

## مدلسازی عملکرد سامانه های فتوولتائیک حرارتی هواخنک یکپارچه با ساختمان

**چکیده:** در تحقیق حاضر روابط ساده و صریح جهت محاسبه پارامترهای حرارتی سامانه های فتوولتائیک حرارتی هواخنک یکپارچه با ساختمان ارائه می شوند. این معادلات بر مبنای اصول بقاء برای سامانه فتوولتائیک حرارتی به دست آمده اند. رابطه هایی ساده و صریح برای محاسبه دمای پانل فتوولتائیک و حرارت منتقل شده به اتاق ارائه شده است. این روابط برای بررسی عملکرد انواع سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان با انواع شفافیت از کدر تا شفاف قابل استفاده هستند. روابط تحقیق حاضر در روش های مختلف قرارگیری سامانه با سیال هوا قابل استفاده هستند. با استفاده از این روابط نیازی به استفاده از معادلات بقای مجموعه پانل فتوولتائیک همراه با ساختمان نخواهد بود و تنها با داشتن  $\eta$  راندمان الکتریکی پانل و  $\tau$  ضریب عبور پانل و شرایط محیطی دو پارامتر اصلی مدنظر در عملکرد سامانه، "دمای پانل فتوولتائیک" و "گرمای منتقل شده به ساختمان" محاسبه می شوند.

**واژه های راهنما:** سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان، مدلسازی، دمای پانل فتوولتائیک، گرمای منتقل شده

علی قهرمانی  
کارشناسی ارشد

### مهدی معرفت\*

استاد،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقاله علمی ترویجی  
دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۳  
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷  
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

Ali Ghahremani  
MSc

Mehdi Maerefat\*  
Professor,  
Faculty of Mechanical  
Engineering,  
Tarbiat Modares University,  
Tehran

## Performance modeling of air cooled building integrated photovoltaic thermal systems

**Abstract:** In the present study, simple and explicit relationships are proposed for calculating the thermal parameters of building-Integrated Photovoltaic-Thermal (BIPV/T) systems. These equations are derived based on conservation principles for PVT systems. Simple and explicit equations are presented for determining the photovoltaic panel temperature and the heat transferred to the room. These relations can be applied to assess the performance of various BIPV/T systems with different transparency levels, ranging from opaque to fully transparent. The present research's relationships are applicable for systems with different installation configurations using air as the working fluid. By using these equations, there is no need to solve the full set of energy balance equations for the combined panel-building system. Instead, with only the electrical efficiency ( $\eta$ ) and the transmittance coefficient ( $\tau$ ) of the panel, along with environmental conditions, the two key performance parameters—the photovoltaic panel temperature and the heat transferred to the building—can be determined.

**Keywords:** Building Integrated Photovoltaic/Thermal system, Modeling, Photovoltaic panel temperature, Heat transferred

## ۱- مقدمه

و همکاران ارائه شده است، دمای سلول خورشیدی، دمای سطح زیرین و دمای هوای خروجی کانال را محاسبه می‌کنند. برای تعیین شفافیت پانل فتوولتائیک از خواص ۳ لایه تشکیل‌دهنده پانل خورشیدی استفاده کرده‌اند [۵]. سرحدی و همکاران یک مدل‌سازی کامل‌تر نسبت به تحقیقات گذشته برای سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی نصب شده روی کانال را ارائه کردند. در این مدل‌سازی، انتقال حرارت تابشی پانل فتوولتائیک به آسمان را به کمک یک ضریب انتقال حرارت در نظر گرفتند [۶].

سلیمانی و همکاران چهار سامانه‌ی فتوولتائیک حرارتی کدر را با روش‌های قرارگیری متفاوت روی پوسته‌ی ساختمان مدل‌سازی کردند. سلیمانی در تحقیق خود، انتقال حرارت تابشی کلکتور به آسمان را به صورت ترم جدا در نظر گرفته است. همچنین روابط پیچیده و متعدد برای محاسبه دمای هوای خروجی کانال، کارایی سامانه‌ی فتوولتائیک حرارتی و دمای لایه‌های مختلف پانل ارائه کردند [۷].

زوهری و همکاران یک سامانه فتوولتائیک حرارتی کدر با کلکتور شیاردار را مدل‌سازی کردند. در مدل‌سازی خود ضمن ساده‌سازی‌های ارزنده، پنج لایه و پنج معادله در نظر گرفتند و موفق نشدند معادلات صریح برای دما و حرارت منتقل شده ارائه کنند [۸].

تیواری و همکاران یک سامانه فتوولتائیک حرارتی نیمه شفاف نصب شده روی اتاق را برای کاربرد گلخانه بررسی و روابط ساده‌ای ارائه و راستی‌آزمایی کردند. روابط پیشنهادی این تحقیق، دمای سلول خورشیدی و دمای اتاق را برای سامانه نیمه شفاف محاسبه می‌کنند [۹].

دون و همکاران یک سامانه فتوولتائیک حرارتی کدر نصب شده روی کانال و اتاق را مدل‌سازی و نتایج خود را با آزمایش جاشی و همکاران مقایسه کردند. در این مدل‌سازی انتقال حرارت سلول خورشیدی به سیال کانال، محیط اطراف و فضای اتاق را در نظر گرفتند و نتایج خود را با حل عددی محاسبه کردند [۱۰].

تیواری و اگرال در کتاب سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان بسیار مفصل به مسائل مختلف در این زمینه پرداختند. تحقیق حاضر برای کامل‌تر کردن مدل‌سازی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی از این کتاب الهام گرفته است [۱۱].

در تحقیق حاضر، به کمک اصول بقاء، یک سری رابطه صریح و ساده برای محاسبه دمای پانل فتوولتائیک و گرمای منتقل شده به اتاق ارائه می‌شوند. روابط صریح ارائه شده برای بررسی عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی با هر میزان شفافیت قابل استفاده و با کاربرد هستند نیازی به تحلیل کامل ساختمان و یا انجام محاسبات عددی نخواهد بود.

امروزه استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی هواخنک یکپارچه با ساختمان در حال گسترش روزافزون است و با افزایش استفاده از آن‌ها، بررسی ساده، سریع و دقیق کارایی این سامانه‌ها، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی هواخنک متداول به دو روش روی ساختمان نصب می‌شوند: مستقیماً روی فضای داخلی ساختمان و یا روی کانالی در سقف فضای داخلی ساختمان. این سامانه‌ها بخشی از انرژی خورشید دریافتی را به برق تبدیل کرده و بخش دیگری از آن را به صورت انرژی حرارتی وارد ساختمان می‌نمایند. حرارت وارد شده به ساختمان می‌تواند برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی بکار رود و بارهای گرمایش دستگاه‌های تهویه مطبوع را کاهش دهد.

سیرین و همکاران سامانه‌ها را دسته‌بندی کردند و نحوه عملکرد آن‌ها را توضیح دادند. همچنین روش‌هایی برای بهبود راندمان این سامانه‌ها را بررسی کردند و تحقیقات موجود در مورد کاربردهای مختلف این سامانه‌ها در ساختمان‌های سبز و انرژی صفر را مرور کرده‌اند [۱].

تیواری و همکاران تحقیقات اخیر روی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال هوا و آب را بررسی کردند. همچنین تأثیر عوامل مختلف را بر راندمان این سامانه‌ها، مثل استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، نانو سیال و یا جنس مواد سازنده سلول‌های خورشیدی را مرور کردند [۲]. دبارما و همکاران [۳] مدل‌سازی حرارتی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی را مرور کردند. روابطی برای بررسی عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک و فتوولتائیک حرارتی با سیال هوا و آب را مرور کردند. همچنین نرم افزارهای متداول شبیه‌سازی این سامانه‌ها را معرفی نمودند. در ادامه چند مورد سامانه فتوولتائیک و فتوولتائیک حرارتی که در سراسر دنیا اجرا شده‌اند را از نظر راندمان حرارتی و الکتریکی مقایسه کردند.

تاریخچه معرفی و مدل‌سازی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی به دهه‌ی ۷۰ میلادی برمی‌گردد. فلورشوتز سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی رابه کمک اصل بقای انرژی مدل‌سازی کرد. برای مدل‌سازی، مدل کلکتورهای حرارتی صفحه‌ای را تعمیم داد و در مدل‌سازی خود تولید هم‌زمان برق و حرارت در سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی را در نظر گرفت [۴].

جاشی و همکاران سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی نصب شده روی کانال را برای دو حالت نیمه شفاف و کدر مدل‌سازی کردند. در این مدل‌سازی انتقال حرارت سلول خورشیدی به سیال کانال و محیط اطراف را در نظر گرفتند. روابطی که در تحقیق جاشی

## ۲- سامانه فتوولتائیک حرارتی بررسی شده

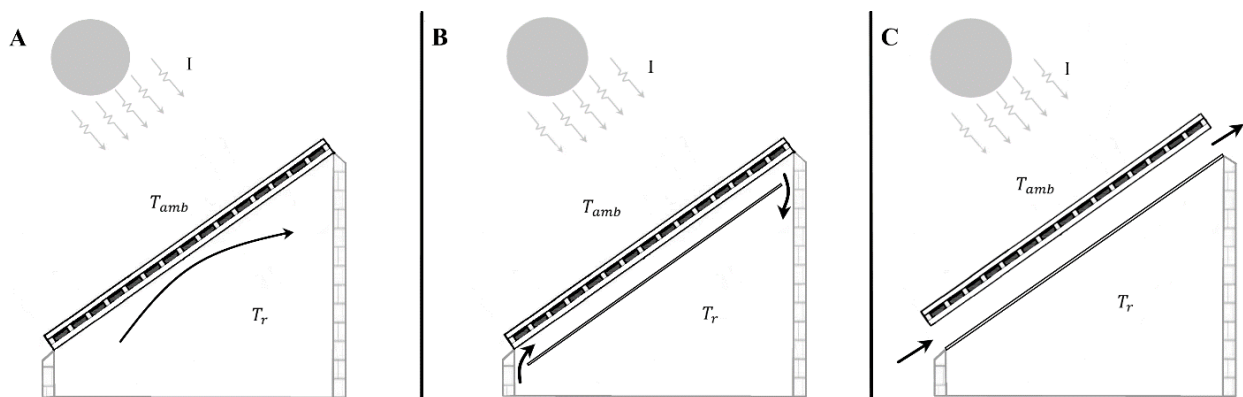
دریافت می‌کند. شدت تابش دریافتی  $I$  به ساعت شبانه روز و شرایط اقلیمی بستگی دارد.

تابش دریافتی با نسبت  $\eta$  به الکتریسیته تبدیل می‌شود و به اندازه  $\tau$  از پانل خورشیدی عبور کرده و مابقی به صورت حرارت در پانل جذب می‌شود.  $\eta$  راندمان الکتریکی است که بر حسب نوع و ساختار سلول‌های خورشیدی تعیین می‌شود.  $\tau$  ضریب عبور پانل فتوولتائیک است. حرارت جذب شده باعث افزایش دمای پانل شده و این حرارت توسط جابجایی به محیط بالا و پایین پانل و همچنین تابش به آسمان منتقل می‌شود.

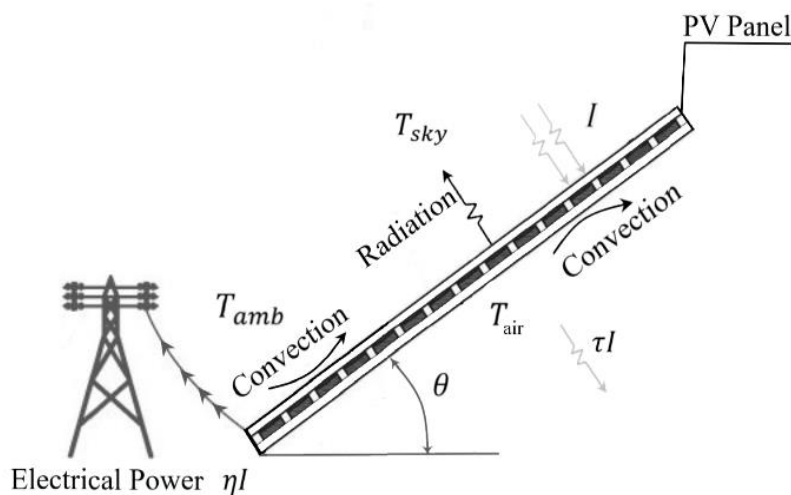
دو پارامتر مهم در بررسی کارایی این سامانه‌های فتوولتائیک عبارتند از: دمای پانل فتوولتائیک یا  $T_{pv}$ ، و گرمای منتقل شده به اتاق یا  $Q$ . دمای بالای  $T_{pv}$  به سلول‌ها آسیب می‌زند و راندمان الکتریکی کاهش می‌یابد و  $Q$  جهت محاسبات تهویه مطبوع مورد نیاز است. به علاوه این دو پارامتر جهت انجام محاسبات آسایش حرارتی و ارزیابی مصرف انرژی در ساختمان کاربرد دارند.

در تحقیق حاضر عملکرد یک پانل فتوولتائیک خنک شونده توسط هوا بررسی شده است. شکل (۱) روش‌های مختلف قرارگیری پانل فتوولتائیک روی پوسته ساختمان را نشان می‌دهد و روابط کاربردی تحقیق حاضر برای هر سه روش قرارگیری قابل استفاده می‌باشند. شکل  $A_1$  پانل فتوولتائیک نصب شده روی اتاق را نشان می‌دهد که گرمای تولیدی مستقیماً وارد اتاق می‌شود. شکل  $B_1$  پانل نصب شده روی کانال هوای داخل اتاق را نشان می‌دهد که گرما به هوای کانال منتقل می‌شود و هوای گرم کانال وارد فضای اتاق می‌شود. شکل  $C_1$  پانل نصب شده روی کانال خارج از اتاق را نشان می‌دهد که در آن جریان هوای داخل کانال فقط باعث خنک شدن پانل می‌شود و از گرمای تولیدی استفاده نمی‌شود.

شکل (۲) شماتیک نمای جانبی پانل فتوولتائیک حرارتی متداول را نشان می‌دهد. این پانل تابش خورشیدی با شدت  $I$  را



شکل ۱ روش‌های مختلف نصب پانل‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه در ساختمان؛ (A) نصب شده روی اتاق، (B) نصب شده روی کانال هوای داخل اتاق و (C) نصب شده روی کانال هوای خارجی



شکل ۲ شماتیک پانل فتوولتائیک

## ۳- مدل سازی

## ۳-۱- دمای پانل

مدل سازی سامانه های فتوولتائیک حرارتی با توجه به اصل بقای انرژی برای سامانه های فتوولتائیک حرارتی نشان داده شده در شکل (۲) انجام شده است. با توجه به تغییرات نسبتاً کند در شرایط محیطی و حرارتی، سیستم در شرایط پایا و میانگین ساعتی پارامترها به صورت ثابت منظور شده است. سامانه تابش خورشیدی را با شدت  $I$  دریافت می کند. با نوشتن بالانس انرژی برای پانل رابطه (۱) به دست می آید.

$$IA = \eta IA + h_{amb}(T_{pv} - T_{amb})A + h_{air}(T_{pv} - T_{air})A + h_{rad}(T_{pv} - T_{sky})A + \tau IA \quad (1)$$

که در آن  $h$  ضریب انتقال حرارت و  $T$  دما و  $A$  سطح پانل است. زیر نویس های amb محیط، pv پانل فتوولتائیک، air هوا، rad تشعشع، sky آسمان می باشند.

رابطه (۱) نشان می دهد که تابش دریافتی با نسبت  $\eta$  به الکتریسیته تبدیل می شود و به اندازه  $\tau$  از پانل خورشیدی عبور می کند و مابقی به صورت حرارت در پانل جذب شده و دمای آن را به  $T_{pv}$  می رساند. حرارت جذب شده با جابجایی و تشعشع به محیط های بالا و پایین منتقل می شود. با ساده کردن رابطه (۱) دمای پانل فتوولتائیک به دست می آید.

$$T_{pv} = \frac{h_{air}T_{air} + h_{amb}T_{amb} + h_{rad}T_{sky} + (1 - \tau - \eta)I}{h_{amb} + h_{air} + h_{rad}} \quad (2)$$

طبق رابطه (۲) با داشتن خصوصیات تابشی  $\tau$  و  $\eta$  پانل و ضرایب انتقال حرارت مرتبط و دمای محیط و دمای آسمان، دمای پانل فتوولتائیک به دست می آید.

رابطه (۲) شبیه رابطه پیشنهادی مرجع برای دمای سلول می باشد؛ با این تفاوت که اثر "تشعشع پانل به آسمان" در تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است و عبور تابش خورشید از پانل به  $\tau$  "ضریب عبور کلی پانل" بستگی دارد. به علاوه، در مدل سازی های گذشته برای لایه های مختلف پانل فتوولتائیک دماهای متفاوتی در نظر گرفته شده بود. به دلیل نازک بودن لایه ها و برای ساده تر شدن مدل سازی، در تحقیق حاضر فقط یک دمای پانل برای همه لایه های پانل فتوولتائیک یعنی  $T_{pv}$  در نظر گرفته شده است. طبق نتایج آزمایش و محاسبات مرجع [۵] و محاسبات مرجع [۷] اختلاف دمای لایه های پانل و سلول خورشیدی بسیار کم بوده است.

## ۳-۲- گرمای منتقل شده

محاسبه حرارت منتقل شده به فضای زیرین پانل فتوولتائیک برای محاسبات کارایی، محاسبات تهویه مطبوع و آسایش حرارتی اهمیت دارد. حرارت منتقل شده  $Q$ ، جمع حرارت بدست آمده از انتقال حرارت سطح زیرین پانل فتوولتائیک با دمای  $T_{pv}$  و بخشی از تابش خورشید است که از پانل عبور کرده است.

$$Q = Ah_{air}(T_{pv} - T_r) + \tau I \quad (3-الف)$$

(۳-الف) حرارت منتقل شده به فضای زیرین را برای حالت A نشان داده شده در شکل A<sub>۱</sub> به دست می دهد. در حالت B انتقال حرارت می تواند مساوی یا اندکی کمتر از حالت A باشد. رابطه (۳-ب) حرارت منتقل شده در حالت B را به دست می دهد. با توجه به تفاوت اندک می توان از رابطه (۳-الف) برای هر دو حالت A و B استفاده کرد.

$$Q = Ah_{air}(T_{pv} - T_{air}) + \tau I \\ = Ah_{air}(T_{pv} - T_r) + \tau I \quad (3-ب)$$

در حالت C بخش اول رابطه بالا با  $(T_{air} - T_{roof})$  جایگزین می شود و ترم  $\tau I$  نیز وارد فضای اتاق نشده و بخشی از آن جذب سقف می شود. حرارت منتقل شده به فضای اتاق در حالت C عبارت است از:

$$Q = Ah_{air}(T_{air} - T_{roof}) + \alpha_{roof}\tau I \quad (3-ج)$$

که  $\alpha$  ضریب جذب و زیر نویس roof سقف می باشد. قابل ذکر است که در منابع و مراجع مطالعه شده روابط صریحی برای محاسبه  $Q$  گزارش نشده است و بیان صریح معادله حرارت منتقل شده از دستاوردهای تحقیق حاضر هست.

## ۳-۳- محاسبه ضرایب انتقال حرارت

برای انجام محاسبات معادله (۲) دما و معادله (۳) گرمای منتقل شده، مقادیر ضرایب انتقال حرارت  $h$  لازم است. برای ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری پانل با هوای محیط روابط گوناگونی پیشنهاد شده اند.

یکی از پرکاربردترین روابط تجربی برای تخمین  $h_{amb}$  رابطه (۴) است که برای سرعت های  $1/35$  m/s تا  $4/5$  m/s استفاده می شود [۱۲].

$$h_{amb} = 1.8 + 3.8V_{amb} \quad (4)$$

و برای جریان مغشوش اجباری داخل کانال از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود [۱۲].

$$h_{air} = \frac{\kappa_{air}}{D_H} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

عدد رینولدز در رابطه (۱۰) با توجه به قطر هیدرولیکی کانال  $D_H$  در رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{VD_H}{\nu} \quad (11)$$

و ضریب انتقال حرارت تابشی پانل به آسمان از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود [۱۴].

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{pv} + T_{sky})(T_{pv}^2 + T_{sky}^2) \quad (12)$$

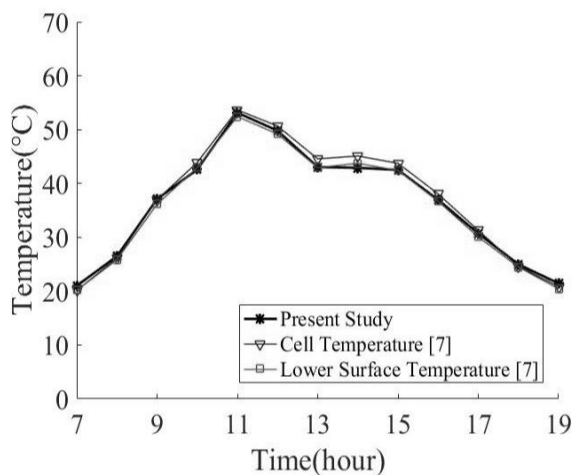
که در آن دمای آسمان  $T_{sky}$  طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$T_{sky} = T_{amb} - 6 \quad (13)$$

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- دمای پانل فتوولتائیک

برای پانل نصب شده طبق حالت شکل A<sub>۱</sub> نتایج محاسبات حاضر با نتایج گزارش شده در مراجع [۷] و [۹] مقایسه می‌شوند. در مرجع [۷] پانل کدر به کار رفته است و تغییرات دمای سلول فتوولتائیک و سطح زیرین آن از اجزای مختلف یک سامانه فتوولتائیک بر مبنای روابط تحلیلی نسبتاً پیچیده گزارش شده است. این نتایج همراه با دمای پانل فتوولتائیک  $T_{pv}$  محاسبه شده بر مبنای رابطه (۲) تحقیق حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ مقایسه دمای پانل فتوولتائیک کدر محاسبه شده طبق مدل سازی حاضر و با نتایج مدل سازی مرجع [۷]

که  $V_{amb}$  سرعت هوای محیط می‌باشد. در صورت نیاز به  $h_{amb}$  در شرایط دیگر، می‌توان از روابط ذکر شده در منابع علمی معتبر بهره گرفت.

$$h_{amb} = 1.8 + 3.8V_{amb} \quad (4)$$

در شرایطی که سرعت جریان هوا پایین باشد و اثرات جابجایی طبیعی غالب باشد، رابطه (۵) برای  $h_{amb}$  پیشنهاد شده است [۱۲].

$$h_{amb} = \frac{\kappa_{air}}{L} \left( 0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) \quad (5)$$

که در آن  $\kappa_{air}$  ضریب انتقال حرارت هدایتی هوا،  $L$  طول پانل،  $Pr$  عدد پرانتل و  $Ra$  عدد رابلی می‌باشند. عدد رابلی طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha} \cos\theta L^3 (T_{pv} - T_{air}) \quad (6)$$

که  $\theta$  زاویه پانل با افق،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی،  $g$  شتاب جاذبه،  $\alpha$  ضریب نفوذ و  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی می‌باشند.

در صورتی که پانل مطابق شکل A<sub>۱</sub> نصب شده باشد، ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی زیر پانل یا  $h_{air}$  هم به کمک رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۲].

در صورتی که پانل مطابق شکل B<sub>۱</sub> یا شکل C<sub>۱</sub> نصب شده باشد، برای جریان داخل کانال، ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به اجباری یا طبیعی بودن جریان و با توجه به اعداد بی‌بعد، رینولدز و رابلی محاسبه می‌شود. برای جریان طبیعی در کانال از رابطه (۷) استفاده می‌شود [۱۳].

$$h_{air} = \frac{\kappa_{air}}{D_H} 0.0965 Ra^{0.29} \quad (7)$$

در رابطه (۷)  $D_H$  قطر هیدرولیکی کانال است. عدد رابلی  $Ra$  طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$Ra = \frac{g\beta(T_{pv} - T_r)(D)^3}{\nu\alpha} \quad (8)$$

و در صورت بکار بردن فن برای جریان آرام اجباری داخل کانال برای  $h_{air}$  از رابطه (۹) استفاده می‌شود [۱۲].

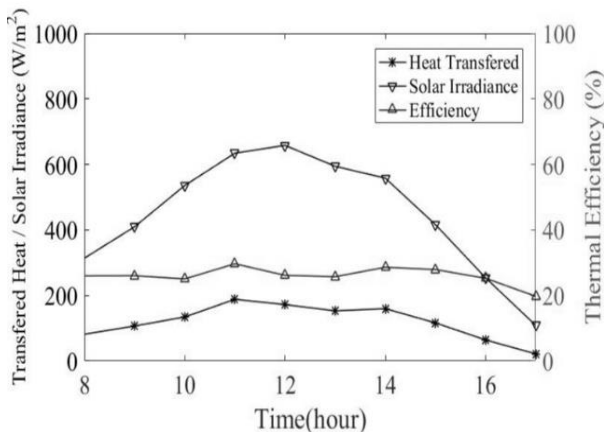
$$h_{air} = 2.98 \frac{\kappa_{air}}{D_H} \quad (9)$$

در شکل (۵) نتایج مدل سازی و تجربی دماهای لایه مختلف تشکیل دهنده پانل خورشیدی گزارش شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می شود نتایج دمای پانل فتوولتائیک  $T_{pv}$  مدل سازی تحقیق حاضر با نتایج تجربی دمای لایه سلول خورشیدی گزارش شده در مرجع [۵] انطباق بسیار خوبی دارد. علاوه بر آن نتایج محاسباتی دمای لایه سلول خورشیدی گزارش شده در مراجع [۷] و [۱۰] مطابقت قابل قبولی با نتایج محاسباتی تحقیق حاضر دارد.

این مقایسه ها نشان می دهند که تحقیق حاضر مدل سازی را بهتر از تحقیقات گذشته انجام داده و نتایج آن قابل استفاده در محاسبات طراحی است.

#### ۴-۲- گرمای منتقل شده

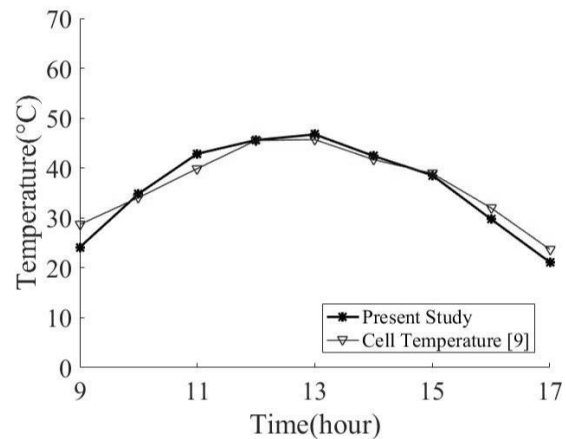
در مراجع و مقاله های بررسی شده گرمای منتقل شده به اتاق به عنوان پارامترهای مستقل گزارش نشده است. لذا امکان مقایسه مقادیر محاسبه شده طبق رابطه (۳) با نتایج دیگر وجود ندارد. به هر حال نظر به اهمیت داشتن مقدار  $Q$  در محاسبات انرژی در ساختمان و تهویه مطبوع و آسایش حرارتی، مقدار آن برای شرایط تجربی مرجع محاسبه شده و در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶ تغییرات گرمای منتقل شده، راندمان حرارتی و شدت تابش خورشید برای پانل مطالعه شده در مرجع [۵]

در شکل (۶) علاوه بر تغییرات  $Q$ ، تغییرات راندمان حرارتی و شدت تابش خورشید  $I$  نیز نشان داده شده اند. مقدار گرمای منتقل شده طبق رابطه (۳) تحقیق حاضر محاسبه شده و به سادگی برای محاسبه راندمان حرارتی به کار گرفته شده است. گرمای منتقل شده، به کاهش بار گرمایشی در ساختمان کمک می کند.

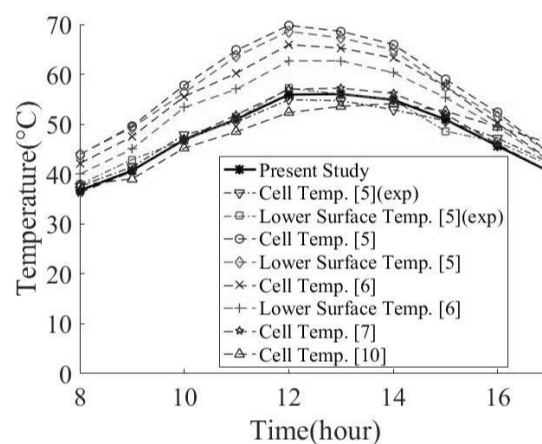
تطابق بسیار خوبی بین نتایج محاسبات دیده می شود و همانگونه که در شکل پیداست تفاوت دمای سلول فتوولتائیک و سطح زیرین آن قابل توجه نبوده و فرض مساوی بودن آن ها به کار گرفته شده در تحقیق حاضر قابل قبول است.



شکل ۴. مقایسه دمای پانل فتوولتائیک شفاف محاسبه شده طبق مدل سازی حاضر و نتایج آزمایش مرجع [۹]

تفاوت در نتایج (مثلاً در ساعت های ۹ صبح و ۱۱ صبح شکل (۴)) می تواند ناشی از تغییرات ناگهانی سرعت باد یا دیگر شرایط محیطی باشد. این مقایسه ها نشان می دهند که تحقیق حاضر مدل سازی پانل کدر و شفاف را به خوبی انجام داده است.

در ادامه پانل نصب شده روی ساختمان مطابق شکل  $B_1$  و نتایج در مرجع [۵] بررسی می شوند. در تحقیق حاضر، دمای پانل فتوولتائیک محاسبه شده است و با نتایج گزارش شده در آزمایش و مدل سازی جاشی [۵] و در تحقیقات سرحدی [۶]، سلیمانی [۷] و دون [۱۰] مورد استناد و مقایسه قرار گرفته است. مرجع [۵] نتایج آزمایش و شبیه سازی خود را ارائه کرده است و مراجع دیگر نتایج این مرجع را مورد استناد قرار داده اند.



شکل ۵ مقایسه دمای پانل فتوولتائیک کدر محاسبه شده طبق مدل سازی حاضر و نتایج مراجع مختلف

## ۵- جمع‌بندی

$\tau$  ضریب عبور کلی پانل فتوولتائیک  
 $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی  $m^2/s$

### زیرنویس‌ها

air هوای زیر پانل فتوولتائیک  
 amb هوای محیط  
 pv پانل فتوولتائیک  
 rad تابشی  
 r اتاق  
 roof سقف  
 sky آسمان

## ۷- مراجع

- [1] C. Şirin, J. Goggins, and M. Hajdukiewicz, "A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings," *Appl Therm Eng*, vol. 229, p. 120607, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120607.
- [2] A. K. Tiwari, K. Chatterjee, S. Agrawal, and G. K. Singh, "A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary development," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2655–2679, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.09.043.
- [3] M. Debbarma, K. Sudhakar, and P. Baredar, "Thermal modeling, exergy analysis, performance of BIPV and BIPVT: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1276–1288, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.035.
- [4] L. W. Florschuetz, "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors," *Solar Energy*, vol. 22, no. 4, pp. 361–366, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90190-7.
- [5] A. S. Joshi, A. Tiwari, G. N. Tiwari, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 1, pp. 154–164, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001.
- [6] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. Mahdavi Adeli, "An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector," *Appl Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2328–2339, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.001.
- [7] M. E. A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, and W. B. Chaouch, "A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors

در تحقیق حاضر، معادلات صریح و ساده برای تحلیل عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان توسعه داده شد. این معادلات برای انواع سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی هواخنک کاربرد دارد. در این روابط عواملی مانند دمای آسمان و انتقال حرارت تابشی از کلکتور به آسمان و انتقال حرارت‌های جابجایی در نظر گرفته می‌شود. این رابطه‌های ساده و صریح برای محاسبه دمای پانل فتوولتائیک و حرارت منتقل شده به اتاق با در نظر گرفتن راندمان الکتریکی  $\eta$  و ضریب عبور پانل  $\tau$  ارائه شدند. نتایج این مدل‌سازی در مقایسه با داده‌های تجربی و مدل‌سازی‌های پیچیده گذشته دقت خوبی را دارد.

معادلات به دست آمده در این تحقیق، ابزار ارزشمندی برای انجام محاسبات کارایی آن‌ها، بهینه‌سازی آن‌ها، محاسبات تهویه مطبوع و آسایش حرارتی می‌باشد. به طوری که می‌توان با اطلاعات ساده از خواص فیزیکی پانل‌ها و شرایط محیط محاسبات مربوط را انجام داد و نیازی به حل سیستم معادلات مجموعه پانل فتوولتائیک همراه با ساختمان نمی‌باشد.

## ۶- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

$A$  سطح  $m^2$   
 $D$  قطر کانال  $m$   
 $D_H$  قطر هیدرولیکی کانال  $m$   
 $h$  ضریب انتقال حرارت  $W/m^2K$   
 $I$  تابش دریافتی مؤثر خورشید روی پانل  $W/m^2$   
 $L$  طول پانل  $m$   
 $Ra$  عدد بی‌بعد رایلی  
 $Re$  عدد بی‌بعد رینولدز  
 $Pr$  عدد بی‌بعد پرناتل  
 $T$  دما  $K$   
 $V$  سرعت  $m/s$

### علائم یونانی

$\alpha$  ضریب نفوذ  $m^2/s$   
 $\beta$  ضریب انبساط حرارتی  $1/k$   
 $\varepsilon$  ضریب انتشار  
 $\eta$  راندمان الکتریکی پانل فتوولتائیک  
 $\theta$  شیب پانل  
 $\kappa$  ضریب انتقال حرارت هدایتی  $W/mK$   
 $\sigma$  ضریب استفان بولتزمن  $W/m^2k^4$

- [13] K. R. Randall, J. W. Mitchell, and M. M. El-Wakil, "Natural Convection Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Enclosures," *J Heat Transfer*, vol. 101, no. 1, pp. 120–125, Feb. 1979, doi: 10.1115/1.3450901.
- [14] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions," *Energy Convers Manag*, vol. 133, pp. 458–476, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.10.066.
- [8] M. Zohri, A. Fudholi, M. H. Ruslan, and K. Sopian, "Mathematical modeling of photovoltaic thermal PV/T system with v-groove collector," 2017, p. 030063. doi: 10.1063/1.4991167.
- [9] S. Tiwari and G. N. Tiwari, "Thermal analysis of photovoltaic-thermal (PVT) single slope roof integrated greenhouse solar dryer," *Solar Energy*, vol. 138, pp. 128–136, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.09.014.
- [10] N. A. Dunne, P. Liu, A. F. A. Elbarghthi, Y. Yang, V. Dvorak, and C. Wen, "Performance evaluation of a solar photovoltaic-thermal (PV/T) air collector system," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, p. 100466, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100466.
- [11] B. Agrawal and G. N. Tiwari, *Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems For Sustainable Developments*, 1st ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2010.
- [12] A. Bejan, *Convection heat transfer*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2013, ISBN: 9781118330081.

## بررسی روابط بین آلاینده های خروجی خودرو با استفاده از مدلسازی ریاضی، معادله احتراق و ماتریس همبستگی

چکیده: در این پژوهش به تحلیل و پیش بینی آلاینده های ۵۰۰۰ خودروی پراید با استفاده از داده های معاینه فنی پرداخته شد. پس از پیش پردازش داده ها (شامل حذف داده های پرت و نرمال سازی)، ماتریس همبستگی بین آلاینده ها محاسبه شد و روند میانگین آلاینده ها بر حسب سال تولید خودروها ترسیم گردید. برای پیش بینی آلاینده های خودروها در سال های آینده، از یک مدل شبکه عصبی استفاده شد که دقت بالایی در پیش بینی داشت. یافته ها نشان دادند که با افزایش سال تولید خودروها، میزان آلاینده های به طور کلی کاهش یافته است که این موضوع نشان دهنده بهبود تکنولوژی های ساخت خودرو و استانداردهای آلاینده های است. علاوه بر این، انواع حسگرهای مرتبط با سیستم کنترل آلاینده های (مانند حسگر اکسیژن، حسگر جرم هوای ورودی و حسگر دریچه گاز) و روابط ریاضی بین این حسگرها و واحد کنترل الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل دقیق تر داده ها، یک برنامه به زبان پایتون توسعه داده شد. این برنامه نه تنها مشکلات مربوط به هر حسگر را شناسایی می کند؛ بلکه مشکلات مشترک بین حسگرها را نیز گزارش می دهد. این رویکرد بهبود یافته می تواند به طور دقیق تری منشاء مشکلات را شناسایی کند و به سیاست گذاران و متخصصان محیط زیست کمک کند تا آلودگی هوا را کاهش دهند. این پژوهش بینش های ارزشمندی برای بهبود مدیریت آلودگی هوا و بهینه سازی عملکرد خودروها فراهم می کند.

واژه های راهنما: آلاینده های خودرو، شبکه عصبی، پراید، معاینه فنی، ماتریس همبستگی

محمدعلی کاظمی\*

استادیار

محمدطاهر رستگاری

مربی،  
گروه مهندسی مکانیک،  
دانشگاه ملی مهارت،  
تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

Mohammad Ali  
Kazemi\*  
Assistant Professor

Mohammad taheer  
Rastegari  
Instructor,  
Department of  
Mechanical Engineering,  
Technical and  
Vocational University  
(TVU), Tehran

## Investigating the relationships between vehicle exhaust pollutants using mathematical modeling, combustion equation, and correlation matrix

**Abstract:** In this study, the emissions of 5,000 Pride vehicles were analyzed and predicted using data from technical inspections. Following data pre-processing, which included outlier removal and normalization, the correlation matrix among pollutants was calculated. Additionally, the trend of average emissions was plotted against the vehicles' year of manufacture. To predict vehicle emissions for future years, a neural network model was utilized, which demonstrated high prediction accuracy. The findings revealed that as the vehicles' year of manufacture increased, the overall emission levels decreased. This trend indicates improvements in automotive manufacturing technologies and emission standards. Furthermore, the study examined various sensors associated with the emission control system (such as the oxygen sensor, mass airflow sensor, and throttle position sensor) and the mathematical relationships between these sensors and the Electronic Control Unit (ECU). For a more detailed data analysis, a Python program was developed. The application not only identifies sensor-specific malfunctions but also reports common or overlapping issues among the sensors. This enhanced methodology can more accurately identify the root cause of the problems, aiding policymakers and environmental specialists in their efforts to mitigate air pollution. This research provides valuable insights for enhancing air pollution management and optimizing vehicle performance.

**Keywords:** Vehicle emissions, Neural network, Pride, Technical inspection, Correlation matrix

## ۱- مقدمه

آلودگی هوا یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی است که جوامع امروزی با آن مواجه هستند. خودروها به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آلاینده، نقش مهمی در تولید آلاینده‌هایی مانند مونو اکسید کربن ( $CO$ )، دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ )، اکسیژن ( $O_2$ ) و هیدروکربن‌های نسوخته ( $HC$ ) دارند. این آلاینده‌ها نه تنها کیفیت هوا را کاهش می‌دهند؛ بلکه به‌طور مستقیم بر سلامت انسان‌ها تأثیر منفی می‌گذارند. به‌عنوان مثال، مونو اکسید کربن می‌تواند باعث کاهش حمل‌ونقل اکسیژن در خون شود و هیدروکربن‌ها می‌توانند به صورت مواد سرطان‌زا عمل کنند [۳-۱].

در ایران، خودروهای داخلی مانند پراید به دلیل سهم بالایی که در بازار حمل و نقل دارند، نقش مهمی در انتشار آلاینده‌ها ایفا می‌کنند. بنابراین، بررسی و پیش‌بینی آلودگی این خودروها می‌تواند به سیاست‌گذاران و متخصصان محیط زیست کمک کند تا تصمیمات بهتری برای کاهش آلودگی اتخاذ کنند. در این پژوهش، از داده‌های آلودگی مربوط به ۵۰۰۰ خودروی پراید که از مرکز معاینه فنی پارس همدان استخراج شده است، استفاده شده است تا الگوهای آلودگی آن‌ها تحلیل و پیش‌بینی شود. با توجه به اهمیت موضوع آلودگی هوا و نقش خودروها در این زمینه، ضرورت دارد که به بررسی دقیق‌تر آلودگی خودروهای داخلی مانند پراید پرداخته شود. این پژوهش با هدف تحلیل داده‌های آلودگی ۵۰۰۰ خودروی پراید و پیش‌بینی آلودگی آن‌ها در سال‌های آینده انجام شده است.

دلایل ضرورت این تحقیق شامل موارد زیر است:

- افزایش آلودگی هوا در شهرهای بزرگ: شهرهای بزرگ ایران مانند تهران، مشهد و اصفهان به دلیل ترافیک سنگین و استفاده گسترده از خودروهای قدیمی با مشکلات جدی آلودگی هوا مواجه هستند [۴]. بررسی آلودگی خودروهای داخلی مانند پراید می‌تواند به شناسایی منابع اصلی آلودگی و ارائه راهکارهای مؤثر برای کاهش آن کمک کند.

- تأثیر آلاینده‌ها بر سلامت انسان: آلاینده‌های منتشر شده از خودروها، به‌ویژه  $CO$  و  $HC$ ، می‌توانند به طور مستقیم بر سلامت انسان تأثیر بگذارند [۵]. این آلاینده‌ها می‌توانند باعث بروز مشکلات تنفسی، بیماری‌های قلبی و حتی مرگ زود هنگام شوند. بنابراین، بررسی و کاهش آلودگی خودروها می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی جامعه کمک کند.

- بهبود طراحی خودروهای داخلی: بررسی آلودگی خودروهای داخلی می‌تواند به خودروسازان کمک کند تا طراحی و تکنولوژی خودروها را بهبود دهند. به‌عنوان مثال، شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش آلودگی می‌تواند به بهینه‌سازی موتورها و سیستم‌های کنترل آلودگی منجر شود.

- پیش‌بینی آلودگی در سال‌های آینده: با استفاده از مدل‌های پیشرفته مانند شبکه‌های عصبی، می‌توان آلودگی خودروها در سال‌های آینده را پیش‌بینی کرد. این پیش‌بینی‌ها می‌توانند به برنامه‌ریزی‌های بلندمدت برای کاهش آلودگی هوا کمک کنند.

- شناسایی الگوهای آلودگی بر اساس سال تولید: بررسی روند تغییرات آلاینده‌ها بر حسب سال تولید خودروها می‌تواند به درک بهتری از تأثیر تکنولوژی‌های جدید و استانداردهای آلودگی کمک کند. به‌عنوان مثال، مشاهده روند کاهش آلاینده‌ها در سال‌های اخیر نشان‌دهنده بهبود تکنولوژی‌های ساخت خودرو است.

- تأثیر سیاست‌های محیط زیستی: این پژوهش می‌تواند به ارزیابی تأثیر سیاست‌های محیط زیستی بر کاهش آلودگی هوا کمک کند. به‌عنوان مثال، تغییرات ناگهانی در روند کاهش آلاینده‌ها در سال ۱۳۹۲ می‌تواند به دلیل اجرای سیاست‌های جدید باشد که این موضوع نیاز به بررسی بیشتر دارد.

این دلایل نشان می‌دهند که بررسی آلودگی خودروهای داخلی مانند پراید نه تنها از نظر علمی و فنی اهمیت دارد؛ بلکه می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی جامعه و حفظ محیط زیست کمک کند.

تحقیقات متعددی در زمینه آلودگی خودروها و استفاده از روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی آلاینده‌ها انجام شده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط جی و همکاران انجام شد، از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی آلودگی خودروها در شهرهای بزرگ استفاده شد و همبستگی بین آلاینده‌های مختلف با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت [۷]. در مطالعه دیگری ریگل و همکاران به بررسی رابطه بین حسگر اکسیژن و تأثیر آن‌ها بر کاهش آلاینده‌ها پرداختند [۸].

علاوه بر این، مطالعات متعددی به بررسی تأثیر سال تولید خودروها بر میزان آلودگی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط فیلیپچیک و همکاران [۹]، میلکو و همکاران [۱۰] و همچنین زوکوتو و همکاران [۱۱] انجام شد. تأثیر

زیر که کد انجام آن در زبان پایتون انجام شد در پیوست (۱) ارائه شده است.

- حذف داده‌های پرت: داده‌های پرت با استفاده از روش  $IQR^1$  حذف شدند. این داده‌ها ممکن است به دلیل خطاهای اندازه‌گیری یا مشکلات فنی در خودروها ایجاد شده باشند.
- نرمال‌سازی: داده‌ها بر اساس محدوده‌های مشخص شده نرمال‌سازی شدند. این کار به بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین کمک کرد. برای مثال:
  - مقادیر  $CO$  بین ۰ تا ۰/۷ نرمال‌سازی شدند.
  - مقادیر  $HC$  بین ۰ تا ۲۵۰ نرمال‌سازی شدند.
  - مقادیر  $O_2$  بین ۰ تا ۳ نرمال‌سازی شدند.

## ۲-۲- تحلیل ماتریس همبستگی بین آلاینده‌ها

ماتریس همبستگی<sup>۲</sup> یک ابزار آماری است که برای بررسی رابطه بین متغیرهای مختلف در یک مجموعه داده استفاده می‌شود. این ماتریس به صورت یک جدول مربعی نمایش داده می‌شود که در آن هر سطر و ستون مربوط به یک متغیر است، و مقدار موجود در هر خانه نشان‌دهنده ضریب همبستگی بین دو متغیر متناظر است.

ضریب همبستگی معمولاً با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون<sup>۳</sup> محاسبه می‌شود که مقادیر آن بین -۱ و +۱ قرار دارد:

- +۱: نشان‌دهنده همبستگی مثبت کامل است؛ یعنی با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد.
- ۰: نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی است؛ یعنی دو متغیر مستقل از یکدیگر هستند.
- -۱: نشان‌دهنده همبستگی منفی کامل است؛ یعنی با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش می‌یابد.

## ۲-۲-۱- روش محاسبه ماتریس همبستگی

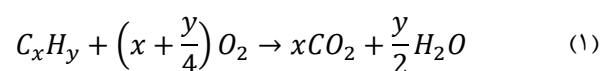
برای محاسبه ماتریس همبستگی، از زبان برنامه‌نویسی پایتون و کتابخانه‌های مرتبط استفاده شد. به‌طور خاص، از تابع  $COIT()$  در کتابخانه Pandas استفاده شد که به‌صورت خودکار ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرها را محاسبه می‌کند.

پارامترهای مختلفی از قبیل میزان کارکرد، سال تولید و... بر روی انتشار آلاینده‌های خروجی از اگزوز انجام گرفت.

## ۲- معادله احتراق و آلاینده‌ها

خودروها در حین احتراق سوخت، مقادیر مختلفی از آلاینده‌ها را منتشر می‌کنند. این آلاینده‌ها شامل موارد زیر هستند:

- مونواکسیدکربن: این گاز سمی ناشی از احتراق ناقص سوخت است و می‌تواند به‌طور مستقیم بر سلامت انسان تأثیر بگذارد و باعث کاهش اکسیژن در خون شود.
- دی‌اکسیدکربن: این گاز یکی از اصلی‌ترین عوامل تغییرات اقلیمی است و به‌عنوان محصول اصلی احتراق کامل سوخت‌های فسیلی شناخته می‌شود.
- اکسیژن: میزان اکسیژن موجود در گازهای خروجی نشان‌دهنده کارایی موتور و فرآیند احتراق است. کاهش اکسیژن معمولاً نشان‌دهنده احتراق کامل است و حد مجاز آن در تمامی استانداردهای آلاینده‌ها اعلام شده به مراکز معاینه فنی حداکثر ۳٪ حجمی است.
- هیدروکربن‌های نسوخته: این ترکیبات ناشی از احتراق ناقص؛ زیرا اکسیژن و شرایط دیگر برای سوختن همه مواد سوختنی فراهم نبوده است و به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تشکیل ذرات معلق و اوزون سطح زمین شناخته می‌شوند. معادله احتراق کامل سوخت در حضور اکسیژن کافی در موتورهای خودروها به صورت زیر است:



در این معادله،  $C_xH_y$  نشان‌دهنده سوخت (مانند بنزین) است. با توجه به شرایط احتراق (مانند مقدار اکسیژن و دما)، ممکن است محصولات جانبی مانند  $CO$  و  $HC$  نیز تولید شوند. این محصولات جانبی به‌عنوان آلاینده‌های اصلی شناخته می‌شوند و ارتباط مستقیمی با کارایی موتور دارند.

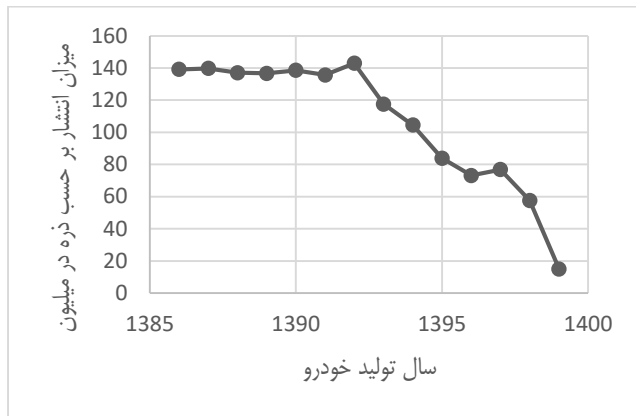
## ۲-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

برای تحلیل دقیق داده‌ها که اطلاعات مربوط به آلاینده‌های ۵۰۰۰ خودرو پراپدی بود که در فصل زمستان به مراکز معاینه فنی مراجعه کرده و در آزمون آلاینده‌ها پذیرفته شده بودند، مراحل

<sup>3</sup> Pearson correlation coefficient

<sup>1</sup> Interquartile Range

<sup>2</sup> Correlation matrix



شکل ۳ میانگین انتشار هیدروکربن نسوخته بر حسب ذره در میلیون<sup>۱</sup> به ازای سال تولید خودرو

بررسی دقیق این نمودارها، بینش‌های ارزشمندی درباره روند تغییرات آلاینده‌های خودروهای پراپد در طول زمان فراهم می‌کند. در ادامه، به تحلیل جزئیات این نمودار پرداخته می‌شود.

### ۲-۳-۱- روند کلی کاهش آلاینده‌ها

نمودار نشان می‌دهد که با افزایش سال تولید خودروها، میزان آلاینده‌ها به‌طور کلی کاهش یافته است. این روند کاهش‌ی نشان‌دهنده بهبود تکنولوژی‌های ساخت خودرو و اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر آلاینده‌ها در سال‌های اخیر است. به‌طور خاص

- آلاینده  $CO$ : کاهش چشمگیری در میزان انتشار  $CO$  مشاهده شد که نشان‌دهنده بهبود فرآیند احتراق و کاهش احتراق ناقص است.
- آلاینده  $HC$ : این آلاینده نیز روند کاهش‌ی مشابهی داشته است که نشان‌دهنده کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته به دلیل بهبود سیستم‌های کنترل آلاینده‌ها است.

### ۲-۳-۲- مختل شدن روند کاهش‌ی در سال ۱۳۹۲

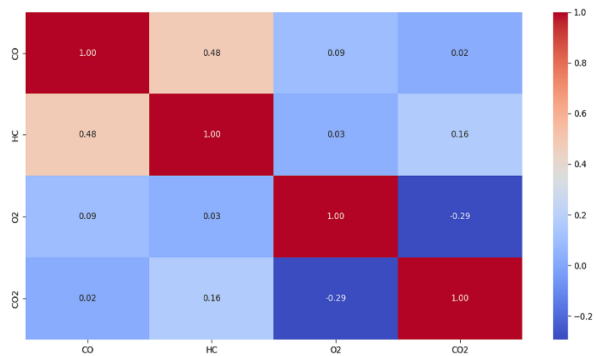
یکی از مهم‌ترین نکات قابل توجه در این نمودار، مختل شدن روند کاهش‌ی آلاینده‌ها در سال ۱۳۹۲ است. در این سال به جای ادامه روند کاهش‌ی، میزان آلاینده‌های  $CO$  و  $HC$  به‌طور ناگهانی افزایش یافت. این افزایش موقتی می‌تواند به دلایل زیر باشد: الف- تغییر در استانداردهای آلاینده‌ها

احتمالاً در سال ۱۳۹۲، استانداردهای آلاینده‌های خودروها تغییر کرده و باعث شده است که خودروسازان به بهبود تکنولوژی‌های

### ۲-۲-۲- تفسیر ماتریس همبستگی

در این پژوهش، ماتریس همبستگی بین آلاینده‌های مختلف ( $CO, HC, O_2, CO_2$ ) محاسبه شد. بر اساس این ماتریس که در شکل (۱) نشان داده شده است، دو مورد حائز اهمیت است:

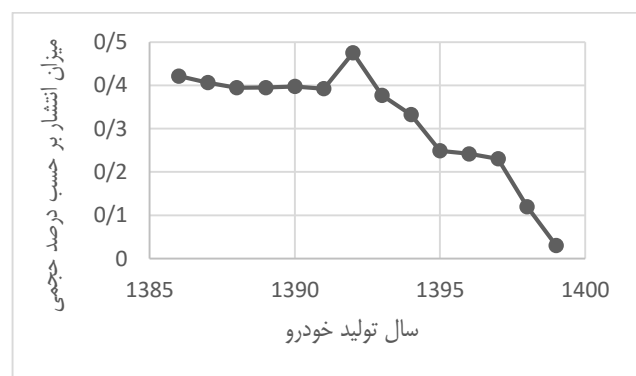
- بین  $CO$  و  $HC$  همبستگی مثبت قوی (۰/۴۸) مشاهده شد که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین این دو آلاینده است؛ زیرا هر دو محصول احتراق ناقص هستند.
- بین  $CO_2$  و  $O_2$  همبستگی منفی نسبتاً قوی (-۰/۲۹) وجود دارد که نشان‌دهنده لزوم مصرف کامل اکسیژن برای کاهش میزان مونواکسیدکربن و افزایش دی‌اکسیدکربن و در نتیجه نیل به احتراق کامل است که هر دو مورد ذکر شده یا پیش‌بینی‌های تئوری انطباق دارند.



شکل ۱ ماتریس همبستگی آلاینده‌ها

### ۲-۳-۲- تحلیل نمودار میانگین آلاینده‌ها بر حسب سال تولید

شکل (۲) و (۳) نمودار میانگین آلاینده‌های مختلف ( $CO, HC$ ) را بر حسب سال تولید خودروها نشان می‌دهد.



شکل ۲ میانگین انتشار مونواکسید کربن بر حسب درصد حجمی به ازای سال تولید خودرو

یک ورودی دریافت کرده، آن را پردازش می‌کند و خروجی تولید می‌کند. در این پژوهش، از یک شبکه عصبی پیش‌خور<sup>۴</sup> استفاده شد که شامل سه نوع لایه است:

۱. لایه ورودی<sup>۵</sup>: شامل متغیرهای مستقل (مانند سال تولید خودرو، نوع سوخت، و داده‌های معاینه فنی).
۲. لایه‌های پنهان<sup>۶</sup>: لایه‌هایی که عملیات پردازش اصلی را انجام می‌دهند. در این پژوهش، از دو لایه پنهان استفاده شد.
۳. لایه خروجی<sup>۷</sup>: شامل متغیرهای وابسته (آلاینده‌های  $CO$ ,  $HC$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ).

#### ۲-۴-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده برای آموزش و آزمایش مدل شامل اطلاعات ۵۰۰۰ خودروی پراید بود که از مرکز معاینه فنی جمع‌آوری شده بود. این داده‌ها شامل اطلاعات زیر بودند:

- سال تولید خودرو: به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل
- آلاینده‌ها: مقادیر اندازه‌گیری شده  $CO$ ,  $HC$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$
- سایر مشخصات فنی: مانند نوع موتور، حجم موتور، و نوع سوخت

قبل از آموزش مدل، داده‌ها پیش‌پردازش شدند. این پیش‌پردازش شامل مراحل زیر بود:

۱. حذف داده‌های پرت: داده‌های غیرمعمول یا نادرست حذف شدند.
۲. نرمال‌سازی داده‌ها: مقادیر داده‌ها به بازه [۰, ۱] نرمال‌سازی شدند تا مدل بهتر بتواند آن‌ها را پردازش کند.
۳. تقسیم داده‌ها: داده‌ها به دو مجموعه آموزش (۸۰٪) و آزمایش (۲۰٪) تقسیم شدند.

پس از آموزش مدل، عملکرد آن با استفاده از مجموعه داده آزمایش ارزیابی شد. معیارهای ارزیابی شامل موارد زیر بودند:

- خطای میانگین مربعات: مقدار  $MSE$  برای مدل آموزش شده برابر با ۰/۰۱۵ بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است.
- خطای مطلق میانگین: مقدار  $MAE$  نیز برابر با ۰/۰۹ بود که نشان‌دهنده خطای کم در پیش‌بینی آلاینده‌ها است.

نتایج پیش‌بینی آلاینده‌ها برای سال ۱۴۰۳ در جدول (۱) آورده شده است. این نتایج با آزمایشاتی که در مرکز معاینه فنی پارس همدان انجام شد، مطابقت داشت. نتایج پیش‌بینی نشان داد که مدل شبکه عصبی توانست به‌طور دقیق میزان آلاینده‌های

موتور و کاهش انتشار آلاینده‌ها توجه بیشتری کنند. این تغییرات ممکن است در ابتدا به علت سعی و خطا در پیدا کردن روش و تجهیزات صحیح منجر به افزایش موقتی آلاینده‌ها شده باشد؛ اما در بلندمدت به کاهش آلودگی منجر شد.

ب- تأثیر جایابی پیمانکار تولیدکننده قطعات در سال ۱۳۹۲، احتمالاً تولیدکننده قطعات از قبیل حسگر اکسیژن و ... را از برند یا فضای دیگری تهیه کرده است و همین امر منجر به تغییر در کیفیت کنترل آلاینده‌ها در خودرو گردیده است.

#### ۲-۳-۳- بازگشت به روند کاهش پس از سال ۱۳۹۲

پس از سال ۱۳۹۲، روند کاهش آلاینده‌ها دوباره ادامه یافته است. این موضوع نشان‌دهنده این است که تغییرات انجام‌شده در سال ۱۳۹۲ (مانند به‌روزرسانی استانداردها یا تغییر در تکنولوژی) به‌طور مؤثری در بلندمدت منجر به کاهش آلاینده‌ها شده‌اند. به‌طور خاص:

- کاهش  $CO$  و  $HC$ : این آلاینده‌ها پس از سال ۱۳۹۲، روند کاهش قابل توجهی داشته‌اند که نشان‌دهنده بهبود فرآیند احتراق و کاهش احتراق ناقص است.

#### ۲-۴-۲- پیش‌بینی آلاینده‌های خودرو پراید تولید سال ۱۴۰۳

##### با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

پیش‌بینی دقیق آلاینده‌های خودروها یکی از چالش‌های مهم در مدیریت کیفیت هوا و برنامه‌ریزی‌های محیط زیستی است. در این پژوهش، برای پیش‌بینی آلاینده‌های خودروهای پراید در سال‌های آینده، از یک مدل شبکه عصبی<sup>۱</sup> استفاده شد. شبکه‌های عصبی به دلیل توانایی بالا در یادگیری الگوها و روابط پیچیده بین داده‌ها، ابزار مناسبی برای حل این نوع مسائل هستند. در ادامه، به توضیح جزئیات فرآیند پیش‌بینی با استفاده از شبکه عصبی پرداخته می‌شود.

#### ۲-۴-۱- مبانی شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> الهام‌گرفته از ساختار مغز انسان هستند و از لایه‌های مختلف نورون‌ها<sup>۳</sup> تشکیل شده‌اند. هر نورون

<sup>5</sup> Input Layer

<sup>6</sup> Hidden Layers

<sup>7</sup> Output Layer

<sup>1</sup> Neural Network

<sup>2</sup> Artificial Neural Network

<sup>3</sup> Neurons

<sup>4</sup> Feedforward Neural Network

## ۲-۴-۴- مزایای استفاده از شبکه عصبی

۱. توانایی یادگیری الگوها: شبکه‌های عصبی می‌توانند روابط غیرخطی پیچیده بین داده‌ها را یاد بگیرند.
۲. دقت بالا: نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی دقت بالایی در پیش‌بینی آلاینده‌ها دارد.
۳. قابلیت تعمیم: مدل می‌تواند برای پیش‌بینی آلاینده‌ها در شرایط مختلف (مانند تغییر در نوع سوخت یا استانداردهای آلاینده‌ها) استفاده شود.

## ۲-۴-۵- چالش‌ها و محدودیت‌ها

۱. نیاز به داده‌های زیاد: شبکه‌های عصبی برای آموزش به داده‌های زیادی نیاز دارند که جمع‌آوری و پیش‌پردازش آن‌ها ممکن است زمان‌بر باشد.
۲. پیچیدگی محاسباتی: آموزش مدل‌های شبکه عصبی ممکن است نیاز به منابع محاسباتی قوی داشته باشد.

## ۲-۴-۶- کاربردهای عملی

- این مدل می‌تواند در موارد زیر استفاده شود:
- ❖ برنامه‌ریزی محیط زیستی: پیش‌بینی آلاینده‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا تصمیمات بهتری برای کاهش آلودگی اتخاذ کنند.
  - ❖ بهبود طراحی خودروها: خودروسازان می‌توانند از این مدل برای بهینه‌سازی طراحی موتور و سیستم‌های کنترل آلاینده‌ها استفاده کنند.
- نظارت بر کیفیت هوا: این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی آلودگی هوا در شهرها استفاده شود.

## ۲-۵- روابط ریاضی حاکم بین حسگرهای مختلف خودروی پراید با واحد کنترل الکترونیکی خودرو

سیستم کنترل بسته آلاینده‌ها<sup>۷</sup> یکی از اجزای کلیدی در مدیریت عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های منتشر شده توسط خودرو است. این سیستم با استفاده از حسگرهای مختلف، اطلاعات لازم را به واحد کنترل الکترونیکی ارسال می‌کند و این واحد بر اساس

خودروهای پراید را پیش‌بینی کند. این دقت بالا نشان‌دهنده این است که شبکه عصبی می‌تواند الگوهای پیچیده بین داده‌ها را یاد بگیرد و برای پیش‌بینی‌های آینده استفاده شود.

جدول ۱ مقایسه مقادیر آلاینده‌های خودرو پراید مدل ۱۴۰۳ بین پیش‌بینی از طریق مدل شبکه عصبی با مقدار واقعی

آلاینده	مقدار پیش‌بینی شده در سال ۱۴۰۳	میانگین مقدار واقعی آلاینده‌های ۵۰۰ خودرو پراید با سال ساخت ۱۴۰۳
CO	۰/۱۲	۰/۱۱
HC	۲۵	۲۴
CO <sub>2</sub>	۲/۸	۲/۹
O <sub>2</sub>	۰/۱۲	۱۲/۲

خطاهای احتمالی در این پژوهش می‌تواند ناشی از خطای ناشی از نمونه برداری و یا خطاهای مربوط به دستگاه اندازه‌گیری باشد که مقادیر داده شده با استفاده از گواهی کالیبراسیون تجهیز اصلاح شده‌اند.

## ۲-۴-۳- طراحی مدل شبکه عصبی

برای طراحی مدل شبکه عصبی از کتابخانه TensorFlow و Keras در زبان پایتون استفاده شد. مراحل طراحی مدل به شرح زیر است:

### الف- ساختار مدل

مدل شامل سه لایه پنهان بود که هر لایه شامل ۶۴ نورون بود. تابع فعال‌سازی<sup>۱</sup> در لایه‌های پنهان، ReLU<sup>۲</sup> انتخاب شد که به دلیل سادگی و کارایی بالا، یکی از محبوب‌ترین توابع فعال‌سازی است.

ب- تابع زیان و بهینه‌ساز

- تابع زیان<sup>۳</sup>: از تابع خطای میانگین مربعات<sup>۴</sup> استفاده شد که برای مسائل رگرسیونی مناسب است.
- بهینه‌ساز<sup>۵</sup>: از بهینه‌ساز آدام<sup>۶</sup> استفاده شد که به دلیل همگرایی سریع و عملکرد خوب در مسائل مختلف، انتخاب شد.

ج- کد پایتون برای ساخت مدل

کد پایتون مورد استفاده برای ساخت مدل شبکه عصبی در پیوست ارائه شده است.

<sup>5</sup> Optimizer

<sup>6</sup> Adam

<sup>7</sup> Closed-Loop Emission Control System

<sup>1</sup> Activation Function

<sup>2</sup> Rectified Linear Unit

<sup>3</sup> Loss function

<sup>4</sup> Mean Squared Error - MSE

- $A$ : سطح مقطع ورودی هوا
- $v$ : سرعت جریان هوا

## ۲-۵-۱-۳- حسگر موقعیت دریچه گاز<sup>۷</sup>

این حسگر موقعیت دریچه گاز را اندازه‌گیری می‌کند و به واحد کنترل الکترونیکی اطلاع می‌دهد که چقدر هوا وارد موتور می‌شود.

رابطه ریاضی:

موقعیت دریچه گاز ( $\theta$ ) به صورت زیر با ولتاژ خروجی ( $V_{TPS}$ ) مرتبط است.

$$V_{TPS} = k_{TPS} \cdot \theta \quad (۴)$$

در این رابطه:

- $k_{TPS}$ : ثابت تناسب حسگر
- $\theta$ : زاویه باز شدن دریچه گاز

## ۲-۵-۱-۴- حسگر فشار منیفولد<sup>۸</sup>

این حسگر فشار هوا در منیفولد ورودی را اندازه‌گیری می‌کند. این اطلاعات برای محاسبه جرم هوای ورودی استفاده می‌شود. رابطه ریاضی:

فشار منیفولد ( $P_{MAP}$ ) به صورت زیر با ولتاژ خروجی ( $V_{MAP}$ ) مرتبط است.

$$P_{MAP} = k_{MAP} \cdot V_{MAP} \quad (۵)$$

در این رابطه:

- $k_{MAP}$ : ثابت تناسب حسگر

## ۲-۵-۲- الگوریتم‌های کنترلی در حلقه بسته [۱۴، ۱۵]

### ۲-۵-۲-۱- کنترل PID<sup>۹</sup>

الگوریتم کنترل PID یکی از متداول‌ترین الگوریتم‌های کنترلی در سیستم‌های کنترل بسته است. این الگوریتم با استفاده از سه مؤلفه تناسبی (P)، انتگرالی (I)، و مشتقی (D) خطای سیستم را کاهش می‌دهد و به تعادل سریع و دقیق می‌رسد. در سیستم کنترل آلاینده‌گی، واحد کنترل الکترونیکی از الگوریتم PID برای

این داده‌ها تصمیماتی برای تنظیم نسبت سوخت به هوا و کاهش آلاینده‌گی می‌گیرد. در ادامه، به بررسی جزئیات فنی انواع حسگرها، الگوریتم‌های کنترلی در حلقه بسته، و روابط ریاضی بین حسگرها و واحد کنترل الکترونیکی در خودرو پراپد پرداخته می‌شود.

## ۲-۵-۱- انواع حسگرها در سیستم کنترل بسته آلاینده‌گی [۱۲، ۱۳]

### ۲-۵-۱-۱- حسگر اکسیژن<sup>۱</sup>

این حسگر غلظت اکسیژن در گازهای خروجی موتور را اندازه‌گیری می‌کند و نقش مهمی در تنظیم نسبت سوخت به هوا دارد. حسگر اکسیژن معمولاً در دو نوع وجود دارد:

۱. حسگر اکسیژن باریک بانده<sup>۲</sup>: فقط تشخیص می‌دهد که مخلوط سوخت و هوا غنی<sup>۳</sup> یا فقیر<sup>۴</sup> است.
۲. حسگر اکسیژن پهن بانده<sup>۵</sup>: غلظت دقیق اکسیژن را اندازه‌گیری می‌کند.

رابطه ریاضی:

سیگنال خروجی حسگر اکسیژن به صورت ولتاژ ( $V$ ) بیان می‌شود که به غلظت اکسیژن ( $C_{O_2}$ ) وابسته است:

$$V = k \cdot \log \left( \frac{C_{O_2,ref}}{C_{O_2}} \right) \quad (۲)$$

در این رابطه:

- $k$ : ثابت تناسب
- $C_{O_2,ref}$ : غلظت مرجع اکسیژن
- $C_{O_2}$ : غلظت اکسیژن اندازه‌گیری شده

### ۲-۵-۲- حسگر جرم هوای ورودی<sup>۶</sup>

این حسگر جرم ۳ هوای ورودی به موتور را اندازه‌گیری می‌کند و اطلاعات آن برای محاسبه نسبت سوخت به هوا ضروری است. رابطه ریاضی:

جرم هوای ورودی ( $\dot{m}_{air}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{air} = \rho \cdot A \cdot v \quad (۳)$$

در این رابطه:

- $\rho$ : چگالی هوا

<sup>۶</sup> Mass Air Flow Sensor - MAF

<sup>۷</sup> Throttle Position Sensor - TPS

<sup>۸</sup> Manifold Absolute Pressure Sensor - MAP

<sup>۹</sup> Proportional-Integral-Derivative Control

<sup>۱</sup> Oxygen sensor - O2 sensor

<sup>۲</sup> Narrowband

<sup>۳</sup> Rich

<sup>۴</sup> Lean

<sup>۵</sup> Wideband

رابطه ریاضی:

کنترل پیش‌بین بهینه‌سازی زیر را حل می‌کند [۱۴، ۱۵]:

$$\min \sum_{k=0}^N (\|y(k) - r(k)\|^2 + \|\Delta u(k)\|^2) \quad (7)$$

در این رابطه:

- $y(k)$ : خروجی سیستم در لحظه  $k$
- $r(k)$ : مقدار مطلوب خروجی سیستم در لحظه  $k$
- $\Delta u(k)$ : تغییرات ورودی کنترلی
- $y(k)$ : افق پیش‌بینی

## ۲-۵-۳- روابط ریاضی بین حسگرها و واحد کنترل الکترونیکی

### ۲-۵-۳-۱- محاسبه نسبت هوا به سوخت

نسبت هوا به سوخت یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که واحد کنترل الکترونیکی بر اساس داده‌های حسگرها محاسبه می‌کند. این نسبت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AFR = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (8)$$

در این رابطه:

- $m_{air}$ : جرم هوای ورودی (محاسبه شده توسط MAF یا MAP)
- $m_{fuel}$ : جرم سوخت تزریق شده (کنترل شده توسط واحد کنترل الکترونیکی)

## ۲-۵-۳-۲- تنظیم نسبت سوخت به هوا بر اساس سیگنال حسگر اکسیژن

واحد کنترل الکترونیکی بر اساس سیگنال حسگر اکسیژن، نسبت سوخت به هوا را تنظیم می‌کند. اگر مخلوط غنی باشد ( $V > V_{ref}$ )، واحد کنترل الکترونیکی مقدار سوخت تزریق شده را کاهش می‌دهد و اگر مخلوط ضعیف باشد ( $V < V_{ref}$ )، مقدار سوخت را افزایش می‌دهد.

رابطه ریاضی:

$$m_{fuel} = m_{fuel,base} + K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

تنظیم نسبت سوخت به هوا استفاده می‌کند. به‌عنوان مثال، اگر حسگر اکسیژن نشان دهد که مخلوط سوخت و هوا غنی است ( $V > V_{ref}$ )، واحد کنترل الکترونیکی با استفاده از الگوریتم PID مقدار سوخت تزریق شده را کاهش می‌دهد تا مخلوط به حالت ایده‌آل نزدیک شود.

رابطه ریاضی:

خروجی کنترل PID ( $u(t)$ ) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴، ۱۵]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

در این رابطه:

- $e(t)$ : خطای سیستم (تفاوت بین مقدار مطلوب و مقدار واقعی)
- $K_p$ : بهره تناسبی
- $K_i$ : بهره تناسبی
- $K_d$ : بهره تناسبی

## ۲-۵-۲-۲- کنترل فازی<sup>۱</sup>

کنترل فازی یک روش هوشمند برای مدیریت سیستم‌های غیرخطی است که در شرایطی با عدم قطعیت یا نویز بالا کاربرد دارد. در سیستم کنترل آلاینده‌گی، کنترل فازی می‌تواند برای تنظیم نسبت سوخت به هوا در شرایط مختلف (مانند شتاب‌گیری یا کاهش سرعت) استفاده شود. کنترل فازی می‌تواند در شرایطی که حسگرها دچار نویز یا خطای اندازه‌گیری می‌شوند به واحد کنترل الکترونیکی کمک کند تا تصمیمات دقیق‌تری بگیرد.

رابطه ریاضی:

کنترل فازی بر اساس قوانین فازی<sup>۲</sup> عمل می‌کند. به‌عنوان مثال: اگر خطای سیستم " $e(t)$ " زیاد<sup>۳</sup> و نرخ تغییر خطای سیستم  $\frac{de(t)}{dt}$  مثبت باشد، خروجی کنترلر "افزایش سوخت" است.

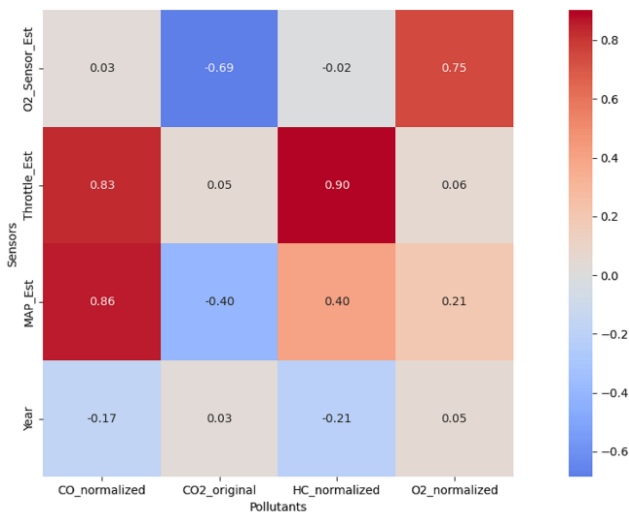
## ۲-۵-۲-۳- کنترل مدل پیش‌بین<sup>۲</sup>

کنترل پیش‌بین یک روش پیشرفته است که با استفاده از مدل‌های ریاضی سیستم، رفتار آینده سیستم را پیش‌بینی کرده و تصمیمات بهینه می‌گیرد. این الگوریتم به ویژه در سیستم‌های پیچیده مانند موتورهای خودرو کاربرد دارد. کنترل پیش‌بین می‌تواند برای پیش‌بینی و کاهش آلاینده‌ها در شرایط مختلف (مانند ترافیک سنگین یا شرایط جوی خاص) استفاده شود.

<sup>3</sup> Model Predictive Control - MPC

<sup>1</sup> Fuzzy Logic Control

<sup>2</sup> Fuzzy rules



شکل ۴ ماتریس همبستگی آلاینده‌ها و حسگرها

به‌طور خاص، اگر حسگر دریچه گاز اطلاعات نادرستی مبنی بر بسته بودن یا کم بودن باز شدن دریچه گاز ارسال کند، واحد کنترل الکترونیکی موتور ممکن است سوخت بیشتری نسبت به هوای موجود تزریق کند که این وضعیت به دلیل کاهش اکسیژن باعث احتراق ناقص سوخت و افزایش هیدروکربن نسوخته می‌شود.

ب- همبستگی بین مونواکسیدکربن و حسگر فشار مطلق منیفولد با مقدار  $0.186$  که نشان دهنده همبستگی بالای وجود نقص در حسگر فشار مطلق منیفولد و افزایش انتشار مونواکسیدکربن است که علت آن به شرح زیر می‌باشد:

خرابی حسگر فشار منیفولد می‌تواند به واحد کنترل الکترونیکی اطلاعات نادرستی درباره فشار هوای ورودی به موتور ارسال کند. این خطا معمولاً باعث ایجاد مخلوط سوخت و هوای غنی (نسبت سوخت بیشتر به هوا) می‌شود که در این شرایط، احتراق ناقص رخ می‌دهد؛ زیرا اکسیژن کافی برای سوزاندن کامل سوخت وجود ندارد و مونواکسیدکربن به‌عنوان محصول جانبی احتراق ناقص افزایش می‌یابد؛ زیرا کربن موجود در سوخت به جای تبدیل کامل به دی‌اکسیدکربن، تنها تا مرحله مونواکسید-کربن، اکسید می‌شود.

ج- همبستگی بین مونواکسیدکربن و حسگر دریچه گاز با مقدار  $0.183$  که نشان دهنده همبستگی بالای وجود نقص در حسگر دریچه گاز و افزایش انتشار مونواکسیدکربن است که علت آن به شرح زیر می‌باشد:

خرابی حسگر دریچه گاز اطلاعات نادرستی درباره وضعیت دریچه گاز به واحد کنترل الکترونیکی ارسال می‌کند. این خطا معمولاً باعث ایجاد مخلوط سوخت و هوای غنی (نسبت سوخت بیشتر به هوا) می‌شود. در این شرایط، اکسیژن ناکافی برای

در این رابطه:

- مقدار پایه سوخت تزریق شده  $m_{fuel,base}$
- خطای سیستم  $e(t) = V_{ref} - V$

## ۲-۵-۳- محاسبه انتشار آلاینده‌ها

میزان آلاینده‌ها ( $E$ ) به صورت تابعی از نسبت سوخت به هوا و شرایط احتراق محاسبه می‌شود:

$$E = f(AFR, T_{combustion}, P_{combustion}) \quad (10)$$

در این رابطه:

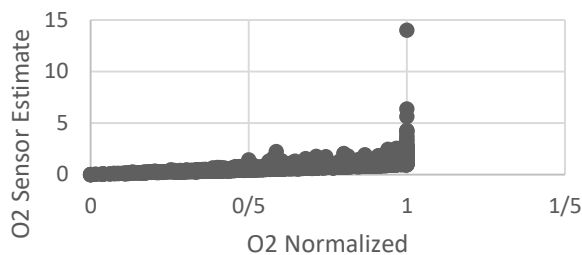
- دمای احتراق  $T_{combustion}$
- فشار احتراق  $P_{combustion}$

## ۲-۵-۴- مدل‌سازی ریاضی حسگرها و پیش‌بینی درصد خرابی آن‌ها با توجه به مقادیر آلاینده‌ها

با تعریف مدل ریاضی حسگرهای اکسیژن، فشار مطلق منیفولد و دریچه گاز به‌عنوان سه حسگر مؤثر و مرتبط با مقادیر آلاینده‌ها و انتخاب روش پیش‌بینی [۱۶، ۱۷] و با استفاده از قوانین مربوط به احتراق کامل و ناقص، نمودار تصمیم‌گیری برای خرابی حسگرها و ... ماتریس همبستگی آلاینده-حسگر را با استفاده از تابع  $corr()$  در کتابخانه Pandas را محاسبه و رسم کرده و در نتیجه می‌توان ارتباط بین خرابی حسگرها با افزایش آلاینده‌ها را پیش‌بینی نمود. نکته حائز اهمیت این است که جهت نیل به این امر ابتدا نرمال‌سازی داده‌ها مطابق با توضیحات قبلی انجام و پس از آن با استفاده از تعاریف ریاضی حسگرها با آلاینده‌ها (حسگر اکسیژن با مقادیر اکسیژن و دی‌اکسید کربن، حسگر موقعیت دریچه گاز با هیدروکربن‌های نسوخته و مونواکسیدکربن و حسگر فشار منیفولد با نسبت مونواکسیدکربن به دی‌اکسید-کربن رابطه دارند) کد پایتون نوشته شد. این ماتریس در شکل (۴) نمایش داده شده است.

با توجه به ماتریس این شکل مهمترین همبستگی‌ها عبارتند از: الف- همبستگی بین هیدروکربن نسوخته و حسگر دریچه گاز با مقدار  $0.19$  که نشان دهنده همبستگی بالای وجود نقص در حسگر دریچه گاز و افزایش انتشار هیدروکربن نسوخته است و علت آن به شرح زیر است:

خرابی حسگر دریچه گاز می‌تواند باعث ارسال اطلاعات نادرست به واحد کنترل الکترونیکی موتور شود. این اطلاعات نادرست منجر به اختلال در تنظیم دقیق میزان سوخت و هوا می‌شود.



شکل ۷ سیگنال حسگر اکسیژن بر حسب مقدار نرمال شده اکسیژن

### ۳- نتیجه‌گیری

علاوه بر موارد مندرج در بخش‌های فوق الذکر، می‌توان مباحث زیر را نیز من باب نتیجه‌گیری بیان نمود:

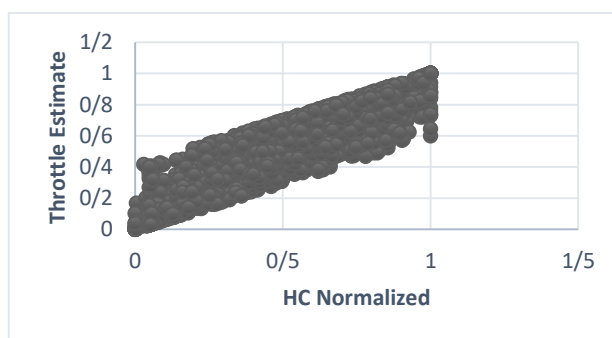
- ❖ یافته‌های این پژوهش با مطالعات قبلی همخوانی دارد.
- به‌عنوان مثال با مطالعه‌ای که توسط جی و همکاران انجام شد، آن‌ها نشان دادند که استفاده از شبکه‌های عصبی می‌تواند به‌طور دقیق آلاینده‌گی خودروها را پیش‌بینی کند [۷]. در مطالعه دیگری که توسط ریگل و همکاران انجام شد، به بررسی رابطه بین آلاینده‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر کیفیت هوا پرداخته شد [۸].
- ❖ همچنین همبستگی بین حسگرها با آلاینده‌ها هم با نتایج تئوری مطابقت داشته هم با نتایج و داده‌های استخراجی تجربی از مراکز معاینه فنی که توسط دستگاه دیاگ انجام شده بود و در نهایت کاهش احتمال میزان خرابی یا نقص در حسگرها نیز با افزایش سال تولید در ماتریس همبستگی شکل (۴) مشاهده گردید.
- ❖ با این حال، این پژوهش با تمرکز بر خودروهای داخلی مانند پراید و استفاده از داده‌های معاینه فنی، نوآوری‌هایی را ارائه می‌دهد که در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در موارد زیر استفاده شود.
- برنامه‌ریزی محیط زیستی: پیش‌بینی آلاینده‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا تصمیمات بهتری برای کاهش آلودگی اتخاذ کنند.
- بهبود طراحی خودروها: خودروسازان می‌توانند از این مدل برای بهینه‌سازی طراحی موتور و سیستم‌های کنترل آلاینده‌گی استفاده کنند.
- نظارت بر کیفیت هوا: این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی آلودگی هوا در شهرها استفاده شود.

اکسیداسیون کامل کربن موجود در سوخت وجود دارد و در نتیجه احتراق ناقص رخ می‌دهد و بخشی از کربن سوخت به جای تبدیل به دی‌اکسیدکربن، به مونواکسیدکربن تبدیل می‌شود.

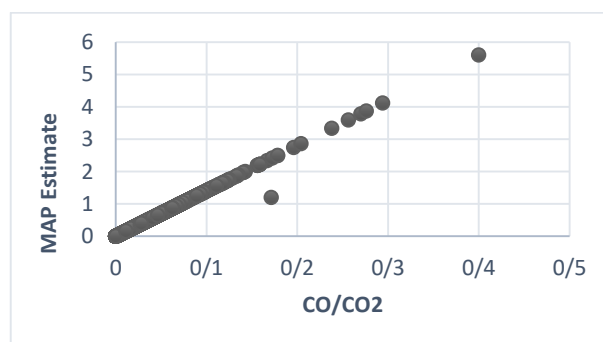
د) همبستگی بین دی‌اکسیدکربن و حسگر اکسیژن با مقدار  $0/69-$  که نشان دهنده همبستگی منفی نسبتاً بالای وجود نقص در حسگر اکسیژن و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن است که علت آن به شرح زیر می‌باشد:

حسگر اکسیژن نقش کلیدی در تنظیم نسبت هوا به سوخت دارد. در صورت خرابی این حسگر، واحد کنترل الکترونیکی اطلاعات نادرست درباره سطح اکسیژن باقیمانده در گازهای خروجی دریافت می‌کند و در نتیجه تزریق سوخت نامتعادل (معمولاً مخلوط غنی) انجام می‌شود؛ زیرا واحد کنترل الکترونیکی فکر می‌کند مخلوط بیش از حد رقیق است که در نهایت احتراق ناقص رخ می‌دهد و باعث کاهش تبدیل کربن به دی‌اکسیدکربن می‌شود.

در شکل‌های (۵) تا (۷) نمودار پراکندگی حسگرهای مختلف نشان داده شده است. بر مبنای این نمودارها رابطه خطی بین حسگر و عامل اثر گذار و ارتباط قوی بین داده‌ها مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که داده پرت قابل توجه در داده‌های ورودی وجود ندارد.



شکل ۵ موقعیت دریچه گاز بر حسب مقدار نرمال شده هیدروکربن‌های نسوخته



شکل ۶ فشار منیفولد ورودی بر حسب نسبت مونواکسیدکربن به دی‌اکسید کربن

control," *Solid state ionics*, vol. 152, pp. 783-800, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00329-6](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00329-6).

## ۴- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از سایت جامع معاینه فنی خودرو پارس همدان اعلام می‌دارند.

## ۵- مراجع

- [9] J. Filipczyk and A. Kutrzyk-Nykiel, "The impact of selected factors on increasing level of exhaust emission from vehicles," *Transport Problems*, vol. 5, pp. 115-122, 2010, <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=86386>.
- [10] A. Milku, F. Attiogbe, C. Atombo, N. Derkyi, and E. Asuako, "Evaluating the categorical effect of vehicle characteristics on exhaust emissions," *African Transport Studies*, vol. 2, p. 100008, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.aftran.2024.100008>.
- [11] S. Dzokoto, C. Atombo, M. Braimah, and A.-R. Issahaku, "Study on factors influencing exhaust emission levels in five major cities in Ghana," 2022, <https://www.eajournals.org/wp-content/uploads/Study-on-Factors-Influencing-Exhaust-Emission-Levels-in-Five-Major-Cities-in-Ghana.pdf>.
- [12] R. B. GmbH, *Automotive handbook*. John Wiley & Sons, 2022. <https://www.wiley.com/en-us/Automotive+Handbook%2C+11th+Edition-p-9781119911906>.
- [13] J. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals," 2018. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>.
- [14] C. Silva, M. Ross, and T. Farias, "Analysis and simulation of "low-cost" strategies to reduce fuel consumption and emissions in conventional gasoline light-duty vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 2, pp. 215-222, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.046>.
- [15] X. Liang, Y. Wang, Y. Chen, and S. Deng, "Advances in emission regulations and emission control technologies for internal combustion engines," *SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy*, vol. 2, no. 13-02-02-0007, pp. 101-119, 2021, <https://doi.org/10.4271/13-02-02-0007>.
- [16] L. Del Re, F. Allgower, L. Glielmo, C. Guardiola, and I. Kolmanovsky, *Automotive model predictive control*. Springer, 2010, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84996-071-7>.
- [17] A. Mirmohammadi and A. Kargarian Marvasti, "Investigating the performance and emission of RCCI engines with different compositions and percentages of natural gas," *Motor Research*, vol. 71, no. 1, pp. 16-39, 2024, [In Persian], <https://doi.org/10.22034/er.2024.2025008.1031>.
- [1] M. Yadegari and M. Ghassemi, "Investigation of the effects of temperature, mass flow rate of the injected fuel, pore diameter, porosity and ambient pressure on the amount of pollutants in the combustion chamber," *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, vol. 23, no. 1, pp. 122-146, 2022, <https://doi.org/10.30506/jmee.2022.547922.1282>.
- [2] A. Asadi and M. Yadegari, "The study of the effect of fuel dilution in methane/air counterflow diffusion flames on the emission of environmental pollutants," *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, vol. 33, no. 6, pp. 25-34, 2025, [In Persian], <https://doi.org/10.30506/mmep.2024.2025565.2166>.
- [3] A. Asadi and M. Yadegari, "A new reduced mechanism for methane oxidation," *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 3-13, 2025, [In Persian], <https://doi.org/10.30506/mmep.2024.2037543.2202>.
- [4] F. Taghizadeh, B. Mokhtarani, and N. Rahmanian, "Air pollution in Iran: The current status and potential solutions," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 195, no. 6, p. 737, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11296-5>.
- [5] D. L. Buckeridge, R. Glazier, B. J. Harvey, M. Escobar, C. Amrhein, and J. Frank, "Effect of motor vehicle emissions on respiratory health in an urban area," *Environmental health perspectives*, vol. 110, no. 3, pp. 293-300, 2002, <https://doi.org/10.1289/ehp.02110293>.
- [6] Z. Luo et al., "Impacts of vehicle emission on air quality and human health in China," *Science of The Total Environment*, vol. 813, p. 152655, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152655>.
- [7] T. Ji, K. Li, Q. Sun, and Z. Duan, "Urban transport emission prediction analysis through machine learning and deep learning techniques," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 135, p. 104389, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104389>.
- [8] J. Riegel, H. Neumann, and H.-M. Wiedenmann, "Exhaust gas sensors for automotive emission

## پیوست (۱)

کد بررسی همبستگی آلاینده ها با سنسورها از قرار زیر است:

```
import pandas as pd
import numpy as np
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

===== #HERE: Put your Excel file path below=====
excel_file_path = "C:/Users/YourUsername/Documents/your_file.xlsx"
===== #

def load_data(file_path):
    try:
        df = pd.read_excel(file_path)
        print("Data loaded successfully")
        print(f"Number of records: {len(df)}")
        return df
    except Exception as e:
        print(f"Error reading file: {e}")
        return None

def custom_normalize(df):
    df_normalized = df.copy()

    df_normalized['CO_normalized'] = df['CO'].clip(0, 0.7) / 0.7
    df_normalized['O2_normalized'] = df['O2'].clip(0, 3) / 3
    df_normalized['HC_normalized'] = df['HC'].clip(0, 250) / 250
    df_normalized['CO2_original'] = df['CO2']

    df_normalized['O2_Sensor_Est'] = (df_normalized['O2_normalized'] / [
    )
        df_normalized['CO2_original'].clip(1, None) / 14((

    df_normalized['Throttle_Est'] = (df_normalized['HC_normalized'] * 0.6 +
        df_normalized['CO_normalized'] * 0.4(

    df_normalized['MAP_Est'] = (df_normalized['CO_normalized'] / [
    )
        df_normalized['CO2_original'].clip(1, None) / 14((

    return df_normalized

def correlation_analysis(df):
    # Define columns for pollutants and sensors
    pollutants = ['CO_normalized', 'CO2_original', 'HC_normalized', 'O2_normalized']
    sensors = ['O2_Sensor_Est', 'Throttle_Est', 'MAP_Est', 'Year']

    # Calculate correlation matrix
    correlation_df = pd.DataFrame()
    for sensor in sensors:
        correlations[] =
        for pollutant in pollutants:
            corr = df[sensor].corr(df[pollutant](
            correlations.append(corr(
            correlation_df[sensor] = correlations

    correlation_df.index = pollutants
    correlation_matrix = correlation_df.T # Transpose to get sensors as rows

# Create heatmap
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.heatmap(correlation_matrix ,
            annot=True ,
```

```

        cmap='coolwarm , '
        center=0,
        fmt='.2f,'
        square=True(

plt.title('Correlation between Sensors and Pollutants('
plt.ylabel('Sensors('
plt.xlabel('Pollutants('
plt.tight_layout()
plt.show()

return correlation_matrix

def analyze_sensor_relationships(df:(
    fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(15, 12)((
    fig.suptitle('Relationships between Sensors and Emissions('

    axes[0,0].scatter(df['O2_normalized'], df['O2_Sensor_Est'], alpha=0.5 (
    axes[0,0].set_xlabel('O2 Normalized('
    axes[0,0].set_ylabel('O2 Sensor Estimate('
    axes[0,0].set_title('O2 vs O2 Sensor('

    axes[0,1].scatter(df['HC_normalized'], df['Throttle_Est'], alpha=0.5(
    axes[0,1].set_xlabel('HC Normalized('
    axes[0,1].set_ylabel('Throttle Estimate('
    axes[0,1].set_title('HC vs Throttle('

    axes[1,0].scatter(df['CO_normalized']/df['CO2_original'], df['MAP_Est'], alpha=0.5(
    axes[1,0].set_xlabel('CO/CO2 Ratio('
    axes[1,0].set_ylabel('MAP Estimate('
    axes[1,0].set_title('CO/CO2 vs MAP('

    total_emissions = (df['CO_normalized'] + df['HC_normalized'] + df['O2_normalized'])/3
    axes[1,1].scatter(df['Year'], total_emissions, alpha=0.5(
    axes[1,1].set_xlabel('Year('
    axes[1,1].set_ylabel('Average Normalized Emissions('
    axes[1,1].set_title('Emissions Trend by Year('

plt.tight_layout()
plt.show()

#Main execution
df = load_data(excel_file_path(
if df is not None:
    df_processed = custom_normalize(df(
    correlation_matrix = correlation_analysis(df_processed(
    analyze_sensor_relationships(df_processed(
    print("\nCorrelation Matrix between Sensors and Pollutants(":
    print(correlation_matrix(

```

## پیش بینی میکرومکانیکی مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوذرات گرافن

**چکیده:** در این مقاله با ارائه یک رویکرد میکرومکانیکی سلسه مراتبی جدید بر اساس روش موری-تاناکا، مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن پیش بینی می شود. اثرات کلوخه ای شدن نانوذرات گرافن در زمینه سیمانی به عنوان یکی از پارامترهای مهم ریزساختاری در فرآیند مدل سازی میکرومکانیکی لحاظ می شود. همچنین اثرات مقدار نانوذرات گرافن، نسبت منظر، مقدار و همراستایی الیاف فولادی در زمینه سیمانی بر مدول الاستیک کامپوزیت مورد مطالعه قرار می گیرد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج پیش بینی شده در این مطالعه با داده های تجربی مقایسه می شوند. نتایج نشان می دهد که افزودن نانوذرات گرافن با توزیع یکنواخت به کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف فولادی موجب بهبود خواص الاستیک می شود. تشکیل حالت کلوخه ای نانوذرات، سبب کاهش اثرات تقویت کنندگی گرافن می شود. بر اساس نتایج میکرومکانیکی، افزایش مقدار و نسبت منظر میکروالیاف فولادی مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی را افزایش می دهد. همچنین همراستایی الیاف موجب حصول حداکثری مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافن خواهد شد.

**واژه های راهنما:** کامپوزیت پایه سیمانی، میکروالیاف فولادی، نانوغرافن، مدول الاستیک، مدلسازی میکرومکانیکی

میتهم  
سلیم زاده شوئیلی\*  
استادیار،  
دانشکده فنی،  
دانشگاه گیلان- رشت

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲  
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳  
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

Maysam  
Salimzadehshooiili\*  
Assistant Professor,  
Faculty of Engineering,  
University of Guilan-  
Rasht

## Micromechanical prediction of elastic modulus of cement-based composites reinforced with steel microfibers and graphene nanoparticles

**Abstract:** A new hierarchical micromechanical approach based on the Mori-Tanaka method is introduced to predict the elastic modulus of cement composites reinforced with steel microfibers and graphene nanosheets. Effects of graphene agglomeration in cement matrix, as one of the key microstructures in the micromechanical modeling are considered. Influences of graphene content, fiber aspect ratio, content, and alignment on the composite elastic modulus are investigated. For validation, predicted results of this study are compared with experimental data. Findings show that uniform distribution of graphene nanoparticles in cement composites containing steel fibers improves elastic properties. Formation of agglomerated nanoparticles reduces reinforcing effects of graphene. Based on the micromechanical results, increasing content and aspect ratio of steel microfibers enhances elastic moduli of the cement composite. Fiber alignment leads to the maximum achievable elastic modulus of steel fibers/graphene nanosheets-reinforced cement composites. Modulus of steel fibers/graphene nanosheets-reinforced cement composites.

**Keywords:** Cement-based composite; Steel microfiber; Nano-graphene; Elastic modulus; Micromechanics

## ۱- مقدمه

مواد پایه سیمانی به دلیل فراوانی منابع، صرفه اقتصادی، شکل-پذیری آسان و استحکام فشاری عالی‌شان، یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی مورد استفاده در زیرساخت‌های عمرانی در سراسر جهان هستند [۱]، [۲]، [۳]. با این حال، معایب چنین موادی از جمله شکنندگی ذاتی، استحکام کششی پایین و حساسیت در محیط‌های مهاجم، همیشه از نگرانی‌های عمده بوده‌اند که ممکن است منجر به دوام ضعیف و هزینه بالای نگهداری شوند [۴]، [۵]، [۶]. تلاش‌های بسیاری برای افزودن میکروالیاف مختلف به کامپوزیت‌های پایه سیمانی، مانند الیاف کربن، شیشه، پلی پروپیلن و ... انجام شده است تا خواص مکانیکی تحت بارهای کششی، دوام و چندعملکردی بودن این مواد بهبود یابد [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]. مزیت اصلی گنجاندن میکروالیاف در کامپوزیت‌های پایه سیمانی، مقاومت در برابر انتشار ترک و تأخیر در گسترش آن است. به طور کلی، اعتقاد بر این است که افزودن میکروالیاف موجب بهبود مقاومت این مواد کامپوزیتی در برابر ترک خوردگی می‌شود [۴]، [۱۱]، [۱۲]. در این زمینه، استفاده از الیاف فولادی در کامپوزیت‌های پایه سیمانی می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای بهبود خواص کلی مکانیکی به‌ویژه مدول و استحکام کششی در نظر گرفته شود [۴]، [۱۱]. الیاف فولادی به دلیل مدول الاستیسیته عالی، استحکام بالا، رسانایی حرارتی خوب و مقرون به صرفه بودن برای مهندسان مواد بسیار جذاب هستند.

با پیشرفت فناوری نانو در حوزه مواد مهندسی ساختمانی، استفاده از نانومواد مانند نانوسیلیکا، اکسید تیتانیوم، نانوکلی، نانوالومینا، نانوالیاف کربن، نانولوله کربن، گرافن و ... در کامپوزیت‌های پایه سیمانی به منظور افزایش عملکرد مکانیکی و فیزیکی‌شان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته است [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. نانومواد دوبعدی مانند گرافن یا اکسید گرافن نه تنها از نظر نیروهای جاذبه مشابه نانومواد یک‌بعدی نظیر نانولوله‌های کربنی هستند، بلکه از اتم‌های کربن با پیوند  $sp^2$  تشکیل شده‌اند که به گرافن خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای می‌بخشند. گرافن دارای مدول الاستیک بالا (۱/۱ تراپاسکال) و استحکام کششی عالی (۱۳۰ گیگاپاسکال)، رسانایی الکتریکی بالا، رسانایی حرارتی زیاد (۵۰۰۰ وات بر متر کلین) و سطح ویژه فوق‌العاده بالا است [۱۳]، [۱۴]. گزارش شده است که اکسید گرافن می‌تواند به‌خوبی در محلول پخش شود و گروه‌های اکسیژن‌دار روی سطح آن می‌توانند به واکنش با سیمان کمک کنند [۱۷]، [۱۸].

تجربی متعددی در حوزه استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت-های پایه سیمانی حاوی نانوذرات گرافن انجام شده است. لو و اویانگ [۱۹] تأثیر افزودن نانوصفحات اکسید گرافن بر ویژگی‌های کامپوزیت سیمانی و بتن فوق‌العاده مقاوم را گزارش کردند. طبق نتایج آزمایشگاهی، افزودن نانوصفحات گرافن موجب بهبود استحکام‌های خمشی و فشاری کامپوزیت‌های پایه سیمانی شده، به‌طوری‌که افزایش استحکام خمشی بیش از افزایش استحکام فشاری می‌باشد. غلامپور و همکاران [۲۰] تأثیر گروه‌های عاملی اکسیژن در گرافن و نقص‌های ساختاری گرافن را بر خواص کششی محوری و فشاری کامپوزیت‌های پایه سیمانی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن اکسید گرافن کاهش-یافته با مقدار ۰/۱ درصد تحت شرایط کاهش بهینه منجر به افزایش ۴۵ و ۸۳/۷ درصد مقاومت کششی و فشاری ۲۸ روزه کامپوزیت‌های پایه سیمانی درصدی در مقایسه با نمونه ساده شده است. هویو و همکارانش [۲۱] گزارش کردند که افزودن ۰/۱۶ درصد وزنی اکسید گرافن در ماتریس سیمانی می‌تواند استحکام خمشی کامپوزیت پایه سیمانی حاصل را تا ۱۱/۶۲ درصد افزایش دهد. پان و همکارانش [۲۲] دریافتند که افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی اکسید گرافن می‌تواند مقاومت فشاری کامپوزیت پایه سیمانی را ۱۵ تا ۳۳ درصد و مقاومت خمشی آن را ۴۱ تا ۵۹ درصد افزایش دهد. در یک مطالعه تجربی دیگر [۲۳]، عملکرد دو شکل خاص از نانومواد گرافنی شامل اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش‌یافته در کامپوزیت‌های پایه سیمانی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. استحکام فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه کامپوزیت سیمانی حاوی ۰/۰۶ درصد وزنی اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش‌یافته به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد افزایش یافتند. به علاوه افزایش استحکام خمشی برای کامپوزیت پایه سیمانی حاوی ۰/۰۴ درصد وزنی اکسید گرافن و ۰/۰۶ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته به ترتیب ۷۵/۷ و ۳۳/۷ درصد گزارش شد.

تقاضا برای مواد کامپوزیتی پایه سیمانی در طیف گسترده‌ای از کاربردها که به خواص مکانیکی و چندمنظوره بهتر تحت بارگذاری‌ها و شرایط محیطی سخت‌تر نیاز دارند، در حال افزایش است. اخیراً، ترکیب میکروالیاف با پرکننده‌های نانومقیاس به‌عنوان روشی نوین برای تولید کامپوزیت‌های پایه سیمانی مطرح شده است [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]. به‌عنوان مثال، چویی و همکارانش [۲۷] تأثیرات الیاف کربن پوشش داده‌شده با نانولوله‌های کربنی را بر ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی بررسی کردند و آن را با کامپوزیت سیمانی تقویت‌شده با الیاف کربن و ماتریس سیمانی خالص مقایسه نمودند. نتایج

نانوگرافن و میکروالیاف فولادی که پارامترهای ریزساختاری مهم را در نظر بگیرد، تاکنون ارائه نشده است.

در این مقاله یک مدل میکرومکانیکی سلسه‌مراتبی مبتنی بر روش موری-تاناکا به منظور تخمین مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت‌شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفات گرافن توسعه می‌شود. لذا تقسیم‌بندی پژوهش حاضر به صورت زیر است: در بخش دوم، فرآیند مدل‌سازی کامپوزیت پایه سیمانی با تقویت‌کننده‌های هیبریدی توضیح داده می‌شود. سپس روابط میکرومکانیکی مدل موری-تاناکا در چندین حالت با توجه به هندسه تقویت‌کننده ارائه می‌شود. در بخش سوم پس از مشخص کردن اجزای تشکیل‌دهنده، پیش‌بینی‌های میکرومکانیکی برای مدول الاستیک کامپوزیت مورد نظر گزارش می‌شود. همچنین در این به منظور اعتبارسنجی مدل میکرومکانیکی، مقایسه با نتایج موجود در ادبیات پیشین انجام می‌شود. در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری پژوهش حاضر بحث خواهد شد. مدل‌سازی میکرومکانیک توسعه داده شده در این پژوهش ریزساختارهای مواد کامپوزیتی پایه سیمانی را به رفتار کششی آن‌ها مرتبط می‌کند و این ارتباط امکان تنظیم معکوس اجزا برای دستیابی به عملکرد کششی هدفمند با حداقل مقدار الیاف و نانوماده و همچنین پیش‌بینی و مدل‌سازی مستقیم رفتار کششی را فراهم می‌سازد.

## ۲- مدل‌سازی میکرومکانیکی کامپوزیت پایه سیمانی

ویژگی ساختاری ماده کامپوزیتی پایه سیمانی مورد نظر در این پژوهش به این صورت است که میکروالیاف فولادی در زمینه سیمانی پراکنده با نانوصفات گرافن پخش شده‌اند.

یک نمایش شماتیک از چنین کامپوزیتی در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این بخش، یک روش سلسه‌مراتبی برای پیش‌بینی میکرومکانیکی خواص الاستیک کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفات گرافن توسعه داده می‌شود. روش تحلیلی برای پیش‌بینی خواص الاستیک چنین کامپوزیت‌هایی با پیش‌بینی خواص الاستیک ماده سیمانی حاوی نانوگرافن آغاز می‌شود.

خواص الاستیک سیمان تقویت‌شده با نانوصفات گرافن با استفاده از روش موری-تاناکا به‌عنوان یک روش میکرومکانیکی تحلیلی کارآمد محاسبه می‌شوند [۴۳، ۴۲]. از دیدگاه یک ماده کامپوزیتی، گرافن‌ها به‌عنوان عامل تقویت‌کننده درون سیمان، که به‌عنوان زمینه (یا ماتریس) عمل می‌کند، پراکنده شده‌اند.

نشان داد که با افزودن این تقویت‌کننده‌های متشکل از الیاف کربن و نانولوله کربن به ماتریس سیمانی، استحکام خمشی کامپوزیت سیمانی در ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۴۸/۵، ۴۲/۲ و ۴۵/۵ درصد بیشتر از ماده سیمانی خالص بود. در حالی که با افزودن الیاف کربن به ماتریس سیمانی، استحکام خمشی کامپوزیت سیمانی در ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۳، ۲۴/۱ و ۱۹/۸ درصد بیشتر از ماده سیمانی خالص شد. چن و همکارانش [۲۸] گزارش کردند که الیاف کربن پوشش داده شده با گرافن در مقایسه با الیاف کربن، در ایجاد حفاظت در برابر تداخل الکترومغناطیسی در کامپوزیت‌های پایه سیمانی مؤثرتر است. در مطالعه‌ای دیگر، نتایج نشان داد که استحکام فشاری کامپوزیت پایه سیمانی حاوی ۰/۰۶ درصد اکسید گرافن و ۱ درصد الیاف کربنی به میزان ۲۳/۸۹ درصد افزایش یافته، در حالی که افزایش استحکام کششی خمشی این کامپوزیت به ۱۳۸/۴۴ درصد رسیده است [۲۹]. در حوزه استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی حاوی دو فاز تقویت‌کننده میکرو و نانومقیاس مطالعات تجربی متعددی انجام شده است [۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵]. با این وجود، مرور ادبیات پیشین به وضوح نشان می‌دهد که یک مطالعه جامع بر خواص کششی کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفات گرافنی انجام نشده است.

روش‌های میکرومکانیکی تکنیک‌های قدرتمندی هستند که عمدتاً برای پیش‌بینی خواص مؤثر مواد ناهمگن توسعه یافته‌اند. مدل‌های میکرومکانیکی می‌توانند خواص مؤثر کامپوزیت‌های پایه سیمانی را بر اساس ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده، مقدار، هندسه تقویت‌کننده و تعامل بین فازها پیش‌بینی کنند [۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹]. حسن‌زاده اقدم و همکارانش [۴۰] با استفاده از مدل میکرومکانیکی محیط مؤثر هدایت حرارتی کامپوزیت پایه سیمانی حاوی نانولوله‌های کربنی را پیش‌بینی کردند. علاوه بر درصد حجمی نانولوله کربن، اثرات حالت موجی بودن و مقاومت لایه میانی بین نانولوله و زمینه سیمانی در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. صافی و همکارانش [۴۱] به تحلیل جامع خواص الاستیک مؤثر کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف ترکیبی نانو و میکروساختار پرداختند. در پژوهش مذکور یک طرح مدل‌سازی میکرومکانیکی چندمرحله‌ای مبتنی بر مدل سلول واحد برای پیش‌بینی ویژگی‌های الاستیک در جهت‌های محوری و عرضی پیشنهاد شده است. با توجه به افزایش کاربردهای کامپوزیت‌های پایه سیمانی با تقویت‌کننده‌های نانو و میکرو مقیاس، یک مدل پیش‌بینی‌کننده برای مدول الاستیک چنین مواد مهندسی حاوی

$$\mathbf{C}^{NC} = \left( f_m \mathbf{C}_m + \sum_{r=1}^N f_r \langle \mathbf{C}_r : \mathbf{A}_r(\theta, \varphi) \rangle \right) : \left( f_m \mathbf{I} + \sum_{r=1}^N f_r \langle \mathbf{A}_r(\theta, \varphi) \rangle \right)^{-1} \quad (3)$$

در این رابطه  $\langle x \rangle$  نشان دهنده میانگین گیری جهتی برای یک تانسور مرتبه چهارم می باشد. پس از انجام عملیات ریاضی، مدول حجمی  $k^{NC}$  و مدول برشی  $\mu^{NC}$  سیمان تقویت شده با نانوگرافن پخش شده به صورت تصادفی برابر خواهد بود با:

$$k^{NC} = k_m + \frac{f_r(\delta_r - 3k_m\alpha_r)}{3(f_m + f_r\alpha_r)} \quad (4)$$

$$\mu^{NC} = \mu_m + \frac{f_r(\eta_r - 2\mu_m\beta_r)}{2(f_m + f_r\beta_r)} \quad (5)$$

که در این رابطه  $k_m$  و  $\mu_m$  به ترتیب مدول حجمی و مدول برشی زمینه سیمانی می باشند و

$$\alpha_r = \frac{3k_m + 2n_r - 2l_r}{3n_r}$$

$$\beta_r = \frac{4\mu_m + 7n_r + 2l_r}{15n_r} + \frac{2\mu_m}{2p_r}$$

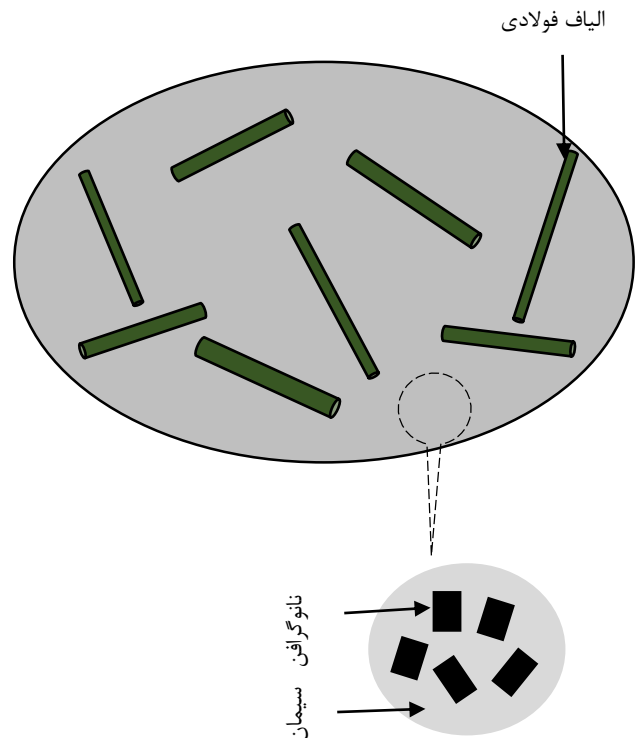
$$\delta_r = \frac{3k_m(n_r + 2l_r) + 4(k_r n_r - l_r^2)}{3n_r} \quad (6)$$

$$n_r = \frac{2}{15} \left( k_r + 6m_r + 8\mu_m - \frac{l_r^2 + 2\mu_m l_r}{n_r} \right)$$

در رابطه فوق  $k_r, n_r, l_r, p_r$  و  $m_r$  ثوابت الاستیک هیل برای گرافن می باشد. مدول الاستیک  $E^{NC}$  و نسبت پواسون  $\nu^{NC}$  زمینه سیمانی حاوی گرافن را می توان مطابق روابط الاستیسیته به صورت زیر محاسبه نمود.

$$E^{NC} = \frac{9k^{NC}\mu^{NC}}{3k^{NC} + \mu^{NC}} \quad (7)$$

$$\nu^{NC} = \frac{3k^{NC} - 2\mu^{NC}}{6k^{NC} + 2\mu^{NC}} \quad (8)$$



شکل ۱ شماتیکی از یک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن

سه نوع پخش گرافن در زمینه سیمانی شامل: (۱) همراستا، (۲) با پراکندگی یکنواخت و (۳) کلوخه ای شده در نظر گرفته می شود. بر اساس مدل موری-تاناکا، تانسور سفتی الاستیک زمینه سیمانی تقویت شده با نانوصفحات همراستا  $\mathbf{C}^{NC}$  به صورت زیر ارائه می شود [۴۴].

$$\mathbf{C}^{NC} = \left( f_m \mathbf{C}_m + \sum_{r=1}^N f_r \mathbf{C}_r : \mathbf{A}_r \right) : \left( f_m \mathbf{I} + \sum_{r=1}^N f_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} \quad (1)$$

در این رابطه  $f_r$  و  $f_m$  به ترتیب کسر حجمی گرافن و زمینه،  $N$  تعداد تقویت کننده و  $\mathbf{I}$  تانسور واحد مرتبه چهارم می باشد. همچنین  $\mathbf{C}_m$  و  $\mathbf{C}_r$  به ترتیب تانسور سفتی الاستیک مرتبه چهارم برای گرافن و زمینه سیمانی بوده و  $\mathbf{A}_r$  به صورت زیر تعریف می شود

$$\mathbf{A}_r = [\mathbf{I} + (\mathbf{S} : \mathbf{C}_m^{-1}) : (\mathbf{C}_r - \mathbf{C}_m)]^{-1} \quad (2)$$

پخش تصادفی گرافن در زمینه سیمانی منجر به ایجاد یک کامپوزیت با خواص ایزوتروپیک می شود. برای شبیه سازی چنین کامپوزیت هایی، ماتریس سفتی آن به صورت زیر اصلاح می شود

$$\mu_{agglomer} = \mu_m + \frac{f_r \zeta (\eta_r - 2\mu_m \beta_r)}{2(\xi - f_r \zeta + f_r \zeta \beta_r)} \quad (12)$$

فرآیند مشابهی برای تعیین مدول حجمی  $k_{emp}$  و مدول برشی  $\mu_{emp}$  فاز زمینه مؤثر به صورت زیر انجام می‌شود.

$$k_{emp} = k_m + \frac{f_r (\delta_r - 3k_m \alpha_r) (1 - \zeta)}{3(1 - \xi - f_r (1 - \zeta) + f_r (1 - \zeta) \alpha_r)} \quad (13)$$

$$\mu_{emp} = \mu_m + \frac{f_r (1 - \zeta) (\eta_r - 2\mu_m \beta_r)}{2(1 - \xi - f_r (1 - \zeta) + f_r (1 - \zeta) \beta_r)} \quad (14)$$

سپس، با به‌کارگیری مدل موری-تاناکا و در نظر گرفتن فاز کلوخه‌ای شده به‌عنوان تقویت‌کننده و فاز زمینه مؤثر به‌عنوان زمینه جدید، مدول حجمی  $k^{FGC}$  و مدول برشی  $\mu^{FGC}$  سیمان حاوی نانوصفحات گرافن کلوخه‌ای شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$k^{FGC} = k_{emp} + \frac{\xi \left( \frac{k_{agglomer}}{k_{emp}} - 1 \right)}{1 + \hat{\alpha} (1 - \xi) \left( \frac{k_{agglomer}}{k_{emp}} - 1 \right)} k_{emp} \quad (15)$$

$$\mu^{FGC} = \mu_{emp} + \frac{\xi \left( \frac{\mu_{agglomer}}{\mu_{emp}} - 1 \right)}{1 + \hat{\beta} (1 - \xi) \left( \frac{\mu_{agglomer}}{\mu_{emp}} - 1 \right)} \mu_{emp} \quad (16)$$

که در این رابطه  $\hat{\alpha}$  و  $\hat{\beta}$  به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\hat{\alpha} = \frac{3k_{emp}}{3k_{emp} + 4\mu_{emp}}, \quad \hat{\beta} = \frac{6(k_{emp} + 2\mu_{emp})}{5(3k_{emp} + 4\mu_{emp})} \quad (17)$$

پس از استخراج خواص مؤثر سیمان حاوی نانوصفحات گرافن می‌توان خواص الاستیک ماده کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوذرات گرافن با استفاده از میکرومکانیکی موری-تاناکا پیش‌بینی نمود. در این مرحله سیمان حاوی نانوصفحات گرافن به‌عنوان زمینه و الیاف فولادی

پراکندگی یکنواخت نانوذرات گرافن در زمینه سیمانی به بهبود خواص این مواد ترکیبی پیشرفته کمک می‌کند. بررسی‌های انجام‌شده در مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در طی فرآیند ساخت چنین مواد کامپوزیتی، ذرات گرافن به دلیل سطح ویژه بالا و برهمکنش‌های قوی، تمایل به حالت کلوخه‌ای شدن دارند که ممکن است نقاط تمرکز تنش ایجاد کنند و باعث کاهش خواص مکانیکی شود [۱۴]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۴۵]، [۴۶]، [۴۷]. لذا مدل‌سازی مطالعه این پدیده ریزساختاری کامپوزیت‌های پایه سیمانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یک تکنیک دو مرحله‌ای مبتنی بر مدل میکرومکانیکی موری-تاناکا برای بررسی تأثیر کلوخه‌ای شدن نانوصفحات گرافن بر خواص الاستیک مؤثر کامپوزیت‌های پایه سیمانی ارائه می‌شود. فرض می‌شود که برخی از ذرات گرافن در نواحی کروی در زمینه سیمانی متمرکز شده و مابقی ذرات گرافن دارای پراکندگی یکنواخت باشند. بنابراین، کل سیستم کامپوزیتی را می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد: ناحیه داخل کره‌ها که به‌عنوان فاز کلوخه‌ای شناخته می‌شود و ناحیه خارج از کره‌ها که به‌عنوان فاز زمینه مؤثر در نظر گرفته می‌شود [۴۸]. دو پارامتر  $\xi$  و  $\zeta$  به منظور توصیف حالت کلوخه‌ای شدن نانوذرات گرافن به کار می‌رود چنانکه

$$\xi = \frac{V_{agglomer}}{V}, \quad \zeta = \frac{V_r^{agglomer}}{V_r} \quad (9)$$

در این رابطه  $V$  حجم کل ماده کامپوزیتی،  $V_{agglomer}$  حجم قسمت کلوخه‌ای شده،  $V_r$  و  $V_r^{agglomer}$  به ترتیب حجم کل گرافن در زمینه سیمانی و بخشی از آن که کلوخه‌ای شده است را بیان می‌کند. با توجه به معادله (۹) و کسر حجمی نانوغرافن، می‌توان کسر حجمی آن را در قسمت کلوخه‌ای شده  $f_r^{agglomer}$  و در قسمت زمینه مؤثر  $f_r^{emp}$  به صورت زیر محاسبه نمود.

$$f_r^{agglomer} = \frac{V_r^{agglomer}}{V_{agglomer}} = \frac{\zeta}{\xi} f_r \quad (10)$$

$$f_r^{emp} = \frac{V_r - V_r^{agglomer}}{V - V_{agglomer}} = \frac{(1 - \zeta) f_r}{(1 - \xi)}$$

ابتدا، خواص الاستیک مؤثر فاز کلوخه‌ای شده و فاز زمینه مؤثر با استفاده از معادلات (۴-۶) و (۱۰) تعیین می‌شوند چنانکه

$$k_{agglomer} = k_m + \frac{(\delta_r - 3k_m \alpha_r) f_r \zeta}{3(\xi - f_r \zeta + f_r \zeta \alpha_r)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1122} = \hat{S}_{1133} &= -\frac{1}{2(1-v^{NC})} \left[ 1 - 2v^{NC} + \frac{1}{a^2 - 1} \right] \\ &+ \frac{1}{2(1-v^{NC})} \left[ 1 - 2v^{NC} + \frac{3}{2(a^2 - 1)} \right] g, \\ \hat{S}_{2323} &= \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ \frac{a^2}{2(a^2 - 1)} + \left[ 1 - 2v^{NC} - \frac{3}{4(a^2 - 1)} \right] g \right\}, \\ \hat{S}_{1212} = \hat{S}_{1313} &= \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ 1 - 2v^{NC} - \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} - \frac{1}{2} \left[ 1 - 2v^{NC} - \frac{3(a^2 + 1)}{a^2 - 1} \right] g \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

در رابطه فوق  $a$  نسبت منظر (نسبت طول به قطر) الیاف فولادی کوتاه و پارامتر  $g$  که به هندسه میکروالیاف مربوط می-شود برابر خواهد بود با:

$$g = \frac{a}{(a^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \left\{ a(a^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \cosh^{-1} a \right\}, \text{ when } a > 1 \quad (21)$$

### ۳- نتایج و بحث

در این قسمت، ابتدا به منظور اعتبارسنجی مدل میکرومکانیکی ارائه شده، پیش‌بینی‌های مدل حاضر با داده‌های تجربی [۵۱] مقایسه می‌شوند. شکل (۲) مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی را بر حسب مقدار نانوگرافن نشان می‌دهد. چگالی گرافن ۲/۲۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و ثوابت الاستیک هیل  $2k_r$ ،  $n_r$ ،  $2m_r$  و  $2p_r$  آن به ترتیب ۱۷۰۰، ۱۰۲۰۰۰، ۶/۸، ۲۰۴۰۰۰ و ۷۳۸ گیگاپاسکال می‌باشد [۴۳]، [۴۴]. همچنین مدول الاستیک و نسبت پواسون زمینه سیمانی به ترتیب ۳۳۴۸ مگاپاسکال و ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که مدول الاستیک پیش‌بینی شده با مدل میکرومکانیکی تطابق مناسبی با داده‌های تجربی [۵۱] دارد. همچنین مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی با افزایش مقدار نانوگرافن افزایش می‌یابد.

به‌عنوان تقویت کننده در نظر گرفته می‌شوند. همچنین فرض می‌شود که توزیع میکروالیاف فولادی در کامپوزیت به صورت اتفاقی باشد. بر اساس روش میکرومکانیکی موری-تاناکا، تانسور سفتی الاستیک چنین کامپوزیتی به صورت زیر داده می‌شود [۴۹]، [۵۰].

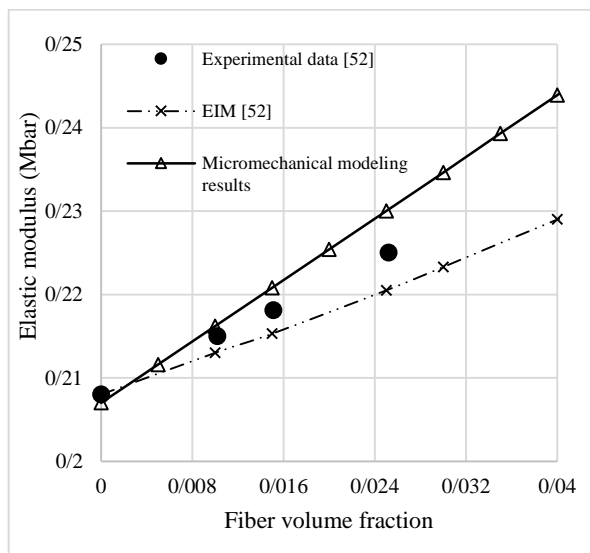
$$[C^{HC}] = [C^{NC}] + V_F ([C^F] - [C^{NC}]) \left\{ [\tilde{A}_1] \left[ (1 - V_F)[I] + V_F[\tilde{A}_1] \right]^{-1} \right\} \quad (18)$$

در این رابطه  $V_F$  و  $C^F$  به ترتیب کسر حجمی و تانسور سفتی الیاف فولادی و تانسور  $\tilde{A}_1$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

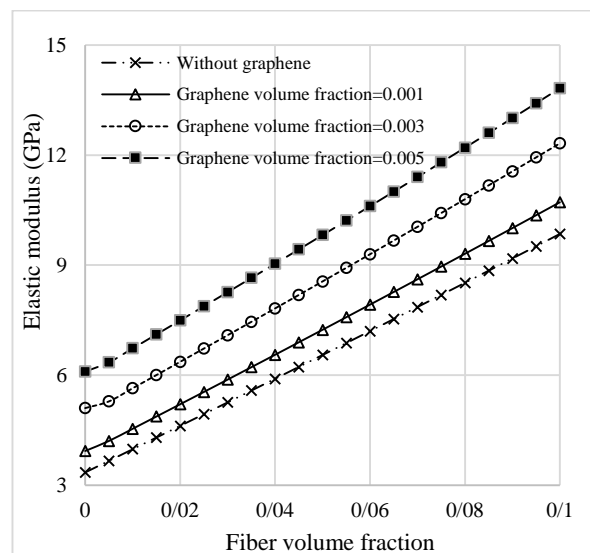
$$[\tilde{A}_1] = [I] + [\hat{S}]([C^{NC}]^{-1}([C^F] - [C^{NC}]))^{-1} \quad (19)$$

همچنین مؤلفه‌های غیر صفر تانسور اشلیبی  $\hat{S}$  به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1111} &= \frac{1}{2(1-v^{NC})} \left\{ 1 - 2v^{NC} + \frac{3a^2 - 1}{a^2 - 1} - \left[ 1 - 2v^{NC} + \frac{3a^2}{a^2 - 1} \right] g \right\}, \\ \hat{S}_{2222} = \hat{S}_{3333} &= \frac{a^2}{8(1-v^{NC})a^2 - 1} + \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left[ 1 - 2v^{NC} - \frac{1}{9} - \frac{1}{4(a^2 - 1)} \right] g, \\ \hat{S}_{2233} = \hat{S}_{3322} &= \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ \frac{a^2}{2(a^2 - 1)} - \left[ 1 - 2v^{NC} + \frac{3}{4(a^2 - 1)} \right] g \right\}, \\ \hat{S}_{2211} = \hat{S}_{3311} &= -\frac{1}{2(1-v^{NC})} \frac{a^2}{a^2 - 1} + \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ \frac{3a^2}{a^2 - 1} - (1 - 2v^{NC}) \right\} g, \end{aligned}$$



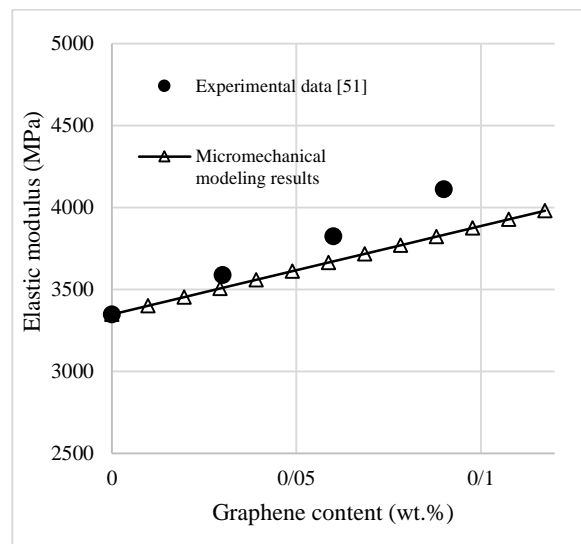
شکل ۳ مقایسه مدول الاستیک کامپوزیت زمینه بتنی حاوی الیاف فولادی



شکل ۴ تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی

نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی نشان می‌دهد که مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن با افزایش مقدار میکروالیاف افزایش می‌یابد.

همان‌طور که بیان شد، ممکن است در حین فرآیند ساخت کامپوزیت‌های سیمانی، نانوذرات کربنی در زمینه به حالت کلوخه‌ای شده درآیند. لذا با استفاده از مدل میکرومکانیکی ارائه شده اثر این پارامتر ریزساختاری بر خواص ارتجاعی کامپوزیت مورد نظر بررسی می‌شود.



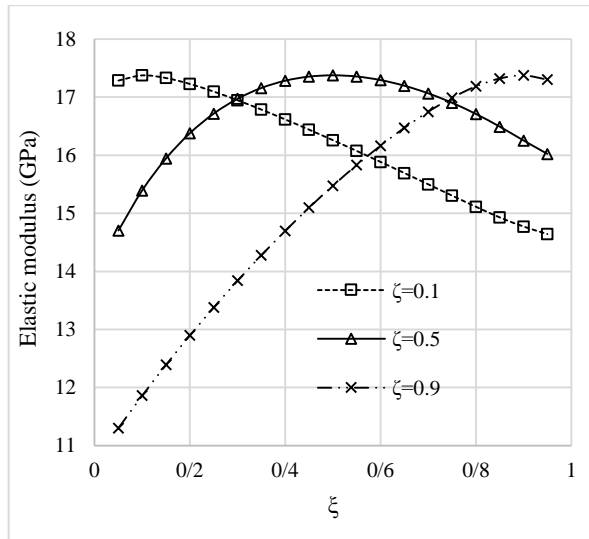
شکل ۲ مقایسه مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی حاوی گرافن

مقایسه‌ای دیگر بین پیش‌بینی‌های مدل میکرومکانیکی حاضر با داده‌های تجربی و همچنین مدل EIM<sup>۱</sup> برای مدول الاستیک کامپوزیت بتنی تقویت شده با الیاف فولادی ارائه می‌شود. مدول الاستیک و نسبت پواسون برای زمینه و الیاف به ترتیب ۲۰/۸۰۲ گیگاپاسکال، ۰/۲۰۸۱ و ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ می‌باشد. همچنین نسبت منظر میکروالیاف فولادی ۱۰۰ می‌باشد [۵۲]. شکل (۳) مدول الاستیک ماده کامپوزیتی را بر حسب کسر حجمی الیاف فولادی نشان می‌دهد. واضح است که نتایج مدل‌سازی ارائه شده در این مطالعه تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی [۵۲] دارد. بیشترین اختلاف بین دو مجموعه از نتایج حدود ۲/۵ درصد می‌باشد.

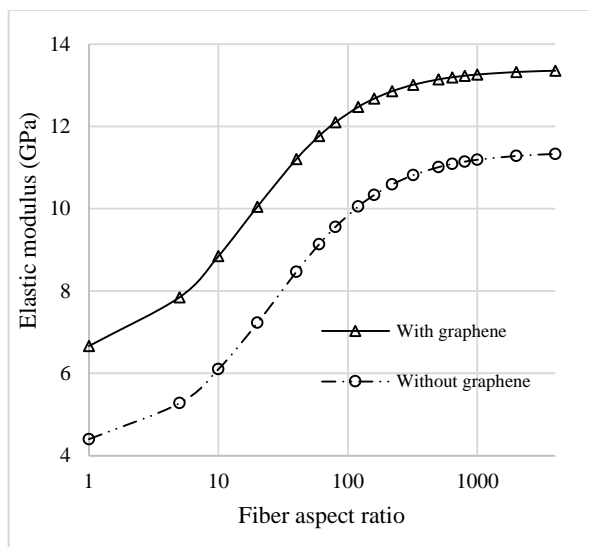
در این قسمت، با به‌کارگیری رویکرد میکرومکانیکی سلسه-مراتبی بر اساس روش موری-تاناکا، مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن ارائه می‌شود. قطر و طول الیاف به ترتیب ۵۰ میکرومتر و ۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۴) تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی بررسی شده است. همچنین نتایج برای سه کسر حجمی گرافن شامل ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۵ ارائه شده است. به خوبی می‌توان دریافت که افزودن حتی مقدار کمی نانوصفحات گرافن باعث بهبود خواص الاستیک کامپوزیت سیمانی اقویت شده با الیاف فولادی می‌شود. به‌عنوان مثال افزودن ۰/۳ درصد حجمی نانوغرافن به کامپوزیت سیمانی حاوی ۴ درصد حجمی الیاف فولادی باعث بهبود حدود ۳۳ درصدی در مدول الاستیک آن می‌شود.

<sup>1</sup> Equivalent inclusion method

کامپوزیت سیمانی می‌شود. در واقع افزایش نسبت منظر میکروالیاف باعث بهبودی در ظرفیت تحمل بار مکانیکی کامپوزیت سیمانی می‌شود. به‌عنوان مثال، با افزایش نسبت منظر الیاف فولادی از ۱۰ به ۱۰۰، مدول الاستیک کامپوزیت سیمانی شامل نانوگرافن و بدون آن به ترتیب ۳۹ درصد و ۶۰ درصد بهبود می‌یابد. همچنین می‌توان دریافت که بعد از نسبت منظر ۱۰۰، افزایش بیشتر آن تأثیر جزئی بر خواص مکانیکی دارد.



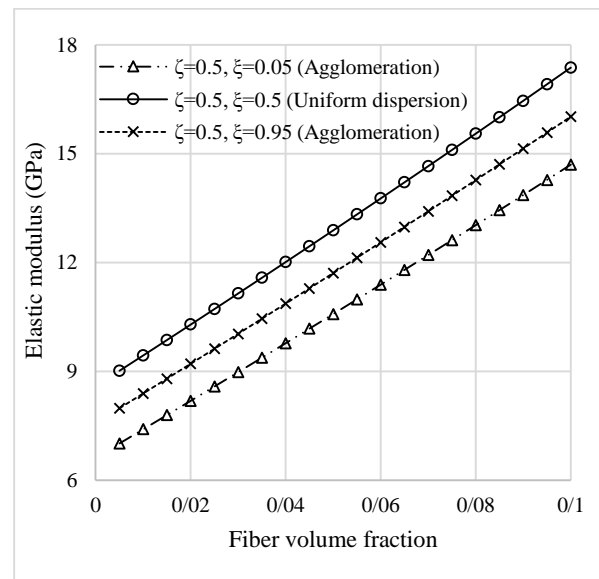
شکل ۶ تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با پارامتر  $\zeta$



شکل ۷ تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با نسبت منظر الیاف

همراستایی الیاف در مواد کامپوزیتی یکی از پارامترهای مهم ریزساختاری جهت طراحی یک ماده مقاوم در برابر بارهای

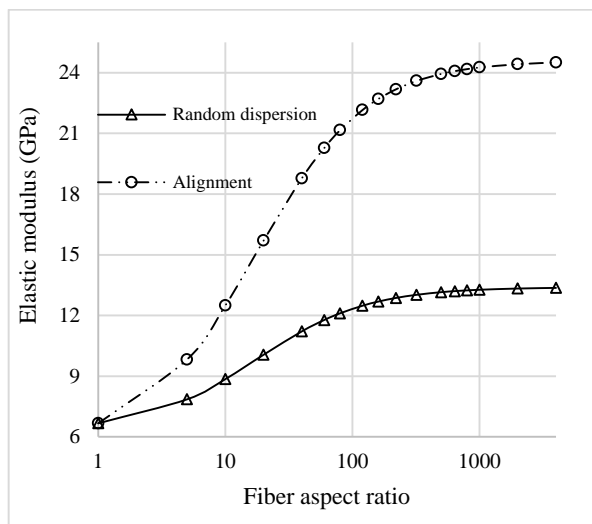
شکل (۵) تأثیر نوع توزیع نانوصفحات گرافن با مقدار ۱ درصد حجمی را بر مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی نشان می‌دهد. تشکیل حالت کلوخه‌ای نانوذرات، سبب کاهش اثرات تقویت‌کنندگی گرافن و در نهایت کاهش مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی حاوب میکروالیاف فولادی می‌شود. در واقع با توزیع یکنواخت نانوگرافن ( $\xi = \zeta$ ) در سیمان می‌توان از مزیت فوق‌العاده خواص مکانیکی چنین ذراتی استفاده نمود.



شکل ۵ تأثیر نوع توزیع نانوصفحات بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن

در شکل (۶) تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با پارامتر تجمع نانوذرات  $\zeta$  به ازای مقادیر مختلف پارامتر  $\zeta$  نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با دور شدن از حالت توزیع یکنواخت نانوذرات، مدول الاستیک کامپوزیت سیمانی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول الاستیک به ازای  $\xi = \zeta$  یعنی تحت شرایط توزیع یکنواخت به دست می‌آید.

شکل (۷) مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی را با نسبت منظر الیاف نشان می‌دهد. درصد حجمی الیاف فولادی و نانوصفحات گرافن در کامپوزیت زمینه سیمانی به ترتیب برابر ۱۰ و ۰/۳ می‌باشد. دقت شود که توزیع الیاف فولادی در کامپوزیت به صورت اتفاقی در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی به وضوح نشان می‌دهد که افزایش نسبت منظر الیاف فولادی باعث افزایش غیرخطی در مدول الاستیک



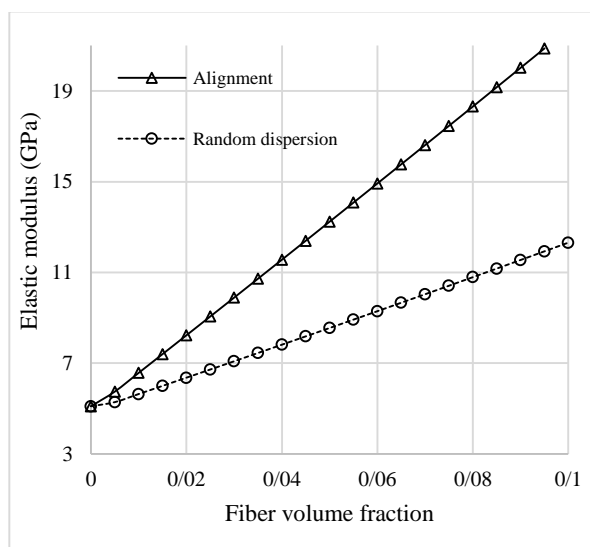
شکل ۹ تأثیر همراستایی الیاف بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با نسبت منظر الیاف

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل میکرومکانیکی بر اساس روش موری-تاناکا جهت پیش‌بینی مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن ارائه شد. با توجه به پارامترهای میکروساختاری موجود از جمله پدیده خوشه‌ای شدن نانوذرات، فرآیند مدل‌سازی میکرومکانیکی در چند مرحله پایه‌ریزی شد. تطابق بسیار خوبی بین نتایج پیش‌بینی شده با مدل میکرومکانیکی حاضر در قیاس با داده‌های تجربی موجود مشاهده شد. یافته‌های مهم این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- افزودن نانوصفحات گرافن به کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی موجب بهبود خواص الاستیک آن می‌شود. افزایش مقدار نانوذرات با حفظ توزیع یکنواخت موجب بهبودی بیشتر در خواص مکانیکی کامپوزیت خواهد شد.
- در صورت تشکیل حالت کلوخه‌ای نانوذرات گرافن، مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی کاهش می‌یابد. لذا به منظور افزایش کارآرایی این ماده کامپوزیتی، توزیع همگن نانوصفحات گرافن در سیمان توصیه می‌شود.
- افزایش کسر حجمی و نسبت منظر میکروالیاف فولادی باعث بهبودی بیشتر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی می‌شود. البته نتایج نشان داد که با افزایش نسبت منظر میکروالیاف، مدول الاستیک تا یک مقدار آستانه‌ای افزایش می‌یابد که به پارامترهای ریزساختاری از جمله مقدار نانوذرات، نوع توزیع الیاف فولادی بستگی خواهد داشت.

کششی خارجی محسوب می‌شود. با استفاده از روش میکرومکانیکی توسعه داده شده، اثرات همراستایی میکروالیاف فولادی بر مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی حاوی الیاف و نانوذرات بررسی می‌شود. نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی در شکل (۸) نشان داده شده است. به وضوح می‌توان دریافت که همراستایی میکروالیاف فولادی در کامپوزیت سیمانی موجب افزایش چشمگیر مدول الاستیک خواهد شد. به عنوان مثال، مدول الاستیک این ماده کامپوزیتی شامل ۵٪ حجمی الیاف فولادی همراستا شده و ۳٪ نانوصفحات گرافن ۵۵ درصد بیشتر از نمونه با توزیع اتفاقی الیاف فولادی می‌باشد.



شکل ۸ تأثیر همراستایی الیاف بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با کسر حجمی الیاف

در شکل (۹) تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافن در مقابل نسبت منظر الیاف در دو حالت شامل توزیع اتفاقی میکروالیاف و همراستایی آن نشان داده شده است. به وضوح می‌توان دریافت که یک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با نانوذرات میکروالیاف فولادی همراستایی دارای مدول الاستیک بسیار بالاتری در قیاس با نمونه حاوی الیاف فولادی با توزیع اتفاقی می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی نشان می‌دهد زمانی که الیاف به صورت همراستا در کامپوزیت پایه سیمانی قرار دارد، مدول الاستیک تا نسبت منظر ۱۰۰۰ به سرعت افزایش می‌یابد و بعد از این مقدار مشخص، تغییرات آن تأثیر جزئی بر مدول الاستیک خواهد داشت. این در حالی است که برای نمونه شامل الیاف فولادی با توزیع اتفاقی، این مقدار عدد ۱۰۰ گزارش می‌شود.

- composites,” *Materials*, vol. 16, no. 7, 2552, 2023, <https://doi.org/10.3390/ma16072552>.
- [8] A. Dinesh, and D. Suji, “Electro-mechanical investigations of steel fiber reinforced self-sensing cement composite and their implications for real-time structural health monitoring,” *Journal of Building Engineering*, vol. 51, 104343, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104343>.
- [9] S. Elkatatny, R. Gajbhiye, A. Ahmed, and A. A. Mahmoud, “Enhancing the cement quality using polypropylene fiber,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, pp. 1097-1107, 2020, <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00804-4>.
- [10] L. Rovero, S. Galassi, and G. Misseri, “Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 194, 108051, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108051>.
- [11] A. E. Naaman, “Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites,” *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, no. 3, pp. 241-252, 2003, <https://doi.org/10.3151/jact.1.241>.
- [12] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, M. Fahmi, and S. İpek, “Mechanical and fracture properties of carbon fiber reinforced self-compacting concrete composites,” In 10th International Conference on Composite Science and Technology, pp. 1-12, Portugal: Lisboa, 2015.
- [13] H. Yang, H. Cui, W. Tang, Z. Li, N. Han, and F. Xing, “A critical review on research progress of graphene/cement based composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 102, pp. 273-296, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.07.019>.
- [14] Y. Lin, and H. Du, “Graphene reinforced cement composites: A review,” *Construction and Building Materials*, 265, 120312, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312>.
- [15] H. Du, and S. Dai Pang, “High performance cement composites with colloidal nano-silica,” *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 317-325, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.045>.
- [16] B. Han, S. Sun, S. Ding, L. Zhang, X. Yu, and J. Ou, “Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 70, pp. 69-81, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.12.002>.
- بیشترین مدول الاستیک زمانی حاصل می‌شود که میکروالیاف فولادی در کامپوزیت پایه سیمانی حاوی نانوذرات گرافن همراستا شده باشند.
  - با توجه به ارتباط بین ریزساختارهای موجود و رفتار کششی کامپوزیت پایه سیمانی حاوی میکروالیاف فولادی و نانوغرافن، امکان تنظیم اجزای سازنده برای دستیابی به عملکرد مکانیکی هدفمند فراهم خواهد شد.
- ### مراجع
- [1] D. Lilargem Rocha, L. U. D. Tambara Júnior, M. T. Marvila, E. C. Pereira, D. Souza, and A. R. G. de Azevedo, “A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history,” *Polymers*, vol. 14, no. 10, 2043, 2022, <https://doi.org/10.3390/polym14102043>.
- [2] X. Li, D. Qin, Y. Hu, W. Ahmad, A. Ahmad, F. Aslam, and P. Joyklad, “A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications,” *Journal of Building Engineering*, vol. 45, 103447, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103447>.
- [3] T. A. Fode, Y. A. C. Jande, and T. Kivevele, “Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite—Comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 9, no. 7, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17924>.
- [4] S. Abdallah, M. Fan, and D. W. Rees, “Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: Overview,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 3, 04018001, 2018, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000215).
- [5] A. A. Abdul-Razzak, and A. A. M. Ali, “Influence of cracked concrete models on the nonlinear analysis of high strength steel fibre reinforced concrete corbels,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 9, pp. 2277-2287, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.016>.
- [6] Y. Ding, F. Zhang, F. Torgal, and Y. Zhang, “Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2440-2449, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.02.025>.
- [7] Y. Hao, C. Shi, Z. Bi, Z. Lai, A. She, and W. Yao, “Recent advances in properties and applications of carbon fiber-reinforced smart cement-based

- Composites*, vol. 82, pp. 165-175, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.004>.
- [26] S. Jiang, D. Zhou, L. Zhang, J. Ouyang, X. Yu, X. Cui, and B. Han, "Comparison of compressive strength and electrical resistivity of cementitious composites with different nano-and micro-fillers," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 60-68, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.05.010>.
- [27] H. Cui, Z. Jin, D. Zheng, W. Tang, Y. Li, Y. Yun, T. Yiu Loand, F. Xing, "Effect of carbon fibers grafted with carbon nanotubes on mechanical properties of cement-based composites," *Construction and building materials*, vol. 181, pp. 713-720, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.049>.
- [28] J. Chen, D. Zhao, H. Ge, and J. Wang, "Graphene oxide-deposited carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application," *Construction and Building materials*, vol. 84, pp. 66-72, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.050>.
- [29] Z. S. Chen, X. Zhou, X. Wang, and P. P. Guo, "Mechanical behavior of multilayer GO carbon-fiber cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 205-212, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.094>.
- [30] S. Wu, T. Qureshi, and G. Wang, "Application of graphene in fiber-reinforced cementitious composites: A review," *Energies*, vol. 14, no. 15, 4614, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14154614>.
- [31] Z. Lu, J. Yu, J. Yao, and D. Hou, "Experimental and molecular modeling of polyethylene fiber/cement interface strengthened by graphene oxide," *Cement and Concrete Composites*, vol. 112, 103676, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103676>.
- [32] Z. Lu, A. Hanif, G. Sun, R. Liang, P. Parthasarathy, and Z. Li, "Highly dispersed graphene oxide electrodeposited carbon fiber reinforced cement-based materials with enhanced mechanical properties," *Cement and Concrete Composites*, vol. 87, pp. 220-228, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.006>.
- [33] X. Liu, G. Wang, R. Liu, K. Lyu, J. Zuo, and S. P. Shah, "Stress-sensitivity of carbon nanotube-grafted-carbon fiber incorporated cement-based composites," *Journal of Building Engineering*, vol. 64, 105589, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105589>.
- [34] F. Zhou, G. Pan, and L. Zhang, "Enhancing the shrinkage resistance and impermeability of cement-based materials using carbon fiber modified by in situ-grown nano-SiO<sub>2</sub> and carbon nanotubes,"
- [17] S. Chuah, Z. Pan, J. G. Sanjayan, C. M. Wang, and W. H. Duan, "Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide," *Construction and Building materials*, vol. 73, pp. 113-124, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>.
- [18] G. Goncalves, P. A. Marques, C. M. Granadeiro, H. I. Nogueira, M. K. Singh, and J. Gracio, "Surface modification of graphene nanosheets with gold nanoparticles: the role of oxygen moieties at graphene surface on gold nucleation and growth," *Chemistry of Materials*, vol. 21, no. 20, pp. 4796-4802, 2009, <https://doi.org/10.1021/cm901052s>.
- [19] L. Lu, and D. Ouyang, "Properties of cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets," *Nanomaterials*, vol. 7, no. 7, 187, 2017, <https://doi.org/10.3390/nano7070187>.
- [20] A. Gholampour, M. Valizadeh Kiamahalleh, D. N. Tran, T. Ozbakkaloglu, and D. Losic, "From graphene oxide to reduced graphene oxide: impact on the physiochemical and mechanical properties of graphene-cement composites," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 49, pp. 43275-43286, 2017, <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16736>.
- [21] D. Hou, Z. Lu, X. Li, H. Ma, Z. Li, "Reactive molecular dynamics and experimental study of graphene-cement composites: Structure, dynamics and reinforcement mechanisms," *Carbon*, vol. 115, pp. 188-208, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.013>.
- [22] Z. Pan, L. He, L. Qiu, A. H. Korayem, G. Li, J. W. Zhu, ... and M. C. Wang, "Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite," *Cement and Concrete Composites*, vol. 58, pp. 140-147, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>.
- [23] T. S. Qureshi, and D. K. Panesar, "Impact of graphene oxide and highly reduced graphene oxide on cement based composites," *Construction and Building Materials*, vol. 206, pp. 71-83, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.176>.
- [24] B. S. Sindu, and S. Sasmal, "On the development and studies of nano-and micro-fiber hybridized strain hardened cementitious composite," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 348-359, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.11.008>.
- [25] G. M. Kim, S. M. Park, G. U. Ryu, and H. K. Lee, "Electrical characteristics of hierarchical conductive pathways in cementitious composites incorporating CNT and carbon fiber," *Cement and Concrete*

- Materials*, vol. 129, pp. 63-79, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.11.003>.
- [43] R. Pouyanmehr, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and R. Ansari, "Effect of graphene nanosheet dispersion on diffusion-induced stresses in layered sn-based nanocomposite electrode for lithium-ion batteries," *Mechanics of Materials*, vol. 145, pp. 103390, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103390>.
- [44] X. Y. Ji, Y. P. Cao, and X. Q. Feng, "Micromechanics prediction of the effective elastic moduli of graphene sheet-reinforced polymer nanocomposites," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 045005, 2010, DOI 10.1088/0965-0393/18/4/045005.
- [45] Y. Suo, R. Guo, H. Xia, Y. Yang, B. Zhou, and Z. Zhao, "A review of graphene oxide/cement composites: Performance, functionality, mechanisms, and prospects," *Journal of Building Engineering*, vol. 53, pp. 104502, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104502>.
- [46] S. Bai, L. Jiang, N. Xu, M. Jin, and S. Jiang, "Enhancement of mechanical and electrical properties of graphene/cement composite due to improved dispersion of graphene by addition of silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 164, pp. 433-441, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.176>.
- [47] M. Krystek, D. Pakulski, V. Patroniak, M. Górski, L. Szojda, A. Ciesielski, and P. Samorì, "High-performance graphene-based cementitious composites," *Advanced Science*, vol. 6, no. 9, pp. 1801195, 2019, <https://doi.org/10.1002/advs.201801195>.
- [48] M. K. Hassanzadeh-Aghdam, "Evaluating the effective creep properties of graphene-reinforced polymer nanocomposites by a homogenization approach," *Composites Science and Technology*, vol. 209, pp. 108791, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108791>.
- [49] T. Mori, and K. Tanaka, "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions," *Acta metallurgica*, vol. 21, no. 5, pp. 571-574, 1973, [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3).
- [50] M. Safi, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and M. J. Mahmoodei, "Effects of nano-sized ceramic particles on the coefficients of thermal expansion of short SiC fiber-aluminum hybrid composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 803, pp. 554-564, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.314>.
- Journal of Building Engineering*, vol. 63, pp. 105542, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105542>.
- [35] X. Ou, G. Ye, J. Jiang, J. Gong, and Z. He, "Improving electrical and mechanical properties of cement composites by combined addition of carbon black and carbon nanotubes and steel fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 438, pp. 136931, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136931>.
- [36] V. Rheinheimer, Y. Wu, T. Wu, K. Celik, J. Wang, L. De Lorenzis, ... and P. J. Monteiro, "Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres," *Cement and Concrete Composites*, vol. 80, pp. 91-103, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.002>.
- [37] S. H. Jang, D. P. Hochstein, S. Kawashima, and H. Yin, "Experiments and micromechanical modeling of electrical conductivity of carbon nanotube/cement composites with moisture," *Cement and Concrete Composites*, vol. 77, pp. 49-59, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.003>.
- [38] E. García-Macías, A. D'Alessandro, R. Castro-Triguero, D. Pérez-Mira, and F. Ubertini, "Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 108, pp. 451-469, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.025>.
- [39] J. Li, , Qiu, J. Weng, and E. H. Yang, "Micromechanics of engineered cementitious composites (ECC): A critical review and new insights," *Construction and Building Materials*, vol. 362, pp. 129765, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129765>.
- [40] M. K. Hassanzadeh-Aghdam, R. Ansari, and M. J. Mahmoodei, A. Darvizeh, and A. Hajati-Modarai, "A comprehensive study on thermal conductivities of wavy carbon nanotube-reinforced cementitious nanocomposites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 90, pp. 108-118, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.021>.
- [41] M. Safi, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and M. J. Mahmoodei, "Elastic properties of cement-based composites reinforced by nano-tailored hybrid fiber," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 26, pp. 5232-5246, 2022, <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1952359>.
- [42] M. Hasanzadeh, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, "Evaluation of effective properties of piezoelectric hybrid composites containing carbon nanotubes," *Mechanics of*

reinforced concrete using a dedicated empirical formula,” *Computational materials science*, vol. 31, no. 3-4, pp. 337-346, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2004.04.003>.

[51] Y. Zhao, Y. Liu, T. Shi, Y. Gu, B. Zheng, K. Zhang, ... and S. Shi, “Study of mechanical properties and early-stage deformation properties of graphene-modified cement-based materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 257, 119498, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119498>.

[52] T. L. Teng, Y. A. Chu, F. A. Chang, and H. S. Chin, “Calculating the elastic moduli of steel-fiber

## پیکربندی یک مدل زیست-گرمایی دست انسان با اتکا به هندسه واقعی مبتنی بر تصاویر پزشکی

**چکیده:** دست انسان به دلیل ساختار پیچیده، تفاوت در ترکیب بافتی بخش های مختلف مانند انگشتان، و نقش حیاتی در تنظیم دما و خون رسانی، ویژگی های منحصر به فردی در انتقال حرارت دارد. مدل های مرسوم تنظیم دمای بدن عمدتاً ترمودینامیکی و صفربعدی بوده اند و از توصیف دقیق توزیع مکانی دما، به ویژه در اندام هایی مانند دست، ناتوان بوده اند؛ در نتیجه، معمولاً بین دمای محاسبه شده و مقدار واقعی پوست اختلاف زیادی مشاهده می شود. در این پژوهش، یک مدل سه بعدی دقیق و واقعی از دست انسان با بهره گیری از تصاویر پزشکی و اطلاعات ساختاری بافت های مختلف توسعه داده شده است. جریان هوا در اطراف دست به صورت ناپایا، آشفته و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده و مدل سازی با استفاده از معادلات ناویر-استوکس و روش میانگین گیری رینولدز انجام شده است. نتایج حاصل از مدل، حداکثر میانگین خطای مطلق ۳/۸ درصد با داده های تجربی دارد که نشان دهنده دقت مطلوب آن است. در شرایط محیطی با دمای ۱۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان ۰/۴ متر بر ثانیه، دمای پوست دست به صورت غیر یکنواخت توزیع شده و دمای کمینه، متوسط و بیشینه به ترتیب برابر با ۱۰/۶۴، ۱/۶۹ و ۲۰/۲۱ درجه سلسیوس می باشد. کمترین دما در انگشت کوچک ثبت شده که مناسب ترین ناحیه برای بررسی شرایط بحرانی تنش گرمایی است.

**واژه های راهنما:** دست، انگشت، توزیع دما، مدل زیست-گرمایی، هندسه واقعی

محمد رئیسی

دانشجوی دکتری

حسن حسن زاده\*

دانشیار

سید علیرضا ذوالفقاری

استاد،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشکده مهندسی،

دانشگاه بیرجند، بیرجند

امیر امیدوار

دانشیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

Mohammad Raeisi  
PhD Student

Hassan Hassanzadeh\*  
Associate Professor

Seyed Alireza  
Zolfaghari  
Professor,  
Department of Mechanical  
Engineering, Faculty of  
Engineering,  
Birjand University,  
Birjand

Amir Omidvar  
Associate Professor,  
Faculty of Engineering,  
Shiraz University of  
Technology, Shiraz

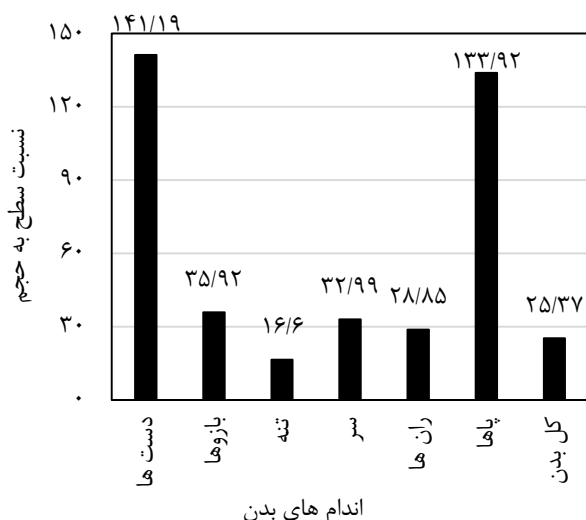
## Configuration of a bio-heat model for human hand with realistic geometry based on medical images

**Abstract:** The human hand, due to its complex structure, varying tissue composition across different regions such as the fingers, and its crucial role in thermoregulation and blood circulation, exhibits unique characteristics in heat transfer. Conventional thermoregulatory models are zero-dimensional and do not provide spatial temperature distribution for body segments and causes the estimated skin temperature to differ greatly from reality. In this study, a detailed and realistic three-dimensional model of the human hand was developed using medical imaging data and anatomically accurate tissue structures. The airflow around the hand was assumed to be unsteady, turbulent, and incompressible, and was modeled using the Navier–Stokes equations with Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) approach. The modeling results showed a maximum mean absolute error of 3.8% compared to experimental data, indicating a high level of accuracy. Under environmental conditions of 10 °C air temperature and 0.4 m/s airflow velocity, the skin temperature distribution was found to be non-uniform. The minimum, average and maximum skin temperatures were 1.69 °C, 10.64 °C, and 20.21 °C, respectively. The lowest temperature consistently occurred in the fingers, with the little finger exhibiting the coldest values. Therefore, the little finger is identified as the most appropriate site for evaluating critical conditions related to cold stress.

**Keywords:** Hand, Finger, Temperature distribution, Bio-heat model, Realistic geometer

## ۱- مقدمه

کرده و با افزایش جابجایی، نرخ انتقال حرارت به یا از محیط اطراف را افزایش دهد. این امر در ادامه سبب کاهش سریع دمای دست و پا به ویژه انگشتان می‌شود.



شکل ۱ نسبت سطح به حجم بخش‌های مختلف بدن [۱]

همچنین مطابق جدول (۱)، نرخ متابولیک پایه در مرکز و پوست دست و پا نسبت به سایر اعضای بدن کمتر است [۲]. از دیگر تفاوت‌های موجود در دست و پا نسبت به سایر اعضا، باید به سازوکار خون‌رسانی متفاوت در این بخش‌ها به دلیل وجود هم‌پیوندی سرخرگی-سیاهرگی<sup>۳</sup> اشاره کرد. پوست این اندام‌ها بدون مو است و در اکثر مواقع نیز بدون هیچ گونه پوشش (به ویژه دست‌ها) می‌باشند. این عدم پوشش به ویژه در شرایط حاد دمایی باعث شده است که این بخش‌ها شرایط حرارتی متفاوتی در مقایسه با دیگر بخش‌های بدن داشته باشند.

در اکثر اوقات دست‌ها در مقایسه با پاها، فاقد پوشش بوده و این امر موجب آسیب‌پذیری بیشتر دست‌ها و به خصوص انگشتان در هنگام مواجهه با سرما می‌شوند. دست‌ها بویژه انگشتان به دلیل داشتن ویژگی‌های ظاهری منحصر به فردشان از نسبت سطح به حجم بالا برخوردارند. از دیگر ویژگی‌های زیستی دست باید به درصد بافت‌های تشکیل دهنده آن اشاره کرد. بافت ماهیچه‌ای بدن تقریباً ۴۴٪ وزن کل بدن را تشکیل می‌دهند در حالی که این نسبت در دست‌ها حدود ۱۱٪ از وزن کل دست را شامل می‌شود [۳]. در مقایسه با سایر بخش‌های بدن، دست‌ها لایه‌های نازک‌تری از پوست، چربی و ماهیچه دارا بوده و این کاهش ضخامت لایه‌ها، به خصوص ماهیچه، به طور قابل توجهی حرارت تولیدی دست را کاهش می‌دهد.

بدن انسان همواره قادر است از طریق سازوکارهای فیزیولوژیکی، دمای مرکز (اندام‌های حیاتی) خود را در محدوده ۳۶-۳۸ درجه سلسیوس ثابت نگه دارد. جهت حفظ دمای بدن در شرایط طبیعی، لازم است گرمای تولید شده ناشی از سوخت و ساز بدن با گرمای انتقال یافته از طریق گردش خون و هدایت حرارتی به سطح پوست با انتقال گرما به محیط اطراف موازنه شوند. هنگامی که بدن از محدوده آسایش خارج شده و از نظر حرارتی وضعیت نامطلوبی دارد، فرآیندهای فیزیولوژیکی (به عنوان پاسخ طبیعی بدن به شرایط نامساعد) فعال شده و منجر به سازگاری بدن با شرایط به وجود آمده می‌شود. از جمله فرآیندهای فیزیولوژیکی بدن می‌توان به کاهش میزان انتقال خون به اندام‌های انتهایی<sup>۱</sup> مانند دست و پا در هنگام مواجهه با یک محیط سرد اشاره کرد. از دیگر روش‌های جلوگیری از اتلاف حرارت بدن، محافظت بخش‌های مختلف بدن بوسیله پوشش است. زیرا افزایش مقاومت حرارتی ناشی از پوشش، نقش بسزایی در کاهش میزان اتلاف حرارت از سطح بدن دارد. در این میان قسمت‌های خاصی از بدن، مانند دست‌ها، پاها، صورت و گوش‌ها (با توجه به کارایی این بخش‌ها در انجام فعالیت‌های روزمره انسان) که در اکثر اوقات فاقد پوشش هستند بیشتر از سایر بخش‌های بدن در معرض سرما و گرما قرار دارند. از این رو جهت پیش‌بینی پاسخ حرارتی و زیستی بدن، به خصوص در شرایط حاد دمایی، لازم است تا انسان بتواند وسایل و یا روش‌های حفاظتی بخصوص در اندام‌های انتهایی بدن مانند دست و پا را اتخاذ نماید.

همواره محیط‌های سرد، تهدید قابل توجهی برای آسایش، کارایی و ایمنی بدن انسان محسوب می‌شوند. از این رو پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های فیزیولوژیکی بدن در هنگام قرار گرفتن در معرض سرمای شدید، ضروری است تا فرد بتواند استراتژی‌های حفاظت شخصی مناسبی را برای جلوگیری از خطر استرس سرما و آسیب‌های شغلی ناشی از بی‌حسی، ضعف عضلانی و... اتخاذ نماید. در این میان باید به بخش‌های دور از مرکز بدن همانند دست و پا به عنوان بخش‌های خاص اشاره کرد. مطابق شکل (۱)، نسبت سطح به حجم که نشان‌دهنده پتانسیل تولید و دفع حرارت در بدن است، در دست و پا برابر بیشتر از سایر بخش‌های بدن است [۱]. این موضوع باعث می‌شود که این بخش‌ها مانند یک سطح گسترش یافته<sup>۲</sup> عمل

<sup>3</sup> Arterio-Venous Anastomoses (AVA)

<sup>1</sup> Extremities

<sup>2</sup> Fin

جدول ۱ نرخ متابولیک پایه مرکز و پوست در اعضای مختلف بدن [۲]

عضو	نرخ متابولیک پایه مرکز بدن (وات)	نرخ متابولیک پایه پوست (وات)
سر	۱۸/۴۳	۰/۲۱
سینه	۵/۹۵	۰/۶
لگن	۴۶/۸۹	۰/۶
بالای بازو	۱/۰۶	۰/۱۸
ساعد	۰/۵۹	۰/۱
دست	۰/۰۹	۰/۰۹
ران	۱/۷	۰/۳۴
ساق	۰/۷۵	۰/۱۵
پا	۰/۱۴	۰/۱۲

همچنین علیرغم اهمیت لرزش برای تولید گرما در پاسخ بدن انسان به سرما، سهم آن در دست‌ها به دلیل داشتن بافت ماهیچه‌ای بسیار کمتر، محدود بوده و از این رو دست‌ها در برابر سرمای شدید به شدت آسیب‌پذیرند.

گردش خون نقشی اساسی در کنترل پاسخ حرارتی اندام‌های مختلف بدن ایفا می‌کند. تفاوت در میزان گردش خون اهمیت زیادی در انتقال حرارت بدن به خصوص در دست‌ها دارد. گردش خون در دست‌ها و انگشتان با توجه به وجود هم‌پیوندی سرخرگی-سیاهرگی در مقایسه با سایر بخش‌های بدن از اهمیت بسزایی برخوردار است. کاهش جریان خون در هنگام مواجهه با سرما، به ویژه در دست‌ها و انگشتان، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه دمای موضعی پوست شده و دست‌ها و انگشتان را مستعد آسیب‌های سرمای می‌کند. از این رو دست از آسیب‌پذیرترین اعضای بدن در هنگام قرارگیری در شرایط محیطی سرد می‌باشد. با این وجود، دانش ما از انتقال حرارت دست و تنظیم حرارت این بخش نسبتاً محدود بوده و این موضوع ارزیابی دقیق پاسخ‌های حرارتی دست را دشوار می‌کند. یکی از روش‌های پر کاربرد در مطالعه انتقال حرارت زیستی بدن، روش آزمایشگاهی است اما استفاده از این روش مستلزم ایجاد فضای گسترده کنترل شده، تهیه ابزار دقیق داده‌برداری، حضور داوطلب و تکرار مناسب آزمایش می‌باشد. در این روش، علاوه بر صرف وقت و هزینه بالا، فرد در شرایط محیطی حاد و تحت

تأثیر تنش سرمایی واقع شده که احتمال بروز مشکلاتی از قبیل درد و سوزش را به همراه خواهد داشت. از این رو بهتر است از روش‌های عددی به عنوان راهکاری جایگزین، برای ارزیابی شرایط حرارتی بدن استفاده شود. مدل‌سازی ریاضی تنظیم حرارت بدن<sup>۱</sup> از جمله روش‌های موثر و ارزشمند در تخمین پاسخ حرارتی و عملکرد سیستم تنظیم حرارت بدن در محیط‌های گوناگون می‌باشند.

مدل‌سازی ریاضی زیست‌گرمایی<sup>۲</sup> بدن، روشی ارزشمند و مؤثر برای ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و تنظیم حرارت بدن در شرایط مختلف محیطی است و در مدل‌های اولیه، بدن انسان به صورت یک استوانه یکنواخت فرض شده است. در ادامه گگی [۴] مدلی ساده و دو لایه جهت ارزیابی آسایش حرارتی بدن انسان در شرایط محیطی یکنواخت ارائه کرد. مدل چند بخشی و چند لایه‌ای استولویچک را باید نقطه عطفی در توسعه مدل‌ها دانست چرا که اولین مدل چند بخشی و چند لایه‌ای از بدن انسان است. در چند دهه اخیر مدل‌های حرارتی چندبخشی دیگری براساس مدل استولویچک [۵] توسعه یافته است که می‌توان به مدل‌های فیالا و همکاران [۶]، تانابه و همکاران [۷]، یانگ و همکاران [۹]، سالوم و همکاران [۲]، ژائو و همکاران [۱۰] و لای و همکاران [۱۱] اشاره کرد. از معایب این مدل‌ها این است که دارای رویکردی توده‌ای<sup>۳</sup> بوده و بخش‌ها و لایه‌بندی مختلف بدن به صورت یک گره فرض شده‌اند که به اندازه کافی برای پیش‌بینی پاسخ حرارتی بدن دقیق نمی‌باشند. دسته دیگر از مدل‌ها، مدل‌هایی با رویکرد توزیعی هستند که به مدل‌های زیست-گرمایی معروفند. در این نوع مدل، بدن به لایه‌های مختلف تقسیم و هر لایه با خواص معین، دارای توزیع مکانی دما است. در این مدل‌ها برای محاسبه توزیع دما در داخل بافت بدن از معادلات زیست-گرمایی مانند معادله معروف پنس [۱۲] استفاده می‌شود که در اواسط قرن بیستم و بر پایه تحلیل تجربی از ساعد انسان ارائه شده است. بعد از آن مدل‌های زیست-گرمایی دیگری ارائه شد که می‌توان به مدل STB ذوالفقاری و معرفت [۱۳]، معلمی و همکاران [۱۴] و افضلیان و ذوالفقاری [۱۵] اشاره کرد.

بیشتر مدل‌های ریاضی اولیه بر پاسخ‌های حرارتی کل بدن متمرکز بوده و با گذشت زمان این مدل‌های تنظیم حرارت بدن به‌طور فزاینده‌ای دقیق‌تر و پیچیده‌تر شده‌اند. در مدل‌های اولیه، دست به‌عنوان یک استوانه همگن در نظر گرفته شده و تبادل حرارتی آن توسط جریان خون و بدون در نظر گرفتن هرگونه

<sup>3</sup> Lumped<sup>1</sup> Thermoregulation model<sup>2</sup> Bioheat model

منحصر به فرد خود می‌باشند. در این مدل مانند مدل قبلی، حداقل دمای قابل تحمل در انگشت برابر با ۵ درجه سلسیوس فرض شده است و انگشت در چهار حالت به صورت بدون پوشش و با پوشش و در معرض جریان باد با سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت و دمای ثابت صفر درجه سلسیوس بررسی شده است. در ادامه لی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۹ با ارائه دو مدل توده‌ای و دو بعدی از انگشت دست به مطالعه تغییرات دمایی در هنگام انسداد شریان و خون‌رسانی مجدد پرداختند. این مدل شامل بخش مرکزی استخوان است که توسط سه لایه بافت ماهیچه، چربی و پوست احاطه شده است. در این مدل، هریک از این لایه‌ها دارای ضخامتی ثابت و خواص حرارتی- فیزیکی همسانگرد و مستقل از دما فرض شده‌اند. در سال ۲۰۱۳، ماندا و همکاران [۱۹] انگشت را به صورت دو استوانه هم مرکز و یک نیم‌کره در قسمت انتهایی بعنوان نوک انگشت شبیه سازی کرده و فرآیند سرمازدگی در آن را بررسی کردند. در این مدل فرض شده است که انگشت دارای بخش مرکزی استخوان بوده که توسط پوست احاطه شده است. فلاحی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از آناتومی انگشتان دست، شبیه‌سازی حرارتی انگشت دست را با هندسه واقعیتر انجام دادند. در این تحقیق انگشت بصورت دو استوانه هم مرکز شامل استخوان و بافت نرم به طول ۶۵ میلی‌متر و قطر ۱۷/۸ میلی‌متر به همراه یک نیم‌کره در قسمت انتهایی آن به عنوان نوک انگشت و نرخ گردش خون در انگشت دست در این تحقیق برابر با مقدار ثابت ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب در ساعت در نظر گرفته شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، در مدل‌های پیشین، دست معمولاً به صورت یک استوانه و یا دو استوانه هم مرکز مدلسازی شده است که بخش داخلی آن نشان دهنده استخوان و بخش بیرونی آن نشان دهنده بافت نرم (ماهیچه، چربی و پوست) می‌باشد. در بعضی از مدل‌سازها دست بصورت چهار لایه هم مرکز که نشان دهنده لایه‌های جداگانه استخوان، ماهیچه، چربی و پوست هستند تشکیل شده است در حالی که هندسه کف دست و پشت آن به‌طور قابل توجهی با استوانه متفاوت است. مدل‌سازی دست بدون در نظر گرفتن تفاوت‌های ساختاری و زیستی در انگشتان دست و کف دست و پشت آن باعث می‌شود تا دمای محاسبه شده برای پوست تفاوت قابل ملاحظه‌ای با مقادیر تجربی داشته باشد [۲۱].

ژانگ و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر پزشکی و ارائه مدلی سه بعدی، به مطالعه زیست گرمایی دست پرداختند. مدل دست ارائه شده در این تحقیق از بخش درونی استخوان و بخش بیرونی بافت نرم شامل بافت ماهیچه، چربی و

رفتار تطبیقی مدل‌سازی می‌شد. با تکامل مدل‌ها، دست به یک استوانه چند لایه در نظر گرفته شده و ویژگی‌های حرارتی مختلف استخوان و سایر بافت‌های دست و انتقال حرارت همرفتی خون در این مدل‌ها مورد توجه قرار گرفت. با این وجود، در اکثر مدل‌های چند بخشی تنظیم حرارت بدن، دست‌ها و انگشتان بسیار ساده مدل‌سازی شده‌اند. این رویکرد ساده منجر به درک ناقص ما از ویژگی‌های انتقال حرارت دست و نقش مهم آن در تنظیم حرارت بدن شده است، بخصوص هنگامی که صحبت از تفاوت دمایی بین انگشتان دست و کف دست یا بین نوک انگشتان و ریشه‌ها می‌باشد. از این رو، مدل‌سازی زیست- گرمایی دست، می‌تواند روشی کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و ایمن برای بررسی پاسخ‌های حرارتی دست تحت شرایط محیطی مختلف باشد. هدف این مقاله، پیکربندی یک مدل زیست- گرمایی از دست انسان با هندسه واقعی و لایه‌بندی دقیق بافت‌ها به همراه خواص فیزیکی و زیستی هر لایه می‌باشد که جهت پیش‌بینی انتقال حرارت و پاسخ حرارتی دست در شرایط مختلف محیطی است.

## ۱-۲- مروری بر کارهای گذشته

همان‌طور که اشاره شد، دست و انگشتان از ساختار ویژه‌ای جهت انتقال حرارت برخوردارند. در مدل‌های کل‌نگر، دست را با انگشتان با همان ویژگی‌های بخش‌های دیگر به شکل استوانه مدلسازی می‌شده‌اند. با توجه به ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل‌های پیشین، دانش ما از ویژگی‌های انتقال حرارت در بخش‌های مختلف دست و فرآیند تنظیم حرارت آن دقیق نیست، لذا لازم است با ارائه یک مدل با جزئیات بیشتر، پیش‌بینی حرارتی دقیق‌تری از بخش‌های مختلف دست بدست آورد. در گذشته، مدل‌های مختلفی در مورد مدلسازی دست و انگشتان ارائه شده است که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره می‌شوند.

در همین راستا، شیتزر و همکاران [۱۶] در سال ۱۹۹۱ با ارائه یک مدل یک بعدی به مطالعه انگشت انسان در شرایط تنش سرمایی پرداختند. در این تحقیق با شبیه‌سازی انگشت به صورت یک استوانه، به بررسی تأثیر این دو پارامتر به همراه دمای محیط و پوشش پرداختند. در ادامه تحقیق پیشین، در سال ۱۹۹۷، شیتزر و همکاران [۱۷]، مدل یک بعدی خود را به یک مدل دو بعدی توسعه دادند. در این مدل و بر خلاف مدل قبلی، انگشت بصورت استوانه‌ای متشکل از چهار لایه مرکز، ماهیچه، بافت چربی و پوست فرض شده است که هر لایه دارای خواص

- توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد شامل تفاوت ظاهری و ساختاری بخش‌های مختلف دست، بویژه انگشتان بر اساس آناتومی کاملاً واقعی.
- لایه‌بندی دقیق‌تر بافت‌های تشکیل‌دهنده دست در مدل حاضر با توجه به درصد حجمی متفاوت بخش‌های مختلف بویژه انگشتان.
- توجه به ساختار ویژه عروق خون‌رسانی و تفاوت زیاد نرخ گردش خون با توجه به شرایط محیطی درون پیوندهای سرخ‌رگی-سیاهرگی که در راستای کاهش میزات اتلاف حرارت بدن، کاهش می‌یابد.
- بیان توزیع دمایی در تمامی نقاط دست انسان با توجه به شبیه‌سازی سه بعدی این بخش با هندسه کاملاً واقعی (علیرغم بیان یک دما بعنوان نماینده دمای دست انسان توسط مدل‌های تنظیم حرارت حاضر بدن با توجه به صفر بعدی بودن این مدل‌ها).
- بررسی انتقال حرارت زیستی حاکم در هنگام مواجهه با تنش‌های حرارتی بویژه در بخش‌های بحرانی مانند انگشتان در شرایط شدید دمایی محیط (مدل‌های پیشین از خود پاسخ مناسبی را نشان نداده و نمی‌توان از آن‌ها در استفاده کرد).

## ۲- روش تحقیق

با پیشرفت روش‌های تصویربرداری، محققان همواره سعی داشته تا در راستای ارتقاء مدل‌های پیشین، با بکارگیری از این روش‌ها، مدل‌های سه بعدی با آناتومی کاملاً واقعی ارائه نمایند [۲۲، ۲۵-۲۹]. در این میان تصویربرداری تشدید مغناطیسی<sup>۲</sup> یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های تصویربرداری در علم پزشکی است. در این روش از امواج بی‌خطر رادیویی و مغناطیسی و بدون نیاز به تابش اشعه ایکس، تصاویری با وضوح بالا از بافت‌های مختلف بدن تهیه می‌شود. در مطالعه حاضر از تصاویر بدست آمده توسط عکس‌برداری پزشکی، جهت ارائه یک مدل کامل مبتنی بر هندسه واقعی و متشکل از تمامی بخش‌های دست از قبیل انگشتان، کف و پشت دست، ساعد با توجه به ساختار بافت در هر بخش استفاده می‌شود. در تصویربرداری تشدید مغناطیسی از یک بخش بدن، تصاویر متعددی در برش‌های مختلف از آن بخش تهیه می‌گردد. تصاویر پزشکی بکار رفته در تحقیق حاضر متشکل از ۱۱۱۳ برش با ابعاد پیکسلی ۰/۹۷ میلی‌متر در هر برش می‌باشد. در شکل (۲) نمونه

پوست تشکیل شده است. در این تحقیق برای مدل‌سازی سه بعدی دست با اندازه و هندسه واقعی همراه با جزئیات فیزیولوژیکی اجزاء، شامل انگشتان، ساعد، کف و پشت دست، از تصاویر پزشکی استفاده شده است. در این مدل، انتقال حرارت ناشی از متابولیک، خون‌رسانی و انتقال حرارت ناشی از هدایت میان لایه‌ها در هر بخش در نظر گرفته شده است. خواص ترموفیزیکی و فیزیولوژیکی بخش بافت نرم با میانگین گیری وزنی - حجمی<sup>۱</sup> از خواص هر بخش (ماهیچه، چربی و پوست) محاسبه شده است. یانگ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۲ با ارائه یک مدل عددی ۷ بخشی از دست انسان به پیش‌بینی دمای پوست دست از جمله انگشتان، کف و پشت دست در شرایط شدید سرمایی پرداختند. بخش‌های دست در مدل ارائه شده شامل پنج انگشت، کف و پشت دست می‌باشد که هر بخش از چهار گره بعنوان لایه‌های تشکیل‌دهنده (مرکز، ماهیچه، چربی و پوست) تشکیل شده است. همچنین در این مدل یک گره خونی مرکزی وجود داشته که از طریق جریان خون، گرما را با بخش‌های دیگر از طریق همرفت تبادل می‌نماید. این مدل حرارتی دستی در مجموع دارای ۲۹ گره می‌باشد. در مدل ارائه شده با توجه به نگرش صفر بعدی در نظر گرفته شده، تنها یک دما بعنوان نماینده دمای انگشتان، کف و پشت دست گزارش می‌گردد که ناتوانی مدل عددی را در بیان توزیع غیر یکنواخت دمایی بر روی سطح پوست بخش‌های مختلف دست را بازگو می‌نماید.

در هیچ یک از مدل‌های فوق، دست به صورت کامل همراه با انگشتان شبیه‌سازی نشده است و این امر باعث شده است که تفاوت‌های ابعادی و زیستی موجود در انگشتان به درستی مورد ارزیابی قرار نگیرد. هر چند مدل ژانگ و همکاران [۲۴] با اتکا به تصاویر پزشکی به هندسه واقعی دست نزدیک است، اما خواص ترموفیزیکی و فیزیولوژیکی بافت نرم دست با میانگین گیری وزنی - حجمی از خواص هر بخش (ماهیچه، چربی و پوست)، محاسبه شده است که دقیق نمی‌باشد. از این رو، ارائه یک مدل کامل مبتنی بر هندسه واقعی و متشکل از تمامی بخش‌های دست از قبیل انگشتان، کف و پشت دست، ساعد و بازو و توجه به ساختار بافت در هر بخش و اصلاح مدل گردش خون امری ضروری به شمار می‌آید.

هدف از انجام این پژوهش، پیکربندی یک مدل زیست-گرمایی از دست انسان با توجه به موارد زیر می‌باشد:

<sup>2</sup> Magnetic Resonance Imaging (MRI)

<sup>1</sup> Volume-Weighted average

جدول ۲ مقدار حجمی بافت‌های دست [۳۰]

ردیف	بافت	حجم ( $cm^3$ )
۱	استخوان	۲۰۰
۲	ماهیچه	۲۷۰
۳	چربی	۳۵۰
۴	پوست	۱۸۰

در نهایت مطابق شکل (۳)، مدل سه‌بعدی دست با هندسه واقعی جهت استفاده در نرم‌افزار کامسول<sup>۵</sup> استخراج شده است.

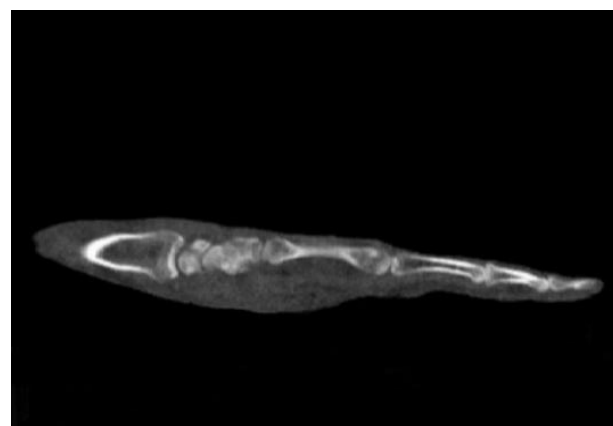
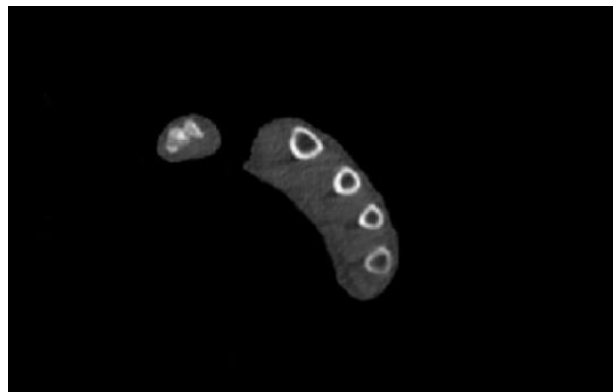


شکل ۳ مدل سه‌بعدی دست انسان با هندسه واقعی

در ادامه جهت تخصیص بافت مرتبط به هر لایه، تعیین خواص حرارتی و زیستی لایه‌ها به نرم‌افزار کامسول انتقال می‌یابد. مقادیر خواص زیست فیزیکی از قبیل چگالی، ظرفیت حرارتی، رسانش گرمایی، نرخ تراوش پایه خون و متابولیک پایه مربوط به هر لایه در جدول (۳) آورده شده است [۳۰]. کمیت مربوط به هر یک خواص زیست فیزیکی بافت‌های دست در جدول علائم و نشانه‌ها آورده شده است.

جهت شبیه‌سازی جریان عبوری از روی دست در سرعت و دماهای متفاوت (با توجه به شرایط محیطی) مدل زیست-گرمایی نهایی، مطابق شکل (۴) دست درون کانالی قرار داده شده است. ابعاد کانال در نظر گرفته شده در این پژوهش، براساس مطالعه ژانگ و همکاران [۲۴] می‌باشد که با توجه به تفاوت جزئی ابعاد نمونه دست بکار رفته در این پژوهش، برابر  $50 * 50 * 100$  سانتی‌متر می‌باشد.

یک برش از تصاویر پزشکی بکار گرفته شده از دست انسان در دو نمای اکسیال<sup>۱</sup> و کرونال<sup>۲</sup> نشان داده شده است. در این تصاویر می‌توان بافت‌های استخوان روشن (سفید رنگ) و سایر بافت‌ها را نیز به رنگ تیره (خاکستری رنگ) مشاهده نمود.



شکل ۲ تصاویر عکس‌برداری تشدید مغناطیسی دست

## ۱-۲- هندسه مدل

در این تحقیق، جهت ارائه یک مدل زیست گرمایی دست با هندسه کاملاً واقعی همراه با جزئیات بافت‌ها، از تصاویر پزشکی استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصاویر پزشکی میمیکس<sup>۳</sup>، اقدام به تعیین و جداسازی بخش‌های استخوان و بافت نرم (ماهیچه، چربی و پوست) نموده تا مدل سه بعدی اولیه دست بدست آید. هنگام جداسازی بافت‌ها و بخش‌های مورد نیاز در نرم‌افزار پردازش تصویر، امکان وقوع خطا به دلیل سطوح ناصاف و حفره در مدل سه‌بعدی وجود دارد که برای اصلاح از نرم‌افزار تری-متیک<sup>۴</sup> استفاده شده است، سپس بافت نرم براساس داده‌های جدول (۲)، لایه‌بندی شده است.

<sup>4</sup> 3-matic

<sup>5</sup> COMSOL

<sup>1</sup> Axial

<sup>2</sup> Coronal

<sup>3</sup> Mimics

استاندارد انتقال حرارت گنجانده و معادله بصورت زیر بیان شده است:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \rho_{bl} c_{bl} \omega (T_b - T) + q_{met} \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی،  $c_p$  ظرفیت گرمای ویژه،  $k$  رسانایی حرارتی،  $\omega$  نرخ تراوش خون،  $T$  دمای بافت،  $T_b$  دمای خون،  $t$  (S) زمان و  $q_{met}$  نرخ حرارت تولید شده توسط متابولیک می‌باشند. در رابطه (۱)، جمله سمت چپ نشان دهنده نرخ ذخیره انرژی حرارتی در بافت بر واحد حجم و جملات سمت راست به ترتیب نشان دهنده هدایت حرارتی در بافت به دلیل گرادیان دما، انتقال حرارت مبادله شده توسط خون و حرارت داخلی تولید شده به دلیل سوخت و ساز بدن بر واحد حجم بافت هستند.

### ۲-۲-۲- نرخ گردش خون

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در معادله زیست گرمایی پنس، نرخ حرارت مبادله شده توسط خون از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q_b = \rho_{bl} c_{bl} \omega (T_b - T) \quad (2)$$

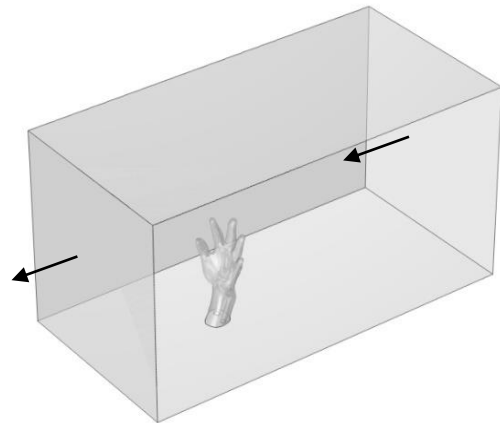
در این رابطه  $Q_b$  نرخ تبادل حرارت بوسیله خون،  $\rho_{bl}$  چگالی خون،  $c_{bl}$  ظرفیت گرمای ویژه خون،  $\omega$  نرخ تراوش خون دریافت،  $T$  دمای بافت و  $T_b$  دمای خون می‌باشند. از جمله ویژگی‌های خاص دست، ساختار ویژه عروق خون‌رسانی و تفاوت زیاد نرخ گردش خون با توجه به شرایط محیطی آن دانست. جریان خون گردش درون دست شامل دو بخش، جریان پایه‌ای خون و مقدار خون درون پیوندهای سرخرگی-سیاهرگی است که می‌تواند در راستای کاهش میزات اتلاف حرارت بدن، کاهش یابد. برای محاسبه نرخ گردش خون از رابطه لوتنز و همکاران [۳۱] استفاده شده است که مطابق رابطه (۳) تابعی از دمای مرکزی بدن  $T_{core}$ ، دمای متوسط پوست کل بدن  $\bar{T}_{skin}$  و دمای موضعی پوست  $T$  می‌باشد.

$$\omega = \omega_{basic} + [1.5((T_{core} - 309.95) + 0.15(\bar{T}_{skin} - 306.15) + 0.2(T - 302.15))]/3000 \quad (3)$$

در رابطه فوق  $\omega_{basic}$  نرخ جریان پایه‌ای خون است که مقدار آن برابر با  $(\frac{1}{5}) \times 10^{-5}$  می‌باشد.

جدول ۳ خواص زیست فیزیکی بافت‌های دست [۳۰]

$Q_b$	$\omega_0$	$k$	$C_p$	$\rho$	
۰/۰۴۵	۰/۰۹۱	۱/۱۶	۱۵۹۰	۱۳۰۰	استخوان
۰/۰۲۲	۰/۰۷۸	۰/۵	۳۷۷۰	۱۰۵۰	ماهیچه
۰/۰۲۳	۰/۰۴۲	۰/۲۰	۲۵۰۰	۸۵۰	چربی
۰/۰۵۰	۰/۹۱۰	۰/۲۱	۳۷۷۰	۱۰۰۰	پوست



شکل ۴ هندسه مدل دست در نرم افزار کامسول

### ۲-۲- معادلات حاکم

بدن انسان همواره با محیط اطراف تبادل حرارت دارد تا دمای بخش مرکزی خود را در محدوده ۳۶-۳۸ درجه سلسیوس حفظ نماید. از جمله عوامل تأثیرگذار بر نرخ انتقال حرارت بدن می‌توان به دمای محیط، سرعت جریان هوا، نرخ حرارت تولید شده به دلیل سوخت و ساز بدن و انتقال حرارت میان بافت‌های مختلف بدن از طریق خون‌رسانی دانست. از این‌رو دامنه حل در مطالعه حاضر متشکل از دو بخش، انتقال حرارت زیستی درون بافت‌های مختلف دست و میدان جریان عبوری بر روی دست می‌باشد.

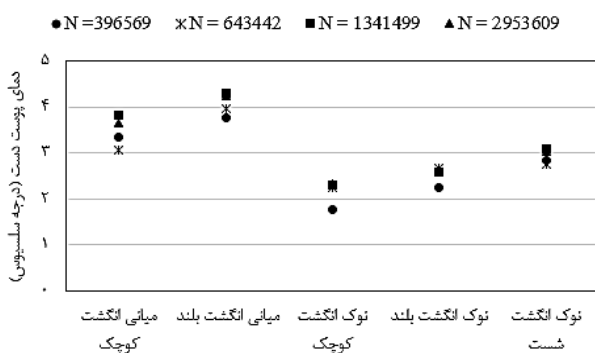
### ۲-۲-۱- معادلات حاکم بر انتقال حرارت زیستی

تاکنون مدل‌های مختلفی برای ارزیابی شرایط حرارتی بافت‌های زنده ارائه شده است، که در این میان مدل زیست گرمایی پنس بیشترین کاربرد را دارد. این مدل، انتقال حرارت زیستی را به روشی ساده توصیف می‌کند و بسیار کارآمد است. مدل پنس [۱۲] در سال ۱۹۴۸ و بر اساس اثر متابولیسم و ریزش خون بر تعادل حرارتی بافت ارائه شد. این دو اثر در معادله

که برابر  $5.67 * 10^{-8} (W/(m^2 \cdot K^4))$  و  $T_{sur}$  نیز دمای محیط اطراف است. به دلیل دمای کم محیط اطراف در این مطالعه از انتقال حرارت از طریق تعرق صرف نظر شده است.

### ۳- شبکه بندی و استقلال از شبکه

برای حل مسئله از یک شبکه بندی غیر سازمان یافته ایجاد در نواحی مختلف مدل بخصوص در هندسه دست و اطراف آن، استفاده شده است. گسسته سازی معادلات بصورت خطی بود و از روش حل فرمول تفاضلی پسرو<sup>۳</sup> در حل معادلات استفاده شده است. در نرم افزار کامسول از یک گام زمانی پویا برای محدود کردن خطای عددی استفاده شده است. با این وجود جهت کاهش خطای عددی نسبت به زمان، حداکثر گام زمانی ۱ دقیقه انتخاب شده است. معیار همگرایی نیز کاهش مقدار باقیمانده برای معادله انرژی به میزان  $10^{-6} * 1$  و برای سایر معادلات به  $10^{-4} * 1$  می باشد. جهت بررسی استقلال نتایج از حل و انتخاب شبکه ای مناسب برای شبیه سازی مسئله، هندسه مورد مطالعه با تعداد گره های محاسباتی ۳۹۶۵۶۹، ۶۴۳۴۴۲، ۱۳۴۱۴۹۹ و ۲۹۵۳۶۰۹ حل و نتایج بدست آمده مقایسه شده اند. در این راستا دمای پوست در ۱۰ نقطه مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. این نقاط شامل کف دست، پشت دست، بند میانی تمامی انگشتان و نوک انگشتان کوچک، میانی و شست می باشند. مقایسه دمای پوست در پنج نقطه از دست در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵ بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

همان طور که مشاهده می شود تفاوت دمای پوست دست در دو حل با گره های محاسباتی ۱۳۴۱۴۹۹ و ۲۹۵۳۶۰۹ با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند که نشان دهنده عدم ضرورت بر انتخاب

### ۲-۲-۳- معادلات حاکم بر جریان عبوری از روی دست

در مطالعه زیست گرمایی دست علاوه بر محاسبه توزیع دما در بافت توسط رابطه پنس، لازم است تأثیر جریان سیال اطراف دست و انتقال حرارت در آن نیز مورد مطالعه قرار گیرد. جریان عبوری از روی دست بصورت ناپایا، آشفته و تراکم ناپذیر فرض گردیده و جریان آشفته توسط معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین گیری رینولدز<sup>۱</sup> بصورت سه بعدی توصیف شده است. با توجه به عملکرد بهتر مدل آشفته SST در مقایسه با مدل های RNG K-e, realizable k-e, low Re k-e و ... در حل مسائل دارای انتقال حرارت تابشی و همرفت بصورت همزمان، از این مدل آشفته در پژوهش حاضر استفاده شده است [۳۲-۳۴]. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و بقای انرژی است که به ترتیب به صورت روابط (۴) تا (۶) بیان شده اند [۳۵]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (5)$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + s \quad (6)$$

در معادلات بالا  $u$  نشان دهنده بردار سرعت،  $P$  فشار استاتیکی و  $\mu$  لزجت سیال است و در معادله (۶)،  $c_p$  نشان دهنده ظرفیت گرمایی ویژه،  $k$  رسانایی حرارتی،  $s$  جمله چشمه و  $T$  دمای سیال است.

### ۲-۳- شرایط مرزی پوست

در مطالعه زیست گرمایی دست، انتقال حرارت از طریق همرفت، تابش و تبخیر از طریق پوست با محیط اطراف صورت می گیرد. نرخ انتقال حرارت تابشی از پوست به محیط اطراف توسط قانون استفان بولتزمن و از طریق رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$q_r = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{sur}^4) \quad (7)$$

که در رابطه فوق (۷) میزان گسیلمندی<sup>۲</sup> سطح پوست است که مقدار را برابر با  $0.98/36$  است.  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن

<sup>3</sup> Backward Differentiation Formula (BDF)

<sup>1</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

<sup>2</sup> Emissivity

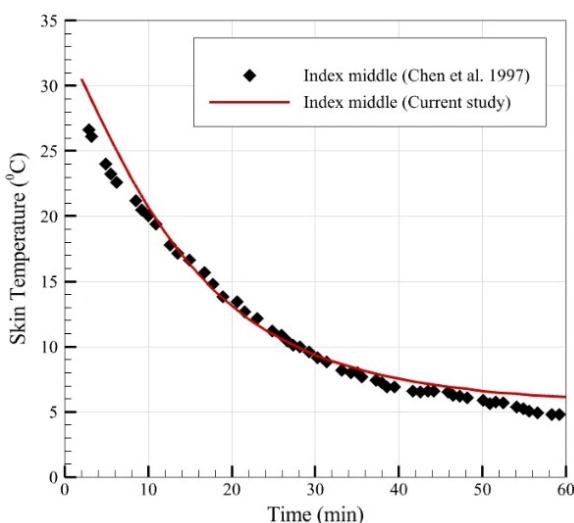
دمای مرکز بدن و متوسط دمای سطح پوست با توجه به عدم بیان این مقادیر در شرایط آزمایشگاهی، به ترتیب برابر  $37/1^{\circ}\text{C}$  و  $31^{\circ}\text{C}$  دانست که در رابطه اصلاح گردش خون مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر موارد بروز این اختلاف عدم بیان دقیق نحوه و محل اندازه‌گیری دمای سطح پوست و خطای ابزار اندازه‌گیری دانست. با این وجود این اختلاف با گذشت زمان و با شبه پایا شدن شرایط، کاهش می‌یابد.

در حالت دوم، از داده‌های آزمایشگاهی چن و همکاران [۳۸] استفاده شده است. در این مطالعه دست در تمامی آزمایش‌ها در یک محفظه واقع شده و هوای درون محفظه به آرامی به گردش درآمده است بطوریکه که سرعت هوا در نزدیکی دست کمتر از  $0/4$  متر بر ثانیه است. زمان آزمایش در مطالعه چن و همکاران [۳۸] ۶۰ دقیقه است.

در شکل (۷)، نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با داده‌های آزمایشگاهی برای حالتی که دمای هوای در گردش درون محفظه صفر است، مقایسه شده است.

جدول ۴ میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد قدرمطلق خطا (MAPE) نتایج پیش‌بینی شده عددی و داده‌های آزمایشگاهی مکجاویچ و همکاران [۳۷]

۱۰ (درجه سلسیوس)	دمای آب
۰/۴۷	MAE ( $^{\circ}\text{C}$ )
۰/۴۵	MSE ( $^{\circ}\text{C}$ )
۰/۶۷	RMSE ( $^{\circ}\text{C}$ )
۳/۸	MAPE (%)

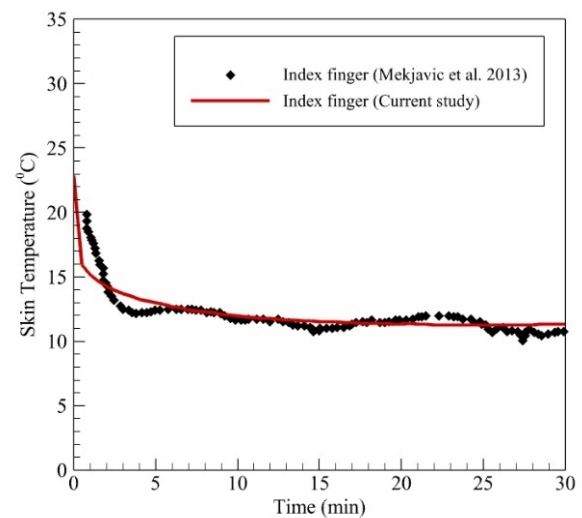


الف- بند میانی انگشت اشاره

گره‌های محاسباتی بیشتر است و در نهایت از شبکه‌ای با تعداد ۱۳۴۱۴۹۹ سلول محاسباتی به‌عنوان شبکه مناسب برای انجام محاسبات انتخاب شده است.

#### ۴- اعتبارسنجی مدل زیست-گرمایی دست

جهت اعتبارسنجی و بررسی صحت مدل، نتایج با داده‌های تجربی منتشر شده در منابع مختلف مقایسه شده است. ابتدا نتایج مدل زیست گرمایی دست با داده‌های آزمایشگاهی مکجاویچ و همکاران [۳۷] مقایسه شده‌اند. در این مطالعه دست به مدت ۳۰ دقیقه درون محفظه‌ای به ابعاد  $25 * 30 * 80$  سانتی‌متر، که دارای سیستم خنک‌کننده فعال تثبیت‌کننده دما، قرار دارد. در شکل (۶) دمای بدست آمده از مدل زیست گرمایی دست در سطح پوست نوک انگشت اشاره با داده‌های آزمایشگاهی تحقیق مکجاویچ و همکاران [۳۷] در دمای  $10^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس با یکدیگر مقایسه شده است که دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۶ اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مکجاویچ و همکاران [۳۷] در نوک انگشت اشاره

در جدول (۴) مقادیر میانگین قدرمطلق خطا، میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین درصد قدرمطلق خطا میان دمای سطح پوست پیش‌بینی شده در نوک انگشت اشاره توسط حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی مقاله مکجاویچ و همکاران ارائه شده است که دارای قدرمطلق خطای  $3/8\%$  می‌باشد. حداکثر اختلاف میان داده‌های تجربی و نتایج عددی بدست آمده از مدل حاضر در حدود  $3/2$  درجه سلسیوس می‌باشد. از جمله علل بروز این اختلاف را می‌توان در نظر گرفتن

جدول ۵ میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نتایج پیش‌بینی شده عددی و داده‌های آزمایشگاهی چن و همکاران [۳۸]

RMSE	MSE	MAE	
۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۷۴	بند میانی انگشت اشاره
۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۷۷	نوک انگشت اشاره
۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸	بند میانی شست
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۶	کف دست

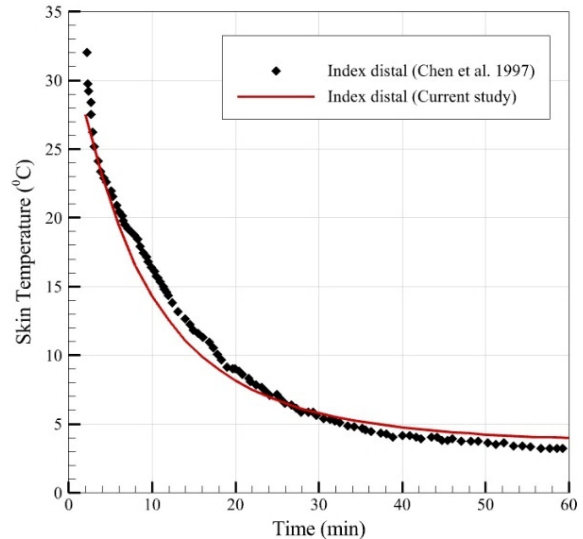
در تمامی حالت‌ها، نتایج عددی بدست آمده با دقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارند. علت اختلاف‌های میان نتایج عددی و آزمایشگاهی را می‌توان مواردی از قبیل دقت ابزارهای اندازه‌گیری و عدم اطلاع از محل دقیق نصب سنسورهای دما بر روی سطح پوست و اندازه‌گیری سرعت نزدیک دست دانست. لذا مدل زیست‌گرمایی ارائه شده توانسته نتایج قابل قبولی را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ارائه نماید که این موضوع بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی دمای سطح پوست در بخش‌های مختلف دست است. در نتیجه مدل حاضر می‌تواند کمک کند تا تأثیر شرایط حاد دمایی از قبیل سرمای‌شدگی بر روی بدن انسان و بخش دست، بدون نیاز به صرف هزینه زیاد در محیط آزمایشگاهی انجام شود.

در جدول (۵) مقادیر میانگین قدرمطلق خطا، میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا میان دمای پیش‌بینی شده سطح پوست در بخش‌های مختلف دست توسط حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی مقاله چن و همکاران [۳۸] ارائه شده است که از دقت قابل قبولی برخوردار است.

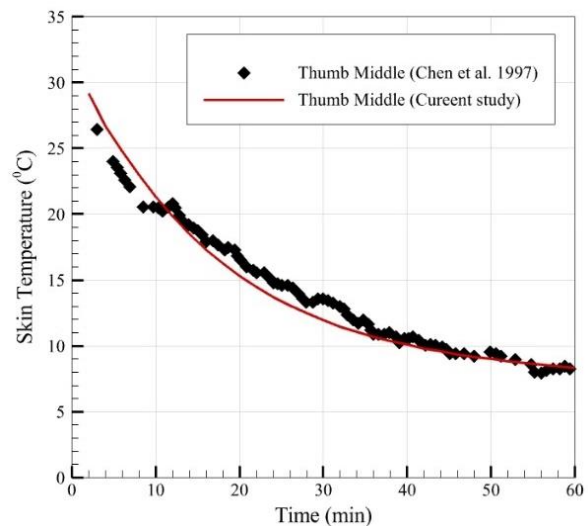
در نهایت نتایج مدل حاضر با نتایج تجربی وانگ و همکاران [۳۹] که به مطالعه تأثیر سرمای‌شدگی پرداخته‌اند، در شکل (۸) مقایسه شده است. همچنین در جدول (۶) مقدار میانگین درصد قدرمطلق خطا میان داده‌های آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۳۹] در دو بخش پشت دست و انگشت حلقه با مقادیر بدست آمده از حل عددی به کمک مدل زیست‌گرمایی پیکربندی شده بیان شده است. میانگین درصد قدرمطلق خطا در بخش پشت دست برابر با ۱/۸۴٪ است که دارای مقدار قابل قبولی است.

جدول ۶ میانگین درصد قدرمطلق خطا (MAPE) میان نتایج پیش‌بینی شده عددی و داده‌های آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۳۹]

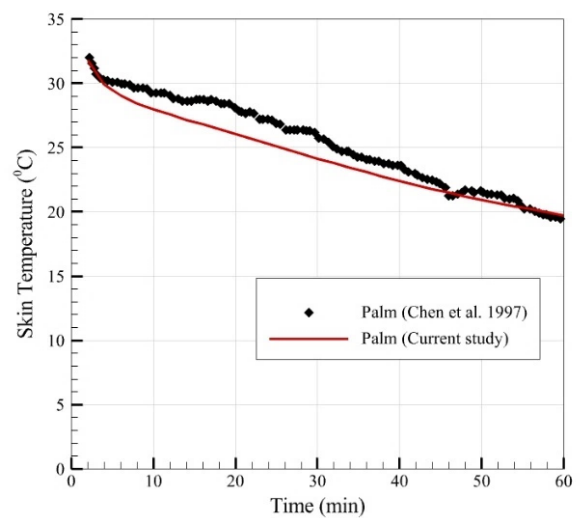
	پشت دست
MAPE (%)	۱/۸۴



ب- نوک انگشت اشاره



ج- بند میانی انگشت شست



د- کف دست

شکل ۷ اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی چن و همکاران [۳۸] در بخش‌های مختلف دست

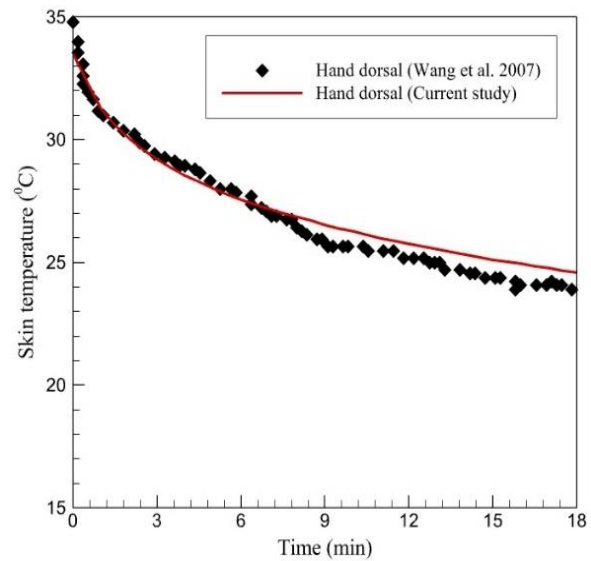
دمای زیاد میان بخش‌های با دمای کمینه و بیشینه دست چشم‌پوشی شده است، که این امر سبب بروز خطای بسیار در پیش‌بینی شرایط دست خصوصاً در شرایط حاد دمایی محیط می‌شود.

در شکل (۹) توزیع دمایی بر روی سطح دست پس از گذشت مدت زمان ۱۰ و ۶۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو زمان، اختلاف زیادی بین بخش‌های مختلف دست وجود دارد که در این میان انگشتان نسبت به سایر بخش‌ها از دمای کمتری برخوردارند. علت این امر را باید ساختار فیزیکی منحصر به فرد انگشتان و نسبت سطح به حجم زیاد آن‌ها در مقایسه با سایر بخش‌های بدن دانست که باعث شده است که انگشتان همچون یک سطح گسترش یافته عمل کرده و بیشترین اتلاف حرارت را داشته باشد.

با مقایسه دمای بخش نوک انگشت با قسمت انتهایی و محل اتصال انگشت به کف دست می‌توان مشاهده نمود که نوک انگشت از دمای کمتری برخوردار است، که این موضوع در تمامی انگشتان صادق است. از طرفی انگشت کوچک در مقایسه با سایر انگشتان دمای کمتری در بخش نوک انگشت و قسمت انتهایی دارد.

در مطالعه رئیسی و همکاران [۲۸]، دمای بحرانی جهت بروز یخ‌زدگی در بافت پوست ۰/۶- درجه سلسیوس بدست آمده است، در صورتیکه دمای نوک انگشت کوچک، بعد از مدت زمان ۶۰ دقیقه، برابر ۲/۱۱ درجه سلسیوس پیش‌بینی شده است که با دمای یخ‌زدگی فاصله دارد. این اختلاف دمای ۲/۷۱ درجه سلسیوس با افزایش سرعت وزش و یا کاهش دمای محیط کاهش یافته و می‌تواند در شرایط بحرانی و یا وقوع یخ‌زدگی در نوک انگشت کوچک شود. در مطالعه امکان وقوع شرایط بحرانی در محیط‌های با شرایط حاد دمایی، انگشت کوچک و خصوصاً بخش نوک انگشت از شرایط بحرانی تری نسبت به سایر بخش‌ها برخوردار است. از این رو می‌توان دمای انگشت کوچک را بعنوان معیاری جهت بررسی امکان بروز خطراتی مانند یخ‌زدگی و بافت‌مردگی انتخاب نمود.

شکل (۱۰) توزیع دما در بخش‌های مختلف دست از نمای کف دست برای شرایط محیطی با دمای صفر درجه سلسیوس و سرعت وزش ۰/۴ متر بر ثانیه پس از گذشت ۶۰ دقیقه نشان داده شده است. با توجه به جهت وزش هوا به سمت پشت دست، کف دست در معرض وزش مستقیم هوای سرد نبوده و وجود بافت نرم و به تبع آن تولید حرارت بیشتر نسبت به پشت دست و انگشتان، این ناحیه دارای دمای بیشتری است.



شکل ۸ اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی وانگ و همکاران در پشت دست [۳۹]

## ۵- نتایج

در این قسمت به بررسی توزیع غیر یکنواخت دمایی سطح پوست دست در شرایط محیطی با دمای صفر درجه سلسیوس و سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه پس از گذشت ۶۰ دقیقه پرداخته شده است. در جدول (۷) مقادیر دمای کمینه، بیشینه و متوسط بر روی سطح پوست دست بیان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمینه دما سطح پوست دست در دمای صفر درجه سلسیوس محیط و سرعت وزش ۰/۴ متر بر ثانیه در نهایت به مقدار ۱/۶۹ درجه سلسیوس کاهش یافته است. در مقابل بیشینه دمای سطح پوست دست برابر ۲۰/۲۱ درجه سلسیوس است که نشان دهنده اختلاف بسیار زیاد و در حدود ۱۷/۵۲ درجه سلسیوس است.

جدول ۷ مقادیر دمای کمینه، متوسط و بیشینه بر روی سطح پوست دست در شرایط محیطی ۰ درجه سلسیوس و سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه

دمای سطح پوست دست (°C)		
بیشینه	متوسط	کمینه
۲۰/۲۱	۱۰/۶۴	۱/۶۹

متوسط دمای سطح پوست دست پس از گذشت ۶۰ دقیقه نیز در حدود ۱۰/۶۴ است که در صورت در نظر گرفتن این دما بعنوان دمای متوسط کل سطح پوست دست همانند مدل‌های تنظیم حرارت موجود بدن، از توزیع غیر یکنواخت دما و اختلاف

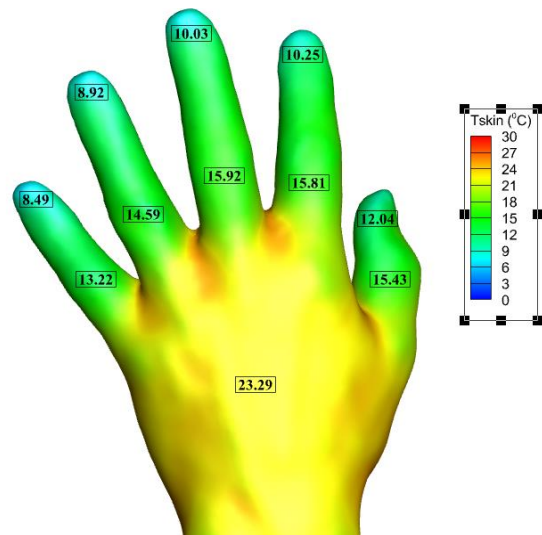
از مقایسه دمای بخش‌های مختلف کف و پشت دست در اشکال (۹) و (۱۰) در ۶۰ دقیقه می‌توان فهمید که دمای سمت پشت و کف دست با یکدیگر متفاوت است که نشان دهنده توانایی مدل زیست-گرمایی پیکربندی شده در پیش‌بینی دمای پوست دست می‌باشد. همچنین در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که انگشت کوچک، کماکان از دمای کمتری نسبت به سایر انگشتان برخوردار است و لذا انتخاب این انگشت بعنوان معیاری جهت بررسی شرایط بحرانی دست مناسب است.

### ۶- نتیجه‌گیری

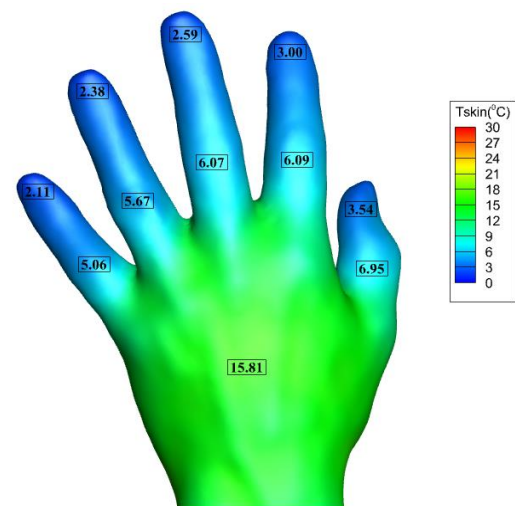
همان‌طور که اشاره شد، اکثر مدل‌های تنظیم حرارت بدن صفر بعدی بوده و با توجه به تعداد تقسیم بندی بدن برای هر قسمت یک دما را محاسبه می‌کنند، از این رو این مدل‌ها قادر نیستند تغییرات مکانی دما در بافت قسمت‌های مختلف بدن را نشان دهند. این مدل‌ها همچنین در شرایط بحرانی دمایی محیط، نیز از خود پاسخ مناسبی را نشان نداده و نمی‌توان از آن‌ها در بررسی انتقال حرارت زیستی حاکم در هنگام مواجهه با تنش-می‌شود که بخشی حساس به تغییرات دما با ساختار فیزیکی منحصر بفرد مانند دست انسان مورد مطالعه باشد. اندام‌های جانبی بدن از قبیل دست‌ها، به دلیل نسبت سطح به حجم بیشتر، نقش بسزایی در فرآیند تنظیم دمای بدن دارند. این ویژگی دست و به‌خصوص انگشتان، باعث تغییرات دمایی زیادی در بخش‌های مختلف دست می‌شود.

در مدل‌های پیشین، دست و یا انگشت به‌عنوان یک استوانه همگن فرض شده که به دلیل ساده‌سازی در هندسه، لایه‌بندی بافت‌ها و گردش خون، نتایج آنها قابل اتکا نمی‌باشند. در مطالعه حاضر سعی شده تا با پیکربندی یک مدل زیست-گرمایی دست انسان با هندسه کاملاً واقعی، با لایه‌بندی بافت‌های مختلف و مدل‌سازی جریان خون، این تفاوت‌های دمایی در بخش‌های مختلف با دقت محاسبه شود. مقایسه نتایج تجربی و عددی استخراج شده از مدل زیست-گرمایی دست، نشان دهنده دقت بالای مدل حاضر در پیش‌بینی دمای بخش‌های مختلف دست از جمله انگشتان می‌باشد. از دیگر نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در بررسی شرایط محیطی با دمای صفر درجه سلسیوس و سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه پس از گذشت ۶۰ دقیقه، کمینه و بیشینه دمای سطح پوست دست به ترتیب برابر مقدار ۱/۶۹ و ۲۰/۲۱ است که با تفاوت در حدود ۱۷/۵۲ درجه

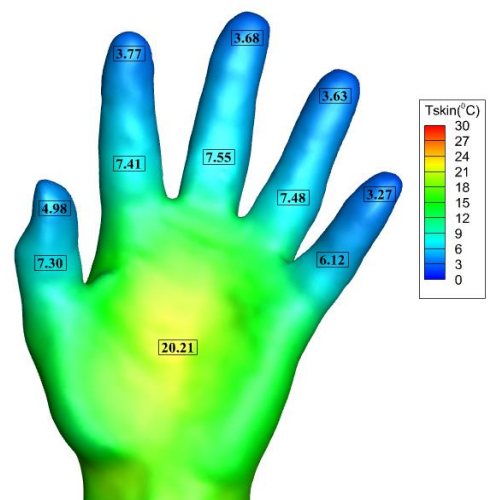


الف- پس از گذشت ۱۰ دقیقه



ب- پس از گذشت ۶۰ دقیقه

شکل ۹ توزیع دمایی بر روی سطح پوست پشت دست در شرایط محیطی ۰ درجه سلسیوس و سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه



شکل ۱۰ توزیع دمایی بر روی سطح پوست کف دست در شرایط محیطی ۰ درجه سلسیوس و سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه

## ۷- پیشنهادات

- با توجه به نتایج این مطالعه، می‌توان موضوعات زیر را جهت انجام تحقیقات بیشتر پیشنهاد نمود:
- بررسی توزیع دمایی دست در دامنه گسترده‌تری از شرایط محیطی (طبیعی و گرم).
- بکارگیری از مدل زیست-گرمایی حاضر در مطالعه تأثیر میزان ضخامت و مقاومت حرارتی پوشش مانند دستکش بر شرایط دمایی دست.
- پیش‌بینی امکان وقوع یخ‌زدگی در دست و بویژه انگشتان در دما و سرعت‌های مختلف.
- مطالعه تأثیر پارامترهای فردی از قبیل جنسیت، سن و توده بدنی بر توزیع دمایی سطح پوست دست.
- بکارگیری از دمای سطح پوست بخش‌های مختلف دست از طریق وسایل شخصی پوششی مانند حلقه و ساعت هوشمند در تعیین میزان رضایت فرد از شرایط محیطی و کنترل وسایل تهویه مطبوع.

## ۸- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، (J/kg · K)
$P$	فشار، (kPa)
$Q$	اتلاف حرارت، (W/m <sup>2</sup> )
$s$	جمله چشمه
$T$	دما
$u_i$	بردار سرعت، (m/s)
$\varepsilon$	ضریب انتشار
$k$	رسانش حرارتی، (W/m · K)
$\mu$	ضریب لزجت دینامیکی، (kg/m · s)
$\rho$	چگالی، (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	ثابت استفان بولتزمن
$\omega$	تراوش خون، (1/s)
زیرنویس‌ها	
B1	خون
core	مرکز بدن
skin	پوست
met	متابولیک

## ۸- مراجع

- [1] M. Zhang, R. Li, Y. Wu, and G. Song, "Thermoregulation of human hands in cold environments and its modeling approach: A comprehensive review," *Building and Environment*,

سلسیوس، نشان دهنده اختلاف بسیار زیاد میان بخش‌های مختلف دست است. این موضوع بر ضرورت مدل‌سازی دست با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد شامل تفاوت ظاهری و ساختاری بخش‌های مختلف دست براساس آناتومی کاملاً واقعی تأکید دارد.

- در این شرایط محیطی، متوسط دمای سطح پوست دست نیز برابر ۱۰/۶۴ درجه سلسیوس می‌باشد که با درنظر گرفتن این دما بعنوان دمای سطح پوست دست همانند مدل‌های تنظیم حرارت موجود بدن، از توزیع غیر یکنواخت دما و اختلاف دمای بسیار میان بخش‌های مختلف دست چشم‌پوشی شده است، که این امر سبب بروز خطا بسیار در پیش‌بینی شرایط دست خصوصاً در شرایط حاد دمایی محیط می‌شود.
- با توجه به توزیع غیر یکنواخت دما و اختلاف دمای بسیار میان بخش‌های مختلف دست، انگشتان کوچک، حلقه، میانی، اشاره و شست به ترتیب دارای دمای ۳/۶۳، ۳/۶۸، ۳/۶۸ و ۴/۹۸ درجه سلسیوس می‌باشند که نسبت به سایر بخش‌ها از دمای کمتری برخوردارند.
- از طرفی انگشت کوچک در بخش نوک انگشت و قسمت انتهایی دارای دمای به ترتیب ۳/۲۷ و ۶/۱۲ می‌باشد که در مقایسه با سایر انگشتان از دمای کمتری برخوردار بوده و این موضوع بر اهمیت توجه به آناتومی واقعی دست در مدل‌سازی دست در هنگام مطالعه زیست-گرمایی دست بویژه در شرایط شدید سرمای دلاله دارد.
- با توجه به جهت جریان اعمالی، دمای سمت پشت و کف دست پس از گذشت ۶۰ دقیقه با یکدیگر متفاوت است که نشان دهنده توانایی مدل زیست-گرمایی پیکربندی شده در پیش‌بینی دمای پوست دست می‌باشد. همچنین در هر دو سمت کف و پشت دست، انگشت کوچک از دمای کمتری نسبت به سایر انگشتان برخوردار است و از این‌رو در مطالعه محیط‌های با تنش‌های سرمای می‌بایست این انگشت بعنوان معیاری جهت بررسی شرایط بحرانی دست انتخاب گردد.
- دمای نوک انگشت کوچک، بعد از مدت زمان ۶۰ دقیقه، برابر ۲/۱۱ درجه سلسیوس بوده که با توجه به دمای بحرانی ۰/۶- درجه سلسیوس جهت بروز یخ‌زدگی در بافت پوست، با رخداد یخ‌زدگی فاصله دارد. این اختلاف دما برابر ۲/۷۱ درجه سلسیوس است که با افزایش سرعت وزش و یا کاهش دمای محیط، می‌تواند در شرایط بحرانی و یا وقوع یخ‌زدگی در نوک انگشت کوچک شود.

- Energy and Buildings*, vol. 118, pp. 114-122, 2016/04/15/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.051>.
- [12] H. H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm," *Journal of Applied Physiology*, vol. 1, no. 2, pp. 93-122, 1948, doi: <https://doi.org/10.1152/jappl.1948.1.2.93>.
- [13] A. Zolfaghari and M. Maerefat, "A new simplified thermoregulatory bioheat model for evaluating thermal response of the human body to transient environments," *Building and Environment*, vol. 45, no. 10, pp. 2068-2076, 2010/10/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.002>.
- [14] N. M. Khiavi, M. Maerefat, and S. A. Zolfaghari, "A new local thermal bioheat model for predicting the temperature of skin thermoreceptors of individual body tissues," *Journal of Thermal Biology*, vol. 74, pp. 290-302, 2018/05/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.04.006>.
- [15] M. Afzalian and A. Zolfaghari, "Modeling the effects of individual parameters on local body temperature by developing an individualized multi-segment thermoregulatory model," (in Persian), vol. 52, pp. 329-338, 08/15 2022, doi: <https://doi.org/10.22034/jmeut.2022.50387.3062>.
- [16] A. Shitzer, L. A. Stroschein, W. R. Santee, R. R. Gonzalez, and K. B. Pandolf, "Quantification of conservative endurance times in thermally insulated cold-stressed digits," *Journal of Applied Physiology*, vol. 71, no. 6, pp. 2528-2535, 1991, doi: <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.6.2528>.
- [17] A. Shitzer, L. A. Stroschein, P. Vital, R. R. Gonzalez, and K. B. Pandolf, "Numerical analysis of an extremity in a cold environment including countercurrent arterio-venous heat exchange," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 119, no. 2, pp. 179-186, 1997, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2796078>.
- [18] O. Ley and C. V. Deshpande, "Comparison of two mathematical models for the study of vascular reactivity," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 39, no. 7, pp. 579-589, 2009/07/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2008.12.003>.
- [19] P. K. V. Manda, "Study of the risk of frostbite in humans with the help of a transient 3D finger model," 2013. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2097/15995>. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2097/15995>.
- [20] A. Fallahi, M. Reza Salimpour, and E. Shirani, "A 3D thermal model to analyze the temperature changes of digits during cold stress and predict the danger of frostbite in human fingers," *Journal of Thermal Biology*, vol. 65, pp. 153-160, 2017/04/01/ vol. 248, p. 111093, 2024/01/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111093>.
- [2] M. Salloum, N. Ghaddar, and K. Ghali, "A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 4, pp. 371-384, 2007/04/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.017>.
- [3] J. A. Stolwijk, "A mathematical model of physiological temperature regulation in man," NASA, 1971. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710023925>.
- [4] A. P. Gagge, A. P. R. Fobelets, and L. Berglund, "A standard predictive index of human response to the thermal environment," *Ashrae Transactions*, vol. 92, pp. 709-731, 1986.
- [5] J. A. J. Stolwijk and J. D. Hardy, "Temperature regulation in man — A theoretical study," *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, vol. 291, no. 2, pp. 129-162, 1966/01/01 1966, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00412787>.
- [6] D. Fiala *et al.*, "Physiological modeling for technical, clinical and research applications," *Frontiers in bioscience*, vol. 2, pp. 939-68, 2010, doi: <https://doi.org/10.2741/S112>.
- [7] Y. Kobayashi and S.-i. Tanabe, "Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system," *Building and Environment*, vol. 66, pp. 1-10, 2013/08/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.013>.
- [8] S.-i. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki, and M. Konishi, "Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)," *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 6, pp. 637-646, 2002/07/01/ 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00014-2).
- [9] J. Yang, W. Weng, and B. Zhang, "Experimental and numerical study of physiological responses in hot environments," *Journal of Thermal Biology*, vol. 45, pp. 54-61, 2014/10/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.07.010>.
- [10] J. Zhao, H. Wang, Y. Li, F. Xiao, and Q. Deng, "Heatstroke recovery at home as predicted by human thermoregulation modeling," *Building and Environment*, vol. 173, p. 106752, 2020/04/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106752>.
- [11] D. Lai and Q. Chen, "A two-dimensional model for calculating heat transfer in the human body in a transient and non-uniform thermal environment,"

- [29] M. Raeisi, H. Hassanzadeh, S. A. Zolfghari and A. Omidvar, "Investigating the effect of air flow velocity and temperature on the thermal response of fingers using a bio-heat model of the human hand," *21th Fluid Dynamics Conference*, 2025, [ In Persian], <https://civilica.com/doc/2251404>.
- [30] L. Vallez, B. Plourde, and J. Abraham. *A new computational thermal model of the whole human body: Applications to patient warming blankets*, doi: <https://doi.org/10.1080/10407782.2015.1080573>.
- [31] W. A. Lotens, "Simulation of hand cooling due to touching cold materials," *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 65, no. 1, pp. 59-65, 1992/01/01 1992, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01466275>.
- [32] C. Li and K. Ito, "Numerical and experimental estimation of convective heat transfer coefficient of human body under strong forced convective flow," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 126, pp. 107-117, 2014/03/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.01.003>.
- [33] X. Li and J. Tu, "Evaluation of the eddy viscosity turbulence models for the simulation of convection–radiation coupled heat transfer in indoor environment," *Energy and Buildings*, vol. 184, pp. 8-18, 2019/02/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.043>.
- [34] M. Zhang, R. Li, Y. Wu, L. Wang, G. Song, and J. Li, "Numerical study of the convective heat transfer coefficient of the hand and the effect of wind," *Building and Environment*, vol. 188, p. 107482, 2021/01/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107482>.
- [35] P. J. Pritchard and J. W. Mitchell, *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. Wiley, 2016.
- [36] V. Bernard, E. Staffa, V. Mornstein, and A. Bourek, "Infrared camera assessment of skin surface temperature – Effect of emissivity," *Physica Medica*, vol. 29, no. 6, pp. 583-591, 2013/11/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.09.003>.
- [37] I. B. Mekjavic, U. Dobnikar, and S. N. Kounalakis, "Cold-induced vasodilatation response in the fingers at 4 different water temperatures," *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, vol. 38, no. 1, pp. 14-20, 2013, doi: <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0118>.
- [38] F. Chen, Z. Y. Liu, and I. Holmér, "Hand and finger skin temperatures in convective and contact cold exposure," *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 72, no. 4, pp. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.03.001>.
- [21] Z. Kang, F. Wang, and Udayraj, "An advanced three-dimensional thermoregulation model of the human body: Development and validation," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 107, pp. 34-43, 2019/10/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.05.006>.
- [22] M. Zhang *et al.*, "A 3D multi-segment thermoregulation model of the hand with realistic anatomy: Development, validation, and parametric analysis," *Building and Environment*, vol. 201, p. 107964, 2021/08/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107964>.
- [23] J. Yang *et al.*, "A 7-segment numerical hand-glove/mitten model for predicting thermophysiological responses of the human hand in extremely cold conditions," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 151, p. 106351, 2022/12/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.106351>.
- [24] Z. Mengying, "Computational modeling and simulation of hand-specific heat transfer and thermoregulation during cold stress," 2021.
- [25] M. P. Castellani, T. P. Rioux, J. W. Castellani, A. W. Potter, and X. Xu, "A geometrically accurate 3 dimensional model of human thermoregulation for transient cold and hot environments," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 138, p. 104892, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104892>.
- [26] M. P. Castellani, T. P. Rioux, J. W. Castellani, A. W. Potter, S. R. Notley, and X. Xu, "Finite element model of female thermoregulation with geometry based on medical images," *Journal of Thermal Biology*, vol. 113, p. 103477, 2023/04/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103477>.
- [27] A. Joshi, R. Li, Y. Wu, M. Zhang, and G. Song, "Analysis of glove local microclimate properties for various glove types and fits using 3D scanning method," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, p. e23596, 2024/01/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23596>.
- [28] M. Raeisi, H. Hassanzadeh, S. A. Zolfghari and A. Omidvar, " Investigating the effect of air flow velocity on human hand temperature distribution in direct and indirect flowing air conditioning systems, " *2th International Conference and 5th National Conference on Air Conditioning, Heating/Cooling and Refrigeration Facilities*, 2024, [ In Persian], <https://civilica.com/doc/2115225>.

372-379, 1996/07/01 1996, doi:  
<https://doi.org/10.1007/BF00599699>.

- [39] D. Wang, H. Zhang, E. Arens, and C. Huizenga, "Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort," *Building and Environment*, vol. 42, no. 12, pp. 3933-3943, 2007/12/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.035>.

## بازیابی انرژی اتلافی بخار برگشتی مخزن کندانس یک کارخانه روغن نباتی با استفاده از اجکتور در سیکل بخار

**چکیده:** هدف از مطالعه پیش رو توسعه و تحلیل عملکرد یک سیستم بازیابی انرژی اتلافی ناشی از تخلیه بخار از مخزن کندانس در سیستم توزیع بخار یک کارخانه روغنکشی از طریق استفاده از اجکتور در سیکل بخار می باشد. بدین منظور ابتدا نرخ بخار اتلافی از مخزن کندانس برگشتی، دما، فشار و میزان انرژی قابل بازیافت آن همچنین دبی و خواص ترمودینامیکی بخار در خط بخار فشار بالای کارخانه اندازه گیری و محاسبه شده است. علاوه بر این، میزان نیاز انرژی در سیستم حرارت مرکزی ساختمان اداری از لحاظ قابلیت تامین آن از طریق انرژی بازیافتی بخار محاسبه شده است. سپس با استفاده از مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین مدل سازی ریاضی، استفاده از اجکتور در سیستم برای بازیابی انرژی اتلافی در شرایط مختلف عملکرد آن، ارزیابی و بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که فشار خروجی اجکتور (پس فشار) در محدوده ۱۷۰ تا ۱۹۰ کیلو پاسکال منجر به نسبت مکش مناسب (در محدوده ۳/۵ تا ۴) و همچنین عملکرد مطلوبی به لحاظ جلوگیری از شکل گیری امواج شوک شده و می تواند فشار بخار مورد نیاز را برای هیترهای کارخانه تامین نماید. همچنین فشار مکش در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال در شرایط کاری مختلف اختلالی در عملکرد سیستم بازیابی حرارت به وجود نمی آورد هر چند نسبت مکش اجکتور تحت تاثیر فشار مکش قرار خواهد گرفت.

**واژه های راهنما:** بازیابی انرژی اتلافی، بخار، اجکتور، نسبت مکش، مخزن کندانس

شریف دهقان  
کارشناسی ارشد

یاسر ملائی برزی\*

استادیار،  
گروه مهندسی مکانیک،  
واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی،  
کاشان

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷  
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

Sharif Dehghan  
MSc

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

## Waste energy recovery in an industrial oil extraction factory using ejector in the steam cycle

**Abstract:** The aim of present study is development and analysis of a waste energy recovery of the return condensate tank low-pressure steam in steam distribution system of an industrial oil extraction factory (oilseeds) via the application of an ejector. For this purpose, the amount of recoverable energy as well as the flow rate and thermodynamic properties of steam in the high pressure steam line of the factory have been measured and calculated. Then the application and adaption of the ejector for the steam waste heat recovery in various system operating conditions was evaluated and investigated using CFD modeling and analytical approach. The results show that the ejector back pressure in the range of 170 to 190 kpa leads to an appropriate suction ratio of 3.5 to 4 and a desirable performance in case of preventing shock waves and providing the minimum pressure needed for the steam heating system. Moreover, the suction pressure in range of 100 to 200 kpa doesn't interrupt the heat recovery system operation even though the suction ratio is affected by the suction pressure.

**Keywords:** Waste energy recovery, Steam, Ejector, Suction ratio, Condensate tank

## ۱- مقدمه

از مخزن بخار برگشتی تأمین نمود. از ویژگی‌های اجکتور می‌توان به هندسه ساده، عدم وجود عضو متحرک و هزینه پایین تعمیر و نگهداری اشاره کرد. این امکانات و سازگاری‌های اجکتور موجب می‌شود که بتوان از این وسیله در بسیاری از کاربردهای صنعتی استفاده کرد. اجکتور از طریق تبادلات مومنتوم، جریان فشار پایین (جریان ثانویه) را با استفاده از جریان فشار بالا (جریان اولیه) متراکم و به یک جریان فشار متوسط تبدیل می‌کند.



شکل ۱ خروجی بخار از مخزن کندانس

تاکنون کاربردهای متنوعی از اجکتورها با اهداف مختلف در صنایع و تأسیسات و در سیکل‌های توان و تبرید در مقالات مختلف گزارش شده است. سرورالدین آبادی و همکارانش [۱] ترکیب سیکل‌های رانکین و تراکمی بخار را با استفاده از اجکتور به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها شرایط مختلف نسبت‌های مکش و مساحت اجکتور را در مدل ریاضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که افزایش دمای مولد بخار و اوپراتور، ضریب عملکرد سیستم را افزایش می‌دهد و اینکه بیشترین تلفات انرژی به ترتیب در اجکتور، مولد بخار و کندانسور روی می‌دهد. همچنین ابراهیم افشاری و همکارانش [۲] تأثیر نوع سیال عامل بر عملکرد سیستم تبرید اجکتوری همچنین تأثیر کمیت‌های عملیاتی سیکل بر توان مصرفی، میزان انرژی گرمایی مورد نیاز و ضریب عملکرد سیکل را بررسی کردند. آنها دریافتند که سیکل با سیال عامل R141b دارای کمترین ضریب عملکرد و R12 دارای بیشترین مقدار ضریب عملکرد نسبت به سایر مبردها است.

یکی از مهمترین چالش‌هایی که امروزه با آن روبرو هستیم و در آینده نیز با آن مواجه خواهیم شد صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. تقاضای روز افزون انرژی در بخش‌های مختلف، جوامع را با چالش بزرگی مواجه ساخته است. با افزایش روز افزون و آزادسازی قیمت حامل‌های سوختی باعث شده است که صنایع در حال بازبینی تکنولوژی و عملکرد سیستم‌های خود در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی باشند. شرکت روغن‌کشی اکسدانه که در سال ۱۳۵۳ تأسیس گردیده، با توجه به اینکه انرژی در آن سال‌ها ارزان بوده لذا به لحاظ عدم نوسازی در طراحی خطوط، تجهیزات و فاصله داشتن آنها با تکنولوژی روز روغن‌کشی در طی این سال‌ها، از این رو سبب گردیده تا مصرف و هزینه انرژی بطور محسوس و نامحسوس افزایش یابد. در کارخانه روغن‌کشی اکسدانه از گاز طبیعی جهت تأمین انرژی فسیلی مورد نیاز استفاده می‌شود. گاز در این کارخانه انرژی مورد نیاز دیگ‌های بخار، تجهیزات پخت دانه، تجهیزات جداسازی روغن از حلال، خشک‌کن‌ها و گرمایش واحدهای اداری اعم از اتاق پرسنل و آب گرم حمام کارکنان را تأمین می‌نماید. با احتساب موارد فوق میانگین شدت مصرف گاز برابر با ۵۹/۸۹ مترمکعب به ازای هر تن دانه می‌باشد. در این کارخانه مصرف بخار به ازای هر تن دانه برابر با ۴۵۳۲ پوند بوده است درحالی‌که میانگین مصرف بخار در صنعت روغن‌کشی ایالات متحده برابر با ۱۰۱۵ پوند به ازای هر تن دانه می‌باشد. این موضوع نشان دهنده مصرف ۴ برابری بخار و نتیجتاً انرژی به ازای واحد تولید در این کارخانه نسبت به صنایع مشابه در ایالات متحده می‌باشد. بنابر این کارخانه اکسدانه از نقطه نظر انرژی دارای پتانسیل مناسبی جهت انجام ممیزی بطور ادواری و همچنین بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌باشد.

تحقیق پیش‌رو به هدررفت انرژی در بخش بخار شرکت اکسدانه اشاره دارد و بعلت وجود تعداد زیاد تجهیزات در سیستم توزیع بخار و نیز عدم عملکرد مناسب تله‌های بخار در اکثر مواقع، شاهد برگشت مقدار زیاد بخار در سیستم برگشتی بخار بالاخص مخزن بخار برگشتی خود می‌باشد که باعث گردیده بخار تخلیه شده از این مخزن بیش از اندازه گردد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

یکی از راهکارهای جلوگیری از اتلاف این بخار حامل انرژی، استفاده کردن از آن در سایر مصرف‌کننده‌های فشار متوسط اعم از سیستم حرارت مرکزی کارخانه است که با نصب یک اجکتور یا ترموکمپرسور می‌توان بخار لازم برای آن را با مکش

با توجه مطالعات مختلف انجام شده روی کاربرد اجکتور جهت بهبود کارایی انرژی سیستم‌های مختلف و همچنین روش‌های تجربی و عددی ارائه شده جهت تحلیل و بهبود عملکرد اجکتورها در سیکل‌های مختلف انرژی، یکی از مشکلات در این خصوص منطبق کردن مشخصات مناسب و بهینه اجکتور بر سیستم مورد نظر برای دریافت بهترین کارایی با توجه به مشخصات ترمودینامیکی جریان‌های در دسترس در سیکل می‌باشد. در ضمن در مطالعات محدودی، از اجکتور جهت بازیابی انرژی به خصوص در سیکل‌های بخار استفاده شده و عملکرد آن مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین وجه تمایز و نوآوری در مطالعه حاضر اولاً استفاده از اجکتور جهت بازیابی انرژی اتلافی در یک سیکل بخار با مشخصات خاص خود و ثانیاً تحلیل و محاسبه مشخصات مناسب و بهینه اجکتور و جریان جرم و انرژی در سیستم مورد نظر برای دریافت بهترین کارایی در محدوده عملکرد آن با توجه به مشخصات ترمودینامیکی جریان‌های در دسترس در سیکل می‌باشد.

هدف از این تحقیق، بررسی استفاده از یک اجکتور یا ترموکمپرسور مناسب جهت بازیابی انرژی بخار کم فشار تخلیه شده از مخزن و بهره بردن از انرژی آن برای گرمایش سایر تجهیزات و مصرف‌کننده‌ها می‌باشد. هندسه اجکتور اولیه از ابعاد اجکتور (یدکی) موجود در کارخانه که برای تأمین خلاء در برج تقطیر یکی از واحدها بوده است، الگوبرداری شده است و نتایج تحلیل‌ها و شبیه‌سازی با نتایج حل معادلات یک‌بعدی حاکم بر اجکتور مطابقت داده شده و دقت آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- اندازه‌گیری و محاسبه اتلاف انرژی ناشی از تخلیه بخار از مخزن کندانس و طرح پیشنهادی جهت بازیابی انرژی بخار اتلافی

بخار فلاش معمولاً از بخار آزاد شده از تخلیه تانک‌ها و مخازن کندانس و یا خطوط کندانس خروجی از تله‌های بخار ایجاد می‌شود. این نوع بخار بدون افزایش حرارت به آب و مستقیماً در اثر تقلیل فشار آب از فشار بالاتر به پایین‌تر تشکیل می‌گردد (در واقع درصدی از آب به بخار تبدیل می‌شود). این مقدار انرژی مقداری از کندانس خروجی را تبخیر می‌نماید که به بخار فلاش معروف است و از این فرآیند با جوشش آب یا فلاشینگ نام برده می‌شود. در واقع میزان بخار فلاش تولیدی برابر با نسبت مازاد بر انرژی تبخیر فشار ثانویه می‌باشد. در کارخانه اکسدانه بخش اعظم کندانس سیستم بخار به صورت بخار فلاش

قهرمانی و همکارانش [۳] عملکرد اجکتور در سیکل تبرید اجکتوری با سیال عامل بخار آب را به کمک نرم‌افزار فلونت و متلب بررسی و ضریب عملکرد سیکل را با جابجایی موقعیت خروجی نازل اولیه بهبود دادند. همچنین سعید خلیلی ساربانقلی و لیلی گروسی فرشی [۴] تأثیر افزودن اجکتور بر عملکرد ترمودینامیکی پمپ حرارتی ترکیبی را مورد بررسی قرار داده و آن را با عملکرد پمپ حرارتی ترکیبی بدون اجکتور مقایسه کردند. آنها نشان دادند که در پمپ حرارتی معرفی شده با اجکتور که عملکرد آرایش جدید حداکثر ۱۰ درصد از نظر نسبت انرژی اولیه و نیز در حدود ۱۸ درصد از نظر بازده قانون دوم بالاتر از پمپ حرارتی ترکیبی است.

ریفات و همکارش [۵] با استفاده از شبیه‌سازی جریان درون اجکتور به کمک CFD، موقعیت نازل اولیه را مورد بررسی قرار داده و موقعیت بهینه برای آن را به دست آورده‌اند. دسواکس و همکارانش [۶] به بررسی جریان درون اجکتور به روش نمایشگر لیزری و مقایسه نتایج آن با شبیه‌سازی عددی پرداخته‌اند. دسواکس و همکارانش نشان دادند که این روش به خوبی می‌تواند دینامیک جریان و پدیده شوک را پیش‌بینی کند. راسلی و همکارانش [۷] چندین اجکتور را مدل کرده تا با شبیه‌سازی دینامیک جریان در این اجکتورها رفتار جریان ناشی از تغییرات هندسه اجکتور را مورد بررسی قرار دهند. آنها نتیجه گرفته‌اند که نسبت جرمی بیشینه کمی پیش از وقوع شوک به دست می‌آید. همچنین آنها نتیجه گرفتند موقعیت نازل یکی از پارامترهای مهم در طراحی اجکتور به شمار می‌رود.

هان و همکارانش [۸] مشخصه‌های جریان دوفازی را در جریان ثانویه یک اجکتور حاوی اجزای چگالش‌پذیر به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داده و تأثیر میزان فشار جریان اولیه روی شروع چگالش و قطر قطرات چگالیده شده در جریان خروجی و همچنین روی طول موج شوک را ارزیابی کردند.

گائو و همکارانش [۹] تأثیر تغییر نسبت مساحت نازل و گلوگاه اجکتور را از طریق یک مکانیزم تنظیم‌کننده قطر نازل روی عملکرد و پارامترهای خروجی یک اجکتور بخار به صورت تجربی بررسی کردند. آنها نشان دادند که نسبت بهینه‌ای برای مساحت نازل به مساحت گلوگاه وجود دارد که در آن میزان مکش بیشینه است. برای هندسه‌ها و شرایط کارکردی بسیار متنوعی نسبت نرخ مایع مکش شده با اختلاف فشار بین سطح آب در محفظه مکش و خروجی گلوگاه وابسته است.

از رابطه (۲) مقدار بخار آزاد شده (فلاش) از مخزن کندانس برابر با 2535 lb/hr یا 1150 kg/hr محاسبه می‌شود. همچنین انرژی اتلافی ناشی از تخلیه بخار فلاش که می‌تواند بازیابی شود به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\dot{E}_{g,waste} = \dot{m}_g(h_{g,tp} - h_{0(f,tp)}) \quad (۳)$$

از رابطه فوق توان اتلافی ناشی از تخلیه بخار فلاش به محیط برابر 2002650 Btu/hr یا 2112907.6 Kj/hr محاسبه می‌شود که این، مقدار قابل توجه اتلاف انرژی را نشان می‌دهد. در این تحقیق سعی گردیده تا از بخار فلاش تلف شده که حاوی مقدار بسیار زیادی انرژی است و در حال حاضر به محیط اطراف اتلاف می‌شود جهت گرمایش آب گرم سرویس حمام و سیستم حرارت مرکزی کارخانه استفاده شود.

در کارخانه مورد مطالعه بعضی از بخش‌ها، گرمایش محیط در فصول سرد خود را توسط هیتر بخار (کوئل بخار) تأمین می‌کنند که از جمله آن می‌توان به قسمت‌های زیر اشاره کرد:

- ۱- اتاق پرسنل برق ۲- اتاق پرسنل کنجاله ۳- اتاق سرپرستان تولید ۴- اتاق کنترل اکستراکسیون ۵- انبار واحد اکستراکسیون ۶- اتاق پرسنل سالن تولید ۷- رختکن پرسنل ۸- آب گرمکن حمام کارکنان ۹- اتاق پرسنل خدمات؛ لازم به ذکر است که در حال حاضر همه این هیترها از بخار اشباع خروجی از بویلر با فشار ۱۰ بار تغذیه می‌گردند و در انتهای مسیر خود دارای یک تله ۳/۴ اینچ هستند و در نهایت خروجی آن به اتمسفر تخلیه (اتلاف) می‌شوند. در جدول (۲) مقدار بخار مصرفی جهت گرمایش این بخش‌ها و نیز مقدار بخار تخلیه شده از مخزن کندانس مشخص شده است.

جدول ۲ مقایسه مقدار بخار مصرفی برای گرمایش با بخار تخلیه شده توسط مخزن کندانس

مصرف کننده‌ها	مقدار بخار kg/hr
آب گرم مصرفی برای حمام‌ها	۱۸۱
آب گرم مصرفی برای سایر مصرف‌کننده‌ها	۳۰۳
هیتر بخار اتاق پرسنل (۸ اتاق)	۵۴۴
مجموع مصارف بخار جهت بخش‌های اداری	۱۰۲۸
مایع کندانس ورودی به مخزن کندانس	۶۸۰۴
دبی بخار تخلیه شده از مخزن کندانس (بخار فلاش)	۱۱۵۰

اتلاف شده و طرحی در جهت به حداکثر رساندن استفاده از این انرژی موجود اجرایی نگردیده است. این بخار از نوع بخار زنده سیستم بخار نیست؛ بلکه در واقع بخاری است که هنگام خروج چگالیده از تله بخار، به دلیل افت ناگهانی فشار و بالا بودن دمای چگالیده تولید می‌شود که به آن فلاش بخار گفته می‌شود. بخار فلاش معمولاً در بخار آزاد شده از تخلیه تانک‌ها و مخازن کندانس و یا خطوط کندانس خروجی از تله‌های بخار به چشم می‌خورد. این نوع بخار بدون افزایش حرارت به آب و مستقیماً در اثر تقلیل فشار آب از فشار بالاتر به پایین تر تشکیل می‌گردد (در واقع درصدی از آب به بخار تبدیل می‌شود).

دبی بخار تخلیه شده به محیط از مخزن کندانس در کارخانه و انرژی اتلافی آن به کمک مقادیر دبی اندازه‌گیری شده بخار و شرایط ترمودینامیکی آن به صورت زیر قابل محاسبه است. جدول (۱) شرایط ترمودینامیکی مایع کندانس فشاربالای ورودی به مخزن کندانس، مایع کندانس اتمسفریک خروجی از مخزن کندانس و بخار فلاش خروجی از آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱ شرایط ترمودینامیکی ورودی و خروجی‌های مخزن کندانس

موقعیت	فشار (bar)	آنتالپی (kj/kg)
مایع کندانس برگشتی فشار بالا (ورودی به مخزن کندانس)	۱۰	۸۰۰
مایع خروجی از مخزن کندانس (اشباع)	آتمسفریک	۴۱۸/۷
بخار تخلیه از مخزن کندانس (اشباع)	آتمسفریک	۲۲۵۶

با توجه به اطلاعات جدول فوق و با توجه به اینکه انرژی مورد نیاز جهت تبخیر مایع کندانس مستقیماً از تقلیل فشار آب کندانس از فشار بالاتر به پایین تر تأمین می‌گردد (در واقع تبخیر بخشی از کندانس در اثر این کاهش فشار اتفاق می‌افتد) درصد بخار آزاد شده (فلاش) از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

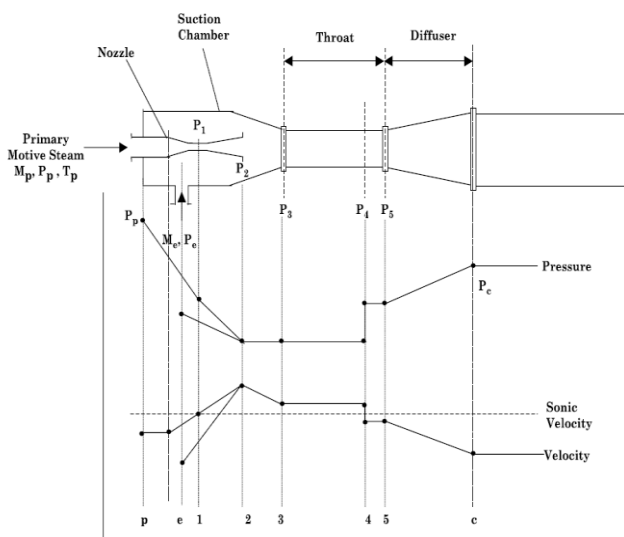
$$x_g = \frac{h_{f,hp} - h_{f,tp}}{h_{g,tp}} \quad (۱)$$

بر اساس داده‌های آنتالپی جدول (۱)، کیفیت بخار در مخلوط دوفاز مخزن کندانس برابر ۰/۱۶۹ محاسبه می‌شود. با محاسبه کیفیت بخار، دبی بخار آب فلاش به صورت کسری از دبی مایع دوفاز ورودی به مخزن کندانس که برابر با 15000 lb/hr (5804 kg/hr) می‌باشد با رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{l,hp} x_g \quad (۲)$$

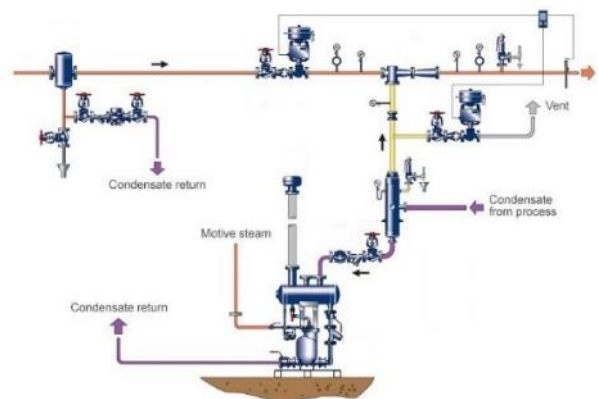
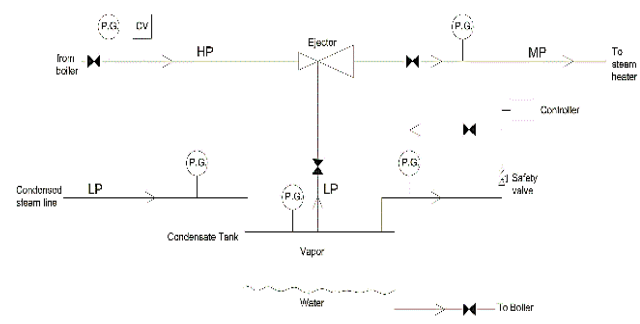
شود، سیال اولیه با فشار زیاد ( $P_p$ ) وارد نازل اولیه که یک نازل همگرا واگرا است می‌شود و سپس در این نازل شتاب می‌گیرد تا در خروجی نازل، جریان به سرعت ما فوق صوت برسد. سیال اولیه در نازل اجکتور، تا فشار ( $P_2$ ) به صورت ایزنتروپیک منبسط می‌شود و با سیال ثانویه در فشار ثابت و در محفظه اختلاط، مخلوط می‌گردد. اختلاط تا قبل از ورود به ناحیه قطر ثابت کامل می‌شود و سیال مخلوط شده با همان فشار ( $P_3 = P_2$ ) با سرعت مافوق صوت به ناحیه قطر ثابت وارد می‌گردد. در این ناحیه بواسطه حضور یک شوک قائم که اثر تراکمی قوی بر سیال دارد، فشار تا ( $P_5$ ) افزایش می‌یابد و سیال با سرعت مادون صوت به دیفیوزر وارد شده تا ( $P_e$ ) متراکم می‌گردد. فشار جریان ثانویه در آستانه ورود به دیفیوزر خروجی و تحت تأثیر جریان اولیه افزایش یافته و بسته به پارامترهای مختلف هندسی اجکتور قابلیت تأمین فشار مورد نظر را در خروجی دارد.

لذا با توجه به محاسبه مجموع مصارف بخار جهت بخش های اداری برابر با 1028 kg/hr به راحتی می‌توان دریافت که بخار فلاش موجود در مخزن کندانس (1150 kg/hr) جهت تأمین بخار این بخش ها قابل استفاده می‌باشد. همانطور که از داده‌های جدول فوق مشاهده می‌شود، به دلیل فشار خیلی کم در مخزن کندانس و وجود مسیر طولانی از مخزن کندانس به سایر مصرف‌کننده که منجر به افت فشار می‌شود، همچنین وجود جریان فشاربالای بخار، لذا استفاده از یک ترموکمپرسور جهت تأمین بخار فشار متوسط مورد نیاز مصرف‌کننده‌ها می‌تواند کارساز باشد. با توجه به شرایط فوق و جهت بازیابی و استفاده از انرژی بخار اتلافی، طرح استفاده از اجکتور برای بازیابی فشار بخار برگشتی به مخزن کندانس و استفاده از آن برای تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز در تأسیسات مشخص شده در جدول (۲)، به صورت شکل (۲) پیشنهاد شده است.



شکل ۳ نمودار شماتیک تغییرات فشار و عدد ماخ در راستای یک اجکتور

از آنجا که عملکرد یک اجکتور به فاکتورهایی چون سطح مقطع نازل سیال محرک و گلوگاه ونتوری، فشار سیال محرک، فشار مکش، فشار خروجی، نسبت گرماهای ویژه، وزن‌های مولکولی و دمای سیال مکش یافته و سیال محرک بستگی دارد؛ لذا برای طراحی اجکتور مطابق نیازمندی‌های سیستم از روش‌های مختلف استفاده می‌شود که با توجه به فشار مکش یا در واقع خلأ مورد نیاز، فشار خروجی و فشار سیال محرک، مقدار بهینه نسبت سطح مقطع دیفیوزر و نازل را تعیین می‌کند. یکی از پارامترهای مهم اجکتور "نسبت مکش" بوده و به صورت نسبت دبی سیال مکش شده به دبی سیال محرک



شکل ۲ فرآیند طراحی شده برای نصب اجکتور روی مخزن کندانس

### ۳- اصول کلی عملکرد اجکتور و نمونه اولیه اجکتور مورد نظر جهت استفاده در سیکل بازیافت حرارت بخار

شکل (۳) تغییرات فشار و سرعت (عدد ماخ) جریان بخار اولیه (محرک) و ثانویه داخل یک اجکتور را به صورت کیفی و شماتیک نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود

جدول ۳ ابعاد و مشخصات هندسی اجکتور اولیه

ابعاد (mm)	پارامتر
۱۲	قطر ورودی نازل
۵/۵	قطر گلوگاه
۸/۸	قطر خروجی
۲۳	طول ورودی تا گلوگاه (ناحیه همگرا)
۴	طول گلوگاه
۴۶	طول گلوگاه تا خروجی (ناحیه واگرا)
۲۸	قطر ورودی
۱۴	قطر گلوگاه
۳۴	قطر خروجی
۳۷	طول ورودی تا گلوگاه (ناحیه همگرا)
۱۴۳	طول گلوگاه
۲۲۱۰	طول گلوگاه تا خروجی (ناحیه واگرا)

#### ۴- تحلیل و طراحی اجکتور در سیکل بازیافت انرژی بخار اتلافی

در این بخش دو رویکرد برای طراحی اجکتور از طریق تحلیل و شبیه‌سازی عملکرد آن در سیستم بازیافت انرژی بخار مورد نظر دنبال می‌شود. رویکرد اول مدل‌سازی ریاضی اجکتور با معادلات یک‌بعدی و رویکرد دوم مدل‌سازی عددی جریان در اجکتور به کمک دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی عملکرد و انتخاب پارامترهای مهم هندسی آن می‌باشد. در نهایت برای اطمینان از نتایج و خروجی‌های درست و قابل اطمینان نتایج دو رویکرد با هم مقایسه و صحت‌گذاری می‌شوند.

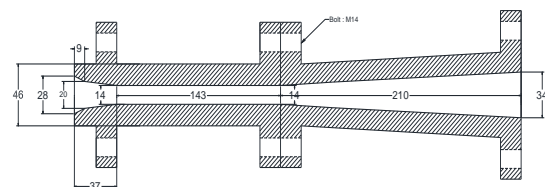
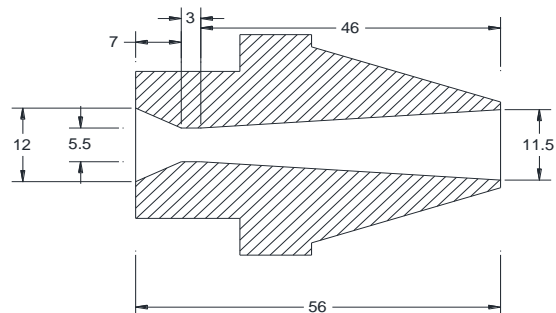
#### ۴-۱- مدل‌سازی ریاضی اجکتور با معادلات یک‌بعدی

به‌طور کلی جهت طراحی اجکتور با مدل ریاضی دو روش وجود دارد. این دو روش شامل اختلاط جریان بخار محرک و بخار مکش در فشار ثابت و یا در مساحت ثابت است [۱۱، ۱۰]. با توجه به شرایط اشاره شده برای کاربرد اجکتور جهت بازیافت فشار و انرژی بخار اتلافی در مخزن کندانس، در این مطالعه از روش فشار ثابت استفاده می‌شود.

مراحل حل این روش، به‌صورت یک الگوریتم کامل در شکل (۵) آمده است [۱۰].

تعریف می‌شود. همچنین پارامترهای "نسبت تراکم" و "نسبت انبساط" به ترتیب نسبت فشار در خروجی اجکتور به فشار مکش و نسبت فشار جریان اولیه (محرک) به فشار مکش می‌باشند. در واقع اجکتور مطلوب، اجکتوریست که با توجه به نوع سیال (سیالات) مورد استفاده و شرایط ترمودینامیکی آنها، بیشترین مقدار نسبت مکش را به ازای ثابت ماندن سایر شرایط ایجاد کند.

در شکل (۴) تصویر نمونه‌ای از یک اجکتور جهت استفاده در سیستم بخار و همچنین ابعاد نازل و دیفیوزر اجکتور اولیه بر حسب میلی‌متر نشان داده شده است. جزئیات هندسی اجکتور مورد نظر در جدول (۳) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که با توجه به در دسترس بودن این اجکتور جهت تست، این ابعاد به عنوان ابعاد اولیه در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته و سپس ابعاد بهینه از طریق مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی بر اساس نیازمندی‌های سیستم به‌دست می‌آید.



شکل ۴ تصویری از نازل و دیفیوزر اجکتور و ابعاد نازل و دیفیوزر اجکتور اولیه

که در آن  $m_p$  دبی جریان محرک،  $m_e$  دبی جریان مکش و  $m_c$  بخار مخلوط در خروجی دیفیوزر است. نسبت جریان

$$\omega = \frac{m_e}{m_p} \quad (5)$$

نسبت تراکم

$$k = \frac{p_c}{p_e} \quad (6)$$

نسبت انبساط

$$Er = \frac{p_p}{p_e} \quad (7)$$

عدد ماخ خروجی از نازل که بصورت انبساط آیزنتروپیک جریان اولیه

$$M_{P2} = \sqrt{\frac{2\eta_n}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{P_p}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (8)$$

که  $M$  عدد ماخ،  $\gamma$  ضریب انبساط آیزنتروپیک و  $P$  فشار و  $\eta_n$  راندمان نازل می باشد.

$$M_{e2} = \sqrt{\frac{2\eta_n}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (9)$$

که  $M_{e2}$  عدد ماخ سیال مکش قبل از خروجی نازل است،  $\gamma=1.3$  ضریب انبساط آیزنتروپیک می باشد. معادلات عدد ماخ بحرانی سیال محرک و سیال مکش

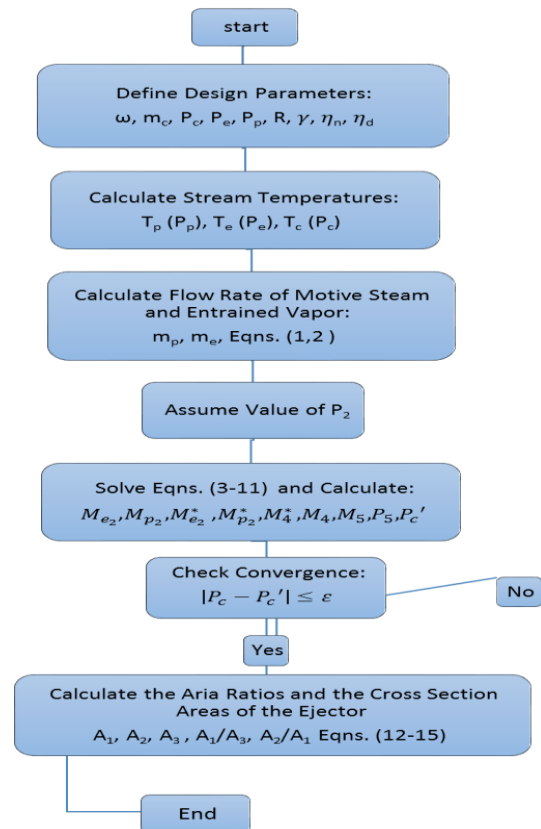
$$M_4^* = \frac{M_{P2}^* + \omega M_{e2}^* \sqrt{\frac{T_e}{T_p}}}{\sqrt{(1+\omega) \left( 1 + \omega \frac{T_e}{T_p} \right)}} \quad (10)$$

با استفاده از معادله شماره (8) اعداد ماخ  $M_4$  و  $M_{P2}^*$  و  $M_{e2}^*$  محاسبه می گردد.

$$M^* = \sqrt{\frac{M^2(\gamma+1)}{M^2(\gamma-1)+2}} \quad (11)$$

محاسبه عدد ماخ  $M_5$  که نشان دهنده شوک صورت گرفته بعد از اختلاط در ناحیه سطح ثابت دیفیوزر است:

$$M_5 = \frac{M_4^2 + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot M_4^2 - 1} \quad (12)$$



شکل ۵ الگوریتم فشار ثابت [۱۰]

حل مدل ریاضی به روش فشار ثابت بر فرضیات زیر استوار است:

- ۱- بخار محرک به صورت آیزنتروپیک در نازل منبسط می شود. همچنین مخلوط بخار محرک و مکش بطور آیزنتروپیک در دیفیوزر متراکم می شود.
- ۲- بخار محرک و مکش اشباع بوده و سرعت های ناچیز و قابل صرف نظر است.
- ۳- سرعت مخلوط متراکم خروجی از اجکتور غیر قابل ملاحظه است.
- ۴- توان ثابت انبساط آیزنتروپیک و رفتار گاز ایده آل
- ۵- اختلاط بخار محرک و مکش در محفظه ورودی دیفیوزر اتفاق می افتد.
- ۶- جریان آدیاباتیک است.
- ۷- جریان اجکتور یک بعدی بوده و در شرایط پایدار کار می کند.
- ۸- تلفات اصطکاکی به صورت بازده آیزنتروپیک در نازل، دیفیوزر و محفظه اختلاط تعریف می شود [۱۲].
- ۹- بخار محرک و بخار کشیده شده دارای وزن مولکولی و نسبت گرمایی ویژه یکسانی هستند.

معادله بقای جرم

$$m_p + m_e = m_c \quad (4)$$

این الگوریتم، ابتدا با شناسایی فشارهای ورودی محرک، مکش و خروجی از دیفیوزر و نسبت مکش در اجکتور آغاز می‌گردد و بعد از طی محاسبات به پیدا کردن فشار خروجی از نازل اجکتور توسط تکرار تا همگرایی جواب می‌انجامد و پس از آن نسبت‌های سطح گلوگاه به خروجی نازل و نیز دیفیوزر را محاسبه می‌کند.

## ۲-۴- شبیه‌سازی عددی اجکتور و شرایط مرزی

در تحلیل عددی از مجموعه نرم افزار تجاری انسیس-فلوئنت برای تولید شبکه و حل به روش حجم کنترل استفاده شده است. برای حل معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل از روش فشار-مبنا استفاده شده است. با توجه به سرعت بالای گاز درون اجکتور و در نتیجه تراکم‌پذیر بودن جریان برای حل جریان نیاز به حل همزمان معادله انرژی می‌باشد. رفتار گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده و جریان به صورت پایا حل گردیده است. با توجه به استفاده اکثر محققین از مدل آشفتگی k-ε واقعی شده که خود نمونه بهبود یافته شده مدل k-ε است، استفاده شده است [۱۳، ۱۴]. برای ورودی‌ها از شرط مرزی فشار- ورودی و برای خروجی از شرط مرزی فشار خروجی با دما و فشار همان دهانه استفاده گردیده و در دیواره اجکتور فرض آدیاباتیک و شرط عدم لغزش لحاظ گردیده است.

برای جلوگیری و کاهش هرگونه خطا به علت درستی یا ابعاد نامناسب مش‌بندی میدان سیال و استقلال نتایج تحلیل از تأثیرات مش‌بندی مدل عددی، مدل‌سازی با تعداد مش‌های متفاوت از ۸۰۰۰ شبکه تا ۷۰۰۰۰ شبکه انجام شده برای بررسی تأثیر تعداد شبکه انجام گرفته و نتایج آن بر اساس پارامتر مهم خروجی "نسبت مکش" بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که به ازای تعداد بیشتر از ۲۳۰۰۰ المان، تغییر در نتایج بسیار اندک بوده و تأثیری در حل مسئله نخواهد داشت. در نتیجه با توجه به پایداری و ثابت شدن تقریبی نتایج که استقلال نتایج تحلیل را از تأثیرات شبکه‌بندی نشان می‌دهد، از تعداد ۲۳۵۰۷ المان برای کاهش زمان محاسبات استفاده شده است. شکل (۶) هندسه مدل و شبکه ایجاد شده روی آن را نشان می‌دهد. با توجه به این که فشار بخار در خط برگشتی به مخزن کندانس در زمان‌های مختلف کاری سیستم ثابت نیست و معمولاً بین ۱ الی ۲ بار بسته به شرایط تغییر می‌کند، مقدار فشار در قسمت مکش را ابتدا ۱ بار در نظر گرفته و فشار سیال ورودی اولیه (محرک) را بر اساس شرایط موجود ۱۰ بار در نظر می‌گیریم.

با توجه به اینکه از مقطع ۲ تا ۴ سطح اجکتور ثابت می‌باشد لذا فشار  $P_2=P_3=P_4$  می‌باشد و افزایش فشار در عرض موج شوک که در مقطع ۴ اتفاق می‌افتد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_5 = \frac{1 + \gamma M_4^2}{1 + \gamma M_5^2} P_4 \quad (13)$$

از معادله زیر  $P_c'$  بدست می‌آید که در صورت بزرگتر بودن اختلاف آن با  $P_c$  اولیه از مقدار مشخص  $\epsilon$  مجدد تا همگرا شدن جواب‌ها حدس اولیه را تکرار می‌کنیم:

$$P_c' = P_5 \cdot \left( \eta_d \cdot \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_5^2 + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (14)$$

که در آن  $\eta_d$  راندمان دیفیوزر می‌باشد.

پس از همگرا شدن جواب‌ها و رسیدن اختلاف به یک  $\epsilon$  مشخص به محاسبه مساحت‌ها می‌پردازیم. برای تعیین سطح گلوگاه نازل  $A_1$  خواهیم داشت:

$$A_1 = \frac{m_p}{P_p} \sqrt{\frac{RT_p}{\gamma \eta_n} \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (15)$$

نسبت مساحت گلوگاه نازل به سطح ثابت دیفیوزر برابر است با:

$$M_2^* = \sqrt{\frac{M_2^2(\gamma + 1)}{M_2^2(\gamma - 1) + 2}} \quad (16)$$

محاسبه عدد ماخ بحرانی سیال خروجی از نازل قبل از اختلاط با سیال مکش شده:

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{P_c}{P_p} \cdot \left( \frac{1}{(1 + \omega) \left( 1 + \omega \cdot \frac{T_e}{T_p} \right)} \right)^{0.5} \cdot \frac{\left( \frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)^{0.5}}{\left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \cdot \left( 1 - \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{0.5}} \quad (17)$$

نسبت مساحت گلوگاه نازل به مساحت خروجی نازل خواهیم داشت:

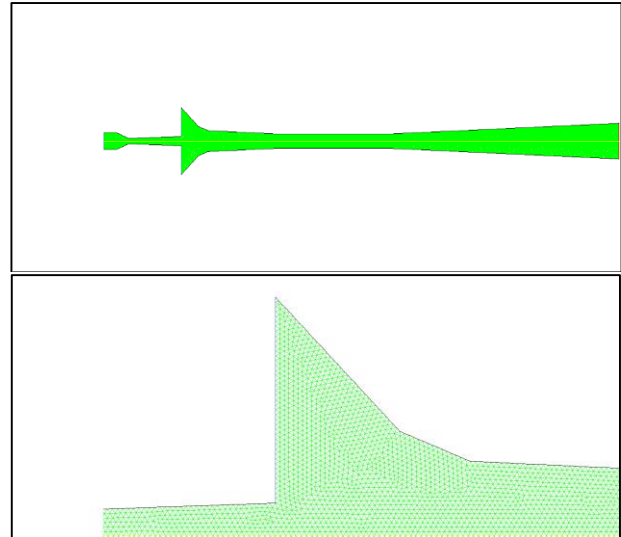
$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{1}{M_{P_2}^2} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{P_2}^2 \right) \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (18)$$

سنجی و ارزیابی شده و دقت نتایج بدست آمده بررسی می‌شود. سپس از مدل عددی اعتبارسنجی شده برای بررسی اثر پارامترهای مختلف مثل فشار خروجی و فشار مکش روی الگوی جریان داخلی و همچنین نسبت مکش اجکتور استفاده شده و نتایج آن ارائه می‌گردد. در نهایت با استفاده از مدل عددی توسعه داده شده ابعاد و مشخصات هندسی اجکتور مناسب با توجه به سیکل بازیابی حرارتی بخار تعریف شده و نرخ جرمی بخار اتلافی سیستم (از مخزن بخار برگشتی) و محدوده دبی بخار محرک تعیین می‌شود.

#### ۵-۱- ارزیابی صحت نتایج تحلیل عددی اجکتور

جهت بررسی صحت و همچنین ارزیابی نتایج مدل عددی، داده‌های حاصل از نتایج حل عددی (CFD) با نتایج مدل ریاضی اجکتور در شرایط مشابه مقایسه شده است. برای انجام این کار یک اجکتور با مشخصات هندسی نمایش داده شده در شکل (۴) و جدول (۳) (با نسبت قطر  $d_2/d_1$  مشخص برابر  $2/0.909$ ) به کمک نرم افزار به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی انجام شده مقدار فشار خروجی اجکتور ۲۰۰ کیلوپاسکال (معادل فشار بخار مطلوب برای تأمین گرمایش هیترهای تأسیسات)، فشار تحریک ۱۰۰۰ کیلوپاسکال (معادل فشار خط بخار فشار بالای کارخانه) و دبی بخار اولیه  $0.331$  کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت مکش اجکتور در فشارهای مکش مختلف به عنوان خروجی مدل محاسبه شده است (با فرض ثابت بودن فشار تحریک اجکتور، فشار خروجی اجکتور و همچنین دبی اولیه ورودی به اجکتور به عنوان ورودی‌های مدل). همچنین داده‌های ورودی فوق در معادلات ریاضی (۱) تا (۱۵) قرار داده شده و با استفاده از الگوریتم فشار ثابت (شکل ۵) مقادیر نسبت مکش در فشارهای مکش مختلف (در محدوده فشار بخار اندازه‌گیری شده در مخزن کندانس برگشتی کارخانه) محاسبه شده است.

در جدول (۴) نسبت مکش بدست آمده از تحلیل عددی با نسبت مکش محاسبه شده از مدل ریاضی اجکتور در فشارهای مکش مختلف مقایسه و خطای محاسباتی به صورت اختلاف نتایج روش عددی و روش تحلیلی به صورت درصدی از مقادیر عددی به عنوان محاسبه و ثبت شده است. همانطور که دیده می‌شود، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج مدل تحلیلی تطابق بسیار خوبی دارند و می‌توان به منظور اطمینان از صحت نتایج به آن تکیه نمود.



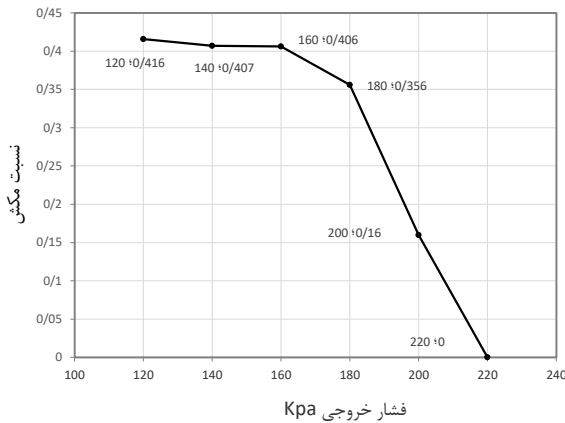
شکل ۶ هندسه مدل و شبکه ایجاد شده روی آن

فشار خروجی اجکتور جهت تأمین بخار مورد نیاز گرمایش بخش‌های اداری با توجه به تقاضای بخار در شرایط کاری مختلف در این بخش‌ها، متغیر و بین ۱۲۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. علت نیاز به فشار متغیر در خروجی اجکتور می‌باشد. علت انتخاب خروجی اجکتور در فشارهای مختلف این است که حداقل و حداکثر فشار مورد نیاز جهت تأمین گرمایش هیترها بسته به شرایط فصلی و ساعات کاری، بین ۱۲۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال (۱/۲ تا ۲ بار) می‌باشد. بنابراین فشار خروجی از دیفیوزر به صورت متغیر در فشار ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار داده می‌شود تا عملکرد اجکتور مورد نظر در حالات مختلف ارزیابی گردد. با توجه به شرایط فوق شرایط مرزی با مشخص بودن فشار در ورودی‌ها و خروجی‌ها به شرح زیر اعمال گردیده و نسبت مکش در اجکتور به عنوان پارامتر مهم خروجی در تحلیل و طراحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ورودی اولیه (محرک): شرایط مرزی فشار ورودی ۱۰ بار مقدار دهی می‌شود. خروجی: شرایط مرزی فشار خروجی که مقدار آن متغیر بوده و در محدوده بالا بررسی می‌گردد. ورودی ثانویه (مکش): شرایط مرزی فشار ورودی و مقدار آن بر اساس مقدار تجربی ۱ بار نظر گرفته شده است. دیواره: شرط عدم لغزش برای معادلات مومنتموم و آدیاباتیک برای معادلات انرژی حاکم می‌باشد.

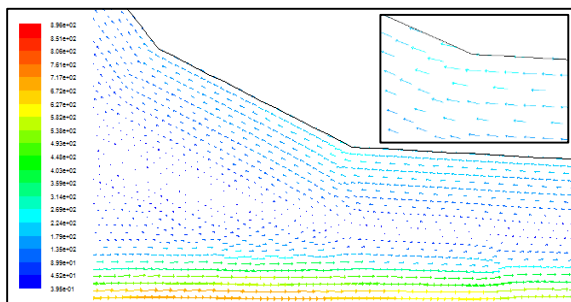
#### ۵- نتایج

در این قسمت ابتدا نتایج مدل‌سازی عددی اجکتور از طریق روابط تحلیلی و تجربی ارائه شده در بخش (۴-۱) صحت

شوک قائم در قسمت سطح ثابت اجکتور افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش عدد ماخ در سطح ثابت دیفیوزر در مواجهه با کاهش فشار در خروجی اجکتور می‌باشد. برای بررسی این موضوع باید تغییرات عدد ماخ در نواحی مختلف اجکتور در فشارهای مختلف خروجی مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۷ نمودار تغییر نسبت مکش با فشار خروجی



شکل ۸ کانتور سرعت جریان برگشتی برای فشار خروجی ۲۲۰ kpas

شکل (۹) کانتورهای عدد ماخ در فشارهای خروجی مختلف در اجکتور از ۱۱۰ تا ۲۲۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. همانطور که در کانتورهای عدد ماخ در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در فشارهای خروجی کمتر از ۱۸۰ کیلوپاسکال موج شوک در گلوگاه اجکتور مشاهده می‌شود. بنابراین برای عملکرد مناسب اجکتور از لحاظ تشکیل شوک عمودی، پس فشار اجکتور نباید کمتر از این مقدار در نظر گرفته شود. در مجموع با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین محدوده فشار خروجی اجکتور (پس فشار) که هم بتواند عملکرد مناسبی به لحاظ نسبت مکش، اختلاط و انتقال جریان و همچنین پیش‌گیری از شکل‌گیری امواج شوک داشته باشد و هم بتواند میزان فشار بخار مورد نیاز را برای هیترهای کارخانه به لحاظ جبران افت فشار و غیره تأمین نماید، فشار بخار خروجی اجکتور در محدوده حدود ۱۷۰ تا ۱۹۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

جدول ۴ مقایسه نتایج حل یک‌بعدی با حل عددی در نسبت قطر دیفیوزر ثابت برابر با ۲/۰۹

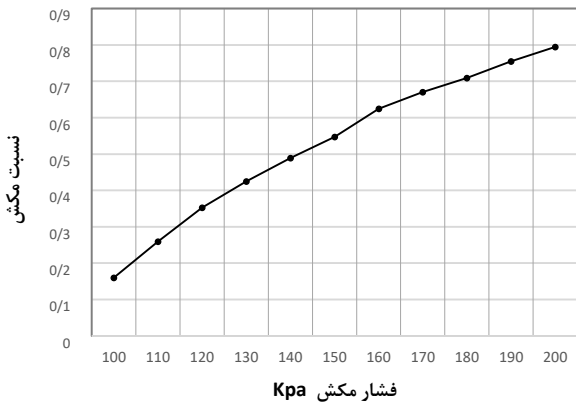
درصد خطا	نسبت مکش حل یک‌بعدی	نسبت مکش حل عددی	فشار مکش
-۱/۲۸	۰/۲۶۲	۰/۲۵۹	۱۱۰
-۰/۶	۰/۳۵۵	۰/۳۵۳	۱۲۰
-۰/۰۱۴	۰/۴۲۵۶	۰/۴۲۵	۱۳۰
۰/۴۹	۰/۴۸۷	۰/۴۸۹	۱۴۰
۰/۹۷	۰/۵۶۸	۰/۵۷۴	۱۵۰
۱/۳۷	۰/۶۱۴	۰/۶۲۵	۱۶۰
۱/۷۶	۰/۶۵۸	۰/۶۷۰	۱۷۰

## ۵-۲- بررسی اثر تغییرات فشار خروجی اجکتور روی جریان داخلی و نسبت مکش

شکل (۷) تغییرات نسبت مکش اجکتور را با فشار خروجی اجکتور در سیکل بخار مورد نظر در محدوده ۱۲۰ تا ۲۲۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش فشار خروجی تا مقدار حدود ۱۸۰ کیلوپاسکال نسبت مکش تغییرات زیادی نداشته و تقریباً ثابت می‌ماند. اما با افزایش فشار خروجی بیشتر از ۱۸۰ کیلوپاسکال کاهش شدید و ناگهانی در نسبت مکش رخ می‌دهد که این به معنای کاهش شدید مکش از مخزن کندانس نسبت به دبی بخار محرک بوده و منجر به عملکرد نامطلوب اجکتور در فشارهای بیشتر از این مقدار در خروجی اجکتور می‌شود.

همچنین نتایج شبیه‌سازی جریان در اجکتور در حالات مختلف نشان می‌دهد که در فشار خروجی حدود ۲۲۰ کیلوپاسکال، در ناحیه مکش جریان برگشتی رخ داده و مکش بخار به دلیل جریان برگشتی در این ناحیه به صفر نزدیک می‌شود. این پدیده به علت ایجاد تغییر و دگرگونی در الگوی جریان در ناحیه اختلاط رخ داده و جریان به سمت ناحیه مکش بر می‌گردد. این موضوع در بردارهای سرعت نشان داده شده در شکل شماره (۸) قابل مشاهده می‌باشد.

برای رسیدن به نسبت مکش مطلوب، فشار خروجی باید در حدی تنظیم شود که نسبت مکش مناسبی در اجکتور داشته باشیم. بنابراین فشارهای خروجی پایین‌تر از حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال برای حفظ نسبت مکش در حد مورد قبول و جلوگیری از جریان برگشتی به نظر مناسب می‌آیند. اما از طرف دیگر با کاهش فشار خروجی احتمال ایجاد و شدت گرفتن



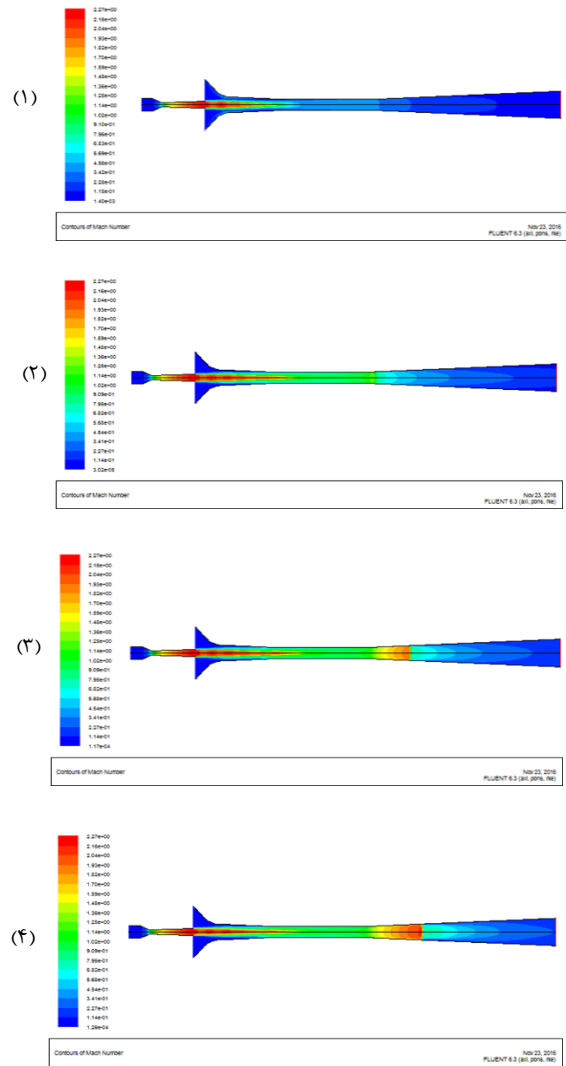
شکل ۱۰ نمودار تغییرات نسبت مکش با تغییر فشار مکش در فشار خروجی **200 Kpa**

جدول ۵ تغییرات نرخ بخار ورودی و خروجی در فشار بخار اولیه ۱۰۰۰ کیلوپاسکال

نسبت مکش	نرخ بخار خروجی (kg/s)	نرخ بخار مکش (kg/s)	فشار بخار اولیه (Kpa)	فشار مکش (Kpa)
۰/۲۵۹	۰/۰۴۱۷	۰/۰۰۸۶	۰/۰۳۳۱	۱۱۰
۰/۳۵۳	۰/۰۴۴۹	۰/۰۱۱۷	۰/۰۳۳۱	۱۲۰
۰/۴۲۵	۰/۰۴۷۳	۰/۰۱۴۱	۰/۰۳۳۱	۱۳۰
۰/۴۸۹	۰/۰۴۹۳	۰/۰۱۶۲	۰/۰۳۳۱	۱۴۰
۰/۵۷۴	۰/۰۵۲۳	۰/۰۱۹۰	۰/۰۳۳۱	۱۵۰
۰/۶۲۵	۰/۰۵۴۰	۰/۰۲۰۷	۰/۰۳۳۱	۱۶۰
۰/۶۷۰	۰/۰۵۵۴	۰/۰۲۲۲	۰/۰۳۳۱	۱۷۰
۰/۷۰۹	۰/۰۵۶۶	۰/۰۲۳۵	۰/۰۳۳۱	۱۸۰
۰/۷۵۵	۰/۰۵۸۲	۰/۰۲۵۰	۰/۰۳۳۱	۱۹۰
۰/۷۹۴	۰/۰۵۹۶	۰/۰۲۶۳	۰/۰۳۳۱	۲۰۰

**۵-۴- محاسبه ابعاد مناسب اجکتور جهت کاربرد در سیکل بازیابی حرارت اتلافی بخار کندانس برگشتی**

اگر بطور میانگین فشار مکش و یا به عبارت دیگر فشار مخزن برگشتی (فشار مکش اجکتور) را ۱۷۰ کیلو پاسکال در نظر بگیریم، در نتیجه با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول (۵) (با ابعاد اجکتور موجود)، مقدار بخار مکش شده برابر با ۰/۰۲۲۲ کیلوگرم بر ثانیه یا ۸۰ کیلوگرم بر ساعت خواهد بود. اما با توجه به مشخصات و نیازمندی‌های سیکل بازیابی حرارتی پیشنهاد شده برای کارخانه (ارائه شده در جدول (۲))، مقدار بخار ونت شده (۱۱۵۰ کیلوگرم بر ساعت) بسیار بیشتر از مقدار



شکل ۹ کانتور تغییرات عدد ماخ در جریان درون اجکتور نسب به فشار خروجی (۱) ۲۲۰ و (۲) ۱۸۰ و (۳) ۱۴۰ و (۴) ۱۱۰ کیلوپاسکال

**۵-۳- بررسی اثر تغییرات فشار مکش اجکتور روی نسبت مکش**

با توجه به این امر که هرچه فشار خروجی اجکتور بالاتر باشد نسبت مکش کم تر خواهد شد، برای جبران این نقیصه می‌توان با افزایش فشار مکش، نسبت مکش را بیشتر نمود. در شکل (۱۰) تغییرات نسبت مکش با افزایش فشار ثانویه (مکش) نشان داده شده است.

با توجه به تجربه نویسندگان، فشار بخار در مخزن کندانس برگشتی معمولاً از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال در شرایط کاری مختلف (بسته به میزان تولید کارخانه) قابل تغییر می‌باشد، اندازه‌گیری شده است. بر این اساس، جدول (۵) نرخ بخار اولیه (محرک) و ثانویه (مکش) بدست آمده از شبیه‌سازی اجکتور را در یک فشار خروجی ثابت برای فشارهای مختلف مکش اجکتور نشان می‌دهد.

تخلیه می شود، پرداخته شد. برای انجام این کار، جریان جرم و انرژی در داخل اجکتور در فشارهای مختلف کاری و نیز تغییرات عدد ماخ در آن به کمک شبیه‌سازی عددی اجکتور بررسی شد. سپس به کمک نتایج مدل‌سازی عددی و با کمک الگوریتم طراحی اجکتور، بهترین محدوده فشار خروجی اجکتور (پس فشار) که هم بتواند عملکرد مناسبی به لحاظ الگوی جریان داخل اجکتور و شکل‌گیری امواج شوک داشته باشد و هم بتواند میزان فشار بخار مورد نیاز را برای هیترهای کارخانه به لحاظ جبران افت فشار و غیره تأمین نماید محاسبه شد. این محدوده فشار خروجی اجکتور قابلیت مکش نسبتاً خوبی را برای بخار اتلافی از مخزن بخار برگشتی در محدوده فشار کارکردی آن فراهم می‌آورد.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که فشار خروجی اجکتور (پس فشار) در محدوده ۱۷۰ تا ۱۹۰ کیلوپاسکال منجر به نسبت مکش مناسب در اجکتور تا حدود ۳/۵ تا ۴ می‌شود. ضمن اینکه این محدوده فشار، هم عملکرد مناسبی به لحاظ نسبت مکش، اختلاط و انتقال جریان داشته و هم از شکل‌گیری امواج شوک (در پس فشارهای پایین‌تر) جلوگیری کرده و می‌تواند فشار بخار مورد نیاز را برای هیترهای کارخانه به لحاظ جبران افت فشار و غیره تأمین نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد که فشار مکش (فشار بخار در مخزن کندانس برگشتی) از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال در شرایط کاری مختلف (بسته به میزان تولید کارخانه) قابل تغییر بوده و در این محدوده اختلالی در عملکرد اجکتور به وجود نمی‌آید هر چند نسبت مکش اجکتور تحت تأثیر فشار مکش قرار خواهد گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده به لحاظ سایز و ابعاد اجکتور، انتخاب اجکتوری با ابعاد ۳/۵ برابر مقیاس اجکتور موجود منجر به بازیافت ۹۰ درصد از انرژی اتلافی بخار شده و بنابراین از لحاظ فنی گزینه مناسبی به‌نظر می‌رسد.

## ۷- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

m	نرخ بخار
$\omega$	نسبت مکش
P	فشار برحسب کیلوپاسکال
R	ثابت گاز برای بخار آب 461.5 J/kg K
K	نسبت تراکم
Er	نسبت انبساط
M	عدد ماخ
$\gamma$	ضریب انبساط

بخار مکش اجکتور شبیه‌سازی شده می‌باشد. لذا برای تأمین بخار مورد نیاز باید ابعاد اجکتور با یک مقیاس مشخص افزایش یابد. در جدول (۶) تغییرات نرخ بخار مکش محاسبه شده با افزایش سایز اجکتور نشان داده شده است.

جدول ۶ نرخ تغییر بخار نسبت به تغییر ابعاد اجکتور برای فشار خروجی ۲۰۰ kpa و فشار ثانویه ۱۷۰ kpa

نرخ بخار خروجی (kg/hr)	نرخ بخار مکش (kg/hr)	نرخ بخار اولیه (kg/hr)	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{M_2}{M_1}$
۱۹۹	۸۰	۱۱۹	۱ برابر	۱
۸۰۲	۳۲۵	۴۷۵	۲ برابر	۲
۱۲۶۰	۵۰۷	۷۴۵	۲/۵ برابر	۳
۱۸۱۴	۷۳۸	۱۰۷۲	۳ برابر	۴
۲۴۷۷	۱۰۰۸	۱۴۶۱	۳/۵ برابر	۵

با بزرگ‌تر شدن ابعاد اجکتور مقدار نرخ بخار مکش نیز بیشتر شده و هم‌زمان با آن نرخ بخار اولیه نیز بیشتر می‌گردد. لذا با لحاظ کردن ملاحظات اقتصادی برای مصرف بهینه بخار اولیه و حداکثر میزان مکش می‌توان انتخاب اجکتور را انجام داد. با توجه به میزان بخار ونت شده از مخزن بخار برگشتی که برابر با ۱۱۵۰ کیلوگرم بر ساعت است می‌توان با انتخاب مدل ۳ از جدول (نرخ بخار مکش ۵۰۷ کیلوگرم بر ساعت) نزدیک به ۴۵٪ بخار ونت شده از مخزن برگشتی را بازیافت کرده و بنابراین حدود نیمی از مصرف بخار تولیدی بویلر صرفه‌جویی کرد. همچنین با انتخاب مدل ۵ تقریباً ۹۰٪ بخار ونت شده قابل بازیافت خواهد بود. در نهایت انتخاب مدل و مقیاس نهایی اجکتور با توجه به ملاحظات اقتصادی طرح قابل انجام خواهد بود.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه‌های رو به افزایش مصرف انرژی و استفاده صنایع از تجهیزات و فناوری‌های جدید برای کاهش آن؛ اجکتورها و یا ترموکمپرسورها برای صنایعی مانند صنایع غذایی، شیمیایی، عمران، کاغذ و تهویه مطبوع و تبرید می‌توانند یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی در این صنایع باشند. در این تحقیق ضمن تحلیل اولیه انرژی در بخش توزیع بخار کارخانه روغن‌کشی، به بررسی استفاده از اجکتور در بخش بخار برگشتی برای بازیابی این بخار که در حال حاضر به اتمسفر

راندمان  $\eta$ 

سطح مقطع مترمربع A

دما برحسب کلوین T

ناحیه مکش e

ناحیه ورودی نازل p

ناحیه خروجی اجکتور c

نازل n

دیفیوزر d

گلوگاه نازل ۱

خروجی نازل ۲

گلوگاه دیفیوزر ۳

## ۸- مراجع

- [7] E. Rusly, L. Aye, W. W. S. Charters, and A. Ooi, "CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 7, pp. 1092-1101, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.02.005>.
- [8] J. Han *et al.*, "Experimental and numerical study on the ejector containing condensable species in the secondary flow for PEM fuel cell applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 232, p. 121091, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121091>.
- [9] J. Gao, Z. Yuan, Y. Hou, and W. Chen, "Numerical study on the influence of plugging rate on the performance of adjustable steam ejector," *International Journal of Fluid Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 023903, 2024, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0204421>.
- [10] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 41, no. 6, pp. 551-561, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(01\)00176-3](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(01)00176-3).
- [11] W. Sun, C. Liu, H. Zhang, W. Sun, H. Xue, and L. Jia, "Numerical analysis of two-stage vacuum ejector performance considering the influence of phase transition and non-condensable gases," *Applied Thermal Engineering*, vol. 213, p. 118730, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118730>.
- [12] D. Guo, J. Wang, and Z. Zhu, "Numerical investigation on performance optimization of steam ejector considering full geometric parameters and working conditions," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 59, p. 104552, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104552>.
- [13] B. Kittrattana, S. Aphornratana, and T. Thongtip, "Investigation on improvement potential of steam ejector performance in refrigeration cycle via constant rate of momentum change design method," *Applied Thermal Engineering*, vol. 231, p. 120953, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120953>.
- [14] R. Rastafi and A. Dehghan, "Study of the solver type and turbulence model in numerical simulation of a supersonic steam ejector ", (in persian), 32nd annual international conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers, Arak, Iran, 2024. <https://civilica.com/doc/2019920>.
- [1] A. Sarvarodin, S. M. Seydmahmoodi, and S. F. Ranjbar, "Experimental analysis of Rankin and steam compression compact using ejector," (in persian), *Energy Engineering and Management*, vol. 1, no. 2, pp. 23-30, 2010, doi: [https://energy.kashanu.ac.ir/article\\_113278](https://energy.kashanu.ac.ir/article_113278).
- [2] F. Yousefi, S. Tabatabayi, and E. Afshari, "Effect of working fluid on performance of an ejector refrigeration system ", (in persian), *Energy Engineering and Management*, vol. 3, no. 3, pp. 52-63, 2014, doi: [https://energy.kashanu.ac.ir/article\\_113325\\_9bf0408d058f5e1a0a72d998b100cb4e.pdf](https://energy.kashanu.ac.ir/article_113325_9bf0408d058f5e1a0a72d998b100cb4e.pdf).
- [3] E. Ghahramani, B. Haghghi, and A. Saleh, "Assessment of effective parameters on ejector performance in refrigeration system," *Applied Energy Conversion*, vol. 1, no. 1, pp. 28-37, 2022, doi: [10.22077/aec.2022.5334.1011](https://doi.org/10.22077/aec.2022.5334.1011).
- [4] S. Khalili Sarbangoli and L. Garousi Farshi, "Thermodynamic analysis of a new hybrid-ejector heat pump and comparison with the hybrid heat pump," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 8, pp. 423-432, 2017, doi: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-4509-fa.html>.
- [5] S. B. Riffat and S. A. Omer, "CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid," *International Journal of Energy Research*, vol. 25, no. 2, pp. 115-128, 2001, doi: <https://doi.org/10.1002/er.666>.
- [6] P. Desevaux, A. Mellal, and Y. Alves de Sousa, "Visualization of secondary flow choking phenomena in a supersonic air ejector," *Journal of Visualization*, vol. 7, no. 3, pp. 249-256, 2004, doi: [10.1007/BF03181640](https://doi.org/10.1007/BF03181640).

## مدل سازی عددی نوین برای پیش بینی دقیق و بهینه سازی عملکرد مبدل های کاتالیستی

**چکیده:** این مطالعه یک مدل عددی برای مبدل های کاتالیستی در متلب توسعه داده که با ترکیب سینتیک پیچیده و انتقال جرم، دقت پیش بینی را افزایش می دهد. برخلاف مدل های ساده، این مدل از واکنش چندگونه ای بهره می برد که رفتار واقعی مبدل را بهتر شبیه سازی می کند. اعتبارسنجی با داده های تجربی نشان داد اختلاف بازده تبدیل برای متان، مونوکسید کربن و اکسید نیتروژن به ترتیب به  $8.72\%$ ،  $5.00\%$  و  $12.6\%$  کاهش یافته است. پارامترهایی مانند دبی حجمی، طول مبدل و غلظت اکسیژن تأثیر زیادی بر عملکرد دارند. افزایش دبی از  $0.05$  به  $1$  متر مکعب بر ثانیه در دمای  $500$  کلوین باعث کاهش راندمان و افزایش دمای روشن شدن بیش از  $80$  کلوین شد. افزایش طول مبدل از  $0.05$  به  $0.3$  متر در دمای  $550$  کلوین، راندمان تبدیل مونوکسید کربن و اکسید نیتروژن را بیش از  $40\%$  بهبود داد. افزایش غلظت اکسیژن تبدیل مونوکسید کربن و متان را افزایش داد؛ اما کاهش اکسید نیتروژن را کاهش داد. افزایش غلظت مونوکسید کربن در گاز خروجی، دمای روشن شدن متان و مونوکسید کربن را افزایش و دمای روشن شدن اکسید نیتروژن را کاهش داد. کنترل غلظت مونوکسید کربن و بهینه سازی طول مبدل عملکرد را بهبود می دهد، هرچند افزایش طول مبدل ممکن است هزینه و افت فشار را بالا ببرد.

**واژه های راهنما:** مبدل کاتالیستی، مدلسازی عددی، سینتیک واکنش، انتقال جرم، بهینه سازی عملکرد

### میر ابوالفضل مختاری\*

دانشیار،  
دانشکده مهندسی و پرواز،  
دانشگاه امام علی (ع)، تهران

### میثم جلالوند

محقق مستقل، کارشناس معاونت  
تحقیقات و جهاد خودکفایی  
هوانیروز، تهران

### مهدی سعادت پور

محقق مستقل،  
کارشناس ارشد مهندسی شیمی،  
گرایش طراحی فرآیند، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

### Abolfazl Mokhtari\*

Associate Professor,  
Flight and Engineering  
Department, Imam Ali  
University, Tehran

### Meysam Jalalvand

Independent Researcher &  
Expert of the Deputy of  
Research and Self-  
sufficiency Army Aviation,  
Tehran

### Mahdi Saadati pour

Independent Researcher &  
Expert of Chemical  
Engineering Process Design,  
Tehran

## Advanced numerical modeling for accurate prediction and optimization of catalytic converter performance

**Abstract:** This study develops a one-dimensional numerical model for catalytic converters implemented in MATLAB, integrating complex reaction kinetics and mass transfer to enhance predictive accuracy. Unlike simplified models, the proposed framework employs multi-species reaction mechanisms, enabling a more precise simulation of real converter behavior. Validation against experimental data demonstrated reductions in the discrepancy of conversion efficiencies for methane, carbon monoxide, and nitrogen oxide to 8.72%, 5.00%, and 12.6%, respectively. Key operational parameters—including volumetric flow rate, converter length, and oxygen concentration—significantly influence performance. Increasing the flow rate from 0.05 to 1 m<sup>3</sup>/s at 500 K decreased conversion efficiency and raised light-off temperature by over 80 K. Extending the converter length from 0.05 to 0.3 m at 550 K enhanced carbon monoxide and nitrogen oxide conversion efficiencies by more than 40%. Higher oxygen concentrations improved methane and carbon monoxide conversion but reduced nitrogen oxide reduction efficiency. Additionally, elevated carbon monoxide levels in the exhaust increased the light-off temperatures of methane and carbon monoxide while lowering that of nitrogen oxide. These findings suggest that controlling carbon monoxide concentration and optimizing converter length can substantially improve catalytic performance, though longer converters may increase cost and pressure drop.

**Keywords:** Waste energy recovery, Steam, Ejector, Suction ratio, Condensate tank

## ۱- مقدمه

متان و بهبود فرآیند کاتالیستی می‌شود [۱۷]. وانگ و همکاران روش‌های حذف متان در موتورهای گاز طبیعی را بررسی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که تغییر شکل با بخار موجب بهبود احتراق متان می‌شود. این نتایج از طریق شبیه‌سازی عددی به دست آمد [۱۸]. بونه‌شادا و همکاران عملکرد کاتالیست سریم-زیرکونیوم را برای کاهش انتشار متان در گازهای خروجی وسایل نقلیه گازسوز مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پالس‌های تناوبی غنی در سوخت رقیق، عملکرد پایدار کاتالیست را حفظ می‌کند و نرخ تبدیل متان در شرایط غنی افزایش می‌یابد [۹]. تان و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی سیالات محاسباتی تأثیر پارامترهای گاز خروجی را بر عملکرد یک مبدل کاتالیستی پالادیوم-رودیوم در موتورهای سنگین گازسوز تحلیل کردند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت کربن مونوکسید در گاز خروجی، بازده تبدیل متان و مونوکسید نیتروژن را به ترتیب ۸/۱٪ و ۴۱/۸٪ در دمای ۶۲۳ کلوین افزایش می‌دهد. این مطالعه غلظت اکسیژن در گاز خروجی را به‌عنوان مؤثرترین عامل در بازده تبدیل متان و کربن مونوکسید شناسایی کرد، در حالی که برای تبدیل مونوکسید نیتروژن، غلظت کربن مونوکسید مهم‌ترین پارامتر بود. دقت مدل‌سازی در مقایسه با داده‌های تجربی برای بازده تبدیل متان، کربن مونوکسید و نیتروژن مونوکسید به ترتیب ۲۰/۶٪، ۱۸/۳٪ و ۱۸/۹٪ گزارش شد [۱۰]. در مطالعه‌ای مشابه، تان و همکاران با استفاده از یک مدل عددی سه‌بعدی، تأثیر پارامترهای ساختاری بر عملکرد یک مبدل کاتالیستی حاوی پالادیوم-رودیوم را برای موتورهای سنگین گازسوز بررسی کردند. افزایش تراکم مبدل کاتالیستی و کاهش ضخامت دیواره، تأثیر مثبتی بر بازده تبدیل داشت. در این مطالعه قطر مبدل به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شد. دقت این مدل‌سازی مانند مطالعه قبل بود [۱۱].

مطالعات دیگر نشان می‌دهند که ترکیب گازهای خروجی در موتورهای گاز طبیعی بر عملکرد مبدل کاتالیستی سه‌گانه تأثیرگذار است و حفظ شرایط بهینه موتور، عامل کلیدی در افزایش کارایی این فرآیند محسوب می‌شود. ژانگ و همکاران عملکرد یک موتور گازسوز سنگین را تحت شرایط استوکیومتری بررسی کردند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که در تست‌های راه‌اندازی گرم، میزان انتشار کربن مونوکسید و هیدروکربن‌ها افزایش می‌یابد، درحالی‌که در راه‌اندازی سرد، میزان انتشار مونوکسید نیتروژن بیشتر است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که بهبود عملکرد کاتالیست به‌دلیل انتشار بیش‌ازحد متان، امری

با پیشرفت فناوری، موتورهای احتراق داخلی بسیار اهمیت یافته‌اند. با این حال، نمی‌توان از تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها چشم‌پوشی کرد. برای مقابله با این چالش، استفاده از مبدل‌های کاتالیستی به‌عنوان راهکاری شناخته‌شده برای کاهش انتشار گازهای مضر از فرآیندهای احتراق به‌کار می‌رود [۱]. مبدل‌های کاتالیستی دستگاه‌های کنترل انتشار هستند که به‌طور معمول در خودروها و دیگر موتورها استفاده می‌شوند. هدف آن‌ها کاهش سطح آلاینده‌های مضر، از جمله گازهای گلخانه‌ای مانند مونوکسیدکربن، اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن در گازهای خروجی قبل از انتشار به جو است [۲].

گازهای گلخانه‌ای اصلی که توسط مبدل‌های کاتالیزوری کاهش می‌یابند شامل مونوکسیدکربن، اکسید نیتروژن و هیدروکربن‌ها هستند تا از تولید موادی مانند نیتروژن در اکسید<sup>۱</sup> و آمونیاک<sup>۲</sup> جلوگیری شود. مبدل‌هایی که مسئول کاهش این سه گاز گلخانه‌ای هستند، به‌عنوان مبدل کاتالیزوری سه‌گانه شناخته می‌شوند. مبدل کاتالیستی طی سال‌ها فرآیندها و تحولات مهمی را پشت سر گذاشته‌است.

در پاسخ به مقررات سختگیرانه زیست‌محیطی، در مورد موتورهای احتراق داخلی تحقیقات زیادی در مورد سیستم مبدل کاتالیستی انجام شده است تا بتوانند به‌طور جداگانه یا همزمان آلاینده‌هایی همچون هیدروکربن نسوخته، ناکس و کربن مونوکسید را از آگروز موتورهای احتراق حذف کنند [۳]. این شامل توسعه مدل برای مبدل‌های کاتالیستی است که به‌طور جامع شیمی کاتالیستی را در سطح مولکولی توصیف می‌کند [۴]. در ادامه مطالعاتی که بر روی این مبدل‌های کاتالیستی صورت گرفته است، بیان می‌شود.

برخی تحقیقات برای افزایش تبدیل متان بر اساس استوکیومتری انجام شده‌است. گونگ و همکاران به بررسی ترکیب موجود در سوخت بر عملکرد یک کاتالیست سه‌گانه پرداختند. آن‌ها دریافتند که تبدیل مونوکسید نیتروژن و متان به یکدیگر وابسته هستند. در این مطالعه غلظت اکسیژن یک عامل مهم برای ارزیابی عملکرد مبدل کاتالیستی عنوان شد [۶]. فری و همکاران احتراق متان را در یک مبدل کاتالیستی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که عملکرد در چرخه‌های غنی یا رقیق باعث بهبود کارایی احتراق متان می‌شود. این اثر به‌ویژه در شرایط تمایل به سمت غنی مشهودتر است و منجر به افزایش نرخ تبدیل

<sup>2</sup> NH<sub>3</sub><sup>1</sup> N<sub>2</sub>O

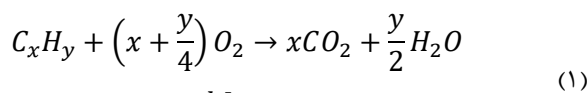
جرم، رفتار واقعی مبدل‌ها را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند. مهم‌ترین دستاوردها و نوآوری‌های این تحقیق عبارتند از: توسعه یک مدل جامع که تأثیر همزمان پارامترهای عملیاتی (از جمله دبی جریان و ترکیب گاز ورودی) و مشخصات فیزیکی مبدل (مانند طول آن) را بررسی می‌کند تأیید اعتبار مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که حاکی از دقت قابل قبول است. شناسایی روابط جدید بین پارامترهای مؤثر مانند تأثیر غیرخطی تغییرات غلظت مونوکسیدکربن بر عملکرد سیستم نتایج این مطالعه می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای طراحی بهینه مبدل‌های کاتالیستی با در نظر گرفتن توأمان جنبه‌های فنی و اقتصادی باشد. به‌طور خاص، مدل حاضر با بهره‌گیری از چارچوب واکنش چندگونه و در نظر گرفتن دقیق‌تر انتقال جرم، عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی بازدهی مبدل کاتالیستی تحت شرایط مختلف عملیاتی مانند تغییرات نرخ جریان حجمی، غلظت اکسیژن، غلظت CO و طول مبدل ارائه می‌دهد.

## ۲- مدل‌سازی

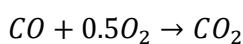
در این قسمت نحوه مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه به تفصیل بیان شده است. معادلاتی که در این قسمت به کار می‌آیند، معادلات پیوستگی، انرژی، نرخ واکنش‌ها، ممنوم و معادلات حالت است.

### ۲-۱- واکنش‌های موجود

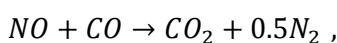
درون یک مبدل کاتالیستی واکنش‌های زیادی انجام می‌شود. با توجه به کیفیت سوخت موجود می‌توان از ترکیبات مضر سوخت که شامل گوگرد و سرب است، صرف‌نظر کرد، اما در مدل‌سازی به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود، تمام معادلات را در نظر نمی‌گیرند و تنها سه واکنش مهم را در نظر می‌گیرند که در معادلات (۱) تا (۳) آورده شده‌اند [۱۹].



$$\Delta H = -2490 \frac{kJ}{mole}$$



$$\Delta H = -283 \frac{kJ}{mole} \quad (2)$$



$$\Delta H = -2630 \frac{kJ}{mole} \quad (3)$$

ضروری است [۱۲]. هاتر و همکاران تأثیر غلظت کربن مونوکسید را بر احتراق متان در موتورها بررسی کردند. آن‌ها دریافته‌اند که در شرایط احتراق استوکیومتری، حضور کربن مونوکسید موجب افزایش دما شده و واکنش اکسیداسیون کاتالیستی را تسریع می‌کند. با استفاده از روش‌های تجربی، آن‌ها یک مدل کنترلی برای پیش‌بینی بازده تبدیل متان در شرایط رقیق توسعه دادند. این مطالعه نتیجه‌گیری کرد که کربن مونوکسید موجود در گازهای خروجی به کاهش انتشار متان کمک می‌کند [۱۳]. آوینن و همکاران دریافته‌اند که مبدل‌های کاتالیستی هیبریدی قادر به تبدیل بیش از ۹۰٪ متان هستند؛ اما مقدار بیشتری آمونیاک تولید می‌کنند. مطالعه آن‌ها نشان داد که کاتالیست‌های مرتبط با موتور دیزلی و کاتالیست‌های مرتبط با موتور با سوخت متان در محدوده گسترده‌ای از غلظت اکسیژن قابلیت احیا دارند، درحالی‌که مبدل‌های کاتالیستی سه‌گانه برای عملکرد بهینه به سطح پایینی از اکسیژن نیاز دارند [۱۴]. ژانگ و همکاران انتشار آمونیاک در موتورهای گاز طبیعی را بررسی کردند و تأثیر نسبت هوا به سوخت و سرعت موتور را در شرایط پایدار مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که انتشار آمونیاک در نسبت هوا به سوخت ۰/۹۶ نسبت به حداکثر مقدار خود می‌رسد و تحت تأثیر میزان اولیه انتشار کربن مونوکسید و اکسیدهای نیتروژن قرار دارد [۱۵]. یون و همکاران دریافته‌اند که فناوری احتراق در اتوبوس‌های مجهز به مبدل کاتالیستی سه‌گانه، میزان ترکیبات آلی فرار و کربونیل‌ها را بیش از ۹۹٪ در مقایسه با اتوبوس‌های بدون مبدل کاتالیستی کاهش می‌دهد [۱۶]. ژانگ و همکاران انتشار آلاینده‌ها را در یک موتور گازسوز بر اساس احتراق استوکیومتری با استفاده از دو نوع سوخت مرجع بررسی کردند. آن‌ها دریافته‌اند که سوخت با ارزش حرارتی بالا باعث کاهش انتشار هیدروکربن، مونوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن می‌شود؛ اما در بارهای بالا میزان انتشار این آلاینده‌ها در مقایسه با سوخت‌های با ارزش حرارتی پایین افزایش می‌یابد [۱۷]. در مطالعه‌ای دیگر، ژانگ و همکاران تأثیر مبدل کاتالیستی سه‌گانه مبتنی بر پالادیوم-سرب اکسید را بر میزان انتشار آلاینده‌ها در یک موتور بنزینی ارزیابی کردند. آن‌ها انتشار هیدروکربن، کربن مونوکسید و نیتروژن مونوکسید را همراه با دمای گازهای خروجی و مصرف ویژه سوخت بررسی کردند [۱۸].

این پژوهش به توسعه یک مدل ریاضی پیشرفته برای تحلیل عملکرد مبدل‌های کاتالیستی پرداخته است. مدل ارائه شده که در محیط نرم‌افزاری متلب پیاده‌سازی شده، قادر است با در نظر گرفتن سینتیک کامل واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های انتقال

## ۲-۲- فرضیات

$$(1 - \varepsilon)k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2} - hG_A(T_g - T_s) - \sum_{i=1}^{N_g} \Delta H_i R_i = 0 \quad (7)$$

همچنین معادله جرم در فاز جامد نیز مطابق معادله (۸) محاسبه می‌شود [۲۱].

$$k_{m,j}G_A(C_{g,j} - C_{s,j}) - R_j = 0 \quad (8)$$

ضریب انتقال جرم در مبدل کاتالیستی مطابق معادله (۹) بدست می‌آید [۲۲].

$$k_{m,i} = Sh_{\infty} \frac{D_{i,j}}{D_H} \quad (9)$$

در معادله فوق  $Sh_{\infty}$  عدد شرود است که برابر  $2/89$  در نظر گرفته شده است.  $D_{i,j}$  ضریب پخش جرمی گونه‌ها،  $D_H$  نیز قطر هیدرولیکی است. پارامتر بعدی، ضریب انتقال حرارت جابجایی است که مطابق عدد ناسلت بدست می‌آید. یعنی:

$$h = \frac{Nu_{\infty} \lambda_g}{D_h} \quad (10)$$

که در معادله فوق [۲۳]:

$$\lambda_g = 0.0241 \left( \frac{T_s + T_g}{2} \right)^{0.8} \quad (11)$$

در این مدل‌سازی عدد ناسلت نیز برابر  $2/89$  در نظر گرفته شده است [۲۳]. سه معادله (۱۲) تا (۱۴) نرخ واکنش‌های شیمیایی صورت گرفته را نشان می‌دهد [۲۴].

$$R_{HC} = \frac{k_{HC} X_{HC} X_{O_2}}{G_1} \quad (12)$$

$$R_{CO} = \frac{k_{CO} X_{CO} X_{O_2}}{G_1} + k_{CO} X_{NO}^{0.5} X_{CO}^m \quad (13)$$

$$R_{NO} = k_{NO} X_{NO}^{0.5} X_{CO}^m \quad (14)$$

که  $X$  غلظت است. همچنین ضریب سرعت واکنش نیز مطابق معادله (۱۵) محاسبه می‌شود [۲۵].

$$\lambda_g = 0.0241 \left( \frac{T_s + T_g}{2} \right)^{0.8} \quad (15)$$

فرضیات ساده شونده و همچنین معادلات مرزی در نظر گرفته شده در این مطالعه در زیر توضیح داده شده است:

- حل معادلات حاکم در حالت تک بعدی انجام شده است.
- محاسبات در حالت پایا انجام شده است.
- چگالی گاز در هنگام عبور از مبدل کاتالیزوری ثابت در نظر گرفته شده است.
- دمای دیواره کانال‌های مبدل کاتالیزوری به صورت خطی در امتداد طول کانال تغییر می‌کند.
- با روش تفاضل پسین، گسسته‌سازی صورت گرفته است.

## ۲-۳- معادلات حاکم

تحقیقات صورت گرفته بر روی مبدل‌های کاتالیستی نشان می‌دهد که مدل‌سازی یک بعدی و چند بعدی بر روی پیش‌بینی عملکرد مبدل‌های کاتالیستی تأثیر چندانی ندارد. در مدل‌های یک‌بعدی از تغییرات در راستای شعاع صرف‌نظر می‌شود و صرفاً تغییرات بر راستای محور در نظر گرفته می‌شود. علت معقول بودن این فرض این است که راستای محوری یک مبدل کاتالیستی چند برابر راستای شعاعی مبدل است؛ به طوری که شعاع مبدل‌ها در حد میکرون و راستای محوری در حد سانتی‌متر است. در ادامه معادلات حاکم بر این مبدل کاتالیستی شرح داده شده است. در یک مبدل کاتالیستی معادله (۴) معادله پیوستگی جرم را نشان می‌دهد [۲۰]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

که در آن  $\rho$ ، چگالی و  $u$  سرعت در راستای محوری است. معادله (۵) معادله انرژی در فاز گاز است [۲۱].

$$u \rho_g c_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial x} + hG_A(T_g - T_s) = 0 \quad (5)$$

که  $h$  و  $G_A$  ضریب انتقال حرارت جابجایی و مساحت تعویض جز است. همچنین معادله جرم در فاز گاز در معادله (۶) بیان شده است.

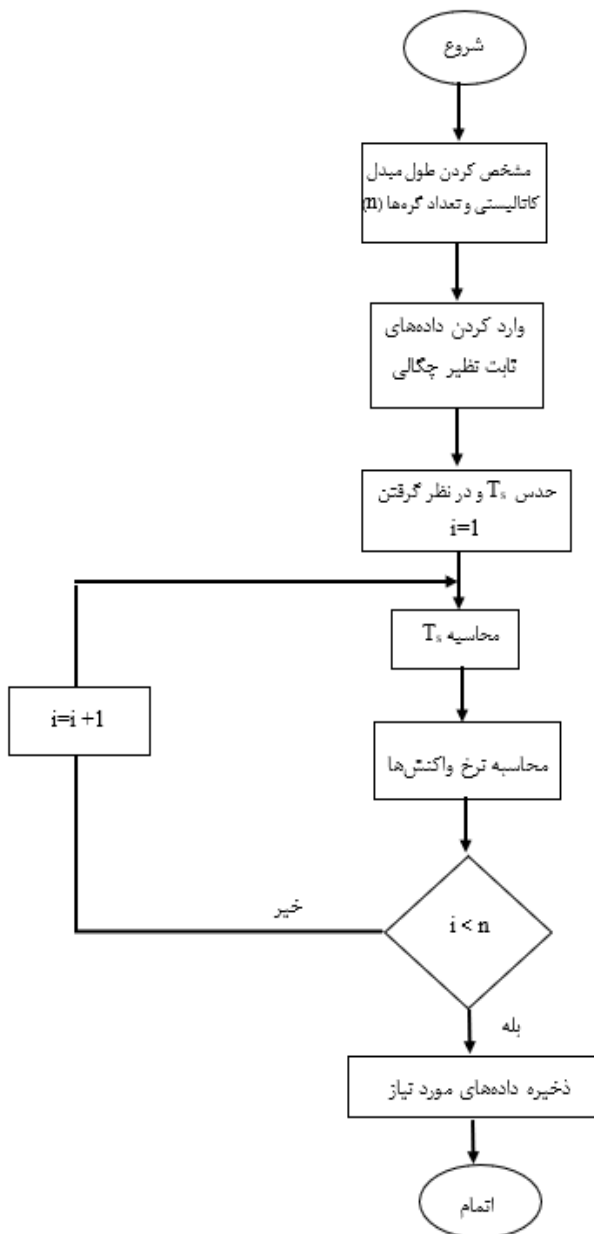
$$u \frac{\partial C_{g,j}}{\partial X} + k_{m,j}G_A(C_{g,j} - C_{s,j}) = 0 \quad (6)$$

که در این معادله،  $C$  غلظت و  $k_m$  ضریب انتقال جرم است. همچنین در معادله (۷) انرژی در فاز جامد نیز در معادله بعدی آورده شده است.

وسیله نقلیه، زمانی که آلاینده‌ها معمولاً بیشتر است، مهم است [۲۹].

## ۲-۴- روند حل

در این بخش، روند حل عددی مدل مبدل کاتالیستی در محیط نرم‌افزار MATLAB به صورت گام‌به‌گام تشریح شده است. ابتدا طول مبدل و تعداد گره‌ها به عنوان پارامترهای شبکه‌بندی تعیین می‌شوند؛ زیرا افزایش تعداد گره‌ها موجب بهبود دقت محاسبات می‌شود. سپس پارامترهای ثابت مدل مانند چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و غلظت‌های ورودی مواد وارد سیستم می‌شوند.



شکل ۱ روند حل مطالعه

که  $A$  ضریب فعالیت،  $E_{a,j}$  انرژی فعال‌سازی است. همچنین  $R$  ثابت جهانی گاز است. ضریب بعدی که باید از معادلات استخراج شود و  $m$  است که مطابق دو معادله (۱۶) و (۱۷) قابل محاسبه است [۲۶].

$$G_1 = T_s(1 + ka_1X_{CO} + ka_2X_{HC})^2 + (1 + ka_3X_{CO}^2X_{HC}^2)(1 + ka_4X_{NO}^{0.7}) \quad (16)$$

$$m = -0.19(1 - 6.26e^{-m_1X_{CO}}) \quad (17)$$

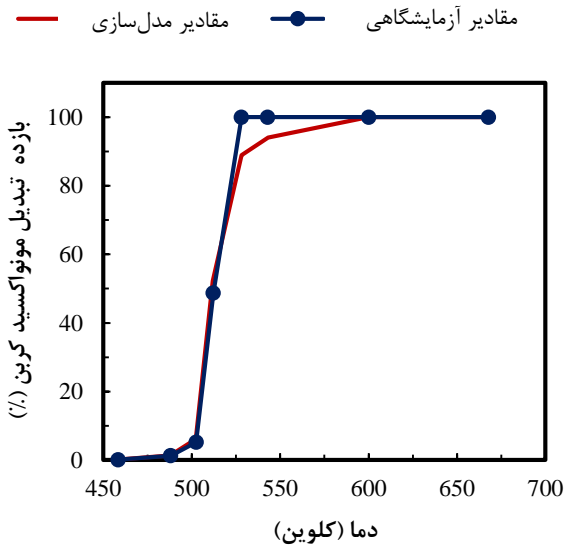
مقدار  $m_1$  برابر ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. پارامتر مهم دیگری که در مدل‌سازی مبدل‌های کاتالیزوری مؤثر است، ضریب  $\lambda$  است. این ضریب نشان‌دهنده نسبت سوخت به هوا است. با توجه به غلظت سایر اجزاء، غلظت اکسیژن باید به گونه‌ای تنظیم شود که احتراق در شرایط استوکیومتری انجام شود ( $\lambda$ ) نحوه محاسبه و بدست آوردن این ضریب در معادله (۱۸) آورده شده است [۲۷].

$$\lambda = \frac{c_{NO} + 2c_{CO_2}}{c_{CO} + \left(2x + \frac{y}{2}\right) 2c_{C_xH_y}} \quad (18)$$

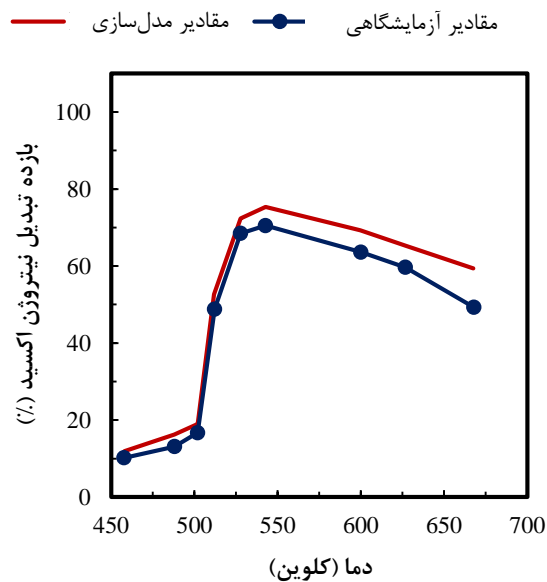
اگر این ضریب کوچکتر از یک باشد مخلوط به اصطلاح غنی و واکنش اکسیداسیون در آن به خوبی انجام نمی‌شود و اگر بزرگتر از یک باشد مخلوط به اصطلاح ضعیف است که نشان‌دهنده اکسیژن زیاد و کاهش است. واکنش به طور کامل رخ نمی‌دهد. در نتیجه، تنظیم اکسیژن نقش مهمی در تجزیه و تحلیل مبدل کاتالیستی ایفا می‌کند. پارامتر مؤثر دیگری که در شناخت عملکرد مبدل کاتالیستی اهمیت دارد، نرخ تبدیل اجزای مختلف است که مطابق معادله (۱۹) محاسبه می‌شود [۲۸].

$$\eta = \frac{c_{out,j} - c_{in,j}}{c_{out,j}} \times 100 \quad (19)$$

در زمینه مبدل‌های کاتالیزوری، دمای رو شن شدن که اغلب به عنوان T50 نشان داده می‌شود یک پارامتر حیاتی است. دمایی است که در آن کاتالیزور به اندازه کافی فعال می‌شود تا ۵۰ درصد از آلاینده‌ها (مانند هیدروکربن‌ها، کربن مونواکسید و نیتروژن اکسید) در گاز خروجی را به مواد کمتر مضر تبدیل کند. دستیابی به دمای پایین‌تر روشن شدن مطلوب است؛ زیرا به این معنی است که مبدل کاتالیزوری پس از روشن شدن موتور شروع به کاهش مؤثر انتشار گازهای گلخانه‌ای سریع‌تر می‌کند که به‌ویژه در مراحل اولیه کارکرد



(ب)



(ج)

شکل ۲ اعتبارسنجی مطالعه برای ضریب تبدیل؛ الف- متان، ب- مونواکسید کربن، ج- نیتروژن اکسید

این اختلاف عمدتاً از عدم قطعیت در سینتیک واکنش، محدودیت‌های انتقال جرم و ساده‌سازی در مدل‌سازی عددی ناشی می‌شوند که با این وجود نسبت مدل‌سازی‌های مقالات دیگر، اختلاف کمتری دارد.

### ۳-۲- بررسی پارامتری

در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی ارائه می‌شود که شامل تأثیر دبی حجمی، طول مبدل کاتالیستی، درصد غلظت اکسیژن

در ادامه، دمای دیواره مبدل در گره اول تخمین زده و با توجه به شرایط، اصلاح می‌شود. سپس در هر گره با استفاده از معادلات انتقال جرم، انرژی و نرخ واکنش، مقادیر دما و غلظت مؤلفه‌ها به صورت تدریجی محاسبه می‌گردد. این روند تا انتهای مبدل ادامه یافته و در نهایت، بازده تبدیل هر مؤلفه ذخیره و گزارش می‌شود. این فرآیند به صورت عددی و با استفاده از روش تفاضل محدود انجام می‌شود تا تعادل بین دقت و زمان محاسبه حفظ گردد که این روند در شکل (۱) آورده شده است.

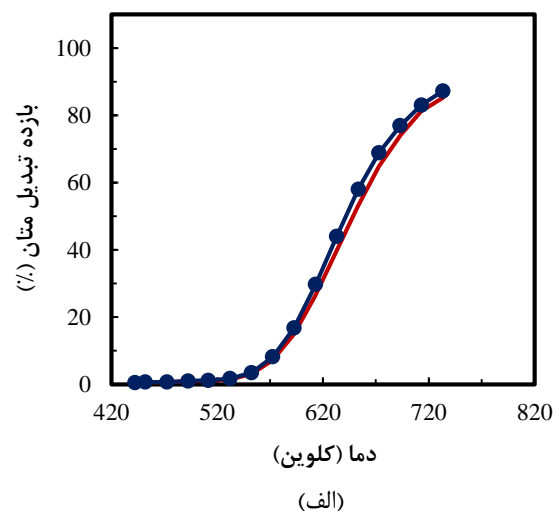
### ۳- نتایج

در این قسمت از پژوهش، تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا به اعتبارسنجی تحقیق پرداخته می‌شود و سپس نتایج به دست آمده توضیح داده خواهند شد.

#### ۳-۱- اعتبارسنجی

در این قسمت، اعتبارسنجی مبدل کاتالیستی صورت گرفته است. نتایج بدست آمده از نتایج قسمت مدل‌سازی با نتایج تجربی از مطالعات کانگ و همکاران [۳۰] ولی و همکاران [۳۱] برای یک موتور گازی مقایسه شده است. مطابق شکل (۲) راندمان تبدیل مطالعات عددی و تجربی با یکدیگر سازگار است. در این تحقیق بیشترین تفاوت بین مدل‌سازی و داده‌های تجربی برای راندمان تبدیل متان، کربن مونو اکسید و نیتروژن اکسید به ترتیب در دماهای ۶۱۰، ۵۳۰ و ۶۷۰ کلوین است که برابر با ۱۱/۷۴، ۱۱ و ۱۵ درصد است. همچنین میانگین اختلاف متان، کربن مونو اکسید و نیتروژن اکسید به ترتیب ۸/۷۲، ۵/۰۰ و ۱۲/۶۵ درصد است.

مقادیر آزمایشگاهی مقادیر مدل‌سازی

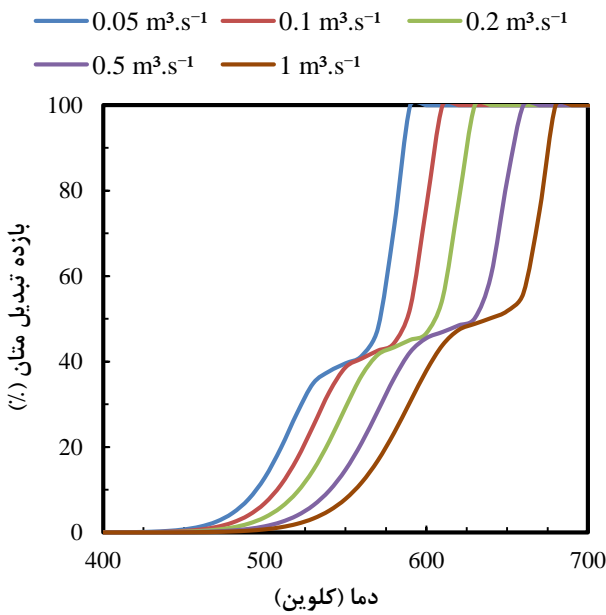


(الف)

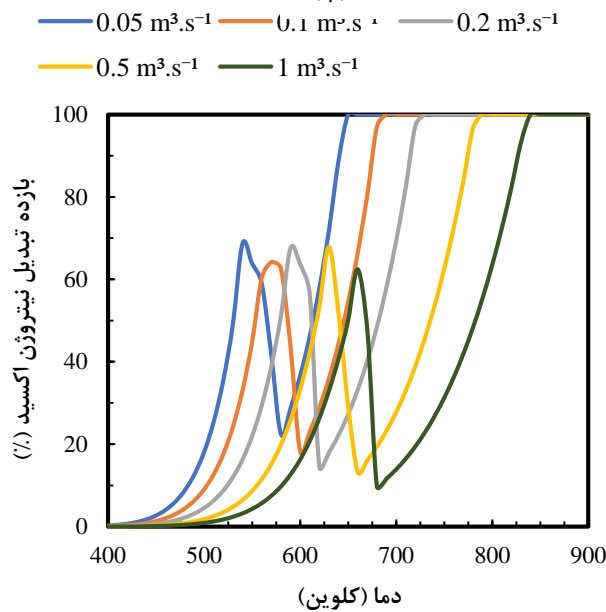
و مونوکسیدکربن بر راندمان تبدیل و دمای روشن شدن یا فعال سازی می باشد.

### ۳-۲-۱- تأثیرات دبی

شکل (۳) نشان می دهد که چگونه نرخ های مختلف جریان حجمی گاز خروجی بر بازده تبدیل مبدل کاتالیستی سه گانه تحت شرایط استوکیومتری تأثیر می گذارد. نمودارهای بازده تبدیل، الگوی ثابتی را در همه سناریوها نشان می دهند. با افزایش نرخ جریان حجمی گاز خروجی از ۰/۵ متر مکعب بر ثانیه به ۱ متر مکعب بر ثانیه، بازده تبدیل برای متان، مونوکسیدکربن و اکسید نیتروژن به طور پیوسته در دمای ورودی ثابت کاهش می یابد. این کاهش به این دلیل رخ می دهد که با کاهش نرخ جریان گاز خروجی، زمان اقامت گازهای خروجی در داخل مبدل کاتالیستی افزایش می یابد. در نتیجه، واکنش های کاتالیستی فرصت بیشتری برای کامل شدن پیدا می کنند و این موضوع باعث افزایش حذف متان، مونوکسیدکربن و مونوکسید نیتروژن می شود. همچنین، در نرخ جریان حجمی ۱ متر مکعب بر ثانیه، بازده تبدیل برای مونوکسیدکربن، متان و نیتروژن اکسید به ترتیب در دماهای ورودی ۶۷۳ کلوین، ۶۷۳ کلوین و ۸۴۰ کلوین به ۱۰۰ درصد می رسد. این نشان می دهد که در شرایط استوکیومتری، مبدل کاتالیستی سه گانه قادر است متان، مونوکسیدکربن و مونوکسید نیتروژن را در دماهای بالای گاز خروجی به طور کامل حذف کند. با افزایش دمای گاز خروجی، بازده تبدیل مونوکسیدکربن معمولاً بهبود می یابد.



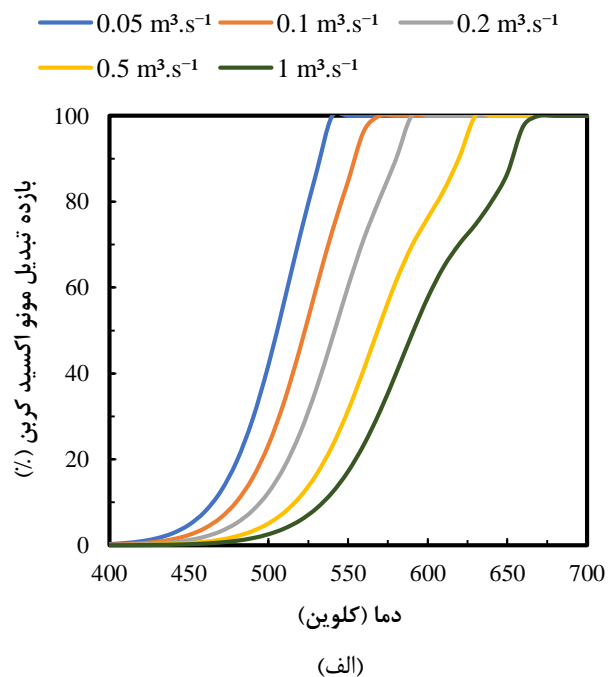
(ب)



(ج)

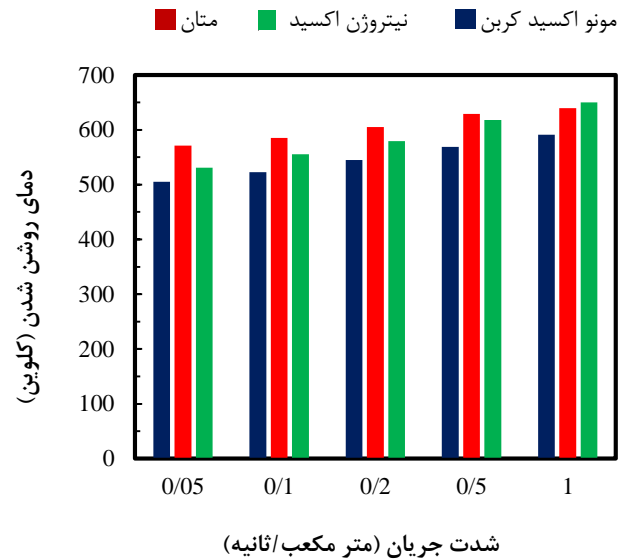
شکل ۳ تأثیر دما بر بازده تبدیل در دبی های حجمی متفاوت؛ الف- مونواکسیدکربن، ب- متان، ج- نیتروژن اکسید

به طور خاص، هنگامی که دمای گاز خروجی به ۴۰۰ کلوین می رسد، بازده تبدیل نیتروژن اکسید ابتدا افزایش پیدا می کند؛ اما با افزایش دمای گاز خروجی به بیش از ۵۴۰ کلوین، بازده تبدیل نیتروژن اکسید شروع به کاهش می کند. در نهایت، با گذر از دمای ۵۹۰ کلوین، بازده تبدیل نیتروژن اکسید دوباره افزایش می یابد و در نرخ جریان ۰/۵ متر مکعب بر ثانیه به ۱۰۰ درصد می رسد. این نوسانات در بازده تبدیل نیتروژن اکسید به دلیل ماهیت دو مرحله ای واکنش های آن است که با یافته های سیو و همکارانش [۳۲] نیز مطابقت دارد.



این بهبود نشان می‌دهد که مبدل‌های طولانی‌تر با فراهم کردن زمان بیشتر برای تماس آلاینده‌ها با کاتالیست، تخریب کامل‌تری از آلاینده‌ها و در نتیجه کنترل بهتر انتشار گازهای گلخانه‌ای را ممکن می‌سازند.

شکل (۶) تأثیر طول مبدل کاتالیستی بر دمای روشن شدن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول مبدل، دمای روشن شدن برای تمامی آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش دما به این دلیل است که افزایش طول مبدل منجر به افزایش زمان اقامت گازهای خروجی در محفظه کاتالیستی می‌شود.

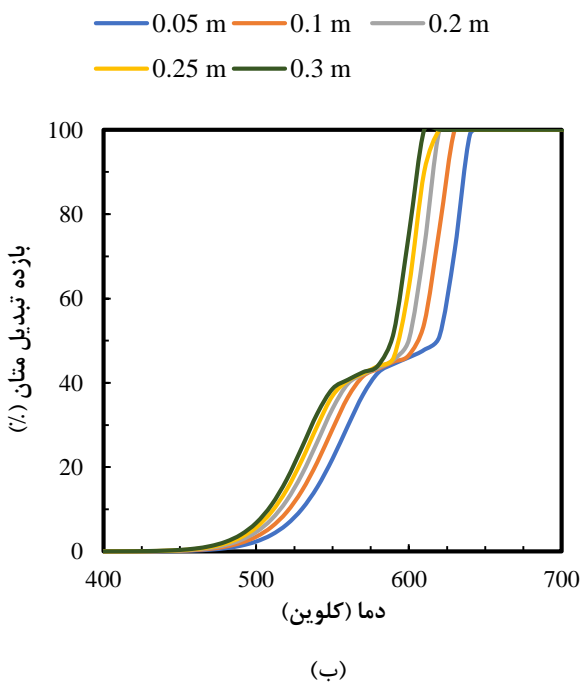
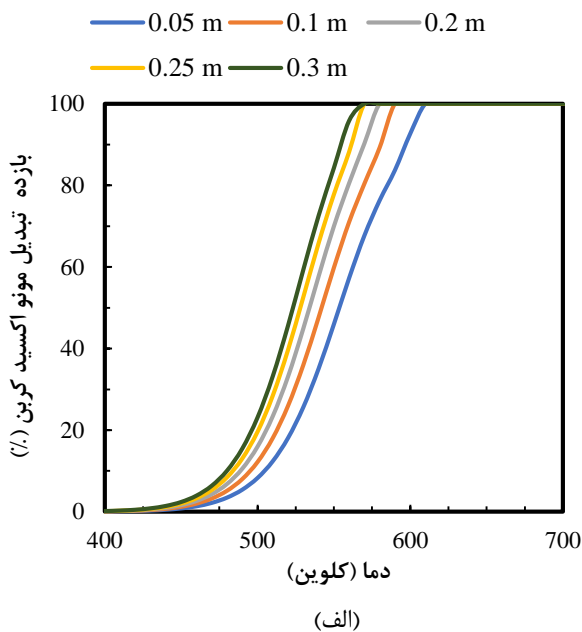


شکل ۱ دمای فعال‌سازی در شدت جریان‌های متفاوت حجمی

شکل (۴) دمای روشن شدن را در نرخ‌های مختلف جریان حجمی نشان می‌دهد. با افزایش نرخ جریان خروجی، دمای مورد نیاز برای دستیابی به ۵۰ درصد بازده تبدیل نیز افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، در نرخ جریان ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه، دمای روشن شدن برای متان، مونوکسید کربن و مونوکسید نیتروژن به ترتیب ۵۷۰/۹ کلوین، ۵۰۵ کلوین و ۵۳۰/۹ کلوین است. این دماها برای نرخ جریان ۱ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب به ۶۳۹/۸ کلوین، ۵۹۱/۲ کلوین و ۶۵۰ کلوین افزایش می‌یابند. این افزایش دما با افزایش نرخ جریان خروجی به دلایل کاهش زمان اقامت و کاهش انتقال حرارت رخ می‌دهد.

### ۳-۲-۲- تأثیرات طول مبدل کاتالیستی

شکل (۵) تأثیر طول‌های مختلف مبدل کاتالیستی را بر بازده تبدیل کربن مونوکسید، متان و نیتروژن اکسید نشان می‌دهد. طول مبدل کاتالیستی تأثیر قابل توجهی بر بازده تبدیل آلاینده‌ها دارد، زیرا با تغییر زمان اقامت گازهای خروجی در محفظه کاتالیستی، میزان برخورد و واکنش آلاینده‌ها با سطح کاتالیست تغییر می‌کند. افزایش طول مبدل باعث افزایش زمان تماس آلاینده‌ها با کاتالیست شده و به تکمیل بهتر واکنش‌های شیمیایی منجر می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش طول مبدل از ۰/۰۵ متر به ۰/۳ متر، بازده تبدیل مونواکسید کربن، متان و نیتروژن اکسید بهبود می‌یابد. به‌عنوان مثال، در دمای ۵۵۰ کلوین و طول ۰/۳ متر، بازده تبدیل مونواکسید کربن به ۸۴/۲٪ افزایش می‌یابد که این مقدار در طول ۰/۵ متر نیتروژن اکسید به ترتیب ۷۵٪ و ۶۷٪ افزایش می‌یابد.



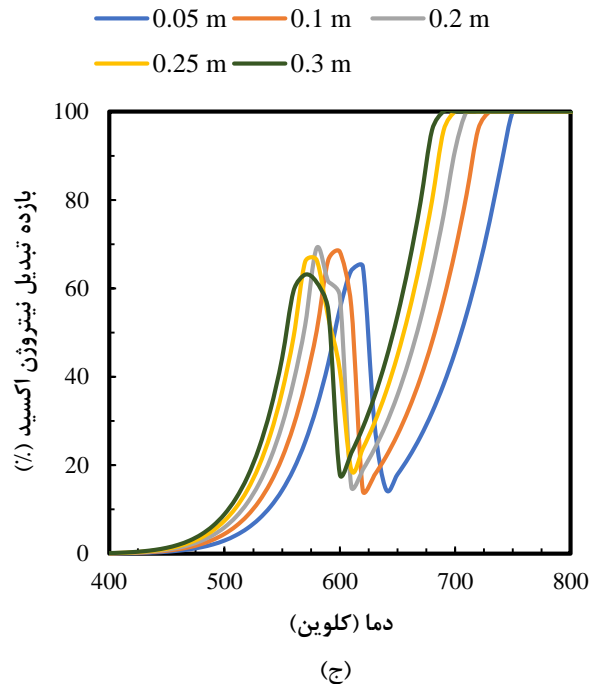
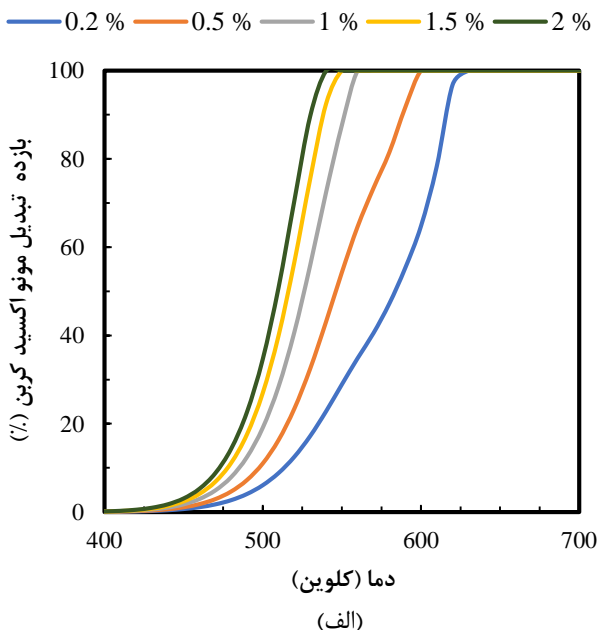
و ۵۵۳/۸ کلوین کاهش می‌یابند. این کاهش دما نشان می‌دهد که با طولانی‌تر شدن مبدل، واکنش‌های شیمیایی در دماهای پایین‌تر به‌طور مؤثرتری انجام می‌شوند.

### ۳-۲-۳- تأثیرات غلظت اکسیژن

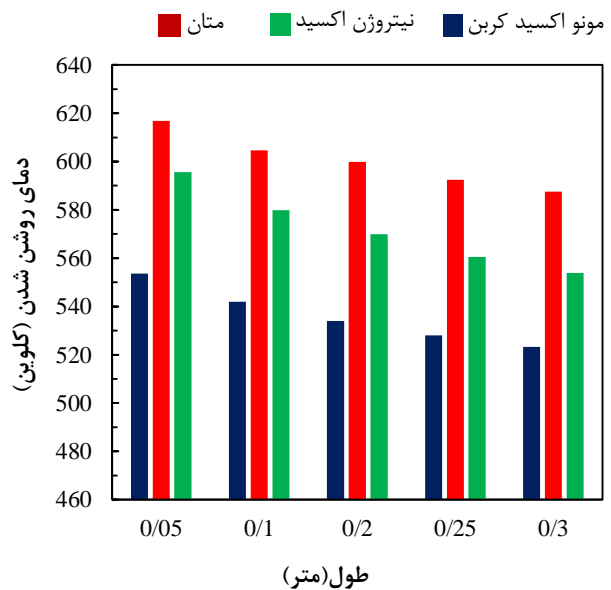
از دیدگاه احتراق، غلظت اکسیژن در گازهای خروجی نقش حیاتی در اکسیداسیون و کاهش آلاینده‌ها دارد. حتی تغییرات جزئی در سطوح اکسیژن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر بازده حذف متان، مونواکسیدکربن و نیتروژن اکسید با استفاده از مبدل کاتالیستی تأثیر بگذارد.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت اکسیژن، عملکرد مبدل کاتالیستی بهبود یافته و به تسریع بازده تبدیل کمک می‌کند، به‌طوری‌که اجزای آلاینده در دماهای پایین‌تری کاهش می‌یابند. این به این دلیل است که افزایش اکسیژن باعث تسریع واکنش‌های اکسیداسیون شده و زمان بیشتری برای تکمیل این واکنش‌ها فراهم می‌کند. به‌علاوه، افزایش غلظت اکسیژن باعث افزایش تماس مولکول‌های اکسیژن با سطح کاتالیست شده که این امر به‌طور مستقیم باعث افزایش نرخ واکنش‌ها و بهبود بازده تبدیل می‌شود.

شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش محتوای اکسیژن، بازده تبدیل نیتروژن اکسید ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. به‌طور خاص، در دمای ۶۲۰ کلوین با افزایش غلظت اکسیژن از ۰/۲٪ به ۲٪، بازده تبدیل نیتروژن اکسید از ۱۰۰٪ به ۷/۱۷٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۲ تأثیر دما بر بازده تبدیل در طول‌های متفاوت مبدل کاتالیستی؛ الف- مونواکسیدکربن، ب- متان، ج- نیتروژن اکسید



شکل ۳ دمای فعال‌سازی در طول‌های متفاوت مبدل کاتالیستی

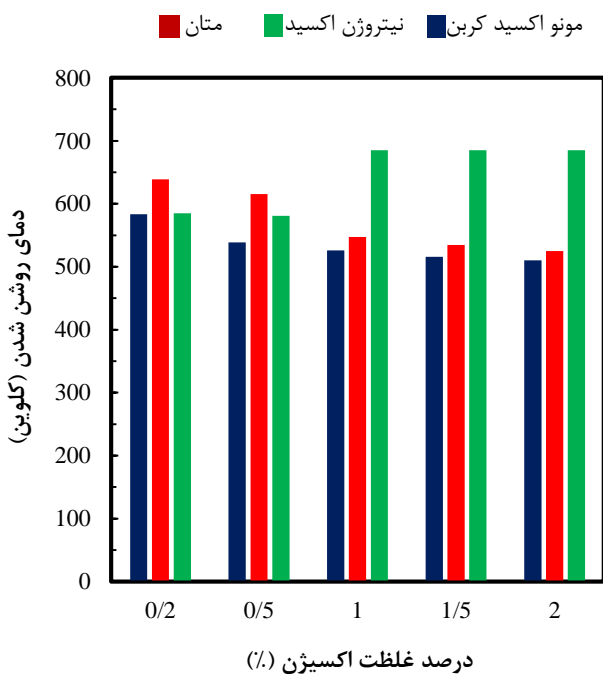
این امر موجب افزایش تماس مولکول‌های آلاینده با سطح کاتالیست و بهبود کارایی واکنش‌های شیمیایی می‌شود. در نتیجه، بازده تبدیل بهبود یافته و به‌طور سریع‌تری افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که در طول ۵ سانتی‌متر، دمای روشن‌شدن کربن مونواکسید، متان و نیتروژن اکسید به ترتیب برابر با ۵۵۳/۶، ۶۱۶/۸ و ۵۹۵/۷ کلوین است. اما با افزایش طول مبدل به ۳۰ سانتی‌متر، این مقادیر به ترتیب به ۵۲۳/۲، ۵۸۷/۶

شکل (۸) تأثیر غلظت‌های مختلف اکسیژن بر دمای روشن شدن را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت اکسیژن در گازهای خروجی، دمای روشن شدن برای متان و مونو اکسیدکربن کاهش می‌یابد. به‌طور خاص، اختلاف دمایی بین غلظت‌های ۰/۲٪ و ۲٪ اکسیژن برای متان برابر با ۱۱۳/۵ کلوین و برای مونو اکسیدکربن برابر با ۷۳/۵ کلوین است.

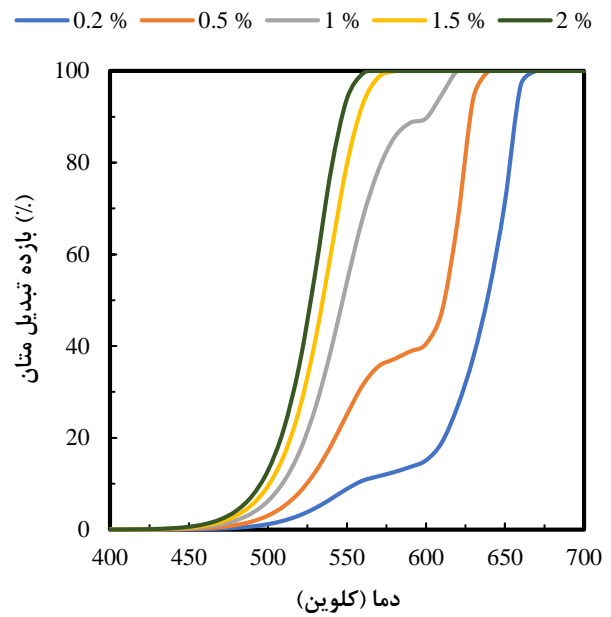
این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که در دماهای ورودی پایین‌تر، اکسیداسیون متان و مونو اکسیدکربن به‌طور عمده توسط اکسیژن انجام می‌شود. در شرایط کم‌اکسیژن، کمبود اکسیژن منجر به محدودیت در واکنش‌های اکسیداسیون می‌شود.

از سوی دیگر، با توجه به شکل (۸)، با افزایش غلظت اکسیژن، دمای روشن شدن برای نیتروژن اکسید افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در غلظت اکسیژن ۰/۲٪ دمای روشن شدن برای مونو اکسیدکربن، متان و نیتروژن اکسید به ترتیب برابر با ۵۸۳/۵، ۶۳۸/۵ و ۵۸۴/۹ کلوین است، در حالی که این مقادیر برای غلظت اکسیژن ۲٪ برابر با ۵۰۹/۱، ۵۲۵ و ۶۸۵ کلوین هستند.

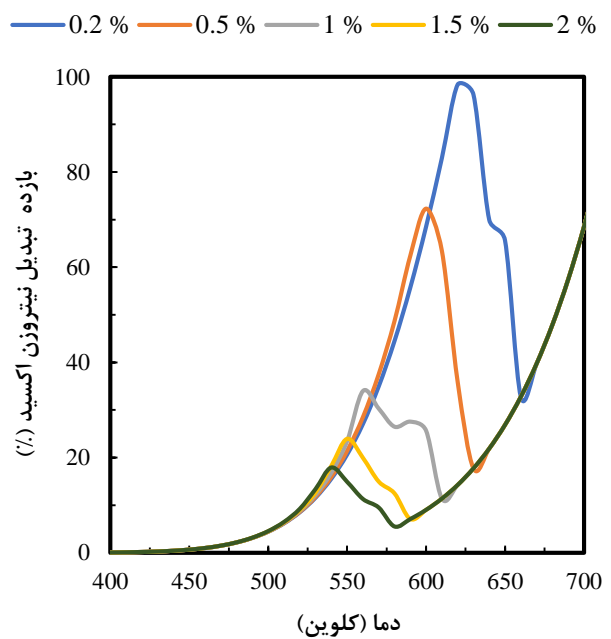
این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که در شرایط غنی از اکسیژن، نیتروژن اکسید به‌عنوان محصول جانبی واکنش‌های اکسیداسیون مونو اکسیدکربن و متان تولید می‌شود. در این شرایط، اکسیداسیون کامل مونو اکسیدکربن و متان باعث افزایش غلظت نیتروژن اکسید و در نتیجه افزایش دمای روشن شدن آن می‌شود.



شکل ۴ دمای فعال‌سازی در درصد غلظت‌های متفاوت اکسیژن



(ب)



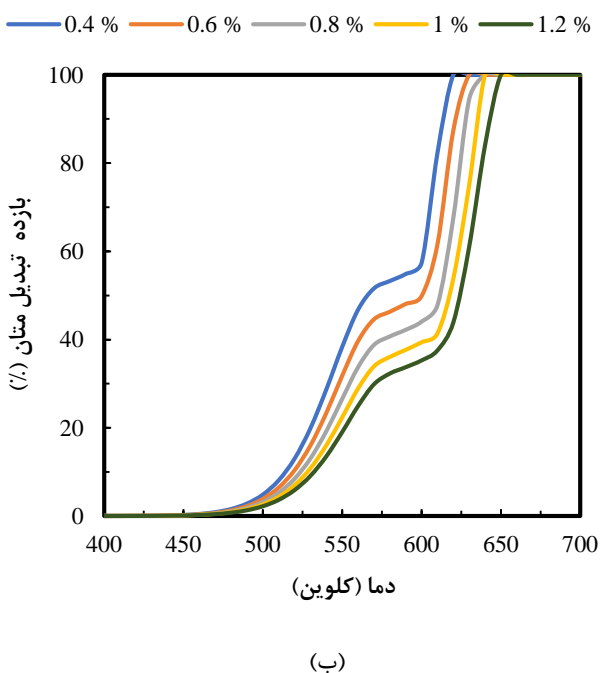
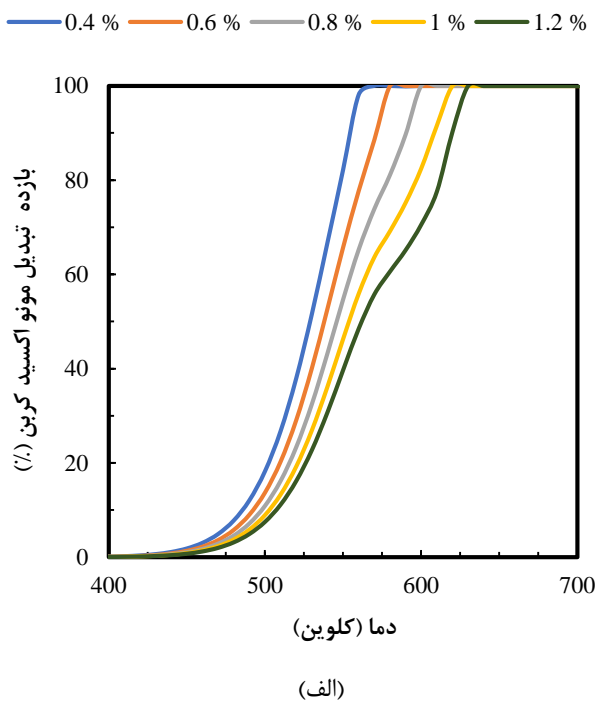
(ج)

شکل ۷ تأثیر دما بر بازده تبدیل در غلظت‌های متفاوت اکسیژن  
الف- مونو اکسیدکربن، ب- متان، ج- نیتروژن اکسید

این امر به این دلیل است که در شرایط غنی از اکسیژن، واکنش‌های اکسیداسیون نیتروژن اکسید به نیتروژن دی اکسید افزایش می‌یابد که این امر باعث کاهش بازده تبدیل نیتروژن اکسید می‌شود. همچنین، در دماهای بالاتر از ۷۰۰ کلوین، بازده تبدیل نیتروژن اکسید به ۱۰۰٪ می‌رسد که نشان می‌دهد شرایط کم‌اکسیژن به‌طور مؤثرتری به کاهش نیتروژن اکسید کمک می‌کند.

## ۳-۲-۴- تأثیرات غلظت اکسیژن

تغییرات غلظت کربن مونو اکسید تأثیرات متفاوتی بر دمای روشن شدن این سه آلاینده دارد که به واکنش‌های شیمیایی و مکانیزم‌های اکسیداسیون و کاهش مرتبط است. با افزایش غلظت مونو اکسید کربن در گازهای خروجی، دمای روشن شدن متان به‌طور تدریجی افزایش می‌یابد. این افزایش به این دلیل رخ می‌دهد که در غلظت‌های بالاتر مونو اکسید کربن، رقابت بیشتری بین مولکول‌های مونو اکسید کربن و متان برای واکنش با اکسیژن موجود در محیط به وجود می‌آید.



شکل (۹) تأثیر غلظت‌های مختلف مونو اکسید کربن در گازهای خروجی را بر بازده تبدیل مبدل کاتالیستی نشان می‌دهد. تغییرات غلظت مونو اکسید کربن تأثیر قابل توجهی بر بازده تبدیل آلاینده‌ها دارد و به‌طور مستقیم با دمای ورودی و شرایط احتراق در ارتباط است. در شکل (۹-الف) تغییرات غلظت کربن بر بازده تبدیل مونو اکسید کربن بررسی شده است. با افزایش مونو اکسید-کربن گازهای خروجی نیاز به دمای ورودی بالاتری برای دستیابی به بازده تبدیل ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد. این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که در غلظت‌های بالاتر مونو اکسید کربن، تعداد مولکول‌های مونو اکسید کربن موجود برای واکنش با اکسیژن افزایش یافته و زمان تماس بیشتری با کاتالیست نیاز است. به-عنوان مثال، برای دستیابی به بازده تبدیل ۱۰۰٪ در غلظت ۰/۲٪، دمای ۵۶۰ کلوین کافی است، در حالی که برای غلظت ۱/۲٪، دمای ۶۳۰ کلوین مورد نیاز است. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت مونو اکسید کربن باعث افزایش دمای روشن-شدن، شده و در نتیجه بازده تبدیل به دمای بالاتری نیاز دارد.

در شکل (۹-ب) تغییرات غلظت کربن مونو اکسید بر بازده تبدیل متان بررسی شده است. برخلاف مونو اکسید کربن، با افزایش غلظت مونو اکسید کربن در گازهای خروجی، بازده تبدیل متان به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که مونو اکسید کربن به‌عنوان یک عامل کاهش‌دهنده در واکنش‌های اکسیداسیون متان عمل می‌کند و باعث افزایش سرعت واکنش‌های اکسیداسیون می‌شود. به‌عنوان مثال، در غلظت‌های ۰/۴ و ۰/۶٪، در دمای ۵۵۰ کلوین، بازده تبدیل به ترتیب برابر با ۳۸/۳٪ و ۳۱/۸٪ است. همچنین، برای دستیابی به بازده تبدیل ۱۰۰٪ در این دو غلظت، دمای مورد نیاز به ترتیب برابر با ۶۲۰ و ۶۳۰ کلوین است.

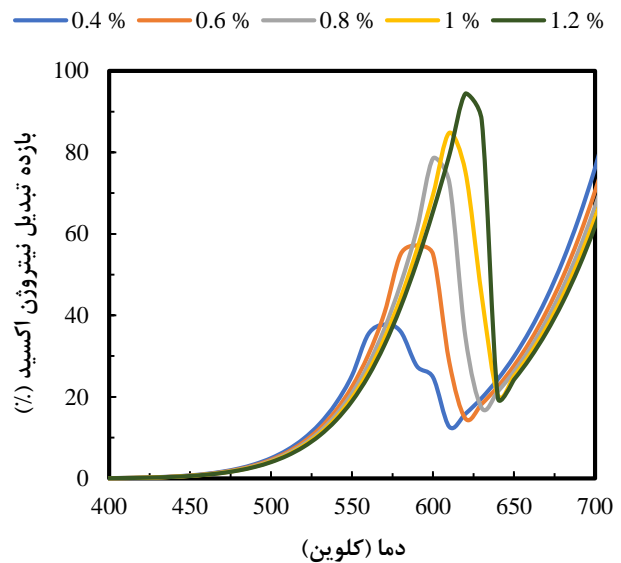
در شکل (۹-ج) تأثیر غلظت مونو اکسید کربن بر بازده تبدیل نیتروژن اکسید بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت مونو اکسید کربن در گازهای خروجی، بازده تبدیل نیتروژن اکسید به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد و در شرایط غنی از مونو اکسید کربن به ۱۰۰٪ می‌رسد. به‌عنوان مثال، در غلظت ۰/۴٪، بازده تبدیل نیتروژن اکسید در دمای ۵۷۰ کلوین به ۴۰/۶٪ می‌رسد، در حالی که در غلظت ۱/۲٪، اوج بازده تبدیل در دمای ۶۲۰ کلوین و ۹۴/۴٪ مشاهده می‌شود.

شکل (۱۰) تأثیر غلظت‌های مختلف مونو اکسید کربن در گازهای خروجی را بر دمای روشن شدن آلاینده‌های متان، مونو-اکسید کربن و نیتروژن اکسید در مبدل کاتالیستی نشان می‌دهد.

غلظت مونواکسیدکربن از ۰/۴٪ به ۱/۲٪، دمای روشن شدن نیتروژن اکسید از ۶۷۶/۴ کلوین به ۵۸۶/۶ کلوین کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل واکنش‌های کاهش نیتروژن اکسید با مونو-اکسید کربن بر روی سطح کاتالیست است که در غلظت‌های بالاتر مونواکسیدکربن بهبود می‌یابد.

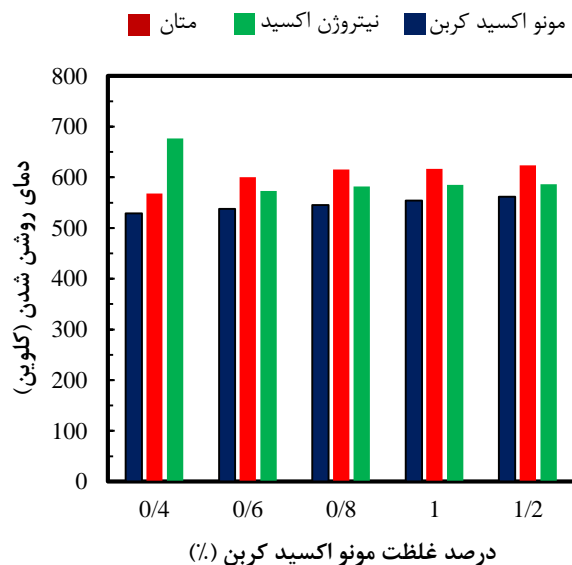
#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک مدل عددی برای مبدل‌های کاتالیستی توسعه داده است که با ادغام سینتیک واکنش‌های پیشرفته و اثرات انتقال جرم، دقت پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد. این مدل در محیط متلب به صورت یک‌بعدی و در حالت پایدار پیاده‌سازی شده است. برخلاف مدل‌های قبلی که به مکانیزم‌های واکنش ساده شده تکیه می‌کردند، این رویکرد از یک چارچوب واکنش چندگونه‌ای بهره می‌برد که رفتار واقعی مبدل کاتالیستی را به طور دقیق‌تر شبیه‌سازی می‌کند. مدل ارائه شده با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد و نتایج نشان داد که اختلاف بین بازده تبدیل شبیه‌سازی شده و داده‌های تجربی به ۸/۷۲ درصد برای متان، ۵/۰۰ درصد برای کربن مونو اکسید و ۱۲/۶ درصد برای نیتروژن اکسید کاهش یافته است. این اختلاف کمتر نسبت به مدل‌های قبلی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با دقت بیشتری می‌تواند عملکرد مبدل کاتالیستی را پیش‌بینی کند. همچنین، نتایج نشان داد که پارامترهای عملیاتی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد تبدیل آلاینده‌ها دارند. برای مثال، افزایش دبی حجمی از ۰/۵ به ۱ متر مکعب بر ثانیه در دمای ۵۰۰ کلوین باعث کاهش راندمان تبدیل و افزایش دمای روشن شدن به میزان بیش از ۸۰ کلوین شد. نتایج نشان داد که افزایش طول مبدل کاتالیستی از ۰/۵ به ۰/۳ متر در دمای ۵۵۰ کلوین، راندمان تبدیل مونواکسید کربن و نیتروژن اکسید را بیش از ۴۰ درصد بهبود می‌بخشد. همچنین افزایش غلظت اکسیژن باعث بهبود تبدیل مونواکسید کربن و متان می‌شود، اما کارایی کاهش نیتروژن اکسید را کاهش می‌دهد که بر لزوم بهینه‌سازی نسبت هوا به سوخت در استراتژی‌های کنترل آلاینده‌ها تأکید دارد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش غلظت مونواکسید کربن در گازهای خروجی، دمای روشن شدن متان و مونواکسید کربن افزایش می‌یابد، درحالی‌که دمای روشن شدن نیتروژن اکسید کاهش پیدا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل غلظت مونواکسید کربن در گازهای خروجی می‌تواند به طور مؤثری دمای روشن شدن و بازده تبدیل آلاینده‌ها را بهبود بخشد. همچنین، یافته‌ها نشان داد که افزایش طول مبدل کاتالیستی



(ج)

شکل ۵ تأثیر دما بر بازده تبدیل در غلظت‌های متفاوت؛ الف- مونواکسیدکربن، ب- متان، ج- نیتروژن اکسید



شکل ۶ تأثیر غلظت‌های مختلف کربن مونو اکسید بر گازهای خروجی را بر روی دمای روشن شدن

در مورد دمای روشن شدن مونواکسیدکربن نیز با افزایش غلظت مونواکسیدکربن در گازهای خروجی، دمای روشن شدن مونواکسیدکربن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل رقابت بین مولکول‌های مونواکسیدکربن برای واکنش با اکسیژن است. با افزایش غلظت مونواکسیدکربن، دمای روشن شدن مونواکسیدکربن به میزان ۳۲/۲۰ کلوین افزایش می‌یابد. در مورد نیتروژن اکسید رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود. با افزایش غلظت مونواکسیدکربن، دمای روشن شدن نیتروژن اکسید به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با تغییر

## ۶- مراجع

- [1] G. Kavitha *et al.*, "Thermodynamic and Emission Analysis of Waste Plastic Oil Fuelled Diesel Engine with Ce-Al Catalyst-Based Catalytic Converters—An Experimental Study," *Process Safety and Environmental Protection*, p. 106997, 2025 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106997>.
- [2] S. Liu *et al.*, "Recent Advances and Perspectives in Catalyst Design for Converting Syngas to Higher Alcohols," *Energy & Fuels*, vol. 38, no. 16, pp. 14769-14796, 2024 <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01419>.
- [3] G. C. Koltsakis and A. M. Stamatelos, "Catalytic automotive exhaust aftertreatment," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 23, no. 1, pp. 1-39, 1997 [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00003-8).
- [4] J. Koop and O. Deutschmann, "Detailed surface reaction mechanism for Pt-catalyzed abatement of automotive exhaust gases," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 91, no. 1-2, pp. 47-58, 2009 <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.05.006>.
- [5] D. Chatterjee, O. Deutschmann, and J. Warnatz, "Detailed surface reaction mechanism in a three-way catalyst," *Faraday Discussions*, vol. 119, pp. 371-384, 2002 <https://doi.org/10.1039/B101968F>.
- [6] J. Gong *et al.*, "O<sub>2</sub> dosage as a descriptor of TWC performance under lean/rich dithering in stoichiometric natural gas engines," *Catalysis Today*, vol. 360, pp. 294-304, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.02.022>.
- [7] D. Ferri, M. Elsener, and O. Kröcher, "Methane oxidation over a honeycomb Pd-only three-way catalyst under static and periodic operation," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 220, pp. 67-77, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.07.070>.
- [8] M. Wang, P. D. Eggenschwiler, D. Ferri, and O. Kröcher, "Experimental and modeling-based analysis of reaction pathways on catalysts for natural gas engines under periodic lean/rich oscillations," *Chemical Engineering Journal*, vol. 430, p. 132848, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132848>.
- [9] D. Bounechada, G. Groppi, P. Forzatti, K. Kallinen, and T. Kinnunen, "Effect of periodic lean/rich switch on methane conversion over a Ce-Zr promoted Pd-Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in the exhausts of natural gas vehicles," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 119, pp. 91-99, 2012 <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.02.025>.
- [10] Y. Tan, C. Kou, J. E. C. Feng, and D. Han, "Effect of different exhaust parameters on conversion

منجر به افزایش زمان تماس بین گازهای خروجی و کاتالیست شده و در نتیجه تجزیه آلاینده‌ها به‌طور کامل‌تری صورت می‌گیرد. با این حال، افزایش طول مبدل ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های ساخت و افت فشار در سیستم آگزوز شود که می‌تواند بر عملکرد موتور تأثیر بگذارد. افزایش طول مبدل هرچند باعث بهبود بازده تبدیل و کاهش دمای روشن شدن می‌شود، اما با افزایش هزینه ساخت، فضای نصب، و افت فشار همراه است که می‌تواند عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار دهد.

## ۵- فهرست علائم و اختصارات

## علائم انگلیسی

A	ضریب فعالیت
C	غلظت جزء ( % )
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ )
D	ضریب پخش جرمی
$D_H$	قطر هیدرولیکی
$E_a$	انرژی فعال‌سازی ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )
$G_A$	مساحت تعویض جزء
H	آنتالپی واکنش
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
$k_m$	ضریب انتقال جرم
Nu	عدد ناسلت
R	ثابت جهانی گاز یا سرعت واکنش
Sh	عدد شروود
T	دما (K)
u	سرعت ( $m \cdot s^{-1}$ )
X	غلظت ( % )

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\lambda$	نسبت سوخت به هوا

## اندیس‌ها

g	گاز
j	جزء
s	جامد

## اختصارات

FDM	روش گسست‌سازی اختلاف محدود
LOT	دمای روشن شدن

## ۵- تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که ما را در نگارش این مقاله یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

- Technical Paper, 0148-7191, 2000  
<https://doi.org/10.4271/2000-01-0211>.
- [20] W. Luc *et al.*, "Two-dimensional copper nanosheets for electrochemical reduction of carbon monoxide to acetate," *Nature Catalysis*, vol. 2, no. 5, pp. 423-430, 2019 <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0269-8>.
- [21] D. Di Maio, E. Stramaccioni, D. A. Misul, P. Napolitano, and C. Beatrice, "A Multiphysics Co-Simulation Framework of a Gas Engine and Three-Way Catalyst toward a Complete Vehicle Design Model," *Machines*, vol. 10, no. 852, 2022 <https://doi.org/10.3390/machines10100852>.
- [22] M. Doble, "Perry's chemical engineers' handbook," *McGraw-Hil, New York, US*, 2007 <https://doi.org/10.3390/machines10100852>.
- [23] G. C. Koltsakis, P. A. Konstantinidis, and A. M. Stamatelos, "Development and application range of mathematical models for 3-way catalytic converters," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 12, no. 2-3, pp. 161-191, 1997 [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(96\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(96)00073-2).
- [24] S. H. Oh and J. C. Cavendish, "Transients of monolithic catalytic converters. Response to step changes in feedstream temperature as related to controlling automobile emissions," *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, vol. 21, no. 1, pp. 29-37, 1982 <https://doi.org/10.1021/i300005a006>.
- [25] Y. Qian *et al.*, "Investigation of the formation characteristics of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> for stoichiometric natural gas engines with Pd-only catalyst," *Fuel*, vol. 329, p. 125223, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125223>.
- [26] S. Turms, "An Introduction to Combustion: Concept and Application," ed: McGraw-Hill, 2000 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125223>.
- [27] F. Huang *et al.*, "Pd or PdO: Catalytic active site of methane oxidation operated close to stoichiometric air-to-fuel for natural gas vehicles," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 219, pp. 73-81, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.07.037>.
- [28] D. Lou, Y. Ren, X. Li, Y. Zhang, and X. Sun, "Effect of operating conditions and TWC parameters on emissions characteristics of a stoichiometric natural gas engine," *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4905, 2020 <https://doi.org/10.3390/en13184905>.
- [29] E. Jiaqiang, J. Luo, D. Han, Y. Tan, C. Feng, and Y. Deng, "Effects of different catalysts on light-off temperature of volatile organic components in the rotary diesel particulate filter during the regeneration," *Fuel*, vol. 310, p. 122451, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122451>.
- efficiency enhancement of a Pd-Rh three-way catalytic converter for heavy-duty natural gas engines," *Energy*, vol. 292, p. 130483, 2024/04/01/2024, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130483>.
- [11] Y. Tan, E. Jiaqiang, C. Kou, C. Feng, and D. Han, "Effects of critical structure parameters on conversion performance enhancement of a Pd-Rh dual-carrier catalytic converter for heavy-duty natural gas engines," *Energy*, p. 131934, 2024 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131934>.
- [12] Q. Zhang, M. Li, G. Li, S. Shao, and P. Li, "Transient emission characteristics of a heavy-duty natural gas engine at stoichiometric operation with EGR and TWC," *Energy*, vol. 132, pp. 225-237, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.039>.
- [13] R. Hutter, L. De Libero, P. Elbert, and C. H. Onder, "Catalytic methane oxidation in the exhaust gas aftertreatment of a lean-burn natural gas engine," *Chemical Engineering Journal*, vol. 349, pp. 156-167, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.054>.
- [14] P. Auvinen *et al.*, "A detailed study on regeneration of SO<sub>2</sub> poisoned exhaust gas after-treatment catalysts: In pursuance of high durability and low methane, NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions of heavy-duty vehicles," *Fuel*, vol. 291, p. 120223, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120223>.
- [15] Q. Zhang, M. Li, S. Shao, and G. Li, "Ammonia emissions of a natural gas engine at the stoichiometric operation with TWC," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 1363-1372, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.098>.
- [16] S. Yoon *et al.*, "Chemical and toxicological properties of emissions from CNG transit buses equipped with three-way catalysts compared to lean-burn engines and oxidation catalyst technologies," *Atmospheric Environment*, vol. 83, pp. 220-228, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.003>.
- [17] Q. Zhang, Z. Li, Z. Wei, M. Li, and X. Zheng, "Experiment investigation on the emission characteristics of a stoichiometric natural gas engine operating with different reference fuels," *Fuel*, vol. 269, p. 117449, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117449>.
- [18] Z. Zhang *et al.*, "Multi-objective optimization of the three-way catalytic converter on the combustion and emission characteristics for a gasoline engine," *Energy*, vol. 277, p. 127634, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127634>.
- [19] J. Braun *et al.*, "Influence of physical and chemical parameters on the conversion rate of a catalytic converter: a numerical simulation study," SAE

- engine," *J. Jilin Univ*, vol. 1, pp. 79-87, 2019  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.039> .
- [32] Y. Cui, M. Shen, J. Wang, J. Wang, G. Shen, C. Wang, "Comprehensive kinetic model of a three-way catalyst for stoichiometric natural gas engines: Experiments and simulation," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 136, p. 104416, 2022  
<https://doi.org/10.1016/j.tice.2022.104416>.
- [30] S. B. Kang, S. J. Han, I.-S. Nam, B. K. Cho, C. H. Kim, and S. H. Oh, "Detailed reaction kinetics for double-layered Pd/Rh bimetallic TWC monolith catalyst," *Chemical Engineering Journal*, vol. 241, pp. 273-287, 2014  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.039>.
- [31] Z. Li *et al.*, "Effect of A/F ratio fluctuation on light-off performance of methane of TWC for CNG