

مدل سازی و بهینه سازی ترمودینامیکی اقتصادی، کالکتور خورشیدی صفحه تخت در حالت گذرا

محمد جواد سلطانی
تاج آبادی
کارشناسی ارشد

حسن حاج عبدالهی*
استاد

محمد شفیعی
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه ولی عصر رفسنجان،
رفسنجان

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

چکیده: هدف از انجام این پژوهش، بهینه سازی ترمودینامیکی اقتصادی، کالکتور خورشیدی صفحه تخت و بررسی انتقال حرارت گذرا است. بطوریکه برای بدترین شرایط از نظر تشعشع، مدل سازی و بهینه سازی انجام می شود. روش پژوهش در این مقاله، بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) می باشد که با نرم افزار متلب انجام شده است. اجزا اصلی توابع هدف، قیود و متغیرهای طراحی می باشد که توابع هدف بازده کالکتور و قیمت کل سالانه می باشد. نتایج نشان می دهد، تاثیر افزایش طول کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه با افزایش طول، بازده کاهش و قیمت کل سالانه افزایش می یابد. علاوه بر این با افزایش عرض کالکتور، بازده ترمودینامیکی اول افزایش و سپس کاهش می یابد و قیمت کل سالانه زیاد می شود. همچنین با افزایش تعداد لوله ها، قیمت کل سالانه کاهش می یابد و بازده ترمودینامیکی اول افزایش، سپس کاهش می یابد. مقایسه ای میان نمودارهای بازده انرژی، آگسرژی و قیمت کل سالانه برای چهار روز متفاوت انجام شده است.

واژه های راهنما: جبهه بهینه پارتو، تشعشع دریافتی، متغیر طراحی، بازده ترمودینامیکی، قیمت کل سالانه

Mohammad Javad
Soltani Tajabadi
M.Sc.

Hassan
Hajabdollahi*
Professor

Mohammad Shafiei
Associate Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Technical and
Engineering Faculty,
Vali-e-Asr University of
Rafsanjan, Rafsanjan

Modeling and economical thermodynamic optimization of flat plate solar collector in transient mode

Abstract: The purpose of this research is economic thermodynamic optimization of flat plate solar collector and investigation of transient heat transfer. In this way, modeling and optimization are done for the worst conditions in terms of radiation. The research method in this article is optimization with the help of multi-objective genetic algorithm (NSGA-2) which is done with MATLAB software. The main components are the objective functions, constraints and design variables, which are the objective functions of collector efficiency and annual total price. As the results, the effect of increasing the length of the collector on the thermodynamic efficiency and the total annual price, which shows that with the increase in length, the efficiency decreases and the total annual price increases. In addition, with the increase in the width of the collector, the thermodynamic efficiency first increases and then decreases. and the total annual price increases. Also, with the increase in the number of pipes, the total annual price decreases and the thermodynamic efficiency first increases and then decreases. It is done on four different days.

Keywords: Pareto optimal front, Received radiation, Design variable, Thermodynamic efficiency, Annual total price

۱- مقدمه

با توجه به این که استفاده از انرژی هرساله حدود ۵٪ افزایش می‌یابد، انرژی خورشیدی می‌تواند منبع بسیار خوبی برای جواب دادن این مقدار از انرژی که استفاده می‌شود، باشد [۱]. سال ۱۹۷۳ شروع استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. با توجه به اینکه سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع گرما استفاده می‌شوند و در حال تمام شدن هستند، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه استفاده از انرژی خورشیدی برای کاربردهای حرارتی، پیشنهاد مناسب می‌باشد. انرژی خورشیدی به چندین دلیل از جمله هزینه اقتصادی کم، ساده بودن طراحی سیستم‌های آن و سازگاری با محیط‌زیست مورد استفاده می‌باشد [۲]. ایده استفاده از کالکتورهای خورشیدی و استفاده از توان خورشید به دوران قبل از تاریخ باز می‌گردد. یعنی زمانی که در سال ۲۱۲ قبل از میلاد دانشمند یونانی ارشمیدس، روشی برای به آتش کشیدن کشتی‌های رومی ابداع کرد [۳].

در طی ۵۰ سال اخیر طراحی‌ها و ساختارهای مختلفی با استفاده از کالکتورهای متمرکزکننده، برای انتقال حرارت به سیال کاری که توان مورد نیاز برای به حرکت در آوردن وسایل مکانیکی را فراهم می‌کنند، صورت گرفته است. دو تکنولوژی خورشیدی ابتدایی که استفاده شدند شامل، دریافت‌کننده‌های مرکزی^۱ و دریافت‌کننده‌های پخشی^۲ می‌باشند. سیستم‌های دریافت‌کننده‌های مرکزی از چرخ آینه‌ای^۳ استفاده می‌نمایند تا انرژی تابشی خورشید را بر روی یک دریافت‌کننده single tower-mounted متمرکز کند [۴].

مبدل‌های انرژی خورشیدی، انواع ویژه‌ای از مبدل‌های حرارتی هستند که انرژی خورشید را به انرژی داخلی ماده انتقال‌دهنده، تبدیل می‌کنند. کالکتور خورشیدی جز اصلی هرسیستم خورشیدی می‌باشند. مبدل خورشیدی وسیله است که تشعشع ورودی خورشید را جذب نموده و آن انرژی را به گرما تبدیل نموده و به سیالی که در جمع‌کننده خورشیدی در جریان است، انتقال می‌دهد. معمولاً سیالی که استفاده می‌شود آب یا روغن می‌باشد. بنابراین از انرژی خورشیدی استفاده‌های زیادی از جمله، تجهیزات تهویه فضا، آب گرم مصرفی یا در تانک‌هایی ذخیره می‌شود و در روزهایی که هوا ابری است یا در شب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کالکتور خورشیدی باید دارای خواص انتقال حرارت خوب، ضریب هدایت و جذب بالا و همچنین

ضریب صدور پایین باشد و در برابر دماهای بالا پایدار باشد. از دیگر ویژگی‌هایی که باید کالکتور خورشیدی داشته باشد این است که در مقابل خوردگی داخلی و خارجی مقاوم باشد و همچنین بازده کالکتور به شرایط و جنس مواد استفاده شده بستگی دارد [۵].

بطور کلی دو نوع کالکتور خورشیدی وجود دارد ثابت یا غیرمتمرکزکننده و متمرکزکننده، یک کالکتور خورشیدی غیرمتمرکزکننده یک سطح یکنواختی برای جذب تشعشع خورشیدی دارد درحالی که یک کالکتور متمرکزکننده یک سطح انعکاس‌دهنده مقعر دارد، که تشعشع خورشید را به یک سطح کوچکتر هدایت می‌کند و نتیجه آن این است که شار تشعشعی افزایش می‌یابد [۶]. کونتینن و همکاران [۷]، یک روش ساخت کم هزینه برای سطوح بهینه جاذب خورشیدی پیشنهاد داده است. امروزه صفحات جاذب خورشیدی توسط روش‌های اندیزاسیون^۴، کندوپاش^۵، تبخیر^۶ و بوسيله رنگ‌های بهینه‌کننده ساخته می‌شوند [۸].

یک منعکس‌کننده بشقاب سهموی، یک کالکتور متمرکزکننده نقطه‌ای است که خورشید را در دو محور دنبال می‌کند و انرژی خورشیدی را در نقطه‌ای کانونی بشقابک دریافت می‌کند. ساختار بشقابک باید به طور کامل خورشید را دنبال کند تا اشعه را به گیرنده حرارتی منعکس کند. برای این منظور مکانیسم ردیاب به دو صورت دو گانه است و در دو محور خورشید را دنبال می‌کند [۹]. با استفاده از آینه‌های که بطور مختصر مقعرند، می‌توان مقادیر بسیار بالاتری از انرژی گرمایی را به گیرنده منتقل کرد. انرژی که توسط گیرنده جذب می‌شود به سیال در حال گردش منتقل می‌شود که می‌توان آن را برای استفاده‌های بعدی ذخیره کرد یا از آن برای تولید انرژی استفاده کرد [۱۰].

از کل انرژی رسیده از طرف خورشید به پوشش شیشه‌ای، مقداری از این انرژی از پوشش شیشه‌ای عبور می‌کند و مقداری از آن به محیط بر می‌گردد. هم چنین مقداری از طریق تشعشع و جابجایی به محیط پیرامون انتقال می‌یابد، از طرف دیگر مقداری انرژی از طریق گسیل انرژی از صفحه جاذب و جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و صفحه جذب‌کننده به صفحه شیشه‌ای می‌رسد. از انرژی که از پوشش شیشه‌ای عبور می‌کند و به صفحه جذب‌کننده می‌رسد، مقداری از آن جذب می‌شود مقداری از آن، از طریق تشعشع به لوله‌ها منتقل می‌شود، مقداری از طریق

⁴ Anodization⁵ Sputtering⁶ Evaporation¹ Central receivers² Distributed receivers³ Heliostat

باون و همکارانش در سال ۱۹۸۴، به پژوهش در مورد اثر نسبت دبی به سطح کالکتور، بر بازده کالکتور پرداختند [۲۰]. الیوا و همکارانش در سال ۱۹۹۱، توزیع دما و مدل دینامیکی در یک کالکتور تخت را ارائه کردند. این مدل نتایج تلاش‌ها برای بهبود مدل انتقال حرارتی یک بعدی، پایدار بود [۲۱]. هیلمر و همکارانش در سال ۱۹۹۹، روش‌های عددی برای حل معادلات مدل دیفرانسیل مرتبه اول حاکم، ارائه داد، که این روش‌ها برای ارزیابی کالکتورها در تابش‌های مختلف، دبی‌های مختلف و ضرایب انتقال حرارت متفاوت کاربرد دارند [۲۲]. مین و همکارانش در سال ۲۰۰۲، با فرض یک حجم کنترل پایای دو بعدی، رابطه غیر خطی برای وابستگی دما به خواص مواد و سیال ارائه دادند، که منجر به محاسبه‌ی توزیع دما سیال و جاذب و بازده کالکتور در دماهای ورودی سیال و پارامترهای هواشناسی متفاوت شد [۲۳].

در پژوهش حاضر، کالکتور خورشیدی صفحه تخت از جنبه ترمودینامیکی و اقتصادی در مرتبه اول در نرم افزار متلب مدل سازی می‌شود و سپس با الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی ناغالب (NSGA-II) بهینه‌سازی انجام می‌شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- آنالیز انرژی

باتوجه به تعریف بازده حرارتی که برابر است با نسبت کار خالص بدست آمده از سیستم به حرارت مصرف شده در سیستم، برای بازده کالکتور خورشیدی صفحه تخت، رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$\eta_{col} = \frac{Q_c}{I_t A_c} \quad (1)$$

که در رابطه (۱) Q_c نرخ حرارت به سیال انتقال یافته به وسیله کالکتور می‌باشد و A_c مساحت یا سطحی که تشعشع خورشید را دریافت می‌کند، می‌باشد. I_t تشعشع کل دریافتی روی سطح یا صفحه مایل می‌باشد. نرخ انتقال حرارت منتقل شده از تشعشع خورشیدی به سیال توسط رابطه زیر ارزیابی می‌شود.

$$Q_c = A_c F_r ((S - U_l(T_i - T_a))) \quad (2)$$

که F_r ، S ، U_l ، T_i و T_a به ترتیب عبارت‌اند از فاکتور حذف حرارت، تشعشع خالص دریافتی به وسیله صفحه جذب‌کننده کالکتور،

تشعشع و انتقال حرارت جابجایی از بالای صفحه‌ی جذب‌کننده به محیط اطراف انتقال پیدا می‌کند. مقداری از بدنه دستگاه به محیط اطراف وارد می‌شود و مقداری هم از طریق رسانایی از پوشش عایق در زیر و کنار دستگاه به محیط بیرون منتقل می‌شود. لوله مقداری از انرژی عبوری از شیشه را دریافت می‌کند. مقداری انرژی از طریق انتقال حرارت به صورت جابجایی با هوای بین صفحات نیز به آن می‌رسد و مقداری انرژی تابشی هم صفحه‌ی جاذب دریافت می‌کند [۱۱].

سولتانا و همکاران [۱۲]، به مدل‌سازی عددی یک کالکتور خورشیدی تخت پرداختند. این مطالعات به منظور، بهینه‌سازی خورشیدی به منظور حداکثر نمودن بازده حرارتی صورت گرفت. رودریگز و همکاران [۱۳]، بازده حرارتی کالکتور خورشیدی صفحه پایین تخت را به صورت گذرا مورد مطالعه قرار دادند. مدل حرارتی گذرا، با استفاده از مقاومت‌ها و خازن‌های حرارتی انجام گرفت. لینگ هه و همکارانش [۱۴]، روش شبیه‌سازی کوپل مونته کارلو و حجم محدود را برای فرایند تبدیل انرژی کوپل تابش، انتقال حرارت هدایت و انتقال حرارت جابجایی در کالکتور خورشیدی سهموی به کار بستند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت تراکم هندسی، توزیع شار حرارتی ملایم تر می‌شود.

دامیردویک و همکاران [۱۵]، تحلیل عددی از بازده حرارتی کالکتورهای خورشیدی دارای صفحات صاف و موج دار انجام دادند. هدف کار، بررسی احتمال بهبود بازده حرارتی کالکتورهای خورشیدی صفحه‌ای بود. کومار و همکاران [۱۶]، بازده حرارتی سیستم مرکب کالکتور و گرمکن آب خورشیدی با سطح جاذب موجی شکل را بررسی کردند. عملکرد حرارتی سیستم ترکیبی کالکتور و گرمکن آب خورشیدی، به میزان زیادی بر نرخ انتقال حرارت بین سطح جاذب و آب، و مقدار تابش خورشید بر روی سطح جاذب وابسته است. تاج داران و همکاران، کالکتورهای خورشیدی صفحات سوراخ دار را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. اثرات پارامترهای، میزان تابش خورشیدی، جهت باد، جریان غیر یکنواخت و حالت‌های مختلف انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفت [۱۷]. هم چنین رحمان و همکاران، یک کالکتور خورشیدی مثلثی با شرایط مرزی حرارتی مربعی سینوسی با نانو سیال را مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. بهره مند و همکاران، سیستم‌های کالکتور خورشیدی با هندسه‌های مختلف را، بصورت تحلیل انرژی و اکسرژی انجام دادند مدل هابر، اساس تحلیل ریاضی معادلات بالانس انرژی برای المان‌های مختلف کالکتور انجام گرفت [۱۹].

$$c_{tube,total} = (\rho_{tube} t_{tube} \pi D_o L_{total} c_{tube}) / A_c \quad (8)$$

ظرفیت گرمایی آب با رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$c_{w,total} = (\rho_w c_{p,w} \frac{\pi D_i^2}{4} L_{total}) / A_c \quad (9)$$

ظرفیت گرمایی عایق پایین با رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$c_{insu,b,total} = \frac{\rho_{insu} t_{insu,b} c_{insu} A_c}{A_c} \quad (10)$$

ظرفیت گرمایی عایق لبه‌ها با رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$c_{insu,e,total} = (\rho_{insu} t_{insu,e} c_{insu} H(2(L + W))) / A_c \quad (11)$$

در روابط بالا ρ ، C و t به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضخامت مربوط به جز مورد نظر هستند. و L_{total} به وسیله روابط (۱۲) تا (۱۴) تشریح می‌شود.

$$L_{total} = (N L_{riser}) + (2 L_{header}) \quad (12)$$

$$L_{header} = W - t_{insu,e} \quad (13)$$

$$L_{riser} = L - ((2 t_{insu,e}) + (2 D_o)) \quad (14)$$

در روابط بالا به ترتیب L ، W و H به ترتیب طول، عرض و ارتفاع کالکتور خورشیدی صفحه تخت هستند. ضرایب a_1 و a_2 به ترتیب با رابطه (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آید. به این صورت که با توجه به این که پوشش اول است یا دوم، برابر با نسبت ضریب اتلاف کلی به ضریب اتلاف از پوشش مورد نظر (اولی یا دومی) تا محیط تعریف می‌شود.

ضریب اتلاف کلی کالکتور، دمای ورودی سیال و دمای محیط می‌باشد. نرخ حرارت دریافتی توسط سیال با رابطه (۳) نیز بیان می‌شود.

$$Q = \dot{m} C_{p,w} (T_o - T_i) \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، به ترتیب T_i و T_o ، عبارت‌اند از نرخ جریان جرم در لوله‌های کالکتور، گرمای ویژه آب در فشار ثابت، دمای سیال خروجی از کالکتور و دمای سیال ورودی به کالکتور می‌باشد. مقدار C_p ، با توجه به خواص آب در دمای متوسط (میانگین دمای سیال ورودی به کالکتور و سیال خروجی از کالکتور) به دست می‌آید.

دمای ورودی سیال یک مقدار مشخص می‌باشد، ولی دمای خروجی سیال از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$T_o = T_a + \left(\frac{S}{U_l} \right) - \left(\left(\frac{S}{U_l} \right) - (T_i - T_a) \right) \exp\left(\frac{-U_l T}{C} \right) \quad (4)$$

که در رابطه بالا C ، T عبارت‌اند زمانی که کالکتور خورشیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد و ظرفیت گرمایی کل می‌باشد که زمان مورد بررسی کالکتور خورشیدی ۱ ساعت یا همان ۳۶۰۰ ثانیه می‌باشد. ظرفیت گرمایی کل با رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$C = c_c (a_1 + a_2) + c_{ap} + c_{tu} + c_w + \frac{c_{insub}}{2} + \frac{c_{insue}}{2} \quad (5)$$

ظرفیت گرمایی پوشش شیشه‌ای با رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$c_{c,total} = (\rho_c t_c c_c A_c) / A_c \quad (6)$$

ظرفیت گرمایی صفحه جذب‌کننده با رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$c_{p,total} = (\rho_p t_p c_p A_c) / A_c \quad (7)$$

ظرفیت گرمایی لوله‌ها با رابطه (۸) بیان می‌شود.

ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت داخلی لوله با توجه به عدد رینولدز محاسبه می‌شود که با توجه به اینکه عدد رینولدز در کدام محدوده عددی قرار دارد، ضریب اصطکاک هم با رابطه مخصوص به خود محاسبه می‌شود. به عبارتی دیگر برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت داخلی لوله، باید اول ضریب اصطکاک محاسبه شود. عدد رینولدز در کالکتور خورشیدی صفحه تخت با رابطه (۲۲) بیان می‌شود.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu N} \quad (22)$$

که در رابطه بالا μ و N به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی سیال کاری کالکتور در دمای میانگین (متوسط دمای ورودی و دمای خروجی سیال کاری) و تعداد لوله‌هایی که به طور موازی در کالکتور خورشیدی صفحه تخت کنار هم قرار گرفته اند، می‌باشد. اگر عدد رینولدز $Re \leq 2300$ باشد، از رابطه های (۲۳) و (۲۴) برای محاسبه ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت داخلی لوله استفاده می‌شود.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (23)$$

$$h_{fi} = 4.36 \frac{k_f}{D_i} \quad (24)$$

در رابطه بالا، k_f مربوط به ضریب هدایت سیال کاری در دمای متوسط (میانگین دمای ورودی و خروجی سیال) به دست می‌آید. اگر عدد رینولدز $2300 < Re \leq 10000$ باشد، از رابطه‌های (۲۵) و (۲۶) برای بدست آوردن ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت داخلی استفاده می‌شود.

$$f = (1.58 \log(Re) - 3.28)^{-2} \quad (25)$$

$$h_{fi} = \frac{k_f}{D_i} \left[\frac{\frac{f}{2}(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{2}}(Pr^{0.67} - 1)} \right] \quad (26)$$

در رابطه بالا Pr ، عدد پرانتل سیال کاری کالکتور در دمای متوسط (میانگین دمای ورودی و خروجی سیال کاری) می‌باشد.

$$C_{insu,e,total} = (\rho_{insu} t_{insu,e} C_{insu} H(2(L + W)))/A_c \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{U_l}{\left(\frac{1}{H_w + H_{rc2-a}}\right)^{-1}} \quad (16)$$

در ادامه به تشریح رابطه فاکتور حذف حرارت می‌پردازد. فاکتور حذف حرارت که در بالا، در رابطه نرخ حرارت مفید سیال وجود دارد، به وسیله رابطه (۱۷) بیان می‌شود.

$$F_r = \frac{m \cdot c_{p,w}}{A_c U_l} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_l F'}{m \cdot c_{p,w}}\right) \right] \quad (17)$$

$$F' = \frac{1/U_l}{w \left[\frac{1}{U_l [D_o + (w - D_o)\eta_f]} + \frac{1}{c_b} + \pi D \right]} \quad (18)$$

در رابطه‌های بالا D_o ، w ، η_f و c_b به ترتیب قطر خارجی لوله‌ها، فاصله مرکز لوله‌های کالکتور از یک دیگر، بازده پره (صفحه جذب‌کننده)، مقاومت باند و ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت داخلی لوله می‌باشد. که هر کدام را با توجه به ضرورت، تشریح می‌شود. بازده پره مستقیم با پروفایل مستطیل شکل با رابطه (۱۹) تشریح می‌شود.

$$\eta_f = \frac{\tanh\left[\frac{m(w-D_o)}{2}\right]}{\frac{m(w-D_o)}{2}} \quad (19)$$

m در رابطه (۲۰) می‌شود.

$$m = \sqrt{U_l / k\delta} \quad (20)$$

که در رابطه بالا به ترتیب k و δ ضریب هدایت صفحه جذب‌کننده و ضخامت صفحه جذب‌کننده می‌باشد. مقاومت باند در این مقاله ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{1}{c_b} \approx 0 \quad (21)$$

که در جدول (۱) زیر به معرفی رابطه (۳۲) پرداخته می‌شود.

جدول ۱ معرفی انواع ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب انتقال حرارت تابش در کالکتور خورشیدی تخت

معرفی ضرایب انتقال حرارت در کالکتور خورشیدی	نماد در فرمول
ضریب انتقال حرارت تابش بین جذب‌کننده و پوشش اول	$H_{r_{p-c1}}$
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین جذب‌کننده و پوشش اول	$H_{c_{p-c1}}$
ضریب انتقال حرارت تابش بین پوشش اول و پوشش دوم	$H_{r_{c1-c2}}$
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش اول و پوشش دوم	$H_{c_{c1-c2}}$
ضریب انتقال حرارت تابش بین پوشش دوم و هوای محیط	$H_{r_{c2-a}}$
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش دوم و هوای محیط	H_w

که رابطه‌های (۳۳) تا (۳۵) ضرایب انتقال حرارت تابش (H_r) بین صفحات و هم چنین بین صفحات و محیط بیان می‌کند.

$$H_{r_{p-c1}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_{c1}^2)(T_p + T_{c1})}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1} \quad (33)$$

$$H_{r_{c1-c2}} = \frac{\sigma(T_{c1}^2 + T_{c2}^2)(T_{c1} + T_{c2})}{\frac{1}{\varepsilon_{c1}} + \frac{1}{\varepsilon_{c2}} - 1} \quad (34)$$

که در روابط بالا $\sigma, T_p, T_{c1}, T_{c2}, \varepsilon_p, \varepsilon_{c1}$ به ترتیب ضریب گسیل پوشش شیشه‌ای اول، ضریب گسیل صفحه جذب‌کننده، دمای پوشش شیشه‌ای دوم، دمای پوشش شیشه‌ای اول، دمای صفحه جذب‌کننده، ثابت بولتزمن و ضریب گسیل پوشش شیشه‌ای دوم می‌باشد. همچنین T_a در رابطه (۳۵) دمای هوای محیط می‌باشد. در رابطه (۳۵) ضریب انتقال حرارت تابشی بین پوشش شیشه‌ای دوم و محیط نیز بیان می‌شود.

$$H_{r_{c2-a}} = \varepsilon_{c2} \sigma (T_{c2}^2 + T_a^2)(T_{c2} + T_a) \quad (35)$$

در ادامه به بیان کردن روابطی برای تشریح کردن ضرایب جابجایی بین صفحات و هم چنین بین صفحات و محیط پرداخته

اگر عدد رینولدز $Re > 10000$ باشد، از رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) برای ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت داخلی لوله استفاده می‌شود.

$$f = 0.00128 + 0.1143(Re)^{-0.311} \quad (27)$$

$$h_{fi} = \frac{k_f}{Di} \left[\frac{\frac{f}{2} Re Pr}{1.07 + \frac{900}{Re} - \frac{0.63}{1+} + 12.7 \sqrt{\frac{f}{2} (Pr^{0.67} - 1)}} \right] \quad (28)$$

مقدار تشعشع خالص دریافتی توسط کالکتور خورشیدی صفحه تخت به وسیله تشریح می‌شود.

$$S = (\tau\alpha) I_t \quad (29)$$

که $\tau\alpha$ ، محصول ضریب موثر جذب انتقال می‌باشد که آن با رابطه (۳۰) بیان می‌شود.

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho} \quad (30)$$

که به ترتیب ρ, α, τ عبارت‌اند ضریب انتقال پوشش، ضریب جذب صفحه جذب‌کننده و ضریب بازتاب دهنده پوشش می‌باشد. که خود مقدار $\tau\alpha$ را بصورت داده با مقدار 0.84 به عنوان داده در نظر گرفته می‌شود.

ضریب اتلاف کل کالکتور (U_l) به ترتیب به صورت مجموع ضریب اتلاف بالا، لبه و پایین در نظر گرفته می‌شود که هر کدام تعریف جداگانه خود را دارد. رابطه ضریب اتلاف کل با رابطه (۳۱) بیان می‌شود.

$$U_l = U_t + U_e + U_b \quad (31)$$

ضریب اتلاف بالای کالکتور، برای کالکتوری که صفحه جذب‌کننده و ۲ پوشش شیشه‌ای بالای صفحه جذب‌کننده دارد، با رابطه (۳۲) تعریف می‌شود.

$$U_t = \left(\frac{1}{H_w + H_{r_{c2-a}}} + \frac{1}{H_{c_{c1-c2}} + H_{r_{c1-c2}}} + \frac{1}{H_{c_{p-c1}} + H_{r_{p-c1}}} \right)^{-1} \quad (32)$$

$$H_w = \max(V_{wind}, \frac{8.6V_{col}^{0.6}}{L^{0.4}}) \quad (40)$$

که در رابطه بالا V_{col} و V_{wind} به ترتیب سرعت باد روی صفحه کالکتور و حجم کالکتور می باشد و L نیز جذر سوم از حجم کالکتور می باشد که در رابطه های (۴۱) و (۴۲) بیان می شود.

$$V_{col} = L * W * H \quad (41)$$

$$l = \sqrt[3]{V_{col}} \quad (42)$$

ضریب اتلاف لبه و پایین کالکتور به عنوان تابعی از ضخامت و ضریب انتقال حرارت هدایت می باشد که با رابطه های (۴۳) و (۴۴) بیان می شود.

$$U_e = \frac{\frac{K_{insu}}{t_{insu-e}} (2(L + W))H}{L * W} \quad (43)$$

که در رابطه بالا $k_{insu}, t_{insu-e}, L, W$ و H به ترتیب عرض کالکتور، طول کالکتور، ضخامت عایقی که لبه کالکتور قرار دارد یا به عبارتی دیگر ضخامت عایق دور تا دور کالکتور خورشیدی، ضریب انتقال حرارت هدایت عایق و ارتفاع کالکتور می باشد. و هم چنین در رابطه زیر t_{insu-b} ضخامت عایقی که در پایین کالکتور قرار دارد است.

$$U_b = \frac{K_{insu}}{t_{insu-b}} \quad (44)$$

۲-۲- مدل سازی اقتصادی

در این قسمت به مدل سازی اقتصادی کالکتور خورشیدی صفحه تخت پرداخته می شود. که نتیجه آن، قیمت کل سالانه می باشد و قیمت کل سالانه را به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می شود. قیمت کل سالانه کالکتور خورشیدی صفحه تخت به دو قسمت تقسیم می شود، قسمت اول به عنوان قیمت سرمایه گذاری برای خرید اجزا کالکتور، نظیر صفحه جذب کننده، لوله ها، پوشش های شیشه ای، پمپ و ... می باشد و قسمت دوم مربوط به قیمت کار کردن یا همان قیمت برق مصرفی پمپ در طول سال می باشد که به عنوان قیمت عملکرد کالکتور خورشیدی در نظر گرفته می شود. بنابراین قیمت کل کالکتور از رابطه (۴۵) بدست می آید.

می شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جذب کننده و پوشش اول از رابطه (۳۶) به دست می آید.

$$H_{cp-c1} = \frac{Nua1Ka1}{t_{p-c1}} \quad (36)$$

که در رابطه بالا $Nua1, Ka1$ و t_{p-c1} به ترتیب ضریب هدایت هوا، عدد ناسلت بین صفحه جذب کننده و پوشش شیشه ای اول و همچنین فاصله بین صفحه جذب کننده و پوشش شیشه ای اول می باشد. بدست آوردن عدد ناسلت بین صفحه جذب کننده و صفحه پوشش اول در رابطه (۳۷) تشریح می شود.

$$Nua1 = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra1 \cos \beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra1 \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra1 \cos \beta}{5830} \right) - 1 \right]^+ \quad (37)$$

در رابطه بالا β و $Ra1$ به ترتیب زاویه مایل بودن با سطح زمین و عدد رایلی بین صفحه جذب کننده و صفحه پوشش اول می باشد. علامت + بالای دو براکت به این معنی است که فقط اگر حاصل داخل براکت مثبت باشد، در محاسبات عدد ناسلت حساب شود در غیر این صورت حاصل دو براکت صفر در نظر گرفته شود. عدد رایلی بین صفحه جذب کننده و صفحه پوشش اول با رابطه (۳۸) بیان می شود.

$$Ra1 = \frac{g(T_p - T_{c1})t_{p-c1}^3 Pr1_a}{Tm1 \theta1} \quad (38)$$

که $Tm1, Pr1_a, g$ و θ به ترتیب شتاب گرانش زمین، عدد پرانتل مخصوص به هوا در دمای متوسط (میانگین دمای صفحه جذب کننده و دمای پوشش اول)، میانگین دمای صفحه جذب کننده و صفحه پوشش اول و ویسکوزیته سینماتیکی در دمای میانگین صفحه جذب کننده و صفحه پوشش اول می باشد که توسط رابطه (۳۹) در ذیل بیان می شود.

$$Tm1 = \frac{T_p + T_{c1}}{2} \quad (39)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش اول و پوشش دوم H_{c1-c2} نیز مانند H_{cp-c1} به دست می آید. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه ای دوم و محیط نیز از رابطه (۴۰) به دست می آید:

$$W_p = \frac{\dot{m}\Delta P}{\eta_p \rho_f} \quad (52)$$

در رابطه بالا $\rho_f \eta_p \Delta P \dot{m}$ به ترتیب نرخ جریان جرمی در لوله‌ها، افت فشار در لوله‌ها، بازده پمپ، چگالی سیال درون لوله‌ها در دمای متوسط سیال ورودی و سیال خروجی می‌باشد. افت فشار درون لوله‌ها از رابطه (۵۳) به دست می‌آید.

$$\Delta P = \frac{2f \left(\frac{L_{total}}{D_i} \right) \rho_f V^2}{1000} \quad (53)$$

در رابطه بالا V سرعت سیال درون لوله‌ها می‌باشد که از رابطه (۵۴) به دست می‌آید.

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho_f A_{cross}} \quad (54)$$

در رابطه بالا A_{cross} مساحت سطح مقطع عبوری لوله‌های حامل سیال می‌باشد که با رابطه (۵۵) به دست می‌آید.

$$A_{cross} = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (55)$$

قیمت کارکرد کالکتور طبق رابطه (۵۶) به دست می‌آید.

$$C_{op} = k_{el} N_h W_p \quad (56)$$

در رابطه بالا N_h و k_{el} به ترتیب قیمت واحد برق و تعداد ساعات کاری کالکتور خورشیدی در طول سال می‌باشد که معادل معادل ۸۷۶۰ ساعت می‌باشد.

۲-۳- روش انجام بهینه‌سازی

در اول بهینه‌سازی ذکر این نکته، مهم می‌باشد که با توجه به این که مقاومت‌های تابشی، تابع دماهای صفحه جذب‌کننده و پوشش شیشه‌ای هستند. فرایند حل یک فرایند صحیح خطا، می‌باشد.

۱- دمای صفحه جذب‌کننده حدس زده می‌شود.

۲- دمای پوشش‌های شیشه‌ای حدس زده می‌شود.

کالکتور خورشیدی ممکن است دارای یک پوشش شیشه‌ای و داری دو پوشش شیشه‌ای باشند و در این مقاله نیز کالکتور خورشیدی دارای دو پوشش می‌باشد.

۳- با توجه به این دماهای صفحه جذب‌کننده و پوشش شیشه‌ای حدس زده می‌شود و دارای مقدار می‌باشد. در این مرحله نرخ

$$TAC: C_{tot} = a C_{inv} + C_{op} \quad (45)$$

در رابطه بالا C_{inv} و C_{op} به ترتیب به عنوان ضریب قیمت سالانه، قیمت سرمایه گذاری سالانه و قیمت عملکرد سالانه شناخته می‌شود. ضریب a از رابطه (۴۶) به دست می‌آید.

$$a = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-y}} \quad (46)$$

در رابطه بالا i و y به ترتیب نرخ سود و عمر سیستم می‌باشند. قیمت سرمایه گذاری سالانه خود به دوبخش قیمت خرید سرمایه گذاری اجزا کالکتور نظیر صفحه جذب‌کننده، پوشش شیشه‌ای، لوله و ... و قیمت خرید سرمایه گذاری پمپ می‌باشد. که با رابطه (۴۷) بیان می‌شود.

$$C_{inv} = C_{col} + C_{pump} \quad (47)$$

$$C_{col} = \phi \{ a_1 A_p^{b1} + a_2 A_{tube}^{b2} + a_3 V_{insu}^{b3} + a_4 A_c^{b4} \} \quad (48)$$

$$C_{pump} = a_5 W_p^{b5} \quad (49)$$

در رابطه بالا ϕ ضریب مونتاژ کالکتور، پارامترهای a_i و b_i ثوابت قیمت تجهیزات موجود در بازار و A_p ، A_{tube} ، V_{insu} و A_c و W_p به ترتیب حجم عایق حرارتی، مساحت خارجی سطح جانبی لوله های کالکتور، مساحت صفحه جذب، مساحت پوشش شیشه‌ای و کار یا برق مصرفی پمپ می‌باشد. مساحت خارجی جانبی کالکتور از رابطه (۵۰) به دست می‌آید.

$$A_{tube} = (N \pi D_o L_{riser}) \quad (50)$$

در این مقاله مساحت صفحه جذب‌کننده و مساحت پوشش شیشه‌ای یکسان فرض می‌شود که در رابطه (۵۱) بیان می‌شود.

$$A_p = A_c = Length_{col} Width_{col} \quad (51)$$

کار مصرفی پمپ از رابطه (۵۲) به دست می‌آید.

عیب‌هایی از جمله این که گران می‌شود و در بیشتر موارد حاصل آن یک بهینه‌سازی موضعی می‌باشد. در این مسایل باید از روش‌های تصادفی استفاده کرد که الگوریتم یکی از این روش‌های تصادفی است. اساس الگوریتم‌های ژنتیک قوانین طبیعی ژن‌ها و قوانین انتخاب در طبیعت است و عناصر پایه‌ای آن پارامترهای ژنتیک مانند ژنتیک طبیعی همان تولید مثل جهش هستند. یک الگوریتم ژنتیک بصورت کلی در ذیل شرح می‌شود:

$$T=0$$

تولید جمعیت اولیه $G(t)$

ارزیابی $G(t)$

تا زمانی که قواعد یا قیود تمام‌کننده، به نتیجه نرسیده یا رای نشده باشند ادامه بدهد یا انجام دهد.

$$T=t+1$$

$G(t)$ را انتخاب کن

$G(t)$ را مجدداً ترکیب کن

$G(t)$ را ارزیابی کن تا زمانی که جواب حاصل شود.

جمعیت نسل $G(t+1)$ از نسل $G(t)$ با یک روال تصادفی انتخاب می‌شود. که این روال تصادفی به وسیله چهار عملگر تولید مثل، ادغام، جهش و مهاجرت نسل جدید را تولید می‌کند. تولید مثل فرایندی است که در آن هر رشته با توجه به تابع هدف تکرار می‌شود. در فرایند تولید مثل فقط رشته جواب‌هایی که از برازندگی بالا برخوردار هستند دوباره در نسل بعدی تکرار می‌شوند و این نشان‌دهنده آن است که رشته جواب‌هایی که برازنده ترند و کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهند شانس بالاتری برای راه پیدا کردن به نسل بعدی را دارند. عملکرد جدایش به طور تصادفی دو قسمت از رشته جواب والد از نسل $G(t)$ را به یک دیگر تعویض می‌کند تا دو رشته جواب فرزند را از نسل $G(t+1)$ تولید کند. جدایش شامل دو تابع جستجو مکمل است. در تابع اولی، جدایش می‌تواند اطلاعات جدیدی درباره رویه چند بعدی شامل کروموزوم‌های نسل قبلی که از پیش در جمعیت موجود هستند آماده کند و از راه ارزیابی رشته جواب‌های جدید الگوریتم ژنتیک می‌تواند اطلاعاتی جمع آوری کند. در تابع دوم، جدایش می‌تواند صفحه چند بعدی جدیدی به جمعیت معرفی کند اگر این جدید در محدوده کارایی بالا از فضای جستجو باشد ارزیابی از جمعیت جدید به طرف جستجوی بیشتر در همین زیر مجموعه می‌رود. جهش، یک عملگر جستجو ثانویه است که تنوع جمعیت را افزایش می‌دهد. جهش‌های ساده برای جلوگیری از اینکه مقدار یک بیت در طول جمعیت ثابت بماند به کار گرفته می‌شود. جهش‌های سطح بالاتر یک جستجوی کاملاً اتفاقی را موجب می‌شوند.

انتقال حرارت مفید دریافتی از کالکتور به دست می‌آید. با توجه به این که ضریب اتلاف کل کالکتور، تابش جذب شده توسط صفحه جذب‌کننده و مشخصات فیزیکی نظیر تعداد لوله، قطر داخلی لوله، طول کالکتور، عرض کالکتور و ... مشخص می‌شود. ۴- دمای پوشش‌های شیشه‌ای با رابطه زیر اصلاح می‌شود که در این مورد باید نکاتی بیان می‌شود که با توجه به این که کالکتور خورشیدی دارای یک پوشش شیشه‌ای است یا دارای دو پوشش شیشه‌ای رابطه دمای اصلاح شده پوشش شیشه‌ای تفاوت دارد. دمای اصلاح شده پوشش اول یا پوشش پایینی از رابطه (۵۷) به دست می‌آید.

$$T_{c1} = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{H_{cp-c1} + H_{rp-c1}} \quad (57)$$

همچنین دمای اصلاح شده پوشش دوم از رابطه (۵۸) به دست می‌آید.

$$T_{c2} = T_{c1} - \frac{U_t(T_p - T_a)}{H_{cc1-c2} + H_{rc1-c2}} \quad (58)$$

۵- دماهای پوشش‌های جدیدی جایگزین دماهای پوشش‌های قدیمی می‌شود و این فرایند از گام ۳ تکرار می‌شود تا به همگرایی برسد.

۶- در این مرحله دمای صفحه جذب‌کننده تصحیح می‌شود به وسیله رابطه (۵۹) بیان می‌شود.

$$T_p = T_a + (s - \frac{Q}{A_c})/U_l \quad (59)$$

۷- مشابه دماهای پوشش‌های اول و دوم، دمای صفحه جذب‌کننده جدید جایگزین دمای صفحه جذب‌کننده قدیمی می‌شود و این فرایند از گام ۲ تکرار می‌شود تا دمای صفحه جذب‌کننده همگرا شود.

۸- در این مرحله دماهای پوشش‌های اول و دوم و هم چنین دمای صفحه جذب‌کننده بدست آمده‌اند و به این ترتیب نرخ انتقال حرارت مفید از کالکتور و همچنین بازده کالکتور و بازده اکسرژی به عنوان هدف نهایی بدست می‌آید.

۴-۲- بهینه‌سازی دو هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناغالب

اغلب مسایل بهینه‌سازی دارای متغیرهای گسسته و پیوسته به طور هم زمان هستند. پس اگر روش‌های استاندارد برنامه ریزی غیر خطی در مورد این مسایل بکار گرفته شود، اثری ندارد و

در جدول (۲) تمام داده‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شد، ذکر شده است. ذکر این نکته در این جا ضروری است که بهینه‌سازی دو هدفه با شرایط گذرا انجام شده است، بدین صورت که از یک تشعشع ثابت و دمای محیط ثابت برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی استفاده نشده است بلکه دمای هوا و مقدار تشعشع متغیر می‌باشد.

به منظور توجیه مبنا یا منطق بهینه‌سازی، این پژوهش در بدترین روز از نظر مقدار تشعشع و دمای محیط انجام شد که اگر بهینه‌سازی در چنین شرایطی نتیجه بخش بود بتوان اطمینان حاصل نمود که در سایر شرایط نیز مثرتر خواهد بود. مقدار تشعشع و مقدار دمای هوا محیط در روز چهارم از ماه دسامبر در زیر آورده شده است به این صورت که اولین داده مربوط به ساعت اول روز چهارم از ماه دسامبر و آخرین داده مربوط به ساعت آخر از روز چهارم از ماه دسامبر است. بنابراین ۲۴ داده برای ماتریس تشعشع و دمای هوا محیط وجود دارد.

ماتریس دما در روز چهارم از ماه دسامبر به قرار زیر می‌باشد.

$$T_a = [7 \ 6.5 \ 5.6 \ 5 \ 4.5 \ 4.5 \ 6 \ 9 \ 11.7 \\ 13.1 \ 14.5 \ 15.2 \ 16 \ 16.3 \ 16.3 \ 15.2 \\ 13.5 \ 11.9 \ 11.4 \ 9.2 \ 8.5 \ 8 \ 7.8 \ 7.5]^\circ\text{C}$$

$$G_t = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 23.9 \ 179.9 \ 357.9 \\ 521.6 \ 636.3 \ 677.4 \ 636.3 \ 521.6$$

$$357.9 \ 179.9 \ 23.9 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; W/m^2$$

$$T_a = [24 \ 23.8 \ 22.5 \ 22 \ 21 \ 22 \ 23.75 \ 26.25 \\ 28.75 \ 26.25 \ 28.75 \ 30 \ 31.25 \ 32.25 \\ 33.75 \ 34 \ 34.5 \ 33.75 \ 32.5 \\ 30.4 \ 28.75 \ 27.5 \ 26.25 \ 25]^\circ\text{C}$$

$$G_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 59 & 209 & 384 & 561.8 & 715.4 & 819.5 & 856 \\ & & & & & & & & .4 & 819.5 \\ & & & & & & & & 715.4 & 561.8 \\ & & & & & & & & 384 & 209 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; W/m^2$$

مهاجرت یک مسئله نسبتاً جدید در الگوریتم‌های ژنتیک است که بر اساس همان مهاجرت که بین جوامع نزدیک یا دور در طبیعت صورت می‌گیرد پایه‌گذاری شده است. دو ویژگی برای انتخاب مهاجران وجود دارد. اولاً آن‌ها باید برازنده باشند دوماً باید کاملاً با اعضای بومی جمعیت متفاوت باشند. معمولاً مهاجرت بین دو جمعیت متفاوت صورت می‌گیرد ولی می‌تواند بین اعضا یک جمعیت هم انجام پذیرد. در این بحث وقتی پیشرفتی برای نسل‌های مختلف گزارش نمی‌شود یک جواب اتفاقی اضافی می‌- شود که تنوع جمعیت حال حاضر را بیشتر می‌کند. مهاجرت به عنوان یک جایگزین برای جهش پیشنهاد می‌شود و معمولاً در مواقعی که خطر همگرایی محلی یا زودرس وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. قواعد همگرایی ژنتیک ممکن است بر اساس پیدا کردن جواب قابل قبول از طریق ارزیابی تمام نسل‌ها و یا گذاشتن یک سری محدوده‌ای خاص پایه ریزی شود که بستگی به هدف و بینش بهینه‌سازی دارد.

۲-۵- مقادیر ورودی

ماتریس تشعشع در روز چهارم از ماه دسامبر به قرار زیر می‌باشد.

علاوه بر داده‌هایی که در بالا ذکر شد، بقیه داده‌ها در ادامه ذکر خواهند شد.

هم چنین ماتریس تشعشع در روز یک از ماه ژوئیه به صورت زیر می‌باشد.

ماتریس دما برای روز ۲۱ سپتامبر به قرار زیر می‌باشد.

$$T_a = [19.5 \ 19 \ 18.3 \ 17.5 \ 16.9 \ 17.5 \ 19.5 \ 22.5 \ 25.6 \ 27.4 \ 28.75 \ 29.4 \ 31.6 \ 31.25 \ 32 \ 31.25 \ 30.6$$

29 26.25 24.7 22.7 21.8 21.25 20.6]°C

همچنین ماتریس تشعشع در روز ۲۱ سپتامبر به صورت زیر می‌باشد.

$$G_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 158.5 & 359 & 571.2 & 758.9 & 887.5 & 933.2 \\ & & & & & & 887.5 & 758.9 & & & & \\ & & & & & & 571.3 & 359 & 158.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; W/m^2$$

ماتریس دما برای روز ۷ ژانویه به صورت زیر می‌باشد.

$T_a = [4.9 \ 4 \ 3.75 \ 3.65 \ 3.1 \ 2.6 \ 3.75 \ 6.25 \ 8.75 \ 11.25 \ 12 \ 13.1 \ 13.75$
 $14.4 \ 14.45 \ 13.75 \ 12 \ 10.6$
 $8.75 \ 7.5 \ 6.8 \ 6.25 \ 5.6 \ 5.1]^{\circ}C$

همچنین ماتریس تشعشع برای روز ۷ ژانویه به صورت زیر می‌باشد.

$$G_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 27.5 & 188.3 & 371.2 & 539.3 & 656.8 & 687 \\ & & & & & & 656.8 & 539.3 & 371.2 & & & \\ & & & & & & 188.3 & 27.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; W/m^2$$

جدول ۲ داده‌های مورد استفاده در بهینه‌سازی دو هدفه

I	0.12
β	30.35°
N_c	2
$\tau\alpha$	0.84
V_{wind}	5 m/s
ε_{c2}	0.88
ε_{c1}	0.88
ε_p	0.92
δ	0.005 m
k_{ap}	384 W/m.°C
$\dot{m}$	0.002 kg/m.s
t_{insub}	0.08 m
t_{insue}	0.04 m
t_{c1}	0.04 m
t_{p-c1}	0.025 m
w	0.15 m
k_{insu}	0.045 W/m.°C
ε_{c2}	0.88
t_{tube}	0.005 m
g	9.81 m/s ²
σ	5.67 * 10 ⁻⁸ J/s.m ² K ⁴
t_{c1-c2}	0.025 m
t_{c2}	0.04 m

همچنین ضخامت کل کالکتور یا ارتفاع کل کالکتور از رابطه (۶۰) به دست می‌آید.

$$\text{Thickness} = t_{insub} + \delta + t_{p-c1} + t_{c1} + t_{c1-c2} + t_{c2} \quad (60)$$

نماد داده در فرمول	مقدار داده
c_{insu}	800 J/kg.°C
c_{tube}	480 J/kg.°C
c_{ap}	480 J/kg.°C
c_c	800 J/kg.°C
ρ_{insu}	50 kg/m ³
ρ_{tube}	8800 kg/m ³
ρ_{ap}	8800 kg/m ³
ρ_c	2500 kg/m ³
a_4	4.5
a_3	220
a_2	60
a_1	120
b_3	1
b_2	0.8
b_1	0.9
a_5	3500
Y	15 years
φ	1.5
b_5	0.47
b_4	1
η_p	0.85
N_h	4380 hours
k_{el}	0.1 \$/kw.h

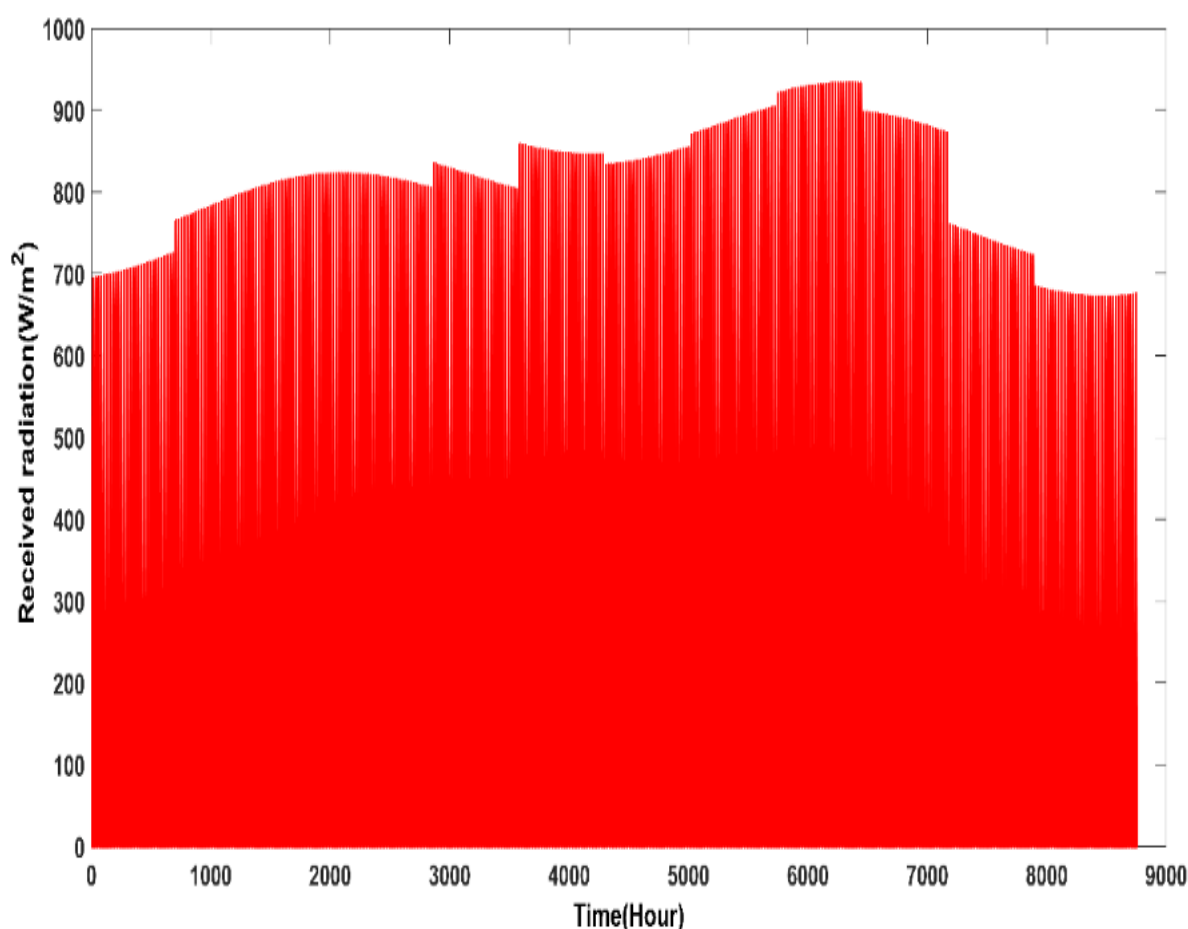
۳- یافته ها

۳-۱- نمودار تشعشع دریافتی ساعتی سالانه برای شهر رفسنجان و نمودار جبهه بهینه پارتو و مشخص کردن نقاط بهینه A، B، C و D

در این پژوهش به مدل سازی و بهینه سازی اقتصادی کالکتورهای خورشیدی آب گرم کن صفحه تخت و بررسی انتقال حرارت گذرا در آن ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک دو هدفه با مرتب سازی ناغالب در متلب پرداخته می شود. نکته ای باید در این جا یاد اوری شود این است که مدل سازی و بهینه سازی با تشعشع و دمای

هوای ثابت انجام نمی شود. یعنی مدل سازی و بهینه سازی با استفاده از تشعشع و مقدای دمای هوای متغیر در طول روز انجام می شود.

در نمودار (۱) تشعشع ساعتی سالانه، که توسط کالکتور خورشیدی با صفحه زاویه دار با زمین که در شهر رفسنجان استان کرمان، در عرض جغرافیایی 30° شمالی قرار دارد، آورده می شود. میانگین تشعشع دریافتی سالانه برای شهر رفسنجان، حدود 253 W/m^2 می باشد.

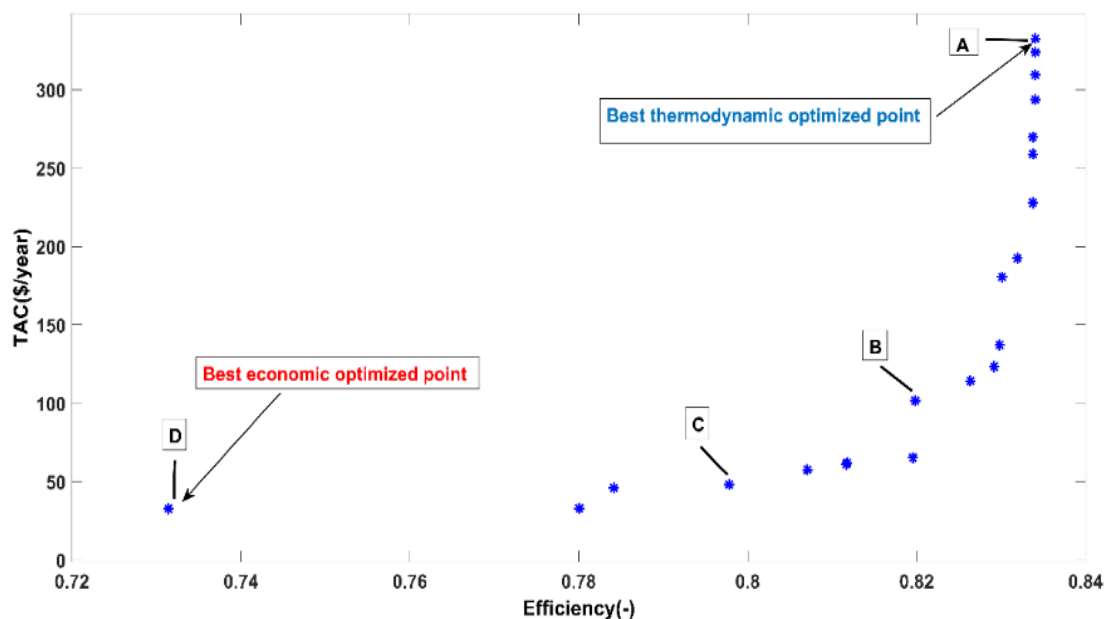


نمودار ۱ میزان تشعشع دریافتی ساعتی سالانه برای شهر رفسنجان

نسل برابر ۱۰ بیشتر ۲۰ ساعت زمان می برد که به همین علت تعداد تعداد نسل را کم انتخاب می شود.

در نمودار (۲) جبهه بهینه پارتو، برای توابع هدف بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه آورده می شود. بهینه سازی دو هدفه به این صورت می باشد که باید بازده ترمودینامیکی را بیشینه سازی و قیمت کل سالانه را کمینه سازی شود.

مورد مطالعه مدل سازی و بهینه سازی برای تعداد نسل برابر ۵ و تعداد کروموزوم ۱۲۰ می باشد. علت اینکه تعداد نسل کم می باشد، این است که با توجه به سنگینی برنامه و طولانی شدن آن به مقدار بسیار زیاد (بیش از ۲۴ ساعت) در رسیدن به همگرایی، تعداد نسل کم گرفته می شود. با توجه به اینکه این نوع الگوریتم از نوع الگوریتم ژنتیک دو هدفه می باشد. با توجه به ساختار الگوریتم های ژنتیک برای همین تعداد کروموزوم و تعداد



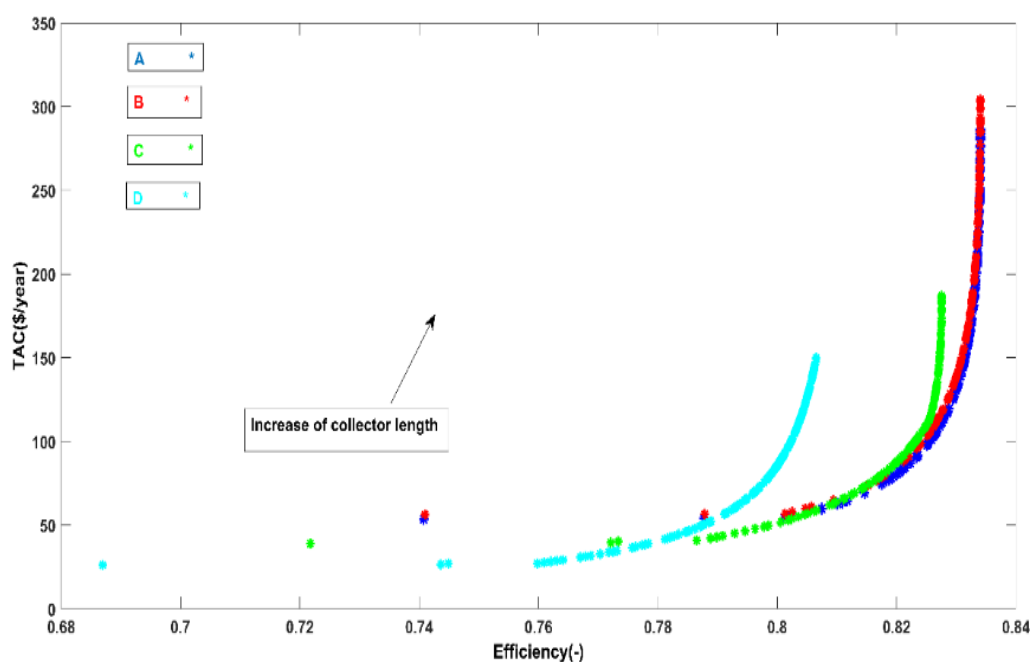
نمودار ۲ پارتو بهینه‌سازی دو هدفه بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه

بدست آمده است که در این بخش به تاثیر این چهار متغیر طراحی بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه پرداخته می‌شود. چنانچه تاثیر متغیر طراحی طول کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه برآورد شود، طول کالکتور از محدوده پایین تا محدوده بالا را می‌توان مجاز در نظر گرفت و سایر پارامترهای طراحی مانند عرض، تعداد لوله و قطر داخلی لوله را به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفت.

تمام نقاط A، B، C و D هیچ برتری یا بدتری از نظر جبهه بهینه پارتو بر یکدیگر ندارند.

۲-۳- تاثیر متغیرهای طراحی بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه

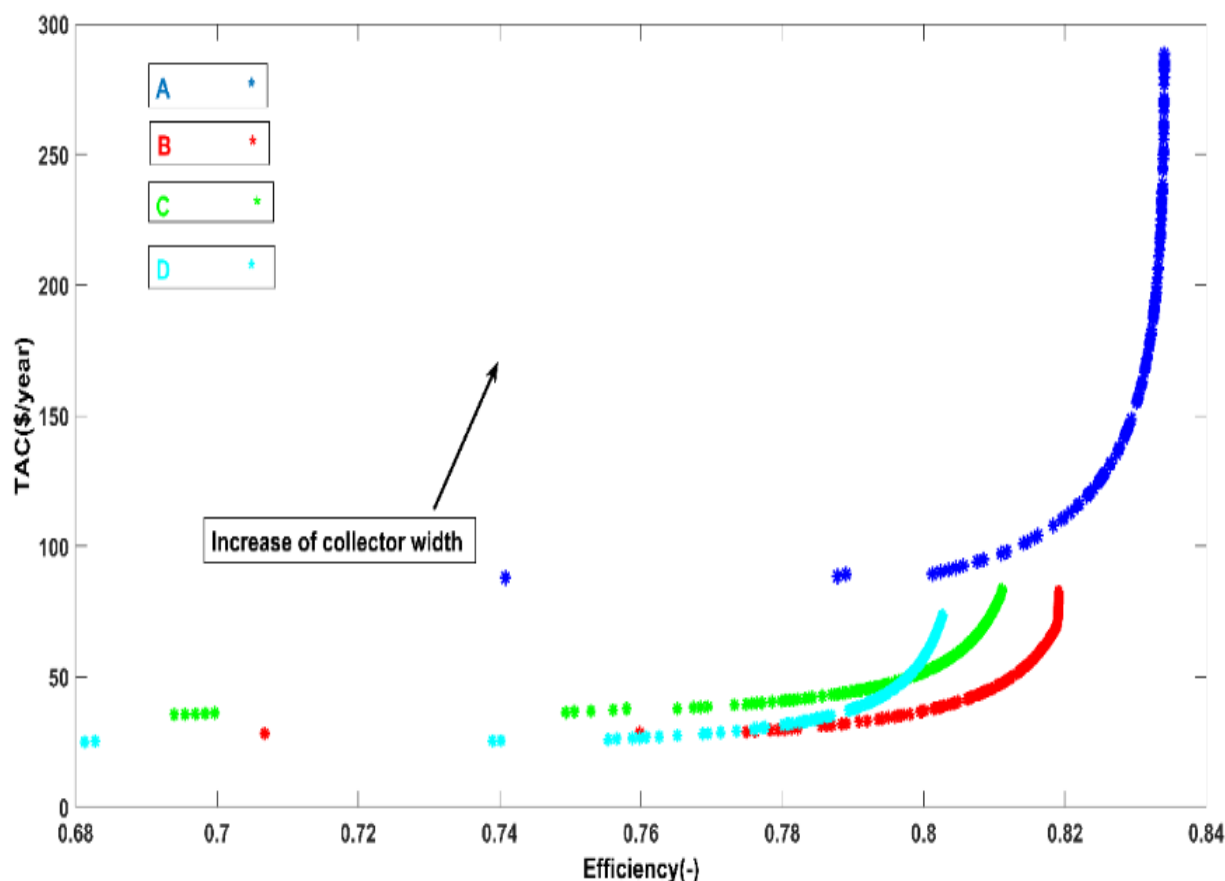
نتایج حاصل از این پژوهش با در نظر گرفتن طول، عرض، تعداد لوله و قطر داخلی لوله کالکتور به عنوان نقاط بهینه A، B، C و D



نمودار ۳ تاثیر افزایش متغیر طراحی طول کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه

بازده همین امر منجر به کاهش بازده ترمودینامیکی می‌شود. از طرفی دیگر افزایش طول کالکتور به معنای افزایش مواد مصرفی که باعث افزایش قیمت سرمایه گذاری و نیاز به یک پمپ قدرتی بیشتر برای جبران کردن اختلاف فشار بیشتر که همین امر منجر به قیمت بیشتر کارکرد و در نهایت منجر به افزایش قیمت کل سالانه می‌شود.

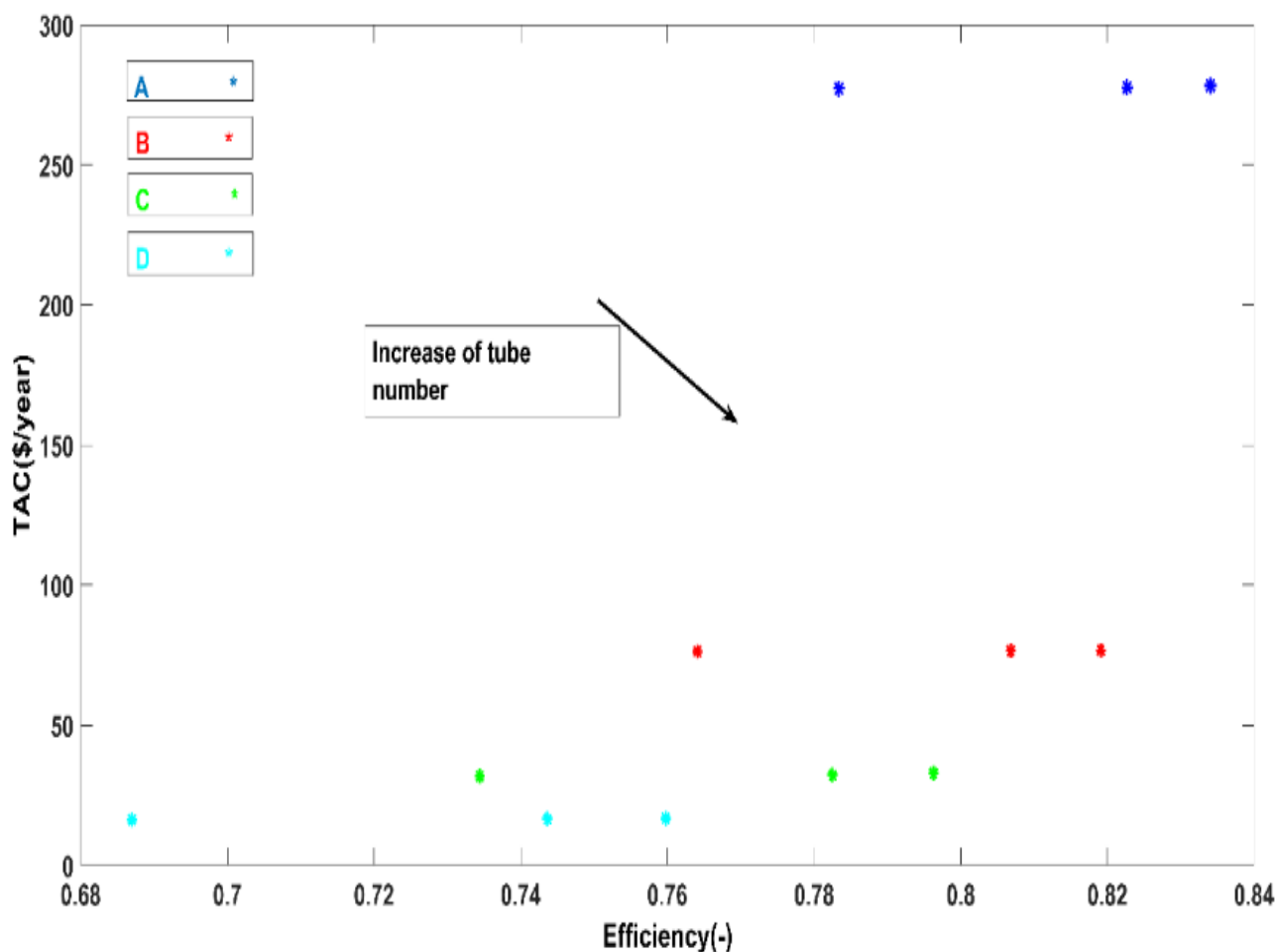
در نمودار (۳) تاثیر افزایش متغیر طراحی، طول کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه می‌باشد. با افزایش طول کالکتور، بازده ترمودینامیکی و قیمت سرمایه گذاری سالانه هر دو بدتر می‌شوند به این صورت که با افزایش طول کالکتور بازده کاهش می‌یابد و قیمت کل سالانه افزایش می‌یابد. با افزایش طول کالکتور، سرعت انتقال حرارت زیاد می‌شود و باتوجه به فرمول



نمودار ۴ تاثیر افزایش متغیر طراحی عرض کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه

لبه کاهش می‌یابد. نتایج عددی نشان می‌دهد که ضریب اتلاف کلی با افزایش عرض کالکتور افزایش می‌یابد در نتیجه نرخ انتقال گرما با افزایش عرض کالکتور بر اساس رابطه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر حداکثر تشعشع دریافتی نیز با افزایش عرض کالکتور، افزایش می‌یابد. در عرض‌های کمتر کالکتور، نرخ زیاد شدن در انتقال حرارت بالاتر از حداکثر تابش دریافتی در حالی که برای عرض‌های بیشتر کالکتور، نرخ زیاد شدن در انتقال حرارت کمتر از حد اکثر تابش دریافتی می‌باشد. قیمت نیز افزایش یافته با افزایش یافتن مواد مورد نیاز کالکتور ولی قیمت کارکرد تغییر نمی‌کند ولی در نهایت قیمت کل افزایش می‌یابد چون قیمت سرمایه گذاری زیاد شده است.

در نمودار (۴) تاثیر افزایش عرض کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه را نشان داده می‌شود. همان طور که نشان داده می‌شود با افزایش عرض کالکتور، قیمت سرمایه گذاری سالانه افزایش می‌یابد. هم چنین بازده ترمودینامیکی نیز اول افزایش می‌یابد ولی سپس بازده ترمودینامیکی کاهش می‌یابد. با افزایش عرض کالکتور، فاصله بین لوله‌ها افزایش می‌یابد و به عنوان یک نتیجه بازده پره کاهش می‌یابد در حالی که تشعشع جذب شده افزایش یافته با افزایش سطح موثر کالکتور، علاوه بر این جملات، با افزایش عرض کالکتور، ضریب اتلاف بالایی کالکتور افزایش یافته با افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی باد، در حالی که ضریب اتلاف

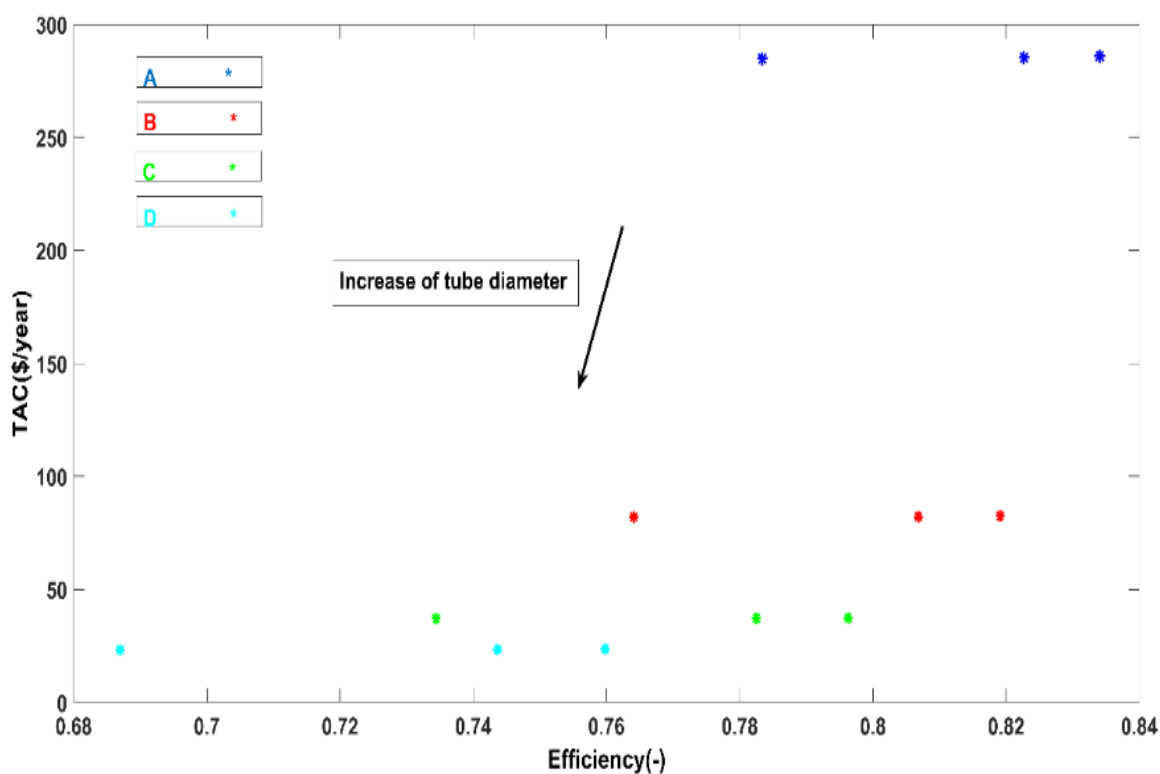


نمودار ۵ تاثیر افزایش متغیر طراحی تعداد لوله کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه

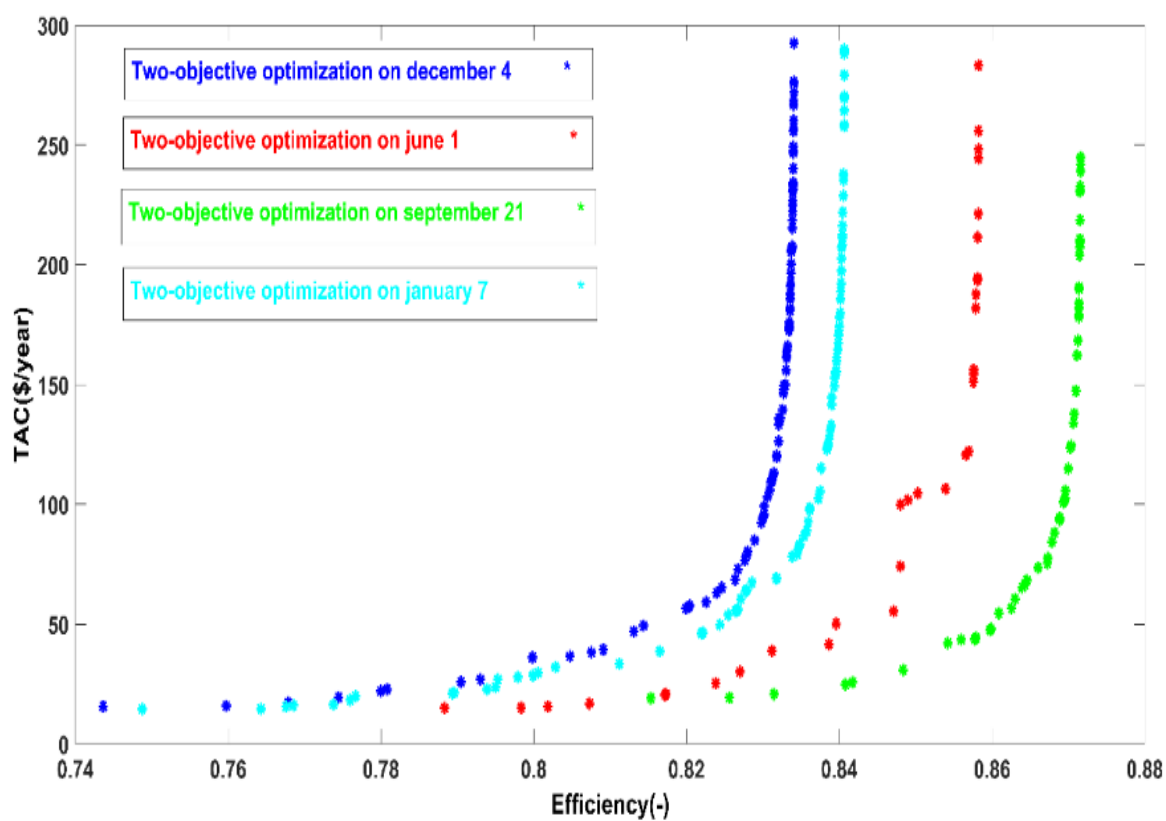
رینولدز و نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد با افزایش تعداد لوله، توضیحاتی که در بالا ارائه شده منجر به رفتار افزایشی و کاهشی بازده ترمودینامیکی می‌شود.

نمودار (۶) تاثیر متغیر طراحی قطر داخلی لوله بر بازده ترمودینامیکی و قیمت سرمایه گذاری سالانه را نشان می‌دهد. هم بازده و قیمت کل سالانه کاهش می‌یابد. افزایش قطر لوله و طیف وسیعی از قطر لوله در منطقه مجاز متغیر طراحی امکان‌پذیر نیست. پس تغییر قطر لوله منجر به تضاد بین توابع هدف می‌شود. با این حال به دلیل راه حل غیر ممکن، فقط مقادیر ممکن قطرها (کوچک‌ترین مقادیر) در نقاط بهینه انتخاب می‌شوند. عدد رینولدز با افزایش این متغیر طراحی کاهش می‌یابد که باعث کاهش ضریب انتقال حرارت، نرخ انتقال حرارت و بازده ترمودینامیکی می‌شود و به دلیل افت فشار کمتر (عدد رینولدز کمتر) و هزینه عملیاتی کمتر، منجر به کاهش قیمت کل سالانه نیز می‌شود.

نمودار (۵) تاثیر افزایش تعداد لوله بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه را نشان می‌دهد با افزایش تعداد لوله، قیمت کل سالانه کاهش می‌یابد در حالی که بازده ترمودینامیکی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. به این صورت که با افزایش تعداد لوله عدد رینولدز و به ترتیب افت فشار و هزینه عملیاتی کاهش می‌یابد و از طرف دیگر با افزایش تعداد لوله، هزینه سرمایه گذاری افزایش می‌یابد. روند کاهش قیمت کل سالانه برای مقادیر بالاتر تعداد لوله نشان می‌دهد که کاهش هزینه عملیاتی بیشتر از افزایش هزینه سرمایه گذاری به ویژه برای نقاط بهینه با بازده بالاتر است. افزایش تعداد لوله رفتار معکوس بر بازده دارد، برای محدوده کوچکی باعث افزایش بازده درحالی که برای محدوده دیگر باعث کاهش بازده می‌شود. به حقیقت وقتی فاصله بین لوله‌ها، با افزایش تعداد لوله‌ها کاهش می‌یابد نتیجه آن چنین است که راندمان باله یا صفحه جذب‌کننده افزایش می‌یابد و سرعت انتقال حرارت افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد



نمودار ۶ تاثیر افزایش قطر داخلی کالکتور بر بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه

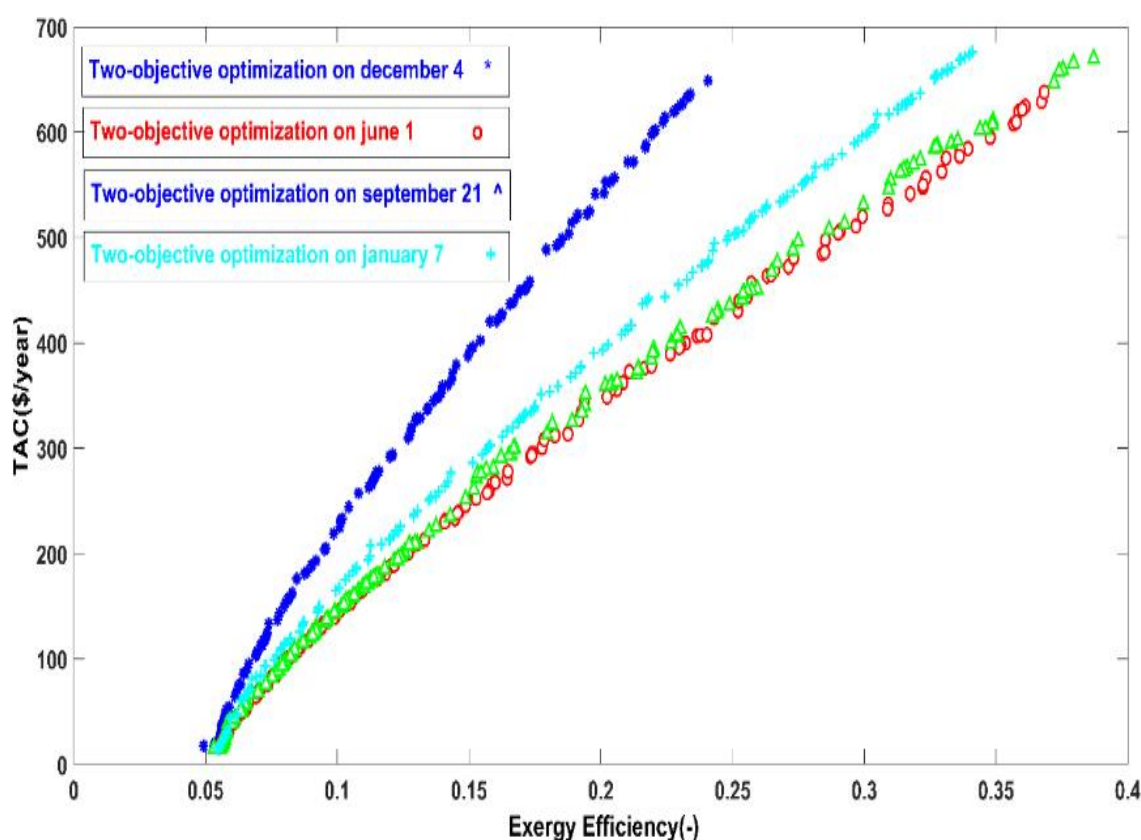


نمودار ۷ پارتو بهینه سازی دو هدفه بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه برای چهار روز مختلف سال

۳-۳- نمودارهای جبهه بهینه پارتو بهینه‌سازی دو هدفه بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه و همچنین بازده اکسرژی و قیمت کل سالانه برای چهار روز مختلف سال از نظر تشعشع و دمای هوا

در نمودار (۷) جبهه بهینه پارتو، بهینه‌سازی دو هدفه بازده ترمودینامیکی و قیمت کل سالانه برای چهار روز مختلف سال که با یک دیگر از نظر تشعشع و دمای هوا با یک دیگر تفاوت دارد، رسم می‌شود. همان طور که در شکل بالا دیده می‌شود در

روز ۲۱ سپتامبر با توجه که این نقاط جبهه بهینه پارتو از نظر قیمت کل سالانه با روزهای دیگر ماه‌ها تفاوت ندارند ولی در روز ۲۱ سپتامبر بازده ترمودینامیکی با توجه به دیگر روزهای ماه‌ها متفاوت می‌باشد و بازده ترمودینامیکی در ۲۱ سپتامبر به مقدارهای بیشتری دست پیدا می‌کند که این قابل انتظار می‌باشد با توجه به تشعشع و دمای هوا در روز ۲۱ سپتامبر و کمترین بازده ترمودینامیکی نیز متعلق به روز ۴ دسامبر می‌باشد که با توجه به تشعشع و دمای هوا در این روز، این نتیجه قابل انتظار است.



نمودار ۸ پارتو بهینه‌سازی دو هدفه بازده اکسرژی و قیمت کل سالانه برای چهار روز مختلف سال

۴- نتیجه گیری

در این مقاله مدل‌سازی و بهینه‌سازی برای بدترین روزهای سال از نظر تشعشع انجام می‌شود که ۴ دسامبر و ۷ ژانویه می‌باشد که بهینه‌سازی برای نرخ جریان جرم ۰/۲۰۰ کیلوگرم بر ثانیه انجام می‌شود. با توجه به اینکه ماکسیمم دمایی که سیال در ۴ دسامبر و ۷ ژانویه به آن می‌رسد، به ترتیب بالای ۳۵۰ کلوین (۷۷ درجه سانتی گراد) و بالای ۳۴۰ کلوین (۶۷ درجه سانتی گراد) می‌باشد که دمای خروجی مطلوبی برای سیال کاری در

نمودار (۸) جبهه بهینه پارتو، بهینه‌سازی دو هدفه بازده اکسرژی و قیمت کل سالانه می‌باشد که برای چهار روز مختلف سال که دارای تشعشع و دمای هوا متفاوت است رسم می‌شود. همان طور که انتظار می‌رود دو روز ۱ ژوئن و ۲۱ سپتامبر به بیشترین بازده‌های اکسرژی نسبت به دو روز ۴ دسامبر و ۷ ژانویه دست پیدا می‌کنند و ۴ دسامبر با توجه به شرایط تشعشع و دمای هوا، به مقدارهای کمتری از بازده اکسرژی دست پیدا می‌کند. قیمت کل سالانه این چهار روز مختلف سال نیز تفاوت زیادی ندارد.

- [10] Becker, Manfred, P.C. Klimas, J. M. Chavez, G.J. Kolb, and W. Meinecke, Second generation central receiver technologies (1993).
- [11] Maddi Organi, V., Khadam Hosseini, H., Mathematical modeling of a solar water heater in Isfahan city and comparison of modeling results with experimental results, *the first annual clean energy conference*, Kerman, Iran, (2019). (in Persian)
- [12] Tanzeen, S., Graham, L., Morrison, Gary Rosengarten, Thermal performance of a novel rooftop solar micro-concentrating collector, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 7, pp. 1992–2000, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.002>, (2012).
- [13] Rodríguez-Hidalgo, M.C., Rodríguez-Aumente, P.A., Lecuona, A., Gutiérrez-Urueta, G.L., Ventas, R., Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14–15, pp. 2394–2404, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.003>, (2011).
- [14] Ya-Ling, H., Jie, X., Ze-Dong, C., Yu-Bing, T., A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 976–985, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.017>, (2011).
- [15] Damir, D., Mladen, A., Numerically assisted analysis of flat and corrugated plate solar collectors thermal performances, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2416–2431, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.016>, (2012).
- [16] Rakesh Kumar, M., A. Rosen, Thermal performance of integrated collector storage solar water heater with corrugated absorber surface, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 1764–1768, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.04.007>, (2010).
- [17] Tajdaran, S., Bonatesta, F., Ogden, R., Kendrick, C., Use of CFD modelling for transpired solar collectors and associated characterization of multi-scale airflow and heat transfer mechanisms, *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 2238–2234, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.344>, (2015).
- [18] Rahman, M.M., Saha, S. Mojumder, S., Naim, A.G., Saidur, R., Ibrahim, Talaat A., Effect of Sine-squared thermal boundary condition on augmentation of heat transfer in a triangular solar collector filled with different nanofluid, *Numerical Heat Transfer*, Part B, Vol. 68, pp. 53–74, DOI:
- این شرایط بد می باشد است. نتیجه گرفته می شود، بهینه سازی که برای شرایط بد جواب می دهد، قطعاً برای شرایط بهتر از نظر تشعشع و دما هوا بهتر جواب می دهد.
- مدل سازی و بهینه سازی ترمودینامیکی اقتصادی انواع دیگر کالکتورهای خورشیدی و مقایسه نتایج آنها با یک دیگر و مدل سازی و بهینه سازی فنی اقتصادی کالکتورهای صفحه تخت با تغییر دادن شرایط مسئله مثلاً تغییر دادن توابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود پیشنهاد می شود.
- ### ۵- مراجع
- [1] Iranian New Energy Organization (SANA) (2010). <http://www.sun.org.ir>. (in Persian)
- [2] Martinopoulos, G., Missirlis, D., CFD modeling of a polymer solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 1499–1508, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.004>, (2010).
- [3] Anderson, B., *Solar energy: fundamentals in building design*, (1977).
- [4] Stine, W.B., Power from the sun: principles of high temperature solar thermal technology, *Solar Energy Research Inst.*, Golden, CO (USA), pp. (1987).
- [5] Kalogirou, S.A., *Solar energy engineering: processes and systems*, Academic Press, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5>, (2013).
- [6] Kalogirou, S., The potential of solar industrial process heat applications, *Applied Energy*, Vol. 76, No. 4, pp. 337–361, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00176-9), (2003).
- [7] Kontinen, P., Lund, P., Kilpi, R., Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces, *Solar energy materials and solar cells*, Vol. 79, No. 3, pp. 273–283, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00411-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00411-7), (2003).
- [8] Wackelgard, E., Niklasson, G., Granqvist, C., *Selectively solar-absorbing coatings*, *Solar Energy: The State of the Art*, J. Gordon, Ed., James & James Ltd., London, pp. 109–144, (2001).
- [9] Pitz-Paal, R., *Concentrating solar technologies: the key to renewable electricity and process heat for a wide range of applications. In Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII on CD-ROM*, Cologne, Germany, (2002).

- [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00142-X), (1999).
- [23] Minn, M.A., Ng, K.C., Khong, W.H., Melvin, T., A distributed model for a Tedlar-foil flat plate solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 27, pp. 507-523, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00175-6), (2002).
- [24] Duffy, J., Beckman, W., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley & sons, New York. (1991).
- [25] Lee, P.S., Garimella, S.V., Liu, D., Investigation of heat transfer in rectangular microchannels, *Int. J. Heat Mass Transf.* Vol. 48, pp. 1688–1704, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.11.019>, (2005).
- [26] Mitchell, J.W., Heat transfer from spheres and other animal forms, *Biophys. J.* Vol. 16, pp. 561–569, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(76\)85711-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(76)85711-6), (1976).
- <https://doi.org/10.1080/10407790.2014.992058>, (2015).
- [19] Bahrehmand, D., Ameri, M., Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with natural convection, *Renewable Energy*, Vol. 74, pp. 357-368, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.028>, (2015).
- [20] Baughn, J.W., Young, M.F., The calculated performance of a solar hot water system for a range of collector flow rates, *Solar Energy*, Vol. 32, pp. 303-305, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(84\)80048-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(84)80048-1), (1984).
- [21] Oliva, A., Costa, M., Numerical simulation of solar collectors the effect of nonuniform and nonsteady state or the boundary conditions, *Solar Energy*, Vol. 5, pp. 359–373, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(84\)80048-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(84)80048-1), (1991).
- [22] Hilmer, F., Vajen, Ratka, A., Ackermann H., Fuhs, W., Melsheimer, O., Numerical solution and validation of a dynamic model of solar collectors working with varying fluid flow rate, *Solar Energy*, Vol. 65, pp. 305–321, DOI:

پایش سلامت سازه ای پنل ساندویچی با هسته مشبک از طریق کاشت کرنش سنج

چکیده: پایش سلامت سازه ای روشی است که در آن سلامت سازه ای به صورت زنده و برخط رصد می شود تا خرابی ها پیش از رسیدن به شکست فاجعه آمیز تشخیص داده شوند. در چندلایه های کامپوزیتی فرایند ساخت لایه به لایه این امکان را فراهم می کند تا با جاسازی حسگر کرنش در بین لایه ها، قطعات نسبت به بارهای وارده هوشمند شده و اطلاعاتی از وضعیت تنش درون سازه ای قابل مشاهده گردد. نوآوری مقاله حاضر به کارگیری سیستم پایش سلامت برای سازه های ساندویچی با هسته مشبک است به گونه ای که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. برای این منظور در حین ساخت نمونه، کرنش سنجی در محل اتصال هسته به پوسته جاسازی شده است تا حالت شکست رایج در این نوع سازه یعنی جدا شدن پوسته از هسته مورد پایش قرار گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که هوشمند سازی پنل ساندویچی و پایش وضعیت آن با روش حاضر در حیطه الاستیک و در بارگذاری های شبه استاتیکی با دقت خوبی امکان پذیر است. خارج از حیطه الاستیک، داده های حاصل از کرنش سنج عمدتاً متأثر از شکست و آسیب در نزدیکی محل کاشت کرنش سنج است.

واژه های راهنما: پنل های ساندویچی، هوشمند سازی، پایش سلامت سازه ای، کاشت کرنش سنج

طیبه اکبری

پژوهشگر

الهام شهابی

قهفرخی*

استادیار

امین میرزایی

پژوهشگر، مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
مجتمع دانشگاهی مواد و
فناوری های ساخت

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

Tayebah Akbari
Researcher

Elham Shahabi
Ghahfarokhi*
Associate Professor

Amin Mirzaei
Researcher, Faculty of
Materials and
Manufacturing
Technologies,
Malek Ashtar
University of
Technology

Structural Health Monitoring (SHM) of lattice core sandwich panel via embedding strain gauges

Abstract: Structural Health Monitoring (SHM) is a method in which the structural health is monitored in order to detect damages before catastrophic failure. In composite laminates, the layer-by-layer fabrication process makes it possible to embed strain sensors between the layers to make the part intelligent with respect to the incoming loads and to obtain information about the stress state inside the structure. The innovation of the present article is to use the health monitoring system for sandwich structures with lattice core in such a way that it would be economical. For this purpose, during the construction of the sample, a strain gauge is embedded between the core and the shell to monitor the common failure mode in this type of structure, i.e. the delamination of the shell from the core. The results of this research show that it is possible to make the sandwich panel smart and monitor its health using the present method in the elastic range and in quasi-static loading with good accuracy. Outside of the elastic range, the data obtained from the strain gauge is mainly affected by the damage and failure near the strain gauge.

Keywords: Sandwich panels, Smartening, Structural Health Monitoring (SHM), Embedded strain gauge

۱- مقدمه

در استاندارد SAE APR6461 پایش سلامت سازه‌ای به این صورت تعریف شده است: فرایند جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها از حسگرهای نصب شده بر روی سازه برای ارزیابی سلامت سازه‌ای. در این روش تعداد زیادی حسگر به طور مداوم حجم بالایی از داده‌ها را برای پردازش به صورت زنده جمع‌آوری می‌کنند. الگوریتم‌هایی داده‌های به‌دست‌آمده را با داده‌های ذخیره‌شده از سازه سالم مقایسه کرده و پس از حذف خطاهای ناشی از شرایط محیطی به محاسبه شاخص آسیب و هشدار در مورد میزان و نوع آسیب می‌پردازند. به این ترتیب یک سیستم پایش سلامت موفق با تشخیص خرابی‌ها در مراحل اولیه، علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری باعث افزایش قابلیت اطمینان شده و از حوادث فاجعه‌بار و خسارات جانی و مالی مرتبط با آن پیشگیری می‌کند. [۱].

پایش سلامت ذاتاً یک حوزه تحقیقاتی میان رشته‌ای با کاربردهایی وسیع در زمینه سازه‌های هوایی، سازه‌های دریایی و سازه‌های عمرانی است. به عنوان مثال زیکا و همکاران [۲] حسگرهای پیزوکامپوزیت را در پایش سلامت سازه‌ای هواپیما و دیاز و همکاران [۳] حسگرهای نوری را در همین راستا به کار گرفته اند. در کاربردهای دریایی لی و همکاران [۴] روش‌های پایش سلامت سازه‌ای را دسته بندی کرده و فرانگول و همکاران [۵] کاربرد پایش سلامت سازه‌ای را در تعیین طول عمر سازه مفید ارزیابی نموده‌اند. نمونه‌های پایش سلامت در کاربردهای عمرانی متعدّدند که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش شکرآوی و همکاران [۶] اشاره نمود که در آن پایش سلامت زیرساخت‌های عمرانی مرور شده است. کاساس و همکاران [۷] پایش سلامت را در خصوص سازه پل به کاربردهاند و سویری و همکاران [۸] در تحقیق خود به پایش سلامت سد بتنی پرداخته‌اند.

بسته به جنس و کاربرد سازه، روش‌های پایش سلامت متعدّدی وجود دارد. در کامپوزیت‌های پلیمری انواع روش‌های پایش سلامت توسط حسنی و همکاران به تفصیل مرور شده است [۹]. از جمله مهم‌ترین روش‌های پایش سلامت در کامپوزیت‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر ارتعاشات، روش امواج هدایت شونده [۱۰]، روش انتشار صوت [۱۱] و روش‌های مبتنی بر کرنش اشاره کرد.

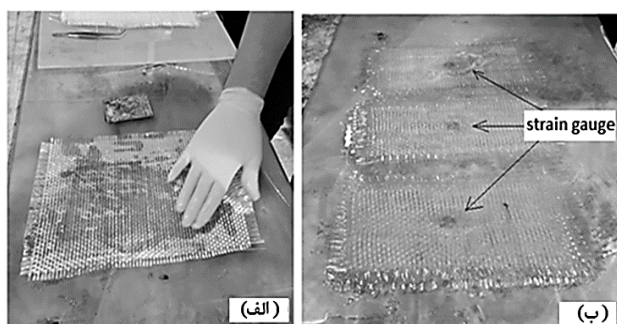
در کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل ساخت لایه به لایه در دمای محیط و یا دماهای متوسط، امکان جاسازی یا کاشت کرنش‌سنج در درون سازه (در بین لایه‌ها) به راحتی امکان‌پذیر است [۱۲]. با کاشت حسگرهای کرنش در نقاط حساس و بحرانی

سازه کامپوزیتی، سازه در برابر بارگذاری‌های مختلف هوشمند شده و امکان اجرای سیستم پایش سلامت بر مبنای کرنش برای آن فراهم می‌گردد. حسگرهای کرنش دو نوعند: کرنش‌سنج‌های مقاومتی و کرنش‌سنج‌های فیبر نوری [۱۳]. کرنش‌سنج‌های فیبر نوری ابزاری جدید و رو به رشد هستند که می‌توانند در تعداد دلخواهی نقطه مشخص شده در طول فیبر هم‌زمان به عنوان حسگر کرنش، دما، ارتعاش و انتشار صوت عمل کنند و به همین خاطر رقیبی جدید برای حسگرهای متعارفی نظیر حسگرهای پیزوالکتریک و کرنش‌سنج مقاومتی محسوب می‌شوند [۱۴]. [۱۵]. اما این مزایا به بهای صرف هزینه بالاتر به دست می‌آیند. به علاوه دقت کرنش‌سنج‌های فیبر نوری نسبت به کرنش‌سنج‌های مقاومتی پایین‌تر است. بنابراین استفاده از کرنش‌سنج‌های مقاومتی در پایش سلامت ساختاری با وجود رقیب جدید همچنان رواج داشته و تحقیقات در این زمینه در جریان است [۱۶].

بلهودگ و لاگاج [۱۷] اثر جاسازی کرنش‌سنج مقاومتی در بین لایه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی بر سختی و استحکام کششی و خمشی قطعه را مورد بررسی قرار داده‌اند. سوسا و همکاران [۱۸] همین موضوع را در مورد سازه‌های ساندویچی با پوسته از جنس شیشه/اپوکسی بررسی کرده‌اند. نتیجه هر دو تحقیق نشان می‌دهد که جاسازی کرنش‌سنج مقاومتی در بین لایه‌ها باعث افت درخور توجهی در خواص مکانیکی سازه نشده و هوشمند سازی کامپوزیت شیشه اپوکسی با این روش بلامانع است. کفال و ایلدیز [۱۹] پایش سلامت پنل کامپوزیتی ضخیمی به شکل بال هواپیما را تحت بارهای خمشی، پیچشی و غشایی با آرایه‌ای از کرنش‌سنج‌های مقاومتی و فیبرنوری پیاده سازی کرده و با این روش تغییر شکل سه بعدی بال را مورد بررسی قرار داده‌اند. زیو و همکاران [۲۰] با استفاده از کرنش‌سنج مقاومتی، مخازن تحت فشار کامپوزیتی ساخته شده به روش رشته پیچی را تحت بارگذاری خستگی تا رسیدن به پارگی کامل پایش برخط کرده و این روش را در پیش‌بینی و پیشگیری از انفجار مخازن قابل اعتماد ارزیابی کرده‌اند.

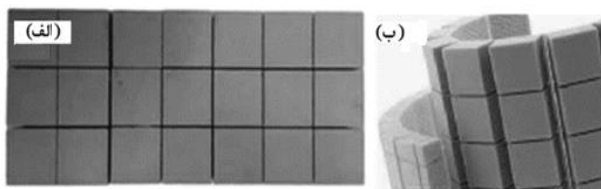
پایش سلامت در ایران جز در کاربردهای عمرانی عمدتاً مغفول مانده است. با گذشت بیش از یک دهه از ورود پایش سلامت به حوزه مهندسی عمران در ایران، اما هنوز از این روش به نحو بایسته در نگهداری سازه‌های عمرانی استفاده نشده است. یکی از دلایل این امر هزینه مالی بالا در اجرای پروژه‌های پایش سلامت است. ناظمی و همکاران در راستای این عامل بازدارنده به توصیف چارچوبی برای تعیین ارزش مالی پایش سلامت سازه‌ای برای نگهداشت پل‌ها پرداخته‌اند [۲۱]. عدم به کارگیری

جاسازی کرنش‌سنج در نزدیکی این محل می‌توان کرنش و در نتیجه بارهای وارد بر محل اتصال را به صورت زنده رصد نمود. نحوه ساخت نمونه با کرنش‌سنج کاشته شده در نزدیکی محل اتصال هسته و پوسته به این صورت بوده است که ابتدا پوسته‌های بالایی و پایینی به صورت دستی مطابق شکل (۱ الف) لایه چینی شده‌اند. پوسته‌ها از جنس شیشه/اپوکسی بوده و شامل چهار لایه پارچه بافته شده از جنس شیشه E می‌باشند. در طی فرایند لایه چینی، کرنش‌سنج‌هایی بر روی پایین‌ترین لایه و در وسط آن جاسازی شده است که در شکل (۱ ب) قابل مشاهده‌اند.



شکل ۱ الف- ساخت رویه‌های پنل ساندویچی به روش دستی ب- جاسازی کرنش‌سنج بین لایه‌ها در حین ساخت رویه‌ها

پوسته‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد پخت شده و پس از پخت کامل با رعایت دستورالعمل‌های لازم با چسب اپوکسی به هسته چسبانیده و تحت فشار خشک شده‌اند. هسته مورد استفاده، فوم پی وی سی شیاردار است که تصویر آن در شکل (۲ الف) دیده می‌شود. وجود شیار در آن باعث می‌شود تا فوم مطابق شکل (۲ ب) انحنای پذیر باشد. این نوع فوم در ساخت بدنه شناورها کاربرد داشته و ساخت بدنه شناور با انحنای ملایم با استفاده از آن امکان‌پذیر است.



شکل ۲ الف- هسته پی وی سی شیاردار به کار رفته در ساخت پنل ساندویچی، ب- امکان ایجاد انحنا در هسته شیاردار

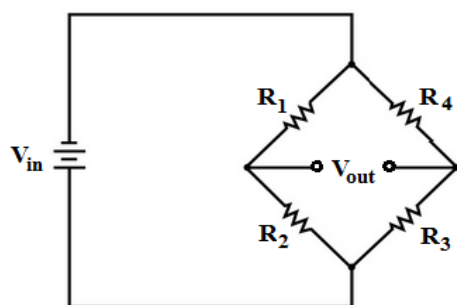
پس از چسباندن رویه‌ها به هسته، اطراف قطعه مطابق ابعاد مذکور در استاندارد ASTM C393 [۲۵] که استاندارد برای تعیین خواص خمشی پنل ساندویچی‌هاست برشکاری شده است. شکل (۳) نمونه نهایی را پس از برشکاری با ذکر ابعاد آن نشان می‌دهد.

سیستم‌های پایش سلامت در ایران در سایر حوزه‌ها مانند صنایع هوایی و دریایی نسبت به حوزه مهندسی عمران مشهودتر است و تا جایی که نویسنده می‌داند هیچ گزارشی در مراجع علمی ایران در مورد استفاده از سیستم‌های روزآمد پایش سلامت در این دو حوزه تاکنون منتشر نشده است.

پژوهش حاضر گام کوچکی در راستای ورود به این عرصه محسوب می‌شود که در آن برای به حداقل رساندن هزینه‌های مرتبط با اجرای سیستم پایش سلامت، اولاً استفاده از کرنش‌سنج‌های مقاوم‌تری به عنوان حسگر در راستای هوشمند کردن سازه ساندویچی مد نظر قرار گرفته است، زیرا نسبت به کرنش‌سنج‌های فیبر نوری قیمت کمتری دارند. و ثانیاً ثبت داده‌های خروجی از کرنش‌سنج با استفاده از میکروکنترلر آردینو صورت گرفته است که نسبت به داده‌بردارهای متعارف برای قرائت کرنش‌سنج هزینه کمتری داشته و به توجیه اقتصادی اجرای سیستم پایش سلامت کمک می‌کند. سازه مورد استفاده از نوع پنل‌های ساندویچی بوده و محل نصب کرنش‌سنج، در نزدیکی محل اتصال هسته به پوسته‌ی پنل ساندویچی در نظر گرفته شده است که نقطه‌ای بحرانی و مستعد آسیب محسوب می‌شود. جزئیات مربوط به نحوه کاشت کرنش‌سنج در حین فرایند ساخت در محل مذکور، به کارگیری سیستم داده برداری مبتنی بر میکروکنترلر آردینو و ارزیابی صحت داده‌های خروجی در ادامه به تفصیل آمده است.

۲- ساخت نمونه پنل ساندویچی با حسگر درونی

پنل‌های ساندویچی به دلیل قابلیت بالایی که در تحمل بارهای خمشی دارند به وفور در ساخت سازه‌های کامپوزیتی استراتژیک در صنایع پیشرفته‌ای نظیر صنایع هوایی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده گسترده از پنل‌های ساندویچی در صنایع پیشرفته باعث شده است تا هوشمندسازی سازه‌های ساندویچی در ایران با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار [۲۲] و روغن‌های مغناطیسی [۲۳]، [۲۴] مورد توجه قرار گیرد. در پژوهش حاضر اما هوشمندسازی سازه ساندویچی با کاشت کرنش‌سنج مقاوم‌تری در محل اتصال پوسته به هسته مدنظر قرار گرفته است. دلیل این جانمایی آن است که در محل اتصال پوسته به هسته، تفاوت در جنس و مدول یانگ هسته و پوسته باعث ایجاد تنش‌های برشی در محل اتصال شده و می‌تواند سبب جدایش پوسته از هسته شود. این مود شکست رایج بوده و باعث از دست رفتن یکپارچگی سازه و کاهش چشمگیر کارایی سازه می‌شود اما وقوع آن از روی سطح با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نیست. با

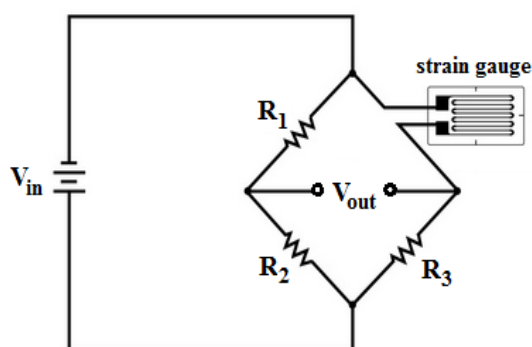


شکل ۵ ساختار پل وتسون که قرائت تغییرات بسیار کوچک مقاومت الکتریکی را امکان پذیر می سازد.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$

$$= \left(\frac{R_3 R_1 - R_2 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)} \right)$$

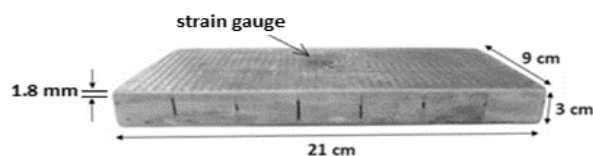
مطابق رابطه (۲) اگر $R_3 R_1 = R_4 R_2$ باشد ولتاژ خروجی صفر بوده و پل در حالت تعادل قرار دارد. در این حالت کوچکترین تغییر در مقاومت‌ها باعث برهم خوردن تعادل پل و ایجاد ولتاژ خروجی کوچکی می‌شود که با اندازه‌گیری دقیق آن می‌توان تغییرات اندک در مقاومت را با دقت بالایی محاسبه نمود. اگر یکی از چهار مقاومت الکتریکی مطابق شکل (۶) با کرنش‌سنج جایگزین شود اصطلاحاً گفته می‌شود که پل در آرایش یک چهارم به کار گرفته شده است.



شکل ۶ پل وتسون در آرایش یک چهارم که در آن تنها یکی از مقاومت‌ها با کرنش‌سنج جایگزین می‌شود.

در این حالت ارتباط بین ولتاژ ورودی و خروجی به صورت زیر خواهد بود:

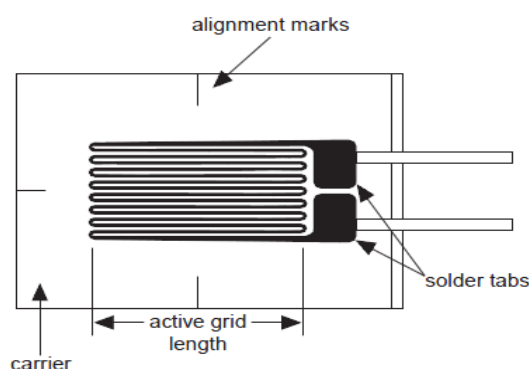
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_g} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (3)$$



شکل ۳ ابعاد نمونه ساخته شده مطابق استاندارد ASTM C393

۳- سخت افزار قرائت کرنش

ساختار کرنش‌سنج‌های مقاومتی مطابق شکل (۴) به صورت شبکه‌ای از یک فویل یا سیم فلزی است که بر روی بستری نارسانا قرار گرفته است.



شکل ۴ ساختار کرنش‌سنج مقاومتی که تغییر طول را به تغییر مقاومت الکتریکی تبدیل می‌کند.

مقاومت کرنش‌سنج‌ها در بازه ۳۰ تا ۳۰۰۰ اهم بوده و رایج‌ترین کرنش‌سنج‌ها دارای مقاومت‌های ۱۲۰، ۳۵۰ و ۱۰۰۰ اهمی هستند. اعمال کرنش در راستای طول شبکه باعث افزایش طول فویل یا سیم و در نتیجه افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شود. این رابطه خطی بوده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = GF \cdot \varepsilon \quad (1)$$

که در آن R_g مقاومت کرنش‌سنج پیش از اعمال کرنش، ΔR_g تغییرات مقاومت در اثر اعمال کرنش و GF ضریب سنج^۱ کرنش‌سنج است که توسط سازنده آن ارائه می‌شود. تغییرات مقاومت الکتریکی در اثر اعمال کرنش در مقایسه با مقاومت اولیه کرنش‌سنج بسیار ناچیز بوده و به همین خاطر اندازه‌گیری دقیق آن دشوار است. برای برون رفت از این مشکل از مدار پل وتسون^۲ برای اندازه‌گیری تغییرات اندک در مقاومت کمک گرفته می‌شود. پل وتسون مداری الکتریکی مطابق شکل (۵) است که ولتاژ خروجی V_{out} در آن از رابطه (۲) به دست می‌آید.

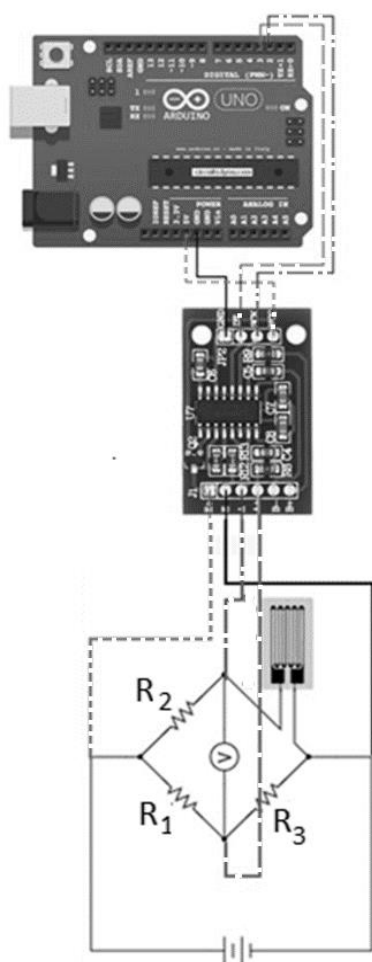
³ Quarter bridge

¹ Gauge factor

² Wheatstone bridge

۵- ارزیابی سیستم داده برداری طراحی شده

برای ارزیابی عملکرد سخت افزار و نرم افزار طراحی شده، داده‌های ثبت شده توسط آن با داده‌های ثبت شده توسط یک داده بردار آزمایشگاهی کالیبره مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور آزمون خمش چهار نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. این آزمون به صورت یک چرخه بارگذاری و باربرداری بوده و دو مرتبه تکرار شده است. بار اول از سیستم داده برداری طراحی شده استفاده شده است و بار دوم از سیستم داده برداری آزمایشگاهی کالیبره استفاده شده است. نحوه قرارگیری نمونه در فیکسچر آزمون خمش چهار نقطه‌ای در شکل (۹ الف) و نحوه بارگذاری بر روی آن در شکل (۹ ب) نشان داده شده است.



شکل ۸ نحوه اتصال پل وتسون به ماژول HX711 و نحوه اتصال ماژول HX711 به میکروکنترلر آردوینو [۲۶]

شکل (۱۰) خروجی دو آزمایش را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. کرنش‌های قرائت شده در این آزمون از نوع فشاری است زیرا کرنش‌سنج در شکل (۹ ب) در سطح رویی (بین دو سنبه) قرار داشته و تحت فشار است.

رابطه بالا کلی بوده و در پل متعادل و پل غیرمتعادل هر دو برقرار است. برای محاسبه کرنش با داشتن ولتاژ خروجی، پارامتر V_r به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_r = \left[\left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)_{strained} - \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)_{unstrained} \right] \quad (4)$$

جایگذاری از رابطه (۳) در رابطه (۴) نتیجه می‌دهد:

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = \frac{-4V_r}{1 + 2V_r} \quad (5)$$

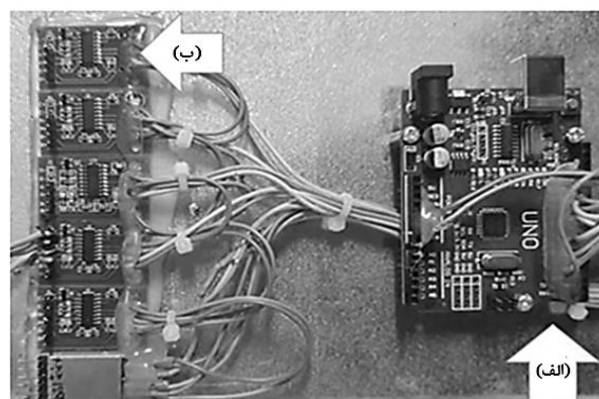
و نهایتاً از ترکیب روابط (۱) و (۵)، کرنش به صورت زیر بر حسب ولتاژهای ورودی و خروجی قابل محاسبه خواهد بود:

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \quad (6)$$

۴- سخت افزار ثبت کرنش

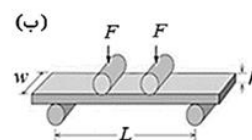
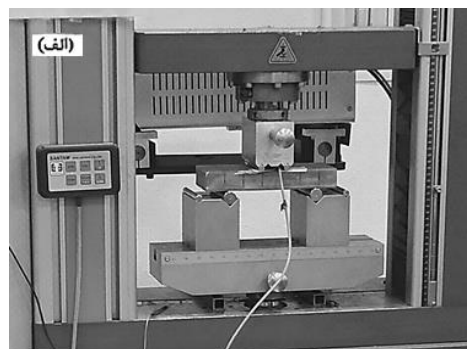
خروجی مدار پل وتسون می‌بایست توسط یک داده بردار دریافت و ذخیره شود. در پژوهش حاضر از ماژول تقویت کننده HX711 برای تبدیل داده‌های آنالوگ حاصل از پل وتسون به داده دیجیتال و از میکروکنترلر آردوینو مدل UNO برای ثبت داده‌های دیجیتال استفاده شده است. حداکثر نرخ داده برداری قابل حصول در این سیستم داده برداری ۱۰ HZ و حداکثر وضوح قابل حصول در ثبت داده‌های دیجیتال در میکروکنترلر آردوینو ۲۴ بیت است. شکل (۷ الف) ماژول آردوینو و شکل (۷ ب) پنج عدد ماژول HX711 را که برای قرائت هم زمان پنج کرنش‌سنج طراحی شده است نشان می‌دهد.

شکل (۸) نحوه اتصال پل وتسون به ماژول HX711 و اتصال ماژول HX711 به میکروکنترلر آردوینو در شکل (۷) را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

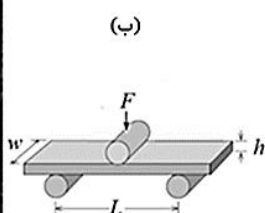
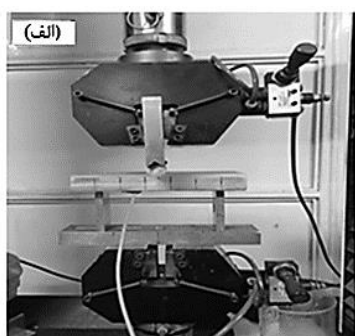


شکل ۷ سخت افزار طراحی شده برای ثبت داده، الف- میکروکنترلر آردوینو، ب- پنج عدد ماژول آنالوگ به دیجیتال HX711

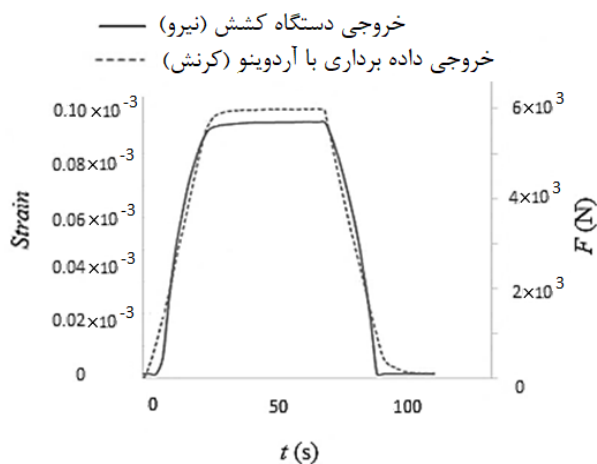
استانداردی برای تعیین خواص خمشی پنل ساندویچی هاست مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت، کرنش سنج مطابق آنچه در شکل (۱۱ الف) قابل مشاهده است در سطح زیرین نمونه و تحت کشش قرار دارد. نحوه قرارگیری نمونه در فیکسچر آزمون خمش سه نقطه‌ای در شکل (۱۱ ب) نمایش داده شده است. خروجی حاصل از سیستم داده برداری حاضر در مقایسه با بار وارده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بارگذاری در این آزمون به این صورت است که بار وارده پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود به مدت ۵۰ ثانیه ثابت باقی مانده و پس از آن باربرداری انجام می‌شود.



شکل ۹ الف- اتصال کرنش سنج به سطح رویی نمونه در آزمون خمش چهار نقطه‌ای ب- نحوه بارگذاری بر روی نمونه در آزمون خمش چهار نقطه‌ای

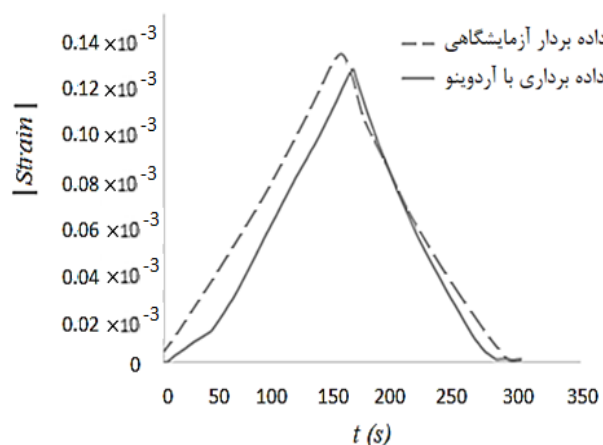


شکل ۱۱ الف- اتصال کرنش سنج به سطح زیرین نمونه در آزمون خمش سه نقطه‌ای ب- نحوه بارگذاری بر روی نمونه در آزمون خمش سه نقطه‌ای



شکل ۱۲ کرنش خروجی از داده‌بردار طراحی شده در مقایسه با بار وارده در آزمون خمش سه نقطه‌ای

همان طور که مشاهده می‌شود خروجی سیستم داده بردار به خوبی منعکس کننده بارهای وارد بر نمونه است. این به این معناست که وقتی سازه در شرایط واقعی تحت بارگذاری قرار داشته باشد با کاشت کرنش سنج در درون سازه می‌توان به صورت زنده برآوردی از بارهای وارد بر سازه داشته و بر مبنای آن پایش سلامت سازه را سازماندهی کرد. اجرای سیستم پایش سلامت مستلزم پردازش داده‌های ثبت شده و تبدیل آن‌ها به نمودارهایی



شکل ۱۰ مقایسه کرنش قرائت شده از طریق داده بردار طراحی شده با داده بردار آزمایشگاهی در آزمون خمش چهار نقطه‌ای

همان گونه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود خروجی‌های داده بردار حاضر تطابق خوبی با داده بردار کالیبره شده آزمایشگاهی دارد. تفاوت اندک موجود به دلیل انجام آزمون‌های مجزا است که با توجه به عدم امکان قرائت همزمان کرنش از طریق دو سیستم داده برداری اجتناب ناپذیر بوده است.

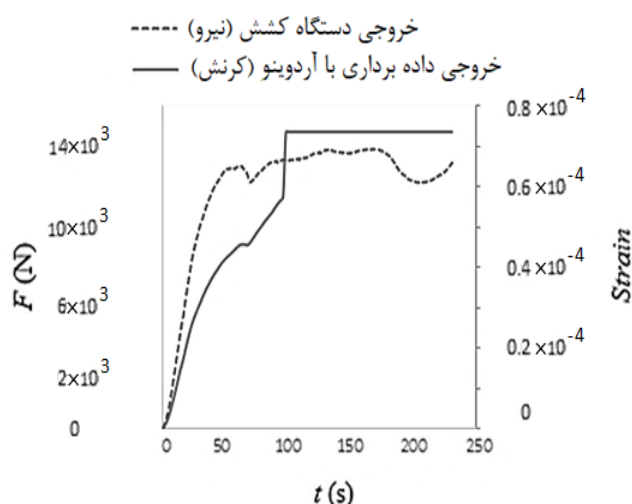
۶- به کارگیری سیستم داده برداری طراحی شده در کرنش‌های کششی در حیطه الاستیک

پس از تایید صحت عملکرد سیستم داده برداری، ارزیابی سیستم داده برداری در کرنش‌های کششی از طریق آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C393-2000 که

۸- ارزیابی سیستم داده برداری در کرنش‌های کششی تا نقطه شکست

در بررسی‌های فوق عملکرد سیستم داده برداری در محدوده الاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد سیستم داده برداری فراتر از حیطه الاستیک، آزمون خمش سه نقطه‌ای تا شکست کامل نمونه ادامه یافته و نتیجه حاصل از آن در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل دیده می‌شود منحنی نیرو (منحنی خط چین) پس از حدود ۵۰ ثانیه از حالت خطی خارج شده و در لحظه ۷۲ ثانیه نزولی شده و اصطلاحاً دنداندار می‌شود.



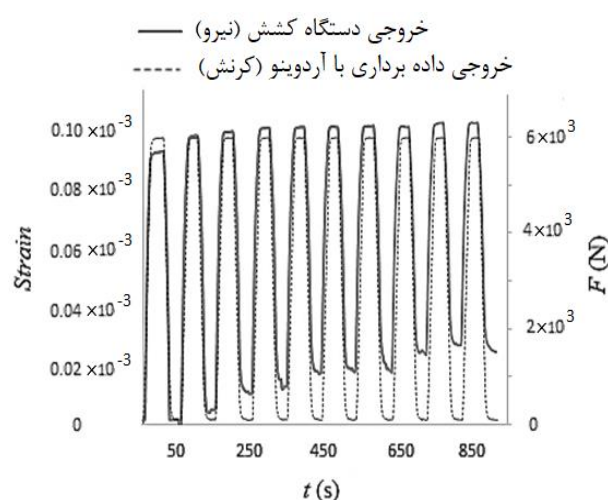
شکل ۱۴ مقایسه کرنش خروجی از داده‌بردار طراحی شده با نیروی وارده در آزمون خمش سه نقطه تا شکست کامل نمونه

خروج از حالت خطی به دلیل ایجاد ریز ترک‌ها و آغاز فرایند آسیب بوده و شیب منفی به معنای بهم پیوستن ریز ترک‌ها و ایجاد اولین ترک ماکروسکوپی در نمونه است. مقایسه منحنی کرنش قرائت شده با منحنی نیرو نشان می‌دهد دو نمودار تا پیش از ایجاد ترک ماکروسکوپی تشابه دارند. اما در اثر ترک ایجاد شده در نمونه، عملکرد کرنش‌سنج مختل شده و قادر به تعقیب و انعکاس نمودار نیرو در بخش رشد آسیب نمی‌باشد. به این ترتیب می‌توان گفت که داده‌های حاصل از سیستم پایش سلامت تا پیش از شروع آسیب از اعتبار کافی برخوردار بوده اما پس از آن با احتیاط قابل استفاده است. پس از وقوع ترک ماکروسکوپی و بسته به فاصله آن تا محل نصب کرنش‌سنج، داده‌های خروجی ممکن است به کلی نامعتبر گردد.

است که در مقایسه با نمودارهای از پیش تعیین شده برای سازه سالم تفسیر می‌شوند. تفسیر داده‌ها و چگونگی استفاده از آن‌ها در تشخیص میزان خرابی در سازه مرحله مهمی در فرایند پایش سلامت سازه‌ای است که با توجه به اطلاعات جمع آوری شده از سازه بدون عیب طراحی و اجرا می‌شود.

۷- ارزیابی سیستم داده برداری در بارگذاری تکرار شونده

اغلب بارهای وارد بر سازه‌ها در حیطه الاستیک و به صورت تکرار شونده هستند. به همین دلیل عملکرد سیستم داده بردار طراحی شده با بارگذاری تکرار شونده در تست خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱۳) نتایج حاصل را نشان می‌دهد که در آن فرایند بارگذاری و باربرداری بر روی نمونه پل ساندویچی ده مرتبه تکرار شده است.



شکل ۱۳ کرنش خروجی از داده‌بردار طراحی شده در مقایسه با نیروی وارده در آزمون خمش سه نقطه‌ای در بارگذاری تکرار شونده

همان گونه که در شکل دیده می‌شود از چرخه سوم به بعد با گذشت زمان کوچکترین کرنش قرائت شده در هر چرخه غیر صفر بوده و به تدریج رو به افزایش است. محتمل‌ترین منشا برای این خطا، افزایش دمای ناشی از جریان الکتریکی در کرنش‌سنج در اثر سپری شدن زمان زیاد است که می‌بایست با روش‌های موجود برای جبران دما در اصول اندازه‌گیری کرنش مرتفع گردد. در بین انواع روش‌های موجود، ساده‌ترین راه حل به کارگیری پل وتسون در آرایش یک دوم با جایگزین کردن دو مقاومت در مدار پل وتسون با دو کرنش‌سنج است که به عنوان موضوعی برای ادامه این پژوهش قابل بررسی می‌باشد.

۹- نتیجه گیری

Great Britain, John Wiley & Sons, pp. 11-13, DOI: <https://doi.org/10.1109/MIM.2010.5669608>, (2010).

- [2] Ksica, F., Hadas, Z., and Hlinka, J., "Integration and Test of Piezocomposite Sensors for Structure Health Monitoring in Aerospace", *Measurement*, Vol. 147, No. 106861, pp. 1-10, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106861>, (2019).
- [3] Díaz-Maroto, P.F., Fernández-López, A., García-Alonso, J., and Iglesias, M., "Buckling Detection of an Omega-stiffened Aircraft Composite Panel using Distributed Fibre Optic Sensors", *Thin-Walled Structures*, Vol. 132, pp. 375-384, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.08.024>, (2018).
- [4] Li, M., Kefal A., Cerik B., and Oterkus E., "Trends in the Analysis and Design of Marine Structures", First Edition, pp. 293-302, London, CRC Press, (2019).
- [5] Frangopol, D. M., Saydam, D., and Kim, S., "Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance of Structures and Infrastructures: A Brief Review", *Structure and infrastructure engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-25, <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.628962>, (2012).
- [6] Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Koloor, S. S. R., and Petru, M., "Health Monitoring of Civil Infrastructures by Subspace System Identification Method: An Overview", *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 10, pp. 1-29, <https://doi.org/10.3390/app10082786>, (2020).
- [7] Casas, J. R., and Cruz, P. J. S., "Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring", *Journal of bridge engineering*, vol. 8, No 6, pp. 362-373, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2003\)8:6\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(362)), (2003).
- [8] Sevieri, G., and De Falco, A., "Dynamic Structural Health Monitoring for Concrete Gravity Dams Based on the Bayesian Inference", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 8, pp. 235-250, <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00380-w>, (2020).
- [9] Hassani, S., and Mousavi, M., Gandomi, A. H., "Structural Health Monitoring in Composite Structures: A Comprehensive Review", *Sensors*, Vol. 22, No. 10, pp. 1-45, <https://doi.org/10.3390/s22010153>, (2022).
- [10] Parvari, Y., Ramezani, H., and Kazemirad, S., "Nondestructive Evaluation of Bilayer Metal-Composite Structures Using Finite Element Simulation of Guided Lamb Wave Propagation", *Journal of Science and Technology of Composites*,

در مقاله حاضر پایش سلامت پنل ساندویچی با هسته مشبک مدنظر قرار گرفته است. از آن جایی که رایج ترین حالت شکست در این نوع پنل ساندویچی جدایش پوسته از هسته است کرنش سنج در طی فرایند ساخت در محل اتصال پوسته به هسته جاسازی شده است. یکی از موانع اساسی در به کارگیری سیستم پایش سلامت هزینه بالای تهیه حسگر و سیستم داده برداری است. هدف از تحقیق حاضر اجرای سیستم پایش سلامت برای پنل ساندویچی به گونه ای است که اجرای آن صرفه اقتصادی داشته باشد. در راستای کاهش هزینه ها، کرنش سنج مورد استفاده از نوع مقاومتری انتخاب شده است زیرا نسبت به کرنش سنج های فیبرنوری قیمت کمتر اما دقت بالاتری دارد. سیستم داده برداری نیز با استفاده از میکروکنترلر آردوینو طراحی شده است که نسبت به داده بردارهای معمول آزمایشگاهی مقرون به صرفه تر است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که:

- جاسازی کرنش سنج در بین چندلایه های کامپوزیتی می تواند به عنوان روشی برای هوشمند سازی قطعات کامپوزیتی و پایش سلامت آن ها مورد استفاده قرار گیرد.
- به کارگیری روش حاضر در پایش سلامت سازه ای در حیطه بارگذاری الاستیک و تا پیش از وقوع ترک ماکروسکوپی در نزدیکی محل کاشت کرنش سنج قابل استفاده است.
- استفاده از سیستم داده برداری مبتنی بر میکروکنترلر آردوینو نسبت به استفاده از داده بردارهای متعارف آزمایشگاهی به مراتب کم هزینه تر بوده و برای راه اندازی سیستم پایش سلامت توجیه اقتصادی دارد. به ویژه هنگامی که تعداد حسگرهای مورد نیاز افزایش یابد مزیت اقتصادی این روش بیشتر نمایان می شود.
- در سیستم حاضر از پل وتسون در آرایش یک چهارم استفاده شده است که به افزایش دما در اثر جریان الکتریکی حساس است. برای حفظ صحت اندازه گیری کرنش در طول زمان لازم است از روش های رایج برای جبران دما استفاده شود که از جمله آن ها استفاده از پل وتسون در آرایش یک دوم است.
- و اما در پایان پیشنهاد نویسندگان در جهت تکمیل این پژوهش ارزیابی عملکرد سیستم داده برداری حاضر در شرایط محیطی سخت، بارهای خستگی و بارهای دینامیکی است.

۱۰- مراجع

- [1] Balageas, D., Fritzen, C.P., and Güemes, A., "Structural Health Monitoring", Second Edition,

- [19] Kefal, A., and Yildiz, M., "Modeling of Sensor Placement Strategy for Shape Sensing and Structural Health Monitoring of a Wing-Shaped Sandwich Panel Using Inverse Finite Element Method", *Sensors*, Vol. 17, No. 12, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/s17122775>, (2017).
- [20] Xiao, B., Yang, B., Xuan, F. Z., Wan, Y., Hu, C., Jin, P., Lei, H., Xiang, Y., and Yang, K., "In-Situ Monitoring of a Filament Wound Pressure Vessel by the MWCNT Sensor Under Hydraulic Fatigue Cycling and Pressurization", *Sensors*, Vol. 19, No. 6, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/s19061396>, (2019).
- [21] Nazemi A H., Afshar M., Pakzad A., and Rahai A., "Introducing a Framework for Determining the Financial Value of Structural Health Monitoring on Maintenance Management of Bridges; The Case Study of the Effect of SHM on Retrofitting of a Bridge", *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 161-182, URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-54528-en.html>, (2021). (in Persian فارسی)
- [22] Maher, R., Khalili, S. M. R., and Eslami-Farsani, R., "The Effect of Shape Memory Wire on the Ballistic Behavior of Smart Corrugated Core Sandwich Panels", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 2, pp. 1612-1627, <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.540982.1752>, (2021). (in Persian فارسی)
- [23] Fard, K. M., and Hassanabadi, M. R., "Free Vibration and Static Bending Analysis of Curved Sandwich Panel with Magneto-Rheological Fluid Layer in Sheets using Improved High Order andwich Panel Theory", *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 49-62, (2015). (in Persian فارسی)
- [24] Khorshidi, K., and Shabani, Y., "Free Vibration Analysis of Sandwich Plates with Magneto Rheological Smart Fluid Core by Using Modified Shear Deformation Theory", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 4, pp. 1826-1835, DOI: <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.552957.1782>, (2022). (in Persian فارسی)
- [25] Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Construction, Annual Book of ASTM Standard, C393, (2000).
- [26] <https://community.robotshop.com/forum/t/hx711-and-a-single-strain-gauge/48600>.
- Vol. 8, No. 3, pp. 1700-1707, <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546257.1765>, (2022). (in Persian فارسی)
- [11] Riahi, M., and Ahmadi, A., "Utilization of Artificial Neural Networks for Detection and Classification of Damages in Composite Plate-like Structures via Ultrasonic Guided Waves", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, (2018). (in Persian فارسی)
- [12] Aloisi, S., Galietti, U., and Pappalettere, C., "Strain Measurement in Composite Materials using Embedded Strain Gauges", *Key Engineering Materials*, Vol. 144, pp. 251-260, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.144.251>, (1998).
- [13] Qiu, Y., Wang, Q. B., Zhao, H. T., Chen, J. A., and Wang, Y. Y., "Review on Composite Structural Health Monitoring Based on Fiber Bragg Grating Sensing Principle", *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 18, No 2, pp. 129-139, <https://doi.org/10.1007/s12204-013-1375-4>, (2013).
- [14] Kinet, D., Mégret, P., Goossen, K. W., Qiu, L., Heider, D., and Caucheteur, C., "Fiber Bragg Grating Sensors Toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions", *Sensors*, Vol. 14, No. 4, pp. 7394-7419, <https://doi.org/10.3390/s140407394>, (2014).
- [15] Lau, K. T., "Structural Health Monitoring for Smart Composites Using Embedded FBG Sensor Technology", *Materials Science and Technology*, Vol. 30, No 13, pp. 1642-1654, <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000608>, (2014).
- [16] Aygun, L. E., and Kumar, V., Weaver, C., Gerber, M., Wagner, S., Verma, N., Glisic, B., Sturm, J. C., "Large-Area Resistive Strain Sensing Sheet for Structural Health Monitoring", *Sensors*, Vol. 20, No. 5, pp. 1-15, <https://doi.org/10.3390/s20051386>, (2020).
- [17] Belhouideg, S., and Lagache, M., "Effect of Embedded Strain Gage on the Mechanical Behavior of Composite Structures", *Journal of Modern Materials*, Vol. 5, No 1, pp. 1-7, <https://doi.org/10.21467/jmm.5.1.1-7>, (2018).
- [18] Sousa, J., Marques, J., Garcia, M., Infante, V., and Amaral, P., "Mechanical Characterization of Sandwich Composites with Embedded Sensors", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 117, No. 104765, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104765>, (2020).

تأثیر سیم اغتشاش ساز بر تنش برشی رینولدز و سرعت‌های نوسانی در سیلندر دایروی

زهرامنصوری
کارشناسی ارشد

میترا یادگاری
دکتری

عبدالامیر بک
خوشنویس*

استاد، گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

چکیده: بررسی جریان حول سیلندر دایروی از مسائل کلاسیک مکانیک سیالات به شمار می‌رود. نیروهای ناپایدار تشکیل شده در پشت سیلندر، ناشی از گردابه‌های جدا شده از سطح آن است. کنترل شدت ریزش گردابه‌ها منجر به کنترل شدت نیروهای ناشی از گردابه‌ها می‌شود. یکی از نمونه تجهیزاتی که در کاهش نوسانات ناشی از گردابه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیم اغتشاش ساز می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر، سرعت‌های نوسانی، تنش برشی رینولدز و ضریب پسا حول سیلندر دایروی همراه با سیم اغتشاش ساز در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ بررسی شد. بدین منظور قطر سیلندر مورد پژوهش ۲۰ میلی‌متر و قطر سیم‌های اغتشاش ساز نصب شده ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ و ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. سیم‌های اغتشاش ساز در موقعیت‌های $\pm 40^\circ$ و $\pm 140^\circ$ درجه نصب شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش ۶۸٪، ۵۰٪ و ۵۵٪ سرعت‌های نوسانی u' ، v' و w' و کاهش ۸۵٪ تنش برشی رینولدز نسبت به سیلندر صاف می‌شود. همچنین وجود پیک در نمودارهای سرعت نوسانی بیانگر وجود گردابه‌های بزرگ در پشت سیلندر می‌باشد. تنش برشی رینولدز با قطر سیم اغتشاش ساز رابطه مستقیم دارد.

واژه‌های راهنما: سیلندر دایروی، سیم اغتشاش ساز، تنش برشی رینولدز، ضریب پسا، سرعت نوسانی

Zahra Mansouri
M.Sc.

Mitra Yadegari
PhD

Abdolamir Bak
Khoshnevis*
Professor, Department
of Mechanical
Engineering Faculty of
Engineering, Hakim
Sabzevari University,
Sabzevar

Effect of trip wire on Reynolds shear stress and fluctuating velocities in circular cylinder

Abstract: Investigating the flow around a circular cylinder is one of the classical problems of fluid mechanics. Unsteady forces formed behind the cylinder are caused by vortices separated from its surface. Controlling the intensity of vortex shedding leads to controlling the intensity of forces caused by vortices. One of equipment that is used to reduce fluctuations caused by vortices is trip wires. Therefore, in the present study, the fluctuating velocities, Reynolds shear stress and drag coefficient around the circular cylinder with the trip wire have been investigated at different Reynolds numbers. For this purpose, the diameter of the circular cylinder is 20 mm and the diameter of the installed trip wires is 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 mm. Trip wires are installed at $\theta = \pm 40^\circ$ and $\pm 140^\circ$ positions. The results show that the use of trip wires with a diameter of 0.25mm causes a decrease of 68%, 50% and 55% of fluctuating velocities (u' , v' , w') and a decrease of 85% Reynolds shear stress compared to the smooth cylinder. Also, the presence of a peak in the fluctuating velocity indicates the presence of large vortices behind the cylinder. Reynolds shear stress has a direct relationship with the diameter of the trip wire.

Keywords: Circular Cylinder, Trip Wire, Reynolds Shear Stress, Drag Coefficient, Fluctuating Velocity

۱- مقدمه

بررسی جریان حول سیلندر دایروی یکی از مسائل مهم در علم مهندسی به شمار می‌رود. از جمله کاربردهای جریان حول سیلندر دایروی می‌توان به دودکش‌ها، دکل‌های مخابراتی، ساختمان‌ها و ... اشاره کرد. دنباله جریان پشت سیلندر منجر به ایجاد نیروهای ناپایدار می‌گردد. این نیروها باعث تخریب تمام ساختارهای بدنه‌ای می‌شود. دلیل مطالعه این گونه پیکربندی، علاقه به فهم بارهای روی ساختارها با توجه به حرکت سیال و کنترل بیشتر جریان سیال برای کاهش اثرات مخرب نیروهای سیالی است [۱-۳]. بررسی جریان حول سیلندر دایروی از سال‌ها قبل مورد مطالعه قرار گرفته است. فیچ و وارسپ [۴] اولین پژوهشگرانی بودند که به بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش ساز بر ضریب پسا در بازه انتقال رینولدز پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از سیم اغتشاش ساز باعث کاهش ضریب پسا می‌شود. هوور و همکاران [۵] به بررسی تجربی تاثیر سیم اغتشاش ساز در سیلندر دایروی صاف بر مشخصات دنباله و ریزش گردابه‌ها در عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ در جریان پایا پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در سیلندر ثابت، سیم اغتشاش ساز منجر به کاهش چشمگیر ضریب پسا و لیفت می‌گردد. نیشی [۶] به بررسی تجربی تاثیر زاویه نصب سیم‌های اغتشاش ساز در دو بازه ۲۰ تا ۶۰ درجه و ۹۷/۵ تا ۱۶۵ درجه بر نیروهای هیدرودینامیکی پرداخت. نتایج نشان داد که در این دو بازه، نیروهای هیدرودینامیکی کاهش می‌یابند. آلام و همکاران [۷] به بررسی تجربی تاثیر نصب سیم اغتشاش ساز در زوایای ۱۰ تا ۷۰ درجه نسبت به محل سکون جلویی سیلندر بر پارامترهای جریان پرداختند. آن‌ها در این پژوهش با تغییر موقعیت زاویه‌ای سیم اغتشاش ساز، پنج رژیم جریان عبوری از روی سیلندر را مشاهده کردند، به طوری که هر یک از پارامترهای جریان، تغییرات خاص خود را داشتند. همچنین با تغییر عدد رینولدز جریان گذرنده از روی سیلندر، مکان بهینه نصب سیم اغتشاش ساز به منظور کاهش ضریب پسا نیز تغییر می‌کرد. جیم و همکاران و همچنین ایگاشی [۸-۹] به بررسی تجربی تاثیر قطر و موقعیت‌های مختلف سیم اغتشاش ساز بر جریان عبوری از روی سیلندر در بازه اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر نسبی بزرگ‌تر، منجر به گذار در اعداد رینولدز کمتر می‌شود. خوشنویس و همکاران [۱۰، ۱۱] به بررسی تجربی تاثیر سیم اغتشاش ساز با قطرهای مختلف بر سرعت متوسط، سرعت نوسانی، عدد استروهل و ضریب پسا پرداختند. این پژوهش بر

روی سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی متر با موقعیت نصب $\pm 140^\circ$ و $\theta = \pm 40^\circ$ انجام شد. آن‌ها دریافتند که نصب سیم اغتشاش ساز با قطرهای ۱ و ۰/۵ میلی متر به صورت دو سیمه بر روی سیلندر صاف، منجر به کاهش قابل ملاحظه ضریب پسا می‌شود. در حالی که نصب سیم اغتشاش ساز با قطر ۱/۵ میلی متر باعث افزایش ضریب پسای سیلندر می‌گردد و سرعت نوسانی بی‌بعد روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند. در پژوهشی دیگر خوشنویس و همکاران [۱۲] به بررسی تجربی تاثیر سیم اغتشاش ساز با قطرهای مختلف بر پارامترهای جریانی دنباله یک ایرفویل اعم از سرعت متوسط و سرعت نوسانی بی‌بعد در عدد رینولدز ۳۷۸۰ پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که ضریب پسا، عرض دنباله و کمینه سرعت نقصانی با افزایش قطر سیم اغتشاش ساز، افزایش می‌یابند. آلام و همکاران [۱۳] تاثیر سیم اغتشاش ساز را بر مشخصات جریان اطراف دو سیلندر دایروی پشت سر هم در عدد رینولدز ۵۵۰۰۰ به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. بر روی هر سیلندر، دو سیم اغتشاش ساز به قطر $D/10$ در زاویه متقارن 30° درجه نصب شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نصب سیم اغتشاش ساز منجر به سرکوب ریزش گردابه‌ها در سیلندر دایروی می‌شود. همچنین ضرایب پسا و لیفت کاهش می‌یابند. یادگاری و همکاران [۱۴-۱۶] به بررسی تجربی و عددی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر رفتار و مشخصات گردابه تشکیل شده در پشت سیلندر بیضوی در اعداد رینولدز ۳۸۵۵۰ و ۶۴۲۵۰ پرداختند. این بررسی بر روی سیلندر با قطر ۴۲/۴ میلی متر و سیم‌های اغتشاش ساز با قطر ۵ میلی متر انجام شد. آن‌ها دریافتند که سیم‌های اغتشاش ساز، تاثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های جریان و کاهش ضریب پسا دارند. خوشنویس و همکاران [۱۷] اثرات آشفتگی جریان ورودی را بر ضریب پسا در سیلندرهای پشت سر هم با قطرهای مختلف ۱۵/۵ و ۲۱/۳ میلی متر در اعداد رینولدز ۱۰۱۰۰، ۱۶۰۰۰، ۲۲۰۰۰ و ۲۷۳۰۰ و ۳۰۶۵۰ به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد در زوایای کمتر از ۶۷/۵ درجه با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب پسا به دلیل حضور سیلندر بالادست کاهش می‌یابد. حاتمی و همکاران [۱۸-۲۰] به بررسی تجربی تغییرات ضریب پسا در سه سیلندر A, B, C با قطرهای ۱۵/۵ و ۲۱/۳ و ۳۱ میلی متر در زوایای 0° ، 5° ، 10° ، $22/5^\circ$ ، 45° و $67/5^\circ$ در دو نسبت فاصله ۴ و ۲ برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف ($48000 < Re < 14700$) پرداختند. مشاهده شد با افزایش قطر سیلندر پایین دست از شدت تاثیر عدد رینولدز بر تغییرات افزایشی ضریب پسا کاسته می‌شود. حقیقت جو و همکاران [۲۳-۲۱] به بررسی تجربی تاثیر صفحات پیچان بر دنباله سیلندر

پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی، ضریب پسا کاهش و سرعت نوسانی بی‌بعد افزایش می‌یابد. ایزدی و بک خوشنویس [۳۴-۳۶] به بررسی تجربی مشخصات جریان حول سیلندر بیضوی در اعداد رینولدز مختلف پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش فاصله از سیلندر، ضریب پسا کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در پژوهش‌های بالا اشاره شد، بیشتر مطالعات به بررسی رفتار و مشخصات ویک (سرعت نقصانی، پهنای دنباله)، ضریب پسا، سرعت متوسط و شدت توربولانس اطراف سیلندر دایروی و بیضوی پرداختند. در حالی که در این پژوهش برای اولین بار به بررسی تاثیر چهار سیم اغتشاش ساز متقارن با قطرهای مختلف بر سه مولفه سرعت نوسانی (u' , v' , w') و تنش برشی رینولدز ($u'v'$) اطراف سیلندر دایروی در ایستگاه‌ها و اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است که این پژوهش را نسبت به پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند.

نتایج حاصل از این پژوهش به دلیل جامع بودن می‌تواند توسط طراحان صنعتی و سازه‌ای به عنوان ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی، طراحی و بهبود دقت مدل‌های مهندسی استفاده شود.

۲- بیان مسأله

تاثیر سیم اغتشاش ساز نصب شده بر روی سیلندر دایروی بر ضریب پسا، سرعت‌های نوسانی و تنش برشی رینولدز در سه ایستگاه در پشت استوانه (۵ و ۲/۰۲ و ۱/۰۶ X/D) در اعداد رینولدز مختلف ۳۹۰۰، ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ مورد بررسی قرار گرفته است. از آن جایی که منحنی ضریب پسا در گستره اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ نسبتاً مسطح است و تغییرات ضریب پسا در آن بازه کم می‌باشد، لذا پژوهش حاضر در اعداد رینولدز ذکر شده انجام شده است. قطر سیلندر دایروی ۲۰ میلی‌متر و قطر سیم‌های اغتشاش ساز نصب شده بر سیلندر دایروی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سیم‌های اغتشاش ساز در زوایای $\pm 140^\circ$ و $\pm 40^\circ$ نصب شده‌اند. معیار انتخاب موقعیت نصب سیم‌های اغتشاش ساز براساس زوایای جدایش در لایه مرزی آرام و متلاطم می‌باشد. بدین صورت که زاویه نصب دو سیم اغتشاش ساز قبل از زاویه جدایش جریان آرام و زاویه نصب دو سیم اغتشاش ساز بعد از زاویه جدایش جریان توربولانس در نظر گرفته شده است.

شکل (۱) شماتیک سیلندر دایروی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بین سیلندر دایروی و سیم‌های اغتشاش ساز، فاصله‌ای وجود ندارد و سیم‌های اغتشاش ساز بر سطح سیلندر نصب شده‌اند.

دایروی در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ پرداختند. قطر سیلندر دایروی مورد بررسی ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از صفحات پیچان منجر به کاهش سرعت نوسانی در دنباله سیلندر می‌شود. منصوری و همکاران [۲۴، ۲۵] به بررسی عددی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر مشخصات دنباله سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ پرداختند. نتایج بیانگر آن است که با کاهش قطر سیم اغتشاش ساز، طول لایه برشی کاهش می‌یابد. ایزدی و همکاران [۲۶] به بررسی تجربی و عددی دنباله جریان سیلندر دایروی چرخان در اعداد رینولدز ۵۹۰۰ و ۱۱۸۰۰ پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که سرعت نوسانی بی‌بعد و ضریب پسا در این حالت، نسبت به حالت بدون چرخش، کاهش می‌یابند. مارتینوزی و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر سرعت نوسانی و مشخصات ریزش گردابه‌های عمودی روی سطح یک سیلندر دایروی در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰ پرداختند. در این پژوهش، قطر سیلندر دایروی ۴۰ میلی‌متر و قطر سیم‌های اغتشاش ساز ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سیم‌های اغتشاش ساز در زوایای ۲۵، ۴۵، ۶۰، ۸۰ درجه نصب شدند. نتایج این بررسی نشان داد که نصب سیم‌های اغتشاش ساز، سبب بهبود مشخصات جریان می‌شود و ویژگی‌های گردابه را تقویت می‌کند. همچنین باعث کاهش سرعت‌های نوسانی می‌شود. ژو و همکاران [۲۸] به منظور کنترل ارتعاشات پشت سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۵۰۰ از روش طیفی استفاده کردند. در این پژوهش از میله‌های چرخان به منظور بررسی سرعت‌های نوسانی، ضریب پسا و مشخصات جریان استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب پسا در این حالت در مقایسه با سیلندر بدون چرخش ۲۵/۱٪ کاهش می‌یابد و افزایش زاویه چرخش سبب کاهش سرعت‌های نوسانی می‌شود. لوی و همکاران [۲۹] به بررسی عددی مشخصات جریان حول سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۴۰۰۰۰ پرداختند. نتایج نشان داد که سرعت نوسانی در کار عددی نسبت به کار تجربی روند افزایشی دارد. لیو و همکاران [۳۰] به بررسی تجربی و عددی سرعت‌های نوسانی و مشخصات جریان حول سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۴۰۰۰۰ با استفاده از مدل توربولانس کی امگا پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که مطابقت خوبی بین کار تجربی و عددی وجود دارد. فوکودوم و همکاران [۳۱] تاثیر سیم اغتشاش ساز را بر ضرایب پسا و برا در ایرفویل مربوط به پره توربین بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که سیم اغتشاش ساز منجر به تاخیر در جدایش، افزایش نیروی برا و کاهش ضریب پسا می‌شود. ایزدی و بک خوشنویس [۳۳، ۳۲] به بررسی تجربی مشخصات دنباله سیلندر دایروی چرخان

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u_i u_j u_k} + \right. \quad (5)$$

$$\left. \rho (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j) \right]$$

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j}) \right] \quad (6)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

$$G_{ij} = -\rho \beta (g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{u_i \theta}) \quad (8)$$

$$\varphi_{ij} = \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \quad (10)$$

$$F_{ij} = -2\rho \Omega_k (\overline{u_j k_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i k_m} \varepsilon_{jkm}) \quad (11)$$

$$G_{ij} = -\frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \left(g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho \varepsilon + 2\rho \varepsilon \frac{k}{a^2} \right) \quad (13)$$

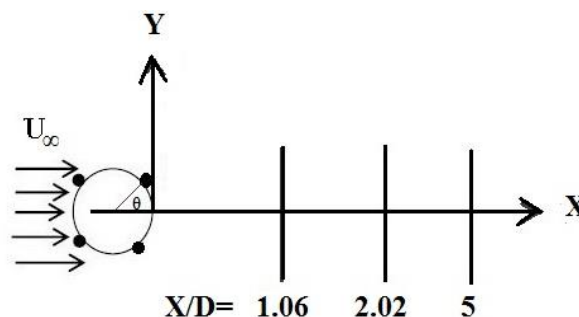
۴- روش عددی

به منظور گسسته سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. همچنین الگوریتم سیمپل^۴ برای کوپل معادلات سرعت و فشار در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی جنبشی آشفته 10^{-6} لحاظ شده است. برای گسسته سازی فشار از روش استاندارد و برای گسسته سازی مومنتوم از روش مرتبه دوم بالادست^۵ استفاده شده است.

۵- نتایج

۵-۱- استقلال از شبکه

تأثیر تعداد نقاط شبکه بر پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر با سیم اغتشاش‌ساز به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تعداد



شکل ۱ شماتیک سیلندر دایروی

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

جریان، دو بعدی، ویسکوز، تراکم ناپذیر و آشفته در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی ورودی و خروجی به ترتیب سرعت ورودی^۱ و فشار خروجی^۲ در نظر گرفته شده است. در سیلندر دایروی، سیم‌های اغتشاش‌ساز و سایر مرزها از شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش استفاده می‌شود. به منظور بررسی دنباله جریان حول سیلندر دایروی با سیم اغتشاش‌ساز از مدل توربولانسی رینولدز استرس^۳ استفاده شده است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و مدل توربولانسی در زیر بیان شده است [۳۷، ۳۹]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) - \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \quad (3)$$

$$G_{ij} - \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user}$$

که در آن P_{ij} ترم تولید، ε_{ij} ترم اضمحلال، φ_{ij} ترم فشار-کرنش و D_{ij} ترم نفوذ تنش‌های رینولدز است. نفوذ تنش‌های رینولدز شامل دو بخش نفوذ آشفته $D_{T,ij}$ و نفوذ مولکولی $D_{L,ij}$ است.

ترم‌های اساسی معادلات انتقالی تنش‌های رینولدز به صورت

زیر بیان می‌شود:

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \quad (4)$$

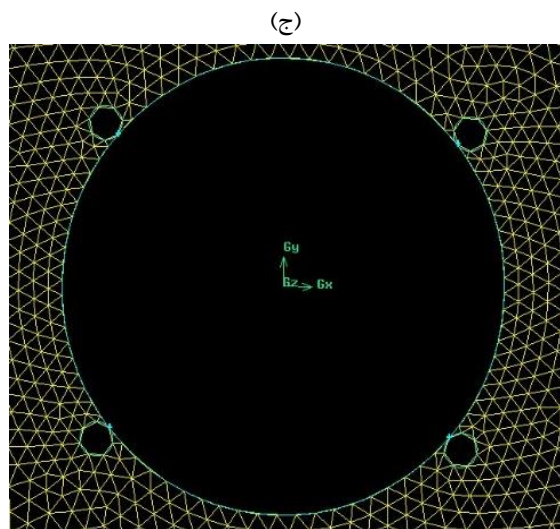
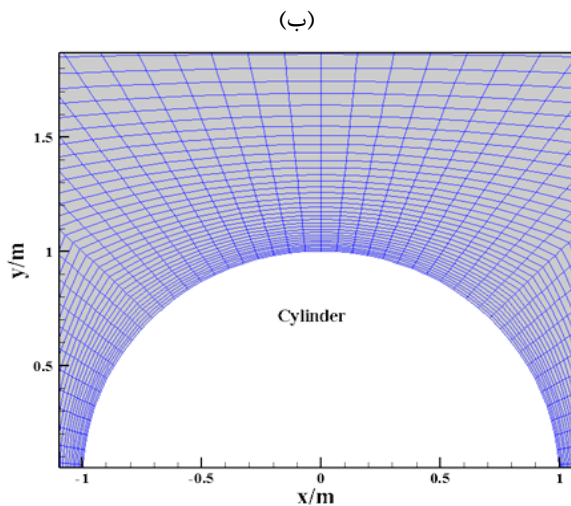
⁴ SIMPLE

⁵ Second order upwind

¹ Velocity inlet

² Pressure outlet

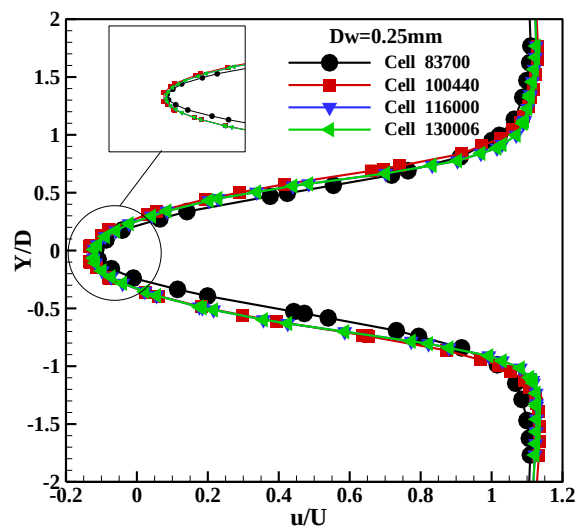
³ RSM



شکل ۳ الف) ابعاد دامنه محاسباتی و جزئیات شبکه (ب) شبکه لایه مرزی کنار دیواره (ج) شبکه نزدیک به سیلندر به همراه سیم‌های اغتشاش ساز

سلول ۱۱۶۰۰۰ به بعد، نتایج مستقل از شبکه هستند. لازم به ذکر است که نتایج شکل (۲) در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و سطح مقطع ۰/۰۰۳۱۴ متر مربع به دست آمده‌اند. جزئیات شبکه در فرآیند شبیه سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (الف-۳) مشاهده می‌شود ناحیه محاسباتی به ۱۲ بخش تقسیم شده است. در نواحی ۱ تا ۴ در مجاورت سیلندر از شبکه‌های ظریف استفاده شده (شکل (ب-۳)) و برای افزایش دقت شبیه سازی از شبکه‌های ریزتر در لایه مرزی مجاور دیوارها استفاده شده است. برای بخش‌های باقی‌مانده، طول شبکه‌ها در جهت شعاعی افزایش یافته و از بخش‌های ۱ تا ۴ بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است.

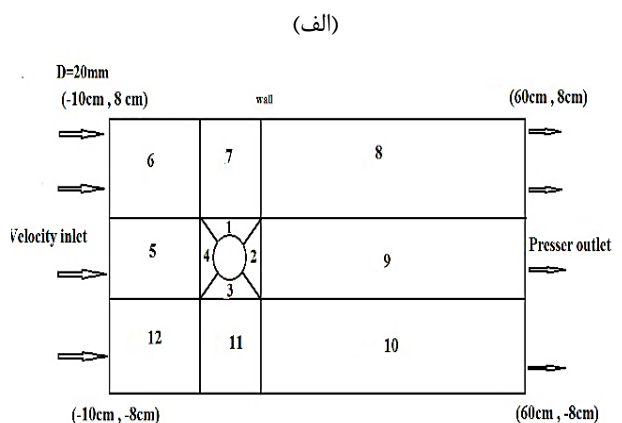
استفاده از شبکه درشت‌تر در مناطق دور افتاده و شبکه‌های ریزتر در نزدیکی دیواره منجر به کاهش هزینه محاسباتی و افزایش دقت شبیه سازی می‌شود. در (شکل (ج-۳)) نیز شبکه نزدیک به سیلندر به همراه سیم‌های اغتشاش ساز نشان داده شده است.



شکل ۲ استقلال از شبکه پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد در سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر

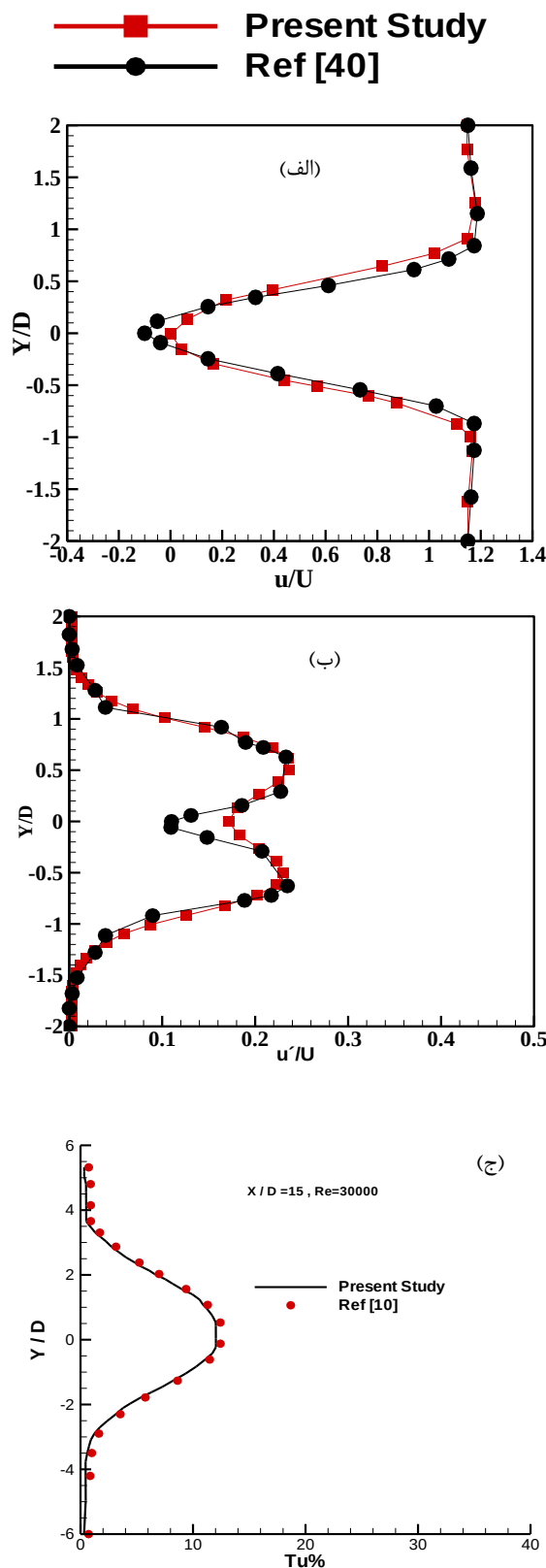
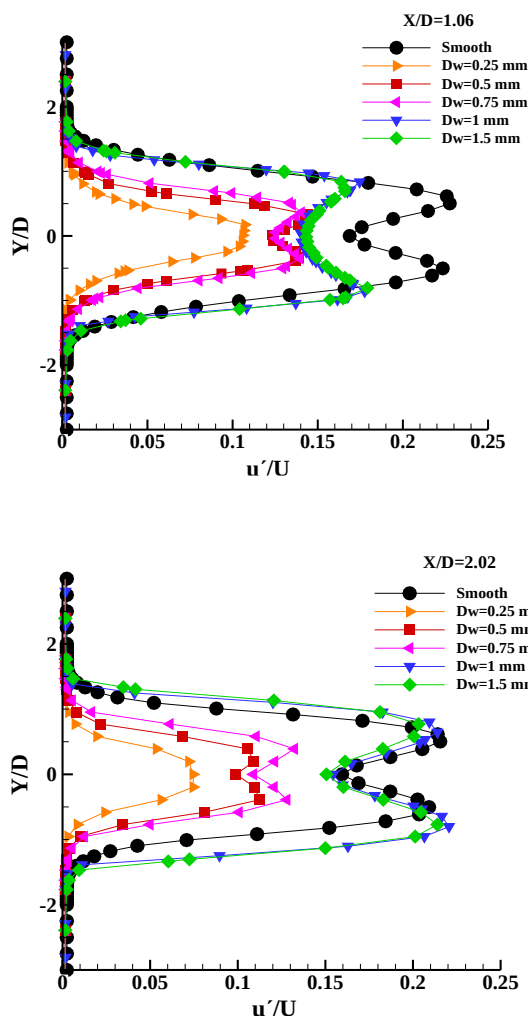
۵-۲- اعتبار سنجی

به منظور بررسی دقت شبیه سازی، پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد و شدت توربولانس در پژوهش حاضر برای سیلندر صاف در عدد رینولدز ۳۹۰۰ با کارهای تجربی [۴۰ و ۱۰] مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین کار حاضر و مراجع [۴۰ و ۱۰] وجود دارد. درصد خطای سرعت‌های متوسط و نوسانی کار حاضر در مقایسه با مرجع [۴۰] به ترتیب ۱۴٪ و ۲۳٪ می‌باشد. علت درصد خطای بیشتر برای سرعت نوسانی، حساس‌تر بودن آن است. همچنین درصد خطای شدت توربولانس کار حاضر با مرجع [۱۰] حدود ۵٪ می‌باشد.

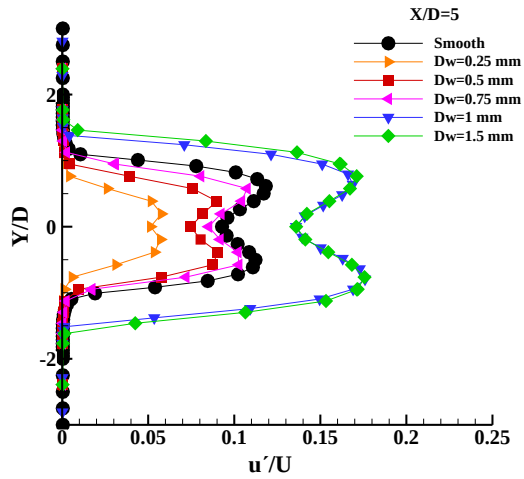


۵-۳- سرعت‌های نوسانی

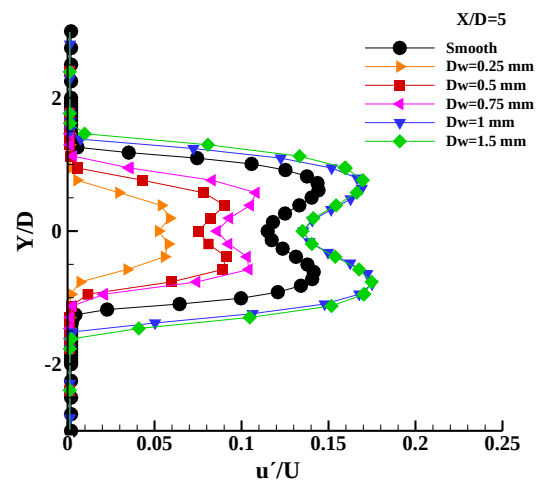
همان طور که در اشکال (۵-۷) مشاهده می‌شود در نزدیک مدل، سرعت نوسانی با افزایش قطر رابطه مستقیم دارد. با افزایش فاصله از مدل، عرض دهانه نمودار افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش گردابه‌ها در بالا و پایین سیلندر می‌باشد. به عبارت دیگر هر دو پیک از خط مرکزی دنباله دورتر شده و پروفیل سرعت متوسط، مسطح‌تر می‌شود که به علت تاثیر انحنا در افزایش شدت خط جریان روی لبه‌های مرز داخلی دنباله و نیز بزرگ بودن گردابه‌ها در این نقاط می‌باشد. همچنین با افزایش فاصله از مدل، تاثیر قطرهای بزرگ‌تر کاهش می‌یابد. استفاده از سیم‌های اغتشاش ساز با قطر بزرگ‌تر بر سرعت نوسانی از ایستگاه دوم به بعد رفته رفته کاهش می‌یابد. وجود نقاط اکسترمم، نشان دهنده گردابه‌های تشکیل شده در پشت مدل می‌باشد که با افزایش فاصله از نقاط اکسترمم، عرض دهانه نمودار افزایش می‌یابد. بهترین حالت برای کاهش سرعت نوسانی، کوچک‌ترین قطر می‌باشد.



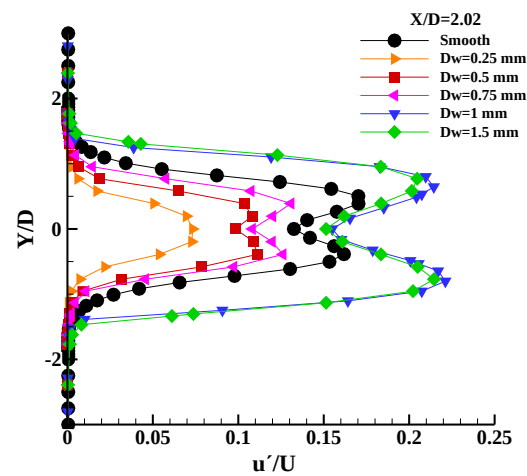
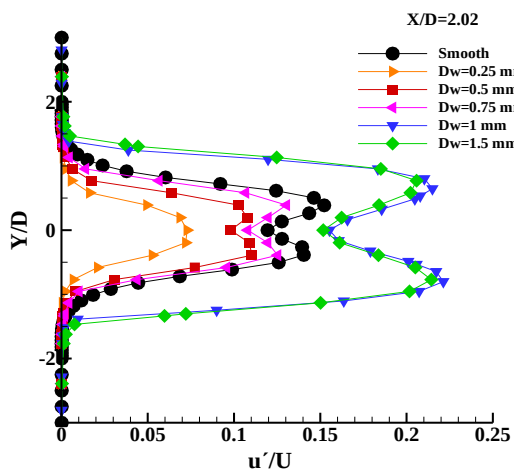
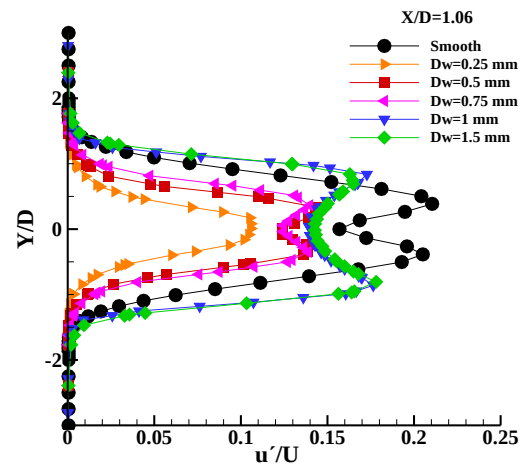
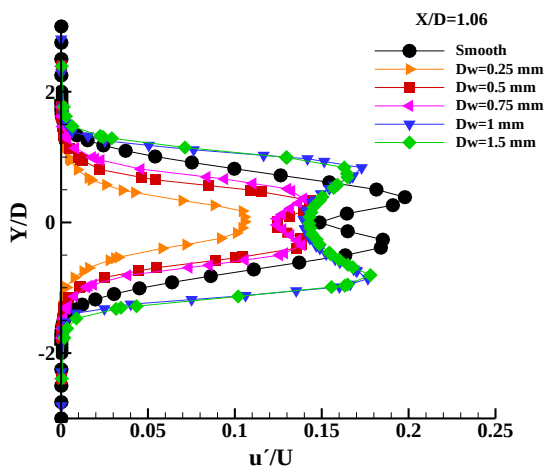
شکل ۴ مقایسه پروفیل (الف) سرعت متوسط بی‌بعد (ب) شدت توربولانس در پژوهش حاضر با مرجع [۴۰] (ج) شدت توربولانس در پژوهش حاضر با مرجع [۱۰]

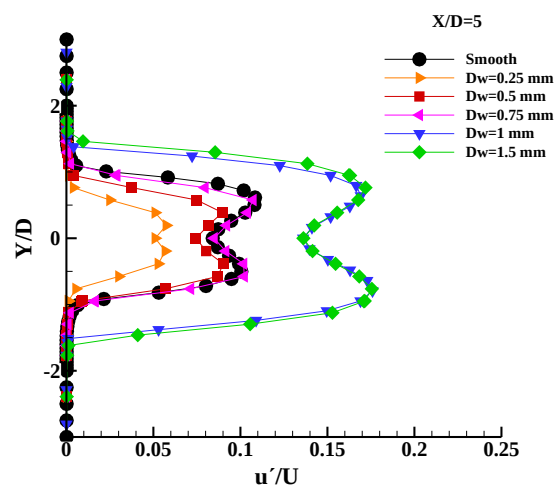
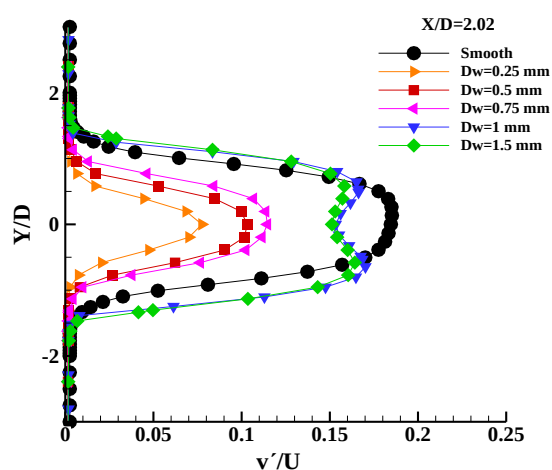


شکل ۶ پروفیل سرعت نوسانی u' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲ و قطرهای مختلف

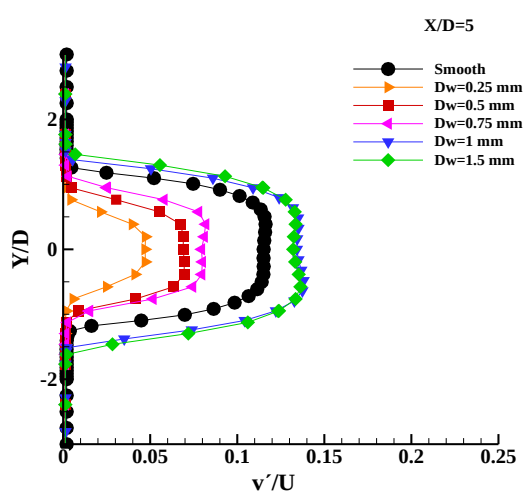


شکل ۵ پروفیل سرعت نوسانی u' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و قطرهای مختلف

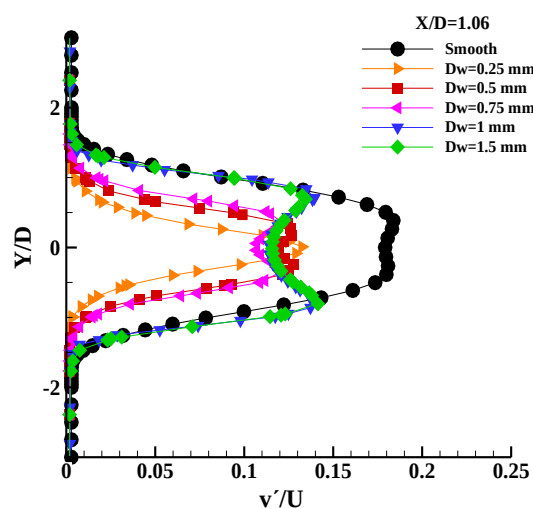
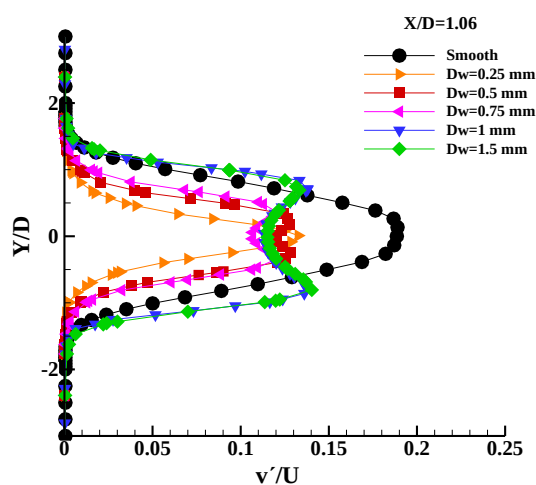




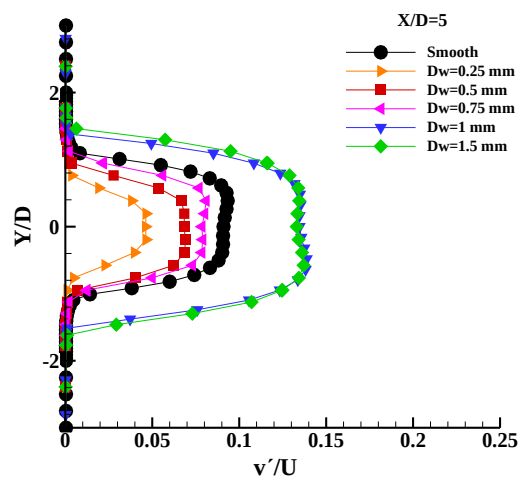
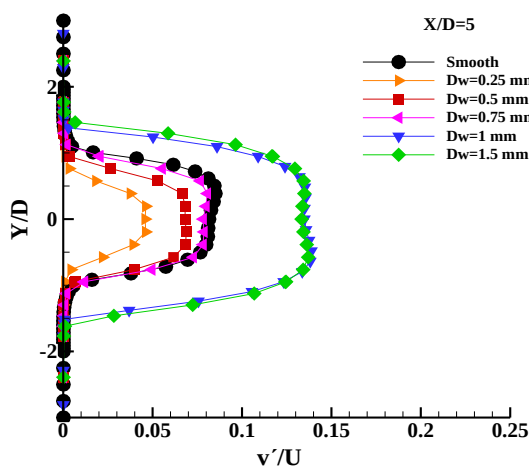
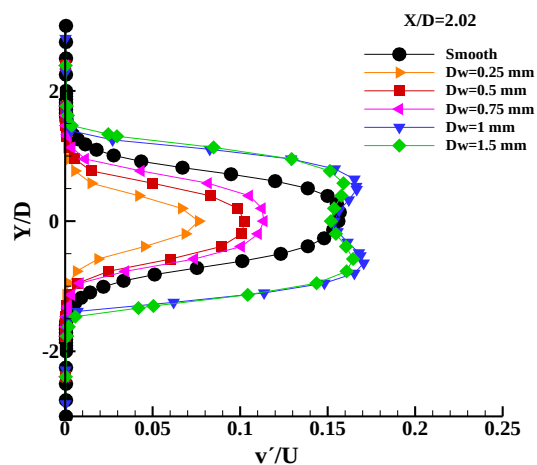
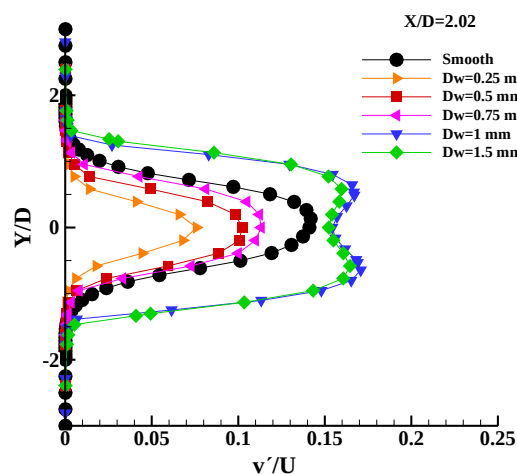
شکل ۷ پروفیل سرعت نوسانی u' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳ و قطرهای مختلف



شکل ۸ پروفیل سرعت نوسانی v' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و قطرهای مختلف



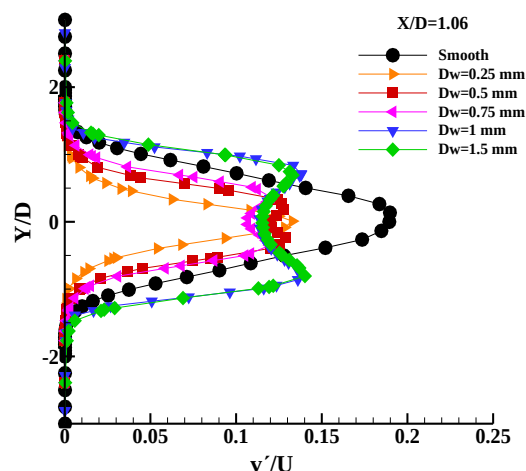
با بررسی نمودارهای v' در اشکال (۸-۱۰) مشاهده می شود که در نواحی نزدیک به مدل، دو پیک وجود دارد که بیانگر وجود گردابه های بزرگ در پشت سیلندر می باشد. در نواحی دور از مدل با افزایش فاصله، اندازه گردابه ها کوچک تر می شود به گونه ای که تقریباً قله ها از بین می روند و انرژی آن ها کاهش می یابد. همچنین در ایستگاه های آخر، عرض پیک ها افزایش می یابد. با افزایش عدد رینولدز در نواحی نزدیک مدل، پیک ها حذف می شوند. استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر بزرگ تر در اعداد رینولدز بالاتر، تاثیر کمتری دارد.



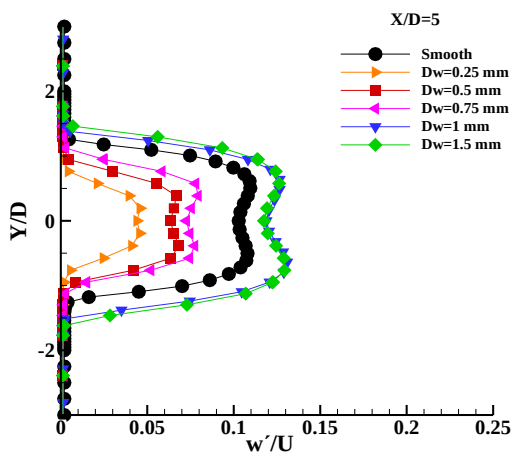
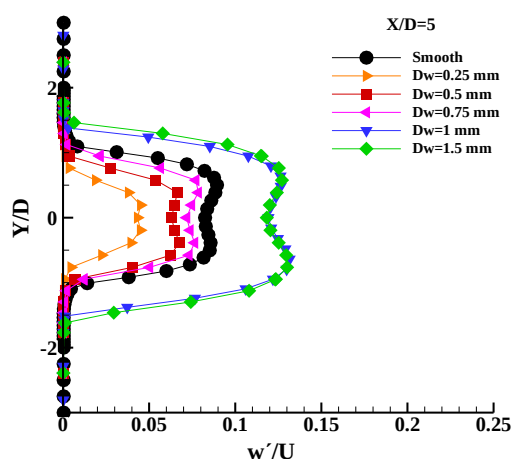
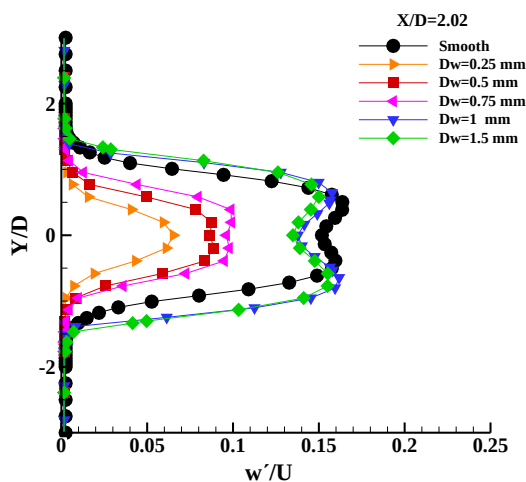
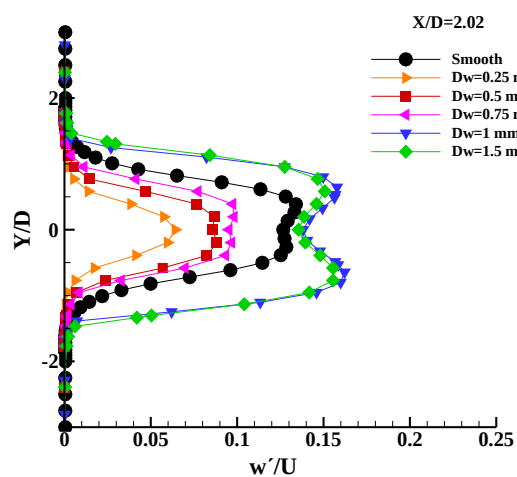
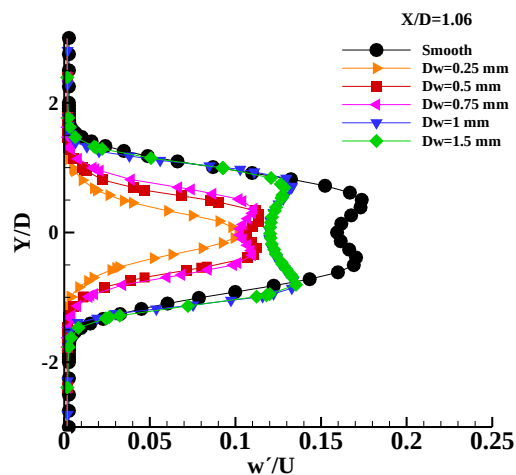
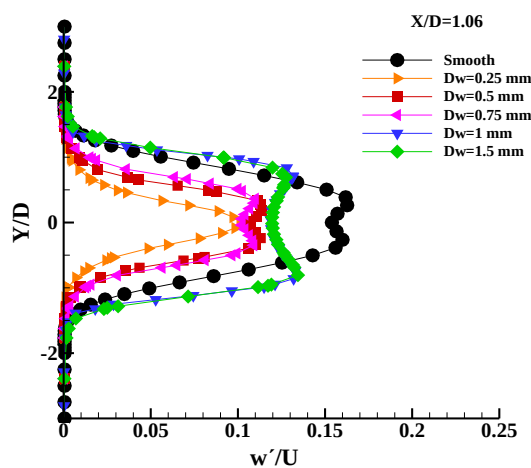
شکل ۱۰ پروفیل سرعت نوسانی v' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳ و قطرهای مختلف

شکل ۹ پروفیل سرعت نوسانی v' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲ و قطرهای مختلف

با بررسی نمودارهای W در اشکال (۱۱-۱۳) مشاهده می‌شود که در نواحی نزدیک مدل ($X/D = ۱/۰۶$ و $۲/۰۲$) نمودار دو پیک دارد که نشان دهنده وجود گردابه‌های بزرگ در پشت سیلندر می‌باشد. در نواحی دورتر از مدل ($X/D = ۵$) با افزایش فاصله، اندازه گردابه‌ها کوچک‌تر می‌شود و انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد به طوری که تقریباً این قله‌ها از بین می‌روند. در ایستگاه‌های آخر، عرض پیک‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز در نواحی نزدیک مدل، این پیک‌ها حذف می‌شوند. همچنین استفاده از سیم اغتشاش ساز در قطرهای بالاتر در اعداد رینولدز بالاتر، تاثیر کمتری دارند. با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر، پیک سرعت‌های نوسانی برای سیلندر صاف و سیلندر با سیم اغتشاش ساز به قطرهای ۱ و ۱/۵ میلی‌متر روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند. به طوری که بیشترین مقدار سرعت نوسانی از ایستگاه دوم به بعد به ترتیب در سیلندر با قطر ۱/۵ و ۱ میلی‌متر، سپس



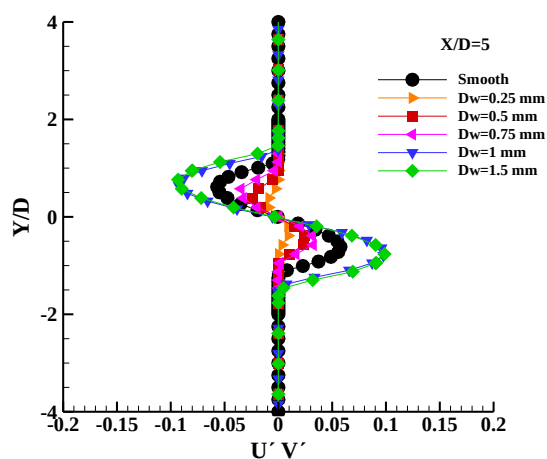
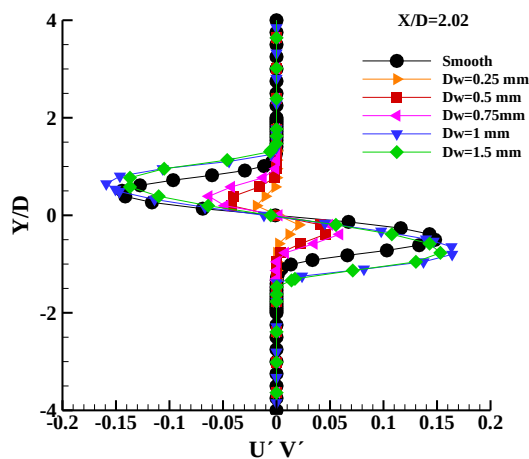
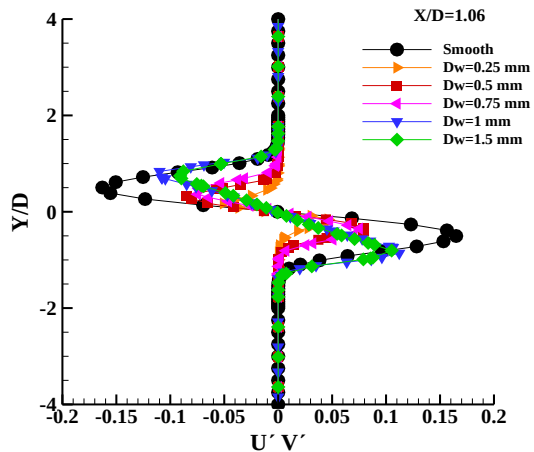
در سیلندر صاف اتفاق می‌افتد. کمترین مقدار سرعت نوسانی مربوط به سیم اغتشاش ساز به قطر ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.



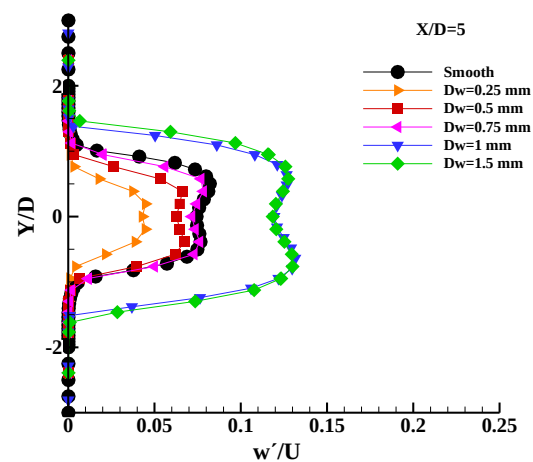
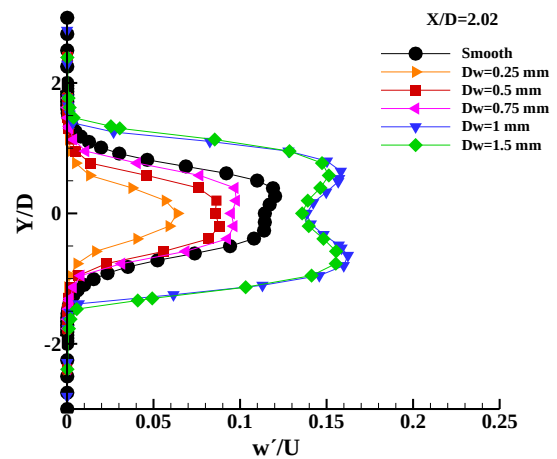
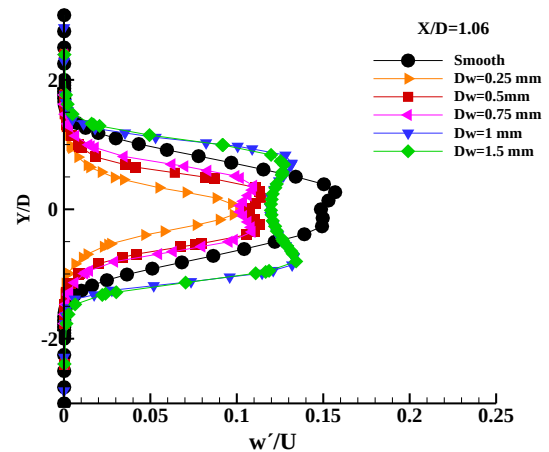
شکل ۱۲ پروفیل سرعت نوسانی w' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲ و قطرهای مختلف

شکل ۱۱ پروفیل سرعت نوسانی w' بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و قطرهای مختلف

اغتشاش ساز رابطه مستقیم دارد. با افزایش فاصله از سیلندر، مقدار تنش برشی رینولدز در سیلندرهایی با سیم اغتشاش ساز به قطر ۱ و ۱/۵ میلی‌متر بیشتر از سیلندر صاف می‌باشد. کمترین مقدار تنش برشی رینولدز مربوط به سیلندر با سیم اغتشاش ساز به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

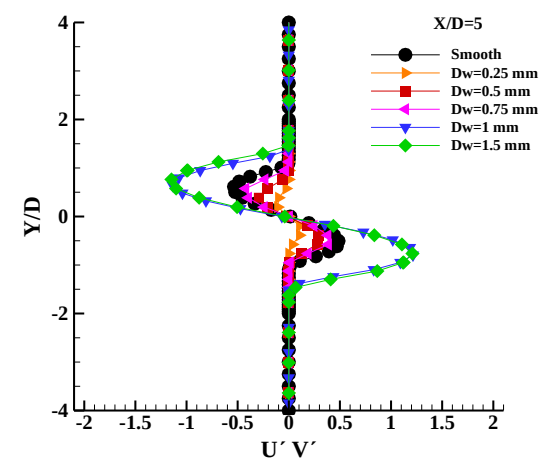
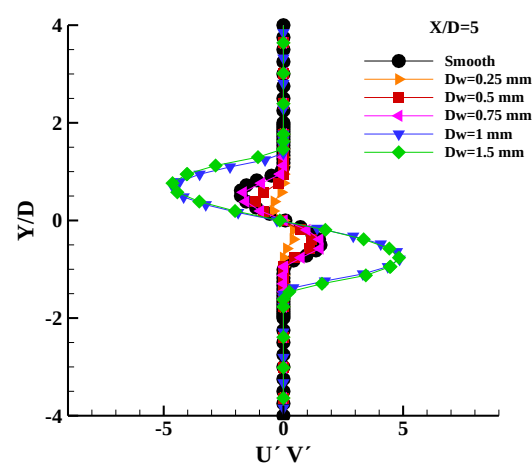
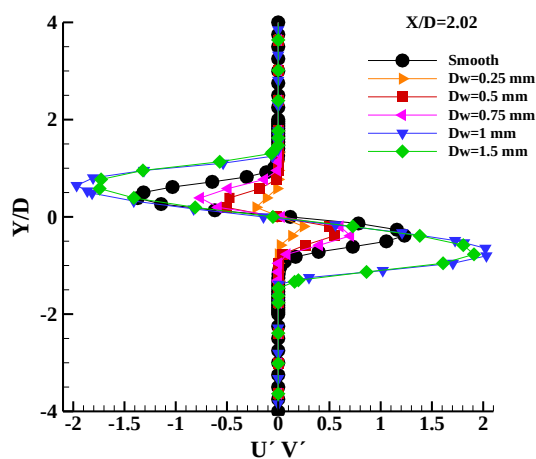
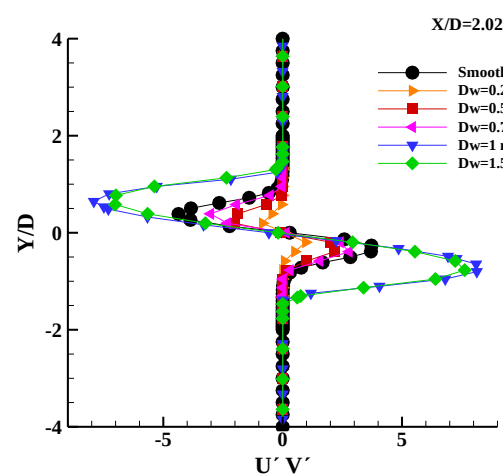
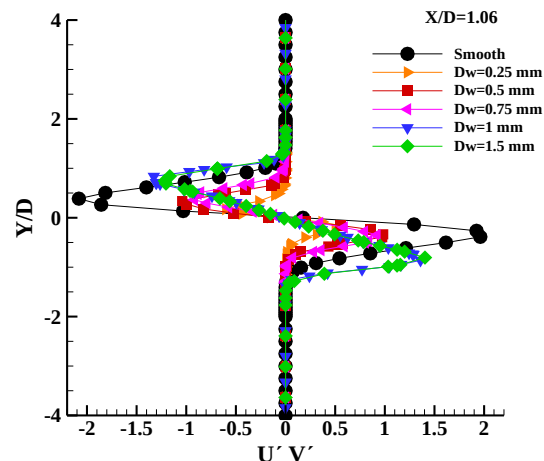
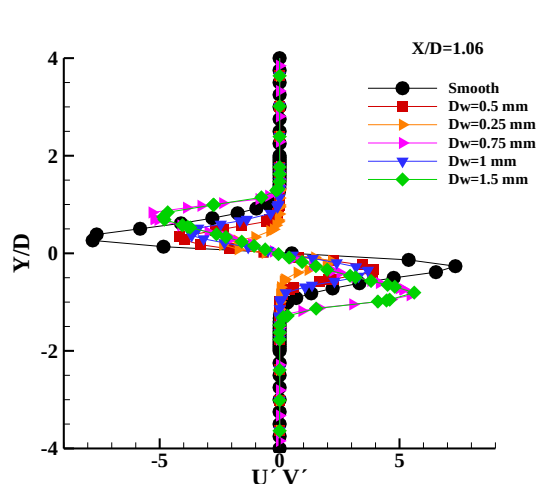


شکل ۱۴ پروفیل تنش برشی رینولدز در عدد رینولدز ۳۹۰۰



شکل ۱۳ پروفیل سرعت نوسانی w'/U بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳ و قطرهای مختلف

نتایج تنش برشی رینولدز در اشکال (۱۶-۱۴) بیانگر آن است که مقدار تنش برشی رینولدز در سیلندر صاف در ایستگاه اول در هر سه عدد رینولدز نسبت به حالت سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز بیشتر است. همچنین تنش برشی رینولدز با قطر سیم



شکل ۱۶: پروفیل تنش برشی رینولدز در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳

شکل ۱۵: پروفیل تنش برشی رینولدز در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲

در شکل (۱۷) نمودار ضریب پسا در حالت سیلندر دایروی صاف و سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز در قطرهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در نواحی نزدیک

کاهش ۴۸٪، ۴۵٪ و ۴۴٪ سرعت‌های نوسانی u' ، v' و w' و کاهش ۵۰٪ تنش برشی رینولدز نسبت به سیلندر صاف می‌شود.

- ضریب پسا در سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۶٪ و ۴٪ نسبت به سیلندر صاف کاهش می‌یابد.
- ضریب پسا در سیم اغتشاش ساز با قطر بزرگ‌تر نسبت به حالت صاف ۸۰٪ افزایش می‌یابد.
- تنش برشی رینولدز با قطر سیم اغتشاش ساز رابطه مستقیم دارد.

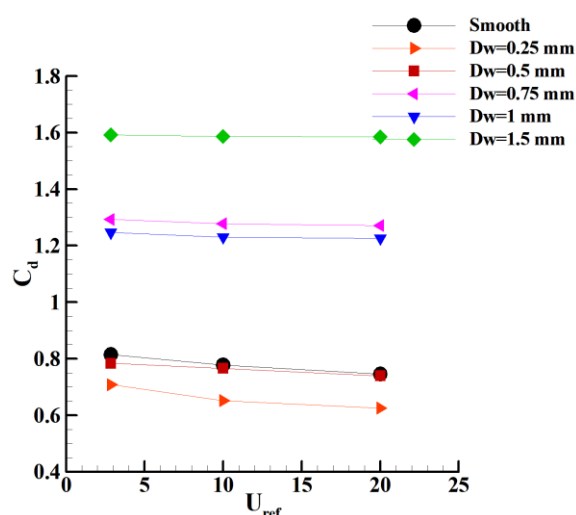
۷- فهرست علائم و اختصارات

C_d	ضریب پسا
D	قطر سیلندر [m]
D_w	قطر سیم اغتشاش ساز [m]
p	فشار (kg ms^{-2})
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
u_i	مولفه‌های سرعت [ms^{-1}]
u	سرعت متوسط [ms^{-1}]
u_{min}	سرعت مینیمم [ms^{-1}]
u', v', w'	مولفه‌های سرعت نوسانی [ms^{-1}]
U_∞	سرعت جریان آزاد [ms^{-1}]
$u'v'$	تنش برشی رینولدز [m^2/s^2]
X	فاصله از نقطه سکون پشت سیلندر [m]
ε	نرخ تلفات (m^2s^{-2})
θ	زاویه نصب سیم اغتشاش ساز
μ	ویسکوزیته دینامیکی [$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$]
μ_t	ویسکوزیته گردابی [kg/ms]
ϑ	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ρ	چگالی [kgm^{-3}]

۸- مراجع

- [1] Rockwell, D., Flow-Induced Vibrations, An Engineering Guide: Routledge, DOI: 10.1201/9780203755747, (2017).
- [2] Zdravkovich, M., Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, No. 2, pp. 145-189, DOI: 10.1016/0167-6105(81)90036-2, (1981).

مدل به علت جریان‌های برگشتی و افزایش شدت اغتشاشات در پشت مدل، سرعت جریان برآیندی از مقدار V و U می‌باشد. همچنین استفاده از سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌متر سبب کاهش ضریب پسا می‌شود. با افزایش قطر سیم اغتشاش ساز، مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷ نمودار ضریب پسا در حالت سیلندر دایروی صاف و سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز در قطرهای مختلف

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر سیم اغتشاش ساز نصب شده در زوایای $\pm 140^\circ$ و $\pm 40^\circ$ در سیلندر دایروی بر ضریب پسا، سرعت‌های نوسانی و تنش برشی رینولدز در سه ایستگاه در پشت استوانه (۵ و ۲/۰۲ و ۱/۰۶ X/D) در اعداد رینولدز مختلف ۳۹۰۰، ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد:

- وجود پیک در نمودارهای سرعت نوسانی بیانگر وجود گردابه‌های بزرگ در پشت سیلندر می‌باشد.
- با افزایش فاصله از مدل، اندازه گردابه‌ها کوچک‌تر می‌شود و انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد.
- با افزایش عدد رینولدز در نواحی نزدیک مدل، پیک‌ها حذف می‌شوند.
- استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش ۴۸٪، ۴۵٪ و ۴۴٪ سرعت‌های نوسانی u' ، v' و w' و کاهش ۵۰٪ تنش برشی رینولدز نسبت به سیلندر صاف می‌شود.
- استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر ۰/۵ میلی‌متر باعث

- [13] Alam, M.M., Kim, S., and Maiti, D.K., Flow interference between two tripped cylinders, Wind and Structures, *An International Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 109-125, DOI: 10.12989/was.2016.23.2.109, (2016).
- [14] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., Numerical and experimental study of characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Mechanical Engineering, pp. 265-285, DOI: 10.1007/s40997-020-00373-6, (2021).
- [15] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136, pp. 1-19, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01071-1, (2021).
- [16] Yadegari, M., and Khoshnevis, A.B., Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, No.7, pp. 548, DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00561-y, (2020).
- [17] Khoshnevis, A., Abasghorbani, N., and Yazdi, M.E., Experimental Investigation of Drag Coefficient of Two Tandem Cylinders at Staggered Arrangement in Turbulent Flow, Vol. 50, No. 2, pp. 83-91, DOI: 10.22034/jmeut.2020.9987, (2020).
- [18] Hatami, S., Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., The Experimental investigation of the drag coefficient of two tandemly-arranged circular cylinders at different angles, Vol. 31, No. 6, pp.3-12, DOI:10.30506/MMEP.2023.562121.2048, (2023). (in Persian).
- [19] Yadegari, M., and Khoshnevis, A.B., Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, No. 6, pp. 534, DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00545-y, (2020).
- [20] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136, No. 10, pp. 10-19, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01999-4, (2021).
- [21] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., and Boloki, M., An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 1-9, (2011). (in Persian).
- [3] Kumar, R.A., C.-H. Sohn, and B.H. Gowda., Passive control of vortex-induced vibrations: an overview, Recent patents on mechanical engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 1-11, DOI: 10.2174/2212797610801010001, (2008).
- [4] Fage, A., The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder, *Aero., Res, Counc, Lond*, Vol. 1283, DOI: 10.3130/aijs.68.23_3, (1929).
- [5] Hover, F., H. Tvedt, and M. Triantafyllou., Vortex-induced vibrations of a cylinder with tripping wires, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 448, pp. 175-195, DOI: 10.1017/S0022112001005985, (2001).
- [6] Quadrante, L.A.R., and Nishi, Y., Amplification/suppression of flow-induced motions of an elastically mounted circular cylinder by attaching tripping wires, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 48, pp. 93-102, DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.02.018, (2014).
- [7] Mahbub Alam, M.d., Zhou, Y., Zha, J.M., Flamand, O., Boujard, O., Classification of the tripped cylinder wake and bi-stable phenomenon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 4, pp. 545-560, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.018, (2010).
- [8] James, D.F., and Truong, Q.-S., Wind load on cylinder with spanwise protrusion, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 98, No. 6, pp. 1573-1, DOI: 10.1061/JMCEA3.0001699, (1972).
- [9] Igarashi, T., Effect of tripping wires on the flow around a circular cylinder normal to an airstream, *Bulletin of JSME*, Vol. 29, No. 255, pp. 2917-2924, DOI: 10.1299/jsme1958.29.2917, (1986).
- [10] Bak Khoshnevis, A., Foroozesh, F., Pedram, M., Vahidi, M., Experimental investigation on drag coefficient reduction due to tripping wire on a cylinder, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp.81-90, DOI: 10.22044/JSFM.2013.139, (2013). (in Persian).
- [11] Bak Khoshnevis, A., Nazari, S., Ezadi Yazdi, M.J., Experimental Investigation of the Characteristics of the Flow around an Elliptic Cylinder in the Presence of a Tripping Wire, *Journal of Fluid mechanics and aerodynamics*, Vol. 5, No. 2, pp. 39-54, DOI: 10.22044/JSFM.2017.3999.2067, (2017). (in Persian).
- [12] Bak Khoshnevis, A., Pedram, M., Experimental Study of Wake Characteristics on an Asymmetric Airfoil Using Tripping Wires, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-9, (2011). (in Persian).

- Aerodynamics*, Vol. 170, pp. 162-178, DOI: 10.1016/j.jweia.2017.08.014, (2017).
- [31] Fukudome, K., Watanabe, M., Iida, A., and Mizuno, A., Separation control of high angle of attack airfoil for vertical axis wind turbines, *AIAA*, Vol. 50, No. 3, (2005).
- [32] Ezadi, Y.M., and Bak, K.A., Experimental investigation of the characteristics of the wake of a rotating circular cylinder at different Reynolds numbers and speed ratios, *Journal Fluid mechanics and aerodynamics*, Vol. 4, No. 1, pp. 51-64, (2015). (in Persian).
- [33] Ezadi Yazdi, M. and Bak Khoshnevis, A., Experimental Investigation of the Effect of Reducing the Drag Coefficient on the Cylinder by Hot-Wire Anemometry, *Journal Mechanical Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 19-30, (2016). (in Persian).
- [34] Yazdi, M.J.E., and Khoshnevis, A.B., Experimental study of the flow across an elliptic cylinder at subcritical Reynolds number, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 133, No. 12, pp. 533, DOI:10.1140/epjp/i2018-12342-1, (2018).
- [35] Ezadi Yazdi, M., Safavi Rad, A., and Bak Khoshnevis, A., Experimental investigation of mean velocity profiles and turbulence intensities around an elliptic cylinder in the different Reynolds numbers, in *1st International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran University, Tehran, Iran, (2016). (in Persian).
- [36] Ezadi, Y.M., and Bak, K.A., Experimental investigation of flow characteristics around an elliptic cylinder near a flat plate, *Fluid mechanics and aerodynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 19-35, (2016). (in Persian).
- [37] Khan, N.B., Ibrahim, Z., Khan, M.I., Hayat, T., Javed, M.F., VIV study of an elastically mounted cylinder having low mass-damping ratio using RANS model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, pp. 309-314, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.109, (2018).
- [38] Launder, B.E., Second-moment closure: present and future, *International Journal of Heat and fluid flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 282-300, DOI: 10.1016/0142-727X(89)90017-9, (1989).
- [39] Daly, B.J., and Harlow, F.H., Transport equations in turbulence, *The physics of fluids*, Vol. 13, No. 11, pp. 2634-2649, DOI: 10.1063/1.1692845, (1970).
- [40] Lourenco, L.M., Characteristics of the plate turbulent near wake of a circular cylinder, A particle image velocimetry study, In *Unpublished, results taken from Beaudan and Moin*, (1994).
- Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 67-80, DOI: 10.1007/s40997-022-00494-0, (2023).
- [22] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, pp. 1-15, DOI: 10.1007/s40430-020-02495-z, (2020).
- [23] Haghighatjoo, H., Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 137, No. 9, pp. 1042, DOI: 10.1140/epjp/s13360-022-03260-y, (2022).
- [24] Mansouri, Z., Yadegari, M., and Khoshnevis, A.B., Numerical investigation of the effect of installing four trip wires with different diameters on the mean and fluctuation velocities and characteristics of the wake around the circular cylinder, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, (2023). (in Perss).
- [25] Bak Khoshnevis, A., Boloki, M., and Yadegari., M., The Investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylindrical wake, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 1, pp. 223-236, DOI: 10.1016/j.jweia.2014.08.014, (2020). (in Persian).
- [26] Ezadi Yazdi, M.J., Rad, A.S., and Khoshnevis, A.B., Features of the flow over a rotating circular cylinder at different spin ratios and Reynolds numbers, Experimental and numerical study, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 134, pp. 1-21, DOI: 10.1140/epjp/i2019-12508-3, (2019).
- [27] Araújo, T.B., Sicot, C., Borée, J., and Martinuzzi, R. J., Influence of obstacle aspect ratio on tripped cylinder wakes, *International journal of heat and fluid flow*, Vol. 35, pp. 109-118, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.01.010, (2012).
- [28] Yu, Z., Ping, H., Liu, X., Zhu, H., Wangu, R., Bao, Y., Zhour, D., Han, Z., and Xu, H., bulent wake suppression of circular cylinder flow by two small counter-rotating rods, *Physics of Fluids*, Vol. 32, No. 11, pp. 115-123, DOI: 10.1063/5.0023881 (2020).
- [29] Luo, D., Yan, C., Liu, H., and Zhao, R., Comparative assessment of PANS and DES for simulation of flow past a circular cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 134, pp. 65-77, DOI: 10.1016/j.jweia.2014.08.014, (2014).
- [30] Liu, Y., Guan, X., and Xu, C., A production limiter study of SST-SAS turbulence model for bluff body flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial*

بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند نورد گرم بر روی ریز ساختار فولاد CK45

چکیده: با توجه به استفاده گسترده فولادهای فریت-پرلیتی در کاربردهای صنعتی، بهینه سازی خواص آن ها یکی از موضوعات مهم تحقیقات در این حوزه است. بر این اساس بهبود ریزساختار نهایی آن ها که منجر به بهبود خواص مکانیکی می گردد، ضروری است. استفاده از بعضی فرآیندهای تولید همچون نورد می تواند سبب بهبود ریز ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی محصولات گردد. در این تحقیق عملیات نورد گرم و کوئنچ در دو محیط مختلف بر روی CK45 انجام شد. نمونه ها در دماهای مختلف و در سرعت های غلتک متفاوت، تحت کرنش های یکسان قرار گرفته و سپس در دو محیط مختلف آب یخ و هوا تا دمای هوای اتاق به سرعت سرد شدند. در نهایت ریزساختار نهایی آن ها با استفاده از میکروسکوپ نوری، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در فرآیندهای نورد گرم در دماهای بالای ۸۵۰ درجه سانتی گراد، ریزساختار پس از نورد و خنک شدن در آب یخ همواره به صورت مارتنزیتی بوده که با افزایش دما این ساختار ریزتر می شود. در نمونه های هوا سرد شده در سرعت ثابت، با افزایش دما، مدت زمان کافی برای رشد و تشکیل شبکه پیوسته از فاز فریت در قطعه وجود داشته و بنابراین نمونه در دماهای بالاتر به حالت قبل از نورد بر می گردد. اما در دماهای پایین و سرعت بالاتر، به دلیل نرخ کرنش بالا، ماده مدت زمان کافی برای بازیابی و تشکیل فاز شبکه -ای فریت نداشته و تنها فریت در جهات نورد تشکیل می گردد.

واژه های راهنما: نورد گرم، ریزساختار، پارامترهای نورد، CK45، فولادهای فریتی - پرلیتی

آیدین سلیمی اصل*

استادیار،
بخش فنی و مهندسی،
دانشگاه پیام نور

اسماعیل صیدی

استادیار،
بخش کشاورزی،
دانشگاه پیام نور

بهنام فرج پور

دانشجوی کارشناسی ارشد،
بخش فنی و مهندسی،
دانشگاه پیام نور

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

Aydin Salimiasl*
Assistant Professor of
Mechanical Engineering
Department, Peyame
Noor University

Esmail Seidy
Assistant Professor of
Agriculture Department,
Peyame Noor University

Behnam Farajpoor
M.Sc. Student of
Mechanical Engineering
Department, Peyame
Noor University

Investigation of the influence of hot rolling parameters on CK45 microstructures

Abstract: Optimization of Ferritic-pearlitic steel properties is one of the most important aims of the researchers in this study branch due to increasing use of these steels in industry applications. Therefore, improving their final microstructure is necessary to enhance the level of the mechanical properties. On the other hand, employing some manufacturing methods such as rolling can improve the microstructure and the mechanical properties in turn. In this research, the hot rolling operation and quenching in two different environments was carried out on CK45 steel. The samples were rolled in different temperatures and different rotational speeds of work-rolls under the same reduction percentage. They were then quickly cooled down in room atmosphere and cold water and the final microstructure was examined using of optical microscope. The results show that in hot rolling process, over 850°C temperatures, the microstructure is always in the form of martensite phase after rolling and cooling in cold water and the microstructure gets smaller even with increasing the temperatures. About the samples which are cooled in room atmosphere and with increasing the temperature, there is enough time for growth and forming continuous background of ferrite phase's in the sample, so the samples return to their before rolling state. However, in low temperatures and high speeds, because of high strain rate, material has not enough time for retrieving and forming ferrite phase and the ferrite phase is formed only in rolling direction.

Keywords: Hot rolling, Microstructure, Rolling parameters, CK45, Ferritic-pearlitic steels

۱- مقدمه

هر دو در مقایسه با روش نورد جزو روش‌های گران قیمت و زمان‌بر محسوب می‌شوند. لذا انتخاب نورد گرم برای کنترل پارامترهای ذکر شده می‌تواند عملیاتی کم‌هزینه‌تر و با سرعت بیشتری ارائه دهد [۴، ۵].

بررسی‌های انجام گرفته در منابع علمی موجود نشان می‌دهد که در حوزه فولادها از حیث شکل‌دهی و نورد آنها، تحقیقات گسترده‌ای در سطح دنیا و در داخل کشور انجام شده است که از جمله آن می‌توان به کارگیری عملیات ترمومکانیکی در این حوزه اشاره کرد، ولی آنچه قابل اذعان است، این است که عمده این تحقیقات بر روی گریدهای مخلف فولادهای آلایژی که عموماً نیز از قیمت بالایی برخوردار می‌باشند، اجرا شده است اما بطور خاص در ارتباط با نورد گرم فولاد CK45، تقریباً می‌توان اظهار داشت که تا به امروز راجع به بهبود خواص مکانیکی آنها به روش شکل‌دهی با نورد گرم، اطلاعات علمی موثقی در دسترس نیست.

نیکان و همکارانش [۶] در پژوهش خود تأثیر پارامترهای مختلف نورد گرم را بر روی فولادهای دو فازه با و بدون عنصر نیوبیوم بررسی کرده‌اند. بر اساس این تحقیق دمای نورد و نرخ کرنش تأثیر محسوسی بر روی خواص مکانیکی و ریز ساختار دارند. یونس فاخر و همکارانش [۷] در تحقیق خود تأثیر جهت نوردکاری و نرخ کرنش نوردکاری سرد را بر روی خواص مکانیکی فولاد CK45 بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج تحقیق با افزایش زاویه نورد کاری از ۰ تا ۹۰ درجه، استحکام کششی فولاد افزایش پیدا کرده و همچنین سختی فولاد با انحراف زاویه در عملیات نورد سرد افزایش محسوسی از خود نشان داده است. ماندانا و همکارانش [۸] در تحقیقی که در آن تأثیر نورد گرم بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای با کربن کم و کربن بالا انجام دادند به این نتیجه رسیدند که نورد گرم یک روش عالی برای از بین بردن پیر سختی، لوله‌ای شدن و طولانی شدن نقطه تسلیم در این فولادها می‌شود. پیترو و همکارانش [۹] در تحقیقی تأثیر پارامترهای نورد گرم مثل نرخ کرنش و دمای نورد را بر روی فولاد St60Mn بررسی کرده‌اند. در این تحقیق استحکام کششی، استحکام تسلیم، سختی، مدول الاستیسیته، چقرمگی، خمش و درصد کاهش مساحت محصولات نورد اندازه‌گیری شدند. تحقیق نشان داد که پارامترهایی مثل نرخ کرنش و دمای نورد تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی این فولاد دارد. هونگ بین لی و همکارانش [۱۰] در پژوهش خود تأثیر دماهای مختلف را در ریز ساختار و خواص مکانیکی فولادهای ساده کربنی در تغییر شکل دادن گرم بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در دمای

فرآیند نورد، یکی از متداول‌ترین فرآیندها برای تولید فرآورده‌های فلزی به ویژه فولادها با شکل‌ها و ابعاد مختلف است، به‌طوری که بیش از ۸۰٪ از فرآورده‌های فلزی در جهان با این روش تولید می‌شود [۱]. از میان انواع مختلف فرآیندهای نورد، نورد تخت از پرکاربردترین فرآیندها است، به‌طوری که در کشورهای صنعتی ۴۰ تا ۶۰ درصد محصولات حاصل از فرآیندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد می‌شود [۲].

ظرفیت و سرعت تولید فرآیند نورد آن را به یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی فلزات تبدیل کرده است، به‌طوری که این فرآیند از اهمیت زیادی در صنعت به ویژه صنایع فلزی برخوردار است. فرآیند نورد ممکن است به صورت گرم یا سرد انجام پذیرد، که برگزیدن روش به نوع، اندازه، ویژگی‌های ماده و شکل پایانی و انتظارات تولید کنندگان از فرآورده بستگی دارد. در روش نورد گرم شکل‌دهی در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد انجام می‌پذیرد، که از مزایای آن نسبت به روش سرد می‌توان به ایجاد تغییر شکل‌های بالا، توان و نیروی اعمالی کمتر، اخذ خواص همسانگرد در ریزساختار محصول نهایی و عدم وقوع پدیده کار سختی در محصول نهایی اشاره کرد [۲].

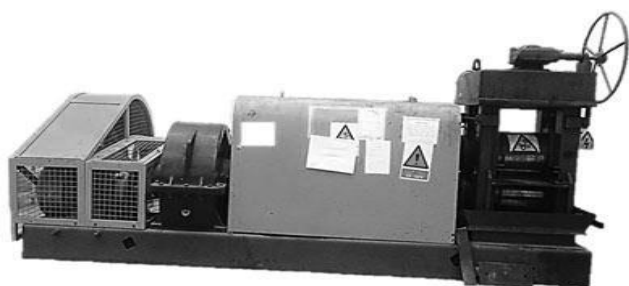
یکی دیگر از مزایای بسیار مهم عملیات نورد گرم بهبود خواص مکانیکی قطعه تولیدی به این روش است، برای ایجاد کیفیت مناسب فرآورده، پارامترهای مختلف مکانیکی، سطحی، دمایی و متالورژیکی می‌بایست تحت کنترل دقیق باشند، این کنترل‌ها برای فولادهای مختلف متفاوت بوده و برای هر کدام از آن‌ها برنامه‌ی کنترل جداگانه‌ای می‌بایست در نظر گرفته شود. از این‌رو می‌توان گفت که یکی از مؤثرترین روش‌ها برای ارتقاء خواص مکانیکی فولادها انجام کنترل‌های لازم حین نورد آن‌ها است. اگر بتوان پارامترهای حاکم در فرآیند نورد را که عبارتند از: دمای تغییر شکل، میزان کرنش اعمالی و نرخ کرنش را به‌خوبی کنترل کرد، آنگاه محصول به دست آمده دارای خواص مکانیکی بهتری خواهد بود که این خواص نیز به نوبه خود متأثر از ریزساختار آن فلز است [۳]. بنابراین فرآیند نورد یک روش استحکام بخشی هم به حساب می‌آید که این استحکام بخشی از طریق مواردی همچون ریز کردن دانه‌ها اتفاق می‌افتد. در بین روش‌های ریز کردن دانه‌ها، فرآیندهای تغییر فرم پلاستیکی شدید و عملیات ترمومکانیکی توسعه پیدا کرده و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [۴] که

شکل ۱ نمونه آماده شده برای عملیات کوره به کار برده شده در این پژوهش یک کوره مقاومتی شرکت Azar Furnace با مدل F11L و با دمای اسمی 1250°C است (شکل ۲).



شکل ۲ کوره مورد استفاده برای آستینیت کردن نمونه

با توجه به اهداف پژوهش از دستگاه نورد موجود در دانشگاه صنعتی سهند استفاده شده است. نمایی از دستگاه نورد در شکل (۳) ارائه شده است. قطر هر غلتک ۳۴ سانتی متر بوده و سرعت حرکت دستگاه در سرعت‌های مختلف ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دور بر دقیقه است.



شکل ۳ دستگاه نورد مورد استفاده برای عملیات

۲-۱- روش انجام آزمایش

پس از آماده کردن نمونه‌ها و برش پلاسمایی و سیمی آنها، زواید مربوط به برش پلاسمایی توسط سنگ‌زن برقی زدوده شد تا نمونه به شکل منظم و به سطح مناسب برسد. قبل از انجام هرگونه عملیاتی روی نمونه آماده شده، ابتدا عملیات متالوگرافی جهت بدست آوردن ریزساختار اولیه انجام می‌گیرد.

650°C درجه تشکیل ساختارهای ریز دانه به آسانی اتفاق می‌افتد. و در بین دمای 700°C – 600°C درجه ساختارهای همگن ریز دانه تشکیل می‌شود.

در این پژوهش تأثیر عملیات نورد گرم بر رویکی از پرکاربردترین فولادها یعنی فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این عملیات نورد گرم بر روی فولاد تحت پارامترهای مختلف نورد کاری انجام می‌گیرد. قبل از عملیات نورد، فولاد تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و ریز ساختار آن بررسی می‌گردد. سپس با اعمال پارامترهای سرعت چرخشی و دما در مقدار کرنش ثابت عملیات نورد انجام شده و در نهایت پس از عملیات حرارتی ریز ساختار فولاد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

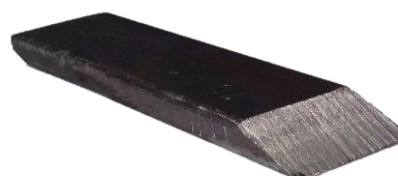
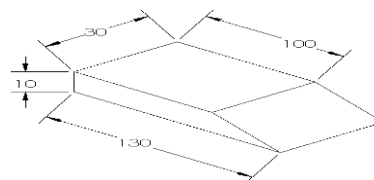
۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق جهت انجام عملیات تغییر شکل گرم، فولاد ساده کربنی CK45 به عنوان ماده اصلی همراه با پودر آلومینای $0/3$ و $0/05$ میکرون، نمد و محلول نایتال 2% مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب شیمیایی فولاد CK45 مورد استفاده در پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد CK45

Element	Fe	S	P	Si	Mn	C
%wt	بالانس	$0/35$	$0/01$	$0/25$	$0/65$	$0/45$

نمونه مورد استفاده ابتدا توسط دستگاه برش پلازما به شکل مکعب مستطیل در آمده و سپس توسط برش سیمی به شکل دوزنقه با زاویه راس 30° درجه، طول ۱۰۰ میلی‌متر، عرض ۳۰ و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر تهیه شد. نمای شماتیک و واقعی از نمونه و مراحل آن در شکل (۱) ارائه شده است.





شکل ۴ نمونه پس از نورد گرم و محیط آب یخ مورد استفاده



شکل ۵ فلوجارت روش انجام آزمایش

۳- نتایج و بحث

قبل از هر گونه بررسی و انجام آزمایشی، نمونه خام تهیه شده توسط دستگاه کوانتومتری آزمایش شده و ترکیب شیمیایی آن بدست آمد. ترکیب بدست آمده در نرم افزار ترمودینامیکی JmatPro وارد شده و بر اساس نمودار، فازهای تعادلی آن مشخص می شود. در شکل (۶) نمودار تعادلی سرمایش نمونه شمش ارائه شده است. مطابق شکل مشاهده می شود که ساختار نهایی در دمای محیط شامل فریت و سمنتیت خواهد بود.

درصد هر کدام از فازهای مربوطه توسط همین نرم افزار Jmatpro محاسبه شده و به ترتیب برابر ۹۳٪ فریت و ۷٪ سمنتیت است، که بخشی از فریت مربوط به فریت پرویوتکتوئید بوده و به صورت جداگانه تشکیل می شود و مابقی آن به صورت لایه های متناوبی از فریت و سمنتیت در قالب فاز پرلیت تشکیل می شوند.

پس از آماده کردن نمونه ها و برش پلاسمایی و سیمی آنها، زواید مربوط به برش پلاسمایی توسط سنگ زن برقی زدوده شد تا نمونه به شکل منظم و به سطح مناسب برسد. قبل از انجام هرگونه عملیاتی روی نمونه آماده شده، ابتدا عملیات متالوگرافی جهت بدست آوردن ریزساختار اولیه انجام می گیرد. سپس نمونه ها جهت عملیات آستینیت کردن به مدت ۱ ساعت درون کوره با دماهای مختلف قرار داده شدند. قبل از قراردادن نمونه در کوره، ابتدا کوره با نرخ گرمایش آرام تا دمای ۶۵۰ درجه بالا برده شده و به مدت ۱ ساعت در این دما نگه داشته می شود. با رسیدن دمای کوره به ۶۵۰ درجه، نمونه به آرامی درون کوره قرار داده می شود. افزایش دمای کوره تا رسیدن به دمای مذکور با همان نرخ گرمایش انجام شده و با رسیدن به دمای مورد نظر جهت توزیع یکنواخت دما در قطعه، کوره ۱ ساعت در این دما نگه داشته می شود. سپس نمونه جهت انجام فرآیند نورد از آن خارج شده و جهت جلوگیری از کاهش دمای نمونه، به سرعت تحت عملیات نورد قرار می گیرد. در مرحله نورد، نمونه توسط میله ی فولادی به آرامی به داخل غلتک هل داده می شود، تا فرآیند نورد تنها یک پاس بر روی نمونه انجام گیرد. دستگاه نورد در این حالت با سرعت های مختلف و با فاصله ۳/۸ میلی متری بین غلتک ها در حال چرخش است. در نتیجه با ورود نمونه به فاصله میان غلتک ها، عملیات نورد گرم در دماهای و سرعت های مختلف و با ۶۲٪ تغییر شکل پلاستیک انجام گرفته و نمونه از طرف دیگر خارج می شود. پس از خروج نمونه از دستگاه نورد، اجازه داده می شود تا نمونه در دو محیط هوا و آب یخ سرد شده و به دمای محیط برسد. با رسیدن به دمای محیط، نمونه از مقطع طولی مورد برش قرار می گیرد و سطح مقطع ایجاد شده مورد عملیات متالوگرافی قرار می گیرد. در شکل (۴) نمونه پس از نورد گرم و محیط آب یخ نشان داده شده است.

جهت متالوگرافی ابتدا سنباده زنی های دقیقی از سنباده با مش ۸۰ تا ۵۰۰۰ و با تعویض ۹۰ درجه ای جهت سنباده زنی صورت گرفت. سپس با پودر آلومینای ۰/۳ و ۰/۰۵ میکرون عملیات صیقل کاری نهایی انجام گرفت. پس از حصول سطح آینه ای و براق نمونه، نمونه ها ابتدا با آب و سپس با الکل تمیز شسته شده و توسط سشوار سطح آن ها خشک شدند. برای نمایان سازی ریزساختار عملیات حکاکی توسط محلول ۲٪ نایتال انجام گرفت. پس از آن تصاویر میکروسکوپی از بزرگنمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰ توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS PMG3 تهیه شد. شکل (۵) فلوجارت روش انجام آزمایش ها را بصورت گرافیکی نشان می دهد.

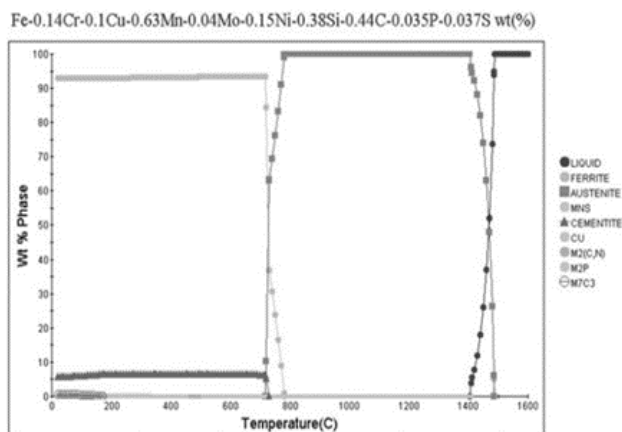


ریزساختار نمونه خام CK45 پس از متالوگرافی در دو بزرگنمایی مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. مطابق تصویر مشاهده می‌شود که ریزساختار شامل دو فاز فریت (به رنگ سفید) و پرلیت (به رنگ تیره) است. آنالیز تصویر از نمونه فوق توسط نرم‌افزار Image J صورت گرفته و در شکل (۸) نشان می‌دهد که حدود ۴۸٪ زمینه را فاز سفید رنگ فریت تشکیل می‌دهد و مابقی ریزساختار پرلیت است.



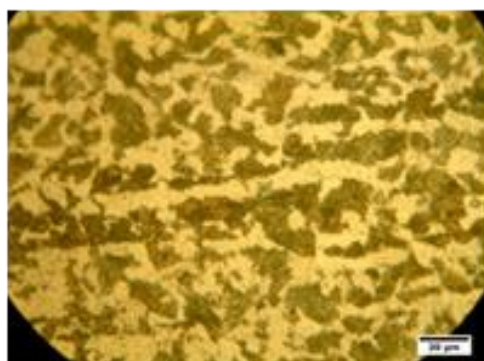
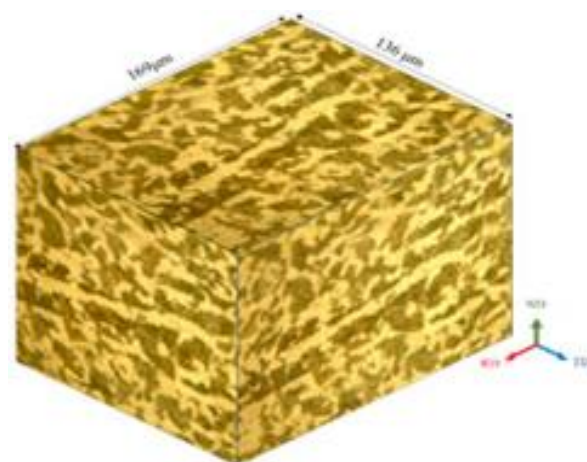
شکل ۷ ریز ساختار نمونه خام فولاد CK45

شکل ۸ آنالیز تصویر ریز ساختار نمونه خام فولاد CK45

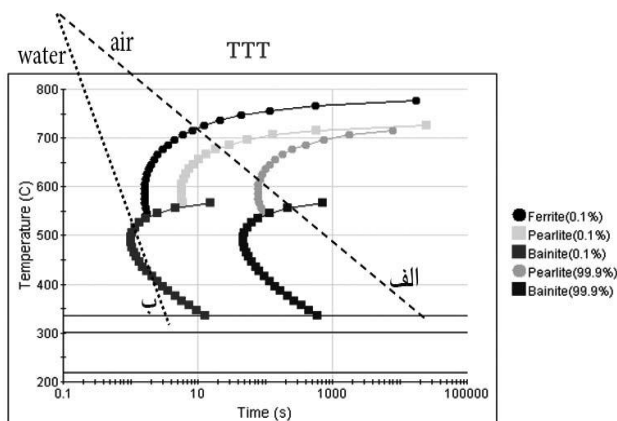


شکل ۶ نمودار سرمایش فولاد CK45 در حالت تعادل

برای انجام عملیات حرارتی، ابتدا نمونه را در منطقه آستنیت (850°C) گرم نموده و سپس عملیات مورد نظر بر روی آن انجام می‌شود. دمای آستنیت در ناحیه 850°C تا دمای نزدیک به 1400°C پایدار است. از این رو آستنیت کردن در این محدوده دمایی شروع می‌شود. جهت حصول اطمینان از دمای آستنیت شدن نمونه، تعداد دو نمونه در این دما به مدت ۶۰ دقیقه مورد گرمایش قرار گرفته و سپس این نمونه‌ها یکی در آب یخ و دیگری در محیط هوا تا دمای محیط خنک گردید. پس از خنک شدن نمونه‌ها، نمونه‌هایی جهت متالوگرافی تهیه و ریزساختار آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۹) ریزساختار این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بعبارت دیگر، شکل (۹) ریز ساختار فولاد CK45 را بعد از عملیات آستنیت شدن در محیط‌های هوا و یخ نشان می‌دهد.



توجه به ریزساختارهای بدست آمده و نمودار TTT مشاهده می شود که نمونه در دمای 850°C کاملاً آستنیت شده است.



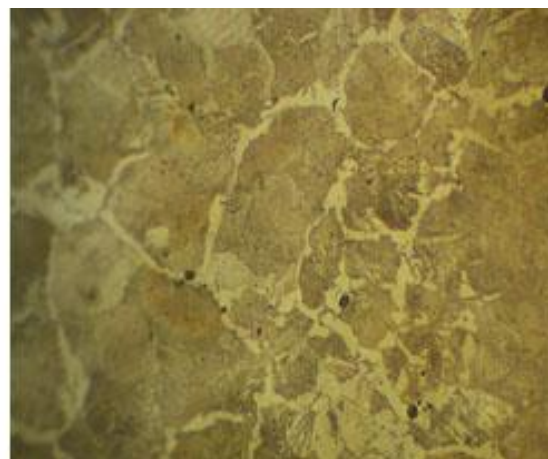
شکل ۱۰ ریز ساختار فولاد CK45 پس از عملیات حرارتی با نرم افزار JmatPro (الف) خنک کردن در هوا (ب) خنک کردن در آب

۳-۱- ریزساختار نمونه نورد شده در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه

عملیات نورد سپس در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه انجام شده و ریز ساختار بررسی می گردد. در بررسی ریزساختاری نمونه های نورد شده در دماهای مختلف، نمونه ها با ۶۲٪ تغییر شکل از دستگاه خارج شده و در دو محیط آب و هوا خنک می گردند.

شکل (۱۱) ریزساختار نمونه های مختلف را نشان می دهد. با توجه به تصاویر ریزساختاری مشاهده می شود که زمانی که نمونه پس از نورد در هوا سرد شود، با توجه به نرخ سرمایش پایین نمونه، ریزساختار نهایی شامل شبکه پیوسته فاز فریت و مابقی آن پرلیت است. البته با افزایش دمای فرآیند نورد، نوع پرلیت از حالت خشن به حالت ریز تبدیل می شود. از طرفی سرد کردن نمونه در آب یخ، منجر به ایجاد فاز مارتنزیت در نمونه شده و در هر سه ریزساختار تیغه های مارتنزیتی به راحتی قابل مشاهده است. در این شرایط نیز با افزایش دمای فرآیند نورد، تیغه های مارتنزیتی تیزتر و ریزتر شده و انتظار می رود سختی و استحکام بالایی در قطعه مشاهده شود.

شکل (۱۲) ریزساختار نمونه های نورد شده در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه و در دماهای مختلف و محیط سرمایش مختلف نشان می دهد. مطابق ریزساختارهای ارائه شده مشاهده می شود که در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه به دلیل اعمال سرعت کرنش بالا، ماده به سرعت تغییر شکل داده و در دماهای پایین امکان بازیابی کمتر می شود. همانطور که در شکل (۱۲-الف) مشاهده می شود، جهت گیری ترجیحی دانه های فریت به وضوح مشخص

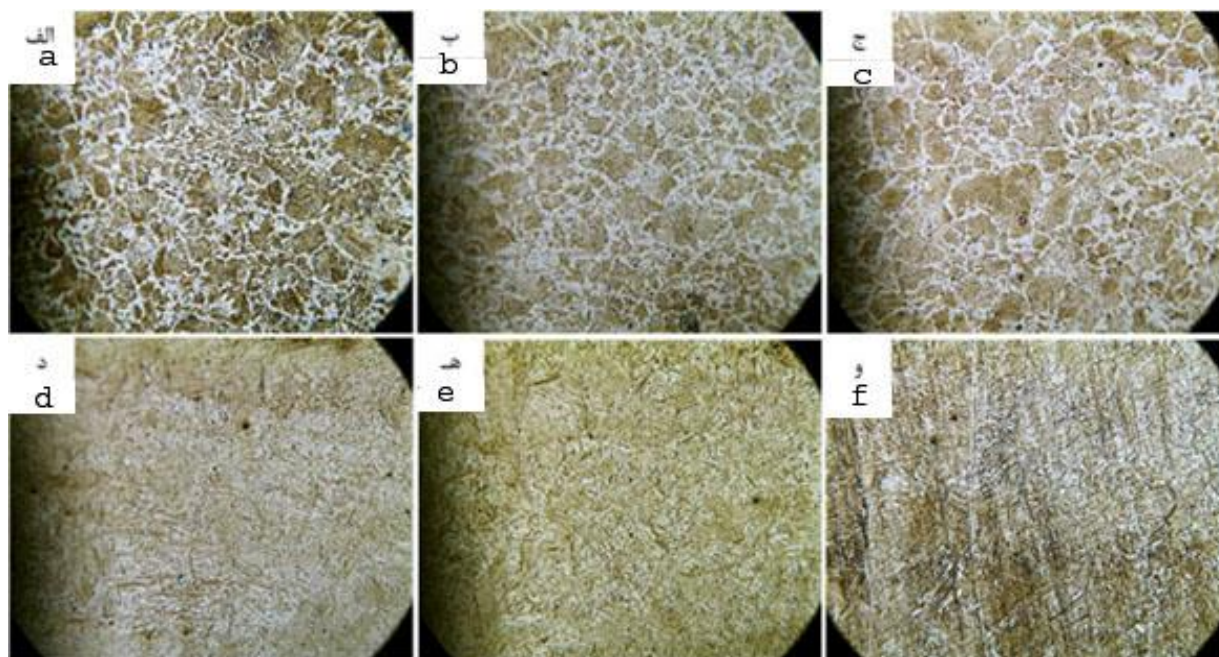


شکل ۹ ریز ساختار فولاد CK45 پس از عملیات حرارتی (الف) خنک کردن در هوا (ب) خنک کردن در آب

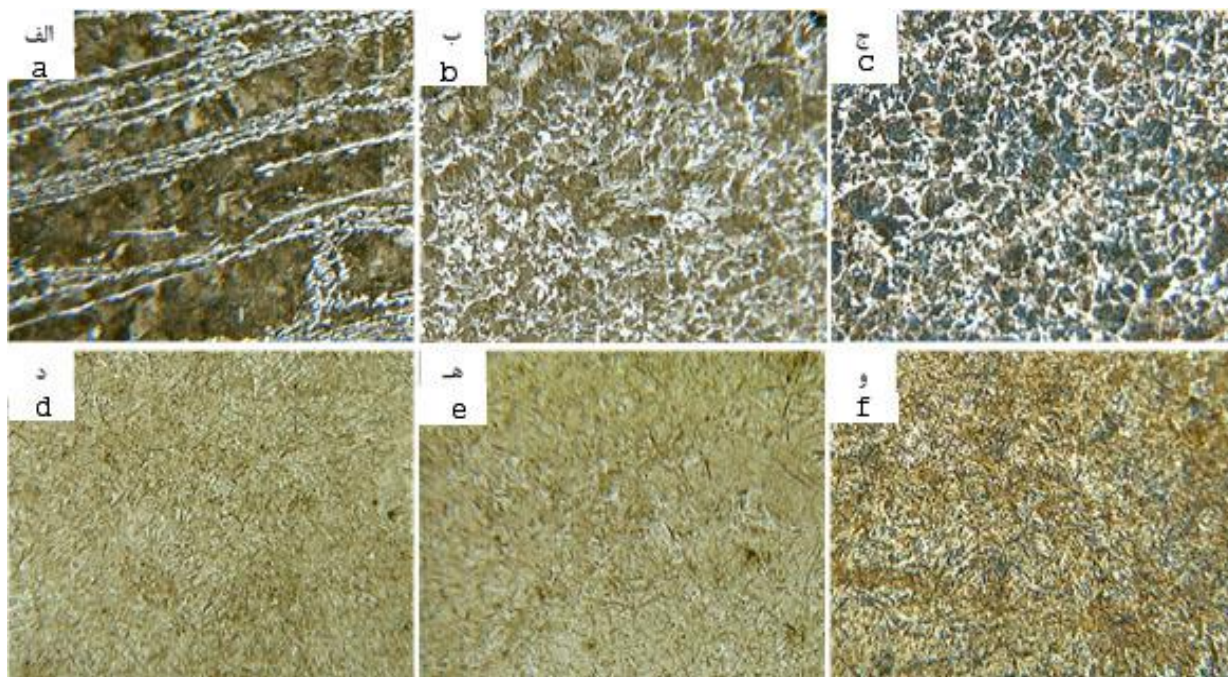
در شکل مشاهده می شود که نمونه پس از عملیات حرارتی در دمای 850°C اگر در هوا خنک شود در این صورت ساختار نهایی شامل فازهای بهم پیوسته فریت بوده و مابقی به صورت پرلیت ریز خواهد بود. اما اگر نمونه در آب یخ خنک شود در این صورت تمام ریزساختار به صورت مارتنزیتی خواهد بود. علت تغییر ریزساختار نمونه در رژیم های عملیات حرارتی با سرعت های سرد کردن متفاوت با پدیده های نفوذ و برش هنگام تحولات فازی توجیه نمود. با استفاده از این نمودارها می توان به ریزساختارهای نهایی نمونه در هر رژیم عملیات حرارتی پی برد. این نمودارها وابسته به عناصر آلیاژی بوده و برای هر ترکیب شیمیایی منحصر بفرد است. نمودارهای TTT برای فولاد CK45 توسط نرم افزار JmatPro رسم و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به اینکه نمونه ای که در هوا سرد می شود مدت زمان بالای یک ساعت طول می کشد تا به دمای محیط برسد، از این رو با فرض یک ساعت مدت زمان خنک شونده، در این حالت با رسم خط نرخ سرمایش، نوع فازهای حاصل پس از سرمایش مشخص می شود. با رسم خط مربوطه و بررسی نحوه تشکیل فازها، مشاهده می شود که نمونه در ابتدا با منحنی تشکیل فریت برخورد نموده و سپس با منحنی شروع پرلیت برخورد می نماید، از این رو در این نوع سرمایش، ساختار نهایی شامل فریت بعلاوه پرلیت ریز است. برای نمونه خنک شونده در آب یخ نیز با توجه به اینکه نرخ سرمایش بسیار بالاست و در مدت کمتر از ۷ ثانیه دمای نمونه به دمای محیط می رسد از این رو با رسم خط مربوط به سرمایش آن مشاهده می شود که نمونه قبل از تشکیل فازهای فریت، پرلیت و یا بینیت با خط تشکیل مارتنزیت برخورد کرده و در نتیجه تمام ساختار را فاز مارتنزیت تشکیل می دهد. با

در شکل (۱۲-ج) نیز همین ساختار دیده می‌شود با این تفاوت که در این شکل فاز فریت مدت زمان بیشتری برای بازیابی و تشکیل داشته و به صورت نسبتاً درشت و پیوسته تشکیل شده است. برای نمونه‌هایی که بعد از فرآیند در آب یخ سرد شده‌اند، ریزساختار کاملاً مارتنزیتی بوده و با افزایش دمای نورد نمونه‌ها، ریزساختار مارتنزیتی کامل بوده و ریز می‌شود.

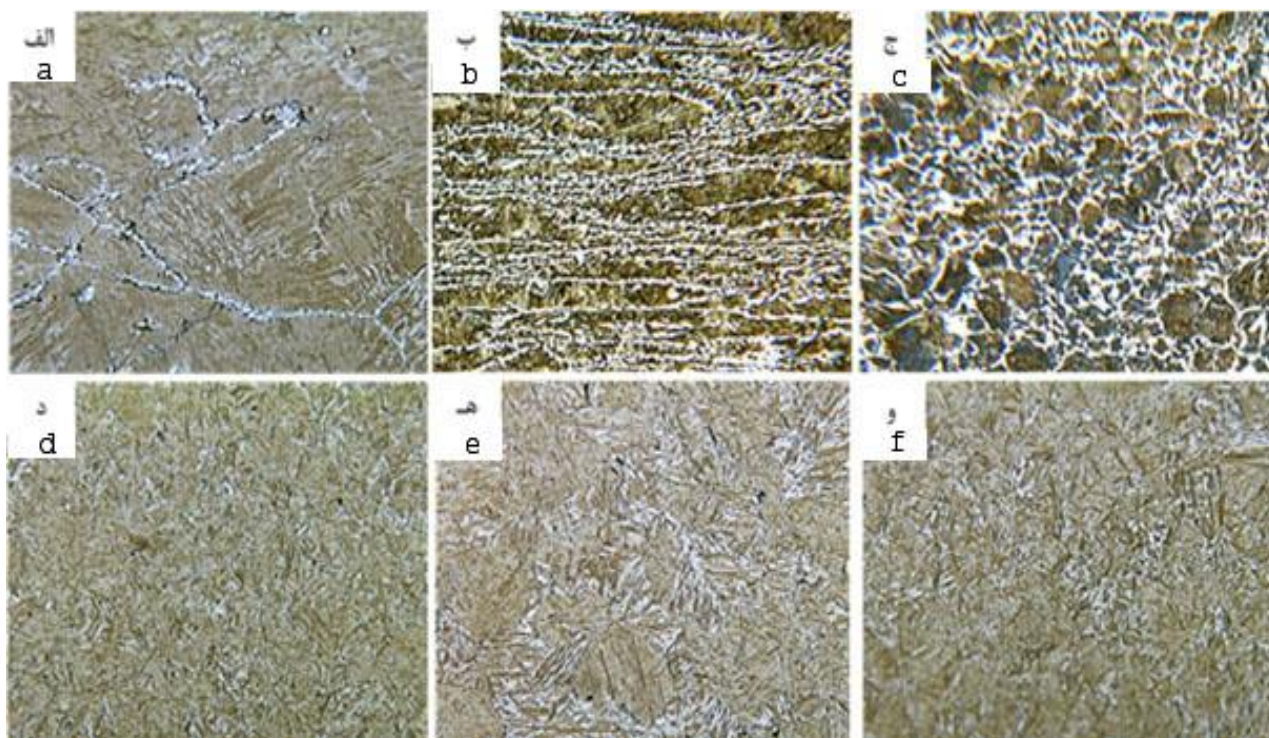
بوده و قابل مشاهده است. این جهت‌گیری در راستای جهت نورد بوده و دانه‌های سفید معرف فاز فریت بوده که در زمینه پرلیت توزیع شده است. ریزساختار نمونه‌های هوا سرد شده در دماهای ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً مشابه هم بوده و تنها نوع فریت در آن‌ها متفاوت است. در شکل (۱۲-ب) دانه‌های ریز فریت دیده می‌شود که در زمینه پرلیت توزیع شده است.



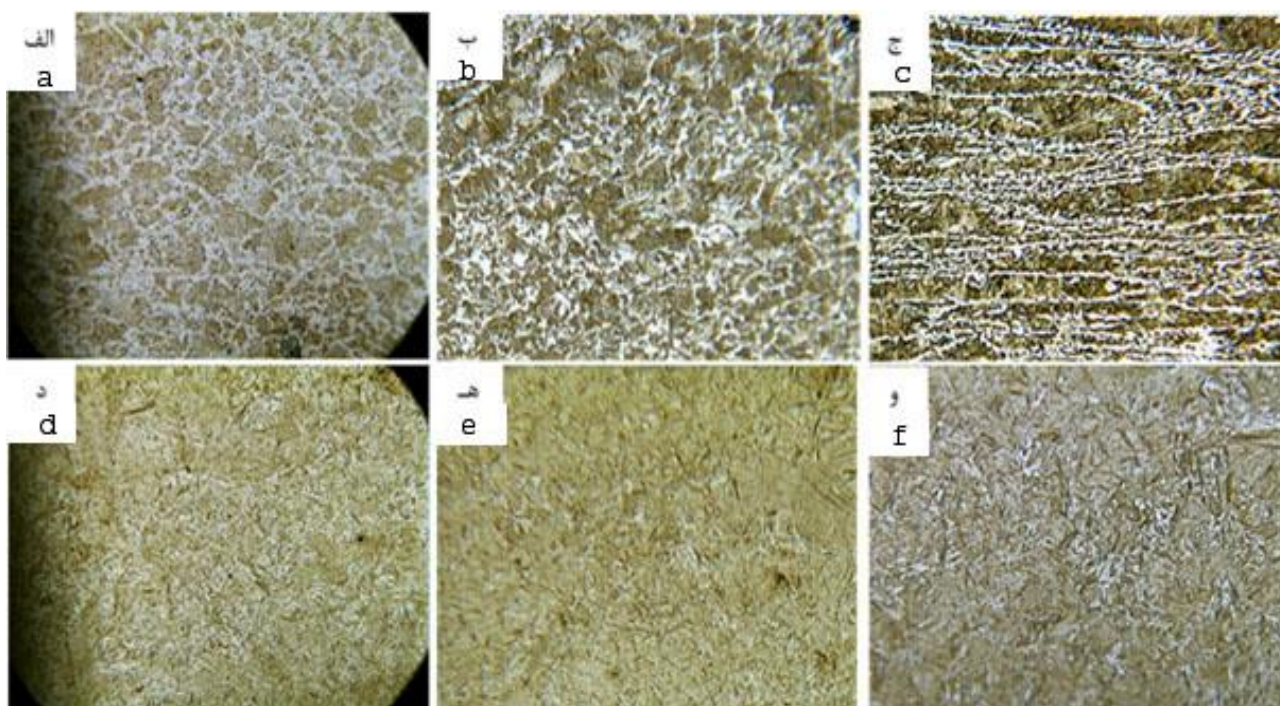
شکل ۱۱ ریزساختار نمونه در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه الف) ۸۵۰ °C - هوا، ب) ۹۵۰ °C - هوا، ج) ۱۰۵۰ °C - هوا، د) ۸۵۰ °C - آب، ه) ۹۵۰ °C - آب، و) ۱۰۵۰ °C - آب



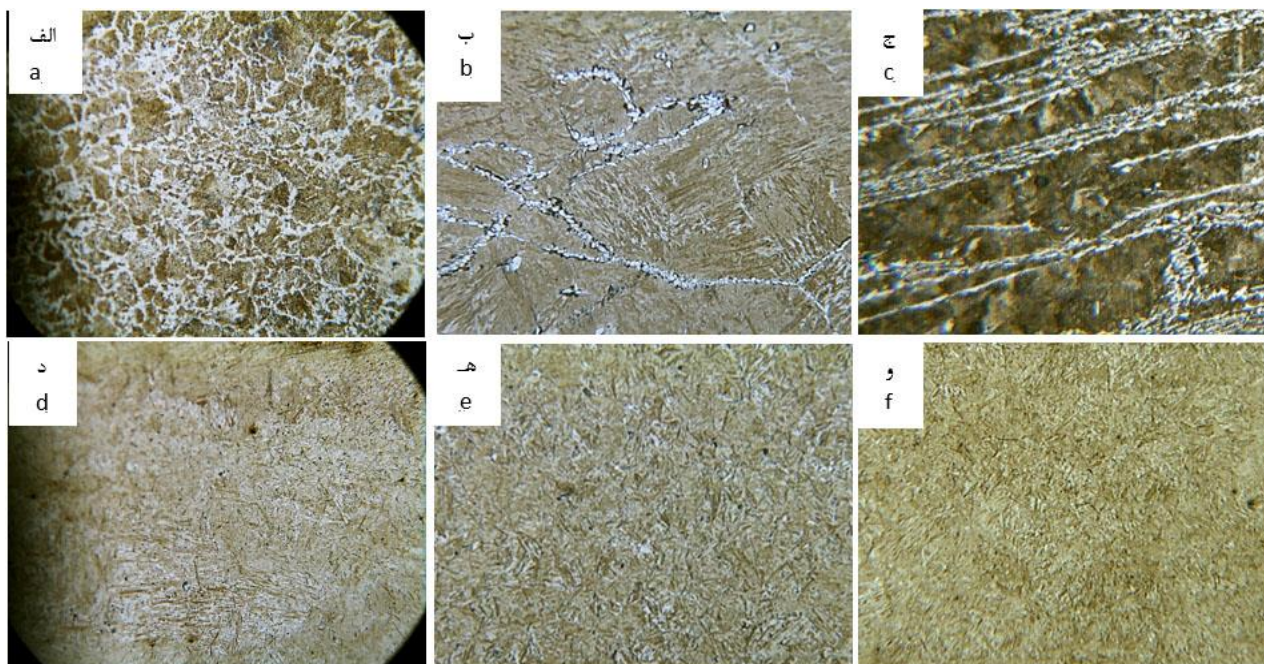
شکل ۱۲ ریزساختار نمونه در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه الف) ۸۵۰ °C - هوا، ب) ۹۵۰ °C - هوا، ج) ۱۰۵۰ °C - هوا، د) ۸۵۰ °C - آب، ه) ۹۵۰ °C - آب، و) ۱۰۵۰ °C - آب



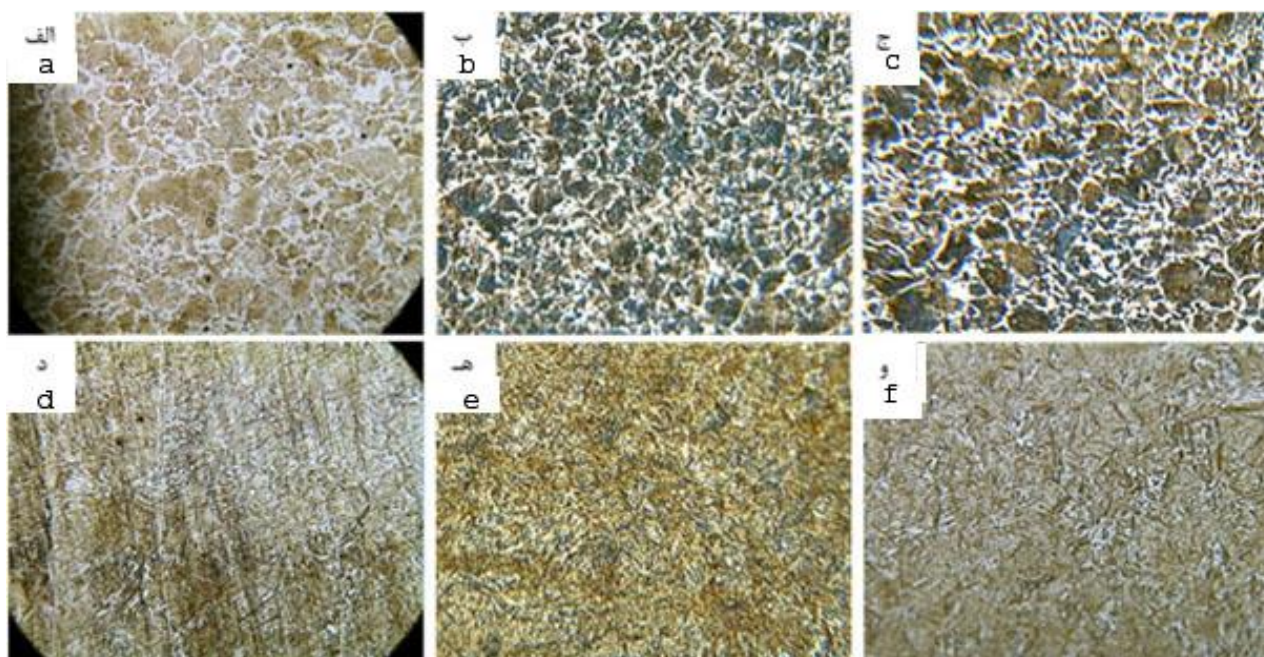
شکل ۱۳ ریزساختار نمونه در سرعت ۲۰ دور بر دقیقه (الف) 85°C - هوا، (ب) 95°C - هوا، (ج) 105°C - هوا، (د) 85°C - آب، (ه) 95°C - آب، (و) 105°C - آب



شکل ۱۴ ریزساختار نمونه در دمای 85°C (الف) 10 rpm - هوا، (ب) 15 rpm - هوا، (ج) 20 rpm - هوا، (د) 10 rpm - آب، (ه) 15 rpm - آب، (و) 20 rpm - آب



شکل ۱۵ ریزساختار نمونه در دمای 950°C (الف) ۱۰ rpm - هوا، ب) ۱۵ rpm - هوا، ج) ۲۰ rpm - هوا، د) ۱۰ rpm - آب، ه) ۱۵ rpm - آب، و) ۲۰ rpm - آب



شکل ۱۶ ریزساختار نمونه در دمای 1050°C (الف) ۱۰ rpm - هوا، ب) ۱۵ rpm - هوا، ج) ۲۰ rpm - هوا، د) ۱۰ rpm - آب، ه) ۱۵ rpm - آب، و) ۲۰ rpm - آب

۲-۳- ریزساختار نمونه نورد شده در سرعت ۲۰ دور بر دقیقه

در این مرحله از نورد گرم، با افزایش سرعت دورانی غلتک‌ها و تنظیم آن در ۲۰ دور بر دقیقه، تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها

متفاوت است. ریزساختار میکروسکوپ نوری این نمونه‌ها در شکل (۱۳) و در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ارائه شده است. در این شرایط، برای نمونه‌های هوا سرد شده، به دلیل بالا بودن سرعت کرنش اعمالی به نمونه، برای نمونه 850°C در هوا ساختار بینیتی به همراه فریت‌های ریز تشکیل شده است.

برای نمونه با ۹۵۰ درجه دمای نورد، فاز فریت ریز تقریباً به طور یکنواخت و در جهت گیری مرجح توزیع شده است. زمینه در این نمونه پرلیت ریز است. برای نمونه نورد گرم شده در دمای ۱۰۵۰ درجه، ریزساختار شامل شبکه بهم پیوسته‌ای از فاز فریت به همراه پرلیت خشن است. برای نمونه‌های آب سرد شده، هر چقدر دمای نورد نمونه افزایش یابد، به دلیل افزایش نرخ سرمایش از یک طرف و از طرف دیگر به دلیل سرعت کرنش اعمالی بیشتر در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های قبلی، مارتنزیت تشکیل شده بسیار ریزدانه شده و این ریز دانه بودن مارتنزیت باعث افزایش بیش از پیش سختی نمونه خواهد بود.

۳-۳- ریزساختار نمونه نورد شده در دمای ۸۵۰°C

در این مرحله از نورد داغ، با ثابت نگه داشتن دمای فرآیند، نورد در ۸۵۰°C و با تغییر سرعت حرکت غلتک‌ها، تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها متفاوت است. ریزساختار میکروسکوپ نوری این نمونه‌ها در شکل (۱۴) و در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ارائه شده است. در این شرایط، برای نمونه‌های هوا سرد شده، به دلیل بالا بودن سرعت کرنش اعمالی به نمونه، در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه با توجه به تصاویر ریزساختاری مشاهده می‌شود که زمانی که نمونه پس از نورد در هوا سرد شود، با توجه به نرخ سرمایش پایین نمونه، ریزساختار نهایی شامل شبکه پیوسته فاز فریت و مابقی آن پرلیت است. در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه به دلیل افزایش اعمال سرعت نرخ کرنش، ماده به سرعت تغییر شکل داده و در دماهای پایین امکان بازیابی کمتر می‌شود. همانطور که در شکل (۱۴-الف) مشاهده می‌شود جهت گیری ترجیحی دانه‌های فریت به وضوح مشخص بوده و قابل مشاهده است. این جهت گیری در راستای جهت نورد بوده و دانه‌های سفید معرف فاز فریت بوده که در زمینه پرلیت توزیع شده است. برای نمونه در ۲۰ دور بر دقیقه به دلیل سرعت بالای تغییر شکل، ساختار بینیتی به همراه فریت‌های ریز تشکیل شده است. برای نمونه‌هایی که بعد از فرآیند در آب یخ سرد شده‌اند، ریزساختار کاملاً مارتنزیتی بوده و با افزایش سرعت نورد نمونه‌ها، ریزساختار مارتنزیتی کامل بوده و ریز می‌شود.

۳-۴- ریزساختار نمونه نورد شده در دمای ۹۵۰°C

ریزساختار نمونه‌های نورد شده در دمای ثابت ۹۵۰°C و در سرعت‌های مختلف نورد در شکل ۱۵ در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر ارائه شده است. با توجه به ریزساختارها مشاهده می‌شود که

برای دمای ۹۵۰°C و در سرعت نورد ۲۰ rpm ریزساختار نمونه با بقیه ریزساختارهای هوا سرد متفاوت است. علت این امر را می‌توان نرخ کرنش بالای اعمال و عدم وجود فرصت کافی برای بازیابی در نمونه عنوان نمود. برای نمونه‌های آب سرد نیز مشاهده می‌شود که ساختار حاصل کاملاً مارتنزیتی بوده و بتدریج ریزتر می‌گردد و علت آنرا نیز در کاهش زمان سرمایش و عدم فرصت کافی برای تبدیل فاز مارتنزیت باید دانست، زمینه مارتنزیتی به وضوح در ریز ساختارها قابل رویت می‌باشد که با افزایش سرعت نورد تغییرات همانند نمونه‌های سرد شده در هوا واضح نمی‌باشد، زیرا فاز مارتنزیت در مقایسه با فازهای فریت و پرلیت از سختی زیادی برخوردار می‌باشد که این خود مانعی برای تشکیل صفحات فازی در راستای فرآیند نورد می‌باشد.

۳-۵- ریزساختار نمونه نورد شده در دمای ۱۰۵۰°C

ریزساختار نمونه‌های نورد شده در دمای ۱۰۵۰°C در شکل (۱۶) آمده است. مشاهده می‌شود برای این نمونه در محیط سرد کننده هوا، همواره ریزساختار شامل فریت و پرلیت است، که با افزایش دمای فرآیند توزیع فاز فریت یکنواخت‌تر شده و انتظار می‌رود انعطاف‌پذیری نمونه در سرعت‌های بالا بیشتر باشد. برای نمونه‌های آب سرد شده مشاهده می‌شود که مارتنزیت با ریز شدن و ریز شدن همراه بوده و همانطور که در قسمت قبلی نیز توضیح داده شد سختی بیش از حد فاز مارتنزیت در مقایسه با فاز فریت و پرلیت و مقاومتی که در مقابل تغییر شکل از خود نشان می‌دهد مانعی برای تغییر ریز ساختار حاصله می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر از میان پارامترهای موثر عملیات نورد بر روی ریز ساختار فولاد CK45 سرعت غلتک (نرخ کرنش اعمالی) و دمای عملیات بررسی گردید. ریز ساختار فولاد مورد پژوهش تحت سرعت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دور بر دقیقه و دماهای ۸۵۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و پس از انجام عملیات حرارتی ریز ساختار بررسی گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییر پارامترهای عملیات نورد تأثیر محسوسی بر روی ریزساختار می‌گذارد که تغییر ریز ساختار هم به نوبه خود ارتباط مستقیمی با خواص مکانیکی فولاد دارد. با افزایش دمای فرآیند نورد گرم در سرعت نورد ثابت و محیط خنک

[5] Ueji, R., Tsuji, N., Minamino, Y., Koizumi, Y., Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 153-162, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2003.10.017>, (2004).

[6] Niakan, H., Najafizadeh, A., Effect of niobium and rolling parameters on the mechanical properties and microstructure of dual phase steels, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 21, pp. 5410-5414, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.078>, (2010).

[7] Younis, F.A., Lattif, S. J. Effect of the Rolling Direction and Draft on Some of the Mechanical Properties for the Medium Carbon Steel, *International Journal of Science and Research*, Vol. 3, No. 12, pp. 2425-2431, Paper ID: SUB14673, (2014).

[8] Zebarjadi Sar, M., Barella, S., Gruttadauria, A., Mombelli, D., Mapelli, C., Impact of Warm Rolling Process Parameters on Crystallographic Textures, Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon Boron-Bearing Steels, *Metals*, Vol. 8, No. 11, pp. 927, DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110927>, (2018).

[9] Nwachukwu, P.U., Oluwole, O.O., Effects of rolling process parameters on the mechanical properties of hot-rolled St60Mn steel, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 6, pp. 134-146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006>, (2017).

[10] Li, H.-B., Fan, L., Chen, L.-S., Effect of Temperature Scheme on Microstructure and Mechanical Properties during Medium Carbon Steel Warm Processing, *Metals*, Vol. 9, No. 1, pp. 77, DOI: <https://doi.org/10.3390/met9010077>, (2019).

کننده هوا، مدت زمان کافی برای تشکیل شبکه فریت پیوسته افزایش یافته و ماده به حالت قبل از نورد برمی گردد. با افزایش دمای فرآیند نورد گرم در سرعت ثابت و محیط خنک کننده آب، تمام ریزساختار پس از سرمایش به صورت مارتنزیتی بوده و با افزایش دما مارتنزیت ریزتر می شود. با افزایش سرعت نورد در دمای ثابت، مدت زمان اعمال کرنش کاهش یافته و نرخ کرنش افزایش می یابد که باعث تغییر در نحوه ریزساختار می شود.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

rpm دور در دقیقه

T دما

TTT دما-زمان- دگرگونی

CCT تبدیل سرد کردن مداوم

۶- مراجع

[1] Ray, S., *Introduction to Rolling Process*, In: Principles and Applications of Metal Rolling, Eds., pp. 1-29, Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-07609-9 Hardback, (2016).

[2] Wang, S.-F. Peng, Y. A., Zhi-Jie, L., Work-Hardening and Deformation Mechanism of Cold Rolled Low Carbon Steel, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 823-828, DOI:10.19026/rjaset.5.5028, (2013).

[3] Zhang, X., Wang, H., Scattergood, R. O., Narayan, J., Koch, C.C., Modulated oscillatory hardening and dynamic recrystallization in cryomilled nanocrystalline Zn, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 16, pp. 3995-4004, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00199-4), (2002).

[4] Sun, J.-J., Lian, F.-L., Liu, H.-J., Jiang, T., Guo, S.-W., Du, L.-X., Liu, Y.-N., E-mail: ynliu@mail.xjtu.edu.cn, Microstructure of warm rolling and pearlitic transformation of ultrafine-grained GCr15 steel, *Materials Characterization*, pp. Medium: X; Size: pp. 291-298, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.07.011>, (2014).

بررسی ایجاد ترک طولی در سخت کاری سطحی فلز پایه

ST44-2 بوسیله سیم جوش MF-10-60-GRZ

چکیده: در صنعت برای سخت کاری سطحی راهنماها به کمک روش جوشکاری از سیم جوش MF-10-60-GRZ طبق استاندارد DIN8555 استفاده می گردد. در جوش های ایجاد شده توسط این سیم جوش، ترک هایی به نام ترک های آزاد سازی تنش و یا ترک چک دیده می شود. وجود ترک طولی بیش از استاندارد منجر به بازسازی و یا رد شدن قطعه می گردد. هدف این مقاله، بررسی راهکارهای مختلف انجام شده جهت حذف ترک های طولی ایجاد شده در هنگام سخت کاری سطحی است. در این پژوهش از روش های جوشکاری با سیم جوش توپودری خود محافظ و زیرپودری استفاده گردید. نتایج سخت کاری سطحی با روش های مختلف نشان داد که هیچ راه عملی برای لایه نشانی این ماده برای رسیدن به لایه سخت شده ۱۵ میلیمتری وجود ندارد و تنها راه قابل اطمینان این است که در بین لایه های سخت ایجاد شده (که از جنس چدن پرآلیاژ هستند)، از لایه های فولاد نرم کم کربن (فلز جوش رسوب داده شده با استفاده از ER70s-6) استفاده شود.

واژه های راهنما: سخت کاری سطحی، ترک طولی، ترک آزادسازی تنش، تکنیک لایه به لایه، سیم جوش MF-10-60-GRZ

محمد خوران*

استادیار، مهندسی مکانیک،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

نوید صفرپور

مری مدعو، مهندسی مواد،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

عیسی خوران

مری مدعو، مهندسی مواد،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

Mohammad Khoran*

Assistant professor of
Mechanical
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Navid safarpour

Lecturer, Material
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Eisa Khoran

Lecturer, Material
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Investigation of longitudinal cracks in a hardened layer by MF-10-60-GP welding wire on ST44-2

Abstract: In the industry, MF-10-60-GRZ welding wire is used according to DIN8555 standard for surface hardening of the guides with the welding method. Cracks called stress release cracks or check cracks can be observed in the welds that have been created by this welding wire. The existence of a longitudinal crack more than the standard leads to reconstructions or rejection of the part. The purpose of this article is to review the various solutions used to remove longitudinal cracks created during surface hardening. In this research, the methods of Submerged Arc Welding (SAW) and Flux Cored Arc Welding (FCAW) were used. The results of surface hardening with different methods showed that there is no practical way to reach a hardened layer of 15 mm, and the only reliable way is to create the low-carbon steel layers (welded metal deposited using ER70s-6) between the hard layers (high-alloy cast iron).

Keywords: Surface hardening, Longitudinal cracks, Stress relieving cracks, Layer welding technique, MF-10-60-GP welding wire

۱- مقدمه

یکی از روش‌های مهم صنعتی در زمینه تولید، تعمیر و نگهداری قطعات تحت سایش، روش سخت‌کاری سطحی با استفاده از روش جوشکاری می‌باشد [۴-۱]. در این فرآیند یک لایه از فلز مورد نظر با خواص سایشی مناسب با استفاده از فرآیندهای مختلف جوشکاری بر روی لایه فلز نشاند می‌شود. از جمله مزیت‌های مهم این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌توان به ارزان بودن، سخت‌کاری موضعی و تعمیر قطعات فرسوده شده اشاره کرد [۴، ۲]. مندز و همکاران [۵] مشخص نمودند که هزینه و بازار عوامل تعیین کننده‌ی هستند که بر تصمیمات فنی در مورد انتخاب روش و نوع عملیات مقاوم‌سازی سایشی تأثیر گذارند. پژوهش‌ها نشان داده است که با استفاده از روش‌های مختلفی مانند جوشکاری با الکتروود دستی، جوشکاری زیرپودری^۱، جوشکاری تحت حفاظت گاز محافظ^۲ و جوشکاری با سیم جوش توپودری خود محافظ^۳ و... می‌توان با اطمینان سخت‌کاری سطحی با جوشکاری را انجام داد [۶-۸]. لکه و همکاران [۹] مشخص نمودند که پدیده رقیق‌سازی^۴ در فرآیندهای سخت‌کاری بین آلیاژ رسوب‌شده و فولاد زیرلایه تأثیر قابل توجهی بر عملکرد قطعه دارد. در جوشکاری زیر پودری مشخص شد که نوع پودر در مخلوط، مقدار پودر ورودی و متغیرهای جوشکاری بر ریزساختار و نوع آلیاژهای تشکیل شده تأثیر می‌گذارند [۱۰].

طبق استاندارد DIN8555 می‌توان از ۱۷ خانواده مختلف آلیاژی به عنوان فلز پرکننده برای اعمال لایه سخت بر روی فلزات و آلیاژهای مختلف استفاده کرد [۱۱]. مواد سخت‌شونده رایج معمولاً در گروه‌های فولاد یا مواد آهنی کم آلیاژ، آهن‌های سفید با کروم بالا یا مواد آهنی با آلیاژ بالا، کاربیدها، آلیاژهای پایه نیکل یا آلیاژهای پایه کبالت طبقه‌بندی می‌شوند. گروه آلیاژی ۱۰ در میان فلزات پرکننده اشاره شده در این استاندارد دارای بالاترین مقادیر سختی می‌باشند [۱۲]. طبق این استاندارد خانواده آلیاژی ۱۰، دارای ترکیب شیمیایی شامل آهن، درصد‌های بالای کروم (۲۰-۳۰ درصد) و کربن (۴/۵-۷ درصد) می‌باشد. لایه‌های سخت ایجاد شده توسط این خانواده آلیاژی می‌تواند سختی‌های بالایی در حدود ۶۴ راکول سی را ایجاد کند. دلیل ایجاد این سختی بالا را می‌توان به ایجاد فاز کاربیدی M_7C_3 در ساختارهای چدن‌های پر کروم و کربن ربط داد [۱۳-۱۴] و

تشکیل سیلیسیدها (Fe_3Si) باعث کاهش مقاومت به خوردگی خواهد بود [۱۵]. در واقع با توجه به ترکیب شیمیایی اشاره شده برای این مواد می‌توان گفت که این فلزات پرکننده در گروه چدن‌های آلیاژی پرکروم جای دارند [۱۶، ۱۷، ۱۲]. در هنگام بازرسی سطح سخت‌کاری سطحی شده با استفاده از فلز پرکننده گروه ۱۰ آلیاژی تعداد زیادی ترک‌های عرضی در لایه‌های سخت شده دیده می‌شود. این ترک‌های عرضی با نام ترک‌های آزادسازی تنش و یا ترک‌های چک شناخته می‌شوند [۱۸]. وجود این ترک‌های عرضی بطور معمول تأثیری بر روی مقاومت به سایش قطعات نداشته و در مقابل سبب آزادسازی تنش‌های ناشی از انقباض گشته و مانع از ایجاد دیگر عیوب و همینطور قله‌کن شدن فلز جوش می‌گردند. ایده‌های مختلفی برای جلوگیری از ایجاد و یا گسترش ترک بکار گرفته شد، نتایج نشان داد که فرآیند هم‌پنینگ^۵ می‌تواند با کاهش تنش پسماند جوشکاری و ایجاد تعداد زیادی مرز دانه با زاویه کم، به جلوگیری از انتشار ترک کمک کند [۱۹]. از مواردی که در بازرسی لایه‌های سخت‌کاری شده مهم می‌باشد، فاصله یکسان ترک‌های عرضی از یکدیگر، میزان باز شونده‌ی قسمت بالای این ترک‌ها، عدم گسترش ترک‌های عرضی به فلز پایه و همچنین عدم وجود ترک‌های طولی در فلز جوش می‌باشد [۲۰].

علت‌های ایجاد و راهکارهای جلوگیری از ترک توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که موارد اصلی آن در ادامه آورده شده است [۲۱-۲۳].

۱- سرعت سرد شدن بالای جوش

۲- مهار زیاد جوش توسط دیگر اجزا

۳- وجود آلودگی در سیم جوش، فلز پایه و ...

۴- عدم آماده‌سازی مناسب لایه زیری یا فلز پایه قبل از انجام جوشکاری

۵- ترکیب نامناسب آلیاژ مورد استفاده

۶- ساین نامناسب مهره جوش (نسبت بالای عرض به ارتفاع مهره-های جوش)

۷- روش جوشکاری نامناسب (در بعضی از روش‌های جوشکاری باید لزوماً از حالت جوشکاری زیگزاگی، مستقیم و یا هر دو استفاده کرد)

۸- استفاده از جریان بیش از حد زیاد در هنگام جوشکاری.

دمای پیش گرمایش تأثیر بسیار بالایی بر خروجی می‌تواند داشته باشد چرا که سبب کاهش نرخ خنک شونده‌ی فلز جوش

⁴ Dilution phenomena

⁵ hammer peening process

¹ Submerged arc welding

² Gas metal arc welding (GMAW)

³ Flux Cored Arc Welding (FCAW)

در این پژوهش و همچنین مشخصه جوش‌های داده شده در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد خام استفاده شده بر حسب درصد وزنی

ER70s-6	MF-10-60GRZ	ST44-2	
۰/۰۷	۴/۲	۰/۲۱	کربن
۱/۵۲	۱/۳۰	۱/۵	منگنز
۰/۸۲	۱/۹۵	-	سیلیسیم
-	۲۳/۵۰	-	کروم
مابقی	مابقی	مابقی	آهن

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری در حالت جوشکاری سطحی

قطر سیم جوش (mm)	جریان جوشکاری	
۲,۴	۲۵۰-۳۵۰	دستگاه جوش FCAW
۲,۴	۲۵۰-۴۰۰	دستگاه جوش SAW

۳- نتیجه و بحث

در هنگام جوشکاری لایه‌های اول جوش با استفاده از سیم جوش MF-10-60-GRZ بر روی فلز پایه ST44-2، ترک‌های طولی به وفور یافت شدند. راهکارهایی که برای جلوگیری از ایجاد این عیب مطرح شدند همگی برپایه دلایل ایجاد ترک‌های طولی در جوش بوده‌اند. با توجه موارد و دلایل بیان شده در مورد علت ایجاد ترک می‌توان برای این مرحله راهکارهای زیر را در نظر گرفت.

اولین راهکار برای حذف ترک‌های طولی آماده‌سازی مناسب سطح قطعه و سنگ‌زنی آن قبل از اعمال لایه‌های سخت در نظر گرفته شد، است. این تست مجدد با انجام این عمل تکرار گردید. تغییر محسوسی در وجود ترک‌های طولی در ساختار قطعه مشاهده نشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت مشکل وجود ترک وجود آلودگی در فلز پایه و یا عدم آماده‌سازی آن نبوده است.

یکی دیگر از عواملی که تاثیر زیادی بر خروجی دارد، پیش گرمایش فلز پایه است، لذا دومین راهکار برای کاهش ترک، بررسی دمای پیش‌گرمایش است. دمای پیش‌گرمایش ۴۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ استفاده شد. بدون پیش‌گرمایش (دمای محیط) حدود ۱۰ ترک در سطح قطعه مشاهده گردید. در صورتی که با بیشتر شدن دمای پیش‌گرمایش از تعداد این ترک‌ها کاسته شد. در دو مورد اول یعنی دماهای ۴۰ و ۷۰ ترک‌های طولی مشاهده شدند. در هنگام جوشکاری با پیش‌گرمایش حدود دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد احتمال وجود ترک‌های طولی بسیار کاهش یافته و به حدود ۱ از ۱۰ رسید و با افزایش دمای

و مناطق اطراف آن می‌گردد. اثرات تغییر در سرعت سرد شدن بر روی شرایط خروجی توسط هورنانگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۴].

با توجه به اهمیت ترک‌های طولی بوجود آمده در هنگام جوشکاری و همچنین مطالعه پیشینه پژوهش، عدم وجود مطالعه‌ی فراگیر بر روی فولاد ST44-2، لزوم مطالعه ترک‌های طولی ایجاد شده در بحث سخت‌کاری با جوشکاری احساس می‌گردد. لذا در این پژوهش با مطالعه تجربی و استفاده از روش‌های جوشکاری با الکتروود توپودری خود محافظ و زیرپودری به بررسی راهکارهای مختلف، جهت حذف ترک‌های طولی ایجاد شده در هنگام سخت‌کاری سطحی پرداخته شده است. هدف از این پژوهش یافتن روشی نوین برای جلوگیری از ایجاد ترک‌های طولی در سخت‌کاری سطحی بوسیله سیم جوش MF-10-60-GRZ است.

۲- روش انجام کار

در طی این پژوهش سعی شد که با استفاده از تغییر در حرارت ورودی، دمای پیش‌گرمایش، دما و زمان پس‌گرمایش، استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های مختلف جوشکاری از ایجاد ترک‌های طولی در لایه‌های سخت‌کاری سطحی شده جلوگیری شود.

دمای پیش‌گرمایش و بین‌پاسی در این پژوهش ۴۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب شد. برای اعمال پس‌گرمایش از مشعل با شعله خنثی استفاده گردید و مشعل را در مدت‌های ۲، ۳، ۵، ۷ و ۸ دقیقه بر روی سطح قطعه نگهداشته تا دمای لایه‌های جوش داده شده حداکثر تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد برسد. برای اندازه‌گیری دما از ترمومتر لیزری استفاده گردید. جهت بهبود کیفیت سطحی و تمیزکاری از فرآیندهای سنگ‌زنی و برس سیمی استفاده شد. جهت کاهش نرخ سرد شدن لایه‌های جوش داده شده در مواقع لازم از ماسه سیلیسی نیز استفاده گردید.

برای انجام جوشکاری از فرآیندهای جوش زیرپودری و جوش با سیم جوش توپودری خود محافظ استفاده گردید. سیم جوش-های مورد استفاده در طی این آزمون، سیم جوش‌های ER70S-6 ساخت شرکت آما، MF-10-60-GRZ ساخت شرکت ایساب برزیل و فلز پایه مورد استفاده در این تحقیق ST44-2 بود. ترکیب شیمیایی فولاد، سیم جوش مصرف شده بوسیله دستگاه کوانتومتری با دقت ۰/۰۱ درصد اندازه‌گیری و در جدول (۱) آورده شده است. مشخصات دستگاه‌های جوشکاری استفاده شده



شکل ۲- ترک‌های طولی و عرضی بوجود آمده در لایه اول رسوب داده شده با فلز جوش MF-10-60-GRZ بدون انجام عملیات پیش گرمایش

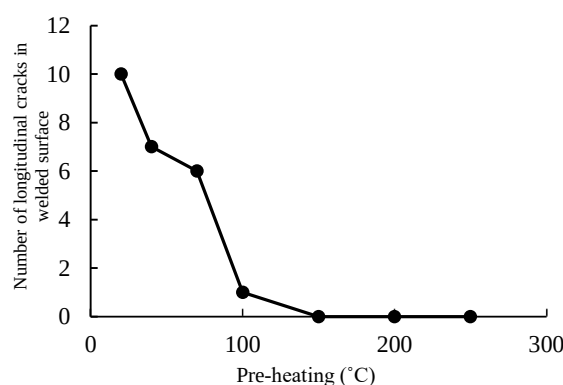


شکل ۳- ترک‌های طولی ایجاد شده بر روی لایه دوم جوشکاری شده توسط فلز جوش MF-10-60-GRZ

برای کاهش تعداد ترک‌ها در لایه دوم، با تجربه از اثر پیش گرمایش که از جوشکاری لایه اول بدست آمد، اولین راهکاری که مورد بررسی قرار گرفت، بحث دما بود. لذا برای از بین بردن ترک‌های طولی در لایه دوم سخت‌کاری شده ابتدا دمای بین پایی افزایش یافته و زمان مابین اعمال لایه دوم و اول تا حد امکان کم شد. در این آزمون دمای بین پایی از ۳۰ درجه سانتیگراد تا ۳۴۰ درجه سانتیگراد تغییر داده شد اما در وجود ترک‌های طولی تفاوتی ایجاد نگردید. در واقع با افزایش دمای بین پایی تعداد ترک‌های موجود در لایه دوم کمتر شدند اما صفر نشدند. در نتیجه راهکارهای دیگری در نظر گرفته شد.

جهت کمتر کردن احتمال ایجاد ترک در لایه دوم تصمیم گرفته شد که لایه اول کاملاً سنگ‌زده شود و صاف گردد تا لایه دوم بر روی یک سطح زیرین صاف، تمیز و عاری از آلودگی قرار گیرد. با انجام این عمل نیز مشاهده شد که خود عملیات سنگ‌زنی فلز جوش MF-10-60-GRZ می‌تواند عاملی برای ایجاد ترک‌های طولی در لایه‌های سخت‌کاری سطحی شده شود. در واقع لایه اولی که جوشکاری و بازرسی شد فاقد هرگونه ترک طولی بود اما بعد از سنگ‌زنی دارای چندین ترک طولی گردید.

پیش گرمایش قطعات قبل از اعمال لایه سخت به حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد و بالاتر دیگر ترک‌های طولی در لایه اول سخت کاری شده مشاهده نشدند. لذا می‌توان بیان نمود هر چه دمای پیش گرمایش بیشتر شود، تعداد ترک‌های ایجاد شده کمتر خواهد شد. با توجه به آزمون تجربی صورت گرفته فرضیه افزایش دمای پیش گرمایش و کاهش تعداد ترک برای این محصول تایید گردید. افزایش دمای پیش گرمایش در واقع سبب کاهش نرخ سردشدگی فلز جوش و مناطق اطراف آن می‌گردد. این امر با کاهش نرخ انتقال حرارت و سرد شدن سریع از ترک‌های انقباضی جلوگیری می‌کند. شکل (۱) نشان دهنده احتمال ایجاد ترک‌های طولی در یک سطح ۷*۳۰ سانتیمتری با دماهای مختلف پیش-گرمایش می‌باشد. همانطوری که مشاهده می‌گردد با افزایش دمای پیش گرمایش بصورت نمایی تعداد ترک‌ها کاهش خواهد یافت بصورتی که بعد از دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد ترکی مشاهده نگردید.



شکل ۱- تعداد ترک‌های ایجاد شده در سطح ۷*۳۰ سانتیمتری

در شکل (۲) لایه اول سخت‌کاری شده بدون اعمال پیش گرمایش، نشان داده شده است. همانطوری که دیده می‌شود، ترک‌های طولی و عرضی بعد از عملیات سخت کاری سطحی بر روی لایه‌های سخت شده دیده می‌شوند. ترک‌های طولی در این نمونه برای مشاهده بهتر با استفاده از فلش با بزرگنمایی بالاتری مشخص گردیده‌اند.

در ادامه انجام فرایند برای بالا بردن ضخامت نیاز به انجام چند پاس جوشکاری دیگر بر روی لایه‌های جوش داده شده است. در نتیجه به منظور انجام این عمل لایه دوم هم جوش داده شد. بعد از اعمال لایه دوم ترک‌های طولی بیشتری نسبت به قبل مشاهده گردید. شکل ۳ نشان دهنده ترک‌های طولی موجود در لایه دوم جوش داده شده توسط سیم جوش MF-10-60-GRZ می‌باشد.



شکل ۵- ترک های طولی ایجاد شده در نمونه پس گرم شده با مشعل به مدت ۷ دقیقه

کاهش سرعت سرد شدن قطعه کار راهکار دیگری برای کاهش تعداد ترک است. لذا برای این امر با پاشیدن ماسه دقیقاً پس از اعمال لایه دوم تلاش شد تا سرعت کاهش دما کمتر شود. بعد از قرار دادن لایه جوش در زیر ماسه های سیلیسی به مدت ۱۵ دقیقه و بازرسی چشمی آن، ترک های طولی در قطعه کار مشاهده گردید. شکل (۶) تصویر قطعه کاری که در زیر ماسه مدفون شده و سپس تمیز گشته و در نهایت مورد بازرسی قرار گرفته شده است را نمایش می دهد. ترک های ایجاد شده در این شکل نیز جهت نمایش بهتر، با استفاده از فلش مشخص شده اند.

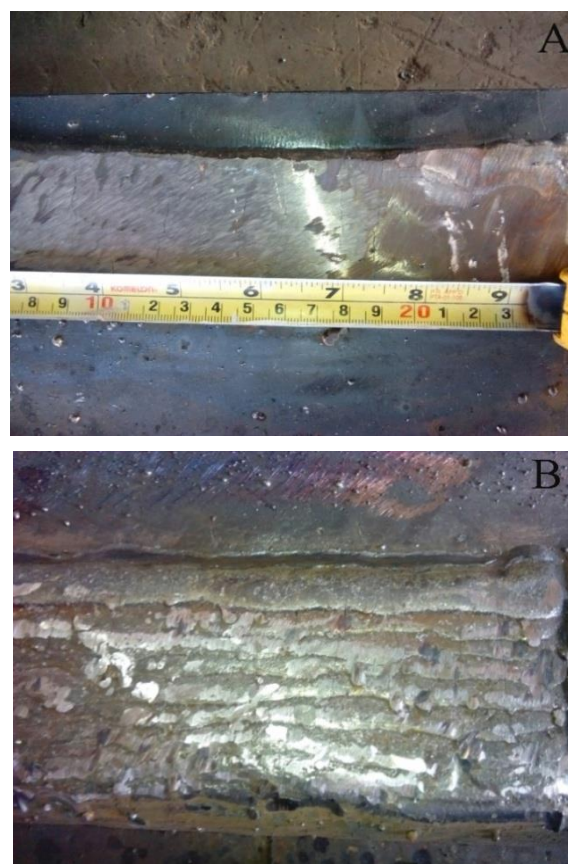


شکل ۶- ترک های طولی ایجاد شده در لایه دوم سرد شده زیر ماسه SiO_2

پیشنهاد دیگری که می تواند مفید باشد، ترکیب دو روش با هم است. لذا به منظور رسیدن به لایه ی دوم سخت کاری شده عاری از ترک استفاده از دو تکنیک همزمان افزایش دمای بین پاسی و استفاده از پس گرمایش بعد از اعمال لایه دوم است. در

شایان ذکر است که سنگ زدن آرام فلز جوش ایجاد ترک های طولی را به دنبال نداشت اما در شرایطی که اپراتور (سنگ کار) با سرعت بیشتری سطح جوش را سنگ بزند، ترک های طولی بیشتری به دلیل فشار بیشتر به قطعه کار، ایجاد می گردد. سنگ زدن فلز جوش رسوب شده از MF-10-60-GRZ فقط در حد حذف جرقه های جوش پیشنهاد شده و مقادیر بیشتر از آن توصیه نمی گردد. در شکل ۴ یک لایه جوش مناسب سنگ خورده و یک لایه نامناسب سنگ خورده به نمایش گذاشته شده است.

سومین راهکار مورد مطالعه برای حذف ترک های طولی، بر مبنای کم کردن سرعت سرد شدن با استفاده از انجام عملیات پس گرمایش بود. برای اعمال پس گرمایش از مشعل گاز بوتان و اکسیژن همراه با شعله خنثی استفاده گردید. بدین منظور در زمان های ۲، ۳، ۵، ۷ و ۸ دقیقه مشعل بر روی سطح جوش لایه دوم قرار گرفت تا دمای لایه دوم سخت کاری شده در حداکثر حالت به حدود ۶۵۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد برسد. این راهکار هم نتوانست عاملی برای حذف ترک های طولی در لایه های دوم سخت کاری باشد. شکل (۵) ترک های طولی را که در قطعات پس گرم شده مشاهده شده را نشان می دهد.



شکل ۴- سنگ زنی لایه جوش داده شده بوسیله سیم جوش MF-10-60-GRZ در شرایط (A) حالت نامناسب، (B) حالت مناسب

با توجه به اطلاعات موجود در کاتالوگ‌های شرکت‌های سازنده سیم جوش‌های سخت‌کاری سطحی، مانند ایساب، لینکولن، استودی و ... راهی عملی مناسبی برای اعمال لایه دوم با استفاده از فلز جوش MF-10-60-GRZ یافت نشد، بنابراین تصمیم گرفته شد که در بین لایه‌های سخت MF10 از لایه‌های نرم ER70S-6 استفاده شود تا از قرار گرفتن لایه‌های MF10 بطور مستقیم بر روی یکدیگر جلوگیری شود تا در نتیجه، ترک‌های طولی حذف گردند. بدین منظور، لایه‌های جوش ابتدا به صورت MF10+ER+MF10+ER+MF10 اعمال شدند. در این حالت مشاهده شد که در هنگام اعمال لایه سوم به بعد، فلز جوش MF10 شروع به کنده شدن و قلوه‌کن شدن از فلز پایه می‌کند. تصویر این رخداد در شکل (۱۰) و (۱۱) آورده شده است. لازم به ذکر است در این تصویر ترک طولی مشاهده نشد.



شکل ۸- لایه سخت‌کاری شده بوسیله جوش زیر پودری



شکل ۹- ترک‌های طولی ایجاد شده در لایه سخت‌کاری شده در جوشکاری زیرپودری

رویه شرح داده شده در بالا دو اشکال دارد، (۱) با سیستم ۵ لایه توضیح داده شده، ارتفاع کلی لایه جوش از ۱۵ میلیمتر فراتر خواهد رفت و (۲) در اثر جوشکاری لایه سوم به بعد احتمال قلوه‌کن شدن این لایه‌های سخت شده در مقالات محققان دیگر نیز مطرح شده است [۲۵]. به منظور رفع مشکلات ذکر شده تصمیم بر این شد که لایه اول با استفاده از سیم جوش ER70S-6 جوش داده شود و بصورت یکی در میان از سیم جوش MF-10-60-GP استفاده گردد. این روش با چهار لایه تمامی خواسته‌های جوش را برآورده کرده و جوشی بدون ایجاد ترک‌های طولی را به همراه خواهد داشت (شکل ۱۲). با انجام این عمل، تعداد ترک‌های عرضی کاهش یافته و از عمق آن‌ها نیز کاسته شد.

این حالت دمای بین پاسی از ۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد تغییر داده شد و زمان اعمال پس‌گرمایش به ۷ دقیقه افزایش یافت. به جز نمونه‌ای که دمای بین پاسی آن ۳۵۰ درجه سانتیگراد بوده و بعد از جوشکاری نیز به مدت ۷ دقیقه با استفاده از مشعل بوتان- اکسیژن گرما داده شد، در سایر نمونه‌های این آزمون ترک‌های طولی مشاهده گردید. تصویر لایه دوم بدون ترک طولی بدست آمده از این آزمون در شکل (۷) آورده شده است. قابل ذکر است که هرچند با بررسی حالت‌های مختلف لایه‌ی دوم بدون ترک به دست آمد، اما این روش قابلیت عملی شدن برای جوشکاری قطعه با ابعاد واقعی که در ریل‌ها وجود دارد را ندارد و بدین منظور می‌بایست به سراغ روش‌های دیگری رفت.

با توجه به اینکه روش مطرح شده تحت شرایط خاصی (با دمای بین پاسی و پس‌گرمایش بالا) منجر به ایجاد جوش بدون ترک طولی می‌شود، به علت حرارت ورودی بالا در جوشکاری زیرپودری و به تبع آن سرعت سرد شدن پایین‌تر نسبت به سایر روش‌ها تصمیم گرفته شد که از سیم جوش مذکور با استفاده از روش جوشکاری زیرپودری استفاده شود. پس از انجام چندین تست با این روش، در مواردی ترک‌های طولی در لایه اول و در چند مورد نیز ترک‌های طولی در لایه دوم مشاهده شدند. شکل (۸) و (۹) نشان دهنده لایه‌های سخت ایجاد شده با استفاده از فرآیند جوش زیرپودری می‌باشد.



شکل ۷- اعمال لایه دوم با استفاده از فلز جوش MF-10-60-GRZ با دمای بین پاسی ۳۵۰ و ۷ دقیقه پس‌گرمایش



شکل ۱۲- جوش چهار لایه ER+MF10+ER+MF10 بدون هیچگونه ترک طولی در نمونه

باید اشاره شود که فرآیند جوشکاری لایه به لایه دارای پیچیدگی‌های ظریفی است. بطور مثال در چندین مورد از نمونه‌های جوش داده شده در لایه سوم که از جنس فلز پرکننده ER70S-6 بود ترک‌های طولی مشاهده شد. دلیل این امر حل شدن مقادیر زیادی از عناصر موجود در چدن پر آلیاژ در فلز جوش ER70S-6 بوده است. برای حل این مشکل حرارت ورودی در هنگام اعمال لایه سوم کاهش داده شد تا میزان امتزاج بین دو لایه کاهش یابد. در مقابل برای جلوگیری از قلوه کن شدن لایه‌های ایجاد شده هنگام جوشکاری لایه اول حرارت ورودی افزایش یافت تا امتزاج بیشتری بین لایه‌های جوش داده شده و فلز پایه ایجاد گردد.

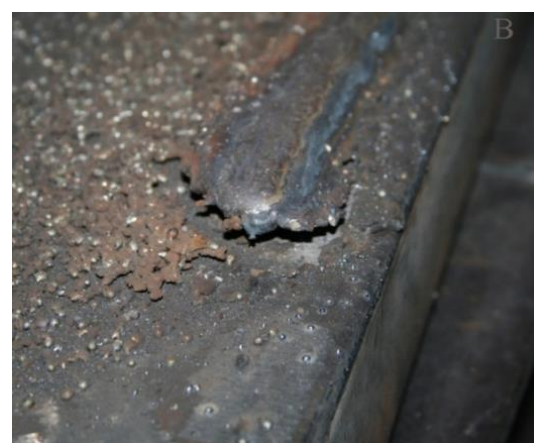
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش شد تا با مطالعه عوامل تاثیر گذار بر ترک طولی ایجاد شده در عملیات سخت کاری با جوشکاری (با سیم جوش سیم جوش MF-10-60-GRZ) به نتایج قابل اطمینان دست یافت که پس از انجام تحقیقات و آزمون‌های مختلف، نتایج زیر حاصل گردید.

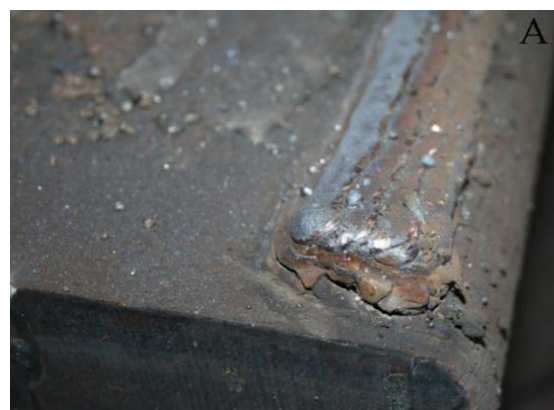
۱- پیش گرمایش ۱۲۰ درجه سانتیگراد برای جلوگیری از ایجاد ترک به دلیل کاهش نرخ خنک شوندگی فلز جوش و مناطق اطراف آن بدلیل کاهش نرخ انتقال حرارت و سرد شدن سریع پیشنهاد می‌گردد.

۲- هیچ یک از روش‌های معمول بیان شده در مقالات برای کاهش ترک‌های طولی در لایه دوم موثر نبود و تنها در شرایط خاص اعمال دمای بین پاسی حدود ۳۵۰ درجه سانتیگراد و پس گرمایشی به مدت ۷-۸ دقیقه توسط مشعل گاز بوتان-اکسیژن بر روی سطح جوش عملی گردید. اما این روش در ابعاد بزرگ و صنعتی قابلیت کاربرد ندارد. چرا که سبب تاب برداشتن قطعه شده و از طرفی صرف زمان و هزینه بسیار زیادی را به همراه دارد.

۳- کنترل نرخ سرد شدن با استفاده از پوشاندن لایه ایجاد شده در زیر ماسه سیلیسی و همچنین تغییر در فرآیند جوشکاری از



شکل ۱۰- A) کنده شدن فلز جوش از فلز پایه (لایه اول جوش داده شده از جنس MF10 می‌باشد)، B) از زاویه‌ای دیگر



شکل ۱۱- الف) بلند شدن فلز جوش از فلز پایه علت اعمال لایه سوم، ب) سطح مقطع فلز کنده شده

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.027>,
(2011).

[7] Zikin, A., Hussainova, I., Katsich, C., Badisch, E., Tomastik, C., Advanced chromium carbide-based hardfacings, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 4270–4278, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.039>, (2012).

[8] Liu, D., Liu, R., Wei, Y., Effects of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 207, pp. 579-586, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.078>, (2012).

[9] Lemke, J.N., Rovatti, L., Colombo, M., Vedani, M., Interrelation between macroscopic, microscopic and chemical dilution in hardfacing alloys, *Materials and Design*, Vol. 91, pp. 368-377, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.117>, (2016).

[10] Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., Subramanian, C., Hardfacing using ferro-alloy powdermixtures by submerged arc welding, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 260, pp. 220-229, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.076>, (2014).

[11] DIN 8555, Committee, DIN. 2005.

[12] Henderson, J.L., Bulloch, J.H., Alloy Classification of Hardfacing Materials, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 47, pp. 127-158, DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(91\)90096-K](https://doi.org/10.1016/0308-0161(91)90096-K), (1991).

[13] Zhou, Y.F., Yang, Y.L., Jiang, Y.W., Yang, J., Ren, X.J., Yanga, Q.X., Fe–24 wt.%Cr–4.1 wt.%C hardfacing alloy: Microstructure and carbide refinement mechanisms with ceria additive, *Materials Characterization*, Vol. 72, pp. 77-86, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.07.004>, (2012).

[14] Qi, X., Jia, Z., Yang, Q., Yang, Y., Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 5510-5514, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.027>, (2011).

[15] Azimi, G., Shamanian, M., Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 505, pp. 598-603, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.084>, (2010).

FCAW به SAW تاثیر بر جلوگیری از ایجاد ترک‌های طولی در لایه‌های جوش داده شده نداشت.

۴- استفاده از یک لایه نرم توسط سیم جوش ER70S-6 در بین لایه‌های سخت سیم جوش MF-10-60-GRZ بدلیل توان هضم تنش‌های پسماند، شرایط آلیاژ سازی و ... بسیار در کاهش ترک موثر بود. بهترین نتیجه زمانی ایجاد شد که ابتدا از لایه ER70S-6 بر روی فلز پایه استفاده گردید تا با در نظر گرفتن میزان امتزاج بین دو لایه، بحث حل شدن مقادیر زیادی از عناصر موجود در چدن پر آلیاژ در فلز جوش ER70S-6 منتفی گردد و کل فلز جوش رسوب داده شده قلوه کن نگردد.

۵- مراجع

[1] Venkatesha, B., Sriker, K., Prabhakar, V.S.V., Wear characteristics of hardfacing alloys: state-of-the-art, *Procedia Materials Science*, Vol. 10, pp. 527-532, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.002>, (2015).

[2] Hou, X., Zhao, B., Yang, J., Xing, X., Zhou, Y., Yang, Y., Yang, Q., Fe–0.4 wt.%C–6.5 wt.%Cr hardfacing coating: Microstructures and wear resistance with La₂O₃ additive, *Applied Surface Science*, Vol. 317, pp. 312-318, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.118>, (2014).

[3] Buchely, M.F., Gutierrez, J.C., Le'on, L.M., Toro, A., The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, Vol. 259, pp. 52-61, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>, (2005).

[4] Correa, E.O., Alcântara, N.G., Valeriano, L.C., Barbedo, N.D., Chaves, R.R., The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 276, pp. 479-484, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.026>, (2015).

[5] Mendez, P.F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S.D., Gajapathic, S.S., Guest, S.D., Izadi, H., Gol, A.K., Wooda, G., Welding processes for wear resistant overlays, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 189, pp. 1-23, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>, (2013).

[6] Qi, X., Jia, Z., Yang, Q., Yang, Y., Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing meta., *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 5510-5514, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.027>, (2011).

- [21] Ferrous Welding Metallurgy, American welding society. 5th Edition, (2004).
- [22] Shahabi, M., Welding defect, 1387, (in Persian),
- [23] Kou. S., Welding Metallurgy. 2th Edition, A John willey & sons inc publication, DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs2003.197>, (2003).
- [24] Hornung, J., Zikin, A., Pichelbauer, K., Kalin, M., Kirchgaßner, M., Influence of cooling speed on the microstructure and wear behaviour of hypereutectic Fe–Cr–C hardfacings, Materials Science & Engineering A, Vol. 576, pp. 243-251, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.04.029>, (2013).
- [25] Xiao, Y., Yefei, Z., Jian, Y., Xiaolei, X., Xuejun, R., Yulin, Y., Qingxiang, Y., Refinement of nano-Y₂O₃ on microstructure of hypereutectic Fe–Cr–C hardfacing coatings, Journal of rare earths, Vol. 33, pp. 671-678, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60469-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60469-5), (2015).
- [16] Chatterjee, S., Pal, T.K., Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, pp. 61-69, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.025>, (2006).
- [17] Chang, C.M., Chen, Y.C., Wu, W., Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy, Tribology International, Vol. 43, pp. 929-934, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.045>, (2010).
- [18] Yang, J., Tian, J., Hao, F., Dan, T., Ren, X., Yang, Y., Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe–Cr–C alloy hardfacing metals with different La₂O₃ additives, Applied Surface Science, Vol. 289, pp. 437-444, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.186>, (2014).
- [19] Tsai, K.C., Jeng, S.L., Huang, J.Y., Prevention of delayed cracking of iron based hardfacing welds, Engineering Failure Analysis, Vol. 48, pp. 210-217, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.025>, (2015).
- [20] Fan, C., Chen, M.C., Chang, C.M., Wu, W., Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys, Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp. 908-912, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.010>, (2006).

مروری بر روند توسعه خودروهای پیل سوختی در دنیا

ناصر بهارلو هوره*
استادیار

سید عرفان
سخنگوی

دانشجوی کارشناسی ارشد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت دبیر شهید
رجایی، تهران

چکیده: در این تحقیق با مرور بر بیش از ۵۰ مقاله معتبر و به روز بین المللی، مزایا و چالش های خودرو پیل سوختی، بیان گردیده است. همچنین ضمن ارائه آخرین آمار از بازار خودروهای پیل سوختی در دنیا، راهکارهای کشورهای مختلف جهت رفع چالش ها و توسعه این خودروها و نیز پیش بینی آینده آن ها عنوان گردیده است. بسیاری از کشورها سال های ۲۰۳۰ الی ۲۰۵۰ را به عنوان شروع ممنوعیت فروش خودروهای احتراق داخلی اعلام کرده اند. یکی از چالش های مهم خودرو پیل سوختی تولید هیدروژن است. طبق گزارش اتحادیه اروپا هزینه متوسط تولید هیدروژن از سوخت فسیلی ۱/۸ دلار به کیلوگرم است در حالیکه هزینه تولید هیدروژن از انرژی های تجدیدپذیر بین ۳ تا ۶/۶ دلار بر کیلوگرم است. با کاهش هزینه تولید هیدروژن از طریق استفاده از انرژی های تجدید پذیر، می توان به هدف ایده آل هزینه پایین و آلاینده گی کم دست پیدا کرد، به نحوی که طبق نقشه راه آژانس بین المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۵۰ هزینه خودروهای پیل سوختی بسیار نزدیک به خودروهای بنزینی خواهد بود و سهم بازار خودرو پیل سوختی در حدود ۱۷ درصد خواهد بود. هم اکنون تخصیص یارانه های دولتی بسیار پر رنگ است. برای مثال می توان به تخفیف ۶۵ درصدی در کالیفرنیا برای فروش تویوتا Mirai و تخفیف ۵۰ درصدی در کره جنوبی برای فروش هیوندای NEXO اشاره کرد.

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴
پذیرش:
۱۴۰۲/۰۴/۲۱

واژه های راهنما: خودرو الکتریکی، خودرو پیل سوختی، تولید هیدروژن، پیل سوختی غشاپلیمری، هزینه، یارانه، آلاینده گی

An overview of the development process of fuel cell vehicles in the world

Nasser Baharlou
Houreh*
Assistant Professor

Seyed Erfan
Sokhangouy
MA student,
Department of
Mechanical
Engineering, Shahid
Rajaei Teacher
Training University,
Tehran

Abstract: In this research, by reviewing more than 50 authentic and up-to-date international articles, the advantages and challenges of fuel cell cars have been stated. Also, while presenting the latest statistics of the fuel cell car market in the world, the solutions of different countries to solve the challenges and development of these cars, as well as predicting their future, have been mentioned. Many countries have announced the years 2030 to 2050 as the beginning of banning the sale of internal combustion vehicles. One of the important challenges of the fuel cell car is hydrogen production. According to the European Union report, the average cost of producing hydrogen from fossil fuel is 1.8 dollars per kilogram, while the cost of producing hydrogen from renewable energy is between 3 and 6.6 dollars per kilogram. By reducing the cost of hydrogen production through the use of renewable energies, the ideal goal of low cost and low emissions can be achieved, so that according to the roadmap of the International Energy Agency (IEA) in 2050, the cost of fuel cell vehicles will be very close to gasoline cars and the market share of fuel cell cars will be around 17%. Currently, the allocation of government subsidies is very colorful. For example, we can mention a 65% discount in California for the sale of Toyota Mirai and a 50% discount in South Korea for the sale of Hyundai NEXO.

Keywords: Electric vehicle, Fuel cell vehicle, Hydrogen production, Polymer membrane fuel cell, Cost, Subsidy, Pollution

فرانسه	تا سال ۲۰۴۰ فروش خودروهای سواری جدید و خودروهای تجاری سبک با استفاده از سوخت فسیلی پایان یابد.	قانون هدایت حمل و نقل	۲۰۴۰
ژاپن	کاهش ۴۶ درصدی انتشار گاز گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰ و انتشار صفر در ۲۰۵۰	استراتژی رشد سبز	۲۰۳۰ و ۲۰۵۰
کره جنوبی	کاهش ۲۴ درصدی انتشار گاز گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰	استراتژی کربن خنثی	۲۰۳۰
کانادا	کاهش ۴۰ درصدی انتشار گاز گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰ و انتشار صفر در ۲۰۵۰	---	۲۰۳۰ و ۲۰۵۰

۲- معرفی جایگزین‌های سوخت فسیلی برای کاربردهای حمل و نقل در دنیا

بازار جهانی خودرو در حال حاضر در حال انجام یک اصلاح ساختاری است که هدف آن پیشی گرفتن از فاز کم‌کربن و در نهایت رسیدن به جامعه‌ای با کربن صفر است. استفاده از خودروهای برقی (EV) به عنوان روشی مؤثر برای کاهش مصرف سوخت خودرو و انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند. برای مثال جایگزینی ۵۵٪ از وسایل نقلیه سبک با ماشین‌های الکتریکی در میلان ایتالیا، به حداکثر کاهش ۶/۸ میکروگرم در متر مکعب در انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx)، و ۱۳/۵ میکروگرم در متر مکعب در انتشار نیتروژن مونو اکسید (NO) در مقایسه با وضعیت عدم استفاده از ماشین‌های الکتریکی، کمک کرده است [۹].

دو فناوری نیروی محرکه عمدتاً در برقی‌سازی وسایل نقلیه جاده‌ای استفاده شده‌اند: وسایل نقلیه الکتریکی باتری‌دار (BEV) که صرفاً از باتری استفاده می‌شود و خودروهای الکتریکی پیل سوختی (FCEV) که با برق تولیدشده ناشی از تزریق سوخت هیدروژن راه‌اندازی می‌شود [۵]. به کمک این خودروها علاوه بر رفع آلودگی هوا، مشکل آلودگی صوتی موتورهای احتراق داخلی را نیز برطرف می‌شود [۱]. هم چنین وسایل نقلیه الکتریکی مبتنی بر باتری از مزایای امکان شارژ باتری در ساعات کم‌مصرف (هزینه کمتر) برق برخوردار هستند [۱۰]. مدل‌های فعلی BEV و FCEV هر دو هنوز کاملاً مقرون به صرفه نیستند و عمدتاً برای استفاده عمومی با مسافت‌های طولانی رانندگی مانند اتوبوس‌های شهری یا تاکسی مناسب

۱- چالش‌های سوخت فسیلی و لزوم روی آوردن دنیا به فناوری‌های نو

بخش حمل و نقل سبب ۲۵ درصد از کل انتشار دی اکسید کربن در سراسر جهان است. به طور خاص، انرژی مورد نیاز برای راه‌اندازی وسایل نقلیه شخصی با موتور احتراق داخلی (ICE) سهم قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای سرانه را به خود اختصاص داده است. این درصد مطمئناً افزایش خواهد یافت، زیرا تولید وسایل نقلیه با ICE در سراسر جهان کماکان در حال افزایش است [۱]. طبق گزارش لی و کیومرا [۲] تا سال ۲۰۴۰، تعداد وسایل نقلیه مسافری به تنهایی ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت و نفت هنوز تا سال ۲۰۴۰، ۹۰ درصد تقاضای انرژی در بخش حمل و نقل را برآورده خواهد کرد که این روند منجر به کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی خواهد شد [۳]. این سهم را می‌توان با جایگزین کردن منابع تجدیدپذیر شامل فتوولتائیک خورشیدی، انرژی باد، زیست‌توده و سوخت‌های مصنوعی (ترکیبی) [۴] به عنوان منبع تولید توان در خودرو کاهش داد. تجربه جذاب رانندگی با خودروهای الکتریکی عامل مضاعف کنار گذاشتن خودروهای ICE است. کشورهای متعددی ممنوعیت قریب‌الوقوع موتورهای احتراق داخلی را اعلام کرده‌اند [۵]. در جدول (۱) نمونه‌ای از تعهد دولت‌ها جهت کاهش یا حذف تدریجی خودروهای ICE را مشاهده می‌شود [۱].

جدول ۱ سیاست‌های اجرایی اعلام شده برخی دولت‌ها برای حذف تدریجی خودروهای موتور احتراق داخلی [۶][۷][۸]

کشور	هدف‌گذاری بر اساس سند خط مشی	نام سند	سال حذف تدریجی
نروژ	تمام خودروهای سواری جدید و وانت‌های سبک فروخته شده در سال ۲۰۲۵ باید بدون آلاینده‌گی باشند.	برنامه ملی حمل و نقل	۲۰۲۵
سوئد	از سال ۲۰۳۰ دیگر مجاز به فروش خودروهای بنزینی و دیزلی جدید نخواهد بود.	برنامه اقدام سیاست آب و هوا	۲۰۳۰
هلند	خودروهای سواری جدید حداکثر تا سال ۲۰۳۰ بدون آلاینده‌گی خواهند بود.	توافقنامه آب و هوا	۲۰۳۰
انگلستان	تا سال ۲۰۳۵ به فروش خودروها و وانت‌های جدید بنزینی و دیزلی متعارف پایان دهد.	---	۲۰۳۵

² Electric vehicle

¹ Internal combustion engine

• هزینه‌های بالای ساخت و ساز	
تقاضا برای وسایل نقلیه توسط شهروندان	• موانع روانی (مانند عدم تمایل ناشی از هزینه بالا) • آگاهی و فرهنگ پذیرش فناوری‌های نو
ایفای نقش دولت‌ها	• فقدان استانداردها و پروتکل‌ها برای به حداقل رساندن عدم اطمینان در مورد تکنولوژیکی غالب • قوانین یا مقرراتی که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد یا مانع سرمایه‌گذاری در ایجاد بازار می‌شود.

۳- آشنایی با پیل سوختی مورد استفاده در خودرو

فناوری FCEV مورد استفاده برای خودروها، بر اساس نوع وسیله نقلیه به پیل سوختی غشاپلیمری (PEMC) و پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC) تقسیم می‌شوند. پیل سوختی PEM رایج‌ترین مجموعه FC است و به دلیل چگالی توان بالا، دمای عملیاتی پایین (۸۰-۶۰ درجه سانتی-گراد) و خوردگی پایین نسبت به بقیه پیل‌های سوختی استفاده از آنها روز به روز در FCEV افزایش یافته‌است [۱۷] [۱۸]. از دیگر مزایای پیل سوختی غشاپلیمری نسبت به سایر پیل‌های سوختی زمان راه‌اندازی سریع‌تر هست [۱۹]. در کاربردهای حمل و نقل این ویژگی از اهمیت خاصی برخوردار است.

پیل سوختی غشا پلیمری نوعی پیل الکتروشیمیایی است که با هیدروژن و اکسیژن تغذیه می‌شود. هیدروژن در آند اکسید و اکسیژن در کاتد احیا می‌شود. اجزاء اصلی پیل سوختی غشا پلیمری شامل غشای انتقال دهنده پروتون، لایه‌های رسانای پخش گاز در دو طرف آند و کاتد، لایه‌های کاتالیست (الکترودها) بین لایه‌های پخش گاز و غشاء، صفحات قطبی یا جمع کننده جریان در دو طرف پیل، کانال‌های جریان برای انتقال سوخت و اکسید کننده در داخل آنها می‌باشد. پروتون-هایی که در طول اکسیداسیون هیدروژن آزاد شده‌اند، از طریق غشای تبادل پروتون به کاتد انتقال داده می‌شود [۲۰]. این غشاء هدایت کننده الکترونیکی نیست، بنابراین الکترون‌های آزاد شده از گاز هیدروژن، از طریق مدار خارجی حرکت کرده و جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که بوسیله غشا از نفوذ کلیه گازها به جز بخار آب جلوگیری می‌شود.

به طور خلاصه می‌توان گفت فرایندهای زیر در پیل سوختی غشا پلیمری انجام می‌شود.

(۱) جریان گاز داخل کانال‌ها (هوا از کاتد و هیدروژن از آند)

هستند [۱۱]. با این حال، به‌ویژه در بازار خودروهای سواری، BEV و FCEV اغلب به‌عنوان رقیب در نظر گرفته می‌شوند [۵].

بر اساس ارقام موجود در گزارش جدید آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۲۳، تعداد خودروهای الکتریکی پیل سوختی هیدروژنی (FCEV) در جاده‌های جهان در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۲۱، ۴۰ درصد افزایش یافته و در مجموع به بیش از ۷۲۰۰۰ خودرو رسیده‌است [۱۲].

فروش خودروهای الکتریکی غیرهیدروژنی در سال ۲۰۲۲ از مرز ۱۰ میلیون نفر فراتر رفت که ۵۵ درصد نسبت به سال ۲۰۲۱ افزایش داشت که کمتر از ۳۰ درصد از این خودروهای هیبریدی پلاگین هستند. علاوه بر این، بیش از ۳۱۰۰۰۰ خودروی تجاری سبک الکتریکی، نزدیک به ۶۶۰۰۰ اتوبوس برقی و ۶۰۰۰۰ کامیون برقی متوسط و سنگین در سال ۲۰۲۲ فروخته شد [۱۲].

موجودی جهانی وسایل نقلیه الکتریکی در اواخر سال ۲۰۲۱ به ۱۱ میلیون رسید. بر اساس گزارش مرجع [۱]، ۴۵٪ از وسایل نقلیه الکتریکی در جاده در چین، ۲۴٪ در اروپا و ۲۲٪ در ایالات متحده آمریکا است. با این حال رشد در هر یک از این بازارها آهسته و بسیار کمتر از اهداف دولتهاست. به عنوان مثال، ژاپن تنها ۱۷ درصد از هدف را برای دستیابی به ۴۰۰۰۰ فروش تجمعی FCEV تا اوایل سال ۲۰۲۱ به دست آورده‌است. این رشد کند ناشی از چهار عاملی است که وضعیت بازار خودروهای برقی به آن وابسته‌است: (۱) تولید خودرو (۲) پشتیبانی از زیرساخت‌ها (۳) تقاضای خودرو (۴) سازمان‌ها، ارگانها و موسسات. هر دیدگاه در کنار نمونه‌هایی از موانع مرتبط در جدول (۲) خلاصه شده‌است.

جدول ۲ چهار عامل موثر بر ایجاد بازار خودرو الکتریکی [۱۳]

[۱۴][۱۵][۱۶]

دسته بندی	عوامل موثر
تولید خودرو توسط خودروسازان	• تعداد کم خودروسازان تولیدکننده خودرو • دامنه پایین پیمایش مسافت • هزینه بالای تولید وسایل نقلیه یا قطعات • کاهش زمان شارژ وسایل نقلیه الکتریکی • صرفه‌جویی در مقیاس پایین در تولید خودرو یا قطعه
تأمین زیرساخت توسط دولت‌ها یا شرکت‌های خصوصی بزرگ	• ناکافی بودن ایستگاه‌های شارژ یا سوخت‌گیری • سود کم برای ایستگاه‌های شارژ یا سوخت‌گیری

چگالی انرژی بالاتر پیل‌های سوختی نسبت به باتری‌ها	عدم وجود سر و صدا
تغذیه سریع‌تر و کاهش زمان شارژ پیل سوختی نسبت به باتری	استفاده از انرژی تجدیدپذیر در تهیه هیدروژن و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی
دامنه پیمایش مسافت بالاتر	بازده انرژی بیشتر از چاه به چرخ
بازده انرژی بیشتر از چاه به چرخ	پیل‌های سوختی می‌توانند همه قسمت‌هایشان جامد باشد و این وضعیت مکانیکی ایده‌آل است
درصد انتشار پایین‌تر آلاینده‌گی	عدم انتشار کربن دی اکسید در حرکت (جاده) و درصد پایین آلاینده‌گی محصولات نامطلوب

در جدول شماره (۴) مقایسه ای بین خودروهای پیل سوختی، احتراق داخلی و باتری دار انجام شده است. بدین ترتیب که مشخصه‌های ذکر شده در ستون اول، مشخصه‌های مثبت هستند و رتبه‌های ۱ و ۳ در کل جدول به ترتیب نشان دهنده بهترین و بدترین عملکرد است. مشخصه آلاینده‌گی پایین چاه تا چرخ با هدف مقایسه میزان آلاینده‌گی تولید شده در فرآیند تولید سوخت مورد نیاز هر خودرو می‌باشد.

جدول ۴ مقایسه بین خودروهای پیل سوختی، احتراق داخلی و باتری دار [۲۲][۲۳][۲۴][۲۵][۲۶]

پارامترها	خودرو پیل سوختی	خودرو احتراق داخلی	خودرو مبتنی بر باتری
طول عمر بالا	۱	۲	۳
آلودگی صوتی پایین	۲	۳	۱
آلاینده‌گی پایین چاه تا چرخ	۳	۱	۲
آلاینده‌گی پایین در جاده (در حال حرکت)	۱	۳	۲
دانشیه توان حجمی بالا	۳	۱	۲
هزینه پایین تولید خودرو	۳	۱	۲
زمان سوخت گیری (شارژ) پایین	۲	۱	۳
بازده انرژی بالا از چاه به چرخ	۱	۳	۲

- (۲) انتقال گازها از کانال به سمت لایه‌های کاتالیست از طریق محیط متخلخل لایه پخش گاز
- (۳) واکنش‌های الکتروشیمیایی در لایه‌های کاتالیست
- (۴) انتقال پروتون H^+ و بخار آب در میان غشاء
- (۵) هدایت الکترون از طریق صفحات جمع کننده و تولید الکتروسیسته
- (۶) انتقال آب به صورت مایع و بخار در میان لایه‌های کاتالیست و لایه‌های پخش گاز
- (۷) تولید آب و حرارت ناشی از واکنش رخ داده در سمت کاتد پیل سوختی

۴- مزایای خودروهای پیل سوختی

علی‌رغم تسلط BEVها در فروش خودروهای الکتریکی، FCEVها نیز مزایای متعددی دارند. (۱) آنها می‌توانند به سرعت در چند دقیقه سوخت‌گیری شوند (۲) مسافت طولانی مدت رانندگی مشابه خودروهای بنزینی یا دیزلی دارند (۳) در هوای بسیار سرد و بسیار گرم بدون از دست دادن ظرفیت ذخیره انرژی یا ظرفیت توان عملکرد مناسبی دارند (۴) یک توده پیل سوختی در یک وسیله نقلیه با عمر معمولی ۵۰۰۰ ساعت یا بیشتر، در حالی که وسایل نقلیه مبتنی بر باتری لیتیومی معمولاً حداقل یک بار در طی مدت ۵۰۰۰ ساعت نیاز به تعویض باتری دارند [۲]. در جدول شماره (۳) مزایای خودروهای پیل سوختی نسبت به موتورهای احتراق داخلی و خودرو مبتنی بر باتری گردآوری شده است. تامین انرژی مورد نیاز برای تولید توان در انواع خودروهای الکتریکی از جمله خودروهای پیل سوختی از تبدیل سایر منابع انرژی اولیه فراهم می‌شود. برای این توالی تبدیل‌ها از منبع انرژی اصلی به انرژی نهایی تولیدکننده قدرت موتور خودرو باید اتلافات انرژی در طول کل فرآیندها ارزیابی شود که این ارزیابی کمیت‌سازی شده و با عنوان بازده انرژی از چاه به چرخ مشخص شده است.

جدول ۳ مزایای خودروهای

پیل سوختی [۵][۲۱][۲۲][۲۳][۲۴][۲۵][۲۶]

مزایای خودروی پیل سوختی نسبت به موتور احتراق داخلی	مزایای خودروی پیل سوختی نسبت به خودروهای مبتنی بر باتری‌ها
طول عمر بالا به علت نبود قسمت‌های متحرک در پیل سوختی خودرو	قابلیت رسیدن به توان بالاتر با افزایش تعداد سل‌های سری شده پیل سوختی

۵- چالش‌های خودروهای پیل سوختی

در جدول (۵) مقایسه تعداد کل FCEV و تعداد خودروهای مبتنی بر باتری (BEV) در چند کشور پیشرو در پایان سال ۲۰۲۲ را نشان داده شده است. مطابق جدول تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین تعداد FCEV و BEV وجود دارد. این تفاوت ناشی از چالش‌ها و نگرانی‌های بازار FCEV است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

جدول ۵ مقایسه تعداد FCEV و تعداد خودروهای مبتنی بر باتری

BEV [۵] [۲۷]

	آلمان	ژاپن	آمریکا
تعداد FCEV	۲۳۲۹	۷۹۷۴	۱۵۹۱۲
تعداد BEV	۷۵۴۰۰۰	۲۸۲۰۰۰	۸۲۸۰۰۰

عواملی که نگرانی‌های مربوط به توسعه خودروهای پیل سوختی افزایش داده است عبارتند از:

۵-۱- دانسیته توان

دانسیته توان حجمی پیل سوختی نسبت به باتری و موتور احتراق داخلی کمتر است، یعنی برای ایجاد یک توان مشخص، توده پیل سوختی نیاز به حجم بیشتری از فضا دارد. دانسیته توان نشان می‌دهد به کمک یک پیل سوختی چه مقدار توان بر واحد حجم (دانسیته توان حجمی) یا بر واحد جرم (دانسیته توان جرمی) تولید می‌شود. با وجود افزایش دانسیته توان پیل سوختی در مقایسه با دهه‌های گذشته اما برای رقابت در کاربردهای حمل و نقل با تجهیزات موجود، بهبود بیشتر در آنها بسیار ضروری می‌باشد. تویوتا Mirai و هوندا Clarity به ترتیب دانسیته توان حجمی ۳ و ۴ کیلووات بر لیتر را گزارش داده‌اند [۲۸]، [۲۹]، درحالی‌که به سرعت مشغول فعالیت‌های تحقیق و توسعه در راستای افزایش این مقادیر هستند.

۵-۲- چالش‌های تولید هیدروژن: هزینه و آلاینده‌گی

از نظر فراوانی در مقابل سوخت‌های فسیلی محدودیتی برای تولید هیدروژن وجود ندارد [۳۰] اما دو مشخصه آلاینده‌گی و

هزینه تولید بصورت تاثیر متضاد و متقابل باید توسط محققان و سیاست‌گذاران ارزیابی شده و به تعادل برسد.

تانگ و همکاران [۳۱] مسیرهای اصلی تولید هیدروژن را شامل پنج فرآیند اساسی برای تولید هیدروژن بررسی کردند: (۱) فرآیندهای شیمیایی- حرارتی (اصلاح، تبدیل به گاز، و تجزیه)، (۲) الکترولیز، (۳) تقسیم آب حرارتی، (۴) فرآیند فتوالکتروشیمیایی (فتوالکترولیز یا فتولیز)، و (۵) فرآیندهای بیولوژیکی (فتولیز، تخمیر، و الکترولیز که در میکروارگانیسم‌ها اتفاق می‌افتد). به همین ترتیب، منابع انرژی اولیه فرآیندهای تولید هیدروژن را می‌توان به ۳ دسته کلی تقسیم کرد: سوخت‌های فسیلی، انرژی هسته‌ای (شکافت)، و انرژی‌های تجدیدپذیر.

اکثریت قریب به اتفاق (تقریباً ۹۵٪) هیدروژن امروزی توسط روش اصلاح گاز طبیعی بخار متان (SMR) و یا روش-های مشابه آن تولید می‌شود، فرآیندی که ارزان‌تر است اما منجر به انتشار قابل توجهی دی اکسید کربن می‌شود. این هیدروژن خاکستری دارای انتشار حدود ۱۰/۹ کیلوگرم در اکسید کربن به ازای یک کیلوگرم هیدروژن است. مقایسه هزینه تولید هیدروژن با فناوری‌های مختلف در جدول (۶) نشان داده شده است. بطور کلی، هزینه تولید هیدروژن از مسیری به مسیر دیگر و از کشوری به کشور دیگر متفاوت است، که بیشتر به دلیل تفاوت در هزینه‌های عملیاتی، طراحی و پیکربندی سیستم تولید، شرایط بازار انرژی، ساختارهای تعرفه، مالیات و یارانه‌ها و سایر سیاست‌های خاص کشور است [۲].

با توجه به گزارش دپارتمان انرژی ایالات متحده، هزینه تولید هیدروژن از الکترولیز متمرکز یا توزیع شده ۳-۳/۹ دلار به ازای هر کیلوگرم در سال ۲۰۱۵ بوده است. DOE ایالت متحده هدف‌گذاری کاهش قیمت برای سال ۲۰۲۵ را ۲ دلار در کیلوگرم و برای سال ۲۰۳۰ مقدار ۱ دلار بر کیلوگرم اعلام کرده است [۳۲]. در این گزارش روش تولید هیدروژن از سه طریق الکترولایزر غشایی (PEM)، آلکالین و اکسید جامد ذکر شده است. ضعف این گزارش این است که در هدف‌گذاری روش تولید هیدروژن بطور دقیق اشاره نشده است؛ بلکه عنوان شده است که تلاش می‌شود تا عمده برق الکترولایزر از طریق منابع تجدیدپذیر تامین شود. خودروهای پیل سوختی واقعاً «سبز» به هیدروژن سبز نیاز دارند اما طبق جدول (۶) استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید هیدروژن یا به اصطلاح تولید هیدروژن سبز هزینه بالایی را در بر دارد. طبق گزارش ۲۰۲۰ اتحادیه اروپا هزینه متوسط تولید هیدروژن از سوخت فسیلی

کاهش دهد، اما هزینه حمل و نقل افزایش می‌یابد. سه شکل اصلی انتقال هیدروژن وجود دارد که عبارتند از (۱) هیدروژن فشرده در تریلرها یا کشتی‌ها، (۲) هیدروژن مایع در تانکرها یا کشتی‌ها و (۳) خط لوله هیدروژن. هیدروژن فشرده به دلیل چگالی انرژی پایین گاز و هزینه بالای تراکم بسیار گران است. با استفاده از فناوری فعلی، مایع سازی بیش از ۳۰ درصد از محتوای انرژی هیدروژن را مصرف کرده و هزینه بالایی دارد. علاوه بر این، مقداری از هیدروژن مایع ذخیره شده از طریق تبخیر یا جوش از بین می‌رود.

الکترولیز توزیع شده بالاترین هزینه تولید را با بیش از ۶ دلار در کیلوگرم دارد. الکترولیز متمرکز با استفاده از نیروی باد هزینه‌های تولید کمتری در حدود ۵ دلار در کیلوگرم دارد، اما پس از در نظر گرفتن حمل و نقل و تحویل هیدروژن از تولید متمرکز، هزینه هیدروژن توزیع شده بیش از ۷ دلار در کیلوگرم است که قیمت بالایی است. روش SMR و روش‌های مشابه که هزینه‌های تولید پایین (۱/۴۰-۱/۷۰ دلار بر کیلوگرم) دارد، اما به دلیل هزینه‌های قابل توجه حمل و نقل، هزینه نهایی تولید و توزیع هیدروژن به بالای ۴ الی ۴/۵ دلار در کیلوگرم می‌رسد [۲].

۴-۵- دوام و پایداری عملکرد اجزای پیل سوختی

با توجه به نوظهور بودن فناوری خودرو پیل سوختی، تعداد مراکز تأسیسات نگهداری و تعمیر کافی نیست. ساخت تأسیسات نگهداری و تعمیر FCEV یک الزام است چون این فناوری کاملاً جدید است و مزایای باتری EV را ندارد. همچنین، توزیع جریان غیر متعادل در FCEV بین FCها باعث یک آرایش عملیاتی نامناسب در پیل‌ها و مجموعه‌ها می‌شود. این وضعیت باعث ایجاد عدم قطعیت بالا و تحلیل یا زوال کارامدی می‌شود [۳۶].

۵-۵- ایمنی هیدروژن

مشکلات موجود در ذخیره گاز سبکی مانند هیدروژن و سطح بالایی از ایزولاسیون مورد نیاز برای ذخیره هیدروژن مایع، نیازمند تبدیل هیدروژن مایع به گاز هیدروژن بسیار کم دما با استفاده از مبدل حرارتی برای تنظیم فشار و کاهش تشکیل NOX می‌باشد. با خنک کردن هیدروژن گازی تا دمای زیر ۲۵۳ درجه سانتیگراد (۴۲۳ درجه فارنهایت) به مایع تبدیل می‌شود، پس از آن می‌شود آن را در مخازن بزرگ با عایق بندی قوی ذخیره کرد. به دلیل پتانسیل نشت هیدروژن، یکپارچگی

۱/۸ دلار به کیلوگرم است در حالیکه هزینه تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر بین ۳ تا ۶/۶ دلار بر کیلوگرم است [۷]. کشورهای مختلفی برای تولید هیدروژن سبز برنامه‌ریزی کرده‌اند. برای مثال دولت ژاپن ۲ تریلیون (۱۸,۵ میلیارد دلار) برای تحقق هدف خود برای تولید سالانه ۳۰۰,۰۰۰ تن هیدروژن سبز تا سال ۲۰۳۰ سرمایه‌گذاری کرده است. عربستان سعودی سرمایه‌گذاری ۵ میلیارد دلاری با هدف تولید ۶۵۰ تن هیدروژن سبز تا سال ۲۰۲۵ کرده و قصد دارد آن را به اروپا و آسیا صادر کند. اتحادیه اروپا، ۴۳۰ میلیارد دلار برای ایجاد ۷۰ پروژه هیدروژن سبز تا سال ۲۰۳۰ در نظر گرفته است تا به اهداف قرارداد سبز خود دست یابد [۳۳].

تویوتا Mirai جدید مصرف سوخت را ۰/۸۶ کیلوگرم بر ساعت در هر ۱۰۰ کیلومتر می‌دهد، بنابراین با استفاده از هیدروژن خاکستری حدود ۹۴ گرم دی‌اکسید کربن در هر کیلومتر تولید می‌شود. این رقم تنها یک بهبود جزئی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن موتورهای احتراقی مدرن است [۳۴].

جدول ۶ مقایسه هزینه تولید هیدروژن با فناوری‌های مختلف [۳۵]

هزینه (\$/kgH ₂)	روش	
۲/۰۸	SMR	سوخت‌های
۲/۲۷	SMR با CCS*	فسیلی به
۱/۳۴	**CC	هیدروژن
۱/۷۷- ۲/۷۷	تبدیل به زیست‌توده	زیست‌توده به
۲/۱۳	بیوفتولیز مستقیم	هیدروژن
۱/۴۲	بیوفتولیز غیر مستقیم	
۵/۷۳- ۸/۵۴	الکترولیز شبکه‌ای	الکترولیز
۵/۷۸- ۲۳/۲۷	الکترولیز فوتوولتائیک	
۵/۲۷- ۹/۳۷	الکترولیز بادی	
۳/۵۶- ۷/۰۰	الکترولیز هسته‌ای	
۲/۱۷- ۲/۶۳	ترمولیز هسته‌ای	چرخه‌های
۷/۹۸- ۸/۴۰	ترمولیز خورشیدی	ترموشیمیایی و ترمولیز

Carbon Capture and Storage Technology*
carbon capture**

۵-۳- توزیع هیدروژن

هیدروژن را می‌توان در محل در یک ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن یا در یک کارخانه متمرکز بزرگ تولید کرد. ساخت یک الکترولیز متمرکز بزرگ می‌تواند هزینه تولید هیدروژن را

بهبود بازار انرژی سبز و استفاده از خودروهای پیل سوختی خواهد کرد. از جمله سیاست‌های کلی انرژی می‌توان به قیمت گذاری خدمات شبکه برق و قیمت گذاری خدمات تولید، توزیع و ذخیره سازی هیدروژن اشاره کرد.

خودروهای پیل سوختی تا کنون عمدتاً از حمایت‌های دولتی برخوردار بوده‌اند. به عنوان مثال، در کالیفرنیا، Mirai با ۶۵ درصد تخفیف نسبت به قیمت فهرست ۵۰ هزار دلاری خود در دسترس بود. با ارائه تخفیف ۲۰ هزار دلاری تویوتا به اضافه مشوق‌های مالیاتی فدرال و ایالتی ایالات متحده که مجموعاً ۱۲/۵ هزار دلار است، Mirai در سال ۲۰۲۱ در ایالات متحده با قیمتی کمتر از ۱۸ هزار دلار در دسترس بود. برای تشویق بیشتر مشتریان، تویوتا همچنین اعتبار سوخت ۱۵ هزار دلاری را برای سه سال اول کار ارائه کرد. یک خودروی ۵۰ هزار دلاری با قیمت کمتر از ۲۰ هزار دلار با ۱۰۰ هزار کیلومتر سوخت رایگان بدون شک یک معامله جذاب است. قیمت Mirai در ژاپن بر اساس مدل بین ۶/۴۵ تا ۷/۸۲ میلیون ین متغیر است که مقدار یارانه بین ۱/۴۵ میلیون ین تا ۲/۳۸ میلیون ین برای آن در نظر گرفته شده است [۳۴].

برای هیوندای نیز چنین حمایتی موجود بوده است. از ۹۶۲۰ هیوندای نکسو فروخته شده در سطح جهان در سال ۲۰۲۱، ۸۸ درصد آن در کره جنوبی بوده است. مشوق‌های ملی و ایالتی کره جنوبی در سال ۲۰۲۱ به این صورت بوده که فروش هر NEXO با قیمت ۶۰ هزار دلار با ارائه یارانه حدود ۳۰ هزار دلار پشتیبانی می‌شد یعنی ۵۰٪ تخفیف جذاب. در کره جنوبی، قیمت معمولی برای اتوبوس‌های پیل سوختی حدود ۶۳۰ میلیون وون است که مشوق‌هایی بین ۱۵۰ تا ۳۳۰ میلیون وون پرداخت می‌شود [۳۴].

در چین تا پایان سال ۲۰۱۹، FCVها بودجه دولتی را به عنوان بخشی از سیاست حمایت مالی برای وسایل نقلیه با انرژی جدید دریافت می‌کردند. طبق این سیاست، خودروهای سواری ۶۰۰۰ یوان به ازای هر کیلووات و حداکثر ۲۰۰۰۰۰ یوان برای هر وسیله نقلیه، اتوبوس‌ها و کامیون‌های کوچک ۳۰۰۰۰۰ یوان و اتوبوس‌ها و کامیون‌های بزرگ ۵۰۰۰۰۰ یوان دریافت می‌کردند. در آلمان به خریداران تویوتا Mirai ۵۰۰۰ یورو از دولت و ۲۵۰۰ یورو از سازنده خودرو (مجموعاً ۷۵۰۰ یورو) پاداش داده می‌شود. ارزیابی درخواست‌های پاداش زیست‌محیطی تا ۱ مارس ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که ۱۷۰ خودروی هیوندای نکسوس، ۱۹ هیوندای ix۳۵ پیل سوختی و ۵۲ خودروی تویوتا Mirai از این برنامه پشتیبانی دریافت کردند [۴۰].

ساختاری مخزن ذخیره برای کاهش خطر نشت ضروری است. علاوه بر این، نصب یک سیستم ایمنی هیدروژن بر روی صفحه همراه با یک سیستم سنسور نشت، سوپاپ و کنترل آب بندی اجزا در کنترل بر نشت هیدروژن موثر باشد. در پیچه مخزن گاز در مخزن هیدروژن برای کاهش فشار گاز هیدروژن در صورت بیشتر شدن فشار از مقدار آستانه آن می‌تواند خطر انفجار را کاهش دهد [۳۷]. تمام موارد ذکر شده مستلزم هزینه‌های اضافی است.

۵-۶- تشخیص خطا

خطا زمانی اتفاق می‌افتد که یک دستگاه در خارج از شرایط مشخصات استاندارد خودش عمل کند. در FCEV خطا در سیستم‌های FC، سیستم‌های ذخیره‌کننده، مبدل‌های قدرت، دستگاه‌های اندازه‌گیری و موتور الکتریکی ایجاد شود. این خطاها باعث بارگذاری بیش از حد در FC، شارژ بیش از حد در دستگاه‌های ذخیره‌کننده، اتصال کوتاه یا مدار باز در سیم-پیچی‌های استاتور موتور، سوییچ باز یا کوتاه در اجزاء مبدل قدرت، داغی بیش از حد در دستگاه‌ها و غیره شود. بعضی از این خطاها باعث افت عملکرد وسیله نقلیه شده و منجر به لرزش، نویز یا آسیب سیستم دینامیک وسیله نقلیه می‌شود [۳۸].

۵-۷- قیمت بالای توده پیل سوختی به علت قیمت بالای اجزای آن از جمله لایه کاتالیست [۳۹].

۶- راهکارهای غلبه بر چالش‌های خودرو پیل سوختی

در حالی که هیدروژن و FCEV در همه کشورها در شرایط فعلی قابل رقابت با خودروهای برقی نیستند با این حال، به احتمال زیاد در آینده نزدیک قابل رقابت خواهند شد، زیرا انتظار می‌رود هزینه هیدروژن و FCEV به میزان قابل توجهی کاهش یابد [۲]. بنابر تحقیقات انجام شده، استدلال‌های زیر به دست آمده است:

۶-۱- حمایت دولتها و پرداخت یارانه و مشوق‌های مالی

سیاست‌های دولت‌ها تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر رقابت‌پذیری انرژی هیدروژنی و FCEVs دارند. سیاست‌های اختصاصی مانند مالیات‌ها، یارانه‌ها و سایر مشوق‌ها یا بازدارنده‌ها و نیز سیاست‌های کلی انرژی و محیط‌زیست کمک شایانی به

۶-۲- کاهش هزینه تولید و انتقال هیدروژن

اگر از روش‌هایی برای تولید هیدروژن استفاده شود که آلاینده‌گی بالایی داشته باشند هزینه کمی خواهند داشت اما می‌بایست از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کرد که آلاینده‌گی کمی داشته باشد. هزینه‌های تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ به میزان ۸۰ درصد کاهش یافته‌است [۲]. بنابراین اگر این روند کاهش در قیمت تولید هیدروژن از انرژی تجدیدپذیر با همین سرعت ادامه پیدا کند، پیش‌بینی‌های انجام شده جهت تولید هیدروژن با آلودگی کم و قیمت پایین محقق خواهد شد.

۶-۳- کاهش هزینه‌های تولید توده پیل سوختی

با روش‌های متعدد و نوینی مانند بهبود میدان جریان با روش‌های میدان جریان همراه با مانع [۴۱]، میدان جریان همراه با فوم فلزی [۴۲]، میدان جریان پینی، میدان جریان لانه زنبوری [۴۳]، میدان جریان ماریچ [۴۴]، میدان جریان درختی [۴۵] می‌توان عملکرد پیل سوختی را بهبود بخشید و نیز هزینه ساخت توده پیل سوختی به ازای یک توان مشخص را نیز کاهش داد.

۶-۴- پیوندزنی یا استفاده هیبریدی از پیل‌های سوختی با سیستم‌های ذخیره انرژی مانند باتری و ابرخازن

ایده‌های بکارگیری ترکیبی از پیل‌های سوختی با سیستم‌های ذخیره انرژی مانند باتری و ابرخازن یکی از راهکارهای کاهش هزینه است [۴۶]. از جمله روش‌های پیوندزنی می‌توان به پیوندزنی پیل سوختی و باتری [۴۷]، پیل سوختی و ابرخازن [۴۸]، پیوند سه‌گانه پیل سوختی، باتری و ابرخازن [۴۹]، پیوند سه‌گانه پیل سوختی، باتری و پیل فوتوولتائیک [۵۰] اشاره کرد.

۶-۵- افزایش دانسیته توان حجمی پیل سوختی

از روش‌های مختلفی برای کاهش حجم توده پیل سوختی در یک توان مشخص استفاده می‌شود. از جمله استفاده از صفحات دو قطبی فلزی به جای صفحات گرافیتی، بهینه سازی و طراحی‌های جدید میدان جریان (موارد مطرح شده در بخش ۶-۳)، طراحی بهینه منیفولد و اصلاح فناوری مونتاژ توده پیل سوختی [۵۱]. برای مثال خودروی هوندا Clarity با

طراحی میدان جریان موجی شکل توانسته تا ۵۰ درصد حجم توده پیل سوختی را کاهش دهد [۲۸].

۷- بازار خودروهای پیل سوختی در دنیا

FCEVهای موجود در بازار تا به امروز، تولیدکنندگان آن و مشخصات ویژه آنها در جدول (۷) آورده شده‌است. موارد ذکر شده در جدول همه از پیل سوختی PEM استفاده شده‌است. بر اساس جدول (۷) راندمان خودروی هیوندای ix۳۵ از ۷۵ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۱۴ به ۱۰۵ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۲۲ و راندمان خودروی هیوندای NEXO از ۸۹ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۱۸ به ۱۱۹ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است. این معادل افزایش سالانه ۵٪ و ۴/۸۲٪ برای دو مدل است [۵۲]. شرکت‌های تویوتا و هوندا مجموعه‌های FC خود را تولید می‌کنند و کمپانی‌های دیگر مانند هیوندای FC را از تولیدکننده می‌خرند.

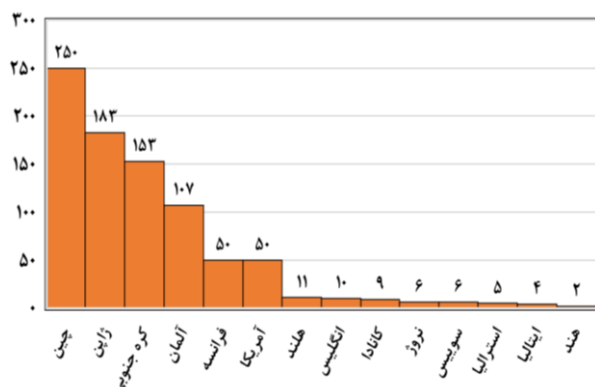
جدول ۷ مشخصات تعدادی از FCEVهای تولیدشده توسط تولیدکنندگان خودرو [۵۲]

نام خودرو	مدل خودرو	برد (کیلومتر)	راندمان (km/kg)	توان FC بر حسب (KW)
Citroen e-Jumpy	۲۰۲۲	۴۰۰	۹۱	۱۰۰
PEUGEOT e-Expert	۲۰۲۲	۴۰۰	۹۱	۱۰۰
Opel Vivaro-e	۲۰۲۲	۴۰۰	۹۱	۱۰۰
Mercedes-Benz GLC	۲۰۲۲	۴۷۸	۱۲۰	۱۴۲
Honda Clarity	۲۰۲۲	۵۸۹	۱۱۸	۱۳۰
Honda FCX Clarity	۲۰۰۸	۳۸۴	۱۰۷	۱۰۰
Toyota MIRAI II	۲۰۲۲	۶۵۰	۱۱۶	۱۳۶
Toyota MIRAI	۲۰۲۲	۶۵۰	۱۱۶	۱۸۶
Toyota MIRAI	۲۰۱۵	۴۹۹	۱۰۰	۱۱۵
Hyundai ix۳۵	۲۰۲۲	۵۹۴	۱۰۵	۱۰۰
Hyundai NEXO	۲۰۲۲	۷۵۶	۱۱۹	۱۲۰
Hyundai ix۳۵	۲۰۱۴	۴۲۴	۷۵	۱۰۰
Hyundai NEXO	۲۰۱۸	۵۶۶	۸۹	۱۲۰

۸- نقشه راه و پیش‌بینی آینده خودرو پیل‌سوختی

با در نظر گرفتن مزایای خودروهای پیل‌سوختی و راهکارهای برطرف شدن چالش‌های موجود، تقاضا برای این خودروها افزایش خواهد یافت. وسعت بازار وسایل نقلیه با سوخت هیدروژن در سال ۲۰۱۸ در حدود ۶۵۱/۹ میلیون دلار بود و بنا شده که این رقم در سال ۲۰۲۶ به ۴۲۰۳۸/۹ میلیون برسد که نشان‌دهنده نرخ رشد ترکیبی سالانه ۶۶/۹٪ از ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۶ خواهد بود [۵۳]. آخرین پیش‌بینی‌ها تخمین می‌زند که در سال (۲۰۲۵) ۳۴۵۰۰ خودرو پیل‌سوختی و در سال (۲۰۲۸) ۶۵۶۰۰ خودرو پیل‌سوختی در جاده‌های کالیفرنیا وجود خواهد داشت [۵۴].

افزایش تعداد خودرو پیل‌سوختی به معنی افزایش تقاضای هیدروژن در دهه پیش رو است. لذا کشورها در کنار خودرو پیل سوختی، تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن (HRS) خود را نیز افزایش داده‌اند. در شکل (۲) تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن تا پایان سال ۲۰۲۲ در ۱۴ کشور پیشرو دنیا نشان داده شده است. براساس گزارش جدید آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۲۳، ۱۰۲۰ ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن در سال ۲۰۲۲ در سراسر جهان فعال بوده است که چین بیشترین جایگاه را دارد [۱۲]. سه کشور برتر که هر سه بیش از ۱۰۰ HRS دارند، به ترتیب چین (۲۵۰)، ژاپن (۱۸۳) و کره جنوبی (۱۵۳) هستند. در ژاپن نقشه راه برای سال ۲۰۲۵ احداث ۳۲۰ ایستگاه سوخت هیدروژن می‌باشد [۵۵]. براساس بیانیه سال ۲۰۱۵ وزارت محیط زیست کره جنوبی، نصب ۵۲۰ ایستگاه هیدروژن تا سال ۲۰۳۰ هدف‌گذاری شده است [۵۶].



شکل ۲ ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن تا پایان سال ۲۰۲۲ در ۱۴ کشورهای دنیا [۲۷]

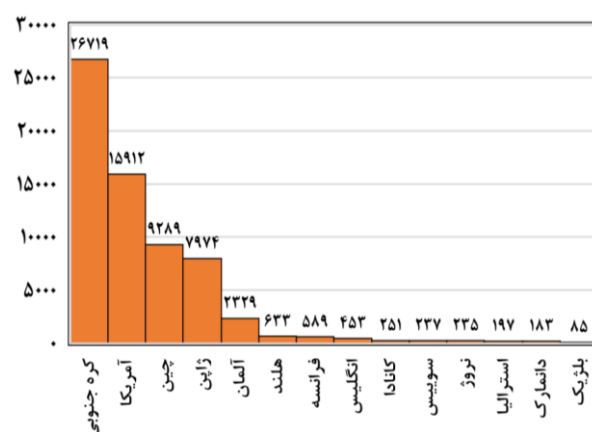
یک پارامتر مهم جهت ارزیابی توسعه کشورها در زمینه خودرو پیل سوختی، نسبت تعداد جایگاه‌های سوخت هیدروژن

جدول (۸) آمار تعداد خودروهای FCEV در جاده‌های چند کشور پیشرو در پایان سال ۲۰۱۹ و پایان سال ۲۰۲۲ آورده شده است. مطابق جدول (۸) کره جنوبی با افزودن بیش از ۲۱۰۰۰ خودرو پیل‌سوختی فقط در طی ۳ سال بیشترین سهم اضافه شده خودرو پیل‌سوختی را به خود اختصاص داده و توانسته در رتبه اول قرار بگیرد. در طی این ۳ سال چین کمترین میزان اضافه شدن را داشته است [۲۷].

جدول ۸ تعداد خودروهای FCEV در جاده‌های چند کشور پیشرو در پایان سال ۲۰۱۹ و پایان سال ۲۰۲۲ [۲۷] [۲] [۵]

کشور	پایان سال ۲۰۱۹	پایان سال ۲۰۲۲
آلمان	۱۰۸۳	۲۳۲۹
ژاپن	۴۰۰۰	۷۹۷۴
آمریکا	۹۲۵۲	۱۵۹۱۲
چین	۸۴۴۳	۹۲۸۹
کره جنوبی	۵۰۳۸	۲۶۷۱۹

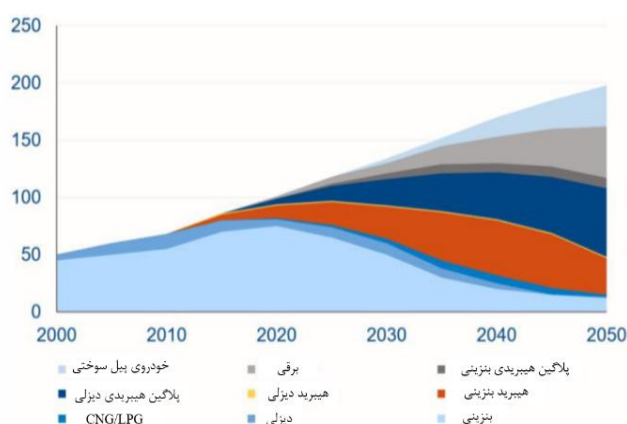
در شکل (۱) نمودار FCVها در ۱۴ کشور پیشرو تا پایان سال ۲۰۲۲ نشان داده شده است. مطابق شکل کره جنوبی از نظر تعداد FCV در جاده‌های خود با ۲۶۷۱۹ وسیله نقلیه، پیش‌تاز است. آمریکا با ۱۵۹۱۲ وسیله نقلیه در رتبه دوم قرار دارد و پس از آن چین و ژاپن قرار دارند.



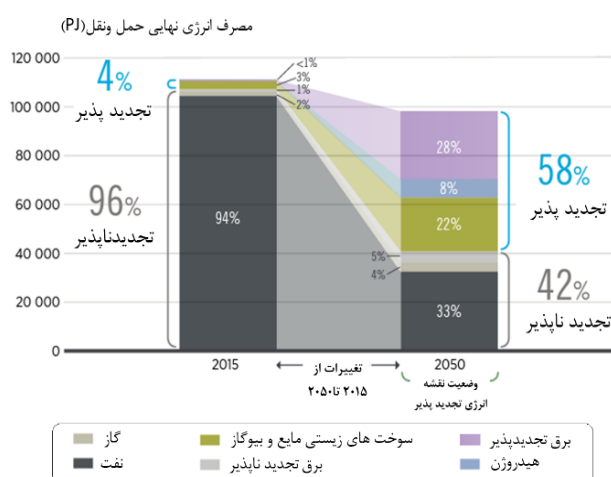
شکل ۱ آمار FCVهای در جاده در ۱۴ کشور پیشرو تا پایان سال ۲۰۲۲ [۲۷]

بیشترین تعداد از خودروهای پیل‌سوختی را خودروهای سواری با ۸۲ درصد به خود اختصاص داده است. ۹/۲ درصد اتوبوس‌ها را شامل می‌شود. کامیون‌های متوسط، کامیون‌های سنگین و خودروهای تجاری سبک هم به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند [۴۰].

مربوط به استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت حمل و نقل باشد که مهم‌ترین مصداق آن خودرو پیل سوختی است.



شکل ۳ حجم فروش خودروهای پیل سوختی بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی [۵۸]



شکل ۴ تفکیک مصرف نهایی انرژی در بخش حمل و نقل، بر اساس منبع [۵۹] (PJ/year)

برای اینکه خودروهای الکتریکی، جایگزین امیدوار کننده‌ای برای خودروهای احتراق داخلی شوند، کاهش هزینه این وسایل نقلیه باید در دستور کار قرار گیرد. با توجه به تجزیه و تحلیل هزینه‌ها، نتیجه گرفته شده‌است که هزینه وسایل نقلیه پیل سوختی و باتری‌دارها، که پر هزینه‌ترین گزینه‌ها در سال ۲۰۱۶ بودند، در سال ۲۰۵۰ بسیار نزدیک به انواع خودروهای دیگر از جمله بنزینی بشود [۶۰]. هزینه وسایل نقلیه سبک مسافری برای ایالات متحده در سال ۲۰۱۵ و تخمین کاهش هزینه‌ها بر اساس داده‌های IEA در شکل (۵) ارائه شده‌است. کاهش هزینه پیل سوختی به ۵۰ دلار در هر کیلووات و هزینه باتری به ۱۰۰ دلار در هر کیلووات ساعت می‌تواند تصمیم اقتصادی در خودروهای پیل سوختی را تغییر دهد.

به تعداد خودرو پیل سوختی است. این نسبت نشان می‌دهد که تا چه میزان مدیران تصمیم گیرنده نگرش چند بعدی داشته‌اند و متناسب با افزایش خودرو به افزایش جایگاه سوخت نیز اقدام کرده‌اند. آمار پنج کشور پیشرو با توجه شکل (۱) و شکل (۲) ارائه شده‌است. بالاترین نسبت یعنی بهترین وضعیت متعلق به فرانسه و سپس به ترتیب ایتالیا و آلمان می‌باشد.

جدول ۹ آمار نسبت تعداد جایگاه‌های سوخت هیدروژن به تعداد خودرو پیل سوختی در پنج کشور پیشرو [۵]، [۲۷]

کشور	نسبت تعداد جایگاه‌های سوخت به ازای هر ۱۰۰ خودرو پیل سوختی
فرانسه	۸/۵
ایتالیا	۶/۱
آلمان	۴/۶
کانادا	۳/۶
چین	۲/۷

افزایش امنیت استفاده از هیدروژن و بالا رفتن تعداد ایستگاه‌های سوخت، فاکتورهایی هستند که تقاضا برای این وسایل را افزایش می‌دهند. واضح است که اگر رانندگان بتوانند به آسانی به این گونه ایستگاه‌ها دسترسی داشته باشند میزان تمایل آنها به FCEV بیشتر می‌شود. در نتیجه، ناگزیر تعداد ایستگاه‌های سوخت هیدروژن در ۱۰ سال آینده افزایش می‌یابد [۵۷].

در شکل (۳) پیش‌بینی‌های حجم فروش خودروی پیل سوختی را بر اساس سناریوی ترکیبی انواع پیش‌رانه‌ها برای بلندمدت (میلیون واحد سالانه) نشان داده شده‌است [۵۸]. با در نظر گرفتن سناریوی مشابه، آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) سهم بازار خودروی پیل سوختی را در حدود ۱۷ درصد تا سال ۲۰۵۰ (۳۵ میلیون واحد فروش سالانه) پیش‌بینی می‌کند. باید توجه شود که این امر نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجهی در زیرساخت هیدروژن ایجاد می‌کند. برای هر یک از ۱۵۰ میلیون FCEV فرضی فروخته شده تا سال ۲۰۵۰، حدود ۹۰۰ تا ۱۹۰۰ دلار باید برای توسعه زیرساخت‌های هیدروژنی هزینه شود [۲].

نقشه راه انرژی‌های تجدیدپذیر (Roadmap) تا سال ۲۰۵۰ که توسط آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA) تدوین شده‌است [۵۹]، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده‌است، اگر مطابق این نقشه راه عمل شود، باید در سال ۲۰۵۰ هشت درصد مصرف انرژی در بخش حمل و نقل

کشور با حمایت کمیته راهبری پیل سوختی انجام شده بود [۶۲].

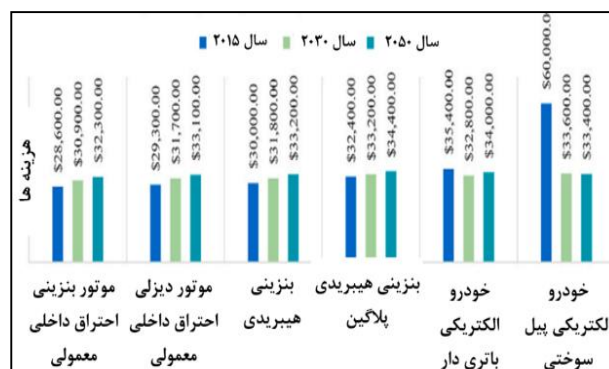
کمیته راهبری پیل سوختی متأسفانه از سال ۹۲ منحل گردید و کشور از اهداف تعیین شده در سند راهبردی پیل سوختی به کلی دور شد.

۹-۲- ظرفیت‌های موجود و ارائه راهکار برای دست یابی به خودرو پیل سوختی در ایران

بیش از ۱۵ مرکز پژوهشی در دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌های سراسر کشور بطور خاص با موضوع پیل سوختی فعالیت می‌کنند. اعضای هیات علمی از دانشگاه‌های سراسر کشور در هزاران مقاله در مجلات معتبر نمایه شده در WOS با کیفیت Q۱ به چاپ رسانده‌اند. تا کنون ۱۱ سمینار و ۵ همایش برگزار شده است که در هر یک از آنها ده‌ها مقاله از سراسر کشور از رشته‌های مختلف شیمی، فیزیک، مهندسی مکانیک، مهندسی برق، مهندسی صنایع، مهندسی شیمی و مهندسی مواد آخرین دستاوردهای خود را در زمینه پیل سوختی ارائه داده‌اند؛ لذا ظرفیت محققان و اساتید ظرفیت بالا و بسیار آماده‌ای است تا ایران نیز بتواند وارد عرصه ساخت خودرو پیل سوختی بشود. به همین دلیل می‌توان گفت از لحاظ تولید استک پیل سوختی مورد نیاز خودرو و نیز زیرساخت‌های هیدروژنی از نظر علمی و فنی در ایران با چالش جدی مواجه نیستیم. قطعاً توجه اقتصادی از جمله هزینه‌های مرتبط با تولید و توزیع هیدروژن جدی‌ترین چالش در ایران است. بنابراین جهت تامین منابع مالی، نهادهای مسول می‌توانند با حمایت و تسهیل شرایط، بانک‌ها و بنگاه‌ها و فعالان اقتصادی را دعوت به همکاری نمایند. همچنین به منظور توسعه خودروهای پیل سوختی در ایران می‌توان از زیرساخت‌های کشور از جمله ظرفیت‌های پالایشگاهی و نیروگاهی در جهت تولید هیدروژن بهره برد. بعلاوه این امکان وجود دارد که از جایگاه‌های سوخت CNG در کشور در جهت تامین گاز ایستگاه‌های شارژ هیدروژن به روش ریفورم گاز طبیعی به منظور سوخت‌گیری خودروهای پیل سوختی استفاده کرد [۶۳].

۱۰- نتیجه گیری

در این مطالعه با بررسی بخش‌های مختلف شامل چالش‌های سوخت‌های فسیلی و لزوم جایگزینی آنها با فناوری‌های نو،



شکل ۵ هزینه وسایل نقلیه سبک مسافری برای ایالات متحده در سال ۲۰۱۵ و پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ [۶۰]

۹- روند توسعه پیل سوختی در ایران

در ایران هنوز خودرو پیل سوختی ساخته نشده است لکن اقداماتی در حوزه تحقیقات و نیز ساخت استک پیل سوختی انجام شده است که در ادامه ذکر شده است.

۹-۱- سند راهبردی ملی توسعه فناوری پیل سوختی

به منظور سیاست‌گذاری متمرکز، جهت‌دهی و هماهنگی فعالیت‌های توسعه فناوری پیل سوختی، سند راهبردی ملی توسعه فناوری پیل سوختی در سال ۱۳۸۶ توسط هیئت دولت وقت تصویب گشت. بر طبق این سند یک بازه ۱۵ ساله مشخص شده بود که جمهوری اسلامی ایران بتواند جزء پنج کشور توسعه‌یافته، توانمند و صاحب‌فناوری قاره آسیا و اولین کشور منطقه در زمینه طراحی، تولید، ارتقاء و بکارگیری فناوری پیل سوختی راهبردی بشود. در این سند هدفگذاری تولید ۱۰۰ دستگاه خودرو پیل سوختی تا پایان سال ۱۴۰۱ شده بود. بدین منظور کمیته راهبری پیل سوختی در سازمان انرژی‌های نو ایران در پژوهشگاه نیرو تاسیس و فعالانه تا سال ۹۱ به حمایت و ارائه خدمات پرداخت.

راه‌اندازی سایت انرژی‌های نو طالقان به منظور پیاده‌سازی و اجرای طرح‌های نمونه هیدروژن و پیل سوختی، خرید صد نمونه کیت آموزشی پیل و اهدا به مراکز آموزش و پرورش کشور، ساخت سیستم پیل سوختی ظرفیت ۱۰ کیلووات [۶۱]، تامین، نصب و راه‌اندازی یک سیستم پیل سوختی ۲۵ کیلو وات با هدف اتصال به شبکه و تجهیزات جانبی آن در سایت انرژی‌های نو طالقان، حمایت از مقالات و پایان نامه‌های تحصیلات تکمیلی، از جمله اقداماتی بود که از سال ۸۶ تا سال ۹۱ در

قدردانی کنیم. همچنین از مرکز تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو نیز بابت حمایت های ایشان تشکر می کنیم.

۱۲- مراجع

- [1] Alcázar-García, D., and Romeral Martínez, J. L., Model-based design validation and optimization of drive systems in electric, hybrid, plug-in hybrid and fuel cell vehicles, *Energy*, Vol. 254, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123719>, (2022).
- [2] Li, Y., and Kimura, S., Economic competitiveness and environmental implications of hydrogen energy and fuel cell electric vehicles in ASEAN countries: The current and future scenarios, *Energy Policy*, Vol. 148, part B, Article ID: 111980, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111980> (2021).
- [3] Liu, T., Tang, X., Wang, H., Yu, H., and Hu, X., Adaptive hierarchical energy management design for a plug-in hybrid electric vehicle, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, pp. 11513–11522, DOI: 10.1109/TVT.2019.2926733, (2019).
- [4] Offer, G.J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., and Brandon, N.P., Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system, *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 24–29, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040> (2010).
- [5] Trencher, G., and Wesseling, J., Roadblocks to fuel-cell electric vehicle diffusion: Evidence from Germany, Japan and California, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 112, Article ID: 103458, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103458>, (2022).
- [6] Khan, U., Yamamoto, T., and Sato, H., Understanding the discontinuance trend of hydrogen fuel cell vehicles in Japan, *International Journal of Hydrogen Energy*, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.141, Vol. 47, pp. 31949–31963, (2022).
- [7] Park, C., Lim, S., Shin, J., and Lee, C.-Y., How much hydrogen should be supplied in the transportation market? Focusing on hydrogen fuel cell vehicle demand in South Korea: Hydrogen demand and fuel cell vehicles in South Korea, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 181, Article ID: 121750, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121750>, (2022).
- [8] Zhang, K., Lau, H.C., and Chen, Z., The contribution of carbon capture and storage to Canada's net-zero

آشنایی با فناوری پیل سوختی، معرفی مزایا و چالش های خودرو پیل سوختی، راهکارهای غلبه بر چالش ها و پیش بینی آینده بازار خودروهای پیل سوختی بر اساس آخرین یافته های محققین و تولیدات شرکت های بزرگ خودرو پیل سوختی و سیاست های کشورهای مختلف بررسی گردید. در راستای سیاست دولت ها جهت حرکت به سمت خودروهای برقی و پیل سوختی، کشورهای نروژ، هلند و سوئد تا سال ۲۰۳۰، انگلیس تا ۲۰۳۵، فرانسه تا سال ۲۰۴۰ و اغلب کشورهای دیگر تا سال ۲۰۵۰ ممنوعیت فروش خودروهای مبتنی بر سوخت های فسیلی را اعلام کرده اند. خودروهای پیل سوختی نسبت به خودروهای احتراق داخلی و خودروهای مبتنی بر باتری از طول عمر بالاتر، میزان آلاینده گی در حال حرکت پایین تر و بازده چاه به چرخ بالاتری برخوردار هستند. مطابق آمارها تا پایان سال ۲۰۲۲، کره جنوبی از نظر تعداد FCV در جاده های خود با ۲۶۷۱۹ وسیله نقلیه، پیشتاز است. آمریکا با ۱۵۹۱۲ وسیله نقلیه در رتبه دوم و پس از آن چین و ژاپن قرار دارند. دو مشخصه آلاینده گی و هزینه تولید بصورت تاثیر متضاد و متقابل باید ارزیابی شده و به تعادل برسد. طبق گزارش اتحادیه اروپا هزینه متوسط تولید هیدروژن از سوخت فسیلی ۱/۸ دلار به کیلوگرم است در حالیکه هزینه تولید هیدروژن از انرژی های تجدیدپذیر بین ۳ تا ۶/۶ دلار بر کیلوگرم است. با کاهش هزینه تولید هیدروژن از انرژی های تجدیدپذیر، می توان به هدف ایده آل هزینه پایین و آلاینده گی کم دست پیدا کرد. تخصیص یارانه و سیاست های تشویقی دولت ها در سال های اخیر جهت خرید خودرو پیل سوختی بسیار پر رنگ بوده است. برای مثال در کالیفرنیا در سال ۲۰۲۱، تویوتا Mirai با ۶۵ درصد تخفیف در دسترس مشتریان قرار گرفته است. در کره جنوبی نیز فروش هیوندای NEXO با ۵۰ درصد یارانه دولتی همراه بوده است. بر اساس مطالعات آژانس بین المللی انرژی (IEA) سهم بازار خودروی پیل سوختی را تا سال ۲۰۵۰ در حدود ۱۷ درصد (۳۵ میلیون واحد فروش سالانه) پیش بینی شده است. طبق پیش بینی IEA هزینه خودروهای پیل سوختی، که پر هزینه ترین گزینه ها در سال های اخیر بودند، در سال ۲۰۵۰ بسیار نزدیک به انواع خودروهای دیگر از جمله بنزینی خواهد بود.

۱۱- تشکر و قدردانی

لازم است از حمایت های عضو محترم هیات علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی جناب آقای دکتر آرش محمدی

- emissions pathway from hydrogen production to fuel cell car utilisation, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 11, pp. 360–367, DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0210>, (2017).
- [19] Maiti, T.K., Singh, J., Dixit, P., Majhi, J., Bhushan, S., Bandyopadhyay, A., Chattopadhyay, S., Advances in perfluorosulfonic acid-based proton exchange membranes for fuel cell applications: A review, *Chemical Engineering Journal Advances*, Vol. 12, Article ID: 100372, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100372>, (2022).
- [20] Djilali, N., Computational modelling of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells: challenges and opportunities, *Energy*, Vol. 32, pp. 269–280, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.08.007>, (2007).
- [21] Kasimalla, V. K., G, N.S., and Velisala, V., A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles, *International Journal of Energy Research*, Vol. 42, pp. 4263–4283, DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4166>, (2018).
- [22] Álvarez Fernández, R., Corbera Caraballo, S., Beltrán Cilleruelo, F., and Lozano, J.A., Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 655–668, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.047> (2018).
- [23] Wong, E.Y.C., Ho, D.C.K., So, S., Tsang, C.W., and Chan, E.M.H., Life cycle assessment of electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles using the greet model—a comparative study, *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 13, Article ID: 4872, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13094872>, (2021).
- [24] Kaur, G., PEM Fuel Cells: Fundamentals, Advanced Technologies, and Practical Application, *Elsevier*, (2021).
- [25] Sagaria, S., Costa Neto, R., and Baptista, P., Assessing the performance of vehicles powered by battery, fuel cell and ultra-capacitor: Application to light-duty vehicles and buses, *Energy Conversion and Management*, Vol. 229, Article ID: 113767, (2021).
- [26] Wu, H.W., and Lin, K. W., Thermodynamic analysis of hydrogen-rich syngas production with a mixture of aqueous urea and biodiesel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 6804–6814, (2018).
- [27] IPHE Country Update: Available online: <https://www.iphe.net> (accessed on 4 June 2023).
- [28] Matsunaga, M., Fukushima, T., and Ojima, K., plan, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 404, Article ID: 136901, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136901>, (2023).
- [9] Ferrero, E., Alessandrini, S., and Balanzino, A., Impact of the electric vehicles on the air pollution from a highway, *Applied Energy*, Vol. 169, pp. 450–459, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.098>, (2016).
- [10] Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., and Esfahanian, V., A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, pp. 414–430, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>, (2017).
- [11] Moon, S., Lee, Y.-J., and Lee, D.-J., A cost-effectiveness analysis of fuel cell electric vehicles considering infrastructure costs and greenhouse gas emissions: An empirical case study in Korea, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 54, Article ID: 102777, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102777>, (2022).
- [12] International Energy Agency, Global EV Outlook 2023, *Geo*, (2023).
- [13] Upham, P., The re Volution is conditional? The conditionality of hydrogen fuel cell expectations in five European countries, *Energy Research and Social Science*, Vol. 70, Article ID: 101722, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101722>, (2020).
- [14] Leibowicz, B.D., Policy recommendations for a transition to sustainable mobility based on historical diffusion dynamics of transport systems, *Energy Policy*, 2023 Elsevier Ltd, Vol. 119, pp. 357–366, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.066>, (2018).
- [15] Cano, Z.P., Siyu Ye, D.B., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z., Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets, *Nature Energy*, Vol. 3, pp. 279–289, DOI:10.1038/s41560-018-0108-1, (2018).
- [16] Bergman, N., Electric vehicles and the future of personal mobility in the United Kingdom, in *Transitions in Energy Efficiency and Demand*, Routledge, pp. 53–71, (2019).
- [17] Mekhilef, S., Saidur, R., and Safari, A., Comparative study of different fuel cell technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 981–989, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>, (2012).
- [18] Ognissanto, F., Landen, T., Stevens, A., Emre, M., and Naberezhnykh, D., Evaluation of the CO2

- DOI: DOI: 10.1109/TVT.2016.2556691, (2016).
- [39] Inayati, I., Waloyo, H. T., Nizam, M., and Saidi, H., Model-Based Simulation for Hybrid Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle, *Proceeding - 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology, ICEVT 2018*, pp. 112–115, DOI: 10.1109/ICEVT.2018.8628338, (2019).
- [40] Samsun, R.C., Rex, M., Antoni, L., and Stolten, D., Deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling station infrastructure: a global overview and perspectives, *Energies*, Vol. 15(14), pp. 4975, DOI: 10.3390/en15144975, (2022).
- [41] Bilgili, M., Bosomoiu, M., and Tsotridis, G., Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, pp. 2303–2311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.139>, (2015).
- [42] Atyabi, S. A., Afshari, E., Zohravi, E., and Udemu, C.M., Three-dimensional simulation of different flow fields of proton exchange membrane fuel cell using a multi-phase coupled model with cooling channel, *Energy*, Article ID: 121247, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121247>, (2021).
- [43] Atyabi, S.A., and Afshari, E., Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 214, pp. 738–748, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.293>, (2019).
- [44] Toghyani, S., Afshari, E., Baniasadi, E., and Atyabi, S.A., Thermal and electrochemical analysis of different flow field patterns in a PEM electrolyzer, *Electrochimica Acta*, pp. 234–245, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.078>, (2018).
- [45] Lorenzini-Gutierrez, D., Hernandez-Guerrero, A., Ramos-Alvarado, B., Perez-Raya, I., and Alatorre-Ordaz, A., Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell using tree-shaped designs for flow distribution, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 14750–14763, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.012>, (2013).
- [46] Koubaa, R., and krichen, L., Double layer metaheuristic based energy management strategy for a Fuel Cell/Ultra-Capacitor hybrid electric vehicle, *Energy*, Vol. 133, pp. 1079–1093, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.070>, (2017).
- Advances in the power train system of Honda FCX clarity fuel cell vehicle, *SAE International*, DOI: 10.4271/PT-143/5, (2009).
- [29] Nakagaki, N., The newly developed components for the fuel cell vehicle, Mirai, *SAE Technical Paper*, DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1174>, (2015).
- [30] Jiao, J., Li, J., and Bai, Y., Ethanol as a vehicle fuel in China: A review from the perspectives of raw material resource, vehicle, and infrastructure, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 180, pp. 832–845, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.141>, (2018).
- [31] Tong, F., and Azevedo, J.M.I., A review of hydrogen production pathways, cost and decarbonization potential, In *Riding the Energy Cycles, 35th USAEE/IAEE North American Conference, Nov 12-15*, International Association for Energy Economics, (2017).
- [32] DOE, “Hydrogen Production: Electrolysis” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.
- [33] Albatayneh, A., Juaidi, A., Jaradat, M., and Manzano-Agugliaro, F., Future of Electric and Hydrogen Cars and Trucks: An Overview, *Energies*, Vol. 16(7), pp. 3230, DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073230>, (2023).
- [34] “IDTechEx” [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-article/fuel-cells-are-not-the-problem-the-hydrogen-fuel-is/25913>. [Accessed: 14-Feb-2022].
- [35] Ji, M., and Wang, J., Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 38612–38635, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>, (2021).
- [36] Wang, J., Wang, H., and Fan, Y., Techno-economic challenges of fuel cell commercialization, *Engineering*, Vol. 4, pp. 352–360, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.007>, (2018).
- [37] Sun, K., and Li, Z., Quantitative risk analysis of life safety and financial loss for road accident of fuel cell vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 8791–8798, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.065>, (2019).
- [38] Zhang, J., Yao, H., and Rizzoni, G., Fault diagnosis for electric drive systems of electrified vehicles based on structural analysis, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, pp. 1027–1039,

- [55] Fuse, M., Noguchi, H., and Seya, H., Near-term location planning of hydrogen refueling stations in Yokohama City, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, Issue 23, pp. 12272-12279, DOI: DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.09.199, (2021).
- [56] Kim, J.H., Kim, H.J., and Yoo, S.H., Willingness to pay for fuel-cell electric vehicles in South Korea, *Energy*, Vol. 174, pp. 497–502, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.185>, (2019).
- [57] Asif, U., and Schmidt, K., Fuel cell electric vehicles (Fcev): Policy advances to enhance commercial success, *Sustainability*, Vol. 13, p. 5149, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13095149>, (2021).
- [58] Manoharan, Y., Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect, *Applied Sciences*, Vol. 9, Article ID: 2296, DOI: <https://doi.org/10.3390/app9112296>, (2019).
- [59] IRENA International Renewable Energy Agency and I. Renewable Energy Agency, *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 (2019 Edition)*, (2019).
- [60] Balali, Y., and Stegen, S., Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, Article ID: 110185, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110185>, (2021).
- [61] Ashraf khorasani, M R., Goorabi, H., Dashti, I., Gholami jourshari, M., D, *IJE*, (2015).
- [62] Baharlou-Houreh, N., Rajabi, F., and Afshari, E., The development of polymer fuel cells in the world and Iran, *Third Annual Clean Energy Conference*, 3-4 July, Kerman, Iran, (2013). (In Persian)
- [63] Torabi, M., Bozorgmehri, S., and Golmohammad, M., Future study of application of Fuel Cells and Batteries in electrical vehicles (EVs), *The national technological requirements Niroom Research Institute (NRI)*, https://press.nri.ac.ir/book_400863.pdf, DOI: 10.30503/nripress.2020.104, (2020). (In Persian)
- [47] Saib, S., Hamouda, Z., and Marouani, K., Energy management in a fuel cell hybrid electric vehicle using a fuzzy logic approach, in *2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICEE-B.2017.8192197, (2017).
- [48] Yang, B., Design and implementation of Battery/SMES hybrid energy storage systems used in electric vehicles: A nonlinear robust fractional-order control approach, *Energy*, Vol. 191, Article ID: 116510, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116510>, (2020).
- [49] García, P., Fernández, L.M., Torreglosa, J. P., and Jurado, F., Operation mode control of a hybrid power system based on fuel cell/battery/ultracapacitor for an electric tramway, *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 39, pp. 1993–2004, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.04.022>, (2013).
- [50] Ezzat, M.F., and Dincer, I., Development, analysis and assessment of fuel cell and photo Voltaic powered vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 968–978, (2018).
- [51] Wang, G., Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review, *Fuel Processing Technology*, Vol. 179, pp. 203–228, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.065>, (2018).
- [52] Selmi, T., Khadhraoui, A., and Cherif, A., Fuel cell-based electric vehicles technologies and challenges, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.29, pp.78121–78131, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23171-w>, (2022).
- [53] İnci, M., Büyük, M., Demir, M.H., and İlbey, G., A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 137, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>, (2021).
- [54] Air Resources Board, Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development, *California Environmental Protection Agency*, July, (2021).