر قطرات سیال در حالت مایع است [۸]. q''' در معادله ۶ نرخ حرارت دهی بر واحد حجم ناشی از واکنش شیمیایی است؛ q_b''' انرژی منتقل شده به قطرات تبخیر شده است؛ q'' شار حرارتی ناشی از انتقال حرارت های رسانش و تشعشع و ε نرخ تبدیل انرژی جنبشی به انرژی حرارتی بواسطه لزجت سیال است [۸]. $\bar{W}$ در معادله ۷ مجموع جرم مواد موجود در واکنش است.

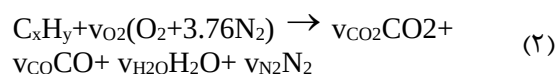
در این مطالعه به منظور مدل سازی و بررسی فرایند احتراق، شناخت ماهیت آتش ضروری است. فرایند آتش سوزی را می توان به سه مرحله تقسیم کرد:

۱. از زمان شروع اشتعال تا رسیدن شعله به حداکثر دما و تابش، آتش در حالت در حال توسعه است.
۲. مدت زمانی که دمای شعله حداکثر مقدار خود را دارد مرحله توسعه یافتگی آتش در نظر گرفته می شود (در این مدت دمای شعله حدود ۷۶۰ درجه سانتیگراد است).
۳. مدت زمانی که آتش رو به خاموش شدن می رود مرحله برگشت شعله نامیده می شود.
۴. از مهمترین عوامل موثر بر رفتار آتش، نوع سوخت، فرایند احتراق و میزان حرارت آزاد شده طی آن است. همچنین، این عوامل بر ویژگی های دود ناشی از آتش سوزی هم موثر هستند.

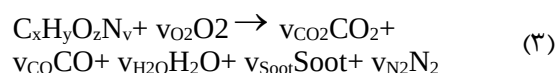
اولین قدم در شناخت آتش تشریح واکنش احتراق است. احتراق شامل واکنش شیمیایی بین سوخت (در حالت بخار) و اکسیژن است [۶]. اگر هوا را بصورت ترکیبی از گازهای نیتروژن (۷۹٪) و اکسیژن (۲۱٪) در نظر بگیریم، به ازای هر مول اکسیژن موجود در هوا ۳/۷۶ مول نیتروژن وجود دارد. بنابراین، می توان واکنش احتراق کامل یک سوخت هیدروکربنی با هوا را به شکل زیر نوشت [۷]:



در واکنش های احتراق حقیقی به دلیل نرسیدن اکسیژن کافی به واکنش و وجود اغتشاش و اختلاط، همیشه مقداری کربن منواکسید در فرآورده ها وجود دارد. بنابراین، واکنش احتراق واقعی را می توان به شکل زیر نوشت [۷]:



برای شبیه سازی احتراق یک ماده واقعی در نرم افزار بصورت پیش فرض از معادله زیر استفاده شده است:



جدول ۲ مشخصات فنی واگن مسافری مدل سازی شده (ابعاد برحسب میلیمتر)

ارتفاع از زمین	۴۰۵۰
ارتفاع اتاق (سالن)	۲۶۵۰
عرض	۲۸۲۵
سپر تا سپر	۲۴۵۰۰
سیستم تهویه	بدون تهویه
تاریخ ساخت	سال ۱۳۵۳
تعداد صندلی	۱۸
ظرفیت به نفر	۵۴
تعداد کوپه	۹
کشور سازنده	دانمارک
نوع واگن	درجه دو

یکی از پارامترهای مهم در بررسی رفتار آتش، نرخ حرارت دهی بر واحد سطح^۱ آن است؛ نرخ حرارت دهی بر واحد سطح عبارت است از میزان حرارت آزاد شده از واحد سطح آتش در واحد زمان که معمولاً با یکای وات بر مترمربع تعیین می شود که همان تعریف شار حرارتی است. نرخ حرارت دهی از رابطه $HRR = \dot{V}\Delta H$ بدست می آید که در آن HRR نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش، $\dot{V}$ دبی حجمی سوخت مصرفی (لیتر بر ثانیه) و ΔH آنتالپی سوختن سوخت یا ارزش حرارتی موثر احتراق (ژول بر لیتر) است [۹]. بنابراین نوع سوخت و سرعت واکنش سوختن از عوامل موثر بر نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش هستند.

۳- مدل سازی واگن

جدول ۲ ضخامت و جنس مواد بکار رفته در ساختار واگن مسافری

بخش	جنس	ضخامت (میلیمتر)
بدنه واگن	تخته سه لا	۴۸
	پشم شیشه	۵۰
	فولاد	۲
کف واگن	PVC	۹۹۸
	تخته سه لا	۵۰
	پشم شیشه	۱۷۰
	فولاد	۲
سقف واگن	آلومینیوم	۲۸
	پشم شیشه	۱۲۰
	فولاد	۲
صندلی ها	فوم سرد ^۲	۱۰۰
دیوارهای جداکننده کوپه ها	تخته سه لا	۵۰

۴- شرایط اولیه و شرایط مرزی شبیه سازی

بر اساس گزارشات تهیه شده توسط گروه ایمنی و نظارت بر شبکه راه آهن اندیشک فاصله زمانی ۱۰ دقیقه ای بین توقف و انفصال واگن تا رسیدن مامورین آتش نشانی وجود داشته و اطلاعات دقیقی از زمان شروع آتش سوزی در واگن موجود نیست. با توجه به عکس های موجود از سانحه می توان حجم آتش سوزی واگن در لحظات ابتدایی و قبل از انفصال را مشاهده نمود. (شکل ۱). با توجه به اهمیت میزان سوختگی واگن در این

برای انجام شبیه سازی و تحلیل آتش ابتدا باید مدل سه بعدی از هندسه محل مورد نظر را تهیه و سپس با مشخص کردن شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل، جنس مواد موجود در محیط، موقعیت و شدت حریق فرضی، نوع سوخت و نیز مشخص کردن تجهیزات و شرایط تهویه، شبیه سازی را اجرا کرد. چرا که در آتش سوزی میزان حرارت آزاد شده و به تبع آن دما و غلظت دود در محیط کاملاً وابسته به ابعاد، جنس، ضخامت، چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و ضریب رسانندگی حرارتی مواد سازنده واگن است که اینها پارامترهای ورودی به نرم افزار هستند. در این مطالعه واگن شماره ۲۹۲۰۲۱۶ مدل سازی شده که مشخصات کامل آن در جدول ۲ آمده است. با توجه به اینکه در تحلیل آتش سوزی حجم و جرم مواد از شکل هندسی آنها مهم تر است، در ساخت مدل از جزئیات ساختاری واگن چشم پوشی شده و مدل ساده سازی شده واگن در نظر گرفته شده است.

همانطور که در ابتدای این بخش اشاره شد علاوه بر هندسه، جنس مواد نیز در مدل سازی احتراق حائز اهمیت است. همچنین ضخامت و جنس مواد بکار رفته در واگن در جدول ۲ آمده است.

^۲ Polyurethane^۱ Heat Release Rate Per Unit Area (HRR)

جدول ۳ شرایط شبیه‌سازی آتش

زمان تنظیم شده	شرایط آتش‌سوزی	موقعیت آتش	HRRPUA (MW)	زمان آتش‌سوزی	شماره
۲۵۰ ثانیه	پنجره‌ها باز	صندلی پنجم	۱/۲	قبل از انفصال واگن	۱
۱۵۰ ثانیه	پنجره‌ها بسته	صندلی پنجم	۱/۲	قبل از انفصال واگن	۲
	پنجره‌ها	صندلی - ها، کف و دیواره - بدون شیشه (شیشه‌ها ذوب شدند)	۱/۲	بعد از انفصال واگن	۳
۱۰۰۰ ثانیه		کوپه سوم			

با توجه به وقوع سانحه در فضای باز و توقف قطار و انفصال واگن در ابتدای آتش‌سوزی، شرایط اولیه جوی (دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر) به عنوان شرایط اولیه شبیه‌سازی در نظر گرفته شد که همین شرایط روی مرزهای مش‌بندی برقرار است [۵]. در این نرم‌افزار آتش به صورت انتشار گاز ناشی از سوختن که از یک سطح جامد یا یک منفذ متصاعد می‌شود مدلسازی شده است؛ سطحی که مشتعل شده است دارای یک نرخ حرارت دهی مشخص بر واحد سطح (شار حرارتی) است [۱۰]. بنابراین شرایط مرزی در سطوحی که آتش‌سوزی از آنجا شروع می‌شود شار ثابت در نظر گرفته شده است (سطوح مذکور و شار حرارتی هر کدام در جدول ۳ آورده شده‌است).

بدلیل استفاده از مواد عایق حرارت مثل پشم شیشه در لایه‌های میانی بدنه واگن، شرایط مرزی در سطوح داخلی و خارجی واگن (سقف، کف و دیواره‌ها) از نوع عایق در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی روی تمام مرزهای مش‌بندی از نوع جابجایی است. شرایط مرزی حاکم به اختصار در جدول ۴ آمده‌اند.

جدول ۴ شرایط مرزی

ردیف	محل برقراری شرط مرزی	شرط مرزی حاکم
۱	موقعیت آتش (سطح شروع آتش‌سوزی)	شار ثابت (۱/۲ مگاوات)
۲	سطوح داخلی و خارجی واگن (سقف، کف و دیواره‌ها)	عایق
۳	مرزهای مش‌بندی	جابجایی

فاصله زمانی (چراکه تعیین کننده میزان خسارت مالی وارده به واگن است) و در نظر گرفتن این حجم از آتش به عنوان لحظه شروع و داشتن مدت زمان ۱۰ دقیقه‌ای رسیدن مامورین، این بخش از سانحه بصورت جداگانه شبیه‌سازی شد. همچنین جهت اعتبارسنجی مدلسازی، خروجی‌های نرم‌افزار با عکس‌هایی که از لحظه رسیدن مامورین در دسترس است و حجم آتش را در آن زمان نشان می‌دهد مورد مقایسه قرار گرفت. به همین خاطر شبیه‌سازی سانحه به دو بخش اصلی تقسیم شده است: بخش اول از زمان شروع آتش‌سوزی تا تخلیه مسافران از واگن و بخش دوم از زمان توقف قطار تا زمان رسیدن مامورین آتش‌نشانی. شرایط آتش بر اساس تفاوت بین موقعیت آتش، میزان آتش اولیه، باز یا بسته بودن پنجره‌های سالن مسافری، شرایط اولیه و شرایط مرزی به چندین حالت برای شبیه‌سازی تقسیم شد که در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند. با توجه به نوع مواد به کار رفته در ساختار واگن و میزان تراکم تجهیزات و ملزومات داخل واگن، نرخ اولیه حرارت دهی بر واحد سطح آتش در شرایط مختلف آتش‌سوزی ۱/۲ مگاوات در نظر گرفته شده است [۵]. ابعاد شبکه مش‌بندی طراحی شده در این تحلیل، با توجه به ابعاد واگن که در جدول ۲ آورده شده، $6m \times 9m \times 30/5m$ در نظر گرفته شد که به ترتیب طول در عرض در ارتفاع هستند. شبکه مش‌بندی مذکور شامل $60 \times 90 \times 305$ سلول مکعبی است؛ بنابراین اندازه هر سلول $0/1 \times 0/1 \times 0/1$ متر خواهد بود. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار پایروسیم در زمینه مش‌بندی، توانایی پیشنهاد کردن مناسب‌ترین اندازه مش‌بندی بر اساس ابعاد شبکه می‌باشد، که از این قابلیت جهت تعیین اندازه‌های مش‌بندی مذکور استفاده شده است [۵].



شکل ۱ واگن در هنگام آتش‌سوزی

۵- مدل اغتشاش منتخب

در نرم افزار مورد استفاده در پژوهش حاضر (پایروسیم ۲۰۱۲) جهت حل عددی معادلات حاکم بر جریان، از روش LES یا شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است که مناسب ترین روش برای شبیه سازی فرآیندهای احتراق است. پدیده آتش سوزی به دلیل تولید گازهای مختلف در طی فرآیند احتراق، انتشار سریع دود و نفوذ آتش به بخش های مختلف بصورت نامنظم و تصادفی و تغییرات سریع دما در زمان ها و مکان های مختلف بعد از شروع آتش سوزی، پدیده ای ناپایاست که نوع جریان های موجود در آن کاملاً آشفته است. گام زمانی حل در نرم افزار پایروسیم تابعی از اندازه مش بندی و سرعت مشخصه جریان است [۱۰]. بنابراین گام زمانی می تواند در هر مرحله از حل تغییر کند.

گام زمانی اولیه بصورت اتوماتیک از رابطه $\frac{5^3 \sqrt{\delta_x \delta_y \delta_z}}{gh}$ محاسبه می شود که در آن δ_x ، δ_y و δ_z به ترتیب طول، عرض و ارتفاع کوچکترین سلول مش بندی و g شتاب گرانش زمین و H ارتفاع دامنه محاسباتی است [۱۰]. در این مطالعه با توجه به ثابت بودن اندازه سلول ها در شبکه مش بندی گام زمانی در تمام مراحل حل توسط نرم افزار، ثابت است. با جایگزین کردن مقادیر ابعاد سلول های مش بندی و ارتفاع دامنه محاسباتی (با توجه به ابعاد شبکه مش بندی این مقدار ۶ متر است) در رابطه فوق، گام زمانی حل ۰/۰۶ ثانیه بدست می آید.

جهت حل معادلات حاکم بر سیال در دینامیک سیالات محاسباتی از روش هایی چون ^{1}DNS ، روش $^{2}RANS$ و LES استفاده می شود. در روش DNS تمام معادلات بصورت مستقیم حل عددی می شوند و در روش $RANS$ تمام معادلات مدلسازی و سپس حل می شوند اما در روش LES گردابه های اغتشاشی بزرگ به طور مستقیم با معادلات ناویر استوکس حل عددی و گردابه های کوچک مدلسازی می شوند؛ بنابراین روش LES نسبت به روش DNS هزینه محاسباتی کمتر و نسبت به روش $RANS$ دقت بالاتری دارد.

باید توجه داشت که نرم افزارهای تخصصی حریق، صرفاً آتش را به صورت یک منبع گرما در نظر نمی گیرند، بلکه در این نرم افزارها، آتش به صورت یک واکنش شیمیایی پویا که خروجی های مختلفی مانند حرارت و گازهای ناشی از احتراق دارد، لحاظ می گردد.

۶- تحلیل نتایج شبیه سازی

حداکثر دمای قابل تحمل برای چشم انسان ۶۰ درجه سانتیگراد است [۵]. جهت به دست آوردن زمان ایمن تخلیه مسافران یک صفحه برش در ارتفاع متوسط قد انسان (۱/۵ متر) در نظر گرفته شد [۵]. همچنین مدت زمانی را که دما در آن صفحه به حداکثر دمای قابل تحمل برای چشم انسان می رسد و همچنین مدت زمانی را که ارتفاع لایه دود که از سقف به سمت کف واگن تجمع می کند به ارتفاع مذکور می رسد (ضخامت لایه دود) به عنوان زمان های بحرانی تخلیه مسافران در نظر گرفته شده است.

۶-۱- تحلیل توزیع دما

تغییرات دما در درب خروجی سمت چپ واگن در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، ۵۰ ثانیه زمان برای تخلیه مسافران از این درب وجود دارد؛ چراکه پس از این زمان دما از ۶۰ درجه سانتیگراد بیشتر می شود و می تواند برای مسافران خطرناک باشد.

بخش عمده ای از این انتقال حرارت بصورت تشعشع است که باعث افزایش سریع دما می شود و بینایی افراد را به شدت تهدید می کند. به گونه ای که بعد از تنها ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه دما به به ترتیب به حدود ۱۶۰ و سانتیگراد ۲۷۵ درجه سانتیگراد خواهند رسید.

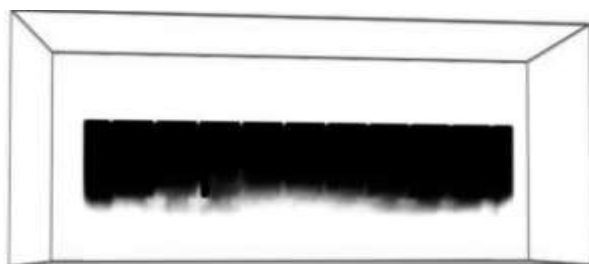
همچنین با توجه به شکل ۳ که تغییرات دما در درب خروجی سمت راست واگن را نشان می دهد، پس از ۱۰۰ ثانیه دما به ۶۰ درجه سانتیگراد می رسد. به عبارتی دیگر ۵۰ ثانیه زمان بیشتر برای تخلیه مسافران از این درب وجود دارد. افزایش دما در سمت ان درب کمتر است به گونه ای که حداکثر دما در این حالت پس از ۲۰۰ ثانیه به حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد می رسد. بنابراین، شرایط در درب سمت چپ واگن به دلیل نزدیکی به منبع آتش، بحرانی تر است.

² Reynolds Averaged Navier-Stokes¹ Direct Numerical Simulation

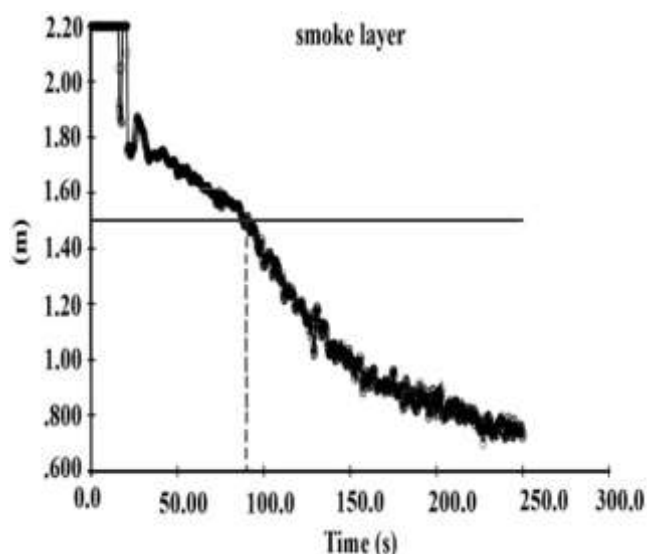
پس از شروع آتش‌سوزی ارتفاع لایه دود به حالت بحرانی می‌رسد. همچنین در شکل ۷ تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۲ آتش‌سوزی نشان داده شده است که با گذشت ۷۵ ثانیه ارتفاع لایه دود به حالت بحرانی می‌رسد و پس از آن بدلیل نبودن تبادل با محیط بیرون و تجمع دود با گذشت اندک زمانی تمام فضای واگن را پر می‌کند که می‌تواند برای تنفس مسافران خطر آفرین باشد. بنابراین با بررسی نتایج می‌توان دریافت باز بودن پنجره‌ها سبب بهبود ۲۰ درصدی زمان بحرانی شده است و این به این معنی که مسافران فرصت بیشتری را جهت تخلیه می‌توانند داشته باشند.



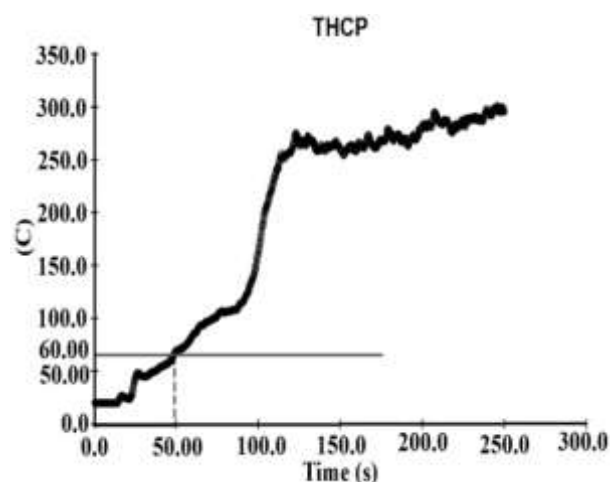
شکل ۴ توزیع دود پس از گذشت ۱۸۰ ثانیه از شروع آتش‌سوزی برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)



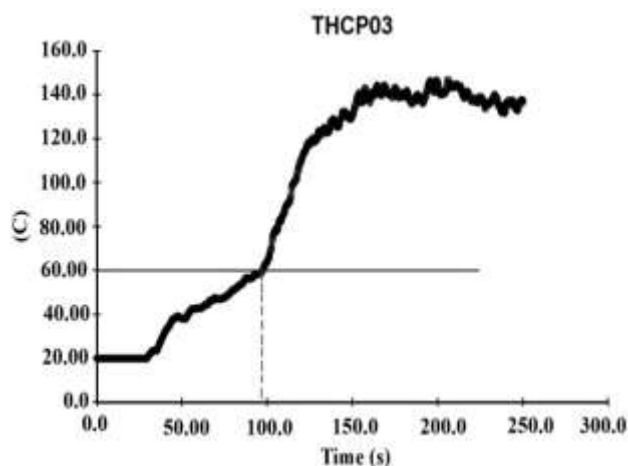
شکل ۵ توزیع دود پس از گذشت ۹۰ ثانیه از شروع آتش‌سوزی برای حالت شماره ۲ (بسته بودن درب‌ها و پنجره‌ها)



شکل ۶ تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (ارتفاع بحرانی)



شکل ۲ تغییرات دما در درب سمت چپ واگن برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (دمای بحرانی)



شکل ۳ تغییرات دما در درب سمت راست واگن برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (دمای بحرانی)

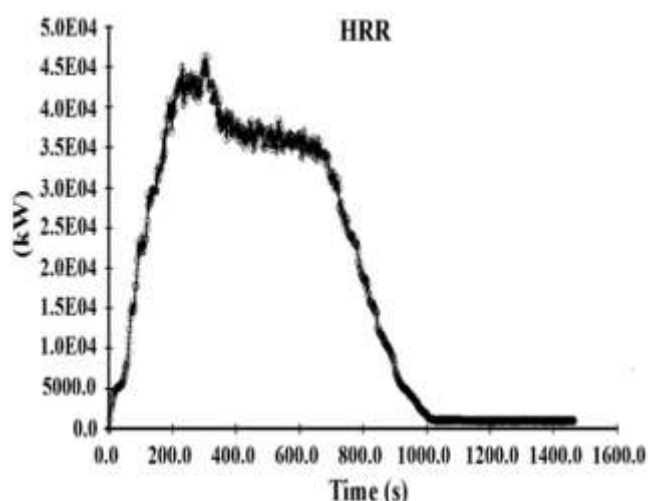
۲-۶ تحلیل توزیع دود

با مقایسه توزیع دود برای حالت شماره ۱ آتش‌سوزی در شکل ۴ و توزیع دود در حالت شماره ۲ در شکل ۵ نشان داده که اگر درب‌ها و پنجره‌های واگن مسافری باز نشوند خطری جدی جان مسافران را تهدید خواهد کرد چرا که همانگونه که شکل ۴ نشان داده؛ باز بودن پنجره سبب تهویه هوا و خروج دود از واگن شده و در این حالی است که در شکل ۵ به دلیل ایجاد پدیده همرفت به تدریج غلظت دود ناشی از آتش به سرعت بالا می‌رود و در مدت زمان کوتاهی تمام فضای داخل واگن را پر می‌کند و می‌تواند موجب خفگی مسافران شود در حالی که باز بودن پنجره‌های واگن سبب جابجایی هوای سرد با دود ناشی از آتش می‌شود.

تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۱ آتش‌سوزی در شکل ۲ نشان داده شده است و با توجه به آن، حدود ۹۰ ثانیه

۴-۶- نرخ حرارت دهی بر واحد سطح

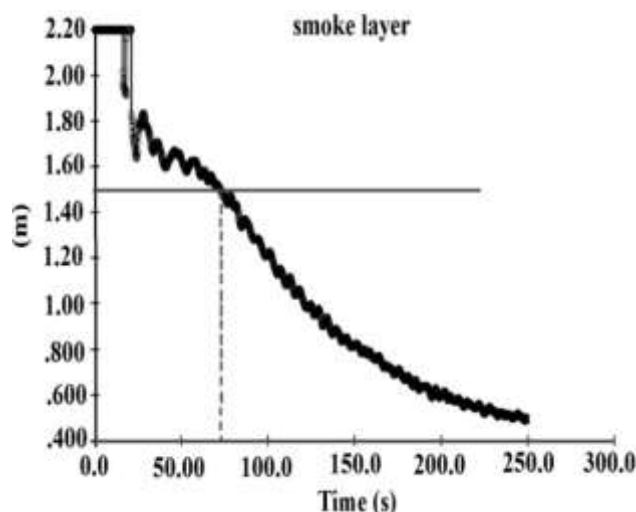
نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش که عبارت است از میزان حرارت آزاد شده از واحد سطح آن در واحد زمان، در شکل ۹ برای حالت شماره ۳ آتش سوزی نشان داده شده است؛ که در آن پس از گذشت حدود ۲۲۰ ثانیه آتش به حالت توسعه یافته می-رسد (حالتی است که نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش به حداکثر مقدار خود می-رسد و ثابت می-ماند). این می-تواند به دلایلی همچون وجود مواد قابل اشتعال و هوای کافی در کنار انتقال حرارت تشعشع و جابجایی هوا در محیط اطراف ایجاد گردد. به همین دلیل آتش سوزی با سرعت بالایی در واگن گسترش یافته به گونه‌ای که حداکثر نرخ حرارت دهی در واحد سطح آتش در این حالت به ۴۵ مگاوات بر متر مربع می-رسد. هر چه میزان نرخ حرارت دهی آتش به حالت توسعه یافته نزدیک‌تر شود مهار آتش با عملیات اطفاء حریق دشوارتر و ویرانی حاصل بیشتر می-شود.



شکل ۹ نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش برای حالت شماره ۳ (بعد از انفصال)

۷- اعتبارسنجی نتایج

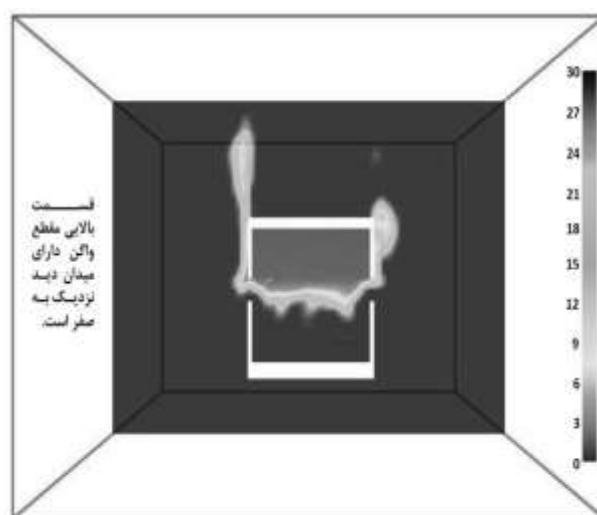
همانطور که در بخش ۴ اشاره شده، جهت بررسی دقیق‌تر، سانه به دو بخش اصلی تقسیم شد. جهت سنجش اعتبار نتایج، در شبیه‌سازی بخش دوم سانه (بعد از انفصال واگن) تمام شرایط از جمله مدت زمان سوختن واگن (حدود ۱۰ دقیقه) براساس سانه واقعی تنظیم و در خروجی‌های نرم‌افزار شرایط آتش (حالت شعله‌ها) و شرایط واگن (میزان سوختگی و از بین رفتن بخش‌های مختلف در اثر نفوذ آتش) در هر لحظه و بخصوص در



شکل ۷ تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۲ (بسته بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (ارتفاع بحرانی)

۳-۶- بررسی میدان دید فضایی در واگن

میدان دید زیر ۵ متر میدان دید بحرانی است که ایمنی مسافران را تهدید می‌کند [۵]. کانتورهای میدان دید فضایی از نمای سمت چپ واگن و صفحه گذرا از وسط آن بر حسب متر پس از گذشت ۵۰ ثانیه از شروع آتش سوزی در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. پس از گذشت فقط ۵۰ ثانیه از شروع آتش سوزی میدان دید فضایی در ارتفاع گذرا از متوسط چشم انسان‌ها از میزان بحرانی ۵ متر کمتر می‌شود که این موضوع می‌تواند کار تخلیه و نجات مسافران را با مشکل جدی مواجه کند.

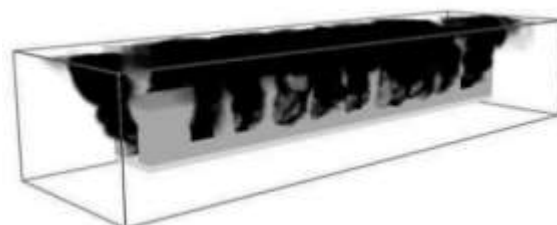


شکل ۸ کانتورهای میدان دید فضایی از نمای سمت چپ واگن و صفحه گذرا از وسط آن بر حسب متر پس از گذشت ۵۰ ثانیه از شروع آتش سوزی

بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد ایمنی مسافران در مدت زمان خیلی کوتاهی شرایط داخل واگن در این زمان از لحاظ دما، توزیع دود و میدان دید به حالت بحرانی می‌رسد که نشان از ضرورت سرعت عمل در تخلیه مسافران است. به علاوه تغییرات ضخامت لایه دود برای حالت باز بودن و بسته بودن درب‌ها و پنجره‌های واگن نشان داد زمان بحرانی در حالت باز بودن درها و پنجره‌ها ۲۰ درصد بهبود یافته که این امر به دلیل ایجاد جریان جابجایی بین محیط سرد و گرم و به عبارتی دود ناشی از آتش سوزی و هوای سردتر بیرون از واگن رخ داده است. در نتیجه بسیار ضروری است که درب‌ها و پنجره‌های واگن مسافری در مواقع اضطراری به آسانی باز و نیز چکش‌های مخصوص جهت شکستن شیشه پنجره‌ها هنگام خطر در محلی در دسترس برای مسافران تعبیه شود.

نرسیدن اکسیژن کافی به آتش از رسیدن آن به حالت توسعه یافته جلوگیری و دمای شعله را کاهش می‌دهد که دانستن این موارد برای عملیات امداد و نجات بسیار کمک‌کننده باشد. همچنین با توجه به اینکه لایه دود در سقف واگن تجمع و به تدریج ضخامت آن افزایش می‌یابد با تعبیه فن‌های مخصوص می‌توان از تجمع دود سمی در واگن جلوگیری کرد. تعبیه سنسورهای دود و مه‌پاش در سقف واگن مسافری و بررسی تاثیر آن روی توزیع دما، انتشار دود، میدان دید فضایی و نرخ حرارت دهی بر واحد سطح از جمله مواردی است که می‌توان در مطالعات آینده بررسی نمود.

لحظه پایان زمان ۱۰ دقیقه با عکس‌های تهیه شده از سانحه مقایسه شده است. مقایسه شعله‌ها در شکل ۱۰ داده شده است. علاوه بر این، در مطالعه جون و همکاران [۵] آتش‌سوزی یک واگن مسافری با نرم‌افزار پایروسیم شبیه‌سازی عددی شده است و با توجه به تشابه آن با مطالعه حاضر می‌توان جهت اعتبارسنجی، نتایج دو مطالعه را با هم مقایسه کرد که در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از بررسی حاکی از آن بوده که حداکثر دما ۶/۹٪ و میدان دید ۱۰٪ با نتایج جون تفاوت داشته است؛ لذا واگن بررسی شده در مطالعه حاضر در حالت بحرانی تری قرار دارد. با توجه به کوچک‌تر بودن ابعاد واگن این مطالعه نسبت به واگن جون، تفاوت در موقعیت منبع آتش و نیز موقعیت فضای آتش سوزی که در هوای آزاد و خارج از تونل بوده، می‌توان گفت نتایج از هماهنگی خوبی برخوردارند.



شکل ۱۰ مقایسه نتایج (حالت شعله‌های آتش و میزان نفوذ آن در بخش‌های مختلف واگن بعد از ۶۰۰ ثانیه از شروع آتش‌سوزی) نرم-افزار با سانحه واقعی

جدول ۵ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج جون و همکاران

پارامتر مورد مطالعه	نتایج جون [۵] برای مورد I	نتایج مطالعه حاضر برای حالت شماره ۱
مدت زمانی که طول می‌کشد تا دما در ارتفاع ۱/۵ متری از کف واگن به ۶۰ درجه سانتیگراد برسد	۲۰۰ ثانیه	۱۰۰ ثانیه
حداکثر دمای داخل سالن	۷۲۰ درجه سانتیگراد	۷۷۰ درجه سانتیگراد
مدت زمان بحرانی برای میدان دید در ۱/۵ متری از کف واگن	۱۰۰ ثانیه	۹۰ ثانیه

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سانحه آتش‌سوزی واگن قطار مسافری تهران به اهواز که در تاریخ ۹۵/۰۴/۲۷ رخ داد با استفاده از نرم افزار پایروسیم شبیه‌سازی و پارامترهای گرمایی و انتشاردود مورد

علامت انگلیسی

T	دما
p	فشار
$u = (u, v, w)$	سرعت در دستگاه مختصات کارتزین
h	آنالپی محسوس (KJ)
τ_{ij}	تانسور تنش
f_b	نیروهای خارجی مثل نیروی درگ (N)
q'''	نرخ حرارت دهی بر واحد حجم ناشی از (kJ/m ³) یک واکنش شیمیایی
q_b''''	انرژی منتقل شده به قطرات تبخیر شده (KJ)
q''	شار حرارتی ناشی از انتقال حرارت‌های رسانش و تشعشع (KW)
ε	نرخ تبدیل انرژی جنبشی به انرژی حرارتی
$\bar{W}$	مجموع جرم مواد موجود در واکنش
R	ثابت جهانی گازها (J/kmol)
C _x H _y	سوخت هیدروکربنی
CO ₂	دی اکسید کربن

- [3] Lönnermark, A., Ingason, H., Li, Y. Z., Kumm, M., Fire development in a 1/3 train carriage mock-up, Fire Safety Journal Vol. 91, pp. 432-440, (2017).
- [4] Jun-min, C., Xiao-lin, Y., Gang, Y., Xiao-han, G., Comparative Study on Heat Release Rate of High-speed Passenger Train Compartments, Procedia Engineering Vol. 71, p. 107 – 113, (2014).
- [5] Shan-jun, M., Zi-rong, L., Dong, L., Jia-xin, L., Nan-jiang, Z., Analysis of Smoke Hazard in Train Compartment Fire Accidents Base on FDS, Procedia Engineering Vol. 52, p. 284 – 289, (2013).
- [6] Thunderhead Engineering, PyroSim User Manual, finland: National Science Foundation, (2012).
- [7] Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J., Fundamentals of Thermodynamics, Michigan: WILY Press, (2003).
- [8] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., McDermott, R., Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Espoo: National Institute of Standards and Technology Special Publication 1018-5, (2010).
- [9] Zeng, Z., Xiong, K., Xin-Ling, L., Weng, M.-C., Liu, F., Study on the smoke stratification length under longitudinal ventilation in tunnel fires, International Journal of Thermal Sciences Vol. 132, p. 285–295, (2018).
- [10] McGrattan, K., Hostikk, S., McDermott, a R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K., Fire Dynamics Simulator User's Guide, Baltimore, Maryland, USA: NIST Special Publication 1019, (2014).

مونوکسید کربن	CO
ماده ای که می سوزد (سوخت)	$C_xH_yO_zN_vOther_w$
آب	H ₂ O
نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش (KW)	HRRPUA
نیتروژن	N ₂
اکسیژن	O ₂
دود ناشی از احتراق	Soot
دبی حجمی سوخت مصرفی (lit/s)	$\dot{V}$
آنتالپی سوختن سوخت یا ارزش حرارتی موثر احتراق (kJ/lit)	ΔH
علائم یونانی	
چگالی (kg/m^3)	ρ
ضریب استوکیومتری واکنش	Y

مراجع

- [1] Xi, Y., Mao, J., Bai, G., Hu, J., Safe velocity of on-fire train running in the tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 60 p. 210–223, (2016).
- [2] Xu, Z. S., You, W., Kong, J., Cao, H., Zhou, C., A study of fire smoke spreading and control in emergency rescue stations of extra-long railway tunnels, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 49, pp. 155-161, (2017).

تحلیل ناپایداری سازه درام دوار یک موتور توربینی تحت بارهای فشاری و حرارتی

چکیده: کماتش یکی از دلایل اصلی خرابی در سازه‌های جداره نازک است، بنابراین امکان وجود کماتش را همیشه باید در طراحی و تحلیل آنها در نظر داشت. در این تحقیق یک درام دوار در یک موتور توربینی که چندین ردیف پره روی محیط خارجی آن متصل هستند مورد تحلیل ناپایداری قرار می‌گیرد. سازه درام دوار در واقع یک سازه مخروطی جداره نازک است که تحت انواع بارهای مکانیکی و حرارتی قرار دارد. ابتدا درام دوار به صورت یک سازه استوانه‌ای مدل و در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحلیل و به کمک روابط تئوری مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. در ادامه هندسه درام به شکل مخروطی مدل می‌شود و روند تحلیل مشابه حالت قبل انجام می‌گردد. تنش‌های اعمالی روی سازه معین می‌شوند و ضرایب کماتش یا همان مقادیر ویژه استخراج می‌گردند و پایداری سازه درام و عوامل موثر بر آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل نشان می‌دهند میزان تاثیر بارگذاری حرارتی بر کماتش سازه درام بیشتر از بارگذاری‌های فشار خارجی است. در درام مخروطی تنش بحرانی ۷۱۰ مگاپاسکال و ماکزیمم تنش کاری برابر ۶۶۰ مگاپاسکال است.

واژه‌های راهنما: موتور توربینی، سازه درام دوار، بارهای مکانیکی و حرارتی، تحلیل سازه، تحلیل ناپایداری.

بهروز شهریاری*
استادیار

علیرضا علیپوری تراب
کارشناس ارشد

مصطفی ناظمی زاده
استادیار،
مجتمع دانشگاهی مکانیک،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

Behrooz
Shahriari*
Assistant professor

Alireza Alipouri
Toraab
MSc.

Mostafa
Nazemizadeh
Assistant professor,
Faculty of Mechanics,
Malek Ashtar
University of
Technology

Analysis of instability of a turbine engine's rotary dram under compressive and thermal loads

Abstract: Buckling is one of the main causes of breakdown in thin wall structures, so the possibility of buckling should always be considered in design and analysis. In this research, instability of a rotating drum in a turbine engine with several rows of blades attached to its external environment is analyzed. The rotary drum structure is a thin-walled conical structure that is subjected to a variety of mechanical and thermal loads. The rotary drum is modeled as a conical structure and analyzed in the Abaqus finite element software and verified by theoretical relations. The stresses applied to the structure are determined, and the buckling coefficients, or eigenvalues, are extracted, and the stability of the drum structure and its associated factors are discussed. The results of the analysis show that the effect of thermal loading on the buckling of the drum structure is greater than external pressure loadings. In the cone drum the critical stress is 710 MPa and the maximum working stress is 660 MPa.

Keywords: Turbine engine, Rotary drum structure, Mechanical and thermal loads, Structural Analysis, Instability analysis.

۱- مقدمه

مختلف نشان می‌دهد قطعاتی که بیشتر در معرض خرابی قرار دارند و طراحی سازه آنها امری حیاتی برای موتور است در درجه اول قطعات روتور (اعم از روتور توربین، روتور کمپرسور و پره‌های دوار) و در درجه دوم بخش تحت گرا دیان حرارتی شدید یعنی محفظه احتراق می‌باشند. البته در موتورهای با توان پایین، توربین بحرانی‌ترین جزء است و در موتورهای با توان بالا کمپرسور بحرانی‌ترین است. درام کمپرسور نیز به عنوان یک جزء روتور به دلیل قرار گرفتن در معرض بارهای فشاری و حرارتی نیازمند پایداری در مقابل این بارها می‌باشد.

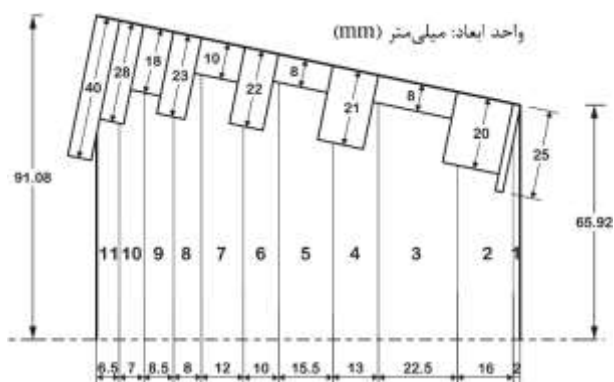
فلاگ [۲] در سال ۱۹۳۶ مدل ریاضی پیچیده، کمانش پوسته مخروطی تحت بار فشاری را مورد مطالعه قرار داد. سید [۳] در سال ۱۹۵۶ یک رابطه ساده برای کمانش پوسته‌های مخروطی همسانگرد تحت بارگذاری محوری برای مخروط با ضخامت ثابت ارائه کرد. ایشان همچنین در سال ۱۹۶۱ [۴] برای اثبات مقدار بار بحرانی استوانه و مخروط تلاش کرد. مطالعه کمانش پوسته‌های مخروطی تحت فشار خارجی متغیر در طول یال مخروط توسط سینگر [۵] در سال ۱۹۶۱ ارائه شده است. ویگرتن و سید [۶] در سال ۱۹۶۵ آزمایش‌های زیادی را روی پوسته‌های مخروطی تحت بارگذاری فشار محوری و فشار هیدروستاتیک خارجی انجام دادند. در سال ۱۹۶۶ برنز [۷] درباره طراحی وزن بهینه پوسته‌های مخروطی تقویت شده توسط تقویت کننده‌های محیطی تحت فشار هیدروستاتیک یک بررسی پارامتری انجام داد. کومنکی [۸] در سال ۱۹۶۷ کمانش پوسته‌های ناقص مخروطی را تحت فشار استاتیکی جانبی یکنواخت را مورد مطالعه قرار داد. برکوویتس و همکارانش [۹] در سال ۱۹۶۷ به بررسی کمانش پوسته مخروطی آلومینیومی بدون تقویت کننده به روش آزمایشگاهی تحت ترکیبی از بارهای مختلف پرداختند. تنی و یاماکی [۱۰] در سال ۱۹۷۰ پایداری الاستیک پوسته‌های مخروطی تحت بار محوری را با شرایط مرزی ساده و گیردار بررسی کرده‌اند. تنی [۱۱] در سال ۱۹۷۸ به مطالعه کمانش حرارتی پوسته‌ی مخروطی ناقص تحت بارگذاری حرارتی یکنواخت، به روش تحلیلی و با استفاده از معادلات دائل پرداخت. در سال ۱۹۸۰ چنگ و کتز [۱۲] کمانش پوسته‌های مخروطی تحت بار محوری با شرایط مرزی مناسب را بررسی کردند. در سال ۱۹۸۵ تنی [۱۳] کمانش پوسته‌های مخروطی ناقص را تحت اثر بارهای ترکیبی بررسی کرد. تانگ و ونگ [۱۴] در سال ۱۹۹۴ یک روش برای تحلیل کمانش پوسته‌های مخروطی لایه‌ای تحت بار محوری و فشار خارجی نشان دادند. رس [۱۵] ارتعاش و ناپایداری الاستیک پوسته‌های مخروطی ناقص را تحت فشار یکنواخت خارجی در سال ۱۹۹۵ بررسی کرد. در سال ۱۹۹۵ پارباتمونو و همکارش [۱۶] بار کمانش محوری پوسته مخروطی با شرایط مرزی مختلف را به روش نیمه تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. اسپگنولی [۱۷] در سال ۱۹۹۹ رفتار کمانش و پس کمانش و در سال ۲۰۰۱ [۱۸] موده‌های مختلف کمانش

در سال‌های اخیر به منظور کاهش هزینه‌های ساخت و همچنین کم کردن حجم ماشین‌آلات و سازه‌ها با حفظ کارایی و حتی بهبود آن و با پیشرفت روش‌های تولید، مواد با مقاومت بالاتر و سازه‌های با حجم و وزن کمتر مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. در این بین به علت کاهش ضخامت مواد مورد استفاده در ساخت سازه‌ها، پدیده کمانش بیشتر از گذشته اهمیت پیدا کرده است؛ زیرا با کاهش ضخامت، مقاومت کمانشی سازه کاهش پیدا کرده و در نتیجه معیار اصلی طراحی کمانش خواهد بود. در گذشته موارد زیادی اتفاق افتاده که در آن علت شکست سازه‌ها پدیده کمانش گزارش شده است. فروپاشی سیلوها، پل‌های درحال ساخت، سکوها نفتی و شکست سازه‌های هواپیما پیش از رسیدن به بار نهایی طراحی مثال‌هایی از این دست هستند. در ساخت سازه‌های هوایی با توجه به اینکه مسئله وزن اهمیت بسیار زیادی دارد ضرورت بررسی مسئله کمانش دوجندان می‌شود. در مورد این سازه‌ها در صورتی که طراح ضخامت سازه‌ها را بیش از حد در نظر بگیرد، منجر به افزایش وزن سازه می‌گردد. از طرفی، با کاهش ضخامت قطعات برای جلوگیری از افزایش غیر مجاز وزن سازه، مسئله کمانش حساس‌تر می‌شود و در نتیجه طراحی این نوع سازه‌ها ملزم به یک روند تکرار و سعی و خطا می‌باشد تا نقطه بهینه طراحی مشخص شود [۱].

سازه روتور به عنوان جزء لاینفک موتور توربین‌گازی هوایی یک نمونه از سازه‌های پیچیده است که اجزای آن تحت اعمال نیروهای مکانیکی ثابت و متغیر و گرا دیان دمایی بالا کار می‌کنند که انواع خرابی‌های سازه‌ای را در موتور سبب می‌شوند. یک موتور ممکن است دارای روتوری با چندین دیسک در کمپرسور و توربین باشد که وزن بالایی را به موتور تحمیل می‌کنند. روتورها برای حفظ یکپارچگی دارای الزامات سختگیرانه‌ای هستند و این اهمیت طراحی سازه روتور را نشان می‌دهد. واماندگی یک جزء روتور نظیر دیسک یا درام می‌تواند یک فاجعه مصیبت بار در پرواز باشد. اگر جزئی از روتور گسیخته شود می‌تواند به آسانی سازه موتور و بدنه هواپیما را شکافته و باعث آسیب مسافران یا سقوط هواپیما گردد. بررسی نتایج تحقیقات و گزارش‌های علمی منتشر شده معتبر، نظیر مقالات منتشر شده در مجلات علمی و ارایه شده در کنفرانس‌های تخصصی، کتب تخصصی توربین‌گاز هوایی و بررسی خرابی‌های سازه‌ای ایجاد شده در قسمت‌های مختلف موتورهای که منجر به خسارات مالی و جانی شده است حاکی از اهمیت موضوع طراحی سازه موفق روتور است. برای پیش‌بینی شکست ناشی از ناپایداری سازه‌ای، نیاز به نوشتن معادلات تعادل و حرکت برای سازه تغییر شکل یافته می‌باشد. تغییر شکل سازه روتور در اصل غیرخطی و پیچیده است، هرچند غالباً به منظور ساده کردن تحلیل، قابل خطی‌سازی می‌باشد. بررسی علل خرابی در موتورهای توربین‌گاز در اندازه‌ها و توان‌های

۳- شناسایی و روابط حاکم بر کماتش پوسته استوانه‌ای تحت فشار خارجی یکنواخت و بار حرارتی یکنواخت

شکل ۱ به صورت شماتیک نمایی برش خورده از هندسه درام مورد بررسی را به همراه ابعاد هندسی نشان می‌دهد. در شکل ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر مربوط به مدول الاستیسیته و ضریب انبساط طولی جنس سازه درام مورد بررسی برحسب دما قابل مشاهده است.

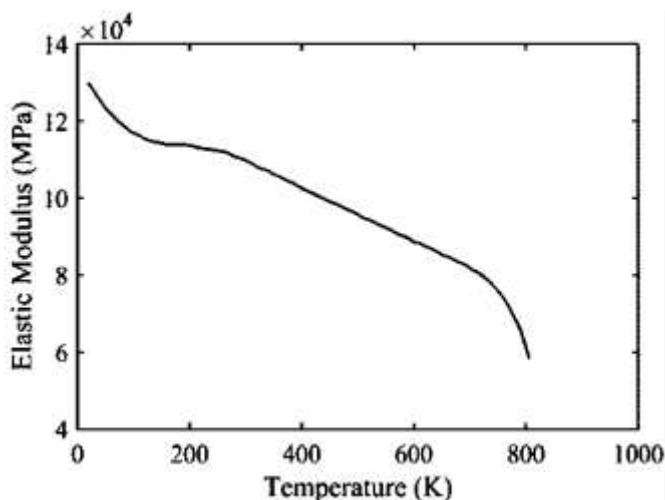


شکل ۱ نمای برش خورده متقارن و ابعاد سازه درام تقویت‌شده

در جدول ۱ برخی مشخصات ابعادی و خواص جنس سازه درام آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات درام مخروطی مورد بررسی

ضریب پواسون	چگالی ($\times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)	طول (mm)	شعاع انتها (mm)	شعاع ابتدا (mm)
۰/۳۱	۴/۴۲	۱۲۱	۹۱/۰۸	۶۵/۹۲



شکل ۲ تغییرات مدول الاستیسیته درام (آلیاژ Ti6Al4V - Annealed) بر حسب دما

پوسته‌های مخروطی تقویت شده توسط تقویت کننده‌های طولی تحت فشار محوری را از طریق تحلیل المان محدود بررسی کرده است. کارل و همکاران [۱۹] در سال ۱۹۹۹ کماتش پوسته مخروطی با دیواره ضخیم تحت فشار هیدروستاتیک خارجی مورد آزمایش قرار دادند. در سال ۲۰۰۱ بار کماتش پوسته مخروطی فلزی بدون تقویت کننده تحت بار محوری با استفاده از روش آزمایشگاهی توسط کریسانتوپولوس و همکارش [۲۰] مورد بررسی قرار گرفت. شکوری [۲۱] در سال ۲۰۰۲ حل تحلیلی مسئله کماتش پوسته مخروطی تحت بارگذاری فشاری محوری یکنواخت را انجام داد. در سال ۲۰۰۴ گلد فلد و آریوکس [۲۲] به مطالعه‌ی کماتش پوسته‌های مخروطی تقویت شده پرداختند. در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ پتل [۲۳-۲۵] به کمک روش نیمه تحلیلی کماتش پوسته‌های مخروطی ناقص تحت بارگذاری‌های پیچشی، فشار جانبی و فشار محوری را مطالعه نمود. تحلیل الاستیک-پلاستیک کماتش پوسته مخروطی فلزی بدون تقویت کننده برای اولین بار توسط بارچوت و همکارش [۲۶] در سال ۲۰۱۲ صورت گرفت. در سال ۲۰۱۲ شادمهری و همکارانش [۲۷] با استفاده از روش نیمه تحلیلی و بر اساس تئوری مرتبه‌ی اول برشی به مطالعه‌ی کماتش پوسته‌ی مخروطی تحت فشار محوری پرداختند. در سال ۲۰۱۴ پیش‌بینی بار کماتش پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی بایک مدل نیمه تحلیلی توسط کاسترو و همکارانش [۲۸] مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۱۴، زیرکیان و همکارش [۲۹] بارهای کماتشی پوسته مخروطی را با استفاده از روش برون‌یابی تعیین کردند. در سال ۲۰۱۸، ترقی و شوکتی [۳۰] رفتار کماتشی پوسته مخروطی فولادی تحت فشار خارجی یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۹، رضائی و مسعودی [۳۱] به بررسی ناپایداری پوسته‌های مخروطی با استفاده از درونیابی ترکیبی المان شش نقطه‌ای پرداختند. در سال ۲۰۲۰، بهلولی و همکاران [۳۲] ناپایداری دینامیکی پوسته مخروطی تقویت شده با پوشش کامپوزیتی را بررسی نمودند. در سال ۲۰۲۱، تائوفو و همکاران [۳۳] تحلیل ناپایداری پوسته‌های مخروطی کامپوزیتی محصور شده با بستر الاستیک را انجام دادند. در این تحلیل آنها از روش تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول استفاده کردند.

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل ناپایداری درام مخروطی تقویت شده در کمپرسور موتور توربینی هوایی تحت بارهای فشاری و حرارتی است. این درام عضو اصلی روتور در موتورهای توربینی پیشرفته کنونی است. حضور نیروی گریز از مرکز در سرتاسر درام دوار علاوه بر نیروهای آیرودینامیکی و بارهای حرارتی از جنبه‌های نوآوری این تحقیق است. حضور بارهای ترکیبی آیرودینامیکی، بارهای حرارتی ناشی از گرا دیان شدید حرارتی و بارهای بزرگ گریز از مرکز ناشی از دوران روتور و لحاظ ترکیب هم‌زمان این بارها در تحلیل پایداری درام دوار جنبه اصلی نوآوری این پژوهش است.

$$p_e a = \frac{(\bar{m}^2 + n^2)^2 D}{n^2 \frac{a^2}{\bar{m}^4}} \quad (4)$$

$$+ \frac{\bar{m}^4}{n^2 (\bar{m}^2 + n^2)^2} (1 - v^2) C$$

برای یافتن مقدار بحرانی، باید مقداری از m که به ازای آن رابطه ۴ به حداقل مقدار خود می‌رسد یعنی $m = 1$ اعمال شود.

$$p_e a = \frac{[(\pi a/L)^2 + n^2]^2 D}{n^2 \frac{a^2}{(\pi a/L)^4}} \quad (5)$$

$$+ \frac{(\pi a/L)^4}{n^2 [(\pi a/L)^2 + n^2]^2} (1 - v^2) C$$

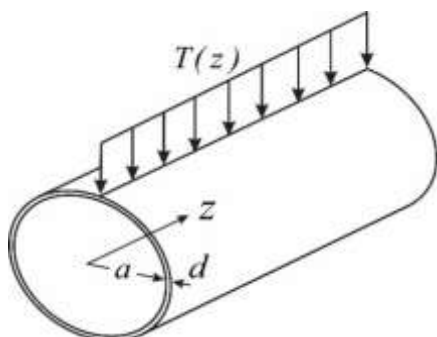
که در نهایت با جایگذاری روابط $C = Eh/(1 - v^2)$ و $D = Eh^3/[12(1 - v^2)]$ در معادله (۵)، معادله بار بحرانی از طریق رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$\frac{p_e a}{Eh} = \frac{[(\pi a/L)^2 + n^2]^2 (h/a)^2}{n^2 \frac{12(1 - v^2)}{(\pi a/L)^4}} \quad (6)$$

$$+ \frac{(\pi a/L)^4}{n^2 [(\pi a/L)^2 + n^2]^2}$$

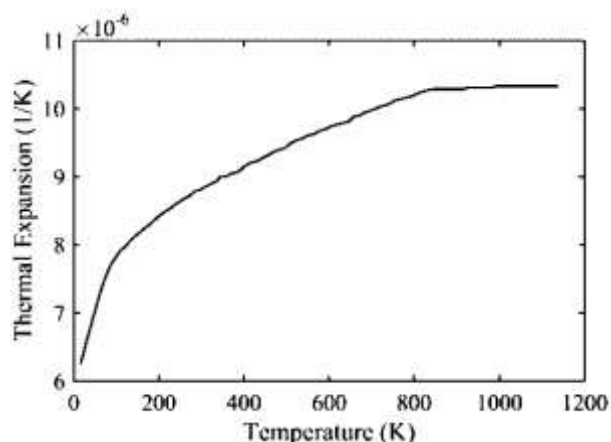
که در آن p_e فشار بحرانی، a شعاع سازه، E مدول الاستیسیته، L طول سازه، h ضخامت سازه، v ضریب پواسون و n ضریبی است که به ازای یک مقدار از آن p_e به مقدار حداقل می‌رسد.

در صورتی که سازه استوانه‌ای تحت بار حرارتی یکنواخت در راستای طول قرار بگیرد، می‌تواند منجر به کمناش سازه شود. شکل ۳ یک سازه استوانه‌ای تحت بار حرارتی یکنواخت محوری را نمایش می‌دهد.



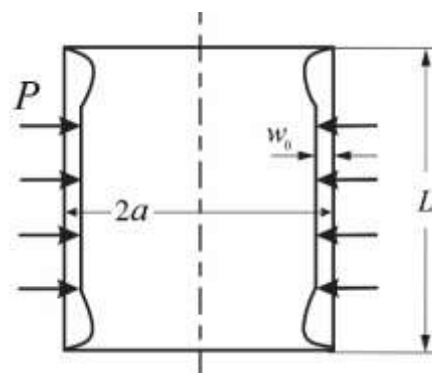
شکل ۵ نمای سازه استوانه‌ای تحت بار حرارتی یکنواخت محوری

بار کمناش برای سازه استوانه‌ای که تحت بار حرارتی مطابق شکل ۵ قرار گرفته، در واقع دمای بحرانی است که از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد [۳۵].



شکل ۳ تغییرات ضریب انبساط طولی درام (آلیاژ Ti6Al4V- Annealed) بر حسب دما

یک پوسته استوانه‌ای می‌تواند تحت فشار خارجی قرار بگیرد و به کمناش برسد. شکل ۴، یک سازه استوانه‌ای تحت فشار خارجی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ نمای سازه درام استوانه‌ای تحت فشار خارجی

معادله پایداری سازه استوانه‌ای تحت فشار خارجی یکنواخت به صورت رابطه (۱) می‌باشد [۳۴].

$$D \nabla^8 w + \frac{1 - v^2}{a^2} C w_{xxxx} + \frac{1}{a} P_e \nabla^4 (w_{\theta\theta}) = 0 \quad (1)$$

از آنجایی که تکیه‌گاه ساده مفروض می‌باشد، بنابراین شرایط مرزی به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$x = 0, l, \quad w = w_{xx} = 0 \quad (2)$$

رابطه (۱) یک معادله دیفرانسیل با ضرایب ساده می‌باشد که می‌توان جواب آن را به صورت رابطه (۳) در نظر گرفت.

$$w = C_1 \sin \bar{m} x \sin n \theta \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در معادله (۱) و اعمال شرایط مرزی، رابطه (۴) حاصل می‌شود.

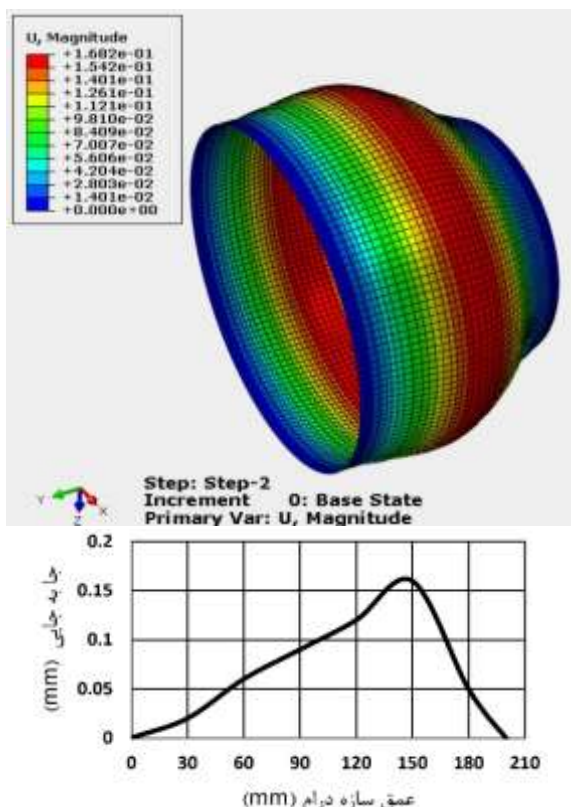
افزار نیز این نیرو به صورت فشار روی سطح هر یک از پایه‌ها (تقویت کننده‌ها) محاسبه و مدل شده است. این مقادیر پس از محاسبه در جدول ۴ آورده شده‌اند.

جدول ۳ مقادیر فشار خارجی در قسمت‌های مختلف درام

شماره بخش	مقدار فشار (atm)
۱	۱/۲
۳	۱/۵
۵	۲
۷	۳
۹ و ۱۱	۴

جدول ۴ مقادیر فشار حاصله از نیروی گریز از مرکز بر روی هر یک از تقویت کننده‌ها

شماره بخش	مقدار فشار (MPa)
۲	$4.32 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
۴	$3.12 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
۶	$2.57 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
۸	$2.1 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
۱۰	$1.63 \times 10^{-3} \text{ MPa}$



شکل ۶ نتیجه بارگذاری‌های مرحله اول تحلیل

در شکل ۶ چون مرحله اول تحلیل، استاتیکی تعریف شد، لذا فقط نتیجه اعمال بارگذاری‌های فشار خارجی و بار گریز از مرکز ناشی از دوران که باعث انبساط عرضی سازه شده، مشاهده

$$T_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3(1-v^2)}} \frac{d}{\alpha a} \quad (7)$$

که در آن d ضخامت سازه، α ضریب انبساط حرارتی، r شعاع سازه و v ضریب پواسون می‌باشد.

۴- مدل سازی و تحلیل کمانش درام دوار موتور توربینی

با توجه به روابط بیان شده برای پایداری سازه، شرایط مرزی به صورت لولا در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری‌های اعمال شده به سازه فشار خارجی، بارگذاری حرارتی و بار اینرسی ناشی از سرعت دورانی یعنی بار گریز از مرکز روی سازه هستند. در مدل سازی سازه در نرم افزار آباکوس دو مرحله که مرحله اول از نوع static general و مرحله دوم از نوع کمانش خطی هستند، تعریف می‌شوند. بارگذاری‌های فشار یکنواخت و سرعت دورانی در مرحله اول و بارگذاری حرارتی در مرحله دوم قرار می‌گیرند. پس از المان بندی مدل و درخواست انجام تحلیل در نرم افزار، نتایج به صورت شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ بدست می‌آیند.

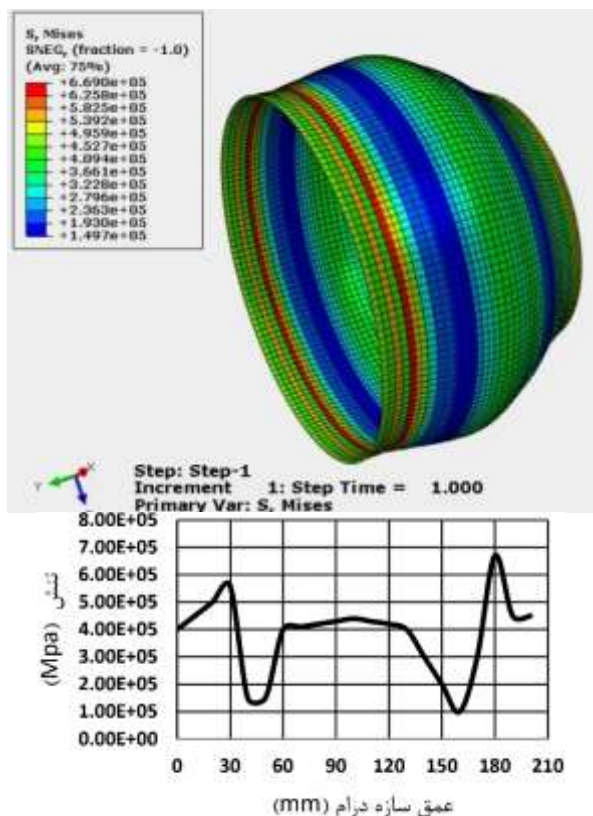
در جدول ۲، شرایط مرزی برای هر دو درام استوانه‌ای و مخروطی و نوع و اندازه المان مورد استفاده برای تحلیل المان محدود در نرم افزار، آورده شده است. در رابطه با اندازه انتخاب شده برای المان‌ها، این نکته حائز اهمیت است که این مقادیر بهینه شده هستند. در واقع پس از بررسی همگرایی المان‌ها، بهترین اندازه برای المان‌ها به صورت اعداد موجود در جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲ مشخصات المان‌ها و شرایط مرزی استفاده شده

درام	شرایط مرزی	نوع المان (shell)	اندازه تقریبی المان
استوانه‌ای	گیردار	Quad-dominated	۵
مخروطی	گیردار	Quad-dominated	۳

از آنجایی که مقدار دما در دهانه کوچک درام ۲۷۳ کلوین و در دهانه بزرگ ۴۰۰ کلوین می‌باشد، لذا برای بیان تغییرات حرارت در سرتاسر درام نیاز به تابع خطی $T(y) = 127 * \frac{y}{121} + 273$ وجود دارد. مقدار سرعت دورانی کل سازه $v = 3350 \text{ rad/sec}$ است. مقدار فشار خارجی در قسمت‌های مختلف سازه درام، در جدول ۳ با توجه به شکل ۱ آورده شده است. در جدول ۴ نیز مقادیر فشار اعمالی به تقویت کننده‌ها حاصل از نیروی گریز از مرکز ردیف‌های پره‌های درام آورده شده است. لازم به ذکر است که بخش‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ به علت آن که به عنوان پایه پره‌های موتور توربینی (تقویت کننده سازه) مدل شده‌اند، لذا خود نیروی گریز از مرکز پره‌ها بر روی این بخش‌ها وارد می‌شود. که مقدار این نیرو برای هر ردیف پره با توجه به ابعاد پره‌های آن ردیف متفاوت می‌باشد. در نرم

نتیجه تحلیل تنش سازه تحت کلیه بارگذاری‌ها در شکل ۹ قابل مشاهده است. انجام تحلیل تنش جهت محاسبه مقدار ضریب اطمینان انجام می‌شود. پس از انجام تحلیل تنش در نرم‌افزار و مقایسه مقادیر حداکثر تنش کاری و تنش مجاز مقدار ضریب اطمینان بیشتر از ۱ محاسبه می‌شود. بنابراین از لحاظ مقدار بارگذاری و ضخامت پوسته مشکلی وجود ندارد.



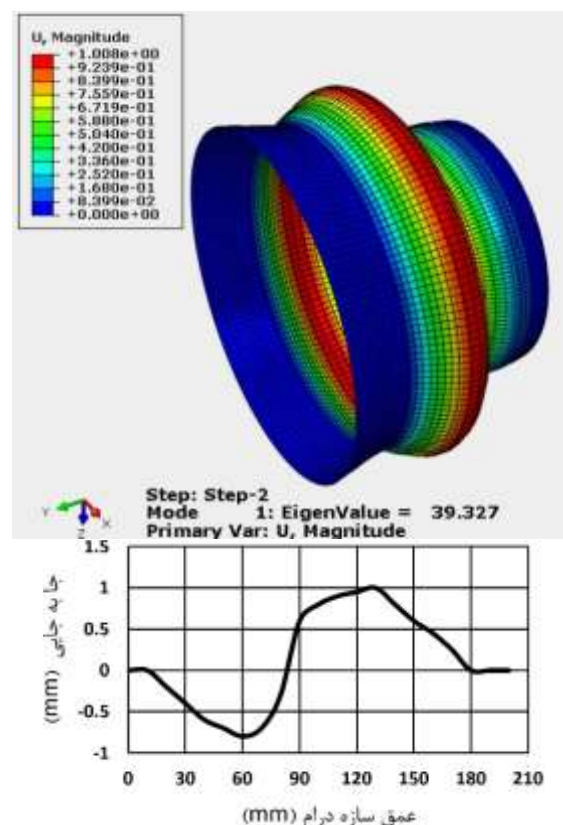
شکل ۹ نتیجه تحلیل تنش ناشی از کلیه بارگذاری‌ها

۵- صحت‌سنجی نتایج

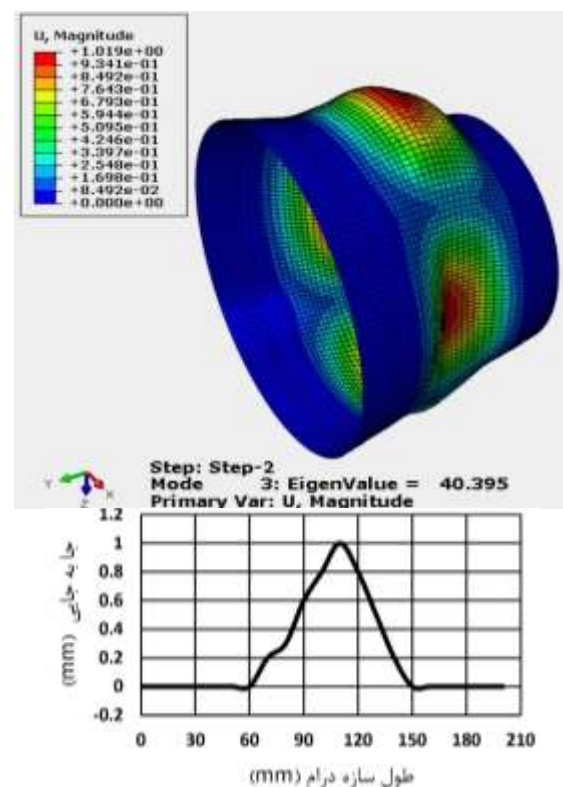
نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش در نرم‌افزار با استفاده از روابط مذکور، صحت‌سنجی می‌شوند. بدین صورت که به ازای مقادیر جداگانه بارگذاری‌ها صحت‌سنجی انجام می‌شود و از مجموع آن‌ها به صحت نتایج تحلیل اصلی پی‌برده می‌شود. با توجه به در دسترس بودن روابط کمانش پوسته استوانه‌ای و توجه به این که پوسته استوانه‌ای و مخروطی مشخصات هندسی نزدیک به یکدیگر دارند، می‌توان جهت صحت‌سنجی تحلیل، از پوسته استوانه‌ای استفاده کرد. جهت انجام این امر از مقادیر جدول ۵ استفاده می‌شود.

در صحت‌سنجی اول مقدار فشار خارجی ۴ مگاپاسکال به سطح خارجی درام اعمال می‌شود. در نرم‌افزار، تحلیل فقط در یک مرحله از نوع کمانش خطی انجام می‌گیرد. همانطور که در شکل ۱۰ می‌توان دید، مقدار ویژه‌ای که نرم‌افزار به عنوان ضریب

می‌شود. در شکل‌های ۷ و ۸ نتیجه تحلیل کمانش ناشی از اعمال تمامی بارگذاری‌های مذکور در مودهای ۱ تا ۳ نمایان است.



شکل ۷ نتیجه بارگذاری‌های مرحله دوم تحلیل کمانش در مود اول

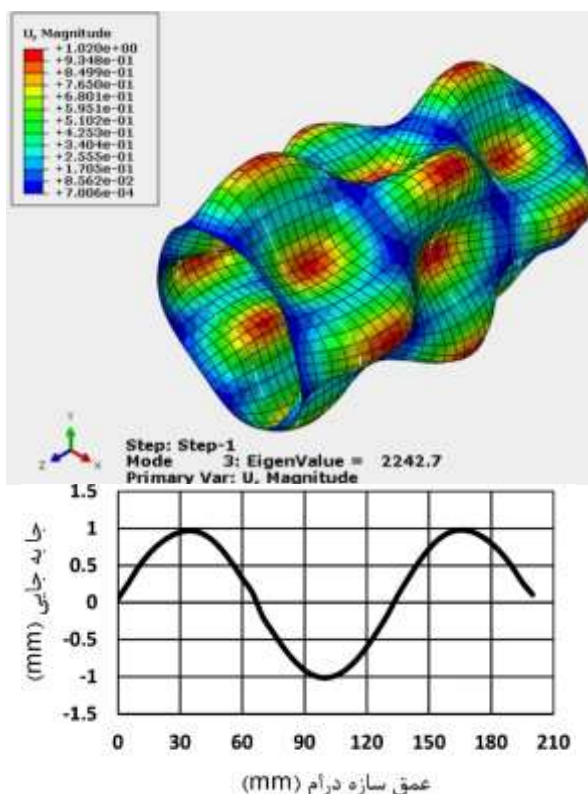


شکل ۸ نتیجه بارگذاری‌های مرحله دوم تحلیل کمانش در مود دوم و سوم

بار بحرانی کمانش ارائه می‌کند برابر $5/4$ است. بنابراین مقدار بار بحرانی برای این بارگذاری در رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

جدول ۵ مشخصات هندسی و جنس پوسته استوانه‌ای

شعاع (r)	۵۰ cm
ضخامت (d)	۲ cm
طول (L)	۲۰۰ cm
ضریب انبساط طولی (α)	$1.1 \times 10^{-5} (1/^\circ\text{C})$
ضریب پواسون (ν)	۰/۲۶
مدول الاستیسیته (E)	$2 \times 10^9 (Kg/S^2cm)$



شکل ۱۱ مقدار ویژه به ازای فشار محوری اعمالی ۲ مگاپاسکال

$$P_{cr} = P \times \lambda = 2 \times 2242 = 4484 \text{ Mpa} \quad (9)$$

از آنجاکه به واسطه بار فشاری محوری، تغییر طولی در سازه درام به‌وجود می‌آید، بنابراین از طریق تساوی روابط ۱۰ و ۱۱ می‌توان به مقدار دمای بحرانی سازه رسید.

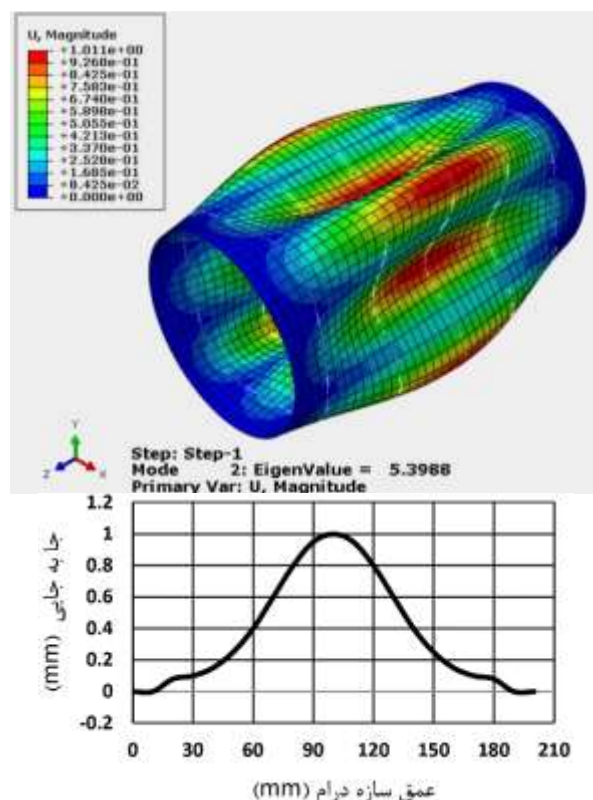
$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad (10)$$

$$P_{cr} = P \times \lambda = 2 \times 2242 = 4484 \text{ Mpa} \quad (11)$$

با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ مقدار دمای بحرانی محاسبه شده برای سازه درام مطابق رابطه ۱۲ می‌باشد.

$$\Delta T_{cr} = \frac{P_{cr}}{E\alpha} = \frac{4484}{2.2} = 2038^\circ\text{C} \quad (12)$$

دمای بحرانی کمانش که توسط رابطه ۷ و با مقادیر جدول ۴ محاسبه شده برابر با ۲۲۰۰ سلسیوس می‌باشد. نهایتاً با درصد خطای ناچیز ۷٪، می‌توان گفت نتایج نرم‌افزار قابل قبول می‌باشد. با توجه به اینکه رابطه ۷ برای محاسبه دمای بحرانی در حالت بارگذاری حرارتی ثابت استفاده می‌شود و بارگذاری حرارتی مسئله به صورت گرادیان خطی حرارتی است، لذا جهت استفاده از این رابطه در انجام این تحلیل، مسئله کمانش حرارتی (به صورت تک مرحله کمانش) یکبار با گرادیان خطی حرارتی و بار دیگر با حرارت ثابت میانگین گرادیان در نرم‌افزار تحلیل شد و طبق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج یکسانی حاصل شد.



شکل ۱۰ مقدار ویژه به ازای بار خارجی اعمالی ۴ مگاپاسکال

$$P_{cr} = 4 \text{ Mpa} \times 5.4 = 21.6 \text{ Mpa} \quad (8)$$

و بار بحرانی کمانش که توسط رابطه ۶ و با مقادیر جدول ۵ محاسبه شده برابر با ۲۱ مگاپاسکال می‌باشد. نهایتاً با درصد خطای ناچیز ۳٪، می‌توان گفت نتایج نرم‌افزار قابل قبول می‌باشد.

در صحت‌سنجی دوم برای بارگذاری حرارتی، مقدار فشار محوری ۲ مگاپاسکال به لبه‌های ابتدا و انتهای درام اعمال می‌شود و در نرم‌افزار تحلیل فقط در یک مرحله از نوع کمانش خطی انجام می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۱۱ پیدا است، مقدار ویژه‌ای که نرم‌افزار به عنوان ضریب بار بحرانی کمانش ارائه می‌کند برابر ۲۲۴۲ است. بنابراین مقدار بار بحرانی برای این بارگذاری در رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

۵- نتیجه گیری

جهت مشاهده تاثیر بارها بر روی کمانش سازه، ابتدا باید تاثیر هر یک از بارگذاری‌ها روی کمانش سازه مورد بررسی قرار بگیرد، سپس تاثیر چندین بار به صورت همزمان مشاهده گردد. بارگذاری‌های فشار خارجی و گرادیان حرارتی بیشترین میزان تاثیر را بر کمانش سازه دارند که البته تاثیر گرادیان حرارتی به مراتب بیشتر است. سرعت زاویه‌ای باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز شده که چون انبساط عرضی سازه می‌گردد، به سختی سازه کمک می‌کند و در نتیجه دارای مقدار ویژه کمانش منفی است و در واقع از کمانش سازه جلوگیری می‌کند. این بدان معنا است که در صورت نبود سرعت زاویه‌ای مقادیر ویژه کاهش پیدا می‌کردند.

از آنجا که رابطه ۷ برای توزیع بار حرارتی یکنواخت به کار برده می‌شود و در این تحقیق بار حرارتی به صورت گرادیان خطی روی سازه لحاظ شده، پس از بررسی و مقایسه دو حالت بارگذاری گرادیان خطی و میانگین بارگذاری گرادیان خطی به صورت ثابت در نرم‌افزار، این نتیجه حاصل شد که این دو حالت بارگذاری کاملاً مشابه بوده و منتج به یک مقدار ویژه می‌شوند.

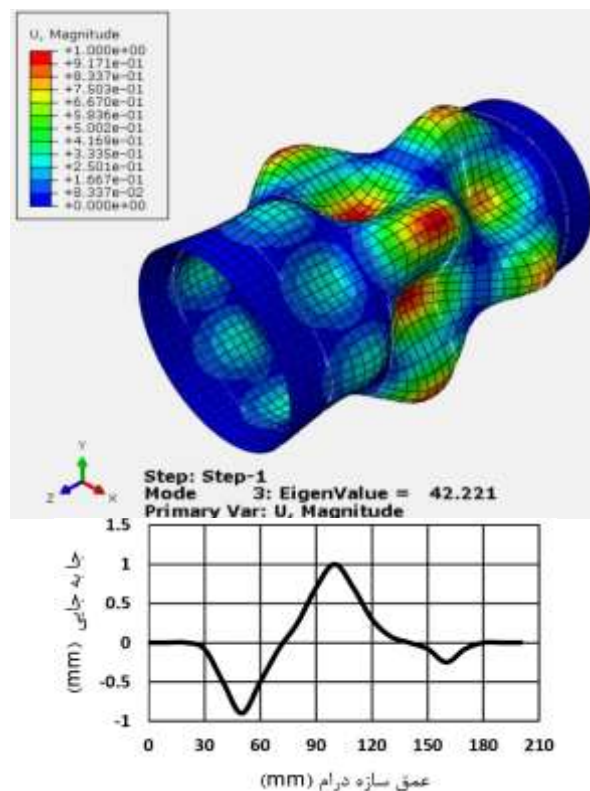
نحوه مدل‌سازی و تحلیل پوسته استوانه‌ای، باعث راحت شدن کار بر روی پوسته مخروطی شد. نتایج تحلیل نشان داد که در درام مخروطی تنش بحرانی ۷۱۰ مگاپاسکال است و ماکزیمم تنش کاری برابر ۶۶۰ مگاپاسکال است.

تشکر و قدردانی

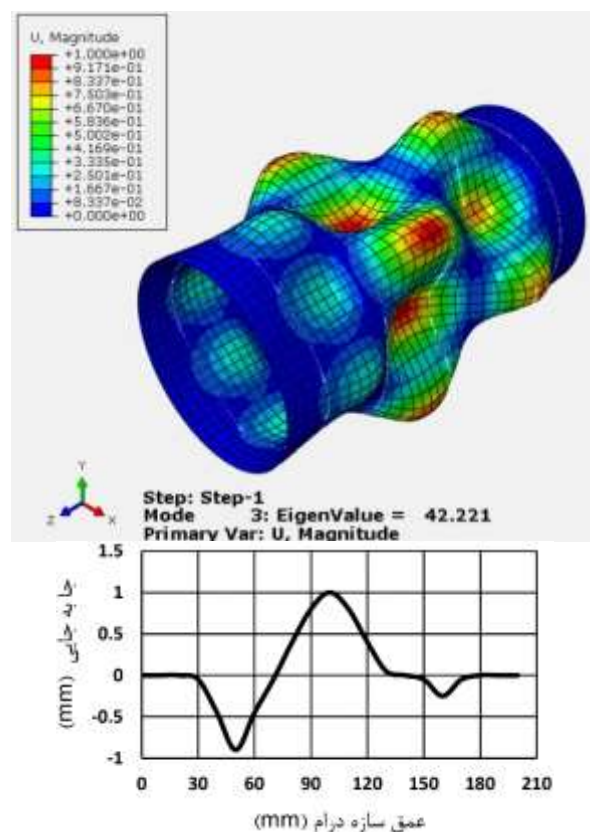
نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از کارشناس محترم مجله سرکار خانم شیما امینی ابراز می‌نمایند.

۶- مراجع

- [1] Ahmadi, M., Thermomechanical buckling analysis of composite cylindrical structures in linear elastic media by finite ring method, *Master Thesis, Shiraz University of Technology*, (1391). (In Persian).
- [2] Timoshenko, S. P., Gere, J. M., *Theory of Stability*, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, (1961).
- [3] Seide, P., Axisymmetric buckling of circular cones under axial compression, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 23, No. 4, pp. 625-628, (1956).
- [4] Seide, P., Buckling of circular cones under axial compression, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 28, No. 2, pp. 458-460, (1961).



شکل ۱۲ مقدار ویژه به ازای گرادیان حرارتی خطی محوری از صفر تا ۱۰۰ سلسیوس



شکل ۱۳ مقدار ویژه به ازای بار حرارتی سراسری ثابت ۵۰ سلسیوس

- conical shells under axial compression, *Engineering structures*, Vol. 21, No.9, pp. 845-55, (1999).
- [18] Spagnoli, A., Different buckling modes in axially stiffened conical shells, *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 8, pp.957-965, (2001).
- [19] Ross, C. T., Sawkins, D., Johns, T., Inelastic buckling of thick-walled circular conical shells under external hydrostatic pressure, *Ocean engineering*, Vol. 26, No. 12, pp. 1297-1310, (1999).
- [20] Chryssanthopoulos, M. K., Poggi, C., Collapse strength of unstiffened conical shells under axial compression, *Journal of constructional steel research*, Vol. 57, No. 2, pp. 165-184, (2001).
- [21] Shakoory, M., Investigation of buckling and free vibrations of conical shells connected by analytical method, *PhD Thesis, Sharif University of Technology*, Summer, (2014). (In Persian)
- [22] Goldfeld, Y., Arbocz, J., Buckling of laminated conical shells given the variations of the stiffness coefficients, *AIAA journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 642-649, (2004).
- [23] Patel, B. P., Shukla, K. K., Nath, Y., Thermal postbuckling analysis of laminated cross-ply truncated circular conical shells, *Composite Structures*, Vol. 71, No. 1, pp. 101-114, (2005).
- [24] Patel, B. P., Nath, Y., Shukla, K. K., Nonlinear thermo-elastic buckling characteristics of cross-ply laminated joined conical-cylindrical shells, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 16, pp. 4810-29, (2006).
- [25] Patel, B. P., Singh, S., Nath, Y., Postbuckling characteristics of angle-ply laminated truncated circular conical shells, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 13, No. 7, pp. 1411-1430, (2008).
- [26] Blachut, J., Ifayefunmi, O., Buckling of unstiffened steel cones subjected to axial compression and external pressure, *Journal of offshore mechanics and Arctic engineering*, Vol.134, No. 3, pp.1-9, (2012).
- [27] Shadmehri, F., Hoa, S. V., Hojjati, M., Buckling of conical composite shells, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 787-792, (2012).
- [28] Castro, S. G., Mittelstedt, C., Monteiro, F. A., Arbelo, M. A., Ziegmann, G., Degenhardt, R., Linear buckling predictions of unstiffened laminated composite
- [5] Singer, J., Buckling of circular conical shells under axisymmetrical external pressure, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 3, No. 4, pp. 330-9, (1961).
- [6] Weingarten, V., Morgan, E. J., Seide, P., Elastic stability of thin-walled cylindrical and conical shells under combined external pressure and axial compression, *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 3, 500-505., (1965).
- [7] Burns, A. B., Minimum-weight, hydrostatically compressed, ring-stiffened cones, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 3, No. 3, pp. 387-392, (1966).
- [8] Kornecki, A., Buckling of truncated conical shells under uniform static pressure, *AIAA Journal*, Vol. 5, No.11, pp. 2099-2101, (1967).
- [9] Berkovits, A., Singer, J., Weller, T., Buckling of unstiffened conical shells under combined loading, *Experimental Mechanics*, Vol. 7, No. 11, pp. 458-467, (1967).
- [10] Tani, J., Yamaki, N., Buckling of truncated conical shells under axial compression, *AIAA Journal*, Vol. 8, No. 3. pp.568-571, (1970).
- [11] Tani, J., Influence of axisymmetric initial deflections on the thermal buckling of truncated conical shells, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 48, No. (2-3), pp. 393-403, (1978).
- [12] Chang, C. H., Katz, L., Buckling of axially compressed conical shells, *Journal of The Engineering Mechanics Division*, Vol.106, No.3, pp. 501-516, (1980).
- [13] Tani, J., Buckling of truncated conical shells under combined axial load, pressure, and heating, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, No. 2, pp. 402-408, (1985).
- [14] Tong, L., Buckling load of composite conical shells under axial compression, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.61, pp. 718-719, (1994).
- [15] Ross, C. T., Vibration and elastic instability of thin-walled conical shells under external pressure, *Computers & structures*, Vol. 55, No.1, pp. 85-94, (1995).
- [16] Pariatmono, N., Chryssanthopoulos, M. K., Asymmetric elastic buckling of axially compressed conical shells with various end conditions, *AIAA journal*, Vol. 33, No.11, pp. 2218-2227, (1995).
- [17] Spagnoli, A., Chryssanthopoulos, M. K., Elastic buckling and postbuckling behaviour of widely-stiffened

- [32] Bohlooly M., Kouchakzadeh M.A., Mirzavand B., Noghabi M., Dynamic instability characteristics of advanced grid stiffened conical shell with laminated composite skins, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 488- 115572, (2020).
- [33] Fu T., Wu X., Xiao Z., Chen Z., Dynamic instability analysis of FG-CNTRC laminated conical shells surrounded by elastic foundations within FSDT, *European Journal of Mechanics*, pp. 85-104139, (2021).
- [34] Brush, D. O., Almroth, B. O., Hutchinson, J. W., *Buckling of bars, plates, and shells*, ASME, (1975).
- [35] Thornton, E. A., Thermal buckling of plates and shells, *Aerospace and Nuclear Engineering*.; Vol. 46, No. 10, pp. 485-506, (1993).
- cylinders and cones under various loading and boundary conditions using semi-analytical models, *Composite Structures*, Vol.118, pp. 303-315, (2014).
- [29] Ghazijahani, T. G., Zirakian, T., Determination of buckling loads of conical shells using extrapolation techniques, *Thin-Walled Structures*, Vol. 74, pp. 292-299, (2014).
- [30] Taraghi, P., Showkati, H., Investigation of the buckling behavior of thin-walled conical steel shells subjected to a uniform external pressure, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 43, No. 4, pp. 635-48, (2019).
- [31] Rezaiee-Pajand, M., Masoodi, A. R., Shell instability analysis by using mixed interpolation, *Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, No. 10, pp. 1-18, (2019).

بررسی اثرات سرعت لغزشی و پرش دمایی بر جریان درون میکروکانال

الیاس رستمی

دکتری مهندسی هوافضا، مدرس
دانشکده فنی و حرفه ای
علامه حسن زاده آملی، آمل

امید حبیبی

کارشناسی ارشد مهندسی
هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه
نصیرالدین طوسی، تهران

بهرام جلیلی*

استادیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه آزاد تهران
شمال، تهران

مقاله علمی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲

چکیده: میکروکانال مبدل حرارتی کوچک و کارآمدی است که با تلفیق ویژگی‌های نظیر ضریب انتقال حرارت بالا، حجم سیال مورد نیاز اندک و وزن و ابعاد کوچک، ابزار بسیار کارآمدی در زمینه مقاصد انتقال حرارتی است. در این مقاله، سرعت لغزشی و پرش دمایی بر جریان درون میکروکانال بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر عدد رینولدزی سرعت لغزشی سبب افزایش سرعت نزدیک دیواره شده، درحالی‌که باعث می‌شود سرعت ماکزیمم در خط مرکزی کاهش یابد. توزیع سرعت در میکروکانال (سرعت لغزشی) در مقایسه با جریان کوانتومی، پهن‌تر و پخته‌تر می‌گردد. سرعت در خط مرکزی (سرعت ماکزیمم) با افزایش سرعت لغزشی، در هر عدد رینولدزی کاهش می‌یابد. سرعت ماکزیمم در جریان توسعه یافته در حدود ۲۵ درصد با افزایش عدد ناسن تا ۰/۱، کاهش می‌یابد، اما این اثر بر روی رینولدزهای بالاتر، بیشتر است. در اعداد ناسن و پرش دمایی مختلف، افزایش سرعت لغزشی و پرش دمایی، اثرکاهشی بر روی دما در هر مقطع دارد. همچنین میکروکانال منحنی همانند میکروکانال مستقیم عمل می‌نماید. افزایش کسر حجمی نانوسیال، باعث افزایش عدد ناسن محلی در رژیم جریان لغزشی و رژیم جریان غیر لغزشی می‌شود.

واژه های راهنما: میکروکانال، سرعت لغزشی، پرش دمایی، مقیاس نانو، عدد ناسن.

Investigation of the effects of slip velocity and temperature jump on the internal flow at microchannel

Elyas Rostami

PhD in Aerospace
Engineering, Allameh
Hassanzadeh Amoli
University, Amol

Omid Habibi

MSc of Aerospace
Engineering, K.N.Toosi
University of
Technology, Tehran

Bahram Jalili*

Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Islamic
Azad University, North
Tehran Branch, Tehran

Abstract: Microchannel is a small and efficient heat exchanger which, by combining some features such as high heat transfer coefficient, low fluid volume required and small weight and dimensions, is a very efficient tool in the field of heat transfer purposes. In this article, the slip velocity and temperature jump on the internal flow of the microchannel are investigated. The results show that in each Reynolds number, the slip velocity increases the velocity near the wall, while decreasing the maximum velocity in the center line. The velocity distribution in the microchannel (slip velocity) becomes wider compared to the quantum flow. The velocity in the center line (maximum velocity) decreases with each Reynolds number as the sliding velocity increases. The maximum velocity during the developed flow decreases by about 25% as the Knudsen number increases to 0.1, but this effect is greater on higher Reynolds numbers. In Knudsen numbers and different temperature jumps, increasing slip velocity and temperature jump has a decreasing effect on the temperature at each section. Curved microchannel acts as a direct microchannel. Increasing the nanofluid volume fraction Increases the local Knudsen number at slip-flow and non-slip-flow regime.

Keywords: Microchannel, Slip Velocity, Temperature jump, Nano scale, Nusselt Number.

۱- مقدمه

زمینه‌ی میکرو و نانوسیال زمینه‌ی بسیار مهمی است که کاربردهای متعددی از جمله کارهای آزمایشگاهی، استخراج نفت، صنایع تصفیه، مسائل انتقال حرارت، صنایع کاغذسازی، روانکاری، پوشش سطح، علم مواد، علوم زیستی و غیره دارد. با توجه به این کاربردهای بسیار گسترده، دانشگاه‌های بسیار معتبر دنیا از جمله ام.آی.تی.^۱، کرنل^۲ و غیره اقدام به تاسیس آزمایشگاه مستقلی به همین نام نموده اند. حتی در برخی از کشورها مانند آلمان انستیتوی مستقلی به همین نام ایجاد گردیده است.

جریان لغزشی در میکروکانال‌ها در حالت کلی در حل معادلات بدست آمده از موازنه‌های سرعت و انرژی که معمولاً سرعت روی سطوح جامد، صفر و دما برابر دمای جامد فرض می‌شود، مورد بحث واقع می‌گردد. این فرض در حل معادلات به عنوان شرط مرزی در مسئله قرار داده می‌شود. اما استفاده از این شرایط همیشه درست نیست. هلمهولتز و ونیوتروسکیمشاهداتی درباره لغزش بین مایع و سطح جامد داشتند که بعدها بردمن نتایج آن‌ها را تایید نمود. ناویر در سال ۱۸۲۳ برای اولین بار به مدل کردن لغزش جزئی مایعات در دیواره جامد پرداخت که پس از آن ماکسول همین کار را در ۱۸۷۹ درمورد گازها انجام داد. در حضور سرعت لغزشی، سرعت در مجاورت جریان غیرصفر است و یک پرش دمایی نیز وجود دارد (اختلاف محدودی بین دمای دیواره‌ی جامد و دمای سیال در مجاورت جامد وجود دارد). سرعت غیر صفر جریان و پرش دمایی در مجاورت دیواره‌های جامد بیشترین اثرات هیدرودینامیکی و حرارتی هستند که می‌توانند در سیالی که جریان لغزشی برای آن صادق است، بررسی شوند. جریان لغزشی در میکروکانال‌ها ممکن است در دو مورد بررسی گردند: (۱) وقتی دیواره‌های میکروکانال در دمای ثابت و یکنواختی گرم می‌شوند (حالت دما ثابت). (۲) زمانی که دیواره‌های میکروکانال در شارحرارتی ثابت و یکنواختی گرم می‌شوند (حالت شار ثابت).

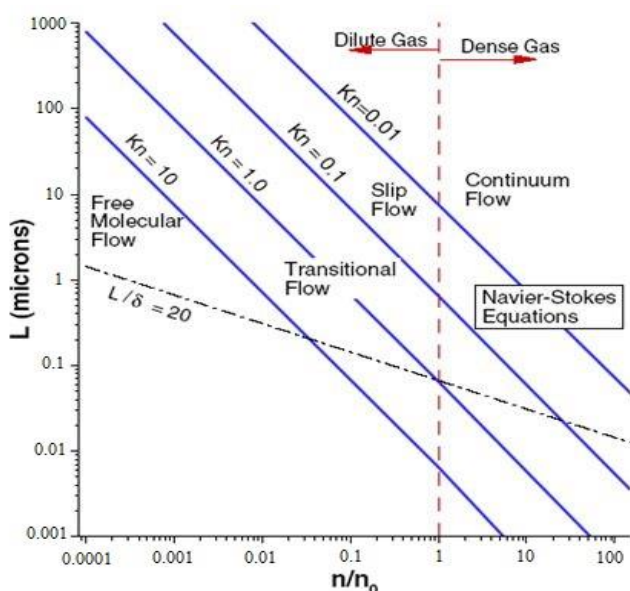
تحقیقات مختلفی بر روی میکروکانال‌ها تا به امروز صورت پذیرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مقالات مروری آقایان هو و تای [۱]، مورینی [۲]، استون [۳]، اسکویروزوکواک [۴]، استینک و کاندلیکار [۵]، رنکسیزبولوت و همکاران [۶]، هو و لی [۷]، کرای و همکاران [۸]، رزا و همکاران [۹]، شآو و همکاران [۱۰] اشاره کرد.

مورینی [۲] کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی را درمورد انتقال حرارت میکروکانال‌ها خلاصه‌بندی نمود. رزا و همکاران [۹] نیز کارهای عددی و آزمایشگاهی را درمورد انتقال حرارت تک‌فاز میکروکانال‌ها با تاکید بر روی اثرات مقیاس‌بندی، بازنگری و بیان نمودند. آن‌ها نتیجه‌گیری نمودند که نظریات کلاسیک انتقال حرارت و جریان سیال منطقی هستند ولی اثرات مقیاس‌بندی نیز باید در نظر گرفته شوند. سپس عبارات مناسبی را برای موضوع ذکر شده تحت شرایط مختلف طبقه‌بندی نمودند. در اوایل دهه ۱۹۸۰ اولین بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی انتقال حرارت میکروکانال‌ها صورت پذیرفت که می‌توان به تحقیقات و آزمایشات آقایان توکرمن و پیسی [۱۱]، هارمز و همکاران [۱۲]، مالا و لی [۱۳]، ژوو و همکاران [۱۴]، جودی و همکاران [۱۵]، هلدن و همکاران [۱۶]، وو و چنگ [۱۷]، لی و السن [۱۸]، هرنجک و تو [۱۹]، سیلوا و همکاران [۲۰]، وانگ و وانگ [۲۱] و الجنک و یانگ [۲۲] اشاره نمود. مطالعات و بررسی‌های روی جریان لغزشی براساس معادلات ناویر-استوکس و معادله انرژی است و جریان لغزشی در این معادلات به شکل شرط مرزی حضور پیدا می‌کند. این شرایط مرزی جدید، سرعت لغزشی و پرش دمایی را بیان می‌کنند. در واقع باید مشخص شود که سرعت جریان در مجاورت دیواره جامد صفر نیست و دما نیز در مجاورت دیواره، برابر با دمای دیواره نخواهد بود و هرکدام از این‌ها از رابطه‌ی خاصی پیروی می‌کنند. شرایط جریان لغزشی به وسیله مفهوم طول لغزش به‌خوبی قابل توضیح است. طول لغزش مسافتی در پشت سطح تماس است که در آن مقدار سرعت با برون‌یابی صفر می‌گردد. اندازه این طول، درجه لغزش و یا عدم لغزش را تعیین می‌نماید. طول لغزش به شماری از فاکتورها از قبیل فعل و انفعال سیال-سیال و دیواره-سیال، چگالی سیال، دمای سیستم و نرخ تنش تحمیلی و غیره بستگی دارد. در صورتی که مقدار طول لغزش صفر باشد، سرعت روی سطح جامد صفر شده و جریان بدون لغزش است و زمانی که طول لغزش بی‌نهایت شود، لغزش کامل اتفاق می‌افتد. در لغزش کامل سرعت در تمام سطح مقطع ثابت و برابر با سرعت میانگین است و بدین‌گونه می‌توان گفت جریان پلاگ رخ داده است. در صورتی که طول لغزش بین صفر تا بی‌نهایت باشد، لغزش جزئی رخ داده است. امروزه با پیشرفت تکنیک‌های ساخت و تولید قطعات در ابعاد میکرو، نیاز به روش‌های نوین در شبیه‌سازی سیالات در این ابعاد وجود دارد. در مقیاس‌های میکرو و نانو و با بالا رفتن عدد نادسن شاهد تغییرات چشمگیری در رفتار سیالات هستیم.

² Cornell¹ MIT

به کارگیری معادلات ناویر- استوکس نسبت به نتایج تجربی اختلاف زیادی از خود نشان می‌دهد و معادلات ناویر-استوکس دیگر صادق نیستند و لذا نمی‌توان از آن استفاده نمود و باید از معادلات جایگزین با دقت بالاتری استفاده کرد.

(۴) رژیم مولکولی آزاد یا رژیم گسسته: این رژیم عدد نادسن بزرگتر از ۱۰ را شامل می‌شود و در این رژیم دیگر نمی‌توان از فرضیات محیط پیوسته استفاده کرد. این رژیم در واقع دنیای گسسته سیالات است و از آن پس وارد گستره‌ی نانو می‌گردد. برای تحلیل جریان در این ناحیه، از روش‌های آماری استفاده می‌شود که یکی از سودمندترین آن‌ها روشی موسوم به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو بوده که توجه بسیاری از محققان را در زمینه حل عددی به خود جلب کرده است. این روش نیازمند توان محاسباتی بالایی است، به همین جهت این روش‌ها در دهه‌های اخیر با گسترش توان محاسباتی رایانه‌ها پرکاربرد شده‌اند. لازم به یادآوری است که روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو به دلیل دارا بودن ساختار کاملاً مولکولی علاوه بر تحلیل رفتار جریان سیال در رژیم گسسته، برای تمامی رژیم‌های دیگر نیز صادق است ولی کارایی این روش در جریان‌های با سرعت پایین به شدت کاهش می‌یابد. در شکل (۱) ناحیه‌های مختلف جریان بر حسب عدد نادسن مشاهده می‌گردد.



شکل ۱ تقسیم بندی رژیم‌های جریان با توجه به عدد نادسن

[۲۳]

تاوسکولچای و شولته [۲۴] به ساخت کانال‌های جریان برای سیستم‌های میکروسیالی پرداختند. ناصری و همکاران [۲۵] به بررسی شرایط جریان در میکروکانال‌ها پرداخته‌اند. هی و

خوشبختانه در میکرو ابزارهای موجود همواره عدد نادسن زیر ۱ است و لذا اکثر مواقع در رژیم جریان پیوسته و یا نهایتاً لغزشی هستیم و در کمتر مواردی به رژیم گذرا نزدیک می‌شویم. در رژیم‌های لغزشی همچنان معادلات ناویر- استوکس برقرار بوده ولی شرایط مرزی تغییراتی نسبت به حالت رژیم پیوسته دارد. در رژیم لغزشی شاهد شرط مرزی لغزشی سرعت و پرش دمایی می‌باشیم. تا چند دهه قبل جریان‌های گاز رقیق تنها در ارتفاعات بالا از سطح زمین دیده می‌شد ولی با پیشرفت علم مشخص شد که جریان‌های در مقیاس کوچک نیز دچار پدیده رقیقی گاز می‌شوند. در مقیاس‌های میکرو و نانو، میزان رقیقی سیال نسبت به مقیاس‌های ماکرو بسیار بیشتر است در نتیجه فرض پیوستگی معادلات سیال دیگر اعتبار ندارد و برای شبیه‌سازی جریان در مقیاس میکرو و نانو نیازمند روش‌های جدیدی است که بتوانند جریان‌های رقیق را نیز مدل نمایند. معیار تقسیم‌بندی جریان‌های مختلف، عدد نادسن است که برابر با تقسیم طول پویش آزاد مولکول‌های سیال بر طول مشخصه آن بوده و به صورت زیر قابل بیان است [۲۳]:

$$Kn = \frac{\lambda}{l} \quad (1)$$

عدد نادسن، عددی بی‌بعد می‌باشد که از نسبت مسافت آزاد میانگین مولکولی به مقیاس طول فیزیکی حاصل می‌شود. عدد نادسن به افتخار فیزیکدان دانمارکی مارتین نادسن، نامگذاری شده است. مقدار عدد نادسن مشخص‌کننده درجه‌ی رقیقی گاز و اعتبار فرض پیوستگی است. به کمک معیار عدد نادسن، رژیم‌های جریان را به ۴ دسته‌ی مجزا می‌توان تفکیک نمود.

(۱) رژیم پیوسته: تا زمانی که عدد نادسن بسیار کوچک باشد (معمولاً کوچک‌تر از ۰/۰۰۱) و یا به عبارت دیگر طول مشخصه سیستم در مقایسه با پویش آزاد مولکول‌ها بسیار بزرگ‌تر است، در رژیم پیوسته قرار داریم و رفتار سیال از روابط سیال در حالت پیوستگی (ناویر- استوکس) پیروی می‌نماید.

(۲) رژیم لغزشی: این رژیم در محدوده‌ی عدد نادسن بین ۰/۰۰۱ و ۰/۱ قرار دارد. در محدوده این رژیم اگرچه وارد رژیم نیمه پیوسته شده‌ایم اما معادلات ناویر- استوکس هنوز صادق‌اند و می‌توان از آن‌ها برای تحلیل رفتار جریان سیال به شرط آن‌که پدیده لغزش سیال روی دیواره‌ها و شرط مرزی پرش حرارتی نزدیک دیواره به درستی مدل شود، استفاده کرد. ولی نتایج به دست آمده از این روش‌ها در بعضی مواقع دقت مناسبی ندارند.

(۳) رژیم گذرا: در این رژیم عدد نادسن در محدوده بین ۰/۱ تا ۱۰ قرار داشته و در واقع حالت گذار از محیط پیوسته به محیط گسسته را نشان می‌دهد. در این رژیم، حل میدان جریان با

بنابراین معادلات حاکم همان معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی مرسوم هستند [۲۳].

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad \text{پیوستگی} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \right) \left(u^* u^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial y^*} \right) \left(u^* v^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \quad \text{مومنتوم در جهت } x \\ & = \left(- \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{1}{Re} \right) \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \right. \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} & \left. + \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^* \partial y^*} \right) \\ & \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \right) \left(u^* v^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial y^*} \right) \left(v^* v^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \\ & = \left(- \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right) \quad \text{مومنتوم در جهت } y \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} & + \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{1}{Re} \right) \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^* \partial y^*} \right) \\ & u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \\ & = \left(\frac{1}{Re Pr} \right) \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \\ & + \left[\left(\frac{Br}{Re Pr} \right) \left(2 \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + 2 \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right)^2 \right] \\ & - \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{Br}{Re Pr} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{انرژی} \quad (۵)$$

برای بی‌بعدسازی معادلات حاکم و شرایط مرزی از پارامترهای زیر استفاده گردیده است [۲۳].

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{u}{u_m}, v^* = \frac{v}{u_m}, x^* = \frac{x}{D_H}, y^* = \frac{y}{D_H} \\ Br &= \mu u_m^2 / k (T_i - T_w) \\ T^* &= (T - T_w) / (T_i - T_w), Kn = \frac{\lambda}{D_H}, \\ P^* &= (p - p_0) / \rho u_m^2, Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \\ Re &= \frac{\rho u_m D_H}{\mu} \end{aligned} \quad (۶)$$

میزان انتقال حرارت در قالب عدد ناسلت بیان می‌گردد. برای تعریف عدد ناسلت، ابتدا دمای میانگین سیال، T_m^* تعریف

همکاران [۲۶] توسط شبیه سازی عددی و آزمایش‌ها به بررسی اثرات مخرب و آسیب‌های ناشی از حباب‌های موجود در کانال‌های میکروسیال پرداختند. آن‌ها برای جلوگیری از تشکیل حباب، تأثیر عواملی چون ساختار داخلی کانال، ترشوندگی داخلی و سرعت جریان مایع را مورد مطالعه قرار دادند. دینکائو و همکاران [۲۷] کاربردهای جریان تپنده در سیستم‌های میکروسیال را توضیح می‌دهند. ریو و همکاران [۲۸] به مقایسه آماده سازی نانوذرات لیپیدی با تزریق در میکروسیستم‌های مختلف پرداختند. آن‌ها بیان نمودند که سیستم‌های میکروسیالی می‌توانند ابزار مفیدی برای تولید نانوذرات لیپیدی باشند. جابری و همکاران [۲۹] به مطالعه‌ی سیستم‌های میکروسیالی با محفظه‌های کشت سلولی جاسازی شده برای سنجش‌های بیولوژیکی با توان بالا پرداختند. پنگ و همکاران [۳۰] یک استراتژی ساده و کم هزینه برای ساخت میکروکانال‌ها بر روی بستر سیلیکون بر اساس نوشتن جوهر قلم با نشانگر مستقیم و حکاکی شیمیایی با کمک فلز گزارش کرده‌اند. استراتژی پیشنهادی برای ساخت میکروکانال، آسان و مقرون به صرفه است و ساختارهای میکروکانال‌ها برای توسعه برنامه‌های کاربردی دستگاه‌های میکروسیال و میکروسنسورها امیدوار کننده است. پینهو و همکاران [۳۱] به تجسم و اندازه گیری سلول‌های خونی جریان یافته در سیستم‌های میکروسیالی و رئولوژی خون پرداخته‌اند. آن‌ها بیان نمودند که با ترکیب ویژگی‌های منحصر به فرد همورولوژی و فناوری میکروسیالی برای تجزیه و تحلیل تک سلولی، می‌توان به پیشرفت‌های ارزشمندی در پزشکی برای درمان‌های جدید و رویکرد تشخیص دست یافت. وانگ و همکاران [۳۲] به مطالعه‌ی طراحی سطح داخلی میکروکانال‌های کاربردی برای کنترل جریان در مقیاس کوچک پرداختند. نیکشاد و همکاران [۳۳] به تحقیق در رابطه با پیشرفت‌های فناوری میکروسیال در زیست شناسی تولید مثل پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های میکروسیال باعث بهبود کارایی در کمک به تولید مثل می‌شود.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

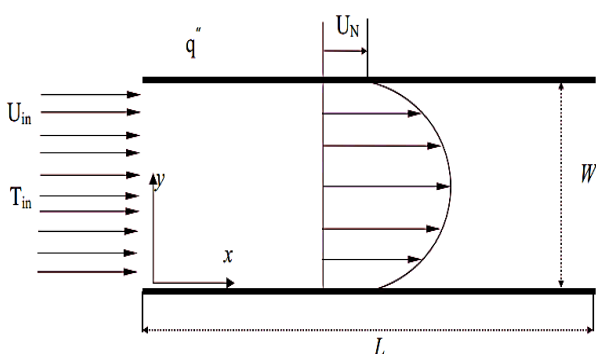
بر طبق آنچه که گذشت، در میکروکانال‌ها رژیم جریان به عدد نادسن که بیانگر میزان رقیقی سیال است، رجوع داده می‌شود. جریان لغزشی در $10^{-1} < Kn < 10^{-3}$ رخ می‌دهد و برای مدل کردن آن از معادلات ناویر-استوکس همراه با شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دمایی روی دیواره‌ها، استفاده می‌شود.

$$T^* = 1, u^* = 1 \quad (14)$$

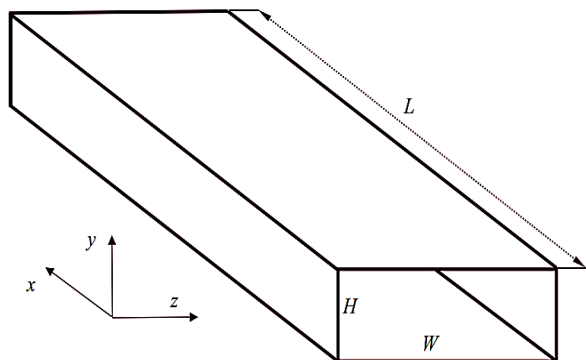
معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی گفته شده به روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری سازی شده اند [۳۶ و ۳۷]. برای حل همزمان کل معادلات حاکم، الگوریتم نیمه‌ضمنی سیمپلر [۲۳] استفاده شده است.

۴- میکروکانال مستقیم

در شکل‌های (۳ و ۲)، نمایی از ساختار و پروفیل سرعت میکروکانال مستقیم و در شکل‌های (۵ و ۴) نیز پروفیل و تغییرات سرعت بی‌بعد را برطبق معیارهای مختلف عدد ناسن و عدد رینولدز مشاهده می‌نماییم. در ادامه به بررسی جریان در میکروکانال پرداخته و تاثیرات سرعت لغزشی و پرش دمایی در آن را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۲ نمایی از میکروکانال مستقیم [۲۳]



شکل ۳ نمایی کلی از میکروکانال مستقیم [۲۳]

می‌شود که انرژی حرارتی متوسط سیال را مشخص می‌نماید [۲۳].

$$T_m^* = (\int u^* T^* dy^*) / \int u^* dy^* \quad (15)$$

حال با استفاده از درجه حرارت متوسط می‌توان عدد ناسلت را تعریف نمود [۳۴].

$$Nu_x = -(2 \frac{\partial T^*}{\partial y^*})_w / T_m^* \quad (16)$$

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از مدل ماکسول [۳۵] مطابق معادله زیر استفاده می‌گردد.

$$\begin{aligned} u_{slip}^* &= u_s^* - u_{wall}^* \\ &= -\left(\frac{2-\sigma}{\sigma}\right) Kn \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*}\right)_w \\ &\quad + \frac{3}{4} \frac{Kn^2}{4K_2^2 Br} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \left(\frac{\partial T^*}{\partial x^*}\right)_w \end{aligned} \quad (17)$$

عبارت دوم سمت راست معادله، بیانگر اثر خزش حرارتی بر روی لغزش سرعت در دیواره‌ها است. همچنین درمورد پرش دمایی از مدل اسمولوچوسکی استفاده می‌گردد [۲۳].

$$T_s^* = -2 k Kn \left(\frac{\partial T^*}{\partial y^*}\right)_w \quad (18)$$

$$k = \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(2 \frac{\gamma}{\gamma+1}\right) \left(\frac{1}{Pr}\right) \quad (19)$$

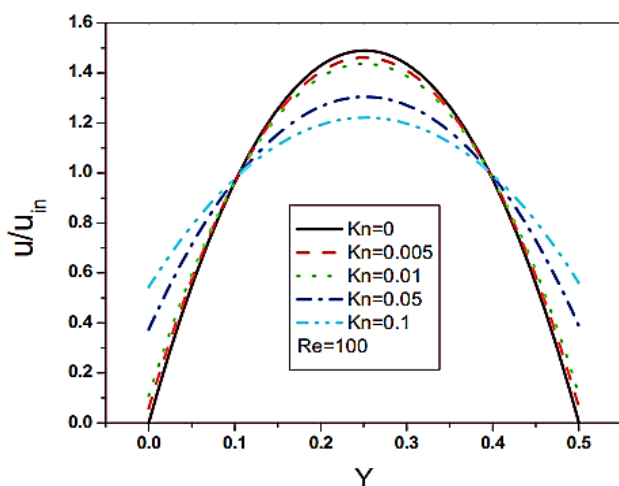
با توجه به تعریف پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته می‌توان شرط توسعه یافتگی هیدرودینامیکی در انتهای میکروکانال را به صورت زیر اعمال نمود [۲۳].

$$\left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*}\right)_{x^*=L} = 0, v^* = 0 \quad (20)$$

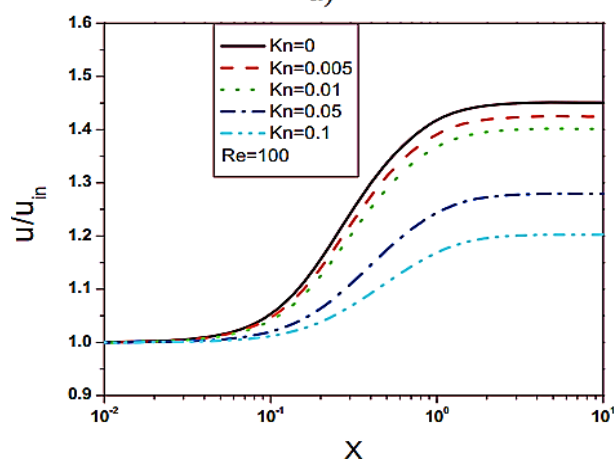
شرط مرزی تقارن در خط مرکزی میکروکانال به صورت رابطه زیر برقرار است [۲۳].

$$\left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*}\right)_{y^*=1/2} = 0, (v^*)_{y^*=1/2} = 0 \quad (21)$$

همچنین با توجه به یکنواخت بودن سرعت و دمای ورودی، شرایط مرزی در ورودی میکروکانال به صورت زیر است [۲۳].



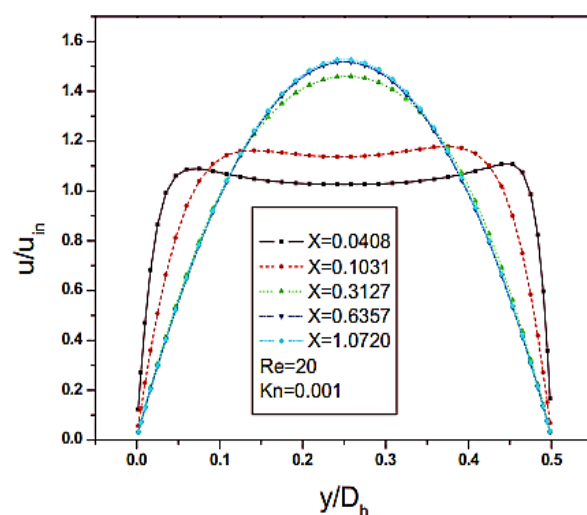
a)



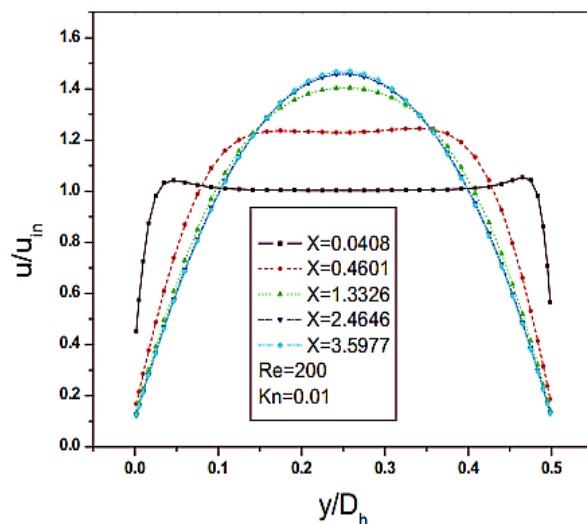
b)

شکل ۵ تغییرات سرعت بی بعد با عدد نادسن [۲۳]

در هر عدد رینولدزی سرعت لغزشی سبب افزایش سرعت نزدیک دیواره شده، درحالیکه باعث می شود سرعت ماکزیمم در خط مرکزی کاهش یابد. مشخص است که توزیع سرعت در میکروکانال (سرعت لغزشی) در مقایسه با جریان کوانتومی ($kn=0$)، پهن تر و پخت تر می گردد. سرعت در خط مرکزی (سرعت ماکزیمم) با افزایش سرعت لغزشی (افزایش kn)، در هر عدد رینولدزی کاهش می یابد. سرعت ماکزیمم در جریان توسعه یافته در حدود ۲۵ درصد با افزایش عدد نادسن تا ۰/۱، کاهش می یابد.



a)



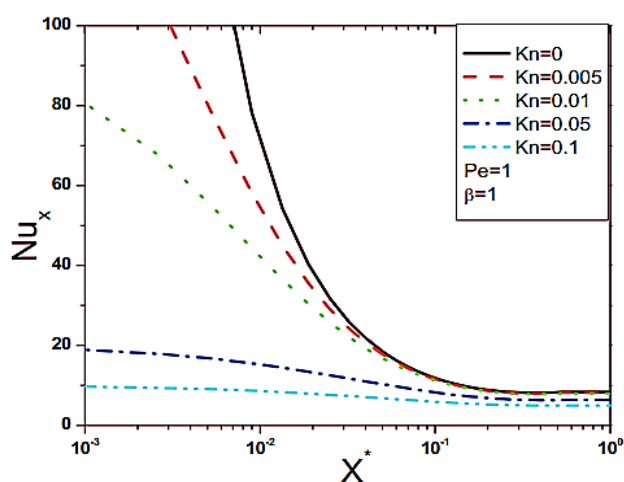
b)

شکل ۴ پروفیل سرعت بی بعد در

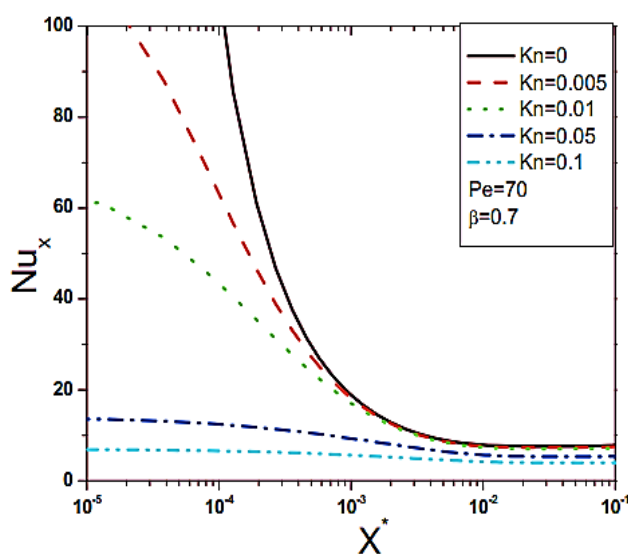
a) $Re=20$, $Kn=0.001$ and b) $Re=200$, $Kn=0.01$ [۲۳]

پروفیل سرعت در شروع میکروکانال دارای شیب زیادی در نزدیکی دیواره است و در مرکز به صورت یکنواخت در می آیند. با پیشروی در جهت x ، گرادیان سرعت نزدیک دیواره شروع به صاف شدن می کند تا به سرعت ماکزیمم در مرکز نزدیک می شود. شرایط توسعه یافتگی کامل برای $Re=20$ و $kn=0.001$ در $x=1.0720$ اتفاق می افتد. شرایط توسعه یافتگی کامل برای $Re=200$ و $kn=0.01$ در $x=3.5977$ اتفاق می افتد.

در شکل (۷) می‌توان تغییرات دمای بی‌بعد در خروجی میکروکانال را در اعداد نادسن و β های مختلف مشاهده نمود. در اعداد نادسن و پرش دمایی مختلف، افزایش سرعت لغزشی و پرش دمایی (افزایش Kn)، اثر کاهشی بر روی دما در هر مقطع دارد. اما این اثر زمانی که پرش دمایی بالا باشد (برای مقادیر کوچکتر $\beta = Pr(\gamma+1)/2\gamma$)، مشهودتر است. کاهش پرش دمایی (با افزایش β) تاثیر قابل توجهی بر روی دما در هر مقطع عرضی مختلف برای مورد ($Kn=0.01$) ندارد، اگرچه افزایش Kn ، سبب می‌شود دمای سیال نزدیک دیواره، کاهش یابد. در شکل (۸) نیز اثرات سرعت لغزشی با توجه به عدد ناسلت مشخص گردیده است.

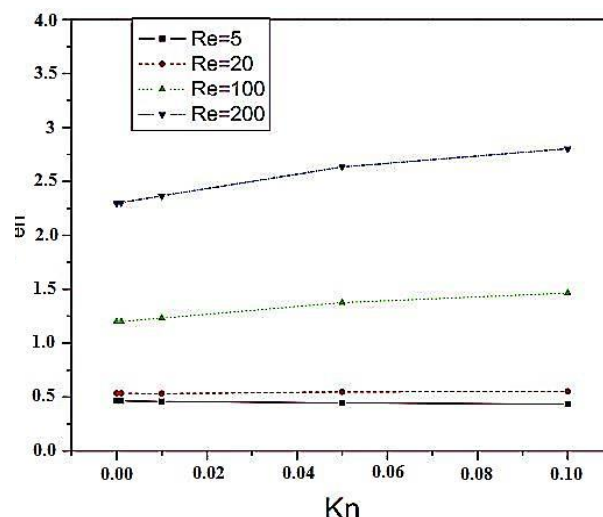


a)



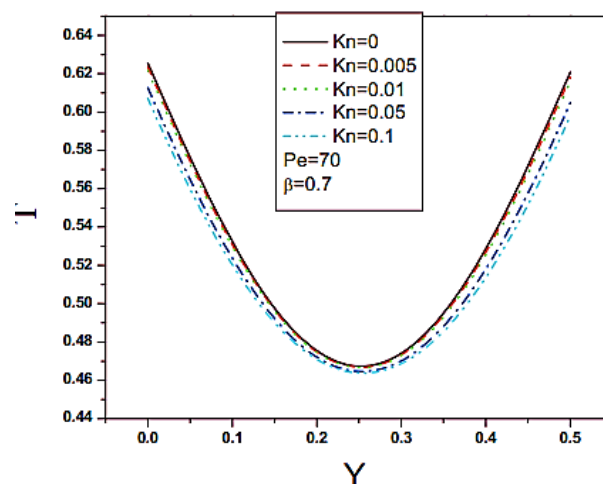
b)

شکل ۸ اثرات سرعت لغزشی بر روی عدد ناسلت
a) $Pe=1$, $\beta=1$ and b) $Pe=70$, $\beta=0.7$ [۲۳]

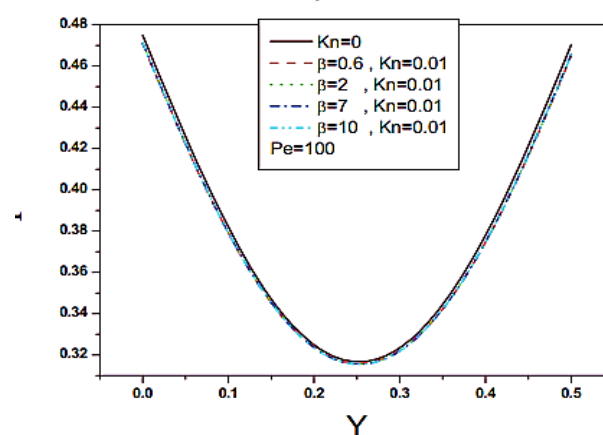


شکل ۶ اثر سرعت لغزشی بر روی طول ورودی بی بعد در رینولدزهای مختلف [۲۳]

شکل (۶) نشان می‌دهد که سرعت لغزشی اثر افزایشی بر روی طول ورودی در هر عدد رینولدزی دارد. اما این اثر بر روی رینولدزهای بالاتر، بیشتر است.



a)



b)

شکل ۷ تغییرات دمای بی‌بعد در خروجی [۲۳]

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad \text{پیوستگی (۱۵)}$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_r}{r \partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = \mu \left[\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{u_r}{r^2} \right) - \left(\frac{2}{r^2} \right) \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] - \frac{\partial P}{\partial r} \quad \text{در مومنوم جهت } r \quad (۱۶)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_\theta}{r \partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_r u_\theta}{r} \right) = \mu \left[\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{u_\theta}{r^2} \right) + \left(\frac{2}{r^2} \right) \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] - \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad \text{در مومنوم جهت } \theta \quad (۱۷)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_z}{r \partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{در مومنوم جهت } z \quad (۱۸)$$

$$\rho C_p \left(u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial T}{r \partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] \quad \text{انرژی (۱۹)}$$

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از معادله زیر استفاده می‌شود.

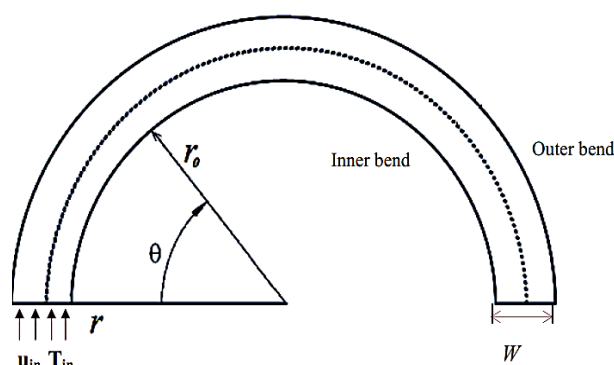
$$u_\theta = \left(\frac{2 - \sigma_u}{\sigma_u} \right) Kn D_h \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right)_w \quad (۲۰)$$

در مورد پرش دمایی نیز از مدل زیر استفاده می‌گردد.

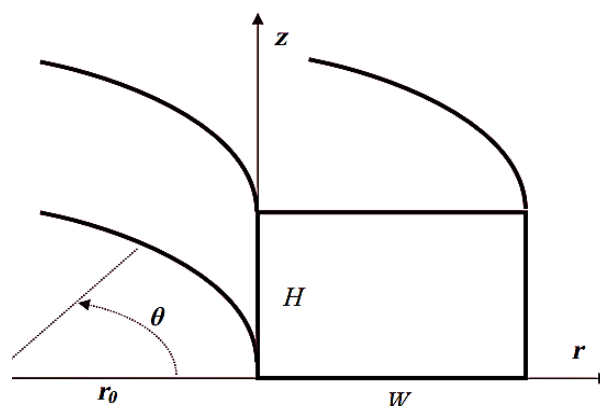
در جریان غیر لغزشی ($Kn=0$)، در نزدیک ورودی میکروکانال ($x=0$)، عدد ناسلت از یک مقدار بی‌نهایت شروع می‌شود و در ادامه به شدت افت می‌یابد تا به مقدار توسعه یافتگی کامل برسد ($Nu \propto \frac{\beta}{Kn} \xrightarrow{Kn \rightarrow 0} Nu \rightarrow \infty$). در حضور سرعت لغزشی و پرش دمایی، عدد ناسلت از یک مقدار متناهی شروع می‌گردد. افزایش سرعت لغزشی (افزایش Kn) و پرش دمایی (کاهش β) باعث افزایش پخش‌دگی (افقی شدن) نزدیک دیواره می‌گردد.

۵- میکروکانال منحنی

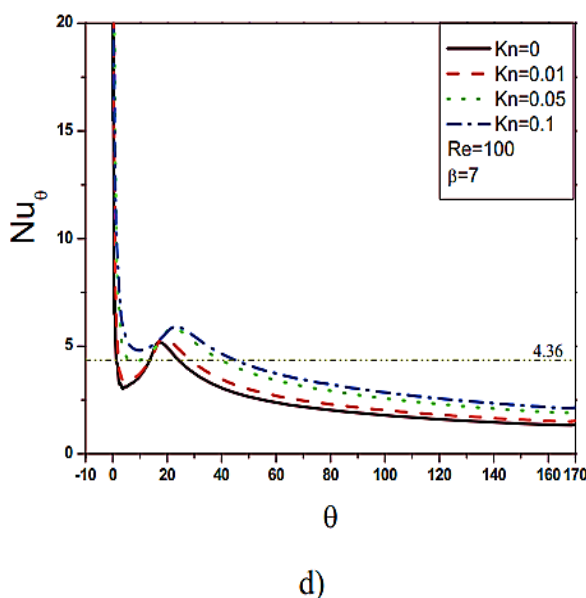
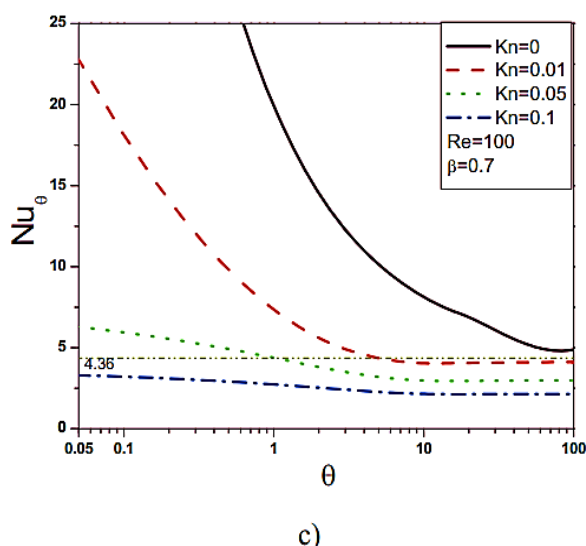
در شکل‌های (۹ و ۱۰)، نمایی از ساختار و پروفیل سرعت میکروکانال منحنی را مشاهده می‌نماییم. این نکته قابل ذکر است که باید فرم معادلات ناویر-استوکس و شرایط مرزی از مختصات کارتیزین به مختصات استوانه‌ای تغییر کند. در ادامه فرم معادلات در مختصات استوانه‌ای را نوشته و به بررسی جریان در میکروکانال پرداخته و تاثیرات سرعت لغزشی و پرش دمایی در آن را مشاهده می‌نماییم.



شکل ۹ نمایی از میکروکانال منحنی [۲۳]



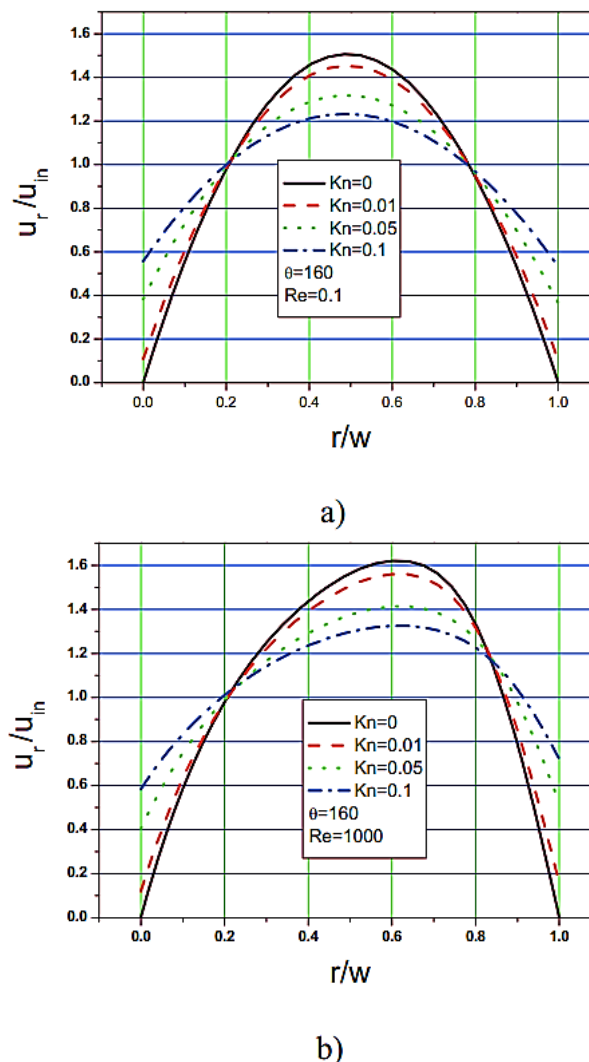
شکل ۱۰ نمایی کلی از میکروکانال منحنی [۲۳]



شکل ۱۲ عدد ناسلت محلی در ناسن های مختلف
[۲۳] c) Re=100, $\beta=0.7$ and d) Re=100, $\beta=7$

با توجه به شکل (۱۲) در می‌یابیم که اگرچه هم سرعت لغزشی و هم پرش دمایی با افزایش Kn ، افزایش می‌یابد ولی نتایج نشان می‌دهند که عدد ناسلت برای پرش دمایی بالا ($\beta=0.7$)، کاهش می‌یابد اما عدد ناسلت محلی با افزایش Kn برای پرش دمایی پایین ($\beta=7$)، افزایش می‌یابد. عدد $Nu=4.36$ برای جریان کاملاً توسعه یافته در کانال مستقیم می‌باشد. قابل ذکر است که عدد ناسلت کاملاً توسعه یافته در میکروکانال منحنی نزدیک ۴/۳۶ می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد که نیروی گریز از مرکز در میکروکانال منحنی اثر قابل توجهی بر روی انتقال حرارت ندارد.

$$T - T_w = \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \right) \left(2 \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \left(\frac{1}{Pr} \right) \times [Kn D_h \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_w] \quad (21)$$



شکل ۱۱ تغییرات پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته در میکروکانال منحنی با عدد ناسن (a) Re=0.1 and (b) Re=1000 [۲۳]

همانطوری که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد، در هر رینولدزی سرعت لغزشی باعث افزایش سرعت جریان نزدیک دیواره شده در حالیکه ماکزیمم سرعت جریان در خط مرکزی کاهش می‌یابد. توزیع سرعت در میکروکانال همراه با رژیم جریان لغزشی در مقایسه با رژیم جریان غیر لغزشی پیچیده‌تر شده است. نیروی گریز از مرکز تأثیری در پروفیل سرعت جریان برای $Re=0.1$ ندارد، اگرچه برای $Re=1000$ ، پروفیل سرعت جریان به سمت انحنای بیرونی تمایل پیدا می‌کند.

۶- نانوسیال در میکروکانال

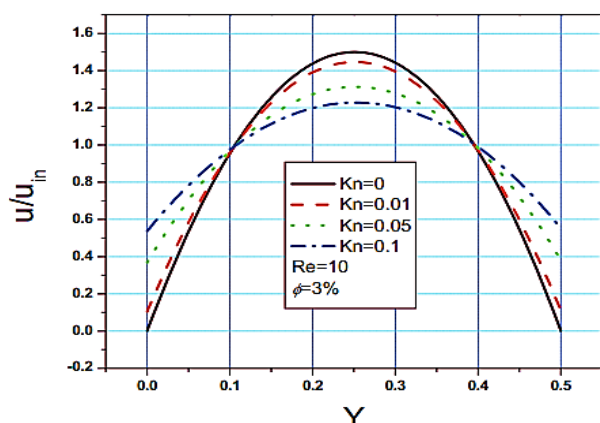
$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad \text{ظرفیت گرمایی نانوسیال (۲۷)}$$

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از معادله زیر استفاده می شود.

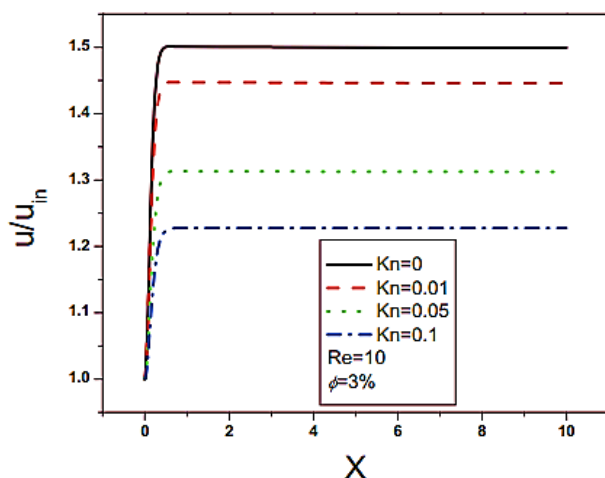
$$U = \left(\frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v}\right) Kn \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_w + \left[\frac{(3)Kn^2 Re}{2\pi Ec}\right] \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_w \quad (28)$$

در مورد پرش دمایی نیز از مدل زیر استفاده می گردد.

$$\theta - \theta_w = \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(2 \frac{\gamma}{\gamma + 1}\right) \left(\frac{1}{Pr}\right) [Kn \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)_w + \left(\frac{Kn^2}{2!}\right) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right)_w + \dots] \quad (29)$$



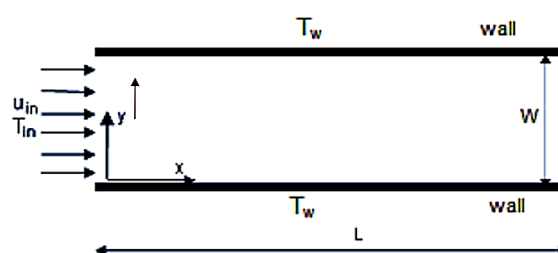
a)



b)

شکل ۱۴ تغییرات پروفیل سرعت بی بعد با عدد نادسن درکسر حجمی نانوذره ثابت و عدد رینولدز ثابت [۲۳]

در شکل (۱۳)، نمایی از ساختار و پروفیل سرعت میکروکانال را مشاهده می کنیم. این نکته قابل ذکر است که باید فرم معادلات ناویر-استوکس و شرایط مرزی برای نانو سیالات تغییر یابد. در ادامه فرم معادلات برای نانو سیالات را نوشته و به بررسی جریان در میکروکانال پرداخته و تاثیرات سرعت لغزشی و پرش دمایی در آن را مشاهده می نماییم. در جدول (۱) نیز برخی از مشخصات نانو ذره و سیال پایه آورده شده است.



شکل ۱۳ نمایی از میکروکانال [۲۳]

جدول ۱ خواص نانوذره و سیال پایه [۲۳]

آب	ذره نانو	خواص
۹۹۸/۲	۳۸۹۰	چگالی (kg/m³)
۴۲۴۰	۸۸۰	ظرفیت حرارتی (J/kg.K)
۰/۶۰۸	۳۵	هدایت حرارتی (W/mK)

$$X_i = \frac{x_i}{D_h}, U_i = \frac{u_i}{u_{in}}, P = \frac{P}{\rho_{nf} u_{in}^2}, \quad \text{پارامترهای بی بعد (۲۲)}$$

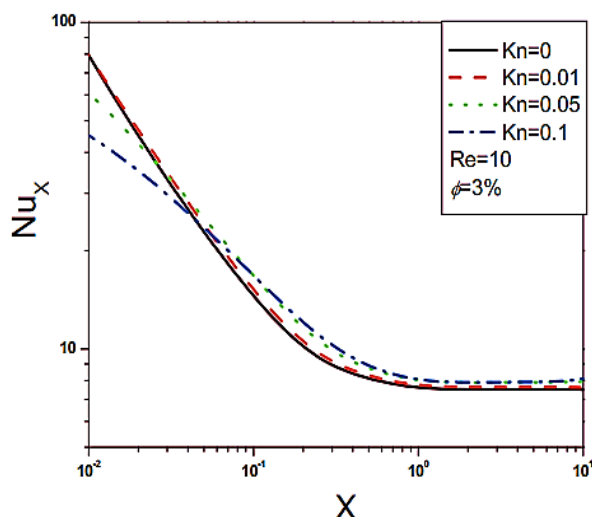
$$\theta = (T - T_{in}) / (T_{wall} - T_{in})$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial X_j} = 0 \quad \text{پیوستگی (۲۳)}$$

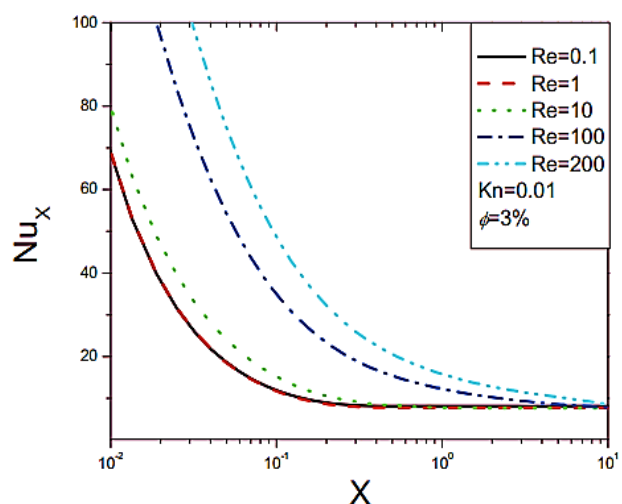
$$\left(\frac{\partial}{\partial X_j} U_i U_j\right) = \left(\frac{1}{Re_{nf}}\right) \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j^2} - \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad \text{مومنتم (۲۴)}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial X_i} U_i \theta\right) = \left(\frac{1}{Pe_{nf}}\right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial X_i^2} \quad \text{انرژی (۲۵)}$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_s \quad \text{چگالی نانوسیال (۲۶)}$$



c)

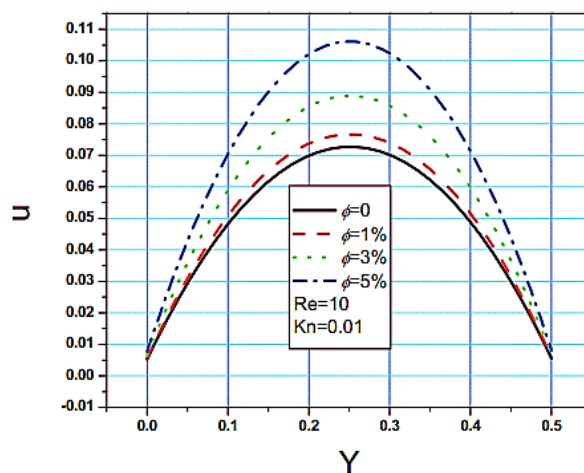


d)

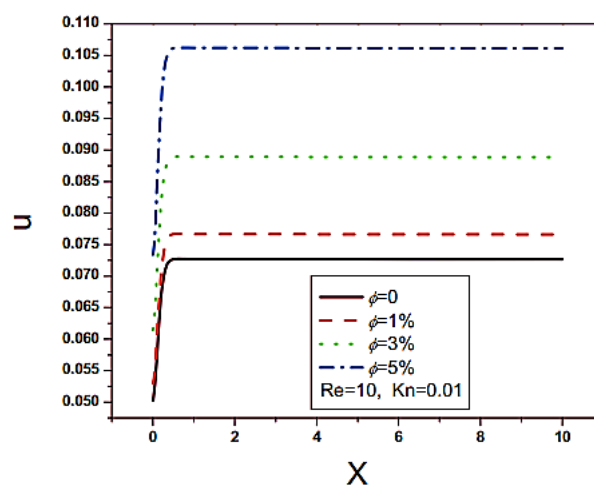
شکل ۱۶ تغییرات عدد ناسلت با عدد نادسن و عدد رینولدز در کسر حجمی نانوذره ثابت [۲۳]

طبق شکل (۱۶) افزایش سرعت لغزشی و افزایش پخش دمایی (افزایش Kn) در جریان نانوسیال، عدد ناسلت محلی را در شروع میکروکانال کاهش می‌دهد و سپس بعد از قسمت آغازین میکروکانال عدد ناسلت محلی افزایش می‌یابد. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت محلی می‌گردد.

در شکل (۱۴) تغییرات پروفیل سرعت بی‌بعد با عدد نادسن در کسر حجمی نانوذره ثابت و عدد رینولدز ثابت مشخص گردیده است و مشاهده می‌گردد که سرعت لغزشی تأثیری افزایشی بر روی سرعت نزدیک دیواره داشته در حالیکه سرعت ماکزیمم کاهش یافته است. پروفیل سرعت در رژیم جریان لغزشی در مقایسه با رژیم جریان غیر لغزشی پخش‌تر شده است.



c)



d)

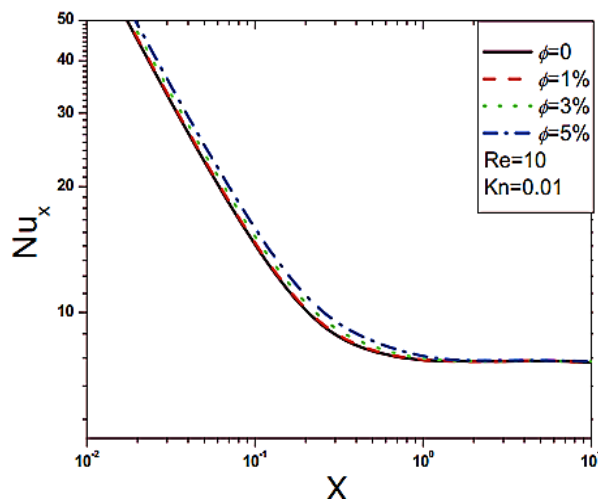
شکل ۱۵ تغییرات پروفیل سرعت با کسر حجمی نانوذره [۲۳]

طبق شکل (۱۵) در می‌یابیم که در یک عدد رینولدز ثابت، سرعت با افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ) افزایش پیدا می‌کند.

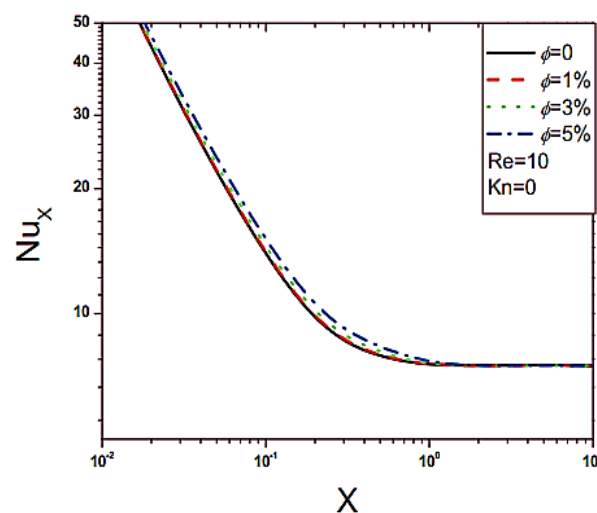
کاملی در مورد رفتار اجزاء وجود ندارد. یکی از مهمترین سیستمهای میکروسیستم، سیستم میکروسیالی است که نیاز به بررسی بیشتری دارد. اگرچه سیستم های ریزسیال در این کار مورد بررسی قرار گرفته است، هنوز جنبه های زیادی در این زمینه وجود دارد که ممکن است بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد. در ابتدا، به دلیل عدم انجام کارهای تجربی در این زمینه، مجبور شدیم از برخی فرض ها استفاده کنیم، که ممکن است برای کارهای بعدی نادیده گرفته شود. جریان سیال ممکن است به عنوان یک جریان قابل تراکم در نظر گرفته شود که برای جریان گاز مهم است. جریان ناپایدار سیال در میکروکانالها باید مورد مطالعه قرار گیرد. زبری سطح را می توان در نظر گرفت. خواص جریان در این کار ثابت فرض می شود، که ممکن است با برخی از مشخصه های جریان مانند دما و فشار متغیر در نظر گرفته شود.

در مقاله حاضر، جریان سیال و انتقال حرارت در سیستمهای میکروسیالی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جریان سیال در اکثر کاربردهای سیستمهای ریزسیال در حالت جریان لغزشی است که با سرعت لغزشی و پرش دمایی در دیوار مشخص می شود. جریان در دستگاههای ریزسیال، لغزش قابل توجهی را نشان می دهد. نتایج این تحقیق را می توان به صورت زیر بیان نمود:

- ۱- شرط سرعت لغزشی و پرش دمایی در میکروکانالها حاکم است.
- ۲- سرعت لغزشی سبب افزایش سرعت نزدیک دیواره شده در حالیکه باعث می شود سرعت ماکزیمم در خط مرکزی کاهش یابد.
- ۳- افزایش عدد ناسن، اثر کاهشی بر روی دما در هر مقطع دارد.
- ۴- افزایش سرعت لغزشی (افزایش Kn) و پرش دمایی (کاهش β) باعث افزایش پخشیدگی (افقی شدن) نزدیک دیواره می شود.
- ۵- سرعت لغزشی اثر افزایشی بر روی طول ورودی در هر عدد رینولدز دارد.
- ۶- در حضور سرعت لغزشی و پرش دمایی، عدد ناسلت از یک مقدار متناهی شروع می شود.
- ۷- میکروکانال منحنی همانند میکروکانال مستقیم عمل می نماید.
- ۸- در یک عدد رینولدز ثابت، سرعت با افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ) افزایش پیدا می کند.
- ۹- افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ) باعث افزایش عدد ناسلت محلی در رژیم جریان لغزشی ($Kn=0.01$) و رژیم جریان غیر لغزشی ($Kn=0$) می شود.
- ۱۰- استفاده از نانوسیال با Pr بالا (بالا Kn) و میکروکانال با سرعت لغزشی بالا (بالا Kn) باعث افزایش انتقال حرارت می گردد.



a)



b)

شکل ۱۷ تغییرات عدد ناسلت با کسر حجمی نانوذره

[۲۳] a) $Re=10$ and $Kn=0.01$ and b) $Re=10$ and $Kn=0$

طبق آنچه که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ)، باعث افزایش عدد ناسلت محلی در رژیم جریان لغزشی ($Kn=0.01$) و رژیم جریان غیر لغزشی ($Kn=0$) می شود. استفاده از نانوسیال یک راه خوب و کاربردی برای افزایش انتقال حرارت در میکروکانال است.

۷- نتیجه گیری

با توسعه علم و فناوری، پیاده سازی میکروسیستم ها در همه نوع فناوری به تعداد زیادی افزایش یافته است. اگرچه میکروسیستم ها به طور گسترده در فناوری ها استفاده می شوند، اما دانش

۸- فهرست علائم و اختصارات

۹- مراجع

علائم انگلیسی

a	پارامتر همرفت- انتشار
C_p	گرمای ویژه ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
d	قطر نانوذرات یا مولکول آب
D_h	قطر هیدرولیک (m)
f	ضریب اصطکاک فانیگ ($= \frac{2\tau_w}{\rho \bar{u}^2}$)
h	ضریب انتقال حرارت ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
k	هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
k_B	ثابت بولتزمن ($=1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/k}$)
Kn	عدد نادسن (λ/D_h)
L	طول میکروکانال (m)
Nu_x	عدد ناسلت محلی ($= \frac{h_x D_h}{k}$)
p	فشار (Pa)
P	فشار بی بعد
Po	عدد پوازیه ($f Re = \frac{2\tau_w D_h}{\mu \bar{u}}$)
Pe	عدد پکلت ($= Re Pr$)
Pr	عدد پرائتل ($= \frac{\mu C_p}{k}$)
q"	شار حرارتی ثابت
Re	عدد رینولدز ($= \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu}$)
T	دما
T^*	دمای بی بعد ($= \frac{k(T-T_{in})}{q'' D_h}$)
u	سرعت (m s^{-1})
U	سرعت بی بعد
W	عرض میکروکانال (m)
x, y	مختصات
X, Y	مختصات بی بعد
X^*	عدد گراتز متقابل ($= \frac{x}{D_h Pe}$)

علائم یونانی

γ	نسبت گرمای ویژه
θ	دمای بی بعد ($= \frac{T-T_{in}}{T_{wall}-T_{in}}$)
λ	مسیر آزاد متوسط (m)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (N s m^{-2})
ρ	چگالی (kg m^{-3})
σ_T	ضریب تطابق حرارتی
σ_V	ضریب تطابق مومنتم مماسی
τ_w	تنش برشی دیواره ($= -\mu(\frac{\partial u}{\partial y})_w$)
$\emptyset$	کسر حجمی جامد

زیرنویس ها

f	سیال پایه
fd	کاملاً توسعه یافته
i, j	شاخص های آرایه
in	شرط ورودی
nf	نانوسیال
s	نانوذرات جامد
wall	دیواره

- [1] Ho, C.-M. and Tai, Y.-C., Micro-electro-mechanical systems (MEMS) and fluid flow. Annu. Rev. Fluid Mech. 30, 579–612, (1998).
- [2] Morini, G. L., Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. International Journal of Thermal Sciences. 43, 631–651, (2004).
- [3] Stone, H.A., Stroock, A.D. and Ajdari, A., Engineering flows in small devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip. Annu. Rev. Fluid Mech. 36, 381–411, (2004).
- [4] Squires, T. M. and Quake, S. R., Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. Reviews of modern Physics. 77(3), 977–1026, (2005).
- [5] Steinke, M. E. and Kandlikar, S. G., Single-phase liquid friction factors in microchannels. International Journal of Thermal Sciences. 45, 1073–1083, (2006).
- [6] Renksizbulut, M., Niazmand, H., Tercan, G., Slip-flow and heat transfer in rectangular microchannels with constant wall temperature. Int. J. Therm. Sci. 45 (9), 870–881, (2006).
- [7] Hu, G. and Li, D., Multiscale phenomena in microfluidics and nanofluidics. Chemical Engineering Science. 62, 3443 – 3454, (2007).
- [8] Kraly, J. R., Holcomb, R. E., Guan, Q. and Henry, C. S., Review: Microfluidic applications in metabolomics and metabolic profiling. Analytica Chimica Acta. 653, 23–35, (2009).
- [9] Rosa, P., Karayiannis, T.G. and Collins, M.W., Single-phase heat transfer in microchannels: The importance of scaling effects. Applied Thermal Engineering. 29, 3447–3468, (2009).
- [10] Shao, N., Gavrilidis, A. and Angeli, P., Flow regimes for adiabatic gas–liquid flow in microchannels. Chemical Engineering Science 64, 2749–2761, (2009).
- [11] Tuckerman D.B., Pease F.W., High-performance heat sinking for VLSI. IEEE Electron Device Lett. EDL-2, 126–129, (1981).
- [12] Harms, T. M., Kazmierczak, M. J. and Gerner, F. M., Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels. International Journal of Heat and Fluid Flow. 20, 149–157, (1999).
- [13] Mala, Gh. M. and Li, D., Flow characteristics of water in microtubes. International Journal of Heat and Fluid Flow. 20, 142–148, (1999).
- [14] Xu B., Ooi K.T., Wong N.T. and Choi W.K., Experimental investigation of flow friction for liquid

- [27] Dincau, B., Dressaire, E. and Sauret, A., Pulsatile flow in microfluidic systems. *Small*, 16(9), p.1904032, (2020).
- [28] Riewe, J., Erfle, P., Melzig, S., Kwade, A., Dietzel, A. and Bunjes, H., Antisolvent precipitation of lipid nanoparticles in microfluidic systems—A comparative study. *International journal of pharmaceutics*, 579, p.119167, (2020).
- [29] Jaber, A., Monemian Esfahani, A., Aghabaglou, F., Park, J.S., Ndao, S., Tamayol, A. and Yang, R., Microfluidic Systems with Embedded Cell Culture Chambers for High-Throughput Biological Assays. *ACS Applied Bio Materials*, 3(10), pp.6661-6671, (2020).
- [30] Peng, Y., Jiang, S., Xia, L., Yin, X., Yu, B. and Qian, L., Direct ink writing combined with metal-assisted chemical etching of microchannels for the microfluidic system applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, p.112320, (2020).
- [31] Pinho, D., Carvalho, V., Gonçalves, I.M., Teixeira, S. and Lima, R., Visualization and measurements of blood cells flowing in microfluidic systems and blood rheology: A personalized medicine perspective. *Journal of Personalized Medicine*, 10(4), p.249, (2020).
- [32] Wang, S., Yang, X., Wu, F., Min, L., Chen, X. and Hou, X., Inner surface design of functional microchannels for microscale flow control. *Small*, 16(9), p.1905318, (2020).
- [33] Nikshad, A., Aghlmandi, A., Safaralizadeh, R., Aghebati-Maleki, L., Warkiani, M.E., Khiavi, F.M. and Yousefi, M., Advances of microfluidic technology in reproductive biology. *Life Sciences*, p.118767, (2020).
- [34] Hettiarachchi, H. D. M., Golubovic, M., Worek, W. M., and Minkowycz, W. J., "Three-Dimensional Laminar Slip-Flow and Heat Transfer in a Rectangular Microchannel with Constant Wall Temperature", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, No. 51, , pp. 5088-5096, (2008).
- [35] Maxwell, J. C., "On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Part 1, Vol. 170, , pp. 231-256, (1879).
- [36] Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, Henk Kaarle, (1955).
- [37] Patankar, S. V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publication Corporation, Washington, (1980).
- flow in microchannels. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. Vol. 27(8), 1165-1176, (2000).
- [15] Judy, J., Maynes, D. and Webb, B.W., Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45, 3477-3489, (2002).
- [16] Holden, M. A., Kumar, S., Castellana, E. T., Beskok, A. and Cremer, P. S., Generating fixed concentration arrays in a microfluidic device. *Sensors and Actuators B*. 92, 199-207, (2003).
- [17] Wu, H. Y. and Cheng, P., Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 46, 2519-2525, (2003).
- [18] Li, H. and Olsen, M. G., MicroPIV measurements of turbulent flow in square microchannels with hydraulic diameters from 200 μm to 640 μm . *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 27, 123-134, (2006).
- [19] Hrnjak, P. and Tu, X., Single phase pressure drop in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 28, 2-14, (2007).
- [20] Silva, G., Leal, N. and Semiao, V., Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: Velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29, 1211-1220, (2008).
- [21] Wang, H. and Wang, Y., Measurement of water flow rate in microchannels based on the microfluidic particle image velocimetry. *Measurement*. 42, 119-126, (2009).
- [22] El-Genk, M. S. and Yang, I.-H., Numerical analysis of laminar flow in micro-tubes with a slip boundary. *Energy Conversion and Management*. 50, 1481-1490, (2009).
- [23] Alireza Akbarinia, Simulation and Modeling of Microfluidic Systems, zur Erlangung des akademischen Grades, Vom Fachbereich für Physik, Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Bremen, (02. Juli 2012).
- [24] Thaweskulchai, T. and Schulte, A., A Low-Cost 3-in-1 3D Printer as a Tool for the Fabrication of Flow-Through Channels of Microfluidic Systems. *Micromachines*, 12(8), p.947, (2021).
- [25] Nasser, B., Akar, S. and Naseri, E., Microchannels for microfluidic systems. In *Biomedical Applications of Microfluidic Devices* (pp. 37-75). Academic Press, (2021).
- [26] He, X., Wang, B., Meng, J., Zhang, S. and Wang, S., How to Prevent Bubbles in Microfluidic Channels. *Langmuir*, 37(6), pp.2187-2194, (2021).

کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری در بهینه‌سازی نیروگاه بوشهر با رویکرد آنالیز اکسرژی برای اتصال آب شیرین کن

آزاده ناصر بگی

دانشجوی دکتری، دانشکده
مهندسی هسته‌ای، دانشگاه
شهید بهشتی، تهران

محمد باقر

محمد صادقی آزاد*

دانشیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه شهید مدنی
آذربایجان، تبریز

مهدی آقایی

استادیار،
دانشکده مهندسی هسته‌ای،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

فرزاد چوبدار رحیم

دانشجوی دکتری، دانشکده
مهندسی مکانیک، دانشگاه
صنعتی ارومیه، ارومیه

مقاله علمی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

چکیده: این پژوهش با هدف بهینه‌سازی ترمودینامیکی نیروگاه اتمی بوشهر با رویکرد آنالیز اکسرژی برای اتصال آب شیرین کن و تولید آب شیرین با حداقل هزینه ممکن انجام شده است. پس از آنالیز اکسرژی و تعیین منابع اتلاف از الگوریتم‌های فرا ابتکاری گرگ خاکستری و ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی سیستم استفاده شده است. عملکرد این الگوریتم‌ها در حل تابع راسترینگ ارزیابی گردیده و مسئله اصلی با الگوریتم برتر برای یافتن دماها و فشارهای بهینه حل شده است. سپس یک واحد آب شیرین کن تقطیر چند مرحله‌ای همراه با ترموکمپرسور با ظرفیت ۲۴۰۰۰ متر مکعب در روز به یکی از جریان‌های بهینه خروجی از توربین کم فشار متصل گردیده است. نتایج نشان دادند که بیشترین میزان برگشت ناپذیری با مقدار ۱۵۱۰/۵۰۰ مگاوات در ابتدا به راکتور و سپس با مقدار ۱۴۴/۵۰۰ مگاوات به ژنراتور بخار تعلق دارد. هزینه تولید آب شیرین نیز در شرایط بهینه نیروگاه ۱/۱۸۰ دلار به ازای هر متر مکعب می‌باشد.

واژه‌های راهنما: نیروگاه اتمی بوشهر، آب شیرین کن، اکسرژی، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم ازدحام ذرات.

Application of meta-heuristic algorithms in Bushehr nuclear power plant optimization with exergy analysis approach to couple a desalination plant

A.Naserbegi

PhD Student,
Department of Nuclear
Engineering, Shahid
Beheshti University,
Tehran

M.M.Sadeghi

Azad*

Associate Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani University,
Tabriz

M.Aghaie

Assistant Professor,
Department of Nuclear
Engineering, Shahid
Beheshti University,
Tehran

F.Choobdar Rahim

PhD Student, Department
of Mechanical
Engineering, Urmia
University of Technology,
Urmia

Abstract: This research has been carried out with the aim of thermodynamic optimization of Bushehr nuclear power plant with the approach of exergy analysis for the connection of desalination plant and the production of freshwater at the lowest possible cost. After exergy analysis and determination of destruction, gray wolf optimizer and particle swarm algorithms have been used to optimize the system. The performance of these algorithms in solving the Rastrigin function has been evaluated and the main problem has been solved with the superior algorithm to find the optimal temperatures and pressures. Then, a multi-stage distillation desalination unit with a Thermo vapor compressor with a capacity of 24,000 cubic meters per day has been connected to one of the outlet flows of the low-pressure turbine. The results showed that the highest rate of irreversibility and loss with 1510.50 MW belongs first to the reactor and then to 144.50 MW to the steam generator. The cost of producing fresh water in optimal conditions of the power plant is estimated at \$ 1.18 per cubic meter.

Keywords: Bushehr nuclear power plant, Desalination plant, Exergy, GWO, PSO.

۱- مقدمه

در آن یک چهارم متوسط جهانی است و تنها ۰/۳۴ درصد از آب-های موجود در جهان را در اختیار دارد. این بدان معناست که حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، برای تأمین نیازها آب کافی در اختیار نخواهد بود؛ بنابراین علاوه بر حفظ منابع آب شیرین موجود باید به فکر شیرین‌سازی آب‌های شور نیز بود [۸].

در سال‌های اخیر بسیاری از کشورهای جهان به انرژی هسته‌ای برای تأمین انرژی موردنیازشان جهت فرآیند شیرین‌سازی، روی آورده‌اند. در ایران نیز با توجه به بحران کمبود آب در ده سال آینده، تولید آب شیرین با استفاده از فناوری هسته‌ای امری ضروری محسوب می‌شود. در راستای نیل به این هدف توجه ویژه به نیروگاه اتمی بوشهر معطوف گردیده است. نیروگاه اتمی بوشهر اولین نیروگاه هسته‌ای ایران است که در جنوب کشور واقع شده است و با در نظر گرفتن نیاز مردم جنوب کشور به آب شیرین، شاید بتوان گفت که تولید آب شیرین با استفاده از این نیروگاه یکی از مهم‌ترین توانایی‌های این مرکز می‌تواند باشد [۹].

در زمینه اتصال واحدهای آب‌شیرین‌کن و به‌طور کلی اتصال واحدهای مصرف گرما به نیروگاه‌های اتمی و بهینه‌سازی ترمودینامیکی این نیروگاه‌ها تاکنون مطالعات فراوانی صورت گرفته است. در یک پژوهش انصاری و همکارانش یک نیروگاه PWR اسمی را با اتصال واحد آب‌شیرین‌کن با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز مورد آنالیز و تحلیل اکسرژی قرار داده‌اند و با بهینه‌سازی ترمودینامیکی منابعی که موجب تخریب انرژی و افزایش هزینه سیستم می‌شود را تخمین زده‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش کارایی و کاهش تخریب در یک سیستم ترمودینامیکی منوط به افزایش هزینه نهایی سیستم خواهد بود [۱۰]. در سال ۲۰۲۰ ویلدینگ و همکارانش بهینه‌سازی چندهدفه را برای حل مسئله افزایش راندمان در فرآیند طراحی یک نیروگاه هسته‌ای PWR ارائه دادند و با استفاده از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک راندمان نیروگاه را از ۳۴/۸۱۰ به ۳۵/۶۳۰ ارتقا دادند [۱۱]. در تحقیقی دیگر ابراهیم گل و همکارانش به بهینه‌سازی اکسرژی راکتور WWER-1000 با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته‌اند. آن‌ها برای جست‌وجوی مقادیر مطلوب الگوریتم ژنتیک، الگوریتم وال و الگوریتم ازدحام ذرات را به کار گرفته‌اند و منابع تخریب اکسرژی را تعیین کرده‌اند. روش ارائه‌شده توسط آن‌ها بازده نیروگاه اتمی را از ۳۳/۶۶۰ درصد به ۳۶/۴۲۰ درصد ارتقا داده است [۱۲].

در اغلب مطالعات موجود سهم ارزیابی اقتصادی در بهینه‌سازی و تولید آب شیرین بسیار محدود بوده و یا مورد توجه قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر ابتدا تحلیل انرژی و اکسرژی با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای نیروگاه هسته‌ای بوشهر توسط کد نویسی در نرم‌افزار متلب انجام شده است. سپس بهینه‌سازی سیستم با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان یک الگوریتم نوین در بهینه‌سازی اکسرجتیکی اجرا گردیده است. پس از مشخص شدن دما و فشار بهینه جریان‌های نیروگاه یک واحد آب‌شیرین‌کن MED-TVC با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز به آن متصل شده و هزینه تولید آب شیرین با استفاده از شبیه‌ساز آنالیز اقتصادی قدرتمند DEEP5.1 در

روند بسیار فزاینده مصرف انرژی در دنیای کنونی به‌ویژه در بخش برق مشکلات عدیده‌ای را در طی سال‌های اخیر ایجاد کرده است. حساسیت‌های جهانی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تلاش برای حفظ محیط‌زیست، منجر به استفاده گسترده از سایر منابع غیر فسیلی تولید برق همچون انرژی هسته‌ای شده است [۱، ۲]. از میان منابع آبی تأمین برق، انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک روش تولید انرژی با انتشار در حد صفر گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان شناخته شده است که علاوه بر این مزیت دارای ویژگی‌هایی همچون تأمین مقدار بسیار چشمگیری از انرژی الکتریکی با مصرف سوخت بسیار ناچیز و اطمینان دسترسی به منبع سوخت می‌باشد که به‌عنوان یک گزینه مناسب در کنار سایر منابع تأمین برق در دهه‌های آتی مدنظر قرار خواهد گرفت [۳، ۴].

در کشور ما با توجه به اهمیت استراتژیک انرژی هسته‌ای و هزینه بالای چرخه سوخت هسته‌ای، بهینه‌سازی و مدیریت مصرف این انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. احداث تأسیسات تولید انرژی الکتریکی از طریق نیروگاه‌های هسته‌ای نیاز به هزینه‌های زیادی دارد. هزینه‌های سوخت برای نیروگاه‌های هسته‌ای جزئی از کل هزینه‌های تولید هستند و به‌طور کلی میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت برای این نیروگاه‌ها، به دلیل بالا بودن هزینه تولید سوخت برای کشور ما بیشتر از نیروگاه‌هایی است که با سوخت فسیلی کار می‌کنند. از این رو کاهش مصرف انرژی الکتریکی به میزان فراوانی در حفظ و بقاء سرمایه‌های ملی به‌ویژه در بخش هسته‌ای مؤثر است [۵].

نیروگاه‌ها به‌عنوان یکی از عرصه‌های مهم تولید انرژی برق و یکی از محورهای عمده توسعه در جوامع در دوران معاصر محسوب می‌گردند و چنانچه در فرآیند طراحی، تولید و بهره‌برداری آن‌ها ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی موردتوجه قرار نگیرد نقش تخریبی آن‌ها بر جامعه بیش از نقش سازندگی آن‌ها خواهد شد. با توجه به حجم بالای انرژی تبدیل یافته و درصد بالای تلفات انرژی در نیروگاه‌ها، اگر بتوان راندمان نیروگاه‌ها را افزایش داد، صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در سوخت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی به عمل خواهد آمد [۶].

تجهیز نیروگاه‌ها برای بالا بردن راندمان و همچنین کاهش هزینه‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل وزارت نیرو در شاخه تولید می‌باشد. در این راستا روش انتگرالسیون فرآیندها به بررسی اثر متقابل فرآیندها و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر و بر کل سیستم، می‌پردازد. به کمک چنین تکنیک‌هایی می‌توان سیستم‌های انرژی از جمله نیروگاه‌های حرارتی را بهینه‌سازی نمود. یک روش مهم در این زمینه آنالیز اکسرژی است. روش آنالیز اکسرژی تکنیک جدیدی برای ارزیابی اتلاف‌های ترمودینامیکی جریان‌ها در طی یک فرآیند می‌باشد. به‌کارگیری این روش در مورد نیروگاه‌های حرارتی می‌تواند اصلاح حرارتی برج‌های خنک‌کن، کندانسورها و همچنین بهینه‌سازی بویلرها و توربین‌ها را در پی داشته باشد [۷]. علاوه بر محدود بودن منابع انرژی و حساسیت در زمینه بهینه‌سازی مصرف آن‌ها از لحاظ اقلیم‌شناسی نیز ایران جز مناطق خشک جهانی طبقه‌بندی شده است و میزان بارندگی

تابع راسترینگ داشته است. در PSO بعد از ۱۰۰۰ تکرار مینیمم تابع به مقدار ۲۷/۰۳۷ می‌رسد درحالی‌که GWO با همین تعداد تکرار مقدار ۱۱-۱/۳۰e را به‌عنوان مینیمم تابع راسترینگ می‌یابد؛ بنابراین با توجه به عملکرد بهتر GWO این الگوریتم برای حل مسئله اصلی یعنی مینیمم کردن تخریب اکسرژی انتخاب شده است.

شرایط بهینه برآورد شده و با هزینه آب شیرین تولیدی توسط سوخت‌های فسیلی مقایسه شده است.

۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی و کمینه‌سازی تابع راسترینگ

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimizer) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) از مهم‌ترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری هوشمند به شمار می‌روند که در حوزه هوش مصنوعی جای می‌گیرند. این الگوریتم‌ها با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی چون گرگ‌های خاکستری، ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌هایی کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده‌اند. در الگوریتم گرگ خاکستری رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری برای به دست آوردن طعمه مدل‌سازی شده است درحالی‌که در الگوریتم ازدحام ذرات کشف الگوهای حاکم بر پرواز پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها به کار گرفته شده است [۱۳، ۱۴]. الگوریتم گرگ خاکستری از رهبری سلسله مراتبی و مکانیزم شکار گرگ خاکستری در طبیعت تقلید می‌کند. از چهار نوع گرگ خاکستری به نام‌های آلفا، بتا، دلتا و امگا برای شبیه‌سازی رهبری سلسله مراتبی استفاده می‌شود. در هنگام طراحی GWO، به منظور مدل کردن ریاضی سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها مناسب‌ترین راه حل را به‌عنوان آلفا (α) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه از بین بهترین راه حل‌ها، دومین و سومین آن‌ها را بتا (β) و دلتا (δ) نام‌گذاری می‌کنند. مابقی راه حل‌های کاندید شده امگا (ω) در نظر گرفته می‌شوند. در الگوریتم GWO، فرآیند شکار (بهینه‌سازی) توسط α ، β و δ هدایت می‌گردد. گرگ‌های ω از این سه گروه پیروی می‌کنند و به این ترتیب الگوریتم با پیروی از پاسخ‌های برتر در هر مرحله به سمت بهترین پاسخ سوق داده می‌شود. با توجه به ارائه روش‌های نوین بهینه‌سازی به‌وسیله الگوریتم‌های فرا ابتکاری، برای انتخاب الگوریتم مناسب لازم است که در ابتدا عملکرد این الگوریتم‌ها در حل یک مسئله مشترک مورد ارزیابی قرار گیرند. برای مقایسه قدرت بهینه‌سازی الگوریتم‌های معرفی شده تابع راسترینگ با ضابطه‌ای مطابق با معادله ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

$$f(x) = An + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad (1)$$

این تابع دارای تعداد زیادی مینیمم محلی است و مینیمم مطلق آن در نقطه $f(0,0)=0$ وجود دارد. مقدار مینیمم برای مقادیر $A=10$ و ۳۰ متغیر در دامنه جست‌وجوی $-5.120 \leq x_i \leq 5.120$ توسط الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ازدحام ذرات بررسی شده است [۱۵].

عملکرد هریک از الگوریتم‌ها برای یافتن مینیمم‌ها در تعداد تکرارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند و ۱۰ نتیجه برتر الگوریتم PSO در جدول ۱ و الگوریتم GWO در جدول ۲ گزارش شده است. این نتایج با وارد کردن ضابطه تابع راسترینگ در کد اصلی این الگوریتم‌ها در متلب در محدوده دامنه جست‌وجو حاصل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم گرگ خاکستری با یافتن مقادیر کمتر قدرت بیشتری در کمینه کردن

جدول ۱ بهترین نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات

شماره اجرا	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف
۱	۱۰۰	۸۷/۳۱۰
۲	۲۰۰	۷۴/۷۸۱
۳	۳۰۰	۵۵/۱۷۸
۴	۴۰۰	۳۵/۰۲۵
۵	۵۰۰	۳۲/۹۵۱
۶	۶۰۰	۳۰/۲۷۹
۷	۷۰۰	۲۷/۴۷۸
۸	۸۰۰	۲۷/۳۲۱
۹	۹۰۰	۲۷/۱۴۸
۱۰	۱۰۰۰	۲۷/۰۳۷
میانگین	۵۵۰	۴۲/۴۵۱

جدول ۲ بهترین نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری

شماره اجرا	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف
۱	۱۰۰	۱۵/۷۱۲
۲	۲۰۰	۱۲/۲۰۲
۳	۳۰۰	۴/۳۲۵
۴	۴۰۰	۰/۰۰۲
۵	۵۰۰	۲/۴e-۰۵
۶	۶۰۰	۲/۹e-۰۶
۷	۷۰۰	۵/۴e-۰۹
۸	۸۰۰	۴/۲e-۱۰
۹	۹۰۰	۲/۹e-۱۱
۱۰	۱۰۰۰	۱/۳e-۱۱
میانگین	۵۵۰	۳/۲۲۴

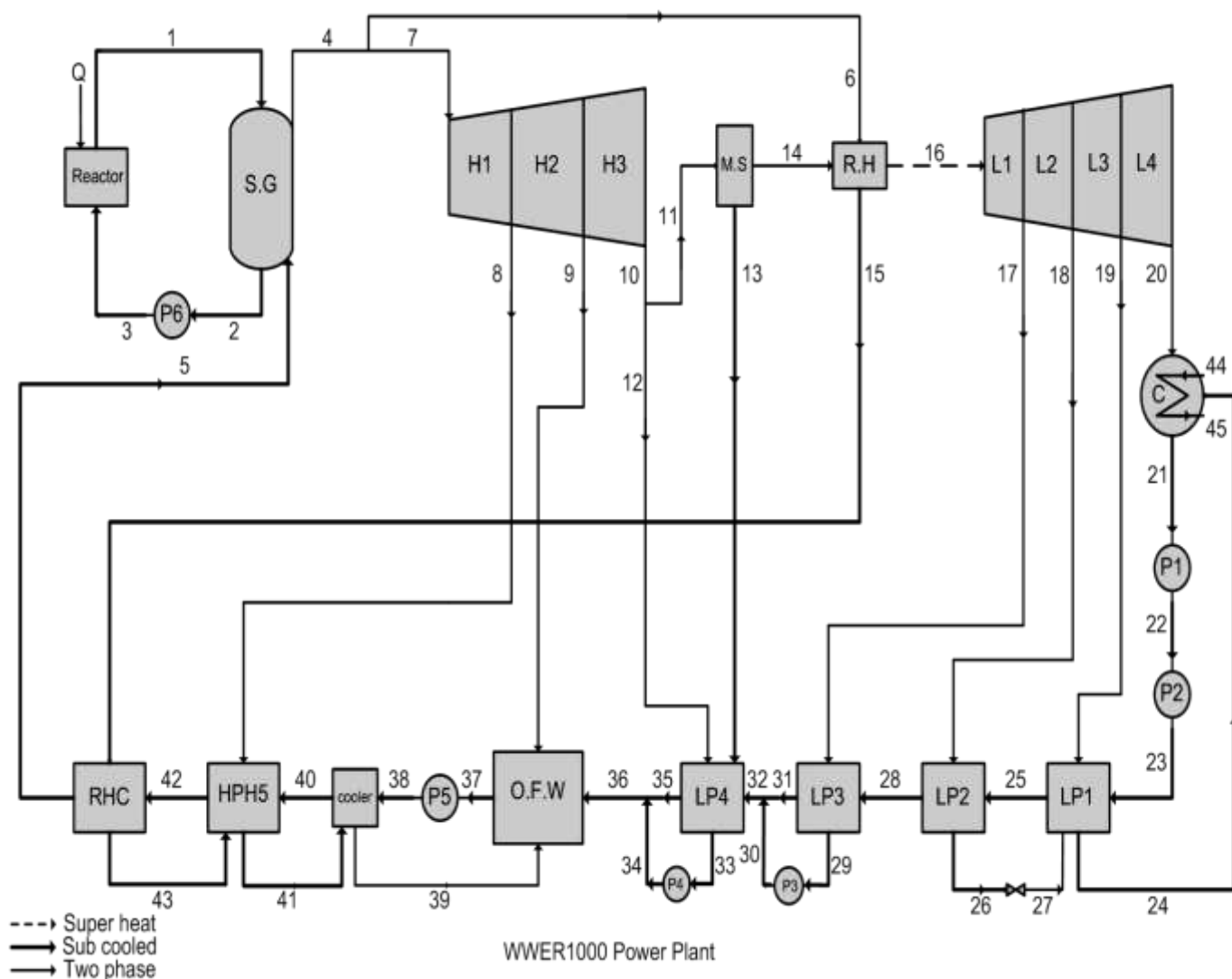
۳- محاسبات اکسرژی جریان‌ها و اجزای نیروگاه بوشهر

در این تحقیق، نیروگاه هسته‌ای بوشهر با قدرت خالص MW ۱۰۰۰ و ظرفیت حرارتی MWt ۳۰۰۰ به‌منظور بهینه‌سازی اکسرژی و سپس اتصال آب‌شیرین‌کن در نظر گرفته شده است. نیروگاه هسته‌ای بوشهر اولین نیروگاه هسته‌ای ایران از نوع آب تحت فشار با مدل راکتور WWER-1000 است. در این نوع راکتورها از آب سبک به‌عنوان خنک‌کننده و تعدیل‌کننده نوترون

جدول ۳ ویژگی‌های اصلی مدار اول

ویژگی‌ها	مقادیر
توان اسمی نیروگاه (MWt)	۳۰۰۰
دبی آب خنک کننده (m^3/h)	۸۴۸۰۰
فشار آب خنک کننده در خروجی از قلب راکتور (MPa)	۱۵/۷۰۰
تعداد لپ‌ها	۴
دبی بخار (kg/s)	۴۳۷
دمای بخار ($^{\circ}C$)	۲۷۸
فشار بخار (MPa)	۶/۲۸۰
دمای آب تغذیه ($^{\circ}C$)	۲۲۰
دمای آب ورودی به ژنراتور بخار ($^{\circ}C$)	۳۲۰
دمای آب خروجی از ژنراتور بخار ($^{\circ}C$)	۲۸۶

در فرآیند شکافت هسته‌ای استفاده می‌شود. این نیروگاه شامل دو مدار اولیه و ثانویه است. مدار اولیه حاوی آب تحت فشار به‌عنوان خنک‌کننده اصلی و کندکننده نوترون است. مدار ثانویه نیز همان چرخه بخار است که به توربین متصل شده و تحت سیکل رانکین عمل می‌کند. در مدار اول، انرژی حرارتی آزاد شده از واکنش تجزیه سوخت هسته‌ای در قلب راکتور توسط خنک‌کننده برداشت شده و حرارت از مدار اولیه به مدار ثانویه توسط ژنراتور بخار انجام می‌گیرد. ویژگی‌های اصلی مدار اول این نیروگاه در جدول ۳ گزارش شده است و نمودار جریان‌های مربوط به کل مدار اول و مدار دوم نیروگاه در شکل ۱ رسم گردیده است [۶].



شکل ۱ طرح‌واره جریان‌های سیال ورودی و خروجی به اجزای مدار اول و مدار دوم نیروگاه اتمی بوشهر

برای انجام محاسبات اکسرژی نوشتن معادلات بالانس جرم و انرژی در کل سیستم امری ضروری است. اکسرژی ماکزیمم کار به دست آمده از یک مقدار مشخص انرژی است. برای محاسبه اکسرژی فیزیکی یک جریان در شرایط T و P باید آن را نسبت به حالت محیطی در T_0 و P_0 بسنجیم. لذا قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای آن مانند روابط ۲ و ۳ نوشته می شوند.

$$Q - W = H_0 - H \quad (2)$$

در روابط فوق Q گرمای فرآیند، W کار انجام شده و H آنتالپی سیستم است.

$$s_0 - s - \frac{Q}{T_0} = 0 \quad (3)$$

مطابق با رابطه ۳ (قانون دوم)، Q گرمای فرآیند، S آنتروپی سیستم و T_0 دمای حالت مرجع است. اگر مقدار Q را از قانون دوم ترمودینامیک به دست آورده و در قانون اول جایگذاری کنیم رابطه ۴ به دست خواهد آمد.

$$W = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (4)$$

در نتیجه می توان مقدار کار ماکزیمم یا همان اکسرژی فیزیکی را به صورت رابطه ۵ بیان نمود.

$$EX = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (5)$$

در رابطه فوق H_0 و S_0 به ترتیب آنتالپی و آنتروپی سیستم در شرایط مرجع (دمای ۱۵ درجه سانتی گراد و فشار اتمسفر) می باشند. برای محاسبه آنتالپی و آنتروپی هر جریان با مشخصات T و P و نیز در شرایط مرجع از یک ام فایل متلب با نام Xsteam استفاده شده است. Xsteam بر اساس استاندارد IAPWS IF-97 خواص بخار و آب را از ۰ تا ۱۰۰۰ بار و از ۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد ارائه می دهد. این ام فایل در غالب یک تابع در هر مرحله از بهینه سازی برای خواندن ویژگی های ترمودینامیکی فراخوانی می شود.

مطابق با رابطه ۵ اکسرژی جریان های نقاط مختلف نیروگاه بوشهر قابل محاسبه خواهد بود [۷]. در جدول ۴ نیز دبی جرمی و کسر بخار نقاط مختلف نیروگاه نشان داده شده است. در ادامه تمامی معادلات بالانس انرژی و اکسرژی برای اجزای نیروگاه به طور مجزا ارائه گردیده است.

جدول ۴ دبی جرمی و کسر بخار نقاط مختلف نیروگاه

شماره	دبی جرمی (kg/s)	کسر بخار
۱	۱۶۸۰۰	۰
۲	۱۶۸۰۰	۰
۳	۱۶۸۰۰	۰
۴	۱۶۶۱/۱۱	۰/۹۹۴

شماره	دبی جرمی (kg/s)	کسر بخار
۵	۱۶۶۱/۱۱	۰
۶	۱۱۷/۵۳	۰/۹۹۴
۷	۱۵۴۳/۵۸	۰/۹۹۴
۸	۱۲۹/۹۴	۰/۹۲۵
۹	۶۴/۶۳	۰/۸۸۵
۱۰	۱۳۴۹	۰/۸۶۱
۱۱	۱۲۲۱/۵۸	۰/۸۶۱
۱۲	۱۲۷/۴۲	۰/۸۶۱
۱۳	۱۶۴/۳۰	۰
۱۴	۱۰۵۷/۲۷	۰/۹۹۶
۱۵	۱۱۷/۵۲	۰
۱۶	۱۰۵۷/۲۷	۱
۱۷	۴۶/۷۲	۰/۹۹۸
۱۸	۴۳/۵۵	۰/۹۶۳
۱۹	۴۵/۷۲	۰/۹۳۱
۲۰	۹۲۱/۲۷	۰/۸۹۸
۲۱	۱۰۱۰/۵۰	۰
۲۲	۱۰۱۰/۵۵	۰
۲۳	۱۰۱۰/۵۵	۰
۲۴	۸۹/۲۷	۰
۲۵	۱۰۱۰/۵۵	۰
۲۶	۴۳/۵۵	۰
۲۷	۴۳/۵۵	۰/۰۳۴
۲۸	۱۰۱۱۰/۵۵	۰
۲۹	۴۶/۷۲	۰
۳۰	۴۶/۷۲	۰
۳۱	۱۰۱۰/۵۵	۰
۳۲	۱۰۵۷/۲۷	۰
۳۳	۲۹۱/۷۲	۰
۳۴	۲۹۱/۷۲	۰
۳۵	۱۰۵۷/۲۷	۰
۳۶	۱۳۴۹/۰۰	۰
۳۷	۱۶۶۱/۱۱	۰
۳۸	۱۶۶۱/۱۱	۰
۳۹	۲۴۷/۴۶	۰/۰۸۹
۴۰	۱۶۶۱/۱۱	۰
۴۱	۲۴۷/۴۶	۰
۴۲	۱۶۶۱/۱۱	۰
۴۳	۱۱۷/۵۲۰	۰
۴۴	۶۱۹۱۲	۰
۴۵	۶۱۹۱۲	۰

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e}{\dot{w}_p} \quad (13)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} - \sum_e \dot{E}_{out} = \dot{w}_p + \dot{E}_D$$

معادلات ۱ تا ۱۴ معادلاتی خطی هستند که با معلوم بودن دماها، فشارها و دبی‌های جرمی ورودی و خروجی به هر یک از اجزای نیروگاه و سپس محاسبه آنتالپی و آنتروپی با استفاده از مشخصات ترمودینامیکی هر جریان قابل حل هستند. با داشتن مقدار آنتالپی و آنتروپی جریان‌ها میزان اکسرژی جریان‌ها نیز قابل محاسبه است.

در این مطالعه برای سادگی تجزیه و تحلیل، فرض می‌شود که انرژی با سرعت ثابت و در شرایط پایا از واکنش شکافت سوخت در راکتور حاصل می‌گردد. درواقع فرض می‌شود که کل انرژی شکافت مطابق با رابطه ۱۵ به کار مفید تبدیل می‌گردد. میزان بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی برای راکتور نیز مانند سایر اجزا با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌گردد [۶].

$$w_{umax} \cong c_v T_{fiss} \cong u_{fiss} = q_{fiss} \quad (15)$$

$$\varepsilon_R = \frac{\sum_{out} \dot{E} - \sum_{in} \dot{E}}{\dot{Q}_{fiss}} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{fiss} + \sum_i \dot{E} - \sum_e \dot{E} = \dot{E}_D \quad (17)$$

نسبت تخریب اکسرژی ($y_{D,k}$) یا نسبت برگشت‌ناپذیری عبارت است از تخریب اکسرژی در یک جزء (k) شاخص جزء است) به اکسرژی کل سوخت نیروگاه WWER و با معادله ۱۸ ارائه می‌شود [۱۰].

$$y_{D,K} = \frac{\dot{E}_{D,K}}{\dot{E}_{f,tot}} \quad (18)$$

در این تحقیق هدف از انجام بهینه‌سازی یافتن دماها و فشارهای بهینه‌ای است که مطابق با آن‌ها مجموع تخریب اکسرژی در کل سیستم به حداقل برسد. برای این منظور تابع هدف مطابق با رابطه ۱۹ تعریف شده است.

$$Fitness = \sum \dot{E}_{D,K} \quad (19)$$

دما و فشار ۱۰ نقطه از نمودار جریان‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده‌اند. از آنجایی که تغییرات فشار در طول توربین‌ها و به تبع آن تغییرات دما در مبدل‌های حرارتی تأثیرات اساسی بر تغییرات بازده و تخریب خواهد داشت این پارامترها به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده‌اند. درواقع متغیرهای تصمیم‌گیری در فرایند بهینه‌سازی به حالت

معادلات بالانس انرژی، تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای توربین به ترتیب مطابق با روابط ۶ تا ۸ ارائه شده است. کار توربین به‌صورت اختلاف آنتالپی‌های ورودی و خروجی از آن تعریف می‌شود و بازده اکسرژتیک آن از تقسیم مقدار کار بر اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های ورودی و خروجی از آن محاسبه می‌گردد. مطابق رابطه ۸ میزان تخریب اکسرژی (E_D) توربین نیز با در دست داشتن اکسرژی جریان‌ها و کار توربین قابل محاسبه است [۶].

$$\dot{w}_t = (\dot{w}_u)_t = \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e \quad (6)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{w}_t}{\sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e} \quad (7)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} - \sum_e \dot{E}_{out} = \dot{w}_T + \dot{E}_D \quad (8)$$

معادلات بالانس انرژی، تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای مبدل‌های حرارتی نیز به ترتیب مطابق با روابط ۹ تا ۱۱ تعریف می‌شوند. مبدل‌های حرارتی وظیفه انتقال حرارت بین دو جریان غیر هم‌دما را به عهده‌دارند و در طول انتقال حرارت کار انجام‌شده توسط این اجزا مطابق رابطه ۹ برابر با صفر است.

$$\dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e = 0 \quad (9)$$

بازده اکسرژی مبدل‌ها بر طبق رابطه ۱۰ از تقسیم اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های گرم شونده بر اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های گرم‌کننده موجود در مبدل به دست می‌آید. میزان تخریب اکسرژی (E_D) برای این اجزا نیز برابر با اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های ورودی و خروجی از آن است [۷].

$$\varepsilon = \frac{\Delta \dot{E}_{stream.to.be.heated}}{\Delta \dot{E}_{stream.used.for.heating}} \quad (10)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} - \sum_e \dot{E}_{out} = \dot{E}_D \quad (11)$$

پمپ‌ها برخلاف توربین‌ها به‌عنوان مصرف‌کننده کار در یک نیروگاه به شمار می‌روند و روابط بالانس انرژی، تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای آن‌ها به ترتیب مطابق با روابط ۱۲ تا ۱۴ تعریف می‌گردد.

$$\dot{w}_p = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad (12)$$

انرژی حرارتی، یک روش پایدار جهت تولید آب شیرین محسوب می‌گردد. در سال‌های اخیر به‌کارگیری این روش با کاهش مستمر هزینه‌های فناوری‌های انرژی تجدید پذیر از جذابیت اقتصادی بیشتری برخوردار گردیده است [۱۶]. راکتورهای اتمی می‌توانند انرژی مورد نیاز را برای آب‌شیرین‌کن‌های با تکنولوژی‌های حرارتی مانند تقطیر فلش چندمرحله‌ای (MSF) یا تقطیر چند اثر (MED) و تکنولوژی‌های مبتنی بر غشاء مانند اسمز معکوس (RO) تأمین کنند. در زمینه اتصال ایمن واحدهای آب‌شیرین‌کن به راکتورهای هسته‌ای دپارتمان فیزیک هسته‌ای عمومی، به نمایندگی از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، شبیه‌ساز DEEP را به‌عنوان نرم‌افزاری برای آنالیز اقتصادی و پیش‌بینی هزینه نهایی تولید آب شیرین ارائه داده است. در این شبیه‌ساز اتصال واحد آب‌شیرین‌کن به نیروگاه هسته‌ای از طریق یک مدار میانی فراهم می‌گردد که این مدار شامل یک مبدل حرارتی و یک مخزن فلش برای تبخیر آب گرم است و برای حفظ ایمنی در شرایط خاص، باید امکان جدایش سریع مدار شیرین‌سازی از نیروگاه از طریق عملکرد سریع یک شیر اتفاق بیفتد. در این تحقیق تکنولوژی تقطیر چندمرحله‌ای به همراه ترموکمپرسور به دلیل دارا بودن راندمان بالا در بین روش‌های حرارتی برای اتصال به نیروگاه هسته‌ای بوشهر انتخاب شده است. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی این واحد توسط دیپ در جدول ۶ گزارش شده‌اند.

جدول ۶ مشخصات واحد آب‌شیرین‌کن

مشخصات واحد	مقادیر
تقطیر چند مرحله‌ای به همراه ترموکمپرسور	نوع تکنولوژی شیرین‌سازی
ظرفیت شیرین‌سازی (m^3/day)	۲۴۰۰۰
دمای آب‌شور ($^{\circ}C$)	۲۵
بیشینه دمای آب ورودی به سیستم شیرین‌سازی ($^{\circ}C$)	۷۰
کل مواد جامد محلول در آب‌شور (PPm)	۳۵۰۰۰
کل مواد جامد محلول در آب شیرین (PPm)	۲۵
میانگین افت دما بین افکت‌های واحد شیرین‌سازی ($^{\circ}C$)	۲/۵
میانگین افت دمای بخار در لوپ میانی ($^{\circ}C$)	۲

۵- نتایج و بحث

پس از کد نویسی معادلات بالانس انرژی و اکسرژی در متلب مقادیر بازده اکسرژی، تخریب اکسرژی و نسبت تخریب اکسرژی برای هر مؤلفه نیروگاه محاسبه شده و نتایج به‌دست‌آمده برای تحلیل انرژی و اکسرژی به‌طور مجزا در جدول ۷ و جدول ۸ گزارش شده‌اند. مطابق با نتایج بیشترین میزان برگشت‌ناپذیری (تخریب اکسرژی) با مقدار $151/50$ MW در ابتدا به راکتور و

ترمودینامیکی این نقاط در مدار دوم اختصاص داده شده‌اند. در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی، شناسایی دو نوع متغیر مستقل مناسب است. این متغیرها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای عملیاتی هستند. متغیرهای تصمیم ممکن است در روند بهینه‌سازی ثابت شوند. تمام متغیرهای دیگر متغیرهای وابسته هستند و مقادیر آن‌ها از متغیرهای مستقل با استفاده از مدل ترمودینامیکی محاسبه می‌گردد [۷]. محدوده دما و فشار برای متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده در طول فرآیند بهینه‌سازی در جدول ۵ گزارش شده است. با تغییر مقادیر این متغیرها به طور مکرر در طول فرآیند بهینه‌سازی معادلات بالانس انرژی و اکسرژی که در این بخش برای تمامی اجزای نیروگاه معرفی شدند حل شده و مقادیر تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای هر مؤلفه از نیروگاه محاسبه می‌گردد. برای مثال با تغییر دما و فشار جریان شماره ۸ و ۹ و به دنبال آن تغییر آنتالپی و آنترופی این دو جریان اکسرژی این جریان‌ها مطابق با رابطه ۵ و کار توربین پرفشار مطابق با رابطه ۶ محاسبه می‌گردد؛ سپس با معلوم بودن میزان کار توربین و اکسرژی جریان‌های ورودی و خروجی از آن میزان بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی به ترتیب مطابق با روابط ۷ و ۸ برای این جزء محاسبه می‌گردد. مجموع تخریب اکسرژی تمام مؤلفه‌ها نیز تابع هدف را تشکیل می‌دهد. با محاسبه تخریب اکسرژی برای تمام اجزاء به همین ترتیب تابع هدف در هر اجرای الگوریتم محاسبه می‌گردد و زمانی که کمترین مقدار ممکن برای این تابع حاصل شود الگوریتم متوقف می‌گردد.

جدول ۵ محدوده دما و فشار برای متغیرهای تصمیم‌گیری

متغیرهای تصمیم‌گیری	کران پایین	کران بالا
فشار جریان شماره ۸ (bar)	۲۴/۷۰	۲۵/۲۰
فشار جریان شماره ۹ (bar)	۱۰/۰۰	۱۶/۰۰
فشار جریان شماره ۱۷ (bar)	۱/۸۰	۲/۳۰
فشار جریان شماره ۱۸ (bar)	۰/۷۰	۱/۱۰
فشار جریان شماره ۱۹ (bar)	۰/۲۵	۰/۳۶
دمای جریان شماره ۲۵ ($^{\circ}C$)	۵۶/۰۰	۶۸/۰۰
دمای جریان شماره ۲۸ ($^{\circ}C$)	۷۸/۰۰	۹۷/۰۰
دمای جریان شماره ۳۱ ($^{\circ}C$)	۱۰۳/۰۰	۱۱۵/۰۰
دمای جریان شماره ۳۶ ($^{\circ}C$)	۱۶۰/۰۰	۱۶۶/۰۰
دمای جریان شماره ۴۲ ($^{\circ}C$)	۲۱۷/۰۰	۲۲۳/۵۰

پس از انجام عملیات بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری با مشخص شدن دماها و فشارهای بهینه یک واحد آب‌شیرین‌کن (MED-TVC) در نرم‌افزار دیپ طراحی شده و پس از اتصال به نیروگاه هزینه تولید آب شیرین در شرایط بهینه نیروگاه برآورد می‌شود.

۴- نمک‌زدایی با استفاده از تکنولوژی هسته‌ای

نمک‌زدایی آب با استفاده از راکتورهای هسته‌ای به‌عنوان منبع

کار برگشت پذیر (MWt)	کار واقعی (MWt)	اجزای نیروگاه
-۳/۸۷	-۱۰/۷۷	پمپ آب تغذیه
-۰/۰۳	-۰/۵۵	پمپ شماره ۱
-۰/۰۵	-۱/۶۷	پمپ شماره ۲
-۰/۰۳	-۰/۱۹	پمپ شماره ۳
-۰/۱۴	-۰/۳۵	پمپ شماره ۴

جدول ۸ نتایج حاصل از تحلیل اکسرژی

نرخ برگشت ناپذیری (%)	بازده اکسرژی (%)	تخریب اکسرژی (MWt)	اجزای نیروگاه
مدار اول			
۵۰/۳۱	۴۹/۶۵	۱۵۱۰/۵۰	راکتور
۴/۸۸	۹۱/۱۷	۱۴۴/۵۰	ژنراتور بخار
۰/۱۸	۹۹/۵۰	۵/۰۳	پمپ خنک کننده راکتور
بخش تولید توان			
۲/۲۲	۹۵/۶۳	۶۶/۴۴	توربین فشار بالا
۳/۸۹	۸۷/۱۲	۱۱۸/۹	توربین فشار پایین
۰/۷۴	۷۳/۲۸	۲۳/۸۷	ری هیتر
۰/۱۷	۹۴/۹۱	۵/۵۶	جداساز رطوبت
بخش کندانس			
۱/۷۶	-	۵۵/۸۰	کندانسور
پیش گرم کن ها			
۰/۱۷	۶۱/۶۸	۵/۴۱	پیش گرم کن فشار پایین ۱
۰/۱۲	۷۸/۰۶	۳/۶۴	پیش گرم کن فشار پایین ۲
۰/۱۳	۸۳/۷۳	۴/۹۱	پیش گرم کن فشار پایین ۳
۰/۳۶	۸۳/۹۰	۱۲/۵۳	پیش گرم کن فشار پایین ۴
۰/۱۲	۹۶/۱۱	۳/۶۷	پیش گرم کن فشار بالا ۵
۰/۰۴	۴۹/۶۵	۱/۵۷	کولر
۰/۰۵	۸۵/۵۹	۱/۴۵	ری هیت کولر
۰/۰۳۳	-	۱/۳۵	دی اریتر
۰/۲۱	۹۶/۸۵	۶/۹۰	پمپ آب تغذیه
۰/۰۲	۶۰/۷۴	۰/۵۲	پمپ شماره ۱
۰/۰۴	۹۱/۶۲	۱/۶۲	پمپ شماره ۲
۰/۰۰۴	۹۳/۱۲	۰/۱۵۴	پمپ شماره ۳
۰/۰۰۵	۹۹/۴۰	۰/۲۱	پمپ شماره ۴

سپس با MW ۱۴۴/۵۰ به ژنراتور بخار تعلق دارد. درواقع تقریباً نیمی از اکسرژی سوخت در راکتور تخریب می گردد. میزان بالای تخریب اکسرژی در راکتور به دلیل بالا بودن دمای واکنش شکافت و افزایش بازگشت ناپذیری فرآیند شکافت می باشد. کمترین میزان تخریب اکسرژی نیز در هوازدا و پمپ ها رخ می دهد. راندمان اکسرژی و تخریب اکسرژی اجزاء به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ مقایسه شده اند. پرواضح است که مؤلفه هایی با میزان تخریب کمتر بازده بالاتری دارند. راندمان اکسرژی پمپ ها در مقایسه با پیش گرم کن های آب تغذیه بالاتر و به تبع آن تخریب اکسرژی در آن ها پایین تر است؛ زیرا کار مکانیکی انجام شده توسط پمپ ها اتلاف حرارتی کمتری را نسبت به انتقال حرارت توسط پیش گرم کن ها ایجاد می کند. نکته قابل توجه دیگر در این دو نمودار بالا بودن میزان بازده برای هوازدا نسبت به سایر گرم کن های آب تغذیه می باشد. دلیل بالا بودن این مقدار کاهش میزان اتلاف حرارت به دلیل تماس مستقیم جریان ها در این جزء است؛ زیرا تماس مستقیم جریان ها اتلافات حرارتی سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. برای صحت سنجی کد نوشته شده از مقایسه نتایج به دست آمده از کد با نتایج عملیاتی در جدول ۹ استفاده شده است. همان گونه که مشخص است میزان خطای مقادیر تئوری با مقادیر عملیاتی برای تمامی پارامترهای مورد مقایسه کمتر از ۲ درصد می باشد.

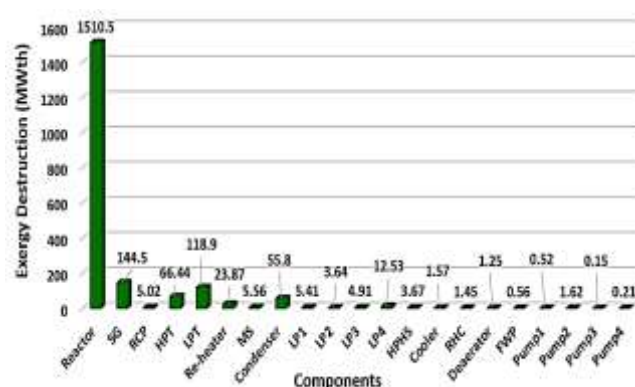
جدول ۷ نتایج حاصل از تحلیل انرژی

کار برگشت پذیر (MWt)	کار واقعی (MWt)	اجزای نیروگاه
مدار اول		
۳۰۰/۱۸۰	۱۴۹۱/۳۰	راکتور
۱۵/۰۵	۰	ژنراتور بخار
-۵/۱۲	-۱۰/۱۵	پمپ خنک کننده راکتور
بخش تولید توان		
۴۹۲/۹۵	۴۲۶/۵۱	توربین فشار بالا
۷۲۰/۵۲	۶۰۱/۶۲	توربین فشار پایین
۲۳/۸۷	۰	ری هیتر
۵/۲۱	۰	جداساز رطوبت
بخش کندانس		
۵۵/۸۰	۰	کندانسور
پیش گرم کن ها		
۵/۴۱	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۱
۳/۶۴	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۲
۴/۹۱	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۳
۱۲/۵۳	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۴
۳/۶۷	۰	پیش گرم کن فشار بالا ۵
۱/۵۷	۰	کولر
۱/۴۵	۰	ری هیت کولر
۱/۳۵	۰	دی اریتر

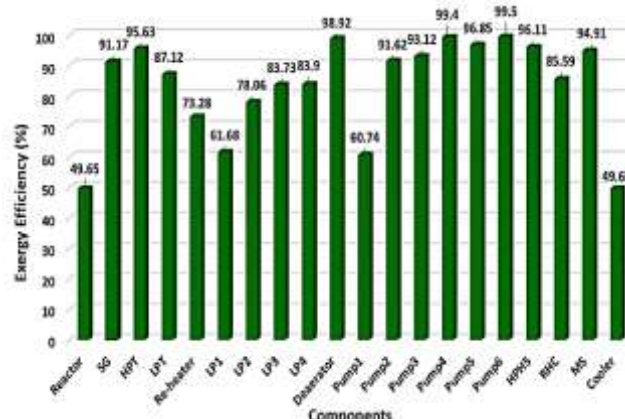
۱۹۶۹/۵۱ MW است. مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری و مقدار تابع هدف حاصل از این متغیرها برای ۲ اجرای برتر الگوریتم GWO در جدول ۱۰ گزارش شده است. در شکل ۴ نیز نحوه کاهش تابع هدف در ۱۰۰ تکرار متوالی برای ۱۰ اجرای برتر در نمودارهای مجزا نشان داده شده است. به عنوان مثال در اجرای نمودار GWO1 ابتدا الگوریتم محدوده‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری را انتخاب نموده است که مطابق با آن‌ها مجموع تخریب اکسرژی بیشتر از ۱۹۶۴ است اما در تکرارهای بعدی با یافتن مقادیر بهتر میزان تخریب در هر تکرار کاهش می‌یابد تا جایی که یافتن مقادیر بهینه‌تر از تکرار ۲۲ به بعد متوقف می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی، مجموع تخریب اکسرژی در حالت بهینه به ۱۹۴۵/۸۵ MW کاهش یافته است و با ارائه این روش می‌توان از تخریب کامل اکسرژی در نیروگاه به میزان ۲۳/۶۰ MW جلوگیری کرد.

جدول ۱۰ نتایج برتر حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری

متغیرها	جمعیت برتر ۱	جمعیت برتر ۲
فشار جریان شماره ۸ (bar)	۲۴/۸۹۰	۲۴/۸۴۰
فشار جریان شماره ۹ (bar)	۱۳/۵۷۰	۱۱/۱۳۰
فشار جریان شماره ۱۷ (bar)	۰/۲۲۸	۰/۲۲۵
فشار جریان شماره ۱۸ (bar)	۰/۹۰۱	۰/۹۸۳
فشار جریان شماره ۱۹ (bar)	۰/۳۳۳	۰/۳۳۲
دمای جریان شماره ۲۵ (°C)	۶۱/۵۰۰	۶۴/۳۷۰
دمای جریان شماره ۲۸ (°C)	۸۲/۱۰۰	۸۰/۰۰۰
دمای جریان شماره ۳۱ (°C)	۱۰۷/۴۲۰	۱۱۵/۵۰۰
دمای جریان شماره ۳۶ (°C)	۱۶۲/۶۵۰	۱۶۲/۶۳۰
دمای جریان شماره ۴۲ (°C)	۲۲۰/۴۳۰	۲۲۲/۳۲۰
مقدار تابع هدف (MWt)	۱۹۴۵/۸۵۸	۱۹۴۵/۸۷۱



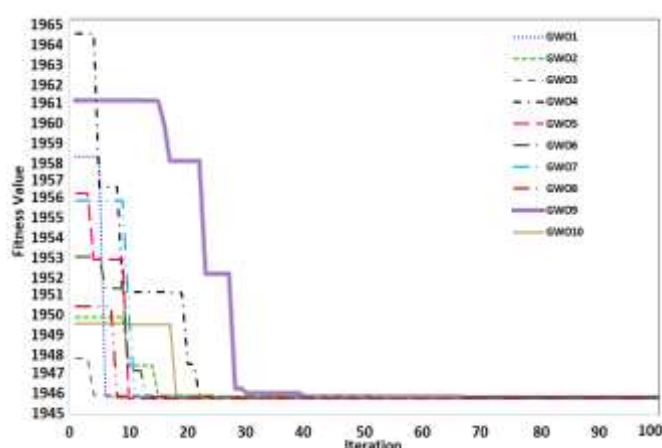
شکل ۲ تخریب اکسرژی در اجزای نیروگاه



شکل ۳ بازده اکسرژی در اجزای نیروگاه

جدول ۹ مقایسه نتایج به دست آمده از کد با نتایج عملیاتی

پارامترها	مقادیر عملیاتی	مقادیر محاسبه شده	درصد خطا
توان حرارتی راکتور (MWt)	۳۰۱۲	۳۰۰۱/۸۰	۰/۳۴
توان خالص خروجی (MWt)	۱۰۱۹	۱۰۲۸/۱۳	۰/۸۸
کار واقعی توربین (MWt)	۴۱۹/۸۰	۴۲۶/۵۱	۱/۵۷
کار واقعی توربین کم فشار ۱۸ (MWt)	۶۰۰/۱۰	۶۰۱/۶۰	۰/۲۵
بازده خالص نیروگاه (%)	۳۳/۸۳	۳۴/۲۰	۱/۰۸
حرارت خالص ورودی به کندانسور (MWt)	۲۱۵۳	۲۱۵۳/۸۳	۰/۰۳
حرارت خالص خروجی از کندانسور (MWt)	۱۹۸۱	۱۹۸۱/۲۰	۰/۰۱



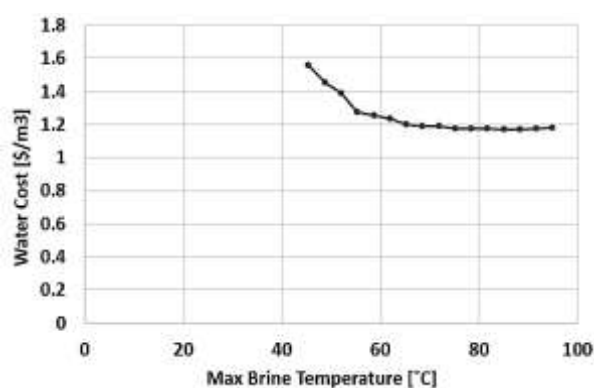
شکل ۴ مقادیر تابع هدف در هر تکرار برای نتایج برتر

پس از بهینه‌سازی، واحد آب‌شیرین‌کن MED-TVC با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز به اولین جریان بخار خروجی از توربین فشار پایین نیروگاه متصل شده است. شکل ۵ طرح‌واره‌ای از جریان‌های ورودی و خروجی از آب‌شیرین‌کن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در صورتی که جریان

پس از تحلیل اکسرژی عملیات بهینه‌سازی توسط الگوریتم گرگ خاکستری انجام شده و مقادیر بهینه دما و فشار به دست آمده‌اند. مقدار تابع هدف یا همان مجموع تخریب اکسرژی در تمام مؤلفه‌های نیروگاه قبل از کمینه‌سازی برابر با

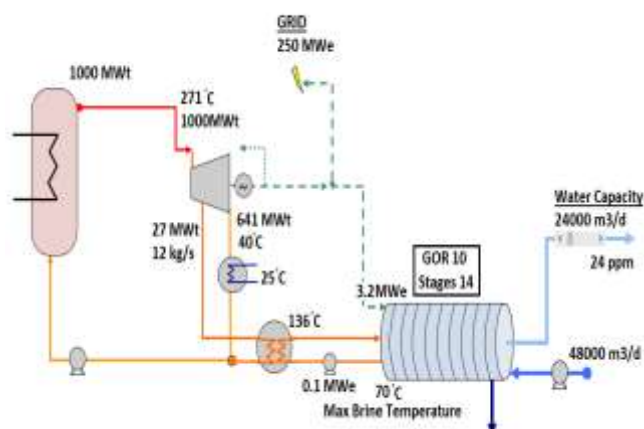
تخمین هزینه	
۱۳۰	هزینه‌های احتمالی واحد
۱۵۴	بهره هزینه در طول ساخت‌وساز
۱۶۶۵	کل هزینه‌های ثابت
۰/۴۳۰	کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت سالانه
هزینه‌های عملیاتی واحد شیرین سازی (\$/m³)	
هزینه انرژی	
۰/۳۶۰	هزینه انرژی گرمایی
۰/۲۲۰	هزینه انرژی الکتریکی
۰/۵۸۰	کل هزینه انرژی
هزینه بهره‌برداری و نگهداری	
۰/۰۲۰	هزینه مدیریت
۰/۰۵۰	هزینه نیروی کار
۰/۰۷۰	هزینه مواد
۰/۰۲۰	هزینه بیمه
۰/۱۷۰	مجموع بهره‌برداری و نگهداری
۱/۱۸۰	هزینه نهایی تولید آب
۲۸۸۶	کل هزینه سرمایه‌گذاری (M\$)
۱۱	مدت زمان برگشت سرمایه (year)

شکل ۶ روند کاهش تقریبی هزینه تولید آب شیرین با افزایش دمای آب ورودی به واحد آب شیرین کن را نشان می‌دهد. افزایش دمای آب ورودی باعث می‌شود که برای یک شیرین سازی مشخص تعداد استیج‌های کمتری موردنیاز باشد بنابراین موجب کاهش هزینه‌های ثابت و عملیاتی واحد خواهد شد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است مقادیر دمای بهینه برای حداقل شدن هزینه تولید آب در اطراف ۷۰ درجه وجود دارند و با افزایش دما از این میزان تغییرات نامحسوسی در کاهش هزینه ایجاد می‌گردد. شکل ۷ نیز نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت شیرین سازی می‌توان هزینه نهایی تولید آب شیرین را کاهش داد؛ این امر به سبب آن است که با افزایش ظرفیت واحد شیرین سازی هزینه‌های ثابت واحد با شیب کمتری نسبت به حالت قبل در حال افزایش خواهند بود و بنابراین در میزان هزینه نهایی تولید آب شیرین به‌طور محسوس تأثیرگذار خواهند بود؛ اما باید توجه شود که ظرفیت نهایی شیرین سازی توسط میزان مجاز برداشت حرارت از نیروگاه محدود می‌گردد. روند کلی بهینه‌سازی نیروگاه و اتصال آب شیرین کن به آن در شکل ۸ به‌صورت مرحله‌به‌مرحله نمایش داده شده است.



شکل ۶ تغییرات هزینه تولید آب شیرین با افزایش دمای آب ورودی

آب شور ورودی به آب شیرین کن دارای حداقل دمای ۷۰ درجه باشد با یک واحد با ۱۴ مرحله غلظت آب شور از ۳۵۰۰ PPM به ۲۵ PPM کاهش داده می‌شود. بازده یک آب شیرین کن (GOR) به صورت حاصلضرب گرمای نهان تبخیر در دبی جرمی آب شیرین تولیدی بخش بر میزان گرمای ورودی به سیستم محاسبه می‌شود. در واقع این پارامتر میزان راندمان و کارآمدی سیستم را بیان می‌کند. هرچه میزان این عدد بزرگتر از یک باشد به این معناست که انرژی کمتری به ازای تولید هر واحد آب شیرین موردنیاز است. مقدار GOR با پارامترهای طراحی برای این سیستم عدد ۱۰ است که توسط دیپ محاسبه شده است. برای انجام عملیات شیرین سازی انرژی معادل ۲۷ MWt موردنیاز است. این مقدار انرژی توسط ۱۲ کیلوگرم بر ثانیه از جریان شماره ۱۷ تأمین می‌گردد. همان‌طور که بیان شد محاسبه هزینه نهایی تولید آب شیرین مهم‌ترین پارامتر موردبررسی در استقرار یک سیستم بهینه تولید آب شیرین می‌باشد. پارامترهای اقتصادی بسیاری به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در محاسبه این هزینه نقش دارند. جدول ۱۱ مقادیر این پارامترهای اساسی را نشان می‌دهد که نرم‌افزار دیپ برای محاسبه هزینه نهایی آب شیرین از آن‌ها استفاده می‌کند. این پارامترها هزینه‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی را پوشش می‌دهند. مطابق با جزئیات گزارش شده هزینه تولید هر مترمکعب آب ۱/۱۸ دلار تخمین زده شده است. این در حالی است که قیمت تولید هر مترمکعب آب توسط سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ تا ۱/۷۸ دلار به ازای مترمکعب نیز گزارش شده است [۱۷]. حتی در سیستم‌های بهینه شده چندمنظوره شامل صفحات خورشیدی، توربین بادی و سیستم تولید آب شیرین؛ هزینه تولید آب تا ۳/۰۸ دلار به ازای مترمکعب برآورد شده است [۱۸].



شکل ۵ طرح‌واره‌ای از جریان‌های ورودی و خروجی از واحد آب شیرین کن

جدول ۱۱ پارامترهای اصلی تخمین هزینه تولید آب شیرین

تخمین هزینه	
هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت واحد آب شیرین کن (\$/m³)	
۱۱۷۷	هزینه ساخت واحد
۶۵	هزینه ساخت لوپ میانی
۷۷	هزینه جریان‌های ورودی / خروجی
۶۲	هزینه‌های مالکیت واحد

۶- نتیجه گیری

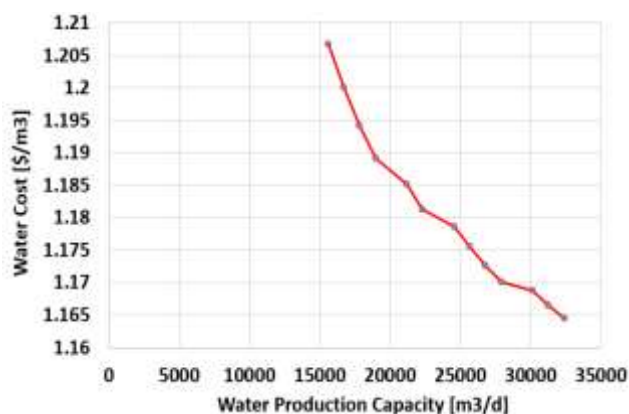
در این مقاله، با انتخاب حجم کنترل مناسب برای نیروگاه هسته‌ای بوشهر، سیکل نیروگاه از نظر قانون اول و دوم ترمودینامیک برای استفاده دو منظوره در جهت تولید آب شیرین تحلیل شده است. محاسبات انجام شده برای میزان تخریب اکسرژی و بازده هر مؤلفه از نیروگاه نشان دادند که بیشترین میزان اتلاف اکسرژی در نقاطی مانند قلب راکتور رخ می‌دهد که دمای واکنش در آن‌ها بسیار بالا است. روش بهینه‌سازی ارائه شده در این تحقیق یکی از قدرتمندترین ابزار جستجوی غیر-مستقیم برای یافتن پارامترهای بهینه در علوم مهندسی به شمار می‌رود. نتایج بهینه‌سازی نشان دادند که با یافتن دماها و فشارهای بهینه با استفاده از این روش جستجو می‌توان از حدود ۲۳/۶۰ MW تخریب در کل سیکل نیروگاه جلوگیری کرد. این مقدار با توجه به طول عمر یک نیروگاه هسته‌ای رقمی قابل توجه در افزایش بهره‌وری نیروگاه‌های دومنظوره است. علاوه بر این؛ تولید آب شیرین با حداقل هزینه به عنوان یکی از مزایای بسیار مهم این سیستم‌ها می‌تواند نویدبخش غلبه بر مشکل عدم دسترسی به آب شیرین به‌ویژه در مناطق جنوبی کشور باشد و استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان یک منبع پایدار در سیستم‌های دومنظوره می‌تواند در چشم‌انداز آینده جایگزینی مناسب برای منابع فسیلی تلقی گردد.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
EX	اکسرژی (J/kg)
H	آنتالپی (J/kg)
S	آنتروپی (J/kg)
u	انرژی درونی (J/kg)
D, K	تخریب اجزاء
ED	تخریب اکسرژی (J/kg)
F, K	جریان در اجزاء
out	خروجی
m	دبی جرمی (kg/s)
T	دما ($^{\circ}C$)
fiss	شکافت
0	شرایط مرجع
C	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg, ^{\circ}C$)
P	فشار (bar)
W	کار (J)
q	گرما (J)
y	نرخ بازگشت‌ناپذیری
in	ورودی

۸- مراجع

- [1] Sadekin S., Zaman S., Mahfuz M. and Sarkar R., Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 513-518, (2019).



شکل ۷ تغییرات هزینه تولید آب شیرین با افزایش ظرفیت واحد شیرین سازی



شکل ۸ فلوچارت روند بهینه‌سازی و اتصال آب شیرین کن

- system with thermo-vapor compressor (MED-TVC). *Energy*, vol. 35(5), pp. 1981-1996, (2010).
- [11] Wilding P.R., Murray N.R. and Memmott, M.J., The use of multi-objective optimization to improve the design process of nuclear power plant systems. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 137, p. 107079, (2020).
- [12] Ebrahimgol H., Aghaie M., Zolfaghari A. and Naserbegi A., A novel approach in exergy optimization of a WWER1000 nuclear power plant using whale optimization algorithm. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 145, p. 107540, (2020).
- [13] Sezer KS, Bayhan N. Comparison of Metaheuristic Algorithm Performances for Optimization of Fractional Order PID Controllers Applied to Gas Turbine Power Plant. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*. vol. 30, 14(2), pp. 209-19, (2021).
- [14] Eltamaly AM. A novel strategy for optimal PSO control parameters determination for PV energy systems. *Sustainability*, vol. 13, pp. 1008, (2021).
- [15] Naserbegi A., Aghaie M. and Zolfaghari A., Implementation of Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm to multi-objective loading pattern optimization of a PWR reactor. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 148, p. 107703, (2020).
- [16] Mukhtar A, Saqib S, Ullah S, Sagir M, Tahir MB, Mahmood A, Al-Sehemi AG, Assiri MA, Ibrahim M, Ali A. Nuclear Desalination. *In Sustainable Materials and Systems for Water Desalination*, pp. 121-135, (2021).
- [17] Rezaei A., Naserbeagi A., Alahyarizadeh G. and Aghaie M., Economic evaluation of Qeshm island MED-desalination plant coupling with different energy sources including fossils and nuclear power plants. *Desalination*, vol. 422, pp. 101-112, (2017).
- [18] Makkeh, S. A., Ahmadi, A., Esmaeilion, F., & Ehyaei, M. A. Energy, exergy and exergoeconomic optimization of a cogeneration system integrated with parabolic trough collector-wind turbine with desalination. *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, pp. 123122, (2020).
- [2] Ağbulut Ü., Ceylan İ., Gürel A.E. and Ergün A., The history of greenhouse gas emissions and relation with the nuclear energy policy for Turkey. *International Journal of Ambient Energy*, pp. 1-9, (2019).
- [3] Veselov F.V. and Khorshev A.A., Optimal Scale of Development of Nuclear Energy in the UES of Russia to 2050. *Atomic Energy*, vol. 128(5), pp. 259-264, (2020).
- [4] Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. and Gusev A.L., Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45(56), pp. 31353-31366, (2020).
- [5] Maronati G. and Petrovic B., Estimating cost uncertainties in nuclear power plant construction through Monte Carlo sampled correlated random variables. *Progress in Nuclear Energy*, vol. 111, pp.211-222, (2019).
- [6] Naserbegi A., Aghaie M., Minucmehr A. and Alahyarizadeh G., A novel exergy optimization of Bushehr nuclear power plant by gravitational search algorithm (GSA). *Energy*, vol. 148, pp. 373-385, (2018).
- [7] Sayyaadi H. and Sabzaligol T., Exergoeconomic optimization of a 1000 MW light water reactor power generation system. *International Journal of Energy Research*, vol. 33(4), pp. 378-395, (2009).
- [8] Zargan J. and Waez-Mousavi S.M., Water crisis in Iran: its intensity, causes and confronting strategies. *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9(44), pp.1-6, (2016).
- [9] Sadeghi K., Ghazaie S.H., Fedorovich E.D., Sokolova E.A. and Shirani, A.S., Economic Assessment of the Possible Desalination Processes for the First Unit of Bushehr Nuclear Power Plant. *Thermal Engineering*, vol. 67(5), pp. 271-281, (2020).
- [10] Ansari K., Sayyaadi H. and Amidpour M., Thermoeconomic optimization of a hybrid pressurized water reactor (PWR) power plant coupled to a multi effect distillation desalination



بررسی تاثیر نانو لوله های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه پلیمری

رضا حاجی زاده اصل
دانشجوی دکتری

مهدی یار محمد
توسکی*

استادیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران
جنوب، تهران

چکیده: در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن نانولوله های کربنی بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت بررسی شد. در گام نخست و به منظور برهم کنش مطلوب تر نانولوله ها با زمینه اپوکسی، اصلاح سطحی آنها صورت گرفت. نانولوله های کربنی اصلاح سطحی شده در درصدهای وزنی مختلف نسبت به زمینه (۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪) انجام و در ادامه مخلوط های حاصله به عنوان زمینه در ساخت کامپوزیت های تقویت شده با الیاف بازالت استفاده شد. به منظور بررسی اثر افزودن نانولوله های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت ها آزمونهای کشش و خمش سه نقطه ای روی آنها صورت پذیرفت. نتایج حاصله نشان می دهد که اولاً بیشترین میزان اثربخشی نانولوله های کربنی اصلاح سطحی شده بر استحکام کششی و خمشی در کامپوزیت های حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی حاصل شده است. ثانیاً تأثیر مثبت نانولوله های کربنی در یک مقدار مشخص بر استحکام خمشی بیشتر از تأثیر همان میزان نانولوله کربنی بر بهبود استحکام کششی بود. ثالثاً روند تغییرات انرژی شکست با افزایش مقدار نانولوله کربنی افزوده شده مشابه استحکام کششی و خمشی نمونه ها بود، بیشترین میزان جذب انرژی در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی با بهبود ۳۵٪ نسبت به نمونه شاهد حاصل شد.

واژه های راهنما: نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، کامپوزیت های زمینه پلیمری.

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

Reza hajizadeh
Asl
PhD Student

Mehdi
Yarmohammad
Tooski *
Assistant Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Islamic
Azad University South
Tehran branch, Tehran

Investigation of carbon nanotubes on mechanical properties of polymer composites

Abstract: In the present study, the effect of adding carbon nanotubes on the tensile and flexural behavior of basalt fiber reinforced epoxy composites was investigated. In the first step, in order to better interact the nanotubes with the epoxy surface, their surface modification was performed. Surface-modified carbon nanotubes were applied at different weight percentages relative to the matrix (0.1%, 0.3%, and 0.5%) and then the resulting mixtures were used as a matrix in the fabrication of basalt fiber-reinforced composites. In order to investigate the effect of adding carbon nanotubes on the mechanical behavior of composites, three-point tensile and flexural tests were performed on them. The results show that, firstly, the highest effectiveness of surface-modified carbon nanotubes on tensile and flexural strength is obtained in composites containing 0.3% by weight. Secondly, the positive effect of carbon nanotubes in a certain amount on flexural strength is greater than the effect of the same amount on the improvement of tensile strength. Energy was obtained in a sample containing 0.3% by weight.

Keywords: Nanocomposites, Carbon nanotube, Polymer Composite.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، افزودن نانو فیلرها به عنوان تقویت کننده ثانویه در ساختار کامپوزیت های الیافی با زمینه پلیمری توسط محققان زیادی انجام شده است. این دسته از کامپوزیت ها که دارای دو نوع تقویت کننده در مقیاس های میکرونی و نانو هستند تحت عنوان کامپوزیت های چندمقیاسی^۱ نامیده می شوند [۱]، [۲].

در بین نانوکامپوزیت ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت های پلیمری، خواص بی نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت های پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. در مواد مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف، الیاف آرمید (کولار)، کربن و شیشه به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. مواد مرکب ساخته شده با الیاف کولار هر چند با مقاومت و چقرمگی بالا یکی از بهترین سیستم های حفاظت بالستیکی را نسبت به وزن ارائه می دهند، ولیکن قیمت بالای آن ها استفاده آن ها را محدود می کند [۳]. دلیل دوم توسعه نانوکامپوزیت های پایه پلیمری و افزایش تحقیقات در این زمینه، کشف نانولوله های کربنی در سال ۱۹۹۱ میلادی است. استحکام و خواص الکتریکی نانولوله های کربنی به طور قابل ملاحظه ای با نانولایه های گرافیت و دیگر مواد پراکنده تفاوت دارد. این دسته از نانوکامپوزیت ها به دلیل خواص منحصر به فردی که دارند، به طور گسترده ای در صنایع خودرو، هوا و فضا و بسته بندی مواد غذایی گسترش یافته اند. از دیگر کاربردهای نانوکامپوزیت های پلیمری، پوشش های مقاوم به سایش، پوشش های مقاوم به خوردگی، پلاستیک های رسانا، حسگرها، آسترهای مقاوم در دمای بالا و غشاهای جداسازی گازها و سیالات نفتی می باشند [۴]. می توان به نوعی غشاء نانوکامپوزیتی ساخته شده از یک نوع پلیمر و نانولایه های سیلیکا اشاره کرد که توسط محققان دانشگاه کارولینای شمالی ساخته شده است [۵].

با افزودن عوامل تقویت کننده از جمله نانو ذرات آلی و غیر آلی مانند نانولوله های کربنی تک جداره و چند جداره، فیبرهای کربنی، نانو ذرات سیلیکا، نانو ذرات اکسید مس، نانو ذرات اکسید آلومینیوم و همچنین نانو ذرات اکسید آهن، عملکرد رزین ها را بهینه سازی کرد. با تقویت رزین ها توسط نانو مواد ذکر شده، خواص مکانیکی این رزین ها مانند چقرمگی شکست، مدول کشش و مدول خمش بهبود می یابد [۶].

در میان نانو فیلر ها نانولوله های کربنی چند جداره^۲ به علت دارا بودن خواص منحصر بفردی هم چون نسبت استحکام به وزن

بالا، و خواص الکتریکی و شیمیایی مناسب مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۷]. نانو لوله های کربنی به دلیل دارا بودن سطح ویژه بسیار بالا و نسبت طول به قطر بالا تمایل زیادی به آگلومره^۳ شدن دارند که باعث افزایش قابلیت آنها برای بهبود خواص مکانیکی می شود [۸].

اسلامی فارسانی و همکاران نمونه های صفحات مشبک کامپوزیتی زمینه پلیمری ساخته و اثر افزودن نانولوله های کربنی چندجداره در درصد های وزنی مختلف (۰، ۱، ۲/۵ و ۴ درصد) بر رفتار ضربه سرعت بالای این کامپوزیت ها را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور، ابتدا نانولوله های کربنی چندجداره با استفاده از همزن مکانیکی و امواج اولتراسونیک درون زمینه پلیمری توزیع شدند. سپس صفحات مشبک کامپوزیتی پلیمری حاوی نانولوله های کربنی با هندسه شش ضلعی با استفاده از روش لایه گذاری دستی ساخته شدند و آزمون ضربه سرعت بالا بر روی این صفحات به وسیله پرتابه استوانه ای با دماغه مخروطی صورت پذیرفت. حضور شبکه ریب های تقویت شده با الیاف کربن موجب محدود شدن سطح شکست و افزایش انرژی جذب شده می گردند. بهترین رفتار ضربه سرعت بالا برای صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی حاصل می شود. در این حالت، سرعت حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده طی فرآیند ضربه به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله های کربنی، افزایش یافت. همچنین به ازای افزودن نانولوله های کربنی چندجداره، میزان سطح تخریب صفحات مشبک کامپوزیتی کاهش یافت.

رزین وینیل استر به علت خواص خوب مکانیکی و مقاومت شیمیایی بالا، در بسیاری از ساختارهای کامپوزیتی و صنایع مختلف استفاده می شود. یکی از مهمترین اهداف اضافه کردن تقویت کننده های نانومتری به زمینه های پلیمری افزایش مدول الاستیک و استحکام آنها می باشد. نانولوله کربنی به دلیل ساختار صلب و نسبت منظری می تواند به طور موثری در افزایش مدول الاستیک و سفتی زمینه پلیمری عمل کند. به طوری که همزمان مدول الاستیک، استحکام کششی و میزان چقرمگی نانو کامپوزیت حاصل افزایش یابد [۹]. اصلی ترین مکانیزم شکست در کامپوزیت های لایه ای، تورق و یا لایه لایه شدن است. افزودن نانولوله های کربنی منجر به افزایش چقرمگی شکست کامپوزیت می شود و در نتیجه، مقاومت در برابر لایه لایه شدن کامپوزیت و شکست زمینه افزایش می یابد به همین دلیل است که پس از انجام آزمون ضربه سرعت بالا در صفحات مشبک کامپوزیتی حاوی نانولوله های کربنی میزان لایه لایه شدن در کامپوزیت کاهش یافته که در نتیجه منجر به کاهش سطح مقطع شکست می شود [۱۰].

^۱ Multiwall carbon nanotubes^۲ Agglomerate^۳ Multiscale composites

چندجداره، استحکام خمشی کامپوزیت حاوی ۵ لایه الیاف شیشه را ۵۰ درصد افزایش می دهد که این به دلیل توزیع خوب نانولوله کربنی در زمینه اپوکسی است، این در حالی است که افزودن ۱ و ۱/۵٪ حجمی نانولوله کربنی باعث کاهش استحکام خمشی شده است. هم چنین برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن افزودن ۱ درصد حجمی نانولوله کربنی منجر به افزایش ۳۴ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت شده است [۱۵].

ژانگ و همکاران به بررسی اثر افزودن نانولوله کربنی بر خواص کششی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن پرداختند و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی منجر به افزایش استحکام کششی کامپوزیت می شود. در این تحقیق نشان داده شده است که نانولوله کربنی منجر به بهبود انتقال تنش بین زمینه و فاز تقویت کننده الیاف می شود و در هنگام فرآیند شکست با بیرون زدگی و گسیختگی نانولوله کربنی، جوانه زنی و اشاعه ترک به تاخیر می افتد. با افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله های کربنی منجر به افزایش ۶ درصد سرعت حد بالستیک کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه می گردد و با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله های کربنی، سرعت حد بالستیک کاهش می یابد که ناشی از آگلومره شدن نانولوله های کربنی است [۱۶].

دهقان و همکاران به تحقیق درباره نانولوله کربنی چند دیواره به عنوان عامل تقویت کننده جهت بهبود رفتار کششی رزین وینیل استر پرداختند و نقش نانو لوله های کربنی بر رفتار تغییر شکل و شکست نانو کامپوزیت با استفاده از نمونه های کششی تقویت شده با ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی نانو لوله های کربنی طبق استاندارد ASTM D638 را بررسی نمودند. جهت تعیین نقش نانو لوله های کربنی بر روی مکانیزم تغییر شکل و شکست وینیل استر، سطح شکست نمونه ها را مورد ارزیابی میکروسکوپی بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می دهد که مدول یانگ، استحکام تسلیم و چقرمگی شکست وینیل استر وابسته به درصد نانولوله کربنی می باشد. بطوری که با افزودن ۱٪ وزنی نانو لوله کربنی به رزین وینیل استر، حدود ۸۲٪ کاهش استحکام کششی، ۵۳/۱۶٪ افزایش مدول یانگ و ۳۰٪ کاهش تافنس شکست ایجاد شد [۱۷]. ارزیابی میکروسکوپی بیان گر وابستگی رفتار شکست نانو کامپوزیت ساخته شده به حضور و میزان این نانو لوله ها بوده و هم چنین به رابطه ی منطقی بین خواص و آرایش سطح شکست نانو کامپوزیت اشاره دارد. ضمناً علاوه بر تشکیل حفرات و پدیده ی بهم پیوستن حفرات، مکانیزم های پل زدن، شکست، جدایش و بیرون آمدن نانو لوله ها و فیبری شدن رزین وینیل استر در سطوح شکست این نانو کامپوزیت ها به وضوح مشاهده شد [۱۷].

کیو و همکاران به بررسی اثر افزودن نانولوله کربنی بدون عامل و عامل دار بر خواص کششی کامپوزیت های اپوکسی الیاف شیشه پرداختند و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی عامل دار موجب افزایش ۱۴ درصدی استحکام کششی و ۲۰ درصدی مدول کششی کامپوزیت نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی می شود. در حالی که افزودن نانولوله کربنی بدون عامل منجر به افزایش ۸ درصدی مدول کششی و کاهش استحکام کششی به دلیل وقوع آگلومراسیون نانولوله های کربنی شده است [۱۱].

آویلز و همکارانش به بررسی فرآیند های اکسیداسیون و سیلانیزه کردن نانو لوله های کربنی چند دیواره برای کامپوزیت های نانو لوله کربنی چند دیواره وینیل استر پرداختند. کامپوزیت های پلیمری از نانو لوله های کربنی چند دیواره ی عامل دار و رزین وینیل استر ساخته شدند و آزمون فشار روی آن ها انجام شد و به این نتیجه رسیدند که بهبود خواص مکانیکی در فشار به دلیل کاهش طول نانو لوله های کربنی بعد از اکسیداسیون آن ها و فرآیندهای ساخت کامپوزیت، محدود خواهد شد و این امر با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد بررسی قرار گرفت [۱۲].

افزودن تنها ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی آمین دار منجر به افزایش ۲۵ درصدی استحکام خمشی و ۱۱ درصدی مدول خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه می شود و به ازای افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله کربنی، استحکام خمشی کامپوزیت ۱۵ درصد و مدول خمشی کامپوزیت ۱۰ درصد افزایش می یابد. در این تحقیق مقدار مطلوب نانولوله کربنی که بیشترین افزایش را در خواص مکانیکی ایجاد می نماید مقدار ۳ درصد وزنی گزارش شده است [۱۳] انرژی جذب شده برای صفحات فاقد نانولوله های کربنی و تقویت شده با ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی به ترتیب برابر با ۷۷/۴۲ و ۸۸/۳۹ ژول گزارش گردیده است. در حقیقت به ازای افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی افزایش ۲۲ درصدی در انرژی جذب شده مشاهده می شود. خواص ضربه سرعت بالا در مواد کامپوزیتی شدیداً وابسته به چقرمگی شکست، مدول الاستیک، استحکام کششی و کرنش شکست الیاف و زمینه، به علاوه فصل مشترک بین زمینه و الیاف، هستند. افزایش میزان انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک به ازای افزودن نانولوله های کربنی، ناشی از بهبود فصل مشترک بین زمینه و الیاف است [۱۴].

دالینا و همکاران به بررسی اثر افزودن نانولوله های کربنی در درصدهای حجمی مختلف (۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۱/۵) بر خواص خمشی کامپوزیت های اپوکسی-الیاف کربن و اپوکسی-الیاف شیشه ساخته شده به روش لایه گذاری دستی^۱، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد حجمی نانولوله کربنی

^۱ Hand lay-up method

مشبک کامپوزیتی پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی با هندسه شش ضلعی با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند و آزمون ضربه سرعت بالا بر روی این صفحات به وسیله پرتابه استوانه‌ای با دماغه مخروطی صورت پذیرفت. نتایج تجربی نشان داد که حضور شبکه ریب‌های تقویت‌شده با الیاف کربن موجب محدود شدن سطح شکست و افزایش انرژی جذب شده می‌گردند. بهترین رفتار ضربه سرعت بالا برای صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی حاصل می‌شود. در این حالت، سرعت حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده طی فرآیند ضربه به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی، افزایش یافت [۱۹]، [۲۰].

در تحقیق دیگری به بررسی افزودن نانولوله‌های کربنی که تحت عملیات سطحی با استفاده از ترکیبات سیلانی قرار گرفته اند، بر خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت پرداخته و نشان داده شد افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده منجر به افزایش ۱۰ درصدی مدول خمشی و ۱۴ درصدی استحکام خمشی می‌شود که این به دلیل توزیع خوب نانولوله‌های کربنی اصلاح شده و همچنین ایجاد پیوند مطلوب بین نانولوله‌ها و زمینه اپوکسی است [۹].

بر این اساس، نانوکامپوزیت‌هایی با شش درصد وزنی مختلف از نانوفیلر ساخته شد و نمونه‌های مربوطه تحت آزمون کشش قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله کربنی در درصد‌های پایین، تأثیر مثبت بر خواص مکانیکی پلیمر وینیل استر دارد به طوری که در ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چند جداره بهترین خواص مکانیکی حاصل گردید. در این حالت چقرمگی ماده ۵۲ درصد، استحکام کششی ۲۳ درصد و مدول الاستیک ۱۴ درصد افزایش یافت. به منظور تایید نتایج آزمایشگاهی و بررسی جامع نقش نانولوله کربنی در رفتار رزین وینیل استر، به وسیله میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی عکس برداری شد و مهمترین مکانیزم‌های شکست مورد بحث و بررسی قرار گرفت. هم‌چنین جهت ارائه یک مدل تئوری مناسب برای پیش‌بینی مدول الاستیک نانو کامپوزیت، نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های تئوری موجود مقایسه گردید و یک ضریب تصحیح جدید بر اساس تئوری هرسچ و نتایج آزمایشگاهی جهت کاربردهای صنعتی آینده ارائه شد. در این پژوهش در ابتدا ۶ درصد وزنی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربنی ساخته شده است. سپس آزمون کشش بر روی نانو کامپوزیت‌ها انجام گرفته است. استحکام نهایی، مدول الاستیک و چقرمگی نانو کامپوزیت‌ها محاسبه گردیده است. در ادامه تئوری‌های برای محاسبه مدول الاستیک و مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده است [۹].

استان و همکاران به بررسی تأثیر پارامترهای تزریق، نرخ کرنش و درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری پلی‌پروپیلن/نانولوله کربنی پرداختند. آن‌ها دمای مذاب و فشار تزریق را به عنوان پارامترهای تزریق و نرخ کرنش و درصد وزنی نانولوله کربنی را به عنوان دو پارامتر دیگر در نظر گرفتند و تأثیر این پارامترها را بر روی خواص مکانیکی شامل مدول یانگ، استحکام نهایی، کرنش نهایی، تنش در نقطه شکست و کرنش در نقطه شکست در سه نرخ کرنش متفاوت مطابق روش تاگوجی بررسی کردند. در تحقیق آنها، درصد‌های وزنی ۱، ۳ و ۵ به عنوان درصد‌های نانولوله کربنی در نظر گرفته شد. مطابق نتایج تحقیق آنها، درصد وزنی بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام، ۵٪ بوده است درحالی‌که ۱٪ وزنی نانولوله بهینه‌ترین حالت برای رسیدن به بیشترین کرنش بوده است [۱۸].

اینام و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانولوله کربنی دوجداره در درصد‌های وزنی خیلی کم (۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۱) بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن پرداختند و نشان دادند که افزودن ۰/۵۲ درصد وزنی نانولوله کربنی دوجداره اصلاح شده با عامل NH_2 به کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن، موجب بهبود ۵ درصدی استحکام خمشی و ۳۵ درصدی مدول خمشی کامپوزیت می‌شود [۱۱].

توستنسون و همکارانش به ساخت نانوکامپوزیت وینیل استر/نانولوله‌های کربنی پرداخت و خواص الکتریکی کامپوزیت‌های ساخته شده را بررسی کردند [۱۷].

۲- نتایج و بحث

افزودن نانولوله کربنی اصلاح شده با عامل سیلانی^۱ منجر به بهبود استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت به میزان ۳۴ درصد و مدول خمشی به میزان ۵۴٪ نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی می‌شود. افزودن نانولوله کربنی که تحت عملیات اکسیداسیون قرار گرفته است، استحکام خمشی را به میزان ۲۵ درصد و مدول خمشی را به میزان ۴۱ درصد افزایش می‌دهد. در حقیقت نتیجه این تحقیق آن است که عملیات سطحی با استفاده از ترکیبات سیلان تأثیر بیشتری بر افزایش خواص نسبت به عملیات اکسیداسیون داشته است نمونه‌های صفحات مشبک کامپوزیتی زمینه پلیمری ساخته و اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در درصد‌های وزنی مختلف (۰/۱-۰/۴-۰/۲۵) بر رفتار ضربه سرعت بالای این کامپوزیت‌ها را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور، ابتدا نانولوله‌های کربنی چندجداره با استفاده از همزن مکانیکی و امواج اولتراسونیک درون زمینه پلیمری توزیع شدند. سپس صفحات

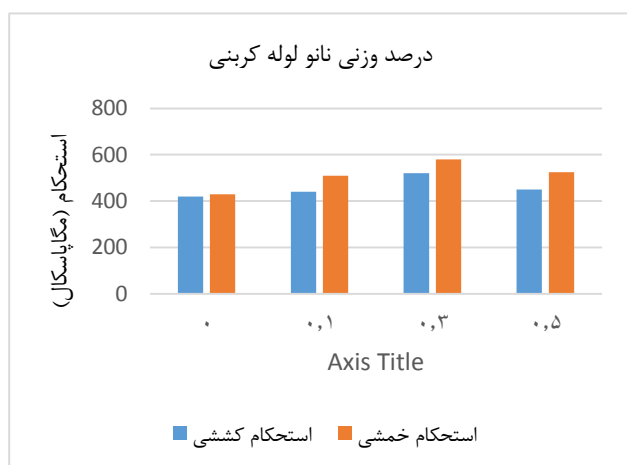
^۱ Silane

نام تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان قرار دادند. نتایج تحقیقات (استحکام و مدول) آزمون کشش و خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های کامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت حاوی درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی در جدول ۱ و به صورت نمودار در شکل ۱ و شکل ۲ آورده شده است [۲۳].

جدول ۱ خلاصه نتایج آزمون کشش و خمش سه نقطه ای

درصد وزنی نانولوله کربنی	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
۰	۲۵/۴۳۰	۸۲/۱۵	۷۷/۴۴۸	۸۸/۱۸
۰/۱	۳۶/۴۶۰	۵۶/۱۷	۷۱/۵۰۲	۷۶/۲۱
۰/۳	۷۵/۵۱۵	۷۳/۲۱	۸۶/۵۸۰	۵۸/۲۵
۰/۵	۸۳/۴۶۵	۲۲/۲۲	۹۱/۵۲۵	۲۱/۲۶

اثر افزودن نانولوله های کربنی بر تغییرات استحکام کششی و خمشی نمونه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود تغییرات استحکام نمونه ها چه خمشی و چه کششی با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی در زمینه ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است.



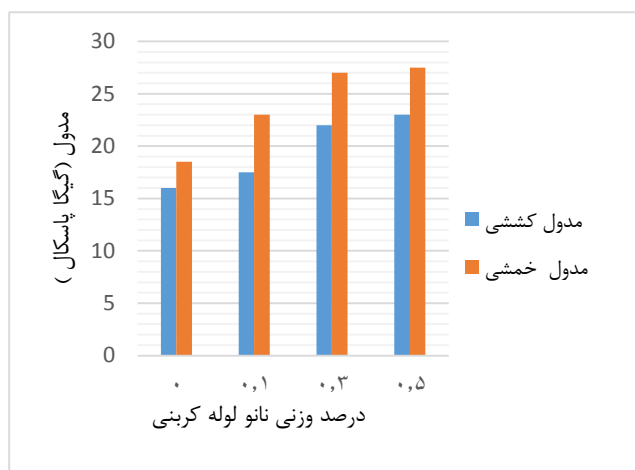
شکل ۱ تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر استحکام کششی و خمشی نمونه های کامپوزیتی [۲۳]

بیشترین میزان استحکام مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله است، به طوری که در ارتباط با این نمونه افزایش ۱۹ و ۸۲ درصدی به ترتیب برای استحکام کششی و خمشی در مقایسه با نمونه شاهد بدون افزودن نانولوله کربنی مشاهده می شود. افزایش استحکام کامپوزیت های الیافی ناشی از افزودن نانولوله های کربنی به دلیل بهبود خواص فصل مشترکی بین زمینه و الیاف بازالت بوده که منجر به آن می شود که انتقال بار از زمینه به الیاف به خوبی صورت پذیرد که این امر منجر به افزایش استحکام کامپوزیت نهایی می شود [۲۳].

بعد از انجام آزمایش های مختلف مکانیکی از قبیل کشش، فشار، شارپی، خمش سه نقطه ای، خستگی و سختی، اثر نانو ذرات بر روی خواص مکانیکی پلیمر مورد بررسی قرار داده اند. آزمایش سختی به دلیل غیر مخرب بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته و یک مدل جدید برای مرتبط کردن تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و نیروی بارگذاری به میکروسختی ارائه شده است. تحقیقات جواد پاینده پیمان و همکاران نشان می دهد، نانو خاکرس و نانو کربنات کلسیم که به عنوان پرکننده در درصدهای کم وزنی به مواد پلیمری اضافه می شوند، خواص مکانیکی آن ها را به نحو چشم گیری افزایش می دهند [۲۱] نتایج تحقیقات بودو و همکاران نشان داد که با رشد نانولوله های کربنی بر روی سطح الیاف شیشه، سرعت حد بالستیک کامپوزیت پلی اتیلن/الیاف شیشه به میزان ۱۱ درصد افزایش می یابد [۳].

هم چنین به منظور پیش بینی رفتار کامپوزیت ها به روش عددی، به دلیل وابستگی تسلیم مواد پلیمری به فشار هیدرواستاتیک، از معیار تسلیم دراکر-پراگر استفاده شده است. محاسبه ضرایب دراکر-پراگر نیاز به آزمایش های پیچیده مکانیکی دارد و اگر تنش تسلیم ماده بالا باشد، عملاً امکان پذیر نیست [۲۲]. به این منظور یک روش بر اساس بهینه سازی جعبه سیاه پر هزینه ارائه شده است که می تواند ضرایب دراکر-پراگر را محاسبه کند. در روش فوق با ایجاد ارتباط بین نرم افزار متلب و کد اباکوس، ضرایب دراکر-پراگر برای کامپوزیت محاسبه شده و اثرات نانوذرات نیز بر این ضرایب به دست آمده است. هم چنین با این روش توانستند، با انجام تنها آزمایش خمش سه نقطه ای، خواص مکانیکی کامپوزیت از قبیل مدول الاستیسیته، تنش تسلیم کششی، تنش تسلیم فشاری و نسبت پواسون پلاستیک را محاسبه کنند. پیش بینی حساسیت تنش تسلیم مواد پلیمری نسبت به دما و نرخ کرنش از پارامترهای مهم برای طراحی قطعات مکانیکی تحت بارگذاری ضربه ای می باشد [۱۴]. به این منظور آزمایش های مختلفی در محدوده دمایی ۲۵-۸۵ درجه سانتی گراد و در نرخ های استاتیکی، دینامیکی و ضربه ای با استفاده از دستگاه های سنتام و هاپکینسون فشاری داده اند. در ادامه ضرایب مدل ری-آیرینگ و اشتراکی که در پلیمرهای آمورف و نیمه کریستال استفاده می شود، محاسبه شده است. هم چنین یک مدل جدید به منظور پیش بینی اثر نانوذرات بر خواص مکانیکی ترموپلاستیک ها ارائه شده است و با ترکیب این مدل با مدل های ری-آیرینگ و اشتراکی دو مدل جدید به منظور پیش بینی استحکام مواد کامپوزیتی در دما، نرخ کرنش و مقدار پرکننده ارائه شده است [۲۱].

اثر افزودن نانولوله های کربنی چندجداره در مقادیر مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری های کششی و خمشی مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور برهم کنش مطلوب تر نانولوله ها با زمینه اپوکسی، ابتدا اصلاح سطحی آن ها به وسیله عامل کوپلینگ ارگانوسیلانی به



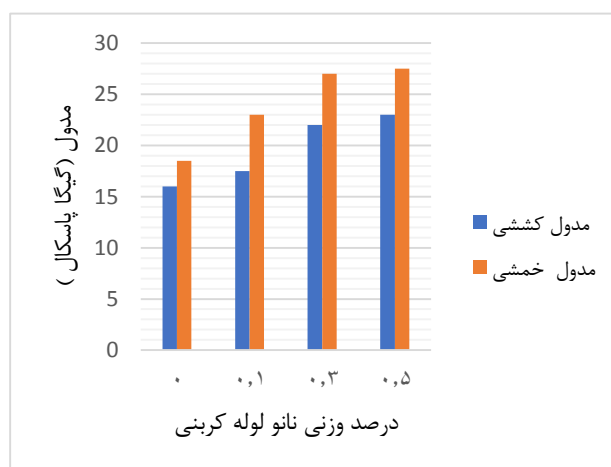
شکل ۳ تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه‌های کامپوزیتی [۲۳]

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود به ازای افزودن یک درصد وزنی نانولوله کربنی مدول کششی و خمشی کامپوزیت به ترتیب به میزان ۱۱ و ۵۱ درصد و در ازای افزودن سه درصد وزنی نانولوله کربنی به ترتیب به میزان ۳۰ و ۵۳ درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی افزایش یافته است. در مقادیر بیشتر نانولوله های کربنی (پنج درصد وزنی) مدول کششی و خمشی کامپوزیت به ترتیب به میزان ۴۰ و ۹۳ درصد افزایش یافته است که این روند نشان دهنده کاهش نرخ افزایش مدول در درصدهای بالاتر نانولوله های کربنی است. حضور نانولوله های کربنی در زمینه باعث محدود شدن حرکت زنجیره های پلیمری شده که در نتیجه باعث افزایش میزان سفتی ماده می شود. هم چنین به علت مدول بسیار بالای نانولوله های کربنی در مقایسه با زمینه اپوکسی افزایش مدول (کششی و خمشی) نانوکامپوزیت حاصله مورد انتظار است [۲۳].

کاهش نرخ افزایش مدول به ازای افزودن درصد وزنی بیشتر نانولوله کربنی احتمالاً ناشی از آگلومره شدن نانولوله های کربنی درون زمینه بوده که از تاثیرگذاری آنها در بهبود سفتی ماده کاسته است [۲۴].

با افزایش درصد وزنی نانولوله ها از یک درصد به سه درصد افزایش میزان مدول کششی و خمشی به ترتیب ۲۴ و ۷۱ درصد و با افزایش درصد وزنی نانولوله ها از ۰/۳ به ۰/۵ میزان افزایش مدول کششی و خمشی هر دو تنها حدود ۳ درصد بوده است [۲]. اثر نانولوله های کربنی بر استحکام کشش و مدول یانگ نمونه های وینیل استر تقویت شده با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله های کربنی چند دیواره در شکل ۳ ارائه شده است با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی، استحکام کششی و چقرمگی شکست کم شده و مدول یانگ افزایش می یابد. از جمله دلایلی که می توان برای کاهش استحکام و چقرمگی شکست این نانوکامپوزیت ها نام برد، توزیع نامناسب نانولوله ها و تجمع این تقویت کننده ها می باشد. از آن جا که مساحت سطح

در حقیقت حضور نانولوله های کربنی از طریق ایجاد پلی بین الیاف و زمینه باعث درهم گیر شدن و قفل شدن آنها می شود. از سوی دیگر، هنگامی که کامپوزیت تقویت شده با الیاف تحت آزمون مکانیکی قرار می گیرد بخش عمده بار اعمالی روی الیاف متمرکز شده و الیاف به عنوان جز اصلی تحمل کننده بار به شمار می رود. تقویت زمینه توسط نانولوله های کربنی اصلاح سطحی شده باعث آن می شود که تمرکز تنش روی الیاف و همچنین در فصل مشترک الیاف- زمینه کاهش یافته و تنش لازم برای پارگی الیاف و هم چنین جدایش فصل مشترک کاهش یافته و در نتیجه استحکام نمونه افزایش یابد. اما افزودن بیشتر نانولوله های کربنی (۰/۵ درصد وزنی) منجر به کاهش استحکام (کششی و خمشی) کامپوزیت در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی می شود. کمتر بودن میزان استحکام در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی را می توان به کاهش میزان چسبندگی الیاف/زمینه به علت تشکیل یک شبکه غیرپیوسته در زمینه و همچنین تشکیل عیوب و کلوخه های نانولوله ها در درصدهای وزنی بالای نانو فیبر نسبت داد. نتیجه دیگری که با توجه به شکل ۱ مشهود است آن است که تأثیر افزودن نانولوله های کربنی در یک درصد وزنی مشخص بر استحکام خمشی نمونه بیشتر تأثیر آن بر استحکام کششی همان نمونه است. این بدان علت است که تحت آزمون خمش سه نقطه ای، نمونه بالای محور خنثی تحت فشار و زیر آن تحت کشش قرار می گیرد. در این حالت زمینه نقش موثرتری را در مقایسه با زمانی که نمونه تحت کشش تک محوری قرار می گیرد بازی می کند. بنابراین با تقویت زمینه توسط نانولوله های کربنی بهبود بیشتری در استحکام خمشی نمونه در مقایسه با استحکام کششی حاصل می شود تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه های کامپوزیتی در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۲ تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه های کامپوزیتی [۲۳]

تزریق بر استحکام کششی و سختی، نمونه‌ها در درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی شامل ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد و شرایط فرآیندی مختلف شامل فشار تزریق و دمای تزریق بر پایه‌ی طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، قالب‌گیری شدند. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری تزریقی، تحت آزمایش کشش و سختی قرار گرفتند. مطابق نتایج به‌دست آمده از آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی موثرترین پارامتر بر استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام کششی نمونه‌ها تقریباً به میزان ۳۱٪ و با افزودن ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی، سختی به میزان ۱۵٪ بهبود یافت. نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که درصد وزنی نانولوله کربنی با ۶۸٪ و ۷۶٪ تاثیرگذاری به ترتیب روی داده‌های استحکام کششی و سختی، موثرتر از شرایط فرآیندی می‌باشد [۲۵].

پخش مطلوب نانولوله‌های کربنی درون زمینه اپوکسی باعث می‌شود که آنها به علت دارا بودن نسبت طول به قطر بالا به عنوان پلی مانع از بازشدن دهانه ترک در حال رشد شوند. در این حالت انرژی بیشتری برای اشاعه ترک نیاز است که باعث می‌شود میزان جذب انرژی نمونه افزایش پیدا کند. این مکانیزم تحت عنوان مکانیزم پلزنی ترک اطلاق می‌شود که شماتیک آن در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۶].

افزودن مقادیر بالای نانولوله کربنی به دلیل توزیع نامطلوب درون زمینه اپوکسی منجر به ایجاد آگلومره‌های متشکل از نانولوله‌های کربنی می‌شود. آگلومره‌ها به عنوان مناطق تمرکز تنش عمل کرده و منجر به کاهش انرژی مورد نیاز برای اشاعه ترک می‌شوند. همچنین آگلومره‌ها باعث هم گرایی ترک‌ها به عنوان مناطق اولیه ایجاد ترک عمل می‌کنند که باعث افت انرژی شکست کامپوزیت می‌شوند [۲۴].

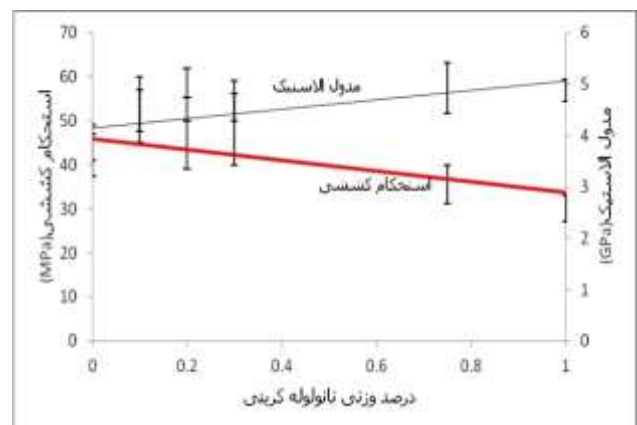
۳- نتیجه گیری

نتایج حاصله نشان می‌دهد که اولاً بیشترین میزان اثربخشی نانولوله‌های کربنی اصلاح سطح شده بر استحکام کششی و خمشی در کامپوزیتهای حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی حاصل شده است. ثانیاً تأثیر مثبت نانولوله‌های کربنی در یک مقدار مشخص بر استحکام خمشی بیشتر از تأثیر همان میزان نانولوله کربنی بر بهبود استحکام کششی بود. ثالثاً روند تغییرات انرژی شکست با افزایش مقدار نانولوله کربنی افزوده شده مشابه استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها بود، بیشترین میزان جذب انرژی در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی با بهبود ۳۵٪ نسبت به نمونه شاهد حاصل شد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی از ۰/۲۵ درصد وزنی استحکام نهایی روند کاهشی پیدا کرده است. بر خلاف مواد معمولی نانو کامپوزیت حاوی

ویژه ی نانولوله‌های کربنی چندین برابر بیشتر از عوامل تقویت‌کننده ی دیگر می‌باشد، این امر منجر به تمایل بیشتر نانولوله‌ها در چسبیدن به یکدیگر خواهد شد. در اثر تجمع و تشکیل آگلومره، سطوح ویژه ی آنها کم می‌شود. از آنجا که انتقال نیرو از طریق فصل مشترک نانو لوله ها و رزین انجام می‌شود، با کاهش این سطوح، انتقال تنش افت پیدا کرده و منجر به کاهش استحکام کششی می‌شود. از طرفی این آگلومره ها به صورت مراکز تمرکز تنش در نمونه عمل کرده و منجر به کاهش چقرمگی شکست نانو کامپوزیت می‌شوند.

از آنجا که نانو لوله‌های کربنی، مدول الاستیکی برابر با ۹۱۰GPA دارند، با جای گیری این مواد در رزین وینیل استر، مدول الاستیک نانو کامپوزیت به شدت افزایش می‌یابد. از آنجا که تعیین مدول الاستیک در تغییر شکل‌هایی در حد الاستیک انجام می‌گیرد، لذا بحث جدایش عوامل تقویت‌کننده از رزین که خود منجر به کاهش عملکرد نانو لوله‌ها بعنوان عوامل تقویت‌کننده و همچنین کاهش استحکام و انرژی شکست می‌شود، مطرح نیست. زیرا در تغییر شکل الاستیک، تنش‌های اعمالی به نمونه در حدی نیستند که بتوانند جدایش نانو لوله‌ها از رزین وینیل استر را موجب شوند. بنابراین طبق قانون مخلوط‌ها، دلیل افزایش مدول یانگ نانو کامپوزیت را می‌توان مدول یانگ بسیار بالای نانو لوله‌های کربنی نام برد. توزیع مناسب نانولوله‌ها نیازمند نیروی برشی بسیار قوی می‌باشد که باید دقت شود به اندازه ی کافی و مناسب بوده تا در طول نانو لوله تخریب ایجاد نشود. در اثر استفاده از همزن آلتراسونیک و همزن برشی قوی، سطح نانولوله‌ها دچار تخریب شده و از عیوب ایجاد شده در سطح، ترک‌ها شروع و انتشار می‌یابند.



شکل ۴ اثر نانولوله‌های کربنی بر استحکام کششی و مدول یانگ نمونه‌های وینیل استر تقویت شده [۲۶]

به این منظور، پلیمر پلی‌آمید ۶ و نانولوله‌های کربنی چند دیواره در درصدهای وزنی مختلف به روش ذوبی در دستگاه اکسترودر دو مارادونه با هم اختلاط پیدا کردند. به‌منظور بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره و شرایط فرآیندی

- [10] Aghamohammadi ,H. Eslami-Farsani, R and Tcharkhtchi, A, The effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior of basalt fibers metal laminates: An experimental study, vol. 98, p. 102538, Apr. doi: 10.1016/J.IJADHADH.2019.102538, (2020).
- [11] Q. Zhu. C. Zhang, J. L. Curiel-Sosa, T. Quoc Bui, and X. Xu, Finite element simulation of damage in fiber metal laminates under high velocity impact by projectiles with different shapes, *Compos. Struct.*, vol.214, pp.73–82,doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.009,(2019).
- [12] Avilés, F. Cauich-Rodríguez ,J. V, Rodríguez-González, J. A.and May-Pat ,A., Oxidation and silanization of MWCNTs for MWCNT/vinyl ester composites., *Express Polym. Lett.*, vol. 5, no. 9, (2011).
- [13] Zainuddin ,S. Optimization of mechanical and thermo-mechanical properties of epoxy and E-glass/epoxy composites using NH₂-MWCNTs, acetone solvent and combined dispersion methods, *Compos. Struct.*, vol. 110, pp. 39–50 ,(2014).
- [14] Ahmadi, H. G, Liaghat, and Charandabi, S. C, High velocity impact on composite sandwich panels with nano-reinforced syntactic foam core, *Thin-Walled Struct.*, vol. 148, p. 106599, (2020).
- [15] Wan Dalina, W. A. D, Mariatti ,M, Ramlee, R, Ishak ,Z. A. M, and Mohamed, A. R, Comparison on the Properties of Glass Fiber/MWCNT/Epoxy and Carbon Fiber/MWCNT/Epoxy Composites, in *Advanced Materials Research*, , vol.58, pp. 32–39, (2014).
- [16] Zhang, J, Ju, S . Jiang ,D, and Peng ,H.-X, Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes, *Compos. Part B Eng.*, vol. 54, pp. 371–376 ,(2013).
- [17] Sharma ,A. P and S. H. Khan, Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates, *Polym. Test.*, vol. 70, pp. 320–347 ,(2018).
- [18] Stan ,F, Sandu, L. I, and Fetecau ,C, Effect of processing parameters and strain rate on mechanical properties of carbon nanotube-filled polypropylene nanocomposites, *Compos. Part B Eng.*, vol. 59, pp. 109–122, (2014).
- [19] Kim ,M.-T and Rhee ,K.-Y, Flexural behavior of carbon nanotube-modified epoxy/basalt composites, *Carbon Lett. (Carbon Lett.)*, vol. 12, no. 3, pp. 177–179, (2011).
- نانولوله کربنی با افزایش استحکام نهایی تردتر نشده است و کرنش آن نیز افزایش یافته است.
- مطابق نتایج به دست آمده از آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله های کربنی موثرترین پارامتر بر استحکام کششی و سختی نمونه های نانوکامپوزیتی می باشد.
- #### ۴- مراجع
- [1] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R, On the mechanical characterizations of unidirectional basalt fiber/epoxy laminated composites with 3-glycidoxypolytrimethoxysilane functionalized multi-walled carbon nanotubes-enhanced matrix, *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 5, doi: 10.1177/0731684415619493, (2016).
- [2] Khosravi, H and Eslami-Farsani, R ,An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 3, no. 1, pp. 11–20, (2016).
- [3] Domun ,N, Ballistic impact behaviour of glass fibre reinforced polymer composite with 1D/2D nanomodified epoxy matrices, *Compos. Part B Eng.*, vol. 167, pp. 497–506 ,(2019).
- [4] Alikhani ,A and Basaeri, A,The effect of pre-strain and number of SMA wires on the compression properties of glass-epoxy conical grid composites, *Compos. Struct.*, vol. 262, p. 113624, Apr., doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113624.(2021).
- [5] Thakur, V. K and Thakur, M. K, Eco-friendly Polymer Nanocomposites : Chemistry and Applications, *Adv. Struct. Mater.*, vol. 74, (2015).
- [6] Handbook of Composites, (1998).
- [7] Gao, Y ,Toughening and self-healing fiber-reinforced polymer composites using carbon nanotube modified poly (ethylene-co-methacrylic acid) sandwich membrane, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 124, p. 105510, Sep., doi :10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105510. 2019)
- [8] Shokrieh, M. M. Saedi, A, and Chitsazzadeh ,M, Evaluating the effects of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of chopped strand mat polyester composites, *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 274–279 ,(2014).
- [9] Setoodeh, A. Sokhandani, N, and Zebarjad, S. M, Theoretical and experimental study on the effect of multi-walled carbon nanotubes on improving the tensile properties and toughness of Vinyl ester resin, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 5, no. 4, pp. 539–550 , (2019).

- [24] Subagia ,I. D. G. A. Tijing L. D, Kim Y, Kim ,C. S, Vista , P.IV ,F, and Shon ,H. K, Mechanical performance of multiscale basalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles, *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 611–617, (2014).
- [25] Esmaili, P. Azdast T. Doniavi ,A, Hasanzadeh, R, Mamaghani, S, and Eungkee Lee ,R, Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 2, no. 3, pp. 67–74, (2015).
- [26] Khajeh Arzani H. Kabiri Ataabadi ,A. R, and Chaparian, Y, Investigation of Effect of Structural Parameters on High Velocity Impact Resistance of Fiber Metal Laminates, *Modares Mech. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 1529–1538 ,(2019).
- [20] Amjadi ,S. Emaminia ,S, Heyat Davudian S, Pourmohammad, S, Hamishehkar ,H, and Roufegarinejad, L, Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles, *Carbohydr. Polym.*, vol. 216, pp. 376–384, Jul., doi: 10.1016/J.CARBPOL.2019.03.062, (2019).
- [21] Payandehpeyman ,J. Majzoobi ,G, and Bagheri ,R, Experimental, analytical and numerical investigation of polypropylene nanocomposites microhardness, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 3, no. 2, pp. 165–176 ,(2016).
- [22] Li, X, Zhang. X, Guo, Y, Shim ,V. P. W, Yang J, and Chai ,G. B., Influence of fiber type on the impact response of titanium-based fiber-metal laminates, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 114, pp. 32–42, (2018).
- [23] Khosravi ,H. Eslami-Farsani ,R, and Ebrahimnezhad-Khaljiri ,H, An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings, *J. Sci. Teh. Compos.*, vol. 3, pp. 187–194, (2016).



مروری بر انواع فراماده، روش ساخت افزایشی و کاربرد آن در صنعت خودرو

شکوه دزیانیان

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمد آزادی*

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده: پیشوند "meta" در کلمه "metamaterial" در زبان یونانی به معنای "فراتر" از ماده است. بنابر این متامتریال یا فرا مواد خواصی فراتر از مواد طبیعی دارند. خواص این مواد از ماده‌ای که از آن تشکیل شده است استخراج نمی‌شود اما خواص آن‌ها وابسته به ساختار آن‌ها است. این ساختار خاص در فرا مواد از تکرار و کنارهم قرارگرفتن جزیها یا آرایه‌های مشابه تولید می‌شود که به آن سلول گفته می‌شود. لذا فرا مواد دارای ساختار بسیار پیچیده است. در نتیجه توانایی بالای تولیدات افزایشی در تولید ساختارهای پیچیده باعث شده توجه‌ها به سمت این تکنولوژی جلب شود. انواع مختلف فرا مواد وجود دارد که به طور کلی به چهار گروه تقسیم می‌شوند که هر کدام کاربرد وسیعی در زمینه‌ها مختلف از جمله صنایع دفاعی، خودرویی، هوافضا و پزشکی دارند. هدف از تدوین این مقاله آشنایی با انواع فرا مواد، سلول‌های متفاوت، کاربردها و روش ساخت این مواد به صورت جامع و دسته بندی شده است. این مقاله همچنین به طور خاص کاربرد انواع فرا مواد را در صنعت خودرو بررسی کرده است.

واژه های راهنما: فرا ماده، پرینتر سه بعدی، پرینتر چهار بعدی، پرینتر پنج بعدی، صنعت خودرو.

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷

Shokouh Dezania
MSc. Student

Mohammad

Azadi*

Associate Professor
Faculty of Mechanical
Engineering, Semnan
University, Semnan

A review on metamaterial types, additive manufacturing technique and its application in automotive industry

Abstract: The prefix "meta" in "metamaterial" is the Greek word, which means beyond the material. Therefore, metamaterials have properties beyond natural materials. The properties of these materials are not affected by the material from which they are composed, however, their properties depend on their structure. This particular structure in metamaterials is produced by the repetition of similar components or arrays called cells. Therefore, metamaterials have a very complex structure. As a result, the high ability of additive manufacturing to fabricate complex structures has drawn attention to this technology. There are different types of metamaterials that are generally divided into four groups, each of which is widely used in various fields, including defense, automotive, aerospace, and medicine. The purpose of compiling this article is to get acquainted with the types of metamaterials, different cells, applications, and methods of manufacturing these materials comprehensively and categorized. This article also specifically examines the application of metamaterials in the automotive industry.

Keywords: Metamaterial, 3D-printer, 4D-printer, 5D-printer, Automotive industry.

۱- مقدمه

۱-۲- فرامواد الکترومغناطیسی

میدان الکترومغناطیسی با توجه به خصوصیات ماکروسکوپی گذردهی الکتریکی^۱ (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی^۲ (μ) مواد تعیین می‌شود. مواد بر اساس این دو پارامتر، در چهار گروه، مطابق شکل ۱ طبقه‌بندی می‌شوند. لذا فرامواد الکترومغناطیسی، در گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند.

فرامواد یک منفی (SNG)^۳ این فرامواد یا دارای ϵ یا μ منفی می‌باشند. این فرامواد به دلیل ماهیت پراکندگی، قابلیت تغییر پارامترهایی همچون ضریب شکست، گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی با تغییر فرکانس را دارند.

فرامواد دو منفی (DNG)^۴: موادی که ϵ و μ منفی دارند. ترکیبی از دو لایه SNG در یک لایه شکل دیگری از مواد فرعی DNG را ایجاد می‌کند. این مواد به عنوان فرامواد شاخص منفی نیز شناخته می‌شوند. نام‌های دیگر DNGها مواد چپ دست و یا موادی با ضریب شکست منفی است.

انواع دیگر فرامواد الکترومغناطیسی نیز، وجود دارد که عبارتند از:

- فرامواد الکترومغناطیسی با فاصله باند^۵
- فرامواد دوگانه ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک^۶
- فرامواد کایرال^۷
- فرامواد تراهرتز^۸

از کاربردهای فراماد الکترومغناطیسی در صنعت خودرو می‌توان به سیستم‌های ایمنی اشاره کرد. برای سیستم‌های ایمنی معمول کنترل کروز، یک میدان دید که حدود ۲۰ درجه را در محدوده ۱۵۰ متر در یک باند موج میلی متر (۷۶-۷۷ گیگاهرتز) پوشش می‌دهد لازم است. با این حال، سیستم‌های جدید کروز کنترل که با استفاده از فرامواد طراحی می‌شوند به میدان دید تا ۶۰ درجه در دامنه ۶۰ متر نیاز دارند [۵]. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، فرامواد مغناطیسی کاربردهای دیگری نیز در صنعت خودرو دارند از جمله سیستم نشان‌دهنده فشار لاستیک و موارد دیگر که در شکل ۲، به صورت موردی نشان داده شده است.

۲-۲- فرامواد اکوستیک

پیشوند "meta" در کلمه "metamaterial" در زبان یونانی به معنای "فرا" از ماده است. بنابراین متامتریال یا فرامواد خواص عجیب و غریب و فراتر از مواد طبیعی دارند. خواص فرامواد از ماده‌ای که از آن تشکیل شده است، استخراج نمی‌شود اما خواص آن‌ها وابسته به ساختار آن‌ها است. فرامواد به دست بشر به گونه‌ای تولید می‌شوند که دارای خواص غیرمعمولی باشند که در طبیعت یافت نمی‌شود. نمونه‌های محدود فرامواد طبیعی مثل چوب پنبه با ضریب پواسون نزدیک به صفر و تحت فشار، انبساط جانبی کمی را نشان می‌دهد [۱].

انواع مختلف فرامواد تا کنون طراحی شده است اما چیزی که در بین فرامواد مشترک است، مفهوم سلول است. فراماده‌ها از تکرار و کنارهم قرار گرفتن جز‌ها یا آرایه‌های مشابه تولید می‌شوند. کوچکترین آرایه واحد تکراری، سلول نام دارد. ساختارهای سلولی به طور گسترده در سیستم‌های طبیعی، از جمله چوب، استخوان انسان و منقار پرندگان گسترش یافته است. مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد با الهام گرفتن از طبیعت می‌توان ساختارهای سلولی را به نحوی طراحی کرد که ویژگی‌های مکانیکی مانند وزن سبک، جذب انرژی زیاد، کنترل ارتعاش و عملکرد گرمایی پیشرفته را به دست آورد [۲].

اصلی‌ترین هدف این مقاله مروری بر فرامواد، دسته‌بندی و معرفی آن‌ها است. هدف دوم مقاله نیز کاربرد فرامواد در صنعت خودرو است. هر کدام از انواع فرامواد کاربردی در صنعت خودرو دارند که همگی بیان شده است. بنابراین، می‌توان موارد زیر را به عنوان نکات مهم این پژوهش مطرح نمود:

مطالعه‌ای بر فرامواد، دسته‌بندی و معرفی انواع فرامواد کاربرد فرامواد در صنعت خودرو

۲- انواع فرامواد

به طور کلی فرامواد به چهار دسته تقسیم می‌شوند [۳].

- فرامواد الکترومغناطیسی
- فرامواد اکوستیک
- فرامواد مکانیکی
- فرامواد حرارتی

⁵ Electromagnetic Band Gap Metamaterials

⁶ Bi-isotropic and Bi-anisotropic Metamaterials

⁷ Chiral Metamaterials

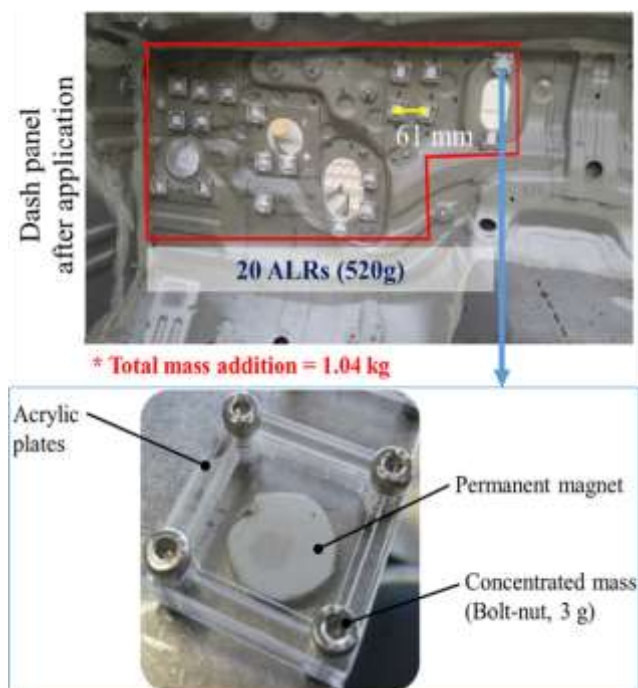
⁸ Terahertz Metamaterials

¹ Permittivity

² Permeability

³ Single Negative Metamaterial (SNG)

⁴ Double Negative Metamaterial (DNG)



شکل ۳ داشبرد و سلول واقعی ساخته شده [۶]

همانطور که قابل مشاهده است، برای ساخت یک سلول اکوستیک از یک صفحه فنری، چهار جرم متمرکز به اندازه ۳ گرم واقع در گوشه‌های صفحه فنری و یک آهنربای دائمی برای اتصال به صفحه داشبرد استفاده شده است. با تکرار این سلول می‌توان داشبرد کامل را تولید کرد.

پس از ساخت داشبرد، ضربه‌ای به آن اعمال شده و پاسخ لرزش و فشار صوتی اندازه‌گیری شده است. در نتایج اندازه‌گیری، تحركات ارتعاشی ۵-۱۳ دسی‌بل و فشارهای صوتی ۷-۱۶ دسی‌بل کاهش یافته است [۶].

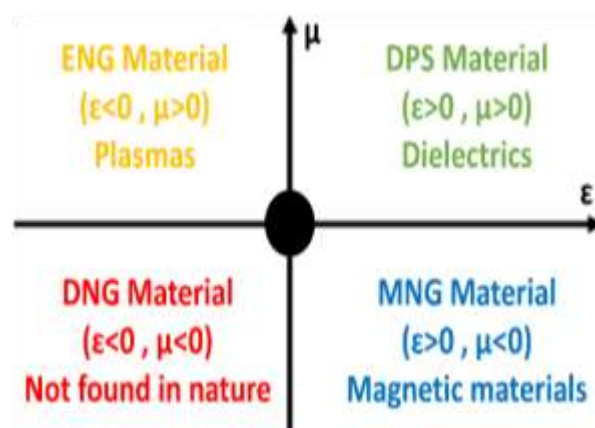
۲-۳- فرامواد مکانیکی

مواد معمولی به طور کلی با چهار ثابت الاستیک، مدول یانگ (E)، مدول برشی (G)، مدول بالک (K) و نسبت پواسون (ν) در ارتباط هستند که سه مورد آخر با سفتی، استحکام و قابلیت فشردگی یک ماده مطابقت دارد. بر این اساس انواع فرامواد مکانیکی به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که عبارتند از [۳، ۷]:

- فرامواد با ضریب پواسون منفی یا اگزتیک ($G \gg K$)
- فرامواد با مدول برشی منفی یا پنتامود ($G < K$)
- فرامواد با تراکم پذیری و سفتی منفی ($-4G/3 < K < 0$)

فرامواد اکوستیک یا فراصوتی به دلیل کاربردهایی در پنهان کردن، کنترل سروصدا و ارتعاش مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد با ساختارهای مختلف تولید شده‌اند و خواصی از جمله ضریب شکست منفی، مدول الاستیک منفی و مدول بالک منفی که در مواد معمولی مقدار مثبتی دارند می‌باشند. این ویژگی می‌تواند منجر به ضریب شکست صوتی منفی و سایر خصوصیات عجیب و غریب شود که در طبیعت یافت نمی‌شود [۱].

از جمله کاربردهای این نوع فرامواد در داشبرد خودرو است. داشبرد دارای یک ساختار بسیار پیچیده است و وظیفه اصلی آن جلوگیری از ورود صدا و لرزش در محفظه موتور به محفظه سرنشین است. در شکل ۳ یک سلول واحد و مجموعه داشبرد ساخته شده به کمک این سلول نشان داده شده است.

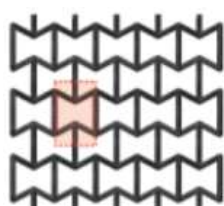


شکل ۱ دسته بندی مواد الکترومغناطیسی [۴]

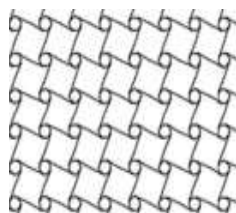


شکل ۲ کاربرد فرامواد در خودرو [۵]

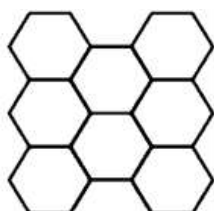
۱-۳-۲- فرامواد اگزتیک



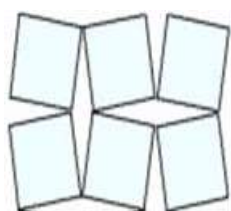
ب



الف



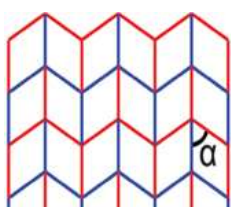
ت



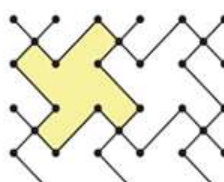
پ



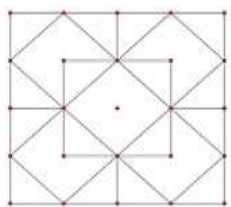
ج



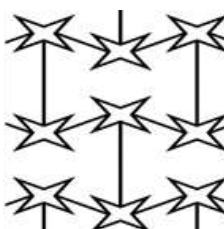
ث



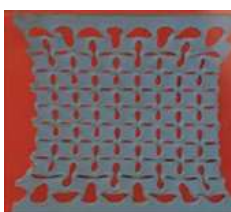
ح



چ



د



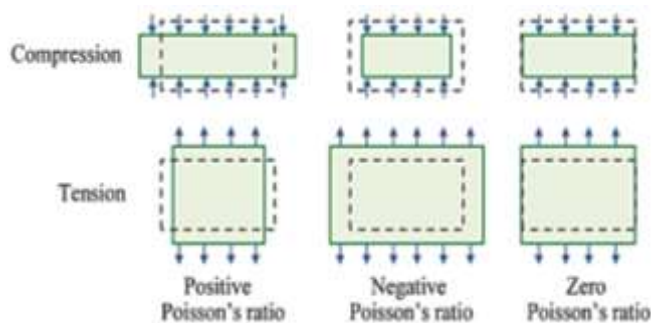
خ

ضریب پواسون نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری است. این نسبت عددی مثبت است و بدین معناست که در اثر اعمال تنش کششی عمودی، اندازه قطعه در راستای نیرو افزایش و در راستای عمود بر نیرو کاهش می‌یابد. از جمله فرامواد مکانیکی، موادی با ضریب پواسون منفی است که با نام اگزتیک شناخته می‌شوند [۱]. اگزتیک‌ها در هنگام اعمال تنش کششی عمودی، در راستای عمود بر نیرو، ضخیم‌تر می‌شوند. همچنین ضریب پواسون صفر که نشان دهنده ثابت ماندن اندازه قطعه در راستای عمود بر نیرو است در این دسته از مواد قرار می‌گیرند. شکل ۴ برای درک بهتر از این موضوع ارائه شده است.

مواد با نسبت پواسون منفی دارای خصوصیات مکانیکی از جمله افزایش مقاومت فرورفتگی، مقاومت در برابر شکستگی، مدول برشی عرضی بالا، خصوصیات دینامیکی پیشرفته مانند: جذب انرژی در اثر ضربه، عملکرد میرایی موج و غیره است [۸]. ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی متعددی برای فرامواد اگزتیک ارائه شده است (شکل ۵).

۲-۳-۲- فرامواد پنتامود

فرامواد پنتامود برای اولین بار توسط میلتن و چرکایف در سال ۱۹۹۵ طراحی شد. آن‌ها طراحی به صورت آرایش خاصی از چهار میله مخروطی در یک ساختار شبکه‌ای از نوع الماس را ارائه دادند که میله‌ها فقط در ابتدا و انتها خود و تنها در یک نقطه‌ای به شبکه متصل می‌شوند [۱۶ و ۳]. این شبکه پنتامود در شکل ۶ نشان داده شده است که می‌تواند دارای سطح مقطع‌های مختلف باشد.



شکل ۴ تغییر هندسی تحت ضریب پواسون مثبت، منفی و صفر

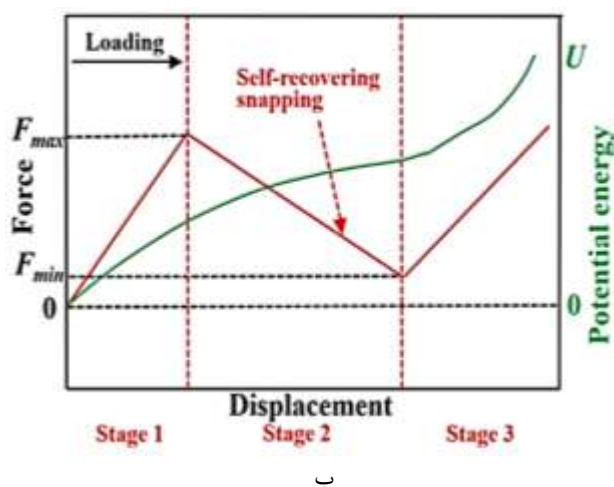
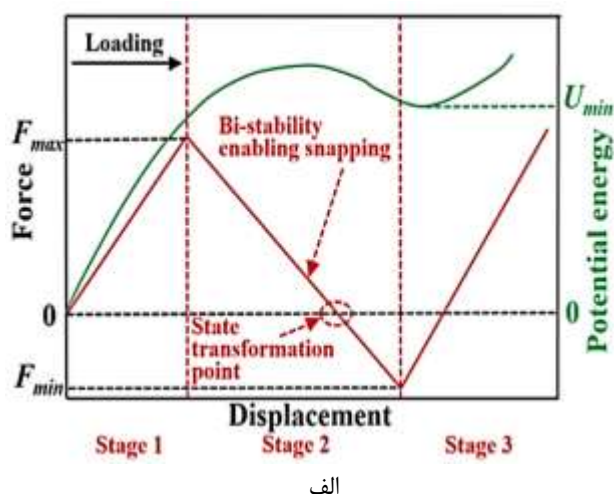
[۸]

شکل ۵ فرامواد اگزتیک (الف) کایرال [۹]، (ب) پاپیونی [۱۰]، (پ) سازه‌های صلب یا نیمه صلب چرخشی [۱۱]، (ت) لانه زنبوری [۱۲]، (ث) اورینگامی [۱۳]، (ج) کریگامی [۱۴]، (چ) فراکتال [۱۵]، (ح) چرخنده ناقص [۱۱]، (خ) بستر الاستیک [۱۱] و (د) ستاره‌ای [۱۰]

فشار است. معمولاً وقتی فشار افزایش می‌یابد، یک ماده از همه جهات منقبض می‌شود.

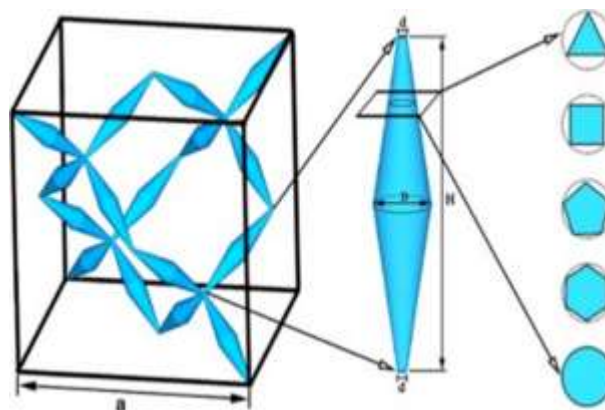
با این وجود مواد استثنایی وجود دارد که تحت فشار هیدرواستاتیک در یک یا دو جهت منبسط می‌شوند. چنین پدیده‌هایی به ترتیب تحت فشار پذیری خطی منفی و سطح فشار منفی شناخته می‌شوند [۱۹]. شکل ۸ برای درک بهتر از این مفهوم ارائه شده است. با افزایش وسایل نقلیه، تعداد تصادفات رانندگی نیز در حال افزایش است که خسارت جبران‌ناپذیری به زندگی و مال مردم وارد می‌کند. طبق آمار، برخورد جلوی خودرو بیشترین احتمال را در تصادفات دارد.

هنگامی که تصادف از جلو رخ می‌دهد، سیستم سپر، اولین قطعه‌ای است که با جسم برخورد می‌کند. بنابراین، برای بهبود قابلیت‌های ایمنی خودرو در هنگام تصادف و همچنین کاهش آسیب‌دیدگی عابر پیاده، لازم است سیستم سپر مورد مطالعه قرار گرفته شود.



شکل ۷ شماتیک نمودار نیرو- جابه جایی برای فرامواد NS: (الف)

بازگشت ناپذیر و (ب) بازگشت پذیر [۱۸]



شکل ۶ پنتامود [۱۷]

فرامواد پنتامود نوعی فراماده مکانیکی جامد سه‌بعدی است که به طور مصنوعی طراحی شده تا فقط حالت تنش تک محوری را تحمل کنند. یک فراماده پنتامود از ماتریس کشش مرتبه ششم خود فقط یک مقدار ویژه غیر صفر دارد و بنابراین می‌تواند به راحتی در پنج حالت مستقل مربوط به پنج مقدار ویژه صفر از ماتریس کشش آن تغییر شکل دهد. این نوع فرامواد را می‌توان به عنوان سیال ایده آل در نظر گرفت، مدول برشی G در مقایسه با مدول بالک K تقریباً صفر است. به عبارت دیگر، در چنین ساختاری فشرده‌سازی سخت است اما به راحتی جریان می‌یابد. در واقع آنها ریزساختارهای شبکه‌ای سه‌بعدی هستند که برای تقلید از رفتار مایعات ساخته شده‌اند. در نتیجه پنتامود جامدی است که رفتاری مشابه مایعات دارد. به همین دلیل به آنها مایعات متا نیز گفته می‌شود.

۳-۲-۳- فرامواد با سفتی و تراکم پذیری منفی

این دسته شامل فراموادی است که به طور کلی دارای خواص مکانیکی منفی است. از جمله این خواص می‌توان به سفتی منفی اشاره کرد. NS شاخه بسیار مهمی از فرامواد مکانیکی است. برای سازه‌های معمولی، با افزایش بار، تغییر شکل در امتداد جهت نیرو افزایش می‌یابد، در حالی که برای فرامواد NS، افزایش تغییر شکل منجر به افت بار می‌شود. این رفتار به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. فرامواد NS به دو دسته تقسیم می‌شوند: فراموادی که با برداشتن بار در حالت تغییر شکل یافته باقی می‌ماند و فراموادی که به شکل اولیه خود برمی‌گردند [۱۸]. شکل ۷ نمودار نیرو- جابه جایی را برای این مواد در دو حالت نشان می‌دهد.

مورد دیگر فراموادی با تراکم‌پذیری منفی است. تراکم‌پذیری تغییر حجم نسبی ماده جامد یا مایع به عنوان پاسخ به تغییر

شکل ۹ فرآیند مدل سازی سیستم سپر NPR: (a) جاذب سپر متداول، (b) کل سیستم سپر متداول، (c) ساختار سلول واحد جاذب NPR، (d) ساختار سلول واحد تیر NPR، (e) جاذب NPR، (f) تیر NPR، (g) جاذب سپر NPR، (h) کل سیستم سپر NPR، (i) مدل وسیله نقلیه ساده شده، (j) مدل ساق پا، (k) مدل دیوار سخت، (l) مدل برخورد خودرو به ساق پا و (m) مدل برخورد خودرو به دیوار سخت [۲۱]

کاربرد دیگر فرامواد در تایر خودرو است. از زمان انتشار اولین لاستیک دوجرخه بادی تجاری توسط دانلوپ در سال ۱۸۸۸، بیش از ۱۰۰ سال است که لاستیک پنوماتیک به دلیل چهار مزیت عمده نسبت به یک لاستیک سفت و سخت در بازار مورد توجه قرار گرفته است: (۱) اتلاف انرژی کم در سطوح ناهموار، (۲) سختی عمودی کم، (۳) فشار تماس کم و (۴) جرم کم. با این حال، لاستیک پنوماتیک معایب مختلفی نیز دارند از جمله: (۱) احتمال خرابی فاجعه بار هنگام رانندگی، (۲) نگهداری لازم برای فشار مناسب داخلی هوا و (۳) روش پیچیده ساخت.

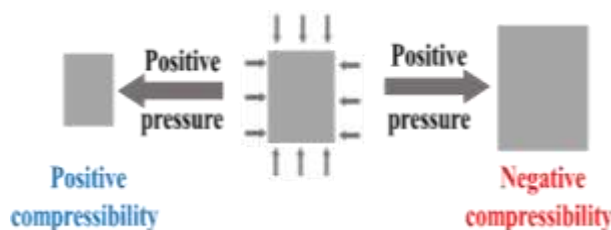
از اوایل دهه ۱۹۲۰، تلاش برای تولید چرخ انعطاف پذیر با افزودن سیم به منظور ارائه لاستیک پنوماتیک با کیفیت و در عین حال تضمین ایمنی صورت گرفت. از آن زمان، محققان با پر کردن الاستومر یا ساختن پره هایی مانند چند ضلعی برای جایگزینی هوای تایر پنوماتیک، سعی در تولید لاستیک های غیرپنوماتیک دارند. اخیراً در رابطه با تایرهای بدون هوا، نوآوری هایی صورت گرفته است. NPT ها متشکل از پره های چند ضلعی انعطاف پذیر و یک لایه الاستومر دارای حلقه های داخلی و بیرونی بوجود آمده اند.

استفاده از فرامواد مکانیکی لانه زنبوری به عنوان جایگزین هوای یک تایر پنوماتیک پیشنهاد شده است. شکل ۱۰ لاستیک طراحی شده به کمک فراماده را نشان می دهد [۲۲].

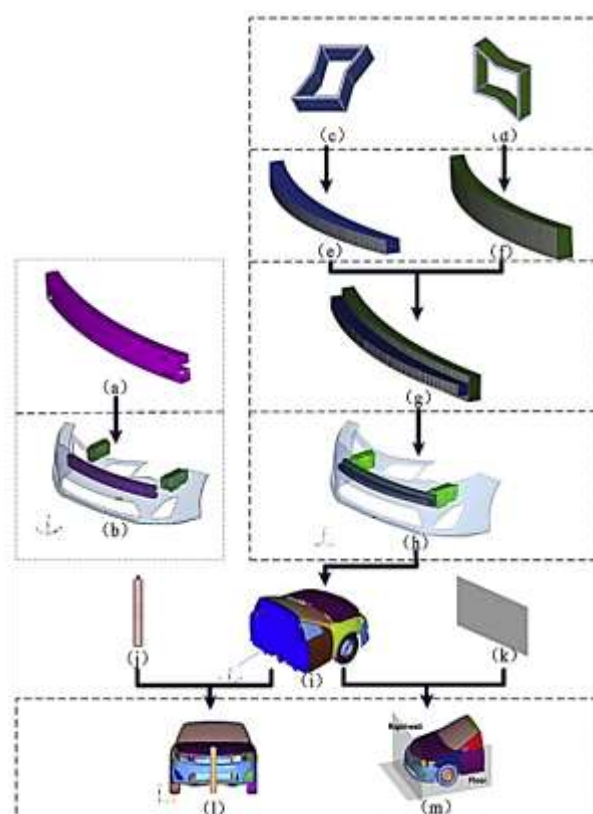
۲-۴- فرامواد با ضریب انبساط حرارتی منفی

به طور کلی، جامدات پس از گرم شدن منبسط می شوند، یعنی ضریب انبساط حرارتی مثبت را نشان می دهند. با این حال، اقلیت جامدات اثر معکوس، یعنی انقباض در اثر حرارت را نشان می دهند. درواقع این مواد دارای انبساط حرارتی منفی می باشند [۲۳]. مواد خاصی دارای این خاصیت می باشد از جمله می توان به Sm2.75C60 با ضریب انبساط حرارتی معادل ۱۰۰- اشاره کرد [۲۴].

امروزه، تحقیقات در مورد سیستم سپر به طور عمده از طریق بهینه سازی ساختار یا استفاده از مواد خاص متمرکز شده است. از نظر بهینه سازی ساختار، تابع هدف، بهینه سازی شکل یا ضخامت مقطع سیستم سپر است. بنابراین، با استفاده از فرامواد مکانیکی اگزتیک در سپرها نوع جدیدی از سپر تولید شده است. این سیستم سپر شامل یک تیر و یک جاذب با ضریب پواسون منفی است تا قابلیت تصادف از جلو در خودرو را بهبود بخشد و همچنین از عابر پیاده محافظت کند. شکل ۹ سلول واحد استفاده شده و سپر تولید شده به این روش و استفاده آن در خودرو را نشان می دهد. همچنین در این شکل مشاهده می شود از یک صفحه تخت و یک میله به عنوان نمونه برای شبیه سازی تصادف با دیوار و پای انسان استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان داده است که عملکرد جامع سیستم سپر NPR بهینه سازی شده به طور موثری بهبود یافته است و عملکردهای بسیار خوبی را هم در حفاظت از عابر پیاده و هم در تصادفات خودرو دارد [۲۱].

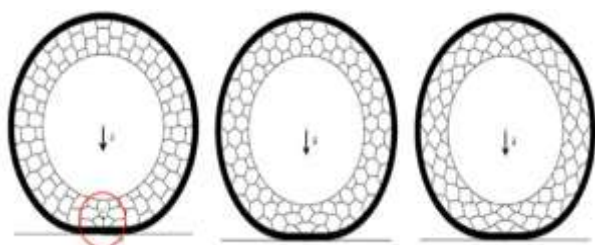


شکل ۸ تراکم پذیری مثبت و منفی [۲۰]

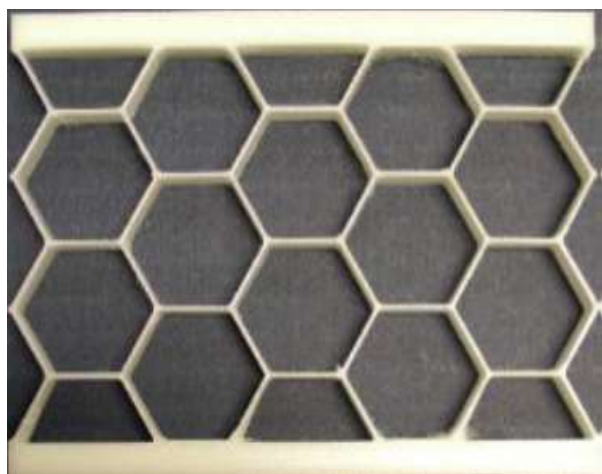


۳- روش تولید فرامواد

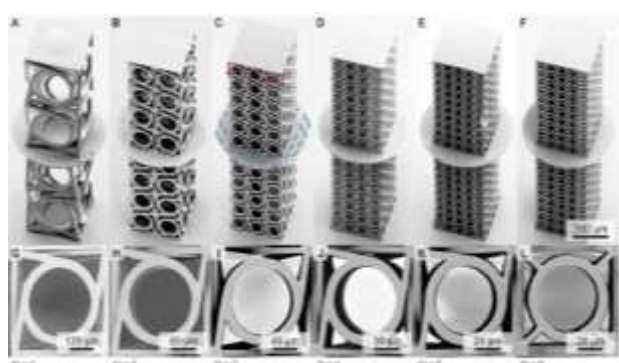
ساخت فرامواد اگزتیک و پنتامود مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱۲ یک نمونه فراماده صلب چرخشی ساخته شده به این روش را نشان می‌دهد. این فراماده می‌تواند در هر کرنش محوری بیش از ۲ درجه بچرخد [۲۸].



شکل ۱۰ لاستیک خودرو طراحی شده با فراماده لانه زنبوری [۲۲]



شکل ۱۱ فراماده مکانیکی ساخته شده به روش FDM [۲۷]



شکل ۱۲ فراماده مکانیکی صلب چرخشی ساخته شده به روش پلیمریزاسیون [۲۸].

۳-۱-۳- ماده پرانی

از آنجایی که فرامواد به دست بشر ساخته می‌شوند و خصوصیات غیر معمول خود را نه بر اساس جنس ماده، اما بر اثر ساختار خود به دست می‌آورند، می‌توان پی برد انتخاب روش ساخت یک انتخاب حیاتی برای فرامواد به شمار می‌آید. این گونه مواد از چیدمان سلول‌ها یا شبکه‌های پیایی و تکراری از مواد مختلف حاصل می‌شوند. لذا دارای ساختار پیچیده می‌باشند. پیشرفت‌های اخیر در فرآیندهای تولید افزایشی، به عنوان مثال چاپ سه‌بعدی، ساخت ساختارهای سلولی را با توپولوژی‌های کاملاً مشخص امکان پذیر کرده است. علاوه بر این پرینترها توانایی تولید طیف وسیعی از مواد را نیز شامل می‌شوند [۲۵].

۳-۱-۱- فرامواد مکانیکی ساخته شده به روش پرینترهای سه‌بعدی

تولید افزایشی که به پرینتر سه‌بعدی نیز شناخته می‌شود شامل ۷ فرآیند متفاوت است که هر کدام دارای ویژگی‌ها منحصر به فرد است. در تمام این فرآیندها، قطعه مورد نظر با اضافه کردن مواد به صورت لایه به لایه به یکدیگر تولید می‌شوند. لازم به ذکر است در این فرآیندها نازل و صفحه ساخت جمعاً در سه راستا و در دستگاه‌های مختصات مختلف مانند کارتریزین و قطبی حرکت می‌کنند [۲۶].

۳-۱-۱- اکستروژن ماده

فرآیند کانونی در این روش ساخت رشته‌های مذاب ۱ است. ساخت رشته‌های مذاب، که با نام تجاری مدل‌سازی لایه‌ای مذاب (FDM) نیز شناخته می‌شود، پرکاربردترین روش چاپ اکستروژن ماده است. در شکل ۱۱ نوعی فراماده مکانیکی ساخته شده به روش FDM نشان داده شده است. در این ساختار مکانیسم خرابی، جذب انرژی و قابلیت چند ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۱].

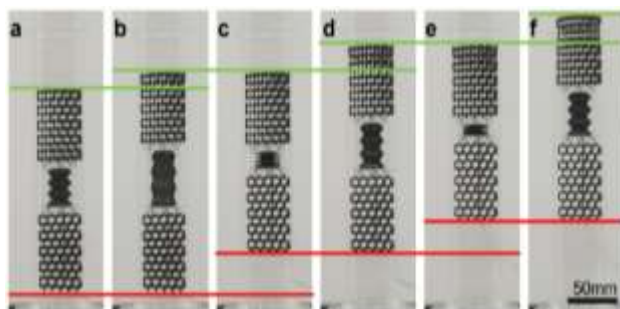
۳-۱-۲- پلیمریزاسیون

فرآیند پلیمریزاسیون بیشتر از سایر فرآیندهای تولید افزایشی مورد استفاده قرار گرفته است. این فرآیند به طور گسترده برای

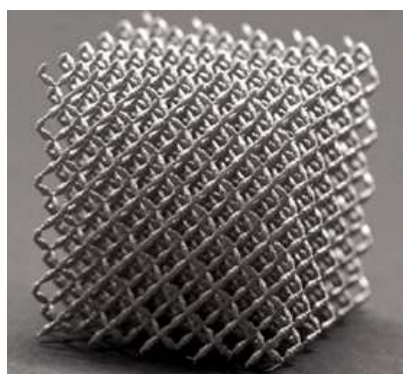
³ Material Jetting

¹ Fused Filament Fabrication (FFF)

² Fused Deposition Modeling (FDM)



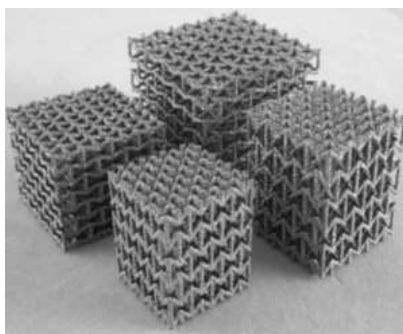
شکل ۱۳ فراماده مکانیکی پلیمری ساخته شده به روش ماده پرانی [۲۹]



الف



ب



ج

شکل ۱۴ فراماده مکانیکی ساخته شده به روش جوش بستر پودری: (الف) پنتامود ساخته شده به روش SLM [۳۰]، (ب) قطعه ساخته شده به روش SLS [۳۱] و (ج) قطعه ساخته شده به روش EBM [۳۲]

بیشتر ساختارهای فرامادی سه بعدی با کاربرد در جذب انرژی و کنترل ارتعاش با استفاده از فرآیند ماده پرانی طراحی و ساخته شده اند (شکل ۱۳).

۳-۱-۴- جوش بستر پودری^۱

این فرآیند شامل زیرمجموعه‌های مختلف از جمله پالایش انتخابی لیزر (SLS)^۲ که توانایی تولید فلزات و پلاستیک‌ها را دارد، ذوب لیزر انتخابی (SLM)^۳ و ذوب پرتو الکترونی (EBM)^۴ است. فرآیند SLM اغلب برای ساخت سازه‌های شبکه‌ای فلزی برای کاربردهای مختلف از جمله خودرو و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. SLM همچنین برای ساخت سازه‌های اگزرتیک و پنتامود مورد استفاده واقع شده است. شکل ۱۴ نمونه‌های مختلف ساخته شده با این فرآیند را نشان می‌دهد. [۱]

۳-۲- فرامواد مکانیکی ساخته شده به روش پرینتر

چهاربعدی

پرینت چهاربعدی برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ معرفی شد و توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی از جمله مواد هوشمند و زیست پزشکی، به خود جلب کرد. پرینت چهاربعدی به عنوان پرینت سه بعدی در طول زمان تعریف می‌شود. در واقع در این فرآیند بعد چهارم زمان است. تفاوت عمده در مورد پرینت چهاربعدی نسبت به پرینت سه بعدی توانایی تغییر شکل قطعه در طول زمان است. در این فرآیند با اعمال یک نیرو خارجی در جسم، تغییر شکل ایجاد می‌شود، سپس با اعمال یک نوع محرک خارجی مانند دما، نور، pH، رطوبت یا سایر محرک‌های محیطی به قطعه‌ای که به روش سه بعدی تولید شده و تغییر شکل یافته، قطعه به شکل اولیه خود باز می‌گردد [۳۳].

³ Selective Laser Melting (SLM)

⁴ Electron Beam Melting (EBM)

¹ Powder Bed Fusion

² Selective Laser Sintering (SLS)

در گام بعدی می‌توان با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی، برای بهینه نمودن ساختار سلولی فرامواد با قیود و یا توابع هدف استحکام، وزن، عمر خستگی و قابلیت اطمینان اقدام نمود. پس از نهایی کردن هندسه نیز، با یکی از روش‌های تولید افزایشی همچون پرینترهای سه‌بعدی، چهاربعدی و پنج‌بعدی برای تولید فرامواد استفاده کرد.

۵- مراجع

- [1] M. Askari, D. Hutchins, P. Thomas, L. Astolfi, R. Watson, M. Abdi, M. Ricci, S. Laureti, L. Nie, S. Freear, R. Wildman, C. Tuck, M. Clarke, E. Woods, A. Clare, Additive Manufacturing of Metamaterials: A review, Additive Manufacturing, Vol. 36, Article No. 101562, (2020).
- [2] T. Li, X. Hu, Y. Chen, L. Wang, Harnessing out-of-plane deformation to design 3D architected lattice metamaterials with tunable Poisson's ratio, Scientific Reports, Vol. 7, Article No. 8949, (2017).
- [3] F. Junxiang, Z. Lei, W. Shuaishuai, Z. Zhi, C. Seung-Kyum, S. Bo, S. Yusheng, A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends, Materials Today, (2021), doi: 10.1016/J.MATTOD.2021.04.019.
- [4] G. Singh, A. Rajni, A. Marwaha, A Review of Metamaterials and its Applications, International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 19, No. 6, pp. 305–310, (2015).
- [5] R. Liu, C. Ji, Z. Zhao, T. Zhou, Metamaterials: Reshape and Rethink, Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 179–184, (2015).
- [6] J. Jung, H. Kim, S. Goo, K. Chang, S. Wang, Realization of a locally resonant metamaterial on the automobile panel structure to reduce noise radiation, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 122, pp. 206–231, (2019).
- [7] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, Progress in Materials Science, Vol. 94, pp. 114–173, (2018).
- [8] K. Liu, L. Hand, W. Hua, L. Ji, S. Zhua, Z. Wan, X. Yang, Y. Wei, Z. Dai, Z. Zhao, Z. Li, P. Wang, R. Tao, 4D printed zero Poisson's ratio metamaterial with switching function of mechanical and vibration isolation performance, Materials and Design, Vol. 196, Article No. 109153, (2020).
- [9] Q. Qi, P. Zhang, W. Wu, K. Xin, H. Liao, Y. Li, D. Xiao, R. Xia, Innovative 3D chiral metamaterials under large deformation: Theoretical and

عملکرد مکانیکی فرامواد معمولی برگشت ناپذیر است و نمی‌تواند تغییرات محیط را درک و پاسخ دهد. با این حال بر اساس روش چاپ چهاربعدی پلیمرهای حافظه شکل، فراماده‌هایی ایجاد شده است که می‌تواند تغییرات دما را حس کرده و خواص مکانیکی را تغییر دهد. این مواد با نسبت پواسون صفر طراحی شده است و قابلیت برگشت‌پذیری به حالت اولیه خود را دارد [۸].

۳-۳- فرامواد مکانیکی ساخته شده به روش پرینتر پنج-بعدی

پرینت پنج‌بعدی شاخه جدیدی از تولید مواد افزایشی است. این فناوری در سال ۲۰۱۶ توسط دانشگاه‌های آمریکایی معرفی شد. در این فناوری، نازل و صفحه ساخت جمعاً دارای پنج درجه آزادی هستند. در فناوری‌های پرینت سه بعدی حرکت در محورهای X , Y و Z منجر به تولید قطعه می‌شود. در این پرینترها نازل از لایه‌ای به لایه دیگر منتقل می‌شود و مقدار نازکی از فیلامنت اکستروود شده را رسوب می‌کند، در واقع قطعه به برش‌های مسطح تقسیم شده و سپس آن را پرینت می‌کند. این بدان معنی است که طراحی‌ها می‌توانند به شدت محدود شوند. درحالی که در پرینترهای پنج بعدی علاوه بر حرکت در این سه راستا، حرکت چرخشی حول دو محور نیز وجود دارد. این حرکات باعث می‌شود نازل توانایی تولید لایه‌های منحنی به جای لایه‌های مسطح در پرینت سه بعدی را داشته باشند. یکی دیگر از مزایای مهم این فناوری جدید استفاده از مواد ۲۵ درصد کمتر در مقایسه با پرینت سه بعدی است. همچنین تولید اجسام پیچیده و مستحکم‌تر نسبت به قطعات ساخته شده به روش سه بعدی از مزیت‌های این فرآیند به حساب می‌آید [۳۴]. با توجه به مزایا بیان شده برای پرینترهای پنج‌بعدی می‌توان نتیجه گرفت این فرآیند نیز مانند پرینترهای سه‌بعدی قابلیت بالایی برای تولید انواع فرامواد با خواص بهبودیافته را دارد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، به معرفی انواع فرامواد و کاربرد آنها در صنعت خودرو پرداخته شد. این کاربردها شامل موارد مختلفی از جمله سیستم‌های امنیتی، سیستم‌های اندازه‌گیری، سپر، تایر و سایر قطعات خودرو می‌باشد. علاوه بر این، فرامواد کاربردهایی از جمله جذب انرژی، سر و صدا و ارتعاش را نیز به همراه دارد. برای ساخت این مواد می‌توان از الگوهای از پیش تعریف شده و یا با الهام گرفتن از طبیعت (ساختارهای سلولی)، طراحی را پیشنهاد نمود.

- [20] R. Gatt, J. Grima, Negative compressibility, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*, Vol. 2, pp. 236–238, (2008).
- [21] C. Wang, W. Wang, W. Zhao, Y. Wang, G. Zhou, Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 153, pp. 78–96, (2018).
- [22] J. Ju, D. Kim, K. Kim, Flexible cellular solid spokes of a non-pneumatic tire, *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 2285–2295, (2012).
- [23] W. Miller, C. Smith, D. Mackenzie, K. Evans, Negative thermal expansion: a review, *Journal of Materials Science*, Vol. 44, pp. 5441–5451, (2009).
- [24] K. Takenaka, Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 13, pp. 013001, (2012).
- [25] S. Montgomery, X. Kuang, C. Armstrong, H. Qi., Recent advances in additive manufacturing of active mechanical metamaterials, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 24, Article No 100869, (2020).
- [26] Standard Document, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, Standard No. F2792, ASTM International, (2012).
- [27] M. Bodagh, A. Damanpack, G. Hu, W. Liao, Large Deformations of Soft Metamaterials Fabricated by 3D Printing, *Materials and Design*, Vol. 131, pp. 81–91, (2017).
- [28] T. Frenzel, M. Kadic, M. Wegener, Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist, *Science*, Vol. 358, pp. 1072–1074, (2017).
- [29] G. Andrew, P. Stefano, Q. Tian, F. Peer, Auxetic metamaterial simplifies soft robot design, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (2016), DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487701.
- [30] R. Hedayati, A. Leeflang, A. Zadpoor, Additively manufactured metallic pentamode meta-materials, *Applied Physics Letters*, Vol. 110, Article No. 91905, (2017).
- [31] Y. Shangqin, S. Fei, B. Jiaming, K. Chee, W. Jun, Z. Kun, 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization, *Materials and Design*, Vol. 120, pp. 317–327, (2017).
- [32] Y. Li, H. Ola, C. Denis, W. Harvey, Additive Manufacturing of Metal Cellular Structures: Design and Fabrication, *The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 67, pp. 608–615, (2015).
- experimental analysis, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 202, pp. 787–797, (2020).
- [10] Y. Xin, H. Wang, C. Wang, S. Cheng, Q. Zhao, Y. Sun, H. Gao, F. Ren, Properties and tunability of band gaps in innovative reentrant and star-shaped hybrid honeycomb metamaterials, *Results in Physics*, Vol. 24, Article No. 104024, (2021).
- [11] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, F. Berto, Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review, *Materials and Design*, Vol. 180, Article No 107950, (2019).
- [12] J. Shabanpour, S. Beyraghi, H. Oraizi, Reconfigurable honeycomb metamaterial absorber having incident angular stability, *Scientific Reports*, Vol. 10, Article No. 14920, (2020).
- [13] J. Silverberg, A. Evans, L. McLeod, R. Hayward, T. Hull, C. Santangelo, I. Cohen, Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials, *Science*, Vol. 345, pp. 647–650, (2014).
- [14] Y. Tang, G. Lin, S. Yang, Y. Yi, R. Kamien, J. Yin, Programmable Kiri-Kirigami Metamaterials, *Advanced Material*, Vol. 29, Article No. 1604262, (2017).
- [15] A. Tran, M. Tran, Y. Wang, Constrained mixed-integer Gaussian mixture Bayesian optimization and its applications in designing fractal and auxetic metamaterials, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 59, pp. 2131–2154, (2019).
- [16] Z. Li., Z. Luo, L. Zhang, C. Wang, Topological design of pentamode lattice metamaterials using a ground structure method, *Materials & Design*, Vol. 202, Article No. 109523, (2021).
- [17] Y. Huang, X. Lu, G. Liang, Z. Xu, Pentamodal property and acoustic band gaps of pentamode metamaterials with different cross-section shapes, *Physics Letters A*, Vol. 380, No. 13, pp. 1334–1338, (2016).
- [18] B. Chen, L. Chen, B. Du, H. Liu, W. Li, D. Fang, Novel multifunctional negative stiffness mechanical metamaterial structure: Tailored functions of multi-stable and compressive mono-stable, *Composite Part B Engineering*, Vol. 204, Article No. 108501, (2021).
- [19] X. M. Yiy, Y. Xiaoying, S. Jiahu, Y. Xiaolei, G. Arash, R. Jianhua, H. Xiaodong, Z. Shiwei, Designing orthotropic materials for negative or zero compressibility, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, pp. 4038–4051, (2014).

- [34] S. Dezhianian. M. Azadi, S.M. Esfarjani. An overview of the incremental production process with five-dimensional printers and their applications, Vol. 6, No. 1, pp. 51- 60 (in Persian فارسی)
- [33] P. Rastogi, B. Kandasubramanian, Breakthrough in the printing tactics for stimuli-responsive materials: 4D printing, Chemical Engineering Journal, Vol. 366, pp. 264–304, (2019).

مروری بر پارامترهای موثر بر رزونانس حفره تایر و راهکارهای کنترل آن

مجتبی مؤمن
کارشناس ارشد

سلمان ابراهیمی نژاد

استادیار، دانشکده مهندسی
خودرو، دانشگاه علم و صنعت
ایران، تهران

مرتضی ملاجعفری*

استادیار، دانشکده مهندسی
خودرو، دانشگاه علم و صنعت
ایران، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

چکیده: بحث نویز که منشا آن ارتعاش است، به دلیل تاثیر گذاشتن مستقیم بر کیفیت زندگی انسان‌ها، بسیار اهمیت دارد. یکی از مهم‌ترین منابع نویز خودرو، نویز تایر است که با کاهش نویز موتور و آگزوز و برقی شدن خودروها اهمیت زیادی پیدا کرده و بخشی از آن، از رزونانس حفره تایر سرچشمه می‌گیرد. در این مقاله رزونانس حفره تایر مورد بررسی قرار گرفته که هدف اصلی آن، شناخت پارامترهای موثر بر رزونانس حفره تایر و راهکارهای کنترل منبع و مسیر انتقال آن به داخل کابین خودرو می‌باشد و براساس مطالعات صورت گرفته، در هیچ مقاله‌ای به طور همزمان به این دو موضوع پرداخته نشده است. همچنین، در این مقاله برای اولین بار راهکارهای کنترل رزونانس حفره تایر و مسیر انتقال آن به داخل کابین خودرو دسته بندی و مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و معایب آن‌ها ارائه شده است. روش تحقیق از نوع توصیفی است که پس از جمع‌آوری، مطالعه و تحلیل مقالات و پژوهش‌های منتشرشده در حوزه نویز حفره تایر، مفاهیم، اصول، فرآیند و دستاوردهای هر کدام از پژوهش‌ها، دسته‌بندی و تحلیل شده است. این مطالعات برای بررسی و کنترل تأثیر رزونانس حفره آکوستیکی تایر، بر محیط آکوستیکی داخل کابین خودرو ضروری هستند.

واژگان کلیدی: رزونانس حفره تایر، نویز تایر خودرو، پدیده رزونانس، راهکارهای کنترل نویز، تحریک تایر.

A review of the parameters affecting the resonance of the tire cavity and its control strategies

Mojtaba Momen
MSc, Iran University
of Science and
Technology, Tehran

**Salman
Ebrahiminejad**
Assistant Professor,
Faculty of
Automotive
Engineering, Iran
University of Science
and Technology,
Tehran

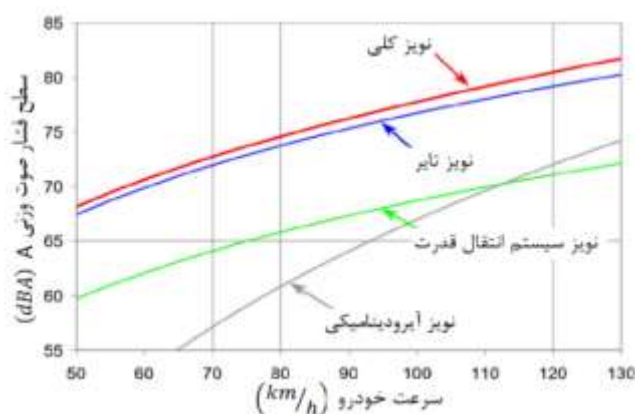
**Morteza
Mollajafari***
Assistant Professor,
Faculty of
Automotive
Engineering, Iran
University of Science
and Technology,
Tehran

Abstract: The noise, which originates from vibration, is significant because it directly affects the quality of human life. One of the essential sources of car noise is tire noise, which becomes prominent by reducing engine and exhaust noises and electrifying cars, and part of it is initiated from the resonance of the tire cavity. In this article, the resonance of the tire cavity was studied, and the primary purpose is to determine the parameters affecting the resonance of the tire cavity and its control solutions of the source of noise and transmission path into the car cabin. Notably, the two problems addressed have not been investigated simultaneously in previous studies. In the present work, for the first time, the tire cavity resonance control solutions are examined and the resonance transmission path into the car cabin. Furthermore, the pros and cons of such an examination were classified as well. The research method is descriptive in which after collecting, studying, and analyzing articles and published researches in the field of tire cavity noise, the concepts, principles, processes, and achievements of each research have been categorized and analyzed. These studies are necessary to investigate and control the effect of tire acoustic cavity resonance on the acoustic environment inside the car cabin.

Keywords: Tire cavity resonance, Vehicle tire noise, Resonance phenomenon, Noise control solutions, Tire excitation.

۱- مقدمه

استاندارد و قانون تبدیل شده است و دلیل اصلی آن ناشی از این حقیقت است که ناظران خارجی، هنگام عبور خودرو با سرعت بیش از ۴۰ کیلومتر بر ساعت، می‌توانند به طور واضح صدای تایر را بشنوند. از طرف دیگر، هدف بعدی، افزایش آسایش سرنشینان در فضای داخلی خودرو است [۱۰]. سندبرگ نشان داده است که نویز تایر در بین سایر نویزهای خودرو (برای وسایل نقلیه تولیدشده مطابق با الزامات اتحادیه اروپا)، تقریباً در همه سرعت ها، نویز غالب است که در شکل (۱) به صورت نمودار مقایسه‌ای نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۱ میزان منابع نویز قسمت‌های مختلف خودرو با توجه به سرعت حرکت [۱۱]

با پیشرفت موتور و کاهش نویز و ارتعاش سیستم حرکت، نویز تایر از بقیه متمایز می‌شود، بنابراین چگونگی کاهش نویز تایرها به یکی از مهمترین کارها برای بهبود ارتعاش و نویز خودرو تبدیل شده است. نویز ایجاد شده توسط یک تایر چرخان عمده‌ای از بلوک‌های آج ساطع می‌شود. با این حال، گزارش شده است که تایرهای صاف نیز باعث ایجاد نویز می‌شوند [۱۲]. انگیزه کنترل نویز می‌تواند ناشی از اجرای تصویب قانونی برای سطح نویز خارجی تایر؛ کاهش سطح ناراضی در فضای داخلی خودرو؛ کاهش نویز برای افزایش راحتی شهروندان و یا تحریم واردات تایرهای با نویز خارج از استاندارد باشد [۱۱].

ساختار مقاله به صورت زیر می‌باشد. در بخش ۲ حفره‌ی تایر معرفی شده و مشخصه‌های نویز و ارتعاشات آن، با توجه به کارها و پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه به طور مبسوط تشریح و مزایا و چالش‌های هر کدام بیان شده است. سپس در بخش ۳، راهکارهای کنترل منبع و مسیر انتقال نویز مربوط به رزونانس حفره تایر در دو بخش مجزا دسته‌بندی و تاثیر هر کدام بررسی

هر موج مکانیکی در حوزه فرکانس که قابل شنیدن باشد را صوت گفته و اگر این صوت، آزاردهنده باشد، به نویز تبدیل می‌شود. گوش انسان توانایی شنیدن صداها در محدوده فرکانس ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز را دارد. به طور کلی سروصدا ناشی از ارتعاش است. ویژگی‌های نویز و ارتعاش بر تصمیم مشتری در خرید خودرو تأثیر می‌گذارد. در طراحی تایرهای پنوماتیک یک حفره وجود دارد که این حفره برای نگه داشتن مقدار هوای مورد نیاز برای کارکرد وسیله نقلیه ضروری است. با این حال، همین حفره، به عنوان عامل به وجود آمدن رزونانس حفره تایر شناخته شده است. رزونانس حفره تایر، به عنوان عامل مهم در تولید نویز تایر محسوب می‌شود که باعث انتقال ارتعاش و نویز به تویی چرخ و از آنجا به بدنه خودرو شده و در نهایت به داخل کابین منتقل می‌شود [۴-۱].

در حال حاضر، نویز تایر برای وسایل نقلیه سواری در سرعت های بالاتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت و برای کامیون‌ها در سرعت های بالاتر از ۷۰ کیلومتر بر ساعت آزاردهنده است [۵]. در اوایل سال ۱۹۹۰ میلادی، ساکاتا از طریق آزمایش‌ها، رزونانس حفره تایر را مورد مطالعه قرار داد. مطالعات وی حاکی از آن بود که در محدوده فرکانس ارتعاشات تایر، حفره می‌تواند در طول حرکت خودرو دچار رزونانس شود. نویز رزونانس حفره تایر، توجه افراد را به خود جلب کرده است و در سال‌های اخیر تبدیل به یک موضوع داغ در زمینه تحقیقات بین‌المللی تایر شده است [۶-۷]. یکی از صداها مشکل‌ساز، رزونانس آکوستیک است که می‌تواند در داخل تایر ایجاد شود و آن را رزونانس حفره تایر می‌نامند. بدون نویز موتور، این صدا بسیار قابل توجه است که استفاده از مواد میراکننده اضافی جهت کاهش نویز انتقال یافته را ضروری می‌سازد [۸-۹]. با این حال، کاهش صدای تعامل تایر و جاده هنوز مسأله‌ای چالش برانگیز است و ساختار تایر چرخ و رزونانس حفره آکوستیکی تایر، به عنوان دلیل و منشاء اصلی آن شناخته می‌شود. سروصدای بیرونی تایر و جاده توسط قوانین و استانداردهای اروپا^۱ تنظیم می‌شود، درحالی‌که سروصدای داخلی تایر و جاده، تنها توسط نیاز بازار و مصرف‌کننده تنظیم می‌گردد [۱].

برای وسیله نقلیه موتوری، منابع اصلی سروصدا، ناشی از موتور، توربولانس بادی و تماس تایر با جاده است. با توسعه و پیشرفت وسایل نقلیه، کنترل سروصدای بیرونی تایرها کم‌کم به

^۱ EC R661 / 2009, ECE R117

شده است. در نهایت مقاله در بخش ۴ با نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

۲- مشخصه‌های ارتعاش و نویز حفره تایر

حفره تایر حجمی است که بین بدنه لاستیکی تایر و رینگ قرار گرفته و معمولاً با سیال هوا پر می‌شود. در اثر ارتعاشات این سیال، ناشی از تحریک جاده، تعامل با رینگ، جداره جانبی و آج تایر، نویز و ارتعاشات حفره تایر به وجود می‌آید. رزونانس حفره تایر منبع مهمی از نویز تایر است که در محدوده فرکانس بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ هرتز بوده و به شدت نویز داخلی وسیله نقلیه را زیاد می‌کند [۱۳]. این نویز از طریق ساختار تایر، توپی، سیستم تعلیق و فرمان به داخل کابین خودرو منتقل شده و صدای آزاردهنده‌ای را در داخل خودرو ایجاد می‌کند [۱۴]. نویز حفره تایر دارای یک پهنای باند فرکانسی باریک، با دامنه رزونانس بالا است و زمانی که امواج صدا در تایر خودرو بصورت افقی (جلو و عقب) در یک جهت با ضریب میرایی کم نوسان می‌کنند، اتفاق می‌افتد [۸].

ساکاتا و همکاران، مکانیزم اثر نیروی محوری را بر روی نویز داخل خودرو مطالعه کردند و پیک طیف فرکانس را نشان دادند و به نتایجی رسیدند که نشان می‌دهد نویز، با اولین شکل مود آکوستیکی حفره در محدوده فرکانس‌های ۱۹۰ تا ۲۶۰ هرتز در شرایط حرکت با سرعت ۷۰ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت، آزاردهنده است. این بدان معناست که رزونانس حفره تایر تأثیر قابل توجهی بر صدای داخل خودرو دارد [۱۵]. ساکاتا و همکارانش، بیان می‌کنند که نویز داخلی کمتر از ۳۰۰ هرتز از طریق ساختار تایر انتقال پیدا می‌کند. همچنین فرکانس طبیعی نویز حفره، کاملاً به شکل و اندازه چرخ وابسته است [۸].

گوندا و همکارانش، نتیجه‌گیری کردند که تنها اولین شکل مود رزونانس حفره تایر می‌تواند باعث افزایش صدای ناشی از تماس تایر و جاده، در داخل کابین شود؛ زیرا این نیروها، تنها در شکل مود اول، باعث تحریک توپی چرخ شده و در شکل مودهای دیگر به دلیل داشتن جهت‌های مخالف، هم دیگر را خنثی می‌کنند [۱].

استاندارد کردن نویز تایر مخصوصاً برای وسایل نقلیه برقی با چرخ‌های بزرگ و تایرهای با نسبت ارتفاع به پهنای کم^۱، یک چالش واقعی برای مهندسان نویز و ارتعاش است [۱۶]. شدیدترین رزونانس حفره هوا زمانی اتفاق می‌افتد که طول موج

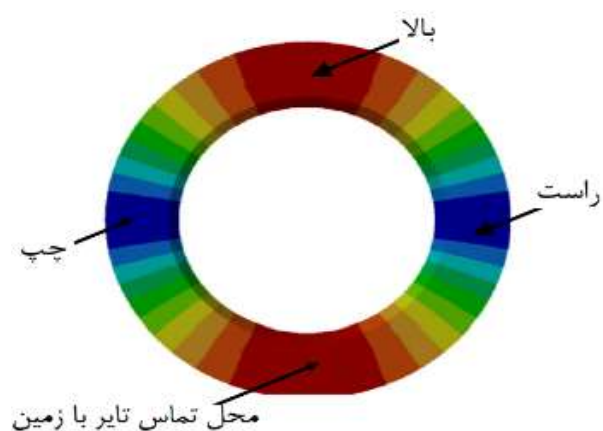
آکوستیکی، تقریباً برابر با متوسط دور تایر باشد. فرکانس طبیعی این شکل مود در تایر اتومبیل سواری معمولاً بسته به اندازه تایر از ۲۰۰ هرتز تا ۲۳۰ هرتز متغیر است و این شکل مود با ساختار تایر کوپل شده و قادر به انتقال صدا با ساختار قوی به داخل خودرو از طریق رینگ، توپی و سیستم تعلیق می‌باشد. رزونانس شکل مودهای بعدی حفره در جهت محیطی، تقریباً مضرب صحیحی از فرکانس رزونانس شکل مود اول است و شدت رزونانس پایین‌تری دارد [۱۷].

ساکاتا اعلام کرد که دو قله نویز مربوط به رزونانس شکل مود اول حفره آکوستیک، در محدوده‌ی فرکانسی بین ۲۰۰ و ۳۰۰ هرتز قرار دارد و مربوط به رزونانس ساختاری تایر نمی‌شود [۱].

از بین تمام شکل مودهای طبیعی تایر، شکل مود حفره هوای تایر به دلیل پهنای باند فرکانسی و میرایی پایین، تأثیر زیادی بر نویز دورن کابین دارد [۱۶]. زبری جاده، الگوی آج، نیروی نامتعادل‌کننده و تغییر انحنای آج به طور مشترک، حفره آکوستیکی تایر را تحریک می‌کند [۱۲].

نویز داخلی فرکانس بالا اکثراً توسط هوا انتشار می‌یابد و معمولاً با ارتعاش ساختاری ناشی از تحریک جاده کوپل نمی‌شود، ولی نویز فرکانس پایین، ارتباط خوبی با ارتعاش ساختاری دارد و می‌تواند توسط مسافران درک شود. با توجه به اثرات ترکیب-شدن زبری سطح جاده و الگوی آج، پهنای باند فرکانس تحریک تایر، به قدری گسترده است که فرکانس طبیعی حفره هوای آکوستیکی تایر را می‌پوشاند [۱۸].

شبیه‌سازی شکل (۲) نشان می‌دهد، فشار صدا در موقعیت-های بالا و محل تماس تایر با زمین، بیشترین مقدار و در موقعیت-های چپ و راست، داری کمترین مقدار است [۱۹].



شکل ۲ شبیه‌سازی فشار صدا در موقعیت‌های متفاوت حفره تایر غیرچرخان [۱۹]

^۱ Aspect Ratio

فشار صوت^۱ (SPL) داخل حفره تایر در محدوده دمای بین ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد حفره نامفهوم و بی معنی است. او ارتباط بین نویز حفره تایر و نویز بیرونی تایر و جاده را با دقت خوبی معادل مقدار ۱/۴ دسی بل یافت.

بارو و همکارانش [۱۳]، فرکانس طبیعی اول تا دهم رزونانس حفره تایر را بصورت جدول (۱) بدست آوردند که در آن m و n به ترتیب مود شعاعی، سمت^۲ و محوری را نشان می دهند.

سکاووزو و همکارانش، نشان دادند که کوپلینگ رزونانس آکوستیکی حفره تایر و رزونانس ساختاری تایر، باعث افزایش نویز منتقل شده به داخل کابین خودرو می شود. در همین راستا، هاوارکمپ بیان کرده است که ارتعاشات ورودی از جاده، با فرکانس حدود ۲۳۰ هرتز به انتقال انرژی از بدنه خودرو و اجزای شاسی دامن می زند [۱].

پینای و همکارانش [۱۰] نتیجه گرفتند که اندازه گیری درجه حرارت داخل حفره تایر از نظر آماری برای پیش بینی سطح

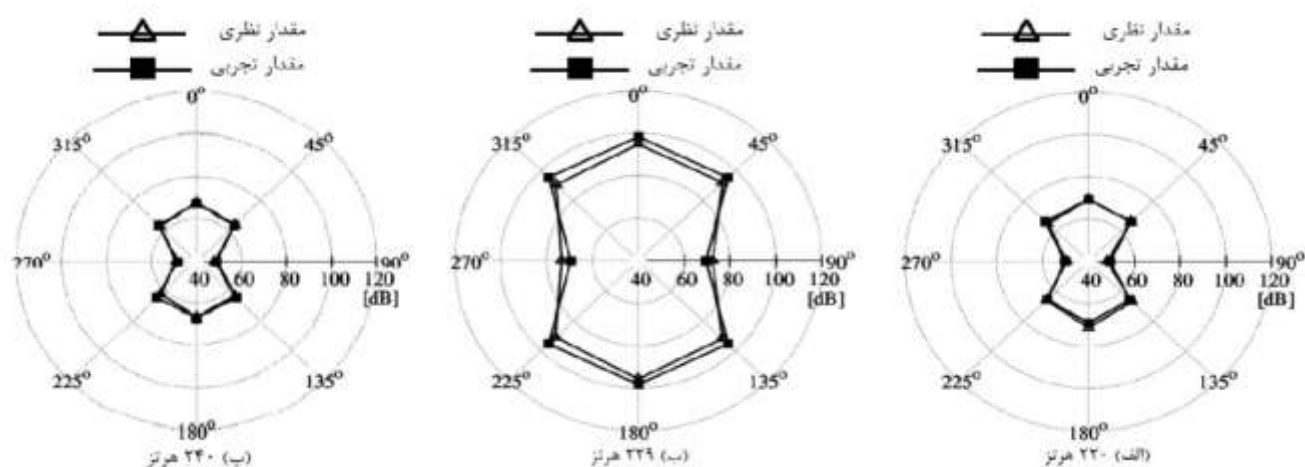
جدول ۱ مقایسه فرکانس طبیعی اول تا دهم رزونانس حفره تایر [۱۳]

خطا %	مدل المان محدود (HZ)	مدل تحلیلی (HZ)	n	m	l
1	182.0	182.2	0	1	0
1.1	363.7	364.1	0	2	0
0.2	544.8	544.9	0	3	0
0.2	725.0	725.1	0	4	0
3.9	769.1	766.0	1	0	0
3.1	789.9	787.4	1	1	0
1.2	849.2	848.2	1	2	0
0.2	904.1	904.3	0	5	0
0.7	939.4	940.1	1	3	0
2.3	1052.4	1054.8	1	4	0

بر نیروهای منتقل شده به شاسی و در نتیجه عکس العمل صدای بالای ۱۰۰ هرتز تأثیر می گذارد.

در پژوهش هریکاوا و همکارانش [۲۱]، یک معادله موج یک بعدی ارائه شده که موج در گردش و میرایی هوا را برای توزیع فشار صدا در داخل تایر خودرو در نظر می گیرد. آن ها توزیع SPL درون یک تایر را بصورت شکل (۳) نشان داده اند.

وانگ و همکارانش [۱۲] تأثیر تغییر پریودیک انحنای آج تایر ناشی از چرخش تایر و بارگذاری جاده را بر رزونانس حفره هوا مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش گلندیر و همکارانش [۲۰]، نرم افزار مدل المان محدود حفره، رینگ و تایر چرخان در وضعیت پایدار، توسعه یافته و برای شبیه سازی المان محدود تمام قسمت های خودرو ارائه شده است. آن ها نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن اثر چرخش از نظر نیروهای ژيروسکوپی، به شدت



شکل ۳ توزیع SPL مدل نظری و تجربی داخل تایر در اطراف فرکانس رزونانس حفره تایر [۲۱]

² Azimuthal

¹ Sound Pressure Level (SPL)

باند آج باشد، پیشنهاد شد. مشاهده شد که پاسخ محدوده فرکانس زیر ۵۰۰ هرتز، در درجه اول به دلیل حرکت شعاعی و مماسی ساختار تایلر است، به علاوه، رزونانس محیطی حفره هوای تایلر، به دلیل اولین موج آکوستیکی رخ می‌دهد. شکل مودهای آکوستیک شعاعی ناشی از موج آکوستیکی شکل مود دوم، قابل اندازه‌گیری بوده و منجر به افزایش جزئی ارتعاش در نزدیکی فرکانس قطع می‌شود.

ناگاجی و همکارانش [۲۳]، یک روش توپولوژی مبتنی بر سطح برای شبیه‌سازی طراحی ساختار الاستیک کوپل‌شده با محیط حفره آکوستیکی، با استفاده از مدل ماده دو فاز ارائه کردند. مدل ماده دو فاز در مسئله بهینه‌سازی کوپلینگ آکوستیک و ساختاری موثر بود. کار آینده، احتمالاً یک بهینه‌سازی توپولوژی در یک محدوده فرکانس مودال است که شامل ارزیابی پاسخ‌های فرکانسی برای تعدادی از خطوط فرکانسی می‌باشد.

در پژوهش هیو و همکارانش [۲۴]، یک روش المان محدود برای یافتن میدان آکوستیکی در حفره تایلر چرخان خودرو پیشنهاد شده و تست فشار صوت نیز برای اعتبارسنجی نتایج انجام شده است. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت خودرو و بار روی تایلر، حداکثر دامنه فشار صدا طبق نتایج شبیه‌سازی و آزمایش افزایش می‌یابد اما با افزایش فشار باد تایلر، طبق نتایج آزمایش، ابتدا حداکثر دامنه فشار صدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که بر خلاف نتیجه شبیه‌سازی است که افزایش مداوم را نشان می‌دهد. همچنین چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت درام تایلر باعث قرارگیری قله دامنه فشار صدا در اطراف زوایای ۰ و ۱۵۰ درجه تایلر می‌شود.

۳- راهکارهای کنترل منبع و مسیر انتقال نویز

سه المان اصلی در بحث نویز، منبع نویز، مسیر انتقال نویز و گیرنده نویز است. برای راحتی گیرنده نویز (انسان) در داخل کابین خودرو باید منبع و مسیر انتقال نویز به داخل کابین خودرو کنترل شود. در بخش ۳-۱ راهکارهای کنترل رزونانس حفره تایلر برای کاهش منبع نویز مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۳-۲ تاثیر انتقال انرژی رزونانس حفره تایلر و راهکارهای کنترل آن برای کاهش مسیر انتقال نویز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

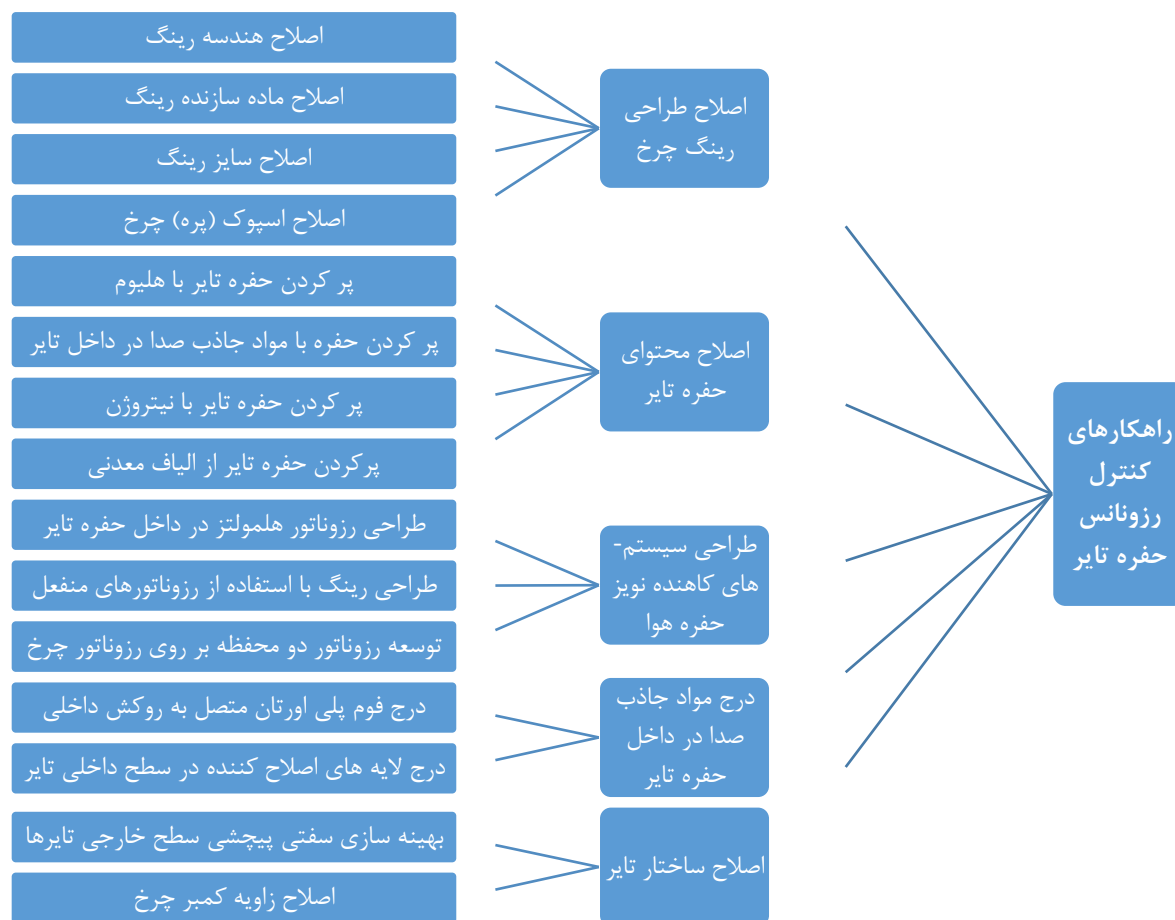
۳-۱- راهکارهای کنترل رزونانس حفره تایلر

در هر دو نتایج نظری و تجربی مشاهده می‌شود، اشکال SPL در موقعیت‌های ۰ درجه و ۱۸۰ درجه (بالا و پایین تایلر) دارای ضد گره و در موقعیت‌های ۹۰ درجه و ۲۷۰ درجه (راست و چپ تایلر) دارای گره در محدوده فرکانس ۲۰۰ تا ۲۶۰ هرتز هستند. بنابراین، مشاهده می‌شود که توزیع شکل مودهای SPL در اطراف فرکانس رزونانس حفره تایلر، اسپیندل وسیله نقلیه را در جهت عمودی به ارتعاش در می‌آورد زیرا فشار صدا در داخل تایلر در جهت عمودی، تغییرات بزرگتری در فرکانس رزونانس حفره تایلر (۲۲۹ هرتز) دارد [۲۱].

یی و همکارانش [۱۵]، توزیع فشار صدا در حفره تایلر ناشی از رزونانس حفره آکوستیکی بخاطر ناهموازی‌های جاده را مورد بررسی قرار دادند. تحت تحریک سرعت در فشار اتمسفر محیط، فرکانس رزونانس در ۲۲۱/۴ هرتز و میزان پیک فشار صدا ۲۴/۴۴ پاسکال بدست آمد، درحالی‌که در آزمایش‌ها، فرکانس رزونانس ۲۱۶/۵ هرتز و میزان پیک فشار صدا حدود ۲۳/۹۷ پاسکال است. ایشیهاما و همکارانش [۲۲]، اندازه‌گیری فشار صدای حفره تایلر، برای یافتن مشخصات سطح جاده و ساختار تایلر را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری صدای حفره تایلر از پتانسیل بالایی برای نظارت بر سطح جاده برخوردار است. امواج آکوستیکی تولیدشده در حفره تایلر دارای مدت زمان بیش‌تر از یک دور چرخش تایلر است. نرخ میرایی صدای حفره کمتر از ۲ درصد است و ضعیف‌تر از نرخ میرایی ارتعاشات ساختاری تایلر می‌باشد. SPL حفره تایلر در حدود ۱۲۰ دسی‌بل یا بیشتر است. توان صدای رزونانس حفره تایلر، در دو فرکانس تنظیم‌شده به وسیله سرعت چرخش چرخ، به شاسی خودرو منتقل می‌شود. فشار صدای حفره تایلر حتی در تایلرهای صاف نیز در اثر حرکت بر روی سطح جاده استاندارد یا سطح جاده آسفالت-بتون متراکم تولید می‌شود.

کائو و بولتون [۱۷]، بر روی شکل مودهای حفره آکوستیکی مرتبه بالاتر و همچنین ایجاد مدل تحلیلی کوپلینگ ساختاری رینگ و آکوستیکی حفره که مورد تحریک نقطه‌ای هارمونیک قرار دارد، بررسی‌هایی را انجام دادند، به طوری که می‌توان تأثیر شکل مودهای آکوستیکی شعاعی مرتبه بالاتر را به صورت تحلیلی نشان داد. اولین شکل مود محیطی معمولاً بسیار مهم است و هنگامی رخ می‌دهد که متوسط دور حفره داخل تایلر، تقریباً برابر یک طول موج باشد. شکل مود اول حفره آکوستیک محیطی در فرکانس ۲۰۰ تا ۲۳۰ هرتز و شکل مود اول حفره آکوستیک شعاعی در فرکانس ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز ظاهر میشوند. در این پژوهش، یک روش اندازه‌گیری نقطه‌ای برای به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری که می‌تواند به دلیل حرکت مماسی

در شکل (۴) یک دسته‌بندی کلی از راهکارهای کنترل رزونانس حفره تایر ارائه شده است و در ادامه کارهای انجام‌شده در هر دسته، بررسی شده‌اند.



شکل ۴ دسته‌بندی کلی راهکارهای کنترل رزونانس حفره تایر

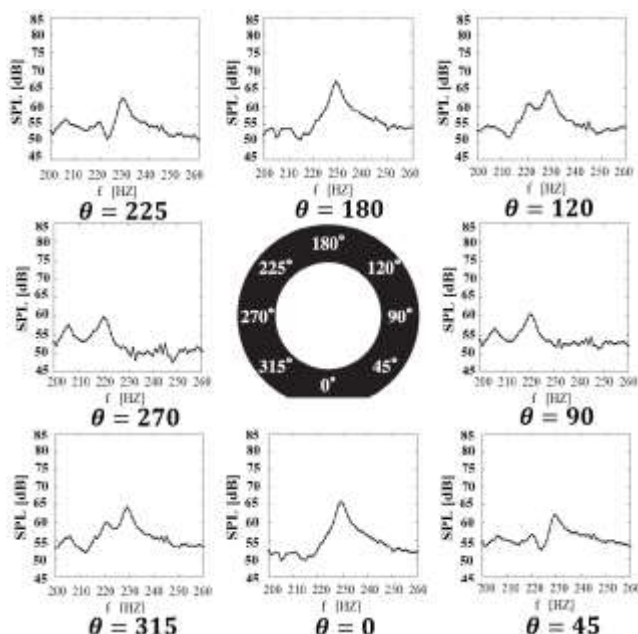
رینگ استفاده کرده‌اند، درحالی‌که شرکت‌های تایر، درحال نصب مواد جذب‌کننده صدا در درون حفره تایر هستند [۱۸].

اقدامات متعددی برای کاهش اثرات منفی رزونانس حفره تایر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یاماچی و همکارانش موفق شدند، با به کارگیری یک رینگ بیضی شکل، اثرات مرتبط با رزونانس حفره را کاهش دهند. درحالی‌که تایرهای بادشده با هلیوم در از بین بردن اتصال بین رزونانس‌های آکوستیکی و ساختاری تایر و در نتیجه، بهبود صدای داخل کابین موثر بودند. اقدام دیگری که امروزه تولیدکنندگان تایر، برای افزایش میرایی رزونانس حفره تایر انجام می‌دهند، استفاده از یک لایه روکش یا پر کردن با مواد جاذب صدا در داخل تایر است و تایرهای بازار را، با درج فوم پلی‌اورتان متصل به روکش داخلی ارائه می‌دهند. بارو و همکارانش نتیجه گرفتند که در صورت ثابت بودن میزان ماده جاذب آکوستیکی، کاهش میزان رزونانس حفره، بیشتر تحت تأثیر حجم روکش قرار دارد. علاوه‌براین، نتایج نشان می‌دهد

هر مسئله نویز و ارتعاش، با اصلاح در منبع نویز یا بهینه سازی مسیر انتقال آن قابل کنترل است. در صورتیکه نویز حفره هوا به وجود آید، تحریک ورودی باید به حداقل برسد و یا مسیر انتقال از تایر به داخل کابین از بین برود. همچنین بهینه‌سازی مسئله نویز و ارتعاش بر سایر مشخصات تایر نباید تأثیر بگذارد که کاری مشکل است. در گذشته راه‌حل‌های بی شماری برای مقابله با نویز شکل مود حفره هوا از جمله اصلاح طراحی رینگ چرخ، معرفی رزوناتور هلمولتز یا مواد جاذب صدا (فوم پلی‌اورتان) در داخل حفره تایر ایجاد شده است، اما تجاری‌سازی بیشتر این راه‌حل‌ها، به دلیل دوام و مشکلات تولید انبوه، موفقیت‌آمیز نبود [۱۶].

مطالعات زیادی در مورد مکانیزم تولید رزونانس حفره انجام شده است و هر دو تولیدکننده اتومبیل و شرکت‌های تایر، روش هایی را برای کاهش نویز حفره ناشی از سازه را آزمایش کرده‌اند. شرکت‌های خودروسازی برای کاهش چنین نویزی از تغییرات

توانایی سرکوب نویز با استفاده از روش روکش ماده جاذب، در محدوده فرکانس رزونانس شکل مود اول حفره تایر یعنی ۲۰۰ تا ۲۶۰ هرتز، مورد بررسی قرار دادند که نتایج در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است.



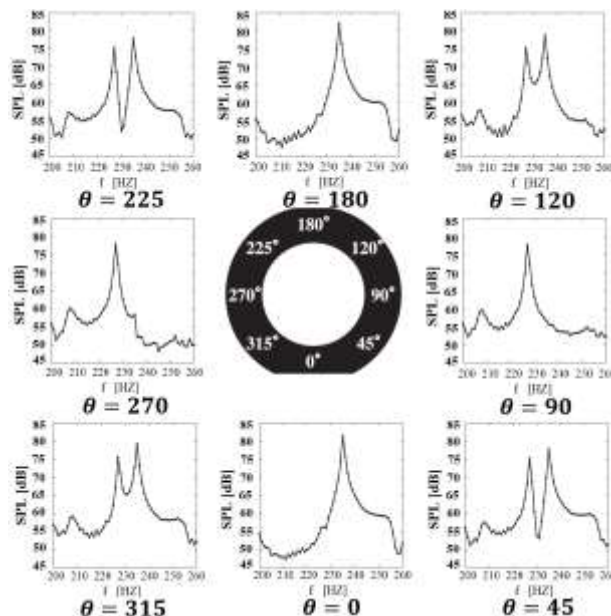
شکل ۶ SPL تایر با ماده جاذب صدا در محدوده فرکانس ۲۰۰ تا ۲۶۰ هرتز [۲۵]

دادند تغییرات محتوای حفره، تأثیری در نویز تایر ندارد. لازم به ذکر است که تغییر محتوای حفره تایر، به دلیل مسایل مربوط به هزینه و استحکام، رایج نیست [۲۶]. از ساکاتا و همکاران، گزارش شده که پرکردن داخل حفره تایر از فوم پلی‌اورتان، باعث حذف رزونانس حفره در فرکانس ۲۳۰ هرتز می‌شود. بسیاری از تحقیقات به آزمایش پرکردن حفره تایر از فوم یا دیگر مواد متخلخل که باعث کاهش انتشار موج صوت در حفره و یا حذف قله‌های مجزا در رزونانس اولین شکل مود حفره تایر می‌شود، به انجام رسیده است [۱].

هاوارکمپ، این نتیجه را گرفت که پرکردن حفره تایر از الیاف معدنی می‌تواند، باعث کاهش انرژی انتقالی به اندازه‌ی بیش از ۲۰ دسی‌بل شود. همچنین از پوشش قیر بر روی رینگ، برای تغییر دادن مشخصه میرایی استفاده شد، اما نتایج استفاده از آن نشان داد که این پوشش‌ها، باعث افزایش امیدانس آکوستیکی دیواره شده و تقویت شکل مود رزونانس حفره تایر را به همراه دارد و نامطلوب است. فرناندز، انواع مختلف مواد جاذب آکوستیکی را در چیدمان‌های متفاوت، به منظور کاهش SPL در رزونانس حفره تایر، بررسی کرد. او نتیجه گرفت که قرارگیری

دهد که برای حجم و میزان ماده جاذب آکوستیکی ثابت، می‌توان با انتخاب یک چیدمان مناسب، میرایی رزونانس حفره را افزایش داد [۱۳].

تاناکا و همکارانش [۲۵] دو تایر تجاری را برای مقایسه



شکل ۵ SPL تایر بدون ماده جاذب صدا در محدوده فرکانس ۲۰۰ تا ۲۶۰ هرتز [۲۵]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در موقعیت‌های بالا و پایین تایر تنها یک قله در فرکانس بالاتر وجود دارد که شکل مود حفره تایر در این فرکانس، بصورت شکل مود عمودی است و در موقعیت‌های راست و چپ تایر تنها یک قله در فرکانس پایین‌تر وجود دارد که شکل مود حفره تایر در این فرکانس، بصورت شکل مود افقی است. در بقیه موقعیت‌ها ادغام این دو قله مشاهده می‌شود که ناشی از پدیده تقسیم فرکانسی است. همچنین با گذاشتن ماده جاذب صدا در داخل حفره تایر، فرکانس شکل مود عمودی و افقی به ترتیب از ۲۳۵ به ۲۲۹ هرتز و از ۲۲۷ به ۲۲۰ هرتز کاهش می‌یابد. در این پژوهش کاهش SPL تایر با اعمال ماده جاذب صدا، برای شکل مود عمودی و افقی به ترتیب از ۷۸/۶ به ۶۳/۵ دسی‌بل و از ۷۵/۱ به ۵۸/۲ دسی‌بل نتیجه‌گیری شده است [۲۵].

محمد و همکاران، با قرار دادن لایه‌های اصلاح‌کننده در سطح داخلی تایر، کاهش اثر رزونانس حفره را تحقیق کرده‌اند [۱۹]. روش دیگر پر کردن حفره تایر با سایر گازها مانند نیتروژن یا هلیوم است که وانگ و همکارانش مشاهده کردند که فرکانس رزونانس کمی تغییر یافت، همچنین بولتون و همکاران نشان

۶۶ دسی بل می‌شود. همچنین استفاده از هلیوم، صدای منتقل شده از هر دو نوع چرخ را به ۵۴ تا ۵۶ دسی بل کاهش می‌دهد، چون سرعت صوت هلیوم به مراتب بیشتر از هوا است [۸].

یامچی و آکیوچی، روش کاهش اثر رزونانس حفره تایر را تغییر طراحی رینگ پیشنهاد کرده و فرمودند که عوامل به وجود آورنده رزونانس حفره را می‌توان با استفاده از رینگ بیضوی بهبود بخشید. این ایده، بر روی این فرضیه استوار بود که تغییر فرکانس و جهت تحریک، در هنگام حرکت خودرو، عامل حذف رزونانس حفره، در محدوده فرکانس مورد نظر است. در یک مطالعه دیگر هایشی پیشنهاد داد که صدای رزونانس حفره تایرها را می‌توان با بهینه‌سازی سفتی پیچشی سطح خارجی تایرها کاهش داد. از آنالیز شکل مود تعلیق خودرو دریافت شد که زاویه کمر چرخ، بر شکل مود رزونانس، اثرگذار است و بر انتقال نویز تاثیر می‌گذارد، بنابراین برخی از تغییرات طراحی می‌تواند به کاهش تاثیر رزونانس حفره آکوستیک تایر منجر شود، مانند اتخاذ یک رینگ کوچکتر و یا اصلاح بخش اسپوک (پره) چرخ که باعث بالارفتن سفتی پیچشی سطح بیرونی تایر می‌گردد [۱].

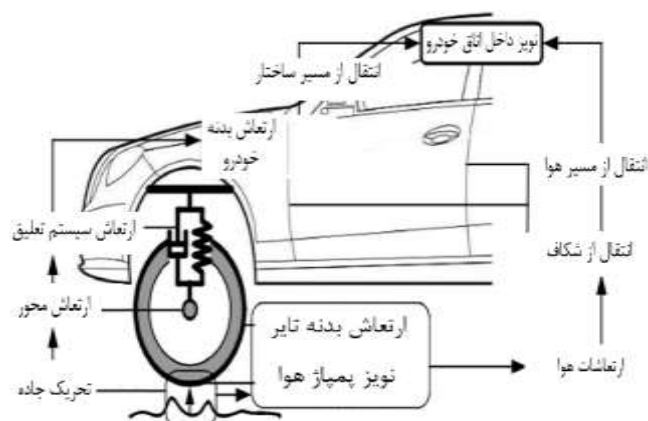
کامیاما و همکارانش [۲۸]، توسعه رزوناتور دو محفظه بر روی رزوناتور چرخ را برای کاهش نویز حفره تایر مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تایید شد که استفاده از رزوناتور دو محفظه، باعث کاهش ۵۰ درصدی یا بیشتر در وزن و هزینه شده و همچنین، افزایش راندمان کاهش نویز نسبت به رزوناتور تک محفظه را به همراه دارد.

سویان و همکارانش [۱۶]، تاثیر استفاده از رینگ‌های با جنس مختلف، در ایجاد پدیده رزونانس کوپلینگ ساختار و آکوستیک تایر مونتاژ شده با رینگ را بررسی کرده و راه‌کاری برای جلوگیری از این پدیده، معرفی شده است. نویز تایر در فرکانس‌های پایین‌تر (زیر ۳۰ هرتز) تحت تاثیر سختی تایر قرار می‌گیرد، در محدوده فرکانس میانی (۳۰ تا ۲۵۰ هرتز) تحت تاثیر شکل مودهای طبیعی تایر است و در محدوده فرکانس بالاتر (بالای ۲۵۰ هرتز) با میرایی تایر کنترل می‌شود. با دور کردن شکل مود اول خمشی رینگ از شکل مود حفره هوای تایر، از ایجاد کوپلینگ جلوگیری می‌شود. این کار با تغییر رینگ فولادی به رینگ آلومینیومی انجام می‌شود. رینگ آلومینیومی نسبت به رینگ فولادی سخت‌تر و سبک‌تر است. در صورت استفاده از رینگ فولادی، قله دوم که شکل مود اول خمشی رینگ فولادی است در حدود فرکانس ۲۴۰ هرتز رخ می‌دهد. بدیهی است که شکل مود اول حفره هوای تایر، تحت تاثیر حضور شکل مود اول خمشی رینگ فولادی قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از رینگ

این مواد جاذب آکوستیکی با ضخامت ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در مکان‌های مشخص در داخل حفره تایر، می‌تواند کاهش بیش از ۱۱ دسی بل را در SPL، به همراه داشته باشد [۱].

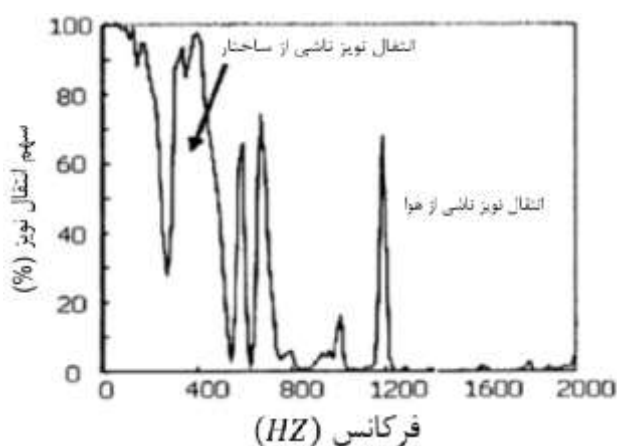
گالرین و همکارانش [۲۷] دریافتند که پاسخ دو نوع گاز هوا و هلیوم در حوزه زمانی تفاوت چندانی ندارند، اما پاسخ فرکانسی آن‌ها بخصوص در محدوده فرکانس ۲۰۰ هرتز تفاوت قابل توجهی دارند که مشاهده می‌شود، حفره پر شده با هوا در این محدوده فرکانس، دارای دو قله مجزا است اما برای هلیوم این گونه نیست. همچنین حفره پر شده با هلیوم، نیروی کمتری به اسپیندل چرخ در محدوده فرکانس رزونانس حفره تایر وارد می‌کند. او نتیجه‌گیری کرد که به منظور افزایش دقت یک مدل تایر در فرکانس بالاتر از ۲۰۰ هرتز، یک مدل حفره گاز دینامیکی الزامی است و نشان داد که مدل سه بعدی تایر همراه با یک مدل حفره اوپلر تراکم‌پذیر یک بعدی می‌تواند با موفقیت، تعامل ساختار تایر و حفره را حتی در محدوده فرکانس ۲۰۰ هرتز با در نظر گرفتن اثرات چرخش و بارگذاری پیش‌بینی کند درحالی‌که هر دو مدل حفره فشار ثابت و مدل حفره گاز ایده‌آل، قادر به پاسخگویی نیرو در پهنای باند فرکانس حفره نیستند.

راه‌حل دیگر ارائه شده توسط فاجیوار و همکارانش، طراحی رینگ با استفاده از رزوناتورهای می‌باشد. فرناندز و همکارانش، بیان کردند که استفاده از رزوناتورهای منفعل در مسئله نویز مجرا بسیار گسترده است، اما آن‌ها در جریان کاهش نویز حفره تایر، استفاده اصلی را پیدا نکرده‌اند، زیرا فرکانس رزونانس حفره تایر غالباً با تغییر سرعت دورانی، تغییر می‌کند. دنیل و همکارانش، برای کاهش نویز حفره تایر از طریق سرکوب فرکانس رزونانس اصلی، استفاده از رزوناتورهای منفعل را توسعه دادند. آن‌ها نشان دادند که با سه رزوناتور تنظیمی، یک کاهش در پیک دامنه صدا از ۱۰۳ تا ۸۸ دسی بل و با پنج رزوناتور تنظیمی، یک کاهش در پیک دامنه صدا از ۱۰۳ تا تقریباً ۸۷ دسی بل در رنج سرعت از ۵۴ تا ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت امکان‌پذیر است. بنابراین تعداد رزوناتورهای بیشتر، بهتر می‌تواند نویز حفره را در دامنه فرکانس‌های بالاتر کاهش دهد. دنیل و همکارانش نشان دادند که هلیوم، فرکانس رزونانس حفره تایر را بسیار افزایش می‌دهد و به طور معمول برای ارتعاش ناشی از ساختار داخلی، در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که دی اکسید کربن که به راحتی در دسترس است؛ فرکانس رزونانس حفره را کاهش می‌دهد. سکاووزو و همکاران نشان دادند وقتی که شکل مود خمشی رینگ فولادی با فرکانس رزونانس حفره هماهنگ می‌شود، فشار صدا داخل خودرو ۷۸ دسی بل است، اما استفاده از رینگ آلومینیومی با مقدار فرکانس خمشی بسیار متفاوت، باعث کاهش فشار صدای داخل خودرو تا



شکل ۷ مسیرهای انتقال نویز به داخل کابین [۱۱]

انتقال نویز ناشی از ساختار عمدتاً در فرکانس‌های پایین (زیر ۵۰۰ هرتز) رخ می‌دهد درحالی‌که انتقال نویز ناشی از هوا، در فرکانس‌های بالا (۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز) اتفاق می‌افتد که در شکل (۸) نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۸ سهم انتقال نویز ناشی از ساختار و هوای تایلر در فرکانس‌های مختلف [۱۱]

پیترزیک گزارش داد که نویز ساختاری ناشی از رزونانس تایلرها در فرکانس زیر ۴۰۰ هرتز، از طریق اسپیندل چرخ و قطعات جامد وسیله نقلیه منتقل می‌شود و به این ترتیب نویز داخلی از پانل‌های تحریک و سطوح کابین به وجود می‌آید. مولیسانی و همکاران مشخص کردند که یک چنین رزونانس تایلری به دلیل حفره هوای آکوستیک تایلر است [۱۱].

جسوپ و بولتون مطالعاتی در مورد شکل مودهای حفره تایلر، به دلیل اثرات نامطلوب آن، همانند فشار نیرویی که بر توپی چرخ وارد می‌کند و باعث انتقال نویز ناشی از ساختار تایلر به داخل وسیله نقلیه می‌شود، انجام داده‌اند. رزونانس حفره تایلر، علاوه بر این که باعث ارتعاش توپی چرخ و انتقال اثر آن به داخل کابین

آلومینیومی، قله دوم که شکل مود اول خمشی رینگ آلومینیومی است در حدود فرکانس ۳۷۸ هرتز رخ می‌دهد.

بولتون و همکارانش [۱۸]، یک سیستم کوپلینگ ساختار و حفره هوای آکوستیک تایلر را به منظور بررسی مکانیزم ایجاد نویز ناشی از آن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در فرکانس اطراف ۲۰۰ هرتز، پدیده کوپلینگ بین شکل مود عمودی حفره تایلر؛ با شکل مود هشتم ساختاری در شرایط سختی بالای مواد آج و شکل مود نهم ساختاری در شرایط سختی کم مواد آج، به وجود می‌آید. هنگامی که مود ارتعاشی عمودی حفره هوایی تایلر، با مودهای فرد (اول، سوم و...) ساختار تایلر کوپل می‌شوند، شتاب مرکز رینگ تایلر در راستای عمودی (بالا و پایین) افزایش می‌یابد. زمانی که مود ارتعاشی افقی حفره هوایی تایلر، با مودهای زوج (دوم، چهارم و...) ساختار تایلر کوپل می‌شوند، شتاب مرکز رینگ تایلر در راستای افقی (جلو و عقب) افزایش می‌یابد. انتقال نیرو به این خاطر است که حرکت خالص آج تایلر (حرکت عمودی) در یک فرکانس خاص ایجاد می‌شود.

۳-۲- تاثیر انتقال انرژی رزونانس حفره تایلر و راهکارهای کنترل آن

بر اساس مکانیزم تولید نویز (منبع) و محیط انتقال نویز (مسیر)، نویز تایلرها می‌توانند به عنوان نویز ناشی از ساختار و نویز حفره هوا، طبقه‌بندی شوند. بر اساس موقعیت گیرنده، نویز تایلرها را می‌توان به عنوان نویز داخلی (داخل وسیله نقلیه) و نویز خارجی (خارج از وسیله نقلیه) طبقه‌بندی کرد. به این ترتیب، اساساً چهار نوع نویز وجود دارد، که از دو مجموعه مسیر وارد داخل کابین می‌شود که هر کدام از ساختار و حفره هوای تایلر ساطع می‌شود. نویز فرکانس متوسط، از طریق ماده جامد به سیستم تعلیق و بدنه خودرو منتقل شده و اصطلاحاً نویز منتقل شده از طریق مسیر سازه‌ای نامیده می‌شود و نویز فرکانس بالا را، اصطلاحاً نویز منتقل شده از طریق هوا می‌نامند که در شکل (۷) نشان داده شده است. به طور کلی تفاوت بین نویز ساختار و نویز حفره هوا در مسیر انتقال است. ارتعاشات و نویز تولید شده در تایلر، از طریق خواص ساختاری تایلر، توپی چرخ و اجزای بدنه همانند سیستم فرمان و تعلیق خودرو، به داخل کابین منتقل می‌شود [۱ و ۱۱].

که این حفره، در معرض دریافت انرژی آکوستیکی از دیواره تایلر قرار گرفته و سپس آن را در فرکانس رزونانس حفره، به ساختار تایلر بازگرداند [۱].

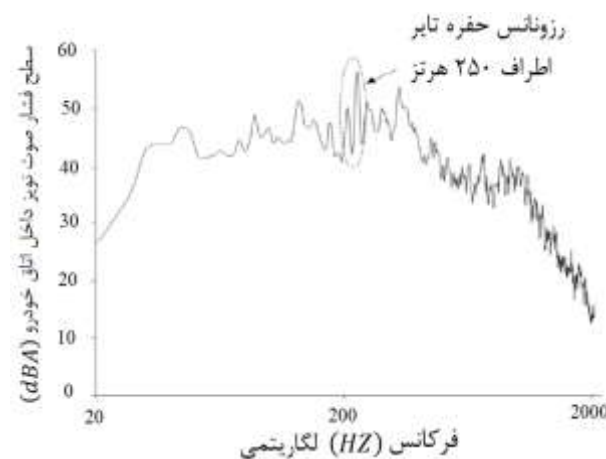
شکل (۹) طیف توان خطی نویز درون کابین از روش تست، هنگام رانندگی وسیله نقلیه با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت در یک جاده ناصاف را نشان می‌دهد [۱۶].

بار میدان صدا) انجام گرفته است تا با استفاده از این مدل، بتوان دامنه فشار صدا ناشی از رزونانس حفره را توصیف کرد. از مدل بار می‌توان برای شبیه‌سازی ویژگی‌های انتقال انرژی رزونانس حفره، به رینگ و سیستم تعلیق استفاده کرد این مدل، برای تحقیق در مورد روش‌های کنترل نویز ناشی از رزونانس حفره تایلر مفید است.

ژانگ و همکارانش [۱۴]، ارزیابی تاثیر مواد جاذب صدا بر روی رزونانس حفره و دستورالعمل‌های مربوط به انتخاب نوع و ضخامت مواد جاذب را مورد بررسی قرار دادند. در این کار، از یک مدل سیال معادل، به عنوان ماده جاذب صدا استفاده شده و رزونانس حفره تایلر روکش‌شده، با استفاده از آنالیز مقادیر ویژه، با توجه به شرایط مرزی مشخص، بدست آمده است. از این پژوهش نتیجه‌گیری می‌شود که روکش با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و مقاومت در برابر انتقال صدای ۲ کیلو پاسکال ثانیه بر متر مربع، به دلیل از بین نبردن تعادل جرم تایلر (کم بودن جرم روکش) و تاثیرگذاری مفید بر کنترل نیروی رزونانس حفره تایلر؛ یک روکش بهینه است.

محمد و همکارانش [۲۹]، استفاده از مواد جاذب آکوستیک و به طور خاص، این بار استفاده از چند لایه مواد نمدی را برای کاهش نویز رزونانس حفره تایلر بررسی کردند. از قبل، مطالعات دیگری بر روی مواد دیگری همچون پشم شیشه، آلومینیوم و روکش پلی‌اورتان انجام شده بود. مواد نمدی که در این مطالعه آزمایش شده‌اند، کم‌هزینه و قابل بازیافت هستند و معمولاً به عنوان روکش داخلی وسایل نقلیه معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای یک نوع از نمد با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر، کاهش SPL در فرکانس حفره تایلر حدود ۶ تا ۱۰ دسی‌بل مشاهده شد. یانگ و همکارانش [۳۰]، یک مدل جدید کوپلینگ تایلر و حفره، شامل لایه‌های آج و رینگ را به شکل تحلیلی ارائه دادند که می‌تواند ساختار تایلر را بهتر نشان دهد و مشخصات دینامیکی اصلی تایلر را در نظر بگیرد. اثرات رزونانس شکل مود اول حفره بر روی نیروی اسپیندل و مومنتوم نیز بسیار برجسته شناخته شد که از طریق آن می‌توان سطح نویز حفره تایلر را نشان داد. درحالی‌که پاسخ فرکانسی، مقادیر پیک یا قله‌ها را در هر دو شکل مود اول و دوم حفره نشان می‌دهند، پاسخ نیرو در اسپیندل، هیچ

می‌شود می‌تواند باعث انتشار نویز نامطلوب، به اطراف گردد. کیم و همکارانشان مشاهده کردند، حرکت موجی که باعث تحریک دیواره تایلر است، نقش بسیار مهمی در انتشار صدای تایلر دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکل مود حفره تایلر زمانی بر شکل مود ساختاری آن منطبق است که هر دو، عدد موج دورانی یکسانی داشته باشند. فشار زیاد هوا در داخل حفره تایلر باعث شده



شکل ۹ طیف نویز کابین در حرکت بر جاده زبر با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت [۱۶]

در طیف نویز داخل کابین در محدوده فرکانس پایین (۰ تا ۴۰۰ هرتز) می‌توان دید که چندین قله وجود دارد. در تعداد کمی از آن‌ها شکل موده‌های تایلر، ساختار رینگ و حفره تایلر نقش دارند. دو قله نزدیک به این محدوده فرکانس، به دلیل تحریک شکل مود حفره هوای تایلر و انتقال از طریق مسیر ساختاری خودرو است. آن‌ها تحت تأثیر فشار باد نیستند، اما دامنه آن‌ها تحت تأثیر نوع سیال، رینگ و سیستم تعلیق قرار دارند [۱۶].

تولیدکنندگان تایلر، به دلیل سخت بودن کاهش نویز منبع صدا، یا کاهش مسیر انتقال صدا از تویی چرخ به داخل کابین خودرو، برای کاهش بخشی از نویز ساختاری تایلر، مواد افزودنی دمپ‌کننده را به وسایل نقلیه اضافه می‌کنند. اگر نویز تایلر با رزونانس قطعات سیستم تعلیق کوپل شود، یک مسیر انتقال نویز به داخل کابین خودرو به وجود می‌آید [۸].

برای مطالعه ویژگی‌های انتقال انرژی و کاهش بیشتر این انتقال، لازم است ابتدا بار فشار صدایی که بر روی رینگ وارد می‌شود، مشخص گردد. در پژوهشی که توسط لیو و همکارانش [۶] انجام گرفته، مدل بار اعمال‌شده بر روی رینگ، تحت تاثیر حداکثر دامنه فشار صدا در داخل حفره ناشی از رزونانس شکل مود اول، با توجه به فشار باد تایلر و بار تحریک‌آمیز جاده، بر اساس شبیه‌سازی، ایجاد شده و آزمایش‌هایی برای تأیید این مدل (مدل

شکل مود عمودی و افقی به ترتیب از ۷۸/۶ به ۶۳/۵ دسی‌بل و از ۷۵/۱ به ۵۸/۲ دسی‌بل با اعمال ماده جاذب صدا کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری مواد جاذب صدا با ضخامت ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در مکان‌های مشخص در داخل حفره تایر، می‌تواند کاهش بیش از ۱۱ دسی‌بل را در SPL، به همراه داشته باشد. راهکار دیگر، اصلاح محتوای حفره تایر با پرکردن حفره از الیاف معدنی، می‌تواند باعث کاهش نویز به اندازه‌ی بیش از ۲۰ دسی‌بل در کابین خودرو شود. طراحی سیستم‌های کاهنده نویز حفره هوا همچون استفاده از سه رزوناتور منفعل تنظیم شده کاهش در پیک دامنه صدا از ۱۰۳ تا ۸۸ دسی‌بل را به همراه دارد.

۵- مراجع

- [1] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R., A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 9, NO. 3-4, pp. 276-293, (2013).
- [2] Del Pizzo, L. G., Bianco, F., Moro, A., Schiaffino, G., & Licitra, G., Relationship between tyre cavity noise and road surface characteristics on low-noise pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 98, pp. 102971, (2021).
- [3] Mange, A., Behrooz, M., & Baqersad, J., Identify challenges in vibration measurements for rotating tyres using a finite element model. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 16, No. 3-4, pp. 113-126, (2020).
- [4] Mollajafari, M., & Shojaeefard, M. H., TC3PoP: a time-cost compromised workflow scheduling heuristic customized for cloud environments. *Cluster Computing*, pp. 1-18, (2021).
- [5] Li, T., A state-of-the-art review of measurement techniques on tire-pavement interaction noise. *Measurement*, Vol. 128, pp. 325-351, (2018).
- [6] Liu, Y., Liu, X., Yuan, J., Yi, J., Hu, X., & Shan, Y., Research on the Model of Load Acting on the Rim Arising from Tire Acoustic Cavity Resonance. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 259, No. 8, pp. 1531-1540, (2019, September).
- [7] Liu, Y., Liu, X., Shan, Y., Hu, X., & Yi, J., Research on mechanism and evolution features of frequency split phenomenon of tire acoustic cavity resonance. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 27, NO. 3-4, pp. 343-355, (2021).
- [8] Daniel, J. O., Automotive wheel and tyre design for suppression of acoustic cavity noise through the incorporation of passive resonators. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 467, pp. 115037, (2020).

قله‌ای پیرامون رزونانس دوم حفره تایر ندارد یعنی شکل مود دوم حفره، باعث ایجاد نیرو و پاسخ اندازه حرکت در اسپیندل نمی‌شود که مطابق با تحقیقات قبلی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از معرفی مسأله رزونانس حفره تایر، بررسی مشخصات ارتعاش و نویز حفره تایر و راهکارهای کنترل منبع و مسیر انتقال آن در چندین بخش، براساس آخرین مقالات منتشر شده مورد بررسی قرار گرفته است. شکل مود رزونانس حفره تایر، توسط تماس و تعامل تایر و جاده تحریک می‌شود که در آن، مود حفره تایر و ساختار تایر با هم کوپل شده و نویز و ارتعاشات را در محدوده فرکانس بین ۲۰۰ و ۲۵۰ هرتز به وجود می‌آورد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بررسی رزونانس حفره تایر، فقط برای محدوده فرکانس ۲۰۰ تا ۲۵۰ هرتز ضروری است. رزونانس حفره تایر، یک عامل مهم در تولید نویز تایر می‌باشد که از طریق انتقال ارتعاش و نویز حفره تایر به تویی چرخ، سیستم تعلیق و فرمان و سپس به بدنه خودرو، در نهایت به داخل کابین خودرو وارد می‌شود.

برای کاهش ناراضایتی ناشی از رزونانس حفره تایر در داخل کابین خودرو، بررسی دو موضوع اهمیت ویژه دارد که عبارتند از کنترل نویز حفره تایر و محیط چرخ به عنوان منبع انتشار نویز؛ و کنترل مسیر انتقال نویز به داخل کابین که در دو بخش مختلف به بررسی و دسته‌بندی راهکارهای قابل انجام برای رفع مشکل، پرداخته شده است. در این مقاله برای اولین بار به بررسی و دسته‌بندی راهکارهای کنترل رزونانس حفره تایر پرداخته شده و در چندین دسته از جمله اصلاح طراحی رینگ چرخ، اصلاح محتوای حفره تایر، درج مواد جاذب صدا در داخل حفره تایر، طراحی سیستم‌های کاهنده نویز حفره هوا و اصلاح ساختار تایر طبقه‌بندی شده است. سپس میزان تاثیر هر کدام برای نمونه‌های موردی بصورت کمی بیان شده است. به عنوان مثال برای حالتی که از رینگ فولادی استفاده شود، به دلیل کوپلینگ شکل مود اول خمشی رینگ فولادی با فرکانس رزونانس حفره که هر دو در حدود فرکانس ۲۴۰ هرتز قرار دارد، فشار صدا در داخل خودرو به اندازه ۷۸ دسی‌بل می‌شود درحالی‌که استفاده از رینگ آلومینیومی این فشار صدا را به ۶۶ دسی‌بل کاهش می‌دهد، زیرا شکل مود اول خمشی رینگ آلومینیومی در حدود فرکانس ۳۷۸ هرتز است. در راهکار دیگر با گذاشتن ماده جاذب صدا در داخل حفره تایر، فرکانس شکل مود عمودی و افقی به ترتیب از ۲۳۵ به ۲۲۹ هرتز و از ۲۲۷ به ۲۲۰ هرتز کاهش و SPL تایر، برای

- [20] Glandier, C., & Grollius, S., Improved Full Vehicle Finite Element Tire Road Noise Prediction, SAE Technical Paper 2017-01-1901, (2017).
- [21] HORIKAWA, S., TANAKA, Y., NAKAMURA, M., & MURATA, S., Theoretical analysis of sound pressure distributions inside a tire cavity. *Advanced Experimental Mechanics*, Vol. 1, pp. 149-154, (2016).
- [22] Ishihama, M., Miyoshi, K., Yoshii, K., & Kanda, M., Tire Cavity Sound Measurement for Identifying Characters of Road Surfaces and Tire Structures. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 253, No. 5, pp. 2872-2882, (2016, August).
- [23] Noguchi, Y., Yamamoto, T., Yamada, T., Izui, K., & Nishiwaki, S., A level set-based topology optimization method for simultaneous design of elastic structure and coupled acoustic cavity using a two-phase material model. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 404, pp. 15-30, (2017).
- [24] Hu, X., Liu, X., Shan, Y., & He, T., Simulation and Experimental Validation of Sound Field in a Rotating Tire Cavity Arising from Acoustic Cavity Resonance. *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 1121, (2021).
- [25] Tanaka, Y., Horikawa, S., & Murata, S., An evaluation method for measuring SPL and mode shape of tire cavity resonance by using multi-microphone system. *Applied Acoustics*, Vol. 105, pp. 171-178, (2016).
- [26] Li, T., Influencing Parameters on Tire-Pavement Interaction Noise: Review, Experiments, and Design Considerations. *Designs*, Vol. 2, No. 4, pp. 38, (2018).
- [27] Gallrein, A., Baecker, M., & Guan, J., Simulation of Dynamic Gas Cavity Effects of a Tire under Operational Conditions, SAE Technical Paper 2018-01-0682, (2018).
- [28] Kamiyama, Y., Development of twin-chamber on-wheel resonator for tire cavity noise. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 37-43, (2018).
- [29] Mohamed, Z., Tire cavity resonance mitigation using acoustic absorbent materials. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 23, No. 10, pp. 1607-1622, (2017).
- [30] Yang, Y., Du, Y., Tong, R., & Wei, Y., An improved structural-acoustic coupling model for tire cavity noise. *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 66, No. 3, pp. 244-257, (2018).
- [9] Zhao, W., Liu, X., Shan, Y., & He, T., Design and simulation of Helmholtz resonator assembly used to attenuate tire acoustic cavity resonance noise. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 263, No. 6, pp. 942-953, (2021, August).
- [10] Pinay, J., Unrau, H. J., & Gauterin, F., Prediction of close-proximity tire-road noise from tire cavity noise measurements using a statistical approach. *Applied Acoustics*, Vol. 141, pp. 293-300, (2018).
- [11] Li, T., Literature review of tire-pavement interaction noise and reduction approaches. *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2424-2452, (2018).
- [12] Wang, Z., Yi, J., Liu, Y., & Liu, X., Characteristics of sound pressure in the tire cavity arising from acoustic cavity resonance excited by the curvature change of tread. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 259, No. 2, pp. 7371-7379, (2019, September).
- [13] Baro, S., Corradi, R., Åbom, M., Caracino, P., & Fioravanti, A. P., Modelling of a lined tyre for predicting cavity noise mitigation. *Applied Acoustics*, Vol. 155, pp. 391-400, (2019).
- [14] Zhang, Y. B., Yao, Q., Xiao, L., Zhang, X. Z., Zheng, C. J., & Bi, C. X., On the resonance of a lined tire cavity. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 105, No. 6, pp. 1237-1242, (2019).
- [15] Wang, Z., Yi, J., Liu, Y., & Liu, X., Characteristics of sound pressure in the tire cavity arising from acoustic cavity resonance excited by the curvature change of tread. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 259, No. 2, pp. 7371-7379, (2019, September).
- [16] Subbian, J., Padmanaban, S., & Skp, A., Investigation of Tyre Acoustic Cavity Mode Induced In-Cabin Noise, SAE Technical Paper 2019-26-0187, (2019).
- [17] Cao, R., & Bolton, J. S., Point excitation of a coupled structural-acoustical tire model with experimental verification: Higher order cavity modes. *Applied Acoustics*, Vol. 136, pp. 48-60, (2018).
- [18] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M., Force Transmission Characteristics for a Loaded Structural-Acoustic Tire Model. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, Vol. 11, No. 06-11-04-0025, pp. 305-319, (2018).
- [19] Hu, X., Liu, X., Wan, X., Shan, Y., & Yi, J., Experimental analysis of sound field in the tire cavity arising from the acoustic cavity resonance. *Applied Acoustics*, Vol. 161, pp. 107172, (2020).