

مطالعه و شبیه سازی تأثیر پوشش پانل فتوولتائیک روی سقف گلخانه بر نور مورد نیاز محصول

چکیده: در تحقیق پیش رو، دو فاکتور مهم سایه اندازی و نوردهی روزانه ناشی از پوشش سقف گلخانه با پانل فتوولتائیک برای یک گلخانه نمونه خورشیدی تک دهانه ۶۰ مترمربعی با سقف شیبدار ۲۰ درجه در شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفت. ارزیابی با دو روش تقریبی (منتج شده از کد ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه کشور) و روش دقیق (شبیه سازی با نرم افزار دیزاین بیلدر) انجام شده و نتایج بدست آمده ابتدا با یکدیگر و سپس با داده های تجربی یک گلخانه خورشیدی واقع در اروپا مقایسه شد. بررسی نتایج نشان می دهد در اکثر محصولات گلخانه ای، نور مورد نیاز محصول تا نرخ پوشش ۵۰ درصد از کل سقف گلخانه توسط صفحات خورشیدی به خوبی تأمین می شود. همچنین مقایسه روش تقریبی و شبیه سازی بیانگر این حقیقت است که در ماه هایی از سال با شدت تابش اندک، خطای اندازه گیری فاکتور سایه اندازی با روش تقریبی قابل توجه بوده و در حدود ۲۴ درصد می باشد، اما در ماه های با شدت تابش زیاد این درصد خطا به میزان ۴ درصد کاهش یافته که قابل چشم پوشی است.

واژه های راهنما: گلخانه خورشیدی، پانل فتوولتائیک، نرخ پوشش، فاکتور سایه اندازی، پارامتر نوردهی روزانه، نرم افزار دیزاین بیلدر، شبیه سازی نور طبیعی

سیاوش منیعی
دانشجوی دکتری

مهدی معرفت*

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مصطفی محمودی

فارغ التحصیل دکتری،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی،
تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

Siavash Maniee
PhD Candidate

Mehdi Maerefat*
Professor,

Faculty of Mechanical
Engineering,
Tarbiat Modares University,
Tehran

Mostafa Mahmoodi
PhD Alumni,

Department of Mechanical
Engineering, K. N. Toosi
University of Technology,
Tehran

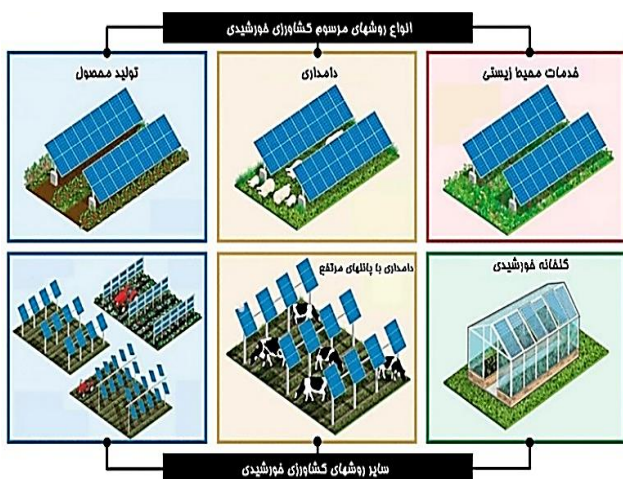
Study and simulation of the effect of roof-mounted photovoltaic panels of the greenhouse on the crop light

Abstract: In the present study, the average shading factor resulting from the percentage of roof coverage with photovoltaic panels was investigated for a 60-m² single-span solar greenhouse with a 20-degree pitched roof, located in Tehran. The evaluation was carried out using two approximate method (derived from code 474 of the National Planning and Budget Organization) and exact method (daylighting simulation by Design Builder software), and then the results were compared with each other and with experimental data from a solar greenhouse in Europe. The results indicate that the required crop light is well supplied up to a roof coverage ratio of 50 percent by photovoltaic panels. In addition, comparing two approximate and simulation methods reveals the fact the percentage error of shading factor between approximate and simulation methods for low-irradiance months is significant (nearly 24%), while the same error decreases to around 4% for high-irradiance months of the year, which is negligible.

Keywords: Solar greenhouse, Photovoltaic panel, Coverage ratio, Shading factor, DLI factor, Design Builder software, Daylighting simulation

۱- مقدمه

تعیین‌کننده بوده که برای به حداکثر رساندن انرژی خورشیدی جذب شده در پانل‌ها و محصولات کشاورزی باید مورد توجه قرار گیرند. در این میان، متغیر اصلی در نظر گرفته شده زاویه شیب صفحات خورشیدی است، البته متغیرهای دیگری نیز مانند موقعیت جغرافیایی نصب، نوع محصول انتخابی، ارتفاع پانل و شدت تابش خورشید در بهینه شدن سیستم مؤثر است [۴].



شکل ۱ معرفی شاخه‌های مختلف کشاورزی خورشیدی [۴]

استفاده دوگانه از زمین برای کشاورزی و تولید انرژی می‌تواند رقابت برای منابع زمین را کاهش دهد و فشار کمتری را برای تبدیل مناطق طبیعی به زمین‌های کشاورزی بیشتر ایجاد کند. شبیه‌سازی‌های اولیه در پژوهشی توسط دوپراز و همکاران در سال ۲۰۱۱ انجام شد که نشان می‌داد کارایی کاربری زمین می‌تواند ۶۰ الی ۷۰ درصد در سیستم‌های کشاورزی خورشیدی افزایش یابد [۳]. همچنین یک مطالعه تجزیه و تحلیل چرخه زندگی نشان داد که سیستم مذکور مبتنی بر مرتع دارای یک هم‌افزایی دوگانه است که در نتیجه آن انتشار گازهای گلخانه‌ای ۶۹/۳ درصد کاهش یافته و ۸۲/۹ درصد انرژی فسیلی کمتری نیز در مقایسه با تولید سنتی نیاز است [۵].

استفاده از گلخانه خورشیدی از طریق نصب پانل‌های فتوولتائیک به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که اصلی‌ترین آنها عبارتند از [۶]:

- نصب صفحات خورشیدی به صورت ثابت روی سقف گلخانه و با چیدمان‌های مختلف
- نصب پانل‌های متحرک روی سقف با قابلیت تنظیم زاویه
- نصب پانل‌های فتوولتائیک نوین با قابلیت عبور نور

رشد مناسب و کیفیت نهایی محصولات گلخانه‌ای، ارتباط مستقیمی با میزان و طول موج نور دریافتی آنها دارد. لذا شناخت پارامترهای کمی و کیفی نور داخل گلخانه و همچنین اثرات انواع سایه‌اندازها بر میزان نور جذب‌شده توسط محصول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عمده‌ترین منبع انرژی نوری گیاه در گلخانه از طریق نور مستقیم خورشید در طول روز است. البته در مواقعی که نور خورشید به دلیل موقعیت جغرافیایی محل و یا شرایط نصب گلخانه جابگویی رشد مناسب گیاه نباشد، می‌توان از منابع نوری مصنوعی به‌عنوان منابع نوری جایگزین استفاده کرد که اصلی‌ترین آنها عبارتند از: لامپ فلورسنت، متال هالید، سدیم پرفشار، و لامپ دیود نوری [۱].

گلخانه‌های تجاری با توجه به مصرف قابل توجه انرژی حرارتی و الکتریکی جزء صنایع انرژی بر طبقه‌بندی می‌شوند. به همین دلیل در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنار نرخ تولید و رشد محصول باکیفیت در گلخانه‌ها اهمیت دو چندان یافته است.

یکی از روش‌های نوین تولید انرژی پاک و کاهش مصرف انرژی در گلخانه‌های امروزی، تبدیل گلخانه سنتی^۲ به خورشیدی^۳ از طریق به‌کارگیری پانل‌های فتوولتائیک^۴ (صفحات خورشیدی تولید الکتریسیته) قابل نصب روی سقف گلخانه بوده که در واقع یکی از شاخه‌های علم جدید کشاورزی خورشیدی^۵ است.

علم کشاورزی خورشیدی نوعی کاربری دوگانه از مساحت در دسترس برای تولید همزمان برق خورشیدی و محصولات کشاورزی است [۲]. مزیت عمده این روش تولید همزمان برق و محصول بدون نیاز به افزایش مساحت کشت بوده، که البته این امر نیازمند مطالعه جامع اثرات سایه‌اندازی پانل‌ها بر کیفیت محصول تولیدی، نرخ تولید انرژی و سایر پارامترهای تعیین‌کننده رشد گیاه در محل کشت است.

فناوری کشاورزی خورشیدی ابتدا توسط گوتزبرگر و زاسترو در سال ۱۹۸۲ ارائه شد [۳]. این روش جدید به‌کار رفته در کشاورزی دارای سه تقسیم‌بندی اصلی بوده که عبارتند از (شکل ۱):
 (۱): نصب صفحات خورشیدی با فاصله از محصولات در مزارع، صفحات خورشیدی نصب شده در بالای محصولات، و پانل‌های خورشیدی گلخانه‌ای. هر سه روش فوق دارای متغیرهایی

⁴ Photovoltaic Panel (PV)

⁵ Agrivoltaics, Agrisolar, or Dual-Use Solar

¹ LED: Light Emitting Diode

² Traditional Greenhouse

³ Solar Greenhouse or Photovoltaic Greenhouse (PVG)

اصولاً در گلخانه‌های خورشیدی، محدودیت اصلی میزان جذب نور محصول است و در شرایطی که نور دریافتی گیاه از میزان نور مورد نیاز کمتر شود، کیفیت محصول افت خواهد کرد.

در شکل (۲) سه نوع اصلی نصب پانل‌های فتوولتائیک نشان داده شده است. روش اول پرکاربردترین و کم هزینه‌ترین روش نصب می‌باشد؛ اما توجه به نرخ جذب نور محصول بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۲ روش‌های اصلی نصب پانل فتوولتائیک برای گلخانه خورشیدی؛ الف- نصب پانل به صورت ثابت بر روی سقف [۷]، ب- نصب به صورت دینامیکی و متحرک [۸]، ج- پانل‌های جدید ابداعی با قابلیت عبور نور [۹]

نماید. در واقع این نسبت سایه‌ای را فراهم می‌کند که با کشت گلخانه‌ای سازگار است.

در سال ۲۰۲۰، تحقیقی توسط لی و همکاران [۱۲] برای امکان‌سنجی نصب صفحات خورشیدی دینامیکی روی سقف یک گلخانه بر تولید همزمان برق و محصول انجام شد. نتایج نشان داد در روزهای ابری که نرخ تولید برق صفحات تا حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد، می‌توان با تنظیم زاویه پانل‌های PV، تولید برق و نور مورد نیاز محصول را به حد مجاز افزایش داد. تولدو و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۱، به ارزیابی توصیفی روش‌ها و چیدمان‌های گوناگون نصب صفحات خورشیدی در سقف گلخانه پرداختند.

بررسی تحقیقات مختلف نشان داد ماژول‌های PV غیرشفاف (مات) معمولی قابلیت ایجاد سایه داشته و در نتیجه به‌طور قابل توجهی بر شرایط داخل گلخانه (دمای هوا، رطوبت نسبی، سطح نور و غلظت دی‌اکسید کربن) و بهره‌وری تأثیر می‌گذارند. برای به حداقل رساندن این اثر، یک رویکرد استفاده از ماژول‌های PV نیمه‌مات جزئی^۱ یا کاملاً شفاف با قابلیت تولید برق است. در صورت به‌کارگیری پانل‌های مات، تابش خورشیدی به‌طور غیر یکنواخت توزیع می‌شود که به‌صورت فصلی متفاوت است. در نتیجه، یافتن چیدمان بهینه از ماژول‌های PV در سقف گلخانه به‌منظور تعریف شرایط بهینه برای کشت گیاه ضروری است. به‌عنوان مثال، چیدمان شطرنجی یکنواختی بهتری را نشان داده و در نتیجه اثرات سایه‌زنی پانل‌های فتوولتائیک را کاهش داده است.

در سال ۲۰۱۸، بلاندو و همکاران [۱۰] برای اولین بار به بررسی رشد برخی از گونه‌های توت داخل گلخانه خورشیدی و با سطح سایه متفاوت در مقایسه با گلخانه سنتی پرداختند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که گلخانه با نرخ پوشش ۱۰۰ درصد نیز می‌تواند تحت شرایطی برای کشت برخی محصولات مقاوم در برابر سایه مانند گونه‌های توت مورد استفاده قرار گیرند. این بررسی تأیید می‌کند که محدودیت درصد سایه‌اندازی در گلخانه‌ها می‌بایست بر اساس محیط جغرافیایی کشت، نوع محصول و ساختار گلخانه به دقت مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر امکان لحاظ کردن یک درصد بهینه پوشش گلخانه برای تمامی محصولات و اقلیم‌ها وجود ندارد و نیاز است تا برای هر یک به‌صورت مجزا تحقیقات مربوطه انجام شود.

مطالعه جامعی توسط مارکو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ با تمرکز بر نصب پانل‌های PV بر عملکرد ۱۴ محصول باغی و گل‌کاری در چهار نوع گلخانه خورشیدی نصب شده در اروپا و با نسبت پوشش بین ۲۵ تا ۱۰۰ درصد انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که همه گونه‌های در نظر گرفته شده از جمله محصولات باغی که نیاز به نور زیاد دارند را می‌توان در داخل گلخانه‌های خورشیدی با نسبت پوشش ۲۵ درصد کشت کرد. اما محدودیت در رشد و عملکرد هنگامی برای این محصولات رخ داد که نسبت پوشش از حداقل ۵۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت. مطالعات بیشتر نیز با طرح‌بندی‌ها و چیدمان‌های متنوع PV در هندسه‌های سقف و نسبت‌های پوشش متفاوت، تأیید می‌کند که نسبت چگالی نسبی ماژول‌های PV مات نباید از ۵۰ درصد تجاوز

¹ Partial or Semi Opaque PV

ایجاد شده توسط دیوار ارائه داد. بیشترین اثر کاهش تشعشع مستقیم و پراکنده فرودی در گوشه‌های گلخانه مشاهده شد.

جدول (۱) خلاصه‌ای از نتایج محققان مختلف طی سال‌های اخیر را بر روی درصد پوشش مجاز گلخانه‌های خورشیدی بر اساس محصول تولیدی و موقعیت جغرافیایی نصب گلخانه ارائه داده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده و اهمیت به‌کارگیری علم کشاورزی خورشیدی در صنایع گلخانه‌ای، هدف از پژوهش حاضر مطالعه و بررسی تأثیر درصد پوشش سقف یک گلخانه نمونه در شهر تهران با پانل‌های فتوولتائیک بر ضریب سایه‌اندازی داخل فضای گلخانه و همچنین میزان تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر می‌باشد. با توجه به اثرات نامطلوب سایه‌اندازی بیش از حد بر کیفیت و کمیت محصول تولیدی گلخانه، یافتن نرخ بهینه پوشش سقف گلخانه‌ها بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

تغییرات روزانه سطح سایه در یک گلخانه خورشیدی ۴۵۰ متر مربعی تولید گوجه‌فرنگی در فصل زمستان به‌صورت تجربی و عددی توسط ژانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۳ مورد مطالعه قرار گرفت. میزان سایه ایجاد شده روی کف گلخانه بطور میانگین حدود ۲۰ درصد مساحت گلخانه گزارش شد که به‌صورت سهموی با زمان در طول روز تغییر می‌کند.

در سال ۲۰۲۳، فررا و همکاران [۱۴] به مطالعه تأثیر سایه‌اندازی ایجادشده توسط پانل‌های PV نصب شده بالای درخت انگور در ایتالیا بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ پرداختند. یافته‌های تحقیق نشان داد که پانل‌های فتوولتائیک حداکثر دمای هوا و خاک را ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دادند. از سوی دیگر نصب پانل‌ها بر ریزاقلیم و فیزیولوژی درخت انگور تأثیر گذاشته و کاهش کیفیت محصول مشاهده می‌شود.

دنگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۵] مدل جدیدی به‌منظور محاسبه توزیع تشعشع خورشیدی داخل گلخانه تحت تأثیر سایه

جدول ۱ بررسی میزان استاندارد پوشش سقف گلخانه خورشیدی با سلول PV مات بدون افت نوردهی مورد نیاز محصول

نوع محصول	موقعیت جغرافیایی	درصد پوشش	درصد مجاز پوشش	پارامتر DLI میانگین ماهانه در طول یکسال		پارامتر DLI مورد نیاز محصول		
				حداقل	حداکثر	حداقل	بهینه	حداکثر
بلک بری	جنوب ایتالیا [۱۰]	٪۳۲	٪۴۰	۱۳/۲	۳۳/۷	۵۳/۲	۱۱	۲۱
توت فرنگی	چین، استان یون نان [۱۶]	٪۲۶	٪۳۰	۲۳/۴	۳۴/۸	۴۶/۴	۱۰	۲۰
فلفل	یونان [۱۷]	٪۲۲	٪۴۵	۱۵/۹	۳۲/۶	۵۵/۷	۱۲	۲۰
کاهو	جنوب غربی یونان [۱۸]	٪۲۰	٪۷۰	۱۴/۸	۳۲/۳	۵۶/۶	۶/۵	۹
انواع گل	شمال شرقی ایتالیا [۱۹]	٪۲۰	٪۸۰	۱۹/۱	۳۲/۵	۴۷/۸	۴	۶
گوجه فرنگی	چین، استان یون نان [۲۰]	٪۲۰	٪۴۰	۲۳/۴	۳۴/۸	۴۶/۴	۲۱	۲۵

فوتون فتوسنتزی^۱ و نرخ انتگرال نور روزانه^۲ شناخته می‌شوند؛ اما پیش از معرفی پارامترهای ذکر شده، نیاز است تا پارامتر توزیع توان طیفی^۳ تعریف شود. در علم نورسنجی، پارامتر SPD به‌عنوان توان در واحد سطح در واحد طول موج یک روشنایی تعریف می‌شود که واحد آن برابر با $W/m^2.nm$ است. به‌طور کلی‌تر، اصطلاح توزیع توان طیفی می‌تواند به غلظت، به‌عنوان تابعی از طول موج هر کمیت رادیومتری یا فتومتری بیان شود. کمیسیون بین‌المللی روشنایی که به اختصار با نام فرانسوی CIE^۴ شناخته می‌شود پارامتر SPD را برای منابع مختلف نوری تعریف کرده است. در همین راستا، پارامترهای A، B و C در

۲- پارامترهای تعیین‌کننده نور مورد نیاز گیاه

به‌منظور مطالعه دقیق اثرات پوشش سقف گلخانه بر نوردهی مورد نیاز محصول، ابتدا باید پارامترهای کمی و کیفی مؤثر بر نور محصول شناسایی و معرفی شوند. کمیت، کیفیت و مدت زمان تابش نور، سه پارامتر اساسی تنظیم‌کننده رشد گیاه هستند. گیاهی که کیفیت نور مناسبی دریافت نمی‌کند ممکن است تفاوت‌های فیزیولوژیکی را در مقایسه با گیاهان مشابهی که در شرایط نوری مطلوب رشد می‌کنند، نشان دهد. دو پارامتر اصلی تعیین‌کننده کمیت نور مورد نیاز گیاه تحت عنوان چگالی شار

³ SPD: Spectral Power Distribution

⁴ CIE: The International Commission on Illumination

¹ PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density

² DLI: Daily Light Integral

تعریف شده، ضریب دیگری تحت عنوان فاکتور نور روز^۱ نیز معرفی شود. این فاکتور به صورت نسبت میزان روشنایی دریافتی در یک صفحه کاری فرضی داخل فضا به روشنایی طبیعی دریافتی یک صفحه افقی در محیط بیرون بدون مانع تعریف می شود. در محاسبه پارامتر DF، هر دو مقدار روشنایی مستقیم و غیرمستقیم جذب شده توسط صفحه کاری باید در نظر گرفته شود [۲۴].

$$DF (\%) = \frac{I_{in}}{I_{out}} \times 100 \quad (2)$$

پارامتر ضریب نوردهی میانگین^۲ (ADF) تعریف دیگری از پارامتر DF بوده که میانگین ضریب نور را برای تمامی فضای یک صفحه کاری و در طول کل یک شبانه روز بدست می آورد. این پارامتر با توجه به نیاز به ارزیابی ماهیت نوردهی مورد نیاز گیاه به صورت روزانه، بسیار حائز اهمیت است. فاکتور سایه اندازی^۳ با توجه به تعریف ضریب DF به صورت زیر تعریف می شود. این فاکتور بیانگر درصد کاهش جذب نور در یک سطح کاری ناشی از عامل سایه اندازی می باشد.

$$S_f (\%) = 100 - ADF \quad (3)$$

علاوه بر پارامترهای کمی مؤثر بر نور گیاه، فاکتورهای کیفی نیز باید مورد مطالعه قرار گیرد تا محصول در شرایط مساعد رشد نماید. کیفیت نور فرودی به توزیع طیفی نور داده شده به گیاه اشاره دارد که از طریق دو پارامتر تابش فعال فتوسنتزی^۴ و پریدوسم نوری معرفی می شود.

پارامتر تابش فعال فتوسنتزی (PAR) محدوده طیفی تابش خورشیدی را از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر مشخص می کند، که با محدوده طیفی مورد نیاز گیاهان برای فرآیند فتوسنتز مطابقت دارد [۱].

به منظور درک بهتر تفاوت پارامتر PAR و Lumen، شکل (۴) که نشان دهنده حساسیت چشم انسان (بر اساس لومن) نسبت به حساسیت گیاه در جذب نور (پارامتر PAR) برای فرآیند فتوسنتز می باشد، ارائه شده است. حساسیت چشم انسان در محدوده طول موج مرئی، بیشتر متمایل به طیف رنگی سبز و زرد است؛ اما این موضوع در خصوص گیاهان در محدوده طیف رنگی قرمز (۶۴۰ تا ۶۸۰ نانومتر) قرار می گیرد.

سال ۱۹۳۱ معرفی شدند که به ترتیب نشان دهنده نور رشته‌ای متوسط، نور مستقیم خورشید و متوسط نور روز بودند [۲۱]. در شکل (۳) پارامتر توزیع نسبی توان طیفی (SPD) نور طبیعی و چندین نمونه لامپ روشنایی از ۳۸۰ نانومتر تا ۷۸۰ نانومتر نشان داده شده است.

کمیت نور محصول به میزان نوری که یک گیاه در هر روز برای رشد مطلوب نیاز دارد اشاره می کند. کمیت نور مورد استفاده در محاسبات انرژی و یا نور دریافتی چشم انسان به ترتیب برحسب وات بر مترمربع و لوکس تعریف می شود. این در حالی است که واحدهای اشاره شده برای بررسی کمیت نور مورد نیاز گیاه چندان مفید نیستند. لذا دانشمندان علم گیاهشناسی از واحد جدیدی تحت عنوان چگالی شار فوتون فتوسنتزی برای اندازه گیری کمیت نور گیاهان بهره می برند که واحد آن میکرومول بر مترمربع-ثانیه است. پارامتر PPFD یک روش اندازه گیری صریح از مقدار فوتون‌هایی است که در هر متر مربع در ثانیه به سطح برخورد می کنند، که روشی دقیق تر برای اندازه گیری نحوه تعامل گیاهان با فوتون است.

یکی از مهم ترین پارامترهای شناسایی نور مورد نیاز گیاه که از محاسبه پارامتر PPFD حاصل می شود، به عنوان نرخ انتگرال نور روزانه یا DLI تعریف می گردد. پارامتر DLI بیانگر چگالی کل نور دریافتی یا مورد نیاز گیاه در طول یک شبانه روز است که واحد آن مول بر مترمربع-روز بوده و از طریق معادله (۱) (با فرض ثابت بودن نرخ روزانه PPFD) محاسبه می شود [۲۲]:

$$DLI = 0.0036 \times PPFD \times h \quad (1)$$

به طور کلی نیاز به نور برای یک محصول خاص در محصولاتی که تولید میوه داشته و گلدار هستند بیشتر بوده و برای محصولاتی که به صورت گیاه باقی می ماند کمتر است. سبزی‌های برگ‌دار مانند کاهو، اسفناج و کلم پیچ معمولاً محصولاتی با نور کم در نظر گرفته می شوند که به نرخ DLI حدود ۱۲ تا ۱۷ مول بر مترمربع-روز نیاز دارند. گوجه‌فرنگی، خیار و فلفل به پارامتر DLI بین ۲۰ تا ۳۰ مول بر مترمربع-روز نیاز دارند. شاهدانه یکی از بالاترین نیازهای نوری گیاهان کشت شده را دارد که به DLI حداکثر ۴۰ مول بر مترمربع-روز نیاز دارد [۲۳].

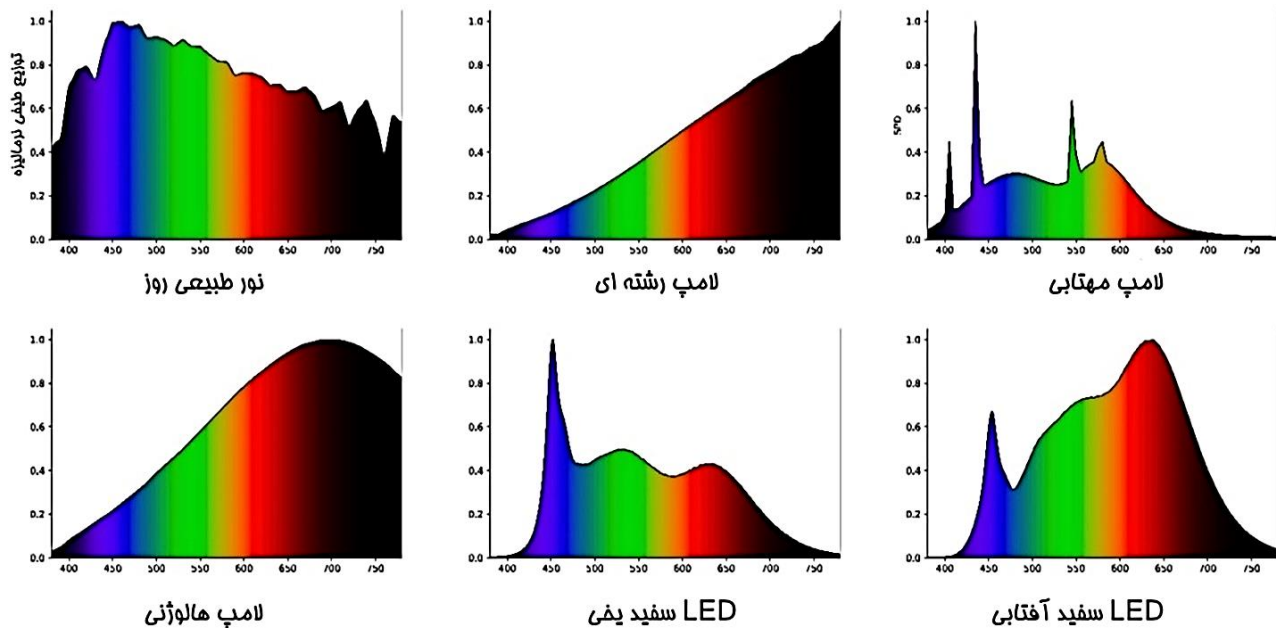
به منظور بررسی میانگین درصد سایه اندازی پانل‌های فتوولتائیک به داخل گلخانه، نیاز است تا علاوه بر دو پارامتر اصلی

³ Shading Factor (S_f)

⁴ PAR: Photosynthetically Active Radiation

¹ Daylight Factor (DF)

² Average Daylight Factor (ADF)

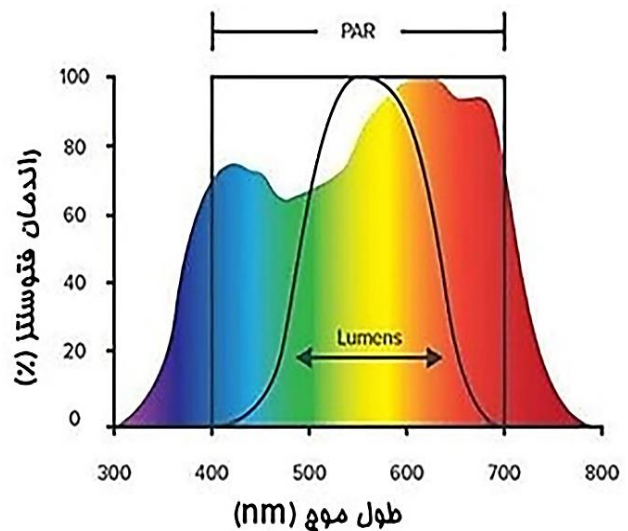


شکل ۳ توزیع نسبی توان طیفی (SPD) نور طبیعی و لامپهای مختلف از ۳۸۰ نانومتر تا ۷۸۰ نانومتر [۲۱]

در نظر گرفته شده است. سایر اطلاعات مربوطه به شرح جدول (۲) می باشد.

جدول ۲ مشخصات گلخانه نمونه مدل سازی شده

مشخصات کمی	عنوان
۱۰ متر (طول)، ۶ متر (عرض)، ۴ متر (ارتفاع تاج)	ابعاد
۲۱۰ مترمکعب	حجم
۲۰ درجه	شیب سقف
ورق پلی کربنات شفاف دو جداره ۸ میلیمتری	مشخصات
ضریب گذر نور: ۰.۷۴	پوشش
ضریب انتقال حرارت ^۶ (U-Value-W/m ² -K): ۲/۱۸	موقعیت
شهر تهران (طول جغرافیایی: ۵۱/۳۲ درجه شرقی، عرض جغرافیایی: ۳۵/۶۸ درجه شمالی، ارتفاع از سطح دریا: ۱۱۹۱ متر)	نصب



شکل ۴ منحنی تغییرات راندمان پارامتر PAR و Lumen بر حسب طول موج

۳- تعریف مسئله نمونه

محصول تولیدی گلخانه نمونه، خیار یا گوجه فرنگی در نظر گرفته شده است که نرخ بهینه پارامتر DLI آنها در حدود ۱۵ مول بر مترمربع-روز می باشد. همچنین نوع پوشش سایه اندازی سقف گلخانه، با پانل فتوولتائیک مونوکریستال مات^۷ بوده که راندمان تقریبی آن ۱۹ درصد می باشد.

به منظور شبیه سازی دینامیکی نوردهی^۱، یک گلخانه نمونه تک دهانه ای^۲ با سقف شیب دار^۳ واقع در شهر تهران در نظر گرفته شده است. موقعیت نصب گلخانه به صورت شرقی - غربی بوده، پوشش خارجی آن از جنس صفحات دو لایه پلی کربنات شفاف^۴ به ضخامت ۸ میلیمتر و همچنین سازه اصلی گلخانه از نوع فلزی

⁵ Visible Light Transmittance (VT or VLT)

⁶ Overall Heat Transfer Coefficient

⁷ Opaque (Blind-Type)

¹ Daylighting

² Single Span

³ Gable Roof

⁴ Clear Polycarbonate Twin-Wall Sheet

۴- تحلیل مسئله نمونه و بررسی نتایج

توسط انواع منابع نوری مصنوعی بدست آمده و با نرخ تولید الکتریسیته توسط پانل‌های فتوولتائیک مقایسه شده است. فاکتور نوردهی میانگین در این روش از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود و با اعمال آن در رابطه (۳) ضریب سایه‌اندازی بدست می‌آید.

$$\text{ADF} (\%) = \text{DLI}_{\text{in}} / \text{DLI}_{\text{out}} \times 100 = \text{VLT}_{\text{ev}} - \text{CR} / 100 \times (\text{VLT}_{\text{ev}} - \text{VLT}_{\text{pv}}) \quad (4)$$

در شرایطی که پانل فتوولتائیک نصب شده در سقف گلخانه از نوع کاملاً مات لحاظ شود، پارامتر VLT_{pv} برابر با صفر خواهد بود و رابطه (۴) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\text{ADF} (\%) = \text{VLT}_{\text{ev}} (1 - \text{CR} / 100) \quad (5)$$

مقادیر فاکتور ADF و ضریب سایه‌اندازی بر اساس رابطه (۵) برای حالات مختلف نرخ پوشش ۰، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ درصد و با ضریب گذر نور تعریف شده در جدول (۲) محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ محاسبه فاکتور ADF و ضریب سایه‌اندازی از روش تقریبی برای درصد پوشش‌های مختلف

فاکتور سایه‌اندازی ($S_f\%$)	فاکتور ADF (%)	درصد پوشش سقف گلخانه (% CR)
۲۶	۷۴	۰
۳۳/۴	۶۶/۶	۱۰
۴۴/۵	۵۵/۵	۲۵
۶۳	۳۷	۵۰
۱۰۰	۰	۱۰۰

شکل (۵) نرخ تغییرات ماهانه تابش خورشیدی شهر تهران را مطابق با داده‌های منتشرشده توسط بانک اطلاعاتی اطلس جهانی خورشیدی^۱ نشان می‌دهد. طول روز برای تهران از ۹/۸ ساعت تا حدود ۱۴/۴ ساعت در سال در حال تغییر است. بیشترین شدت تابش ماهانه برای شهر تهران در ماه‌های ژوئن (اوایل خرداد) تا اوت (اوایل شهریور) با زاویه تابش خورشیدی ۷۸ درجه نسبت به افق رخ می‌دهد که به طور میانگین برابر با ۱۷۰ کیلووات ساعت بر متر مربع است. در مقابل، کمترین شدت تابش مربوط به ماه‌های دسامبر و ژانویه (اواسط آذر تا دی) بوده با زاویه تابش ۳۱ درجه نسبت به افق بوده که تا ۵۵ کیلووات ساعت بر متر مربع کاهش را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، تحلیل و بررسی اثرات سایه‌اندازی پانل‌های فتوولتائیک در سقف گلخانه خورشیدی نمونه با دو روش مختلف محاسبه گردیده است.

در روش اول که به روش تقریبی (تخمینی) شناخته می‌شود، فاکتور نوردهی داخل گلخانه و به طبع آن نرخ سایه‌اندازی از روابط تخمینی که به ضریب گذر نور پوشش گلخانه مرتبط است بدست می‌آید. سپس با استفاده از ضریب بدست آمده و محاسبه پارامتر DLI بیرونی برای اقلیم محل نصب گلخانه با یکی از روش‌های مرسوم مانند نرم‌افزار آنلاین Global DLI App (این نرم‌افزار داده‌ها را از سایت Nasa Power بخش نرخ تشعشع خورشیدی جهانی دریافت می‌کند [۲۵]) یا روش تخمینی ارائه شده در نشریه ۴۷۴ وزارت جهاد کشاورزی [۲۶]، میزان DLI درون گلخانه در درصد‌های مختلف پوشش سقف با پانل‌های PV محاسبه می‌گردد.

روش دوم (روش دقیق) محاسبه پارامتر DLI داخل گلخانه با به‌کارگیری ماژول Daylighting نرم‌افزار Design Builder انجام شده است. در این روش، مدل سه بعدی گلخانه به همراه تمامی مشخصات پوسته و سازه گلخانه در نرم‌افزار مربوطه مدل گردید، سپس اطلاعات نرخ نور لحظه‌ای داخل گلخانه برای روزهای مختلف سال استخراج شده و در نهایت داده‌های نوردهی یک شبانه روز کامل برای هر روز سال محاسبه و گزارش شد.

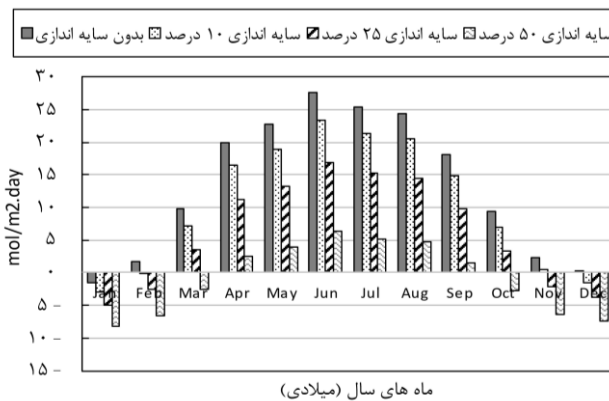
۴-۱- نتایج روش تقریبی

در روش تقریبی محاسبه فاکتور سایه‌اندازی و ضریب نوردهی میانگین، درصد نوردهی روزانه به یک صفحه افقی فرضی داخل گلخانه تنها بر اساس پارامترهای ضریب گذر نور از پوشش گلخانه و درصد پوشش عامل سایه‌اندازی (که در این تحقیق پانل‌های فتوولتائیک روی سقف می‌باشد) محاسبه می‌گردد. پس از استخراج فاکتور نوردهی میانگین، مقادیر سالانه DLI از روابط نشریه ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه کشور و یا نرم‌افزار آنلاین Global DLI App استخراج گردید. سپس میزان DLI داخل گلخانه برای درصد پوشش‌های مختلف صفر، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد پانل فتوولتائیک نصب شده در سقف محاسبه شده و با مقدار بهینه DLI محصول برای رشد مناسب مقایسه شده است. مقدار DLI بهینه محصول در این تحقیق برابر با ۱۵ مول بر مترمربع روزانه لحاظ شده است. در نهایت کمبود نور طبیعی مورد نیاز

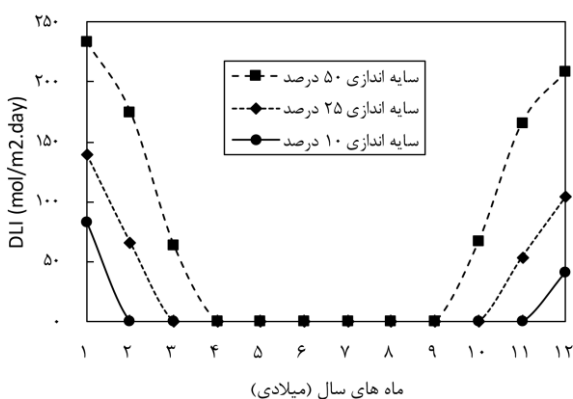
¹ Global Solar Atlas

شکل (۷) نتایج حاصل از کسری و یا مازاد نور داخل گلخانه را طی ماه‌های مختلف یکسال با توجه به درصد پوشش پانل‌های PV در سقف نشان می‌دهد. ماه‌هایی که مقدار مابه‌التفاوت DLI در آنها منفی شده است، نیازمند تأمین نور مصنوعی توسط لامپ می‌باشند. در شرایط بدون پوشش سقف، تنها در ماه‌های ژانویه و دسامبر به نور مصنوعی نیاز است؛ اما با درصد پوشش ۵۰، از ماه اکتبر تا مارس باید از نور مصنوعی استفاده شود.

محاسبه شدت نور مصنوعی مورد نیاز گلخانه با توجه به اختلاف دو عامل میزان نور طبیعی در دسترس داخل گلخانه و مقدار نور مورد نیاز گیاه بدست می‌آید. به‌منظور محاسبه تعداد و توان لامپ‌های مورد نیاز گلخانه، پارامتر PPFd طبق رابطه (۱) بر اساس مقدار کمبود DLI محاسبه می‌شود.

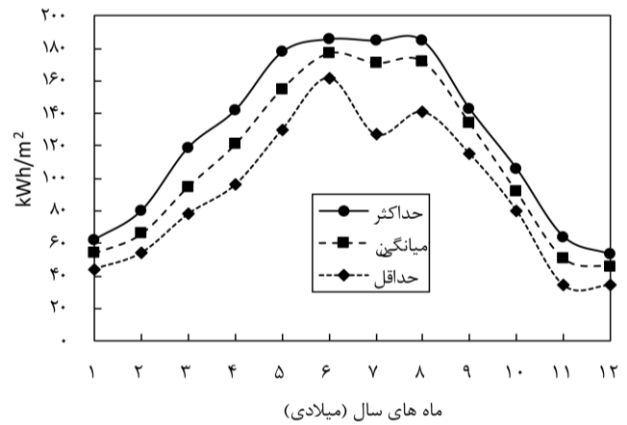


شکل ۷ میزان مازاد/کسری DLI داخل گلخانه برحسب پوشش سقف گلخانه طی یکسال در شهر تهران برای درصد‌های مختلف



شکل ۸ میزان کسری PPFd داخل گلخانه برحسب سایه‌اندازی ۵۰، ۲۵ و ۱۰ درصد برای شهر تهران

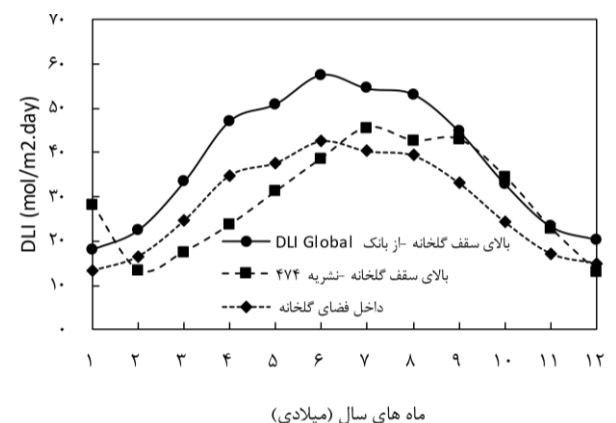
شکل (۸) نتایج محاسبه پارامتر PPFd با توجه به میزان پوشش سقف ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد و بر اساس مقدار DLI منفی ارائه شده در شکل (۷) نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، حداکثر PPFd مورد نیاز در صورت پوشش ۵۰ درصد سقف، در ماه



شکل ۶ تغییرات میانگین ماهانه DLI برحسب سایه‌اندازی ۵۰، ۲۵ و ۱۰ درصد در شهر تهران

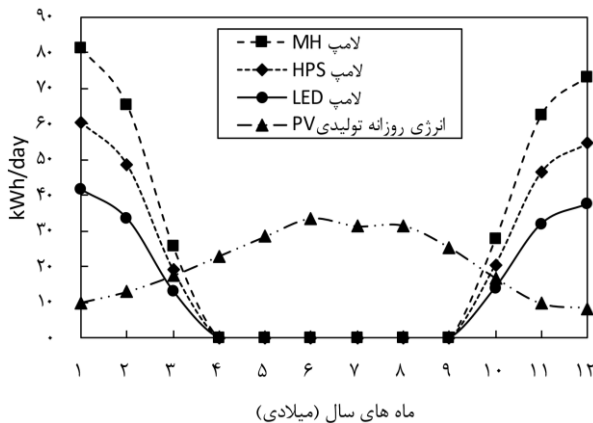
شکل (۶) نیز مقدار پارامتر DLI در بالای سقف گلخانه و عبوری به داخل گلخانه در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد که از طریق دو روش محاسباتی نشریه ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه و نرم‌افزار آنلاین Global DLI App استخراج شده است. همانطور که مشخص است، حداکثر نرخ DLI داخل گلخانه در ماه ژوئن برابر با ۴۰ مول بر مترمربع است، که برای رشد محصول گلخانه‌ای با DLI حدودی ۱۵ مطلوب است؛ اما در صورتی که تولید محصول در ماه‌های ژانویه یا دسامبر مد نظر باشد، نرخ DLI به میزان ۱۳ کاهش یافته که بیانگر این حقیقت است که نور طبیعی خورشید جوابگوی رشد مطلوب محصول نبوده و نیاز است تا کمبود نور توسط لامپ‌های تولید نور مصنوعی فتوسنتزی تأمین شود و یا دوره رشد محصول افزایش یابد.

از سوی دیگر، نتایج پارامتر DLI بدست آمده از روابط نشریه ۴۷۴ نشان می‌دهد بجز ماه‌های سپتامبر تا نوامبر، در بقیه ماه‌های سال خطای ۳۰ الی ۴۰ درصدی با داده‌های واقعی وجود دارد که خطای قابل توجهی بوده و لذا استفاده از آن توصیه نمی‌شود.



شکل ۶ تغییرات میانگین ماهانه پارامتر DLI برحسب سایه‌اندازی ۵۰، ۲۵ و ۱۰ درصد در شهر تهران

مصرف برق بسیار بالا نسبت به تولید برق خورشیدی بوده و توجه فنی و اقتصادی نخواهد داشت.



شکل ۹ مقایسه انرژی تولیدی پانل PV و میزان روزانه توان لامپ مورد نیاز بر حسب کیلووات ساعت به منظور جبران کمبود نور داخل گلخانه در نرخ سایه‌اندازی ۵۰ درصد برای سه نوع لامپ متال هالید (MH)، بخار سدیم (HPS)، و LED

۴-۲- نتایج روش شبیه‌سازی

نقطه ضعف اصلی روش ارائه‌شده قبلی، عدم امکان ارزیابی توزیع نور حاصل از پوشش سقف گلخانه می‌باشد. زیرا در روش تقریبی هندسه سقف، تغییرات سایه‌اندازی زیر سقف در طول شبانه‌روز و چیدمان‌های مختلف PV مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد. در نتیجه، نتایج روش قبل با فرض توزیع میانگین نور و سایه در کل زیربنای گلخانه بوده که با خطای قابل توجهی به ویژه در برخی ماه‌های سال همراه خواهد بود. بروز این خطا ناشی از لحاظ کردن زاویه تابش نور به صورت کاملاً عمود بر سقف بوده و به عبارتی زاویه اوج^۱ خورشید برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. لذا برای بررسی دقیق نواقص روش اول، شبیه‌سازی نوردهی روزانه از طریق موتور محاسباتی رادیانس^۲ نرم‌افزار دیزاین بیلدر^۳ انجام گردید.

جدول ۴ مقایسه تولید انرژی سالانه پانل فتوولتائیک و انرژی مورد نیاز نور مصنوعی گلخانه نمونه با توجه به درصدهای مختلف پوشش سقف

انرژی سالانه مصرفی (kWh) / تعداد مورد نیاز لامپ نوع LED	انرژی سالانه مصرفی (kWh) / تعداد مورد نیاز لامپ نوع HPS	انرژی سالانه مصرفی (kWh) / تعداد مورد نیاز لامپ نوع MH	انرژی تولیدی سالانه توسط پانل PV بر حسب kWh	درصد پوشش سقف گلخانه
۲ / ۴۶۸	۳ / ۶۸۲	۶ / ۹۱۵	۰	بدون پوشش
۷ / ۵۵۹۹	۱۱ / ۸۱۶۳	۲۱ / ۱۰۹۴۵	۷۵۹۸	پوشش ۵۰ درصد
۱۳ / ۲۷۰۰۰	۱۸ / ۳۹۳۸۴	۳۷ / ۵۲۷۸۲	۱۵۱۹۶	پوشش ۱۰۰ درصد

ژانویه و برابر با ۲۳۳ میکرومول بر مترمربع-ثانیه است. در حالی که همین پارامتر برای پوشش‌های ۲۵ و ۱۰ درصد، به ترتیب به میزان ۴۷ و ۲۲ درصد مقدار اعلامی با پوشش ۵۰ درصد می‌باشد. نکته مهم در انتخاب نور تکمیلی گلخانه، نوع لامپ انتخابی است. سه نوع از پرکاربردترین لامپ‌های گلخانه‌ای با محدوده PAR مطلوب برای گیاه که در محاسبات ارائه شده در شکل (۹) نیز استفاده شده است، عبارتند از:

- لامپ متال هالید MASTER HPI-T(400 W) با شدت PPF برابر با ۵۳۲ میکرومول بر ثانیه
- لامپ بخار سدیم MASTER SON- PIA Green Power (600 W) با شدت ۱۰۷۰ میکرومول بر ثانیه
- لامپ (600 W) Gravita LED با شدت PPF برابر با ۱۵۶۰ میکرومول بر ثانیه

لامپ LED در یک توان مصرفی یکسان مقدار شدت تشعشع فتوسنتزی به ترتیب در حدود ۴۵ و ۹۵ درصد بالاتر از لامپ بخار سدیم و متال هالید تولید می‌کند و راندمان مطلوب‌تری دارد. البته هزینه خرید لامپ LED نیز به مراتب بالاتر از لامپ‌های دیگر است.

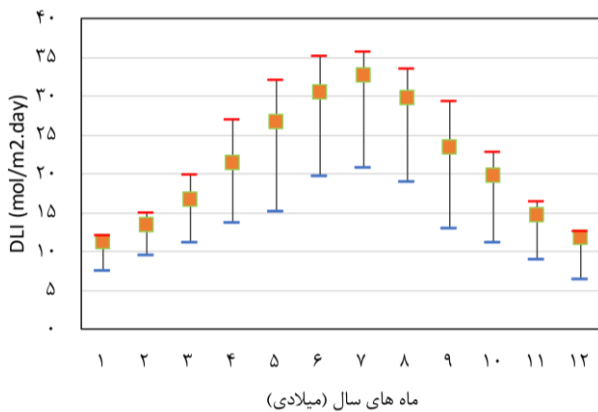
با فرض تولید محصول گلخانه‌ای در کل سال، محاسبات توان نور مصنوعی با به‌کارگیری لامپ‌های متفاوت انجام گردید که در جدول (۴) ارائه شده است.

از نتایج استنباط می‌شود که میزان انرژی سالانه مورد نیاز از طریق نور مصنوعی در شرایط بدون پوشش قابل توجه نبوده و قابل چشم‌پوشی است. در شرایط پوشش ۵۰ درصد، تولید انرژی سالانه تقریباً برابر با انرژی مورد نیاز لامپ بخار سدیم برای جبران نور است. در صورتی که به جای لامپ HPS از لامپ LED استفاده شود، انرژی سالانه تولیدی PV تقریباً ۳۵ درصد بیشتر از انرژی مورد نیاز لامپ‌ها خواهد بود که مطلوب است؛ اما در شرایط پوشش کامل سقف با پانل PV، انرژی مصرفی لامپ‌های LED، HPS، و MH در مقایسه با انرژی تولیدی پانل‌ها به ترتیب ۱/۸، ۲/۶ و ۳/۵ برابر بیشتر بوده که بیانگر نرخ

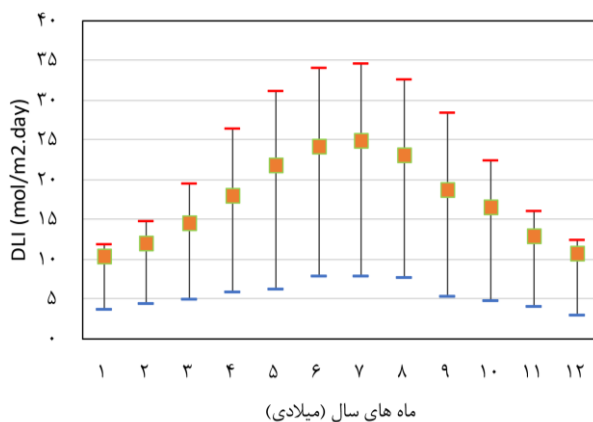
³ Design Builder Software

¹ Zenith Angle

² Radiance Illuminance Simulation



شکل ۱۱ تغییرات حداقل/میانگین/حداکثر ماهانه ضریب DLI داخل گلخانه بدون پوشش سقف



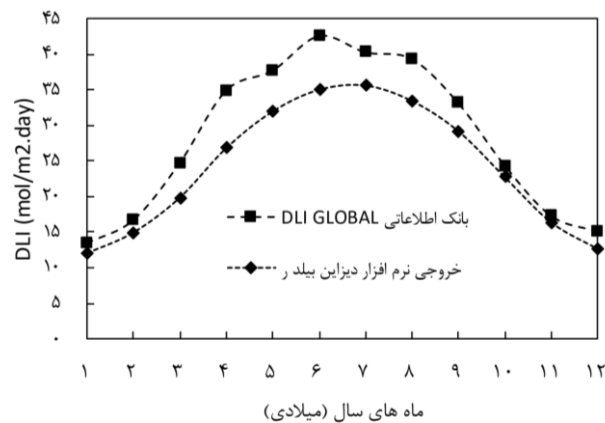
شکل ۱۲ تغییرات حداقل/میانگین/حداکثر ماهانه ضریب DLI داخل گلخانه با پوشش ۵۰ درصدی سقف جنوبی

به منظور مقایسه دقیق نحوه توزیع نور و اثرات سایه‌اندازی، کانتورهای نرخ DLI برای گلخانه نمونه در دو حالت بدون پوشش سقف و پوشش سقف جنوبی به میزان ۵۰ درصد (پوشش ۲۵ درصد کل سقف گلخانه) در شکل (۱۳) ارائه شده است. همچنین کانتورهای مرتبط با تمامی ماه‌های سال برای حالت دوم در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

نتایج بررسی کانتورهای مرتبط با گلخانه بدون پوشش در شکل (۱۳-الف) نشان می‌دهد که تغییرات پارامتر DLI در نقاط مختلف گلخانه بسیار اندک بوده و قابل چشم‌پوشی است. به عبارت دیگر، مقادیر میانگین DLI با مقادیر نقاط مختلف گلخانه تقریباً یکسان بوده و اختلافات اندک به وجود آمده نیز به دلیل سایه‌اندازی محدود ستون‌های فلزی گلخانه می‌باشد؛ اما این مسئله در خصوص حالت (ب) (با لحاظ کردن پوشش) کاملاً متفاوت است؛ به گونه‌ای که در ماه‌های سرد سال که زاویه اوج خورشید به بیشترین مقدار خود می‌رسد (ارتفاع خورشید نسبت

فرضیات شبیه‌سازی به شرح زیر است:

- ارتفاع صفحه کاری برداشت داده‌های نوری لحظه‌ای از کف گلخانه: ۷۵ سانتیمتر (محل حدودی کشت محصول)
 - نوع مدل آسمان: صاف آفتابی استاندارد^۱
 - ابعاد شبکه‌بندی سطح: مربع ۳۰ سانتیمتری
- در شکل (۱۰) مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی با خروجی نرم‌افزار ارائه شده است. بررسی شکل مذکور نشان می‌دهد که در ماه‌های سرد و معتدل سال، نتایج خروجی نرم‌افزار حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد کمتر از داده‌های تجربی است؛ اما در ماه‌های گرم سال این اختلاف بین ۲۵ تا ۳۰ درصد می‌رسد. از دلایل این اختلاف می‌توان به نوع مدل آسمان انتخابی در نرم‌افزار، و تغییرات زاویه ورود نور به داخل فضای گلخانه اشاره نمود.



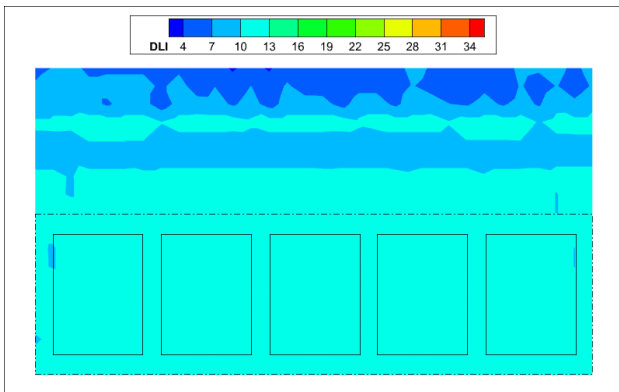
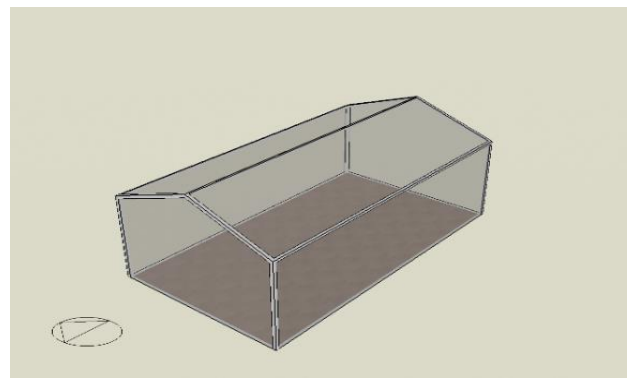
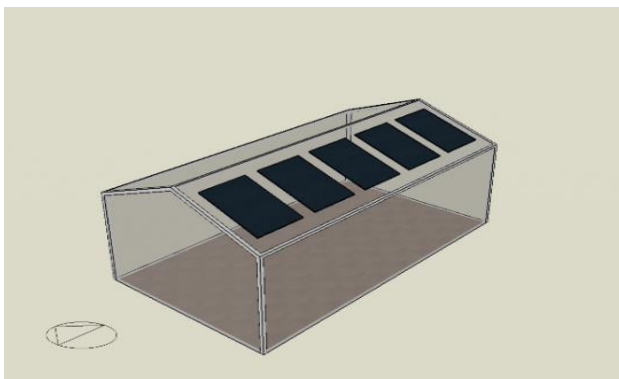
شکل ۱۰ مقایسه تغییرات ماهانه پارامتر DLI داخل گلخانه، بین داده‌های DLI Global با خروجی نرم‌افزار دیزاین بیلدر

یکی از نتایج مهم دیگری که از شبیه‌سازی حاصل می‌شود، بررسی تغییرات پارامتر DLI داخل گلخانه با پوشش‌های مختلف سقف است. در حالت اول نتایج برای گلخانه نمونه بدون هیچ گونه پوششی استخراج گردید (شکل ۱۱). در شرایط بدون پوشش، اختلاف اندکی بین مقدار میانگین با حداکثر وجود دارد که از ۵ تا ۱۵ درصد در ماه‌های مختلف در حال تغییر است. این در حالی است که در شرایط پوشش ۲۵ درصد سقف (۵۰ درصد پوشش سقف جنوبی با پانل فتوولتائیک/سقف شمالی بدون پوشش)، اختلاف مقدار میانگین و میزان حداکثر DLI به دلیل وجود اثر سایه‌اندازی افزایش یافته و از ۱۱ تا ۳۴ درصد تغییر می‌کند. همانطور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، حداکثر اختلاف میانگین با حداکثر، در پوشش ۲۵ درصد سقف جنوبی در ماه‌های گرم سال (به‌ویژه ماه سپتامبر) رخ داده که زاویه تابش نور خورشید نسبت به زمین در عمودی‌ترین حالت ممکن بوده و باعث حداکثر سایه‌اندازی داخل گلخانه می‌شود.

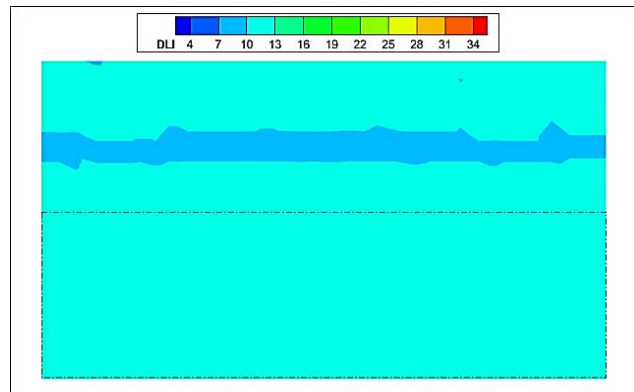
^۱ CIE Sunny Clear Day – Standard Sky

لامپ‌ها در اختیار قرار دهد. به‌عنوان نمونه با توجه به محل سایه‌اندازی در ماه‌های مختلف، لامپ‌های نوری می‌بایست در فضاهای مرکزی گلخانه نصب شوند و در ۲ متر ابتدایی و انتهایی طول گلخانه نیازی به نصب لامپ نمی‌باشد. از سوی دیگر، حداکثر مقدار PPFD مورد نیاز لامپ که در ماه‌های سرد سال با طول روز کم رخ می‌دهد، مطابق نتایج توزیع نور طبیعی در حدود ۲۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بوده که معیار دقیقی برای انتخاب نوع لامپ است.

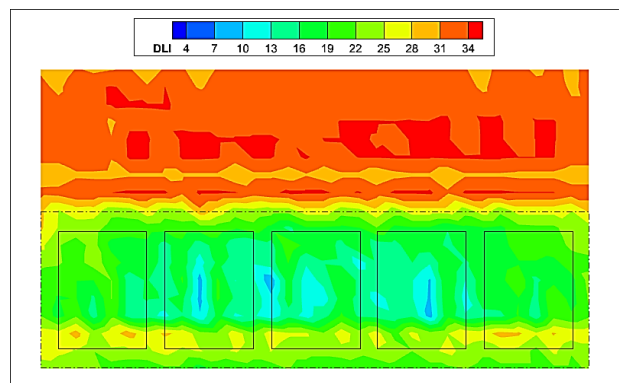
به آسمان پایین‌تر است)، سایه ایجاد شده ناشی از پوشش سقف گلخانه عمدتاً در بخش شمالی رخ می‌دهد و همچنین اختلاف مقدار میانگین و حداکثر محدود است؛ اما در ماه‌های گرم سال با زاویه اوج خورشیدی کم، سایه ایجاد شده دقیقاً زیر موقعیت پانل‌های نصب شده در سقف ایجاد شده و از سوی دیگر، اختلاف قابل توجهی مابین نقاط حداکثر، میانگین و حداقل وجود دارد. مطالعه دقیق کانتورهای شکل (۱۴) می‌تواند نتایج ارزشمندی را از ظرفیت طراحی منبع نور مصنوعی مورد نیاز و موقعیت نصب



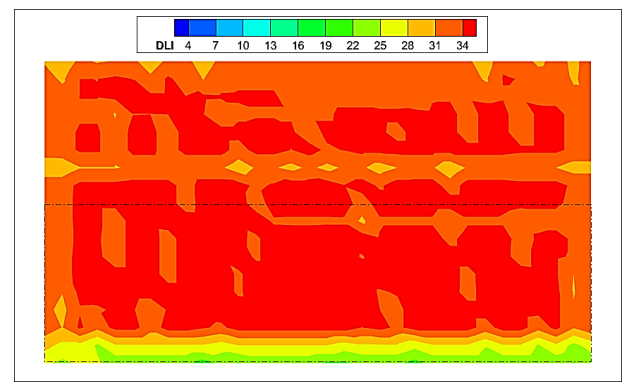
ب / ژانویه



الف / ژانویه

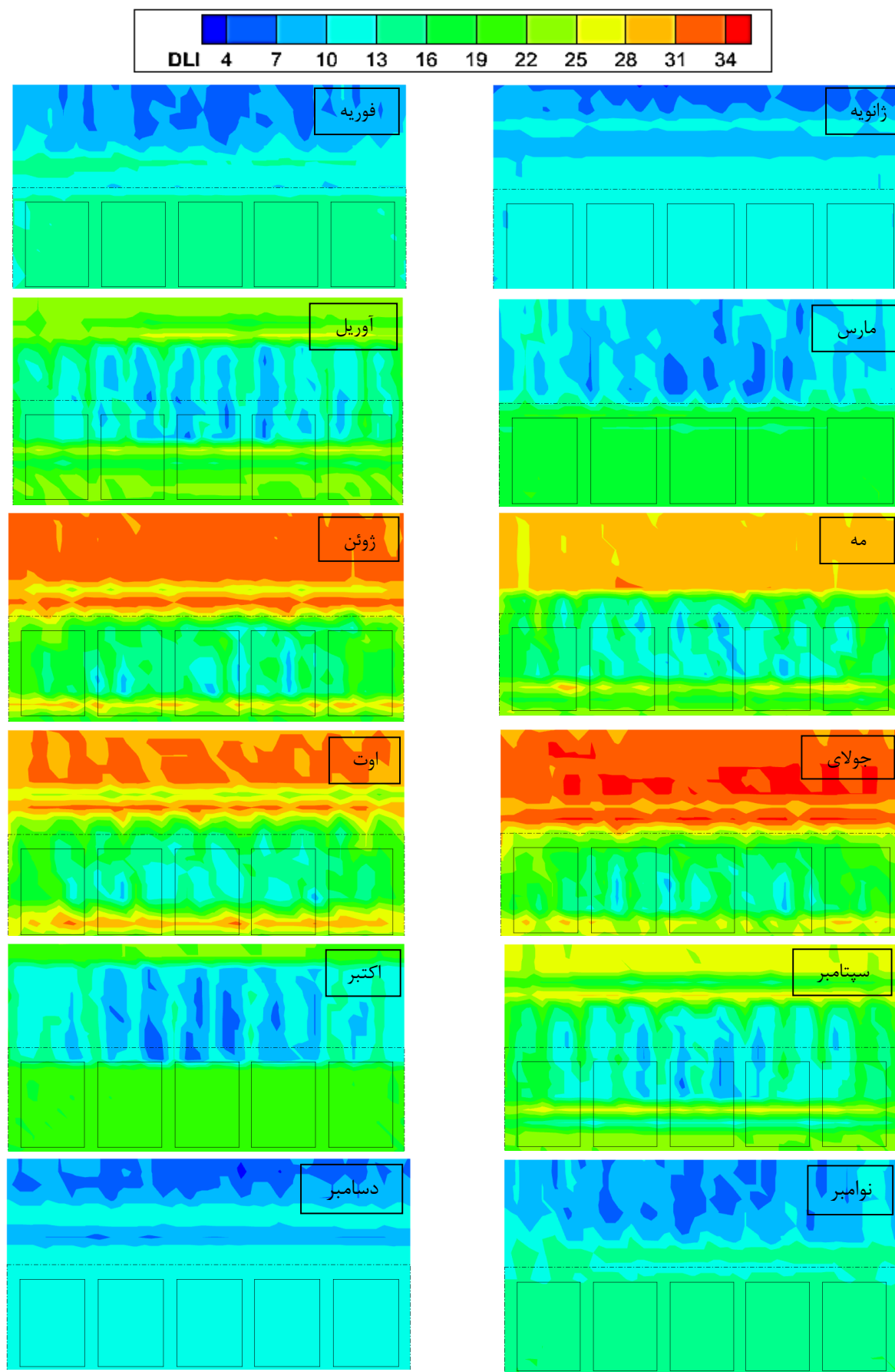


ب / جولای



الف / جولای

شکل ۱۳ مقایسه کانتور تغییرات DLI روزانه (برحسب مول بر مترمربع در روز) داخل گلخانه نمونه در دو حالت؛ الف- بدون پوشش سقف و ب- پوشش ۵۰ درصد سقف جنوبی، برای دو ماه ژانویه (سردترین ماه سال) و جولای (گرم‌ترین ماه سال)



شکل ۱۴ کانطور تغییرات DLI روزانه (برحسب مول بر مترمربع در روز) داخل گلخانه نمونه در شرایط پوشش سقف با ۵۰ درصد پانل فتوولتائیک نصب شده در سقف جنوبی، در ماه‌های مختلف یک‌سال میلادی

جدول ۵ محدوده بهینه نصب لامپ داخل گلخانه در ماه‌های مختلف سال برحسب درصد

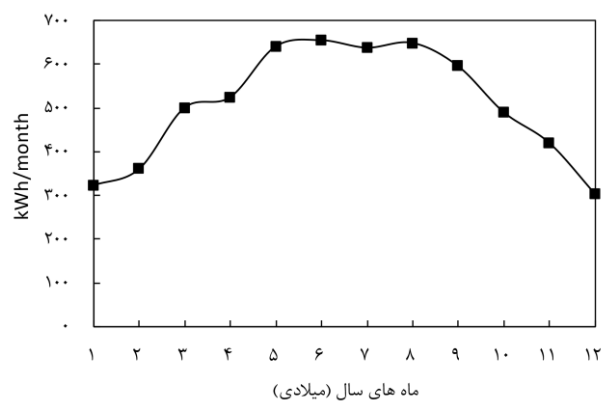
ماه‌های سال به میلادی	جهت طولی (X)	جهت عرضی (Y)
۱	۸۰-۲۰	۱۰۰-۹۰
۲	۷۰-۳۰	۱۰۰-۷۰
۳	۶۰-۴۰	۷۰-۵۵
۴	۵۵-۴۵	۵۵-۴۵
۵	۵۵-۵۰	۵۰-۴۵
۶	۵۰-۴۰	۲۵-۲۰
۷	۵۰-۴۰	۲۵-۲۰
۸	۵۰-۴۰	۲۵-۲۰
۹	۶۰-۳۰	۶۰-۳۵
۱۰	۷۰-۳۰	۸۰-۴۵
۱۱	۸۵-۲۰	۱۰۰-۷۰
۱۲	۹۰-۱۰	۱۰۰-۸۰

۴-۳- صحت‌سنجی و مقایسه نتایج روش تقریبی و دقیق با یکدیگر

در این بخش، نتایج ضریب سایه‌اندازی روش‌های اول و دوم با یکدیگر و همچنین با نتایج یک تحقیق تجربی-تحلیلی به‌منظور صحت‌سنجی داده‌ها مقایسه گردیده است. اعتبارسنجی از طریق مقایسه داده‌ها با تحقیق منتشر شده در سال ۲۰۱۸ توسط مارکو و همکاران [۲۹] و همچنین پژوهش تکمیلی هانریدر و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۳۰] انجام شده است. در این تحقیق، حالات مختلف سایه‌اندازی ناشی از پانل فتوولتائیک برای گلخانه نصب شده در جزیره ساردینیا واقع در کشور ایتالیا با عرض جغرافیایی ۳۹/۲ شمالی و طول جغرافیایی ۸/۶ شرقی بررسی شده است. با توجه به اطلاعات خروجی شبیه‌سازی، می‌توان به مقایسه نرخ سایه‌اندازی از روش دوم با نرخ سایه‌اندازی میانگین تخمینی پرداخت که از معادلات ۳ و ۴ استخراج شده و نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است.

مقایسه نتایج روش تقریبی و دقیق بیانگر این موضوع است که در ماه‌های با شدت تابش خورشید اندک (ماه‌های سرد سال)، میزان خطای استفاده از روش تقریبی قابل توجه خواهد بود؛ به گونه‌ای که در ماه ژانویه، درصد خطای روش تقریبی در حدود ۲۴ درصد می‌باشد؛ اما هر چقدر به سمت ماه‌های گرم سال پیش می‌رویم (زاویه تابش خورشید عمودی‌تر می‌شود)، درصد خطا کاهش یافته و به‌عنوان مثال در ماه ژوئن میزان خطا حدود ۴ درصد خواهد بود.

با توجه به آنکه برای مدل نمونه، ۵ عدد پانل فتوولتائیک با ابعاد هر کدام ۱/۵ در ۲ متر (مساحت هر پانل ۳ مترمربع)، راندمان ۱۹ درصد و زاویه نصب ۲۰ درجه در سقف لحاظ شده است، میزان تولید انرژی الکتریکی ماهانه برحسب کیلووات ساعت از طریق شبیه‌سازی مدل استخراج گردیده که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، بالاترین میزان تولید الکتریسیته در ماه ژوئن با مقدار ۶۵۷ کیلووات ساعت و کمترین آن در ماه دسامبر و برابر با ۳۰۴ کیلووات ساعت بدست آمده است. همچنین کل انرژی تولیدی سالانه صفحات خورشیدی نصب شده در سقف گلخانه برابر با ۶۰۷۴ کیلووات ساعت خواهد شد.



شکل ۱۵ نتایج خروجی انرژی الکتریکی تولیدی ماهانه پانل‌های فتوولتائیک نصب شده در سقف جنوبی گلخانه با پوشش ۵۰ درصد

تولید برق از طریق صفحات خورشیدی علاوه بر کاهش وابستگی سیستم به شبکه سراسری، در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز (مانند دی‌اکسید کربن) مؤثر است. طبق گزارشات منتشرشده کمیسیون اروپا و وزارت انرژی آمریکا، تولید CO₂ به ازای هر کیلووات ساعت برق فسیلی به‌طور میانگین برابر با ۴۲۱ گرم می‌باشد [۲۷]. البته این پارامتر در ایران به دلیل فرسودگی شبکه تولید برق در حدود ۷۰۳ گرم گزارش شده است [۲۸]. حال با توجه به تولید برق خورشیدی سالانه ۶۰۷۴ کیلووات ساعت از پانل‌های موجود در سقف گلخانه نمونه، به میزان ۴/۲۷ تن کاهش تولید دی‌اکسید کربن رخ می‌دهد که از دیدگاه زیست‌محیطی حائز اهمیت است.

یکی از مهمترین مزیت‌های شبیه‌سازی نوردهی با این روش، تعیین نقاط بهینه نصب منابع نوری مصنوعی به جهت تأمین کسری نور مورد نیاز گیاه است که با توجه به ماهیت توزیع سایه‌اندازی غیریکنواخت داخل فضا، اهمیت قابل توجهی خواهد داشت. در همین راستا، محدوده مجاز نصب لامپ‌های تأمین نور در جدول (۵) برای مسئله نمونه مشخص شده است.

جدول ۶ مقایسه مقادیر ضریب سایه‌اندازی تحقیق حاضر به روش‌های تقریبی و شبیه‌سازی با مقادیر گزارش شده در مرجع [۲۹]

ماه‌های سال به میلادی	روش تقریبی	روش شبیه‌سازی	مرجع [۲۹]
۱	۴۴/۵	۳۶	۳۶/۴
۲	۴۴/۵	۳۷	۴۴/۵
۳	۴۴/۵	۴۳/۵	۴۵/۲
۴	۴۴/۵	۴۴/۴	۴۳/۸
۵	۴۴/۵	۴۴/۱	۴۲/۳
۶	۴۴/۵	۴۲/۷	۴۳
۷	۴۴/۵	۴۲/۲	۴۲/۳
۸	۴۴/۵	۴۲/۶	۴۳
۹	۴۴/۵	۴۵/۳	۴۵/۲
۱۰	۴۴/۵	۴۳/۳	۴۵/۲
۱۱	۴۴/۵	۴۰/۷	۳۷/۸
۱۲	۴۴/۵	۳۷/۱	۳۳/۴

از سوی دیگر، مقایسه نتایج ضریب سایه‌اندازی از شبیه‌سازی گلخانه با مقاله اعتبارسنجی بیانگر این حقیقت است که همخوانی مطلوبی بین نتایج برقرار است. البته میزان اختلاف اندکی به ویژه در ماه‌های با زاویه قرارگیری خورشید مایل (ماه‌های سرد سال) وجود دارد که دلیل آن می‌تواند تفاوت در عرض جغرافیایی موقعیت دو مسئله با هم باشد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر سایه‌اندازی پانل‌های فتوولتائیک نصب شده روی سقف یک گلخانه بر نور مورد نیاز محصول و میزان تولید انرژی الکتریکی از آنها می‌باشد. علاوه بر این، شناسایی نحوه توزیع نور داخل گلخانه و استخراج نقاط با نرخ سایه بالا برای تعیین موقعیت نصب منابع نوری مصنوعی از دیگر اهداف تحقیق است. در همین راستا، تحلیل برای یک گلخانه نمونه واقع در شهر تهران به دو روش تقریبی و دقیق (شبیه‌سازی) انجام گردید که خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- نرخ سایه‌اندازی ناشی از پوشش ۲۵ درصد سقف گلخانه با پانل فتوولتائیک، تقریباً هیچ اثر نامطلوبی بر نور مورد نیاز محصول نشان نمی‌دهد.

- نرخ پوشش ۵۰ درصدی با صفحات خورشیدی، بالاترین حد مجاز پوشش سقف گلخانه بوده که باعث تغییرات جزئی در کمیت و کیفیت محصول می‌شود. در این شرایط، نیاز است تا توزیع غیر یکنواخت نور به‌منظور جبران کمبود نور طبیعی مورد تحلیل قرار گیرد. همچنین نرخ پوشش بیشتر از ۵۰ درصد می‌تواند نور جذب شده محصول را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.
- در شرایط پوشش سقف گلخانه به میزان ۵۰ درصد، توزیع نور طبیعی به گونه‌ای است که در ۲۵ درصد ابتدایی و انتهایی طول گلخانه نیازی به نصب لامپ نمی‌باشد؛ اما در بقیه نواحی با توجه به تغییرات ماهانه نرخ DLI، بخش اندکی از نور مورد نیاز گیاه به دلیل اثرات سایه‌اندازی باید توسط منابع نوردهی مصنوعی تأمین شود.
- میزان انرژی الکتریکی تولیدی صفحات خورشیدی نصب شده در گلخانه نمونه برابر با ۶۰۷۴ کیلووات ساعت در سال به دست آمد که منجر به کاهش ۴/۲۷ تن تولید گاز دی‌اکسید کربن سالانه می‌گردد.
- در شرایط پوشش کامل (۱۰۰ درصدی) سقف گلخانه، انرژی سالانه مورد نیاز که باید توسط لامپ تأمین شود، بین ۱/۸ تا ۳/۵ برابر (برحسب نوع لامپ) انرژی تولیدی کل پانل‌های فتوولتائیک نصب شده خواهد بود که بیانگر عدم توجیه‌پذیری پوشش کامل سقف با پانل می‌باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

ADF	ضریب نور روز میانگین (%)
CR	ضریب پوشش سقف (%)
DF	فاکتور (ضریب) نور روز (%)
DLI	ضریب انتگرال نور روزانه ($\text{mol/m}^2.\text{day}$)
E	انرژی (kWh)
h	تعداد ساعات یک طول روز کامل
I	روشنایی (lumen/m^2 یا lux)
PPFD	چگالی شار فوتون فتوسنتزی ($\mu\text{mol/m}^2.\text{s}$)
S_f	فاکتور (ضریب) سایه‌اندازی (%)
S_g	فاکتور کلی انتقال انرژی خورشیدی (g-value - %)
SPD	پارامتر توزیع توان طیفی ($\text{W/m}^2.\text{nm}$)
U	ضریب کلی انتقال حرارت ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
VLT	ضریب انتقال نور مرئی (%)
\dot{W}	توان (kW)

زیرنویس‌ها

ev	پوشش گلخانه
in	ورودی
out	خروجی
pV	پانل فتوولتائیک

۷- مراجع

- [10] F. Blando, C. Gerardi, M. Renna, S. Castellano, and F. Serio, "Characterisation of bioactive compounds in berries from plants grown under innovative photovoltaic greenhouses," *Journal of Berry Research*, vol. 8, no. 1, pp. 55-69, 2018, doi: <https://doi.org/10.3233/JBR-170258>.
- [11] M. Cossu *et al.*, "Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses," *European Journal of Agronomy*, vol. 118, p. 126074, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126074>.
- [12] Z. Li, A. Yano, and H. Yoshioka, "Feasibility study of a blind-type photovoltaic roof-shade system designed for simultaneous production of crops and electricity in a greenhouse," *Applied Energy*, vol. 279, p. 115853, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115853>.
- [13] R. Zhang *et al.*, "Dynamics of shaded areas in a typical-shaped solar greenhouse and their effects on tomato growth—A case study in winter," *Scientia Horticulturae*, vol. 312, p. 111882, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111882>.
- [14] G. Ferrara, M. Boselli, M. Palasciano, and A. Mazzeo, "Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.)," *Scientia Horticulturae*, vol. 308, p. 111595, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111595>.
- [15] L. Deng, A. Li, and J. Che, "Distribution and optimization of solar radiation in a solar greenhouse under the influence of wall shading," *Solar Energy*, vol. 284, p. 113034, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113034>.
- [16] Y. Tang, X. Ma, M. Li, and Y. Wang, "The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse," *Solar Energy*, vol. 195, pp. 318-328, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070>.
- [17] C. Zisis, E. M. Pechlivani, S. Tsimikli, E. Mekeridis, A. Laskarakis, and S. Logothetidis, "Organic Photovoltaics on Greenhouse Rooftops: Effects on Plant Growth," *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 65-72, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.658>.
- [18] G. Trypanagnostopoulos, A. Kavga, M. Souliotis, and Y. Tripanagnostopoulos, "Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 724-731, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.066>.
- [19] A. Colantoni *et al.*, "Solar Radiation Distribution inside a Greenhouse Prototypal with Photovoltaic Mobile Plant and Effects on Flower Growth," *Sustainability*, vol. 10, no. 3, p. 855, 2018. [Online].
- [1] G. A. Rampinelli *et al.*, "Development of artificial lighting system for light supplementation in smart greenhouses with agrivoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 231, p. 120914, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120914>.
- [2] H. Dinesh and J. M. Pearce, "The potential of agrivoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 299-308, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- [3] S. Gorjian *et al.*, "Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, p. 112126, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>.
- [4] A. Sarr, Y. M. Soro, A. K. Tossa, and L. Diop, "Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 948, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/3/948>.
- [5] A. S. Pascaris, R. Handler, C. Schelly, and J. M. Pearce, "Life cycle assessment of pasture-based agrivoltaic systems: Emissions and energy use of integrated rabbit production," *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 3, p. 100030, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2021.100030>.
- [6] C. Toledo and A. Scognamiglio, "Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)," *Sustainability*, vol. 13, no. 12, p. 6871, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6871>.
- [7] A. Yano *et al.*, "Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse," *Biosystems Engineering*, vol. 106, no. 4, pp. 367-377, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.04.007>.
- [8] A. Marucci and A. Cappuccini, "Dynamic photovoltaic greenhouse: Energy balance in completely clear sky condition during the hot period," *Energy*, vol. 102, pp. 302-312, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.053>.
- [9] M. E. Loik *et al.*, "Wavelength-Selective Solar Photovoltaic Systems: Powering Greenhouses for Plant Growth at the Food-Energy-Water Nexus," *Earth's Future*, vol. 5, no. 10, pp. 1044-1053, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2016EF000531>.

- [26] A. P. E. R. Institute, *Greenhouse Development Criteria Design Criteria, No. 474*. Bureau of Technical Execution Systems (in Persian), 2008.
- [27] K. Li, H. Fan, and P. Yao, "Estimating carbon emissions from thermal power plants based on thermal characteristics," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 128, p. 103768, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103768>.
- [28] S. Azizi, R. Radfar, H. Nikoomaram, and A. Rajabzadeh Ghotri, "Feasibility study of controlling carbon dioxide emissions from Iranian thermal power plants through CO₂-EOR," (in Persian), *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, vol. 9, 2023.
- [29] M. Cossu *et al.*, "Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 822-834, 2018/10/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.001>.
- [30] N. Hanrieder, A. Kujawa, A. B. Seychelles, M. Blanco, J. Carballo, and S. Wilbert, "Estimation of maximum photovoltaic cover ratios in greenhouses based on global irradiance data," *Applied Energy*, vol. 365, p. 123232, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123232>.
- Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/855>.
- [20] R. H. E. Hassanien, M. Li, and F. Yin, "The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production," *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 377-388, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.044>.
- [21] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [22] N. Mattson, "Greenhouse Lighting," 2014. [Online]. Available: <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/b/5759/files/2015/03/Greenhouse-Lighting-27mfc6l.pdf>
- [23] D. J. Potter and P. Duncombe, "The Effect of Electrical Lighting Power and Irradiance on Indoor-Grown Cannabis Potency and Yield," *Journal of Forensic Sciences*, vol. 57, no. 3, pp. 618-622, 2012, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.02024.x>.
- [24] K. Lakhdari, L. Sriti, and B. Painter, "Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions," *Building and Environment*, vol. 204, p. 108173, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>.
- [25] M. Woods, "A global DLI app," *Asian Turfgrass Center*, 2021. [Online]. Available: <https://www.asianturfgrass.com/post/global-dli-app/>.

تجزیه و تحلیل تجربی پارامترهای موثر بر نرخ و توزیع پاشش انژکتورها

چکیده: پاشش سوخت در موتورهای احتراق داخلی یکی از عوامل کلیدی در بهبود کارایی احتراق و کاهش آلاینده ها می باشد. عملکرد صحیح انژکتورهای سوخت نه تنها به نرخ پاشش بلکه به توزیع یکنواخت سوخت در فضای احتراق نیز کمک می کند. این عامل به شدت بر کارایی سوزاندن سوخت تأثیر می گذارد و می تواند به افزایش تولید توان و کاهش مصرف سوخت منجر شود. در این تحقیق به منظور تجزیه و تحلیل تجربی پارامترهای مؤثر بر نرخ و توزیع پاشش انژکتورها، مدل آزمایشگاهی از یک دستگاه تست انژکتور طراحی و ساخته شد. هدف از این مطالعه، درک بهتر روابط بین پارامترهای مؤثر و نحوه تأثیر آن ها بر عملکرد کلی سیستم های سوخت رسانی می باشد. این دستگاه قابلیت انجام تست های نشتی، بررسی شکل و مقدار پاشش انژکتورها را دارد. نتایج نشان داد افزایش زمان پاشش، افزایش فشار ریل سوخت و افزایش ولتاژ اعمال شده به انژکتورها باعث افزایش مقدار پاشش می شود و سرعت قطع و وصل برق انژکتورها و وجود یا عدم وجود فیلتر تأثیر چندانی بر میزان پاشش ندارد.

واژه های راهنما: سیستم سوخت رسانی، انژکتور، دستگاه شستشوی انژکتور، مدل آزمایشگاهی، خودرو

بهمن رحمتی نژاد*

مربی

حسین رحیمی آسیابارکی

مربی

فرزین عظیم پور شیشوان

استادیار،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشگاه ملی مهارت،

تهران

مقاله علمی ترویجی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

**Bahman
Rahmatinejad***
Instructor

**Hossein Rahimi
Asiabaraki**
Instructor

**Farzin Azimpour
Shishevan**
Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Technical and
Vocational University
(TVU), Tehran

Experimental analysis of parameters affecting injector spray rate and distribution

Abstract: Fuel injection in internal combustion engines is a key factor in improving combustion efficiency and reducing emissions. The proper functioning of fuel injectors contributes not only to the injection rate but also to the uniform distribution of fuel within the combustion chamber. This factor significantly impacts fuel burning efficiency and can lead to increased power output and reduced fuel consumption. In this research, to experimentally analyze the parameters affecting the injection rate and distribution of injectors, a laboratory model of an injector test rig was designed and built. The aim of this study is to better understand the relationships between these parameters and how they affect the overall performance of fuel systems. This device is capable of performing leak tests and examining the shape and quantity of injector spray. The results showed that increasing the injection time, increasing the fuel rail pressure, and increasing the voltage applied to the injectors all increase the amount of fuel injected. The speed of switching the injector power on and off and the presence or absence of a filter had little effect on the amount of fuel injected.

Keywords: Fuel system, Injector, Injector cleaning machine, Laboratory model, Automotive

۱- مقدمه

پیچشی تک پایه ساده بوده و از آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است. شرایط انجام تمامی آزمایش‌ها شرایط استاندارد اتمسفریک بوده است. تصویربرداری از میدان پاشش با استفاده از روش سایه‌نگاری انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در رینولدز ۳۰۰۰۰ رژیم پاشش انژکتور از رژیم قطره‌چکانی به رژیم اتمیزاسیون تغییر یافته و با افزایش بیشتر رینولدز تا حد ۳۷۰۰۰ رژیم کاملاً توسعه یافته پاشش (که مخروط پاشش کامل می‌شود) حاکم می‌شود. از طرفی، با افزایش رینولدز، زاویه پاشش انژکتور ابتدا افزایش یافته و با افزایش بیشتر رینولدز، تقریباً ثابت می‌شود.

حسینعلی پور و همکاران [۴] به تحلیل تجربی مشخصات اسپری خروجی از یک انژکتور جریان چرخشی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از یک نوع انژکتور جریان چرخشی با چهار ورودی مماسی که به روش بایول طراحی و با روش تراشکاری ساخته شده است استفاده نمودند. این انژکتور به صورت جریان چرخشی می‌باشد و به سبب افت فشار در محور میانی انژکتور، هوای بیرون به داخل انژکتور مکیده شده و یک حفره هوا در مرکز انژکتور شکل می‌گیرد؛ بنابراین افشانی تک پایه اما با عملکرد دوفازی می‌باشد و از این رو چتر پاششی به صورت یک مخروط توخالی با لایه نازک ایجاد می‌نماید.

مراد و رضانی [۵] به مطالعه تجربی ضخامت فیلم مایع حاصل از برخورد اسپری با یک سطح جامد پرداخته و نشان دادند در دبی‌های حجمی بالای افشانه یک لایه مایع بر روی سطح جامد تشکیل می‌شود. در صورتی که ضخامت لایه مایع زیاد باشد، در کاربردهای احتراقی، می‌تواند منجر به احتراق ناقص سوخت در محفظه احتراق شود. ضخامت لایه مایع به پارامترهای زیادی، نظیر دبی حجمی سیال، فاصله نازل تا سطح و مود شکست افشانه، بستگی دارد. اندازه ضخامت متوسط لایه مایع با تغییر پارامترهایی نظیر دبی حجمی سیال مایع و گاز و فاصله نازل تا سطح تغییر می‌کند و این ضخامت در بازه بین ۴۰ تا ۲۲۰ میکرومتر در شرایط مختلف متغیر است.

رستمی و مهدوی مقدم [۶] به بررسی تجربی و عددی مشخصات قطره‌سازی سوخت‌های دیزل و مازوت تزریق شده از یک انژکتور فشاری-پیچشی پرداخته و نشان دادند طول شکست و قطر قطرات با افزایش دما و فشار سوخت روندی نزولی را طی کرده و با توسعه کامل جریان، تقریباً به سمت مقدار صفر میل می‌کنند. توزیع قطر اندازه قطرات با افزایش گرانروی سیال و توزیع سرعت قطرات با کاهش گرانروی سیال صافتر و یکنواخت‌تر می‌شود. خداوردیان و همکاران [۷] به بررسی تبخیر اکسیدکننده پاشش شده از انژکتور فشاری-

موتورهای احتراق داخلی امروزه کاربردهای فراوانی دارند. در این موتورها، تولید توان با بازده بالا بستگی به عملکرد صحیح در تمامی قسمت‌های آن دارد [۱]. یکی از این قسمت‌ها سیستم سوخت‌رسانی انژکتوری می‌باشد. در این سیستم سوخت توسط یک پمپ مکانیکی یا برقی با فشار به داخل لوله‌های سوخت‌رسانی و ریل سوخت وارد می‌گردد و از طریق انژکتورها به پشت سوپاپ هوا یا درون سیلندر به صورت پودر شده پاشیده می‌شود. در سیستم سوخت‌رسانی چند نقطه‌ای (MPFI)، انژکتورها مابین ریل سوخت و منیفولد هوای ورودی قرار گرفته و توسط اورینگ‌هایی که در دو انتهای آن‌ها قرار دارند آب‌بندی شده و با استفاده از بست در جای خود بر روی ریل سوخت نصب می‌شوند. واحد کنترل الکترونیکی (ECU) بر اساس سیگنال‌های ارسالی از سنسور دور موتور و همچنین در صورت وجود از سنسور میل سوپاپ زمان عمل انژکتورها را مشخص نموده و باعث فعال شدن انژکتورها و پاشش سوخت می‌گردد تا سوخت به صورت ذرات پودر از انژکتور خارج گردد. ECU با کنترل مدت زمان باز بودن انژکتورها در یک سیکل، حجم سوخت تزریقی را کنترل می‌کند.

انژکتورها از نظر شکل به دو دسته مخروطی و استوانه‌ای تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال در خودروهای پژو پارس، ۴۰۵، سمند، پراید و زانتیا از انژکتورهای نوع مخروطی و در خودروهای پیکان، پژو RD و پژو ۲۰۶، از انژکتورهای نوع استوانه‌ای استفاده شده است. در مدل‌های جدید اکثراً از نوع استوانه‌ای استفاده می‌شود.

انژکتورها دارای یک سوکت ۲ پایه هستند که پایه ۱ آن‌ها ولتاژ ۱۲ ولت را مستقیم و به صورت دائم از رله دابل می‌گیرد و پایه ۲، ولتاژ منفی را از ECU به صورت منقطع (در زمان پاشش) دریافت می‌کند.

یکی از مهم‌ترین راه‌های کاهش مصرف انرژی در صنایع مختلف افزایش راندمان حرارتی است [۲]. در موتورهای احتراق داخلی در صورتی که انژکتور به درستی کار کند می‌توان به راندمان حرارتی بالا دست یافت. محققین متعددی در مورد انژکتور، تحقیق نموده‌اند؛ که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

پورمحمود و همکاران [۳] پارامترهای عملکردی یک انژکتور پیچشی، به عنوان تابعی از اعداد رینولدز و وبر را مطالعه نمودند. انژکتور مورد استفاده در این پژوهش، یک انژکتور

که دارای کیفیت مناسب باشند نیز دشوار باشد. راه حل مناسب موجود جهت حل مشکل استفاده از دستگاه انژکتور شوی است. با استفاده از این دستگاه می توان عملکرد انژکتورها را مورد بررسی قرار داد و رسوبات و ناخالصی های موجود را برطرف کرد و انژکتورهای معیوب را شناسایی نمود. به طور کلی برای جلوگیری از خرابی انژکتورها و صحت عملکرد آن باید بین کیلومترهای ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلومتر انژکتور خودرو را شستشو نمود البته در شرایط کاری متفاوت و خودروهای مختلف این مقدار قابل تغییر می باشد. با توجه به بررسی منابع مختلف مشخص شد یکی از عواملی که باعث افزایش آلاینده ها و مصرف سوخت و کاهش قدرت موتور می شود، رسوب آلودگی ها در انژکتور خودرو است. این عامل باعث افزایش اندازه ذرات سوخت تزریقی در محفظه سیلندر و در نتیجه عدم احتراق کامل می شود. همچنین عیوب انژکتور بر عملکرد و عمر سایر تجهیزات کنترل کننده آلاینده ها مانند سنسور اکسیژن و کاتالیست تأثیر منفی می گذارد؛ بنابراین استفاده از دستگاه شستشوی انژکتور جهت بررسی عملکرد صحیح انژکتورها در بازه های زمانی مشخص توصیه می شود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- ساخت دستگاه

به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر میزان پاشش در انژکتورها نیاز به طراحی و ساخت دستگاه شستشوی انژکتور می باشد. برای ساخت دستگاه مورد نظر ابتدا وسایل مورد نیاز تهیه شد و سپس قطعات مانند شکل (۱) بر روی میزی با ابعاد ۹۰*۵۰*۳۰ سانتی متر سوار گردید و در نهایت سیم کشی دستگاه انجام شد.

اجزای دستگاه طراحی و ساخته شده مطابق شکل (۱) به ترتیب نشان دهنده ۱- ریل سوخت، ۲- انژکتورها، ۳- استوانه های شیشه ای اندازه گیری سوخت، ۴- تایمر دیجیتالی، ۵- رله پنج پایه، ۶- گیج فشار، ۷- شیلنگ سوخت ورودی به ریل سوخت، ۸- شیرهای تخلیه سوخت استوانه های شیشه ای، ۹- برد آردوینو، ۱۰- آداپتور جریان AC به DC با ولتاژ قابل تنظیم می باشد.

مشخصات فنی دستگاه:

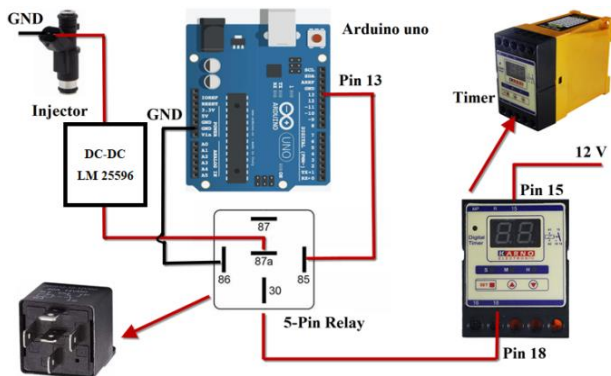
- فشار کاری صفر تا ۶ بار
- دمای کاری ۱۰- تا ۵۰ درجه سانتی گراد
- تغذیه برق تایمر ۲۲۰ ولت
- تغذیه برق پمپ بنزین و انژکتورها ۱۲ ولت

پیچشی در محفظه احتراق در شرایط فشار پایین پرداخته و نشان دادند هر چند نقش تبخیر آبی در تغییر دما و فشار قطرات به عنوان فاز گسسته و نیز گاز محیطی به عنوان فاز پیوسته مشهود است، ولی همزمان با آن می توان میل این دو فاز به شرایط پایدار و ایجاد حالت پایا را مشاهده کرد. سیمون ماریسیج و همکاران [۸] مدل ریاضی برای انژکتور یک سیستم تزریق سوخت ریل مشترک ارائه نمودند. آن ها برای این کار از شبیه سازی رایانه ای همراه با اندازه گیری سیستم تزریق سوخت آکومولاتور ریل مشترک یک موتور تک سیلندر استفاده نمودند. شبیه سازی رایانه ای، پدیده هایی از قبیل فشار ریل، نرخ تزریق، کل سوخت تزریقی، فاصله زمانی جریان انژکتور تا اولین شواهد فرآیند تزریق و سایر تأخیرهای زمانی بین فازهای مختلف را محاسبه می کند. مقایسه بین پارامترهای تزریق محاسبه شده و اندازه گیری شده تطابق خوبی را نشان داد. کمال تدینوف و همکاران [۹] مطالعات تجربی تزریق سوخت در موتور دیزل با انژکتور شیب دار را انجام دادند. سوخت اسپری شده توسط یک دوربین پرسرعت با ضبط همزمان پالس های کنترل دوربین و انژکتور بر روی اسیلوسکوپ انجام شد. دو انژکتور دیزل هشت سوراخه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش در قطر روزنه های نازل که محورهای آن ها حداکثر از محور انژکتور منحرف می شوند، باعث کاهش توزیع ناهموار سوخت در محفظه احتراق و بهبود فرآیند احتراق و عملکرد دیزل می شود. مولر و همکاران [۱۰] اثرات اکسیژن رسانی به سوخت تزریق شده در یک موتور احتراق تراکمی با انژکتور دو روزنه را بررسی نمودند. آن ها به منظور مقایسه احتراق دیزل معمولی و تزریق سوخت با هوا از یک موتور تک سیلندر استفاده کردند. نتایج نشان داد ویژگی های عملیاتی، انتشار هیدروکربن و مونوکسید کربن و در نتیجه راندمان احتراق بین دو مورد اشاره شده مشابه است.

در مطالعات تأثیر هندسه سوراخ های نازل بر فرآیندهای تزریق، اختلاط و احتراق، عمدتاً از دو رویکرد تجربی و عددی استفاده می شود. مطالعات تجربی با تجسم فرآیند تزریق در یک محفظه با حجم ثابت و فیلم برداری با سرعت بالا انجام می شوند [۱۱-۱۶] و مدل سازی عددی با استفاده از فناوری های CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) انجام می پذیرد [۱۷-۱۹].

به منظور عملکرد صحیح موتور خودرو باید از انژکتورهای آن به خوبی مراقبت و نگهداری شود؛ همچنین تعویض این قطعه نیز راه حلی برای حل مشکل محسوب نمی شود؛ زیرا این قطعه گران قیمت است و جهت تعویض آن باید هزینه زیادی صرف شود و از سوی دیگر ممکن است دستیابی به انژکتورهایی

رله مغناطیسی بوده و برد آردوینو با قطع و وصل جریان این رله می‌تواند جریان برق انژکتورها را قطع و وصل نماید.



شکل ۲ مکانیزم قطع و وصل جریان برق انژکتورها

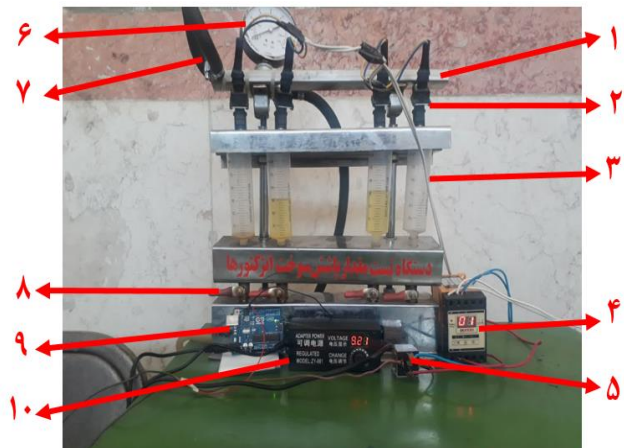
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تست نشتی سوزن انژکتورها

- تعداد انژکتورهای همزمان کاری ۱ تا ۴
- گیج فشار با قابلیت تحمل ۱۶ بار (230 Psi)
- ابعاد دستگاه: ۹۰*۵۰*۳۰ سانتی‌متر
- قابلیت‌های ویژه دستگاه طراحی شده:
- بررسی و مشاهده نشتی انژکتور
- تست زاویه تزریق و نحوه پودر سازی انژکتورها
- تست حالت یکنواختی پاشش سوخت انژکتورها
- شستشوی شیمیایی و رفع کامل رسوبات داخلی انژکتورهای مسدود
- مشاهده و مقایسه حجم پاشش سوخت انژکتورها نسبت به یکدیگر
- امکان شستشوی انژکتورها بدون جداسازی از خودرو (شستشوی روکار)، برای این منظور کافی است که شیلنگ‌های ورودی و خروجی ریل سوخت دستگاه را به ریل سوخت خودروی مورد نظر متصل نمود.
- دارا بودن اتصالات مناسب و مخصوص انژکتورهای تمام خودروهای ایرانی (سایپا و ایران خودرو)



(الف)



شکل ۱ نمای ظاهری و اجزاء دستگاه



(ب)

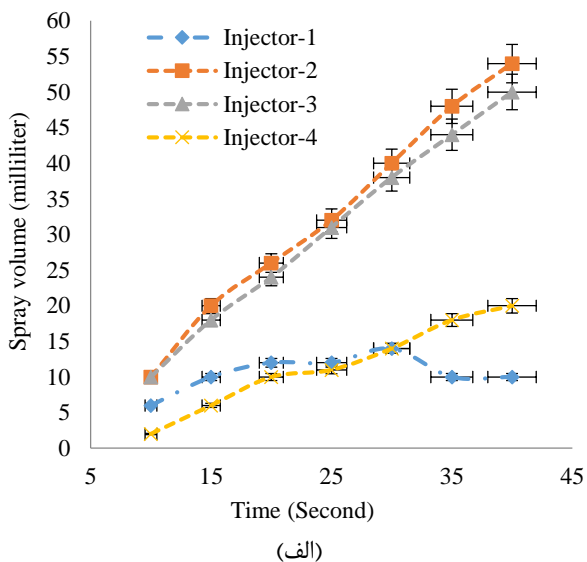
شکل ۳ فشار ریل سوخت؛ الف- در حین پاشش انژکتورها، ب- زمانی که انژکتورها پاشش نمی‌کنند.

۳-۲- مکانیزم قطع و وصل جریان انژکتورها

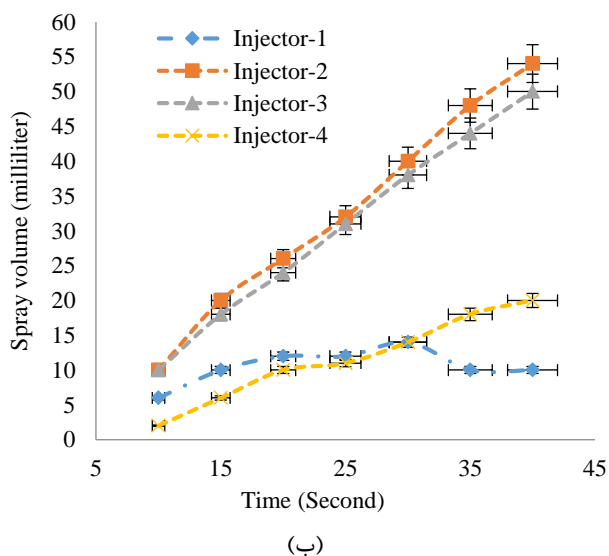
به منظور جلوگیری از یکسره باز بودن انژکتورها و همچنین ایجاد حالت واقعی‌تر در دستگاه شستشوی انژکتور، نیاز به قطع و وصل جریان برق انژکتورها می‌باشد. این عمل بر روی خودرو توسط قطع و وصل نمودن پایه منفی توسط ECU انجام می‌شود. برای انجام این کار در دستگاه طراحی شده مدار شکل (۲) طراحی و ساخته شد. در این مدار به کمک تایمر دیجیتال زمان تست تعیین می‌شود (۱۰؛ ۲۰؛ ۳۰ و ۴۰ ثانیه) و توسط برنامه‌نویسی در برد آردوینو زمان قطع و وصل انژکتورها مشخص می‌گردد. پایه‌های ۸۵ و ۸۶ در رله ۵ پایه مربوط به

۳-۳- بررسی مقدار پاشش هر یک از انژکتورها

به منظور بررسی مقدار پاشش هر یک از انژکتورها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، تایمر دستگاه بر روی ۱۰ الی ۴۰ ثانیه تنظیم می‌شود و مقدار پاشش هر انژکتور با دیگری مقایسه می‌گردد. در این آزمایش از یک انژکتور نو و سه انژکتور کارکرده استفاده شده است. اگر متوسط پاشش هر یک از انژکتورهای کارکرده از متوسط پاشش انژکتور نو بیشتر باشد، دلیل بر گشاد شدن سوراخ انژکتور می‌باشد و در صورتی که از متوسط پاشش انژکتور نو کمتر باشد؛ احتمالاً به علت گرفتگی سوراخ انژکتور است که باید توسط دستگاه اولتراسونیک نسبت به شستشوی آن اقدام گردد. در روش‌های نوین از پردازش تصویر برای تشخیص این عیوب در انژکتور استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۵ بررسی مقدار پاشش یک انژکتور نو و سه انژکتور کارکرده؛ الف- در حالت معمولی، ب- بعد از اولتراسونیک

تست نشستی سوزن انژکتورها در فشار ۵ بار انجام شده است. در این آزمایش برق پمپ‌بنزین وصل و برق انژکتورها قطع می‌باشد. در این حالت نشستی احتمالی انژکتورها به صورت چشمی کنترل می‌شود و در صورت وجود نشستی، اورینگ سوزن انژکتور مربوطه تعویض می‌گردد. اصولاً در این شرایط با توجه به فشار تنظیم شده در رگولاتور، کل جریان ورودی به ریل سوخت از مسیر برگشت به باک عبور می‌کند. لازم به ذکر است فشار تولیدی پمپ‌بنزین‌ها ۵ الی ۶ بار است و فشار ریل سوخت جهت پاشش ۲/۵ الی ۳ بار می‌باشد. زمانی که انژکتورها در حین پاشش باشند، فشار ریل سوخت ۲ الی ۲/۵ بار می‌باشد؛ ولی زمانی که برق انژکتورها قطع می‌باشد و پاشش نمی‌کنند فشار پمپ تا ۵ بار افزایش پیدا کرده و با فعال شدن رگولاتور کل سوخت برگشت داده می‌شود (شکل (۳)).

۳-۲- بررسی شکل پاشش انژکتورها

در این آزمایش برق پمپ‌بنزین و برق انژکتورها وصل می‌باشد و به صورت چشمی شکل پاشش انژکتورها بررسی می‌گردد. در شکل (۴) حالت‌های مختلف به صورت عملی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انژکتور شماره (۱) با اینکه خوب پاشش می‌کند ولی ضعیف است. این موضوع نشان‌دهنده گرفتگی نسبی سوراخ‌های انژکتور می‌باشد. انژکتور شماره (۲) دارای یک شکاف در پاشش است و مورد قبول نیست. این مشکل می‌تواند ناشی از انسداد موضعی در قسمتی از سوراخ‌های انژکتور باشد. انژکتور شماره (۳) به سمت چپ بیشتر پاشش می‌کند. انژکتور شماره (۴) خوب است ولی انژکتور شماره (۵) به یک سمت پاشش پهن‌تری دارد. این مشکل زمانی ایجاد می‌شود که قطر سوراخ‌های آن سمت در اثر سایش بزرگ‌تر شده باشند.

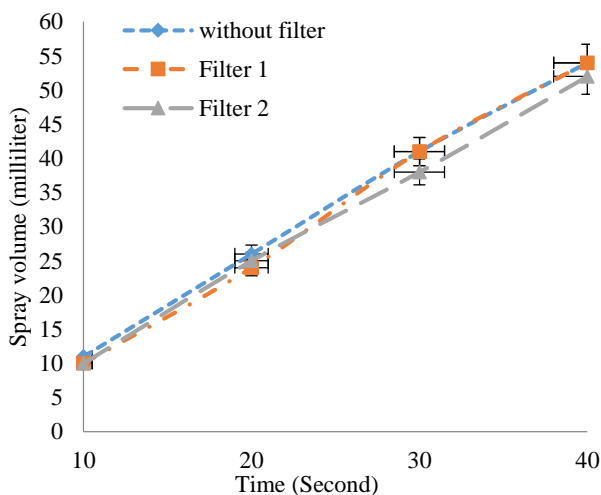


شکل ۴ نمونه‌های انواع پاشش سوخت در انژکتورها

ولتاژ ورودی این مبدل ۳ تا ۳۰ ولت و ولتاژ خروجی آن ۱/۵ تا ۳۰ ولت و حداکثر جریان خروجی ۳ آمپر می‌باشد. آزمایش در چهار ولتاژ مختلف و پنج بازه زمانی انجام شده است و متوسط پاشش‌ها محاسبه و در نتیجه در شکل (۶) گزارش گردیده است. با توجه به شکل (۶) مشخص گردید هرچقدر ولتاژ سیستم زیاد باشد مقدار پاشش نیز بیشتر خواهد بود؛ مثلاً زمانی که ولتاژ سیستم ۱۰ ولت است نسبت به حالتی که ولتاژ سیستم ۶ ولت می‌باشد در مدت زمان ۱۰ ثانیه؛ ۷ میلی‌متر سوخت بیشتر پاشیده می‌شود.

۳-۵- بررسی تأثیر وجود فیلتر بر میزان پاشش

به‌منظور بررسی تأثیر وجود فیلتر بر میزان پاشش انژکتورها؛ با دو فیلتر متفاوت در سه حالت مختلف (بدون فیلتر؛ فیلتر ۱؛ فیلتر ۲) و در چهار بازه زمانی آزمایش پاشش از سیستم گرفته شد و متوسط پاشش‌ها محاسبه گردید و نتیجه در شکل (۷) گزارش گردید. نتایج نشان داد در صورتی که فیلتر گرفتگی زیادی نداشته باشد، وجود یا عدم وجود آن بر روی سیستم تأثیر چندانی بر میزان پاشش انژکتورها ندارد.



شکل ۷ بررسی تأثیر وجود فیلتر بر میزان پاشش انژکتورها

۳-۶- بررسی سرعت قطع و وصل انژکتورها بر میزان مصرف سوخت

به‌منظور بررسی سرعت قطع و وصل انژکتورها بر میزان پاشش و در نتیجه مصرف سوخت، برنامه‌نویسی بر روی برد آردوینو انجام گرفت. طبق برنامه نوشته‌شده برق انژکتورها با سرعت ۴، ۶ و ۸ میلی‌ثانیه قطع و وصل می‌شوند. برای انجام این آزمایش،

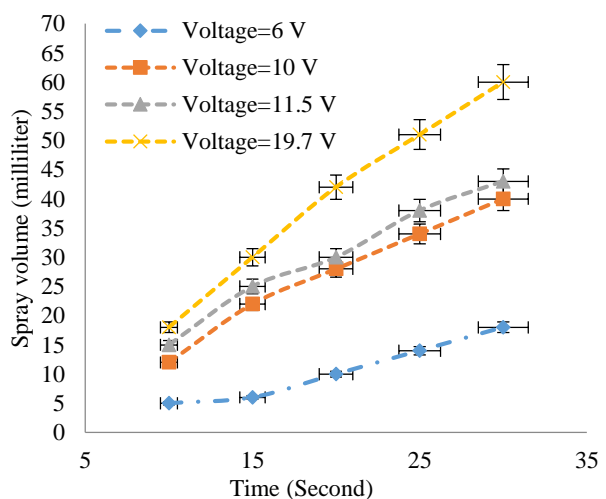
در این آزمایش انژکتور شماره (۲) نو می‌باشد. با توجه به شکل (۵-الف) مشخص است که انژکتور شماره (۱) کلاً معیوب می‌باشد چراکه در ۳۵ و ۴۰ ثانیه با وجود افزایش زمان پاشش، مقدار پاشش کاهش یافته است. انژکتور شماره (۴) گرفتگی شدید دارد و انژکتور شماره (۳) با وجود کارکرده بودن ولی گرفتگی نداشته و مقدار پاشش آن به انژکتور نو نزدیک می‌باشد.

یکی از اصلی‌ترین لوازم دستگاه انژکتور شوی وان اولتراسونیک می‌باشد. با مشاهده عملکرد نامناسب هر یک از سوزن انژکتورها در مرحله شستشوی اتوماتیک یا دستی؛ آن انژکتور باید با دستگاه اولتراسونیک شستشو شود. در این روش با استفاده از امواج مافوق صوت ذرات چربی و آلودگی‌ها از روی سطح جسم جدا شده و جسم یا قطعه پاک می‌شود. عمل شستشو بین ۱ الی ۱۰ دقیقه می‌تواند طول بکشد. در این آزمایش انژکتورهای (۱)، (۳) و (۴) در دستگاه اولتراسونیک برای شستشو قرار داده شده و به مدت ۱۰ دقیقه توسط اولتراسونیک شستشو شدند و مجدد آزمایش تکرار شد.

با توجه به شکل (۵-ب) نمودار انژکتور شماره (۴) به نمودار انژکتورهای (۲) و (۳) نزدیک شد و نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که گرفتگی آن برطرف شده است ولی انژکتور شماره (۱) همچنان نمودار قابل قبولی ندارد. همچنین مطابقت نمودار انژکتور شماره (۳) با نمودار انژکتور شماره (۲) بیشتر شده است.

۳-۴- بررسی تأثیر مقدار ولتاژ سیستم بر میزان پاشش

به‌منظور بررسی تأثیر ولتاژ سیستم بر روی میزان پاشش انژکتورها از مبدل DC-DC LM25596 استفاده شده است (شکل (۲)).



شکل ۶ تأثیر مقدار ولتاژ سیستم بر میزان پاشش انژکتورها

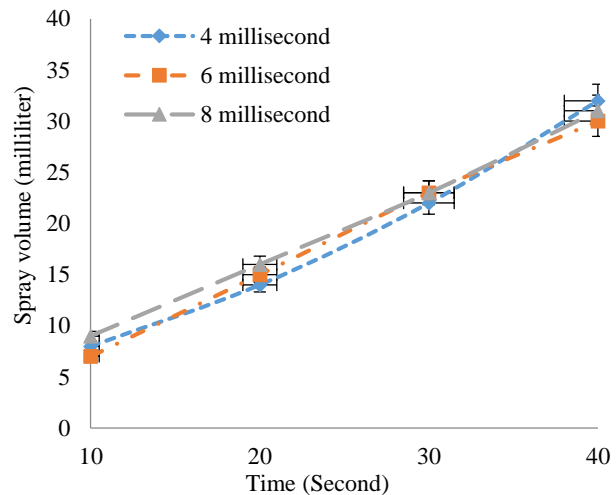
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور تجزیه و تحلیل تجربی پارامترهای مؤثر بر نرخ و توزیع پاشش انژکتورها، یک مدل آزمایشگاهی دستگاه تست انژکتور طراحی و ساخته شد. در این دستگاه تست نشستی سوزن انژکتورها، بررسی شکل پاشش و مقدار پاشش به صورت چشمی انجام گرفت. نتایج نشان داد افزایش زمان پاشش، افزایش فشار ریل سوخت و افزایش ولتاژ اعمال شده به انژکتورها باعث افزایش مقدار پاشش می شود و سرعت قطع و وصل برق انژکتورها و وجود یا عدم وجود فیلتر تأثیر چندانی بر میزان پاشش نخواهد داشت.

۵- مراجع

- [1] B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, and F. Azimpour Shishevan, "Investigation of the effect of AL2O3 nanofluid in M13NI engine cooling system," (in persian), *The Journal of Engine Research*, vol. 70, no. 1, pp. 47-65, 2023, doi: <https://doi.org/10.22034/ER.2023.1975318.0>.
- [2] B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, F. Azimpour Shishevan, and M. A. Mohtadi Bonab, "Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator," (in persian) *The Journal of Engine Research*, vol. 70, no. 2, pp. 66-79, 2023, doi: <https://doi.org/10.22034/ER.2023.2011671.1015>.
- [3] A. Poormahmood, M. Ghorban Hosseini, A. Kebriaee, and M. Farshchi, "An Experimental Study on the Operating Parameters of a Simplex Swirl Injector," (in persian), *Fuel and Combustion*, vol. 9, no. 1, pp. 75-84, 2016.
- [4] S. M. Hosseinalipour, H. Karimaei, and F. Ommi, "Experimental Analysis of the Spray Characteristics of a Swirl Injector," (in persian), *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, vol. 46, no. 4, pp. 69-75, 2017.
- [5] M. R. Morad, and A. Ramezani, "Experimental study of liquid film thickness formed by spray impingement on a solid surface," (in persian), *Fuel and Combustion*, vol. 13, no. 2, pp. 57-72, 2020.
- [6] E. Rostami, and H. Mahdavy Moghaddam, "Experimental and Numerical Investigation of Atomization characteristics of Diesel and Mazut Fuel injected from a Pressure-Swirl Atomizer," (in persian), *Fuel and Combustion*, vol. 14, no. 3, pp. 33-58, 2021, doi: <https://doi.org/10.22034/jfnc.2021.284326.1278>.

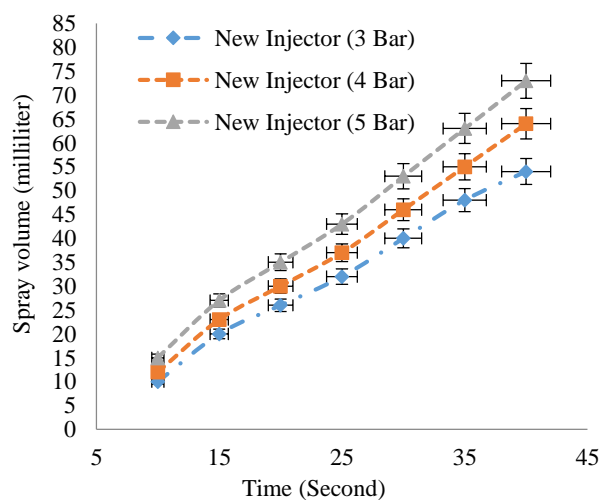
تایمر دستگاه بر روی ۱۰ الی ۴۰ ثانیه تنظیم می گردد و مقدار پاشش انژکتور نو در سه حالت ذکر شده مطابق شکل (۸) به دست می آید. طبق آزمایش انجام شده مشخص گردید که سرعت قطع و وصل انژکتورها در میزان پاشش انژکتورها بی تأثیر می باشد.



شکل ۸ تأثیر سرعت قطع و وصل انژکتورها بر میزان پاشش

۳-۷- بررسی تأثیر افزایش فشار بر روی مقدار پاشش

با مسدود کردن نسبی مسیر برگشت سوخت می توان فشار ریل سوخت را افزایش داد. در این حالت فعال شدن رگولاتور انتهایی ریل سوخت تأثیری بر کنترل فشار ندارد و می توان فشار ریل سوخت را افزایش و کاهش داد. به منظور بررسی تأثیر افزایش فشار بر روی مقدار پاشش فقط از انژکتور نو استفاده شده است و آزمایش ها در سه فشار ۳، ۴ و ۵ بار انجام شد. همان طور که در شکل (۹) ملاحظه می شود نتایج نشان داد متوسط پاشش انژکتورها با افزایش فشار ریل سوخت افزایش می یابد.



شکل ۹ بررسی تأثیر افزایش فشار بر روی مقدار پاشش

- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.140>.
- [14] Z. Wang, H. Xu, C. Jiang, and M. L. Wyszynski, "Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection," *Fuel*, vol. 174, pp. 140-152, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.083>.
- [15] R. Payri, F. J. Salvador Rubio, G. C. Bracho León, and A. A. Viera Sotillo, "Vapor phase penetration measurements with both single and double-pass Schlieren for the same injection event," in *Illass Europe. 28th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Editorial Universitat Politècnica de València, July 2017, pp. 747-754, doi: <https://doi.org/10.4995/TLASS2017.2017.4884>.
- [16] R. Payri, J. P. Viera, V. Gopalakrishnan, and P. G. Szymkowicz, "The effect of nozzle geometry over internal flow and spray formation for three different fuels," *Fuel*, vol. 183, pp. 20-33, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.041>.
- [17] F. Xue *et al.*, "Numerical analyses of transient flow characteristics within each nozzle hole of an asymmetric diesel injector," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 104, pp. 18-27, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.027>.
- [18] F. J. Salvador, D. Jaramillo, J. V. Romero, and M. D. Roselló, "Using a homogeneous equilibrium model for the study of the inner nozzle flow and cavitation pattern in convergent-divergent nozzles of diesel injectors," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 309, pp. 630-641, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.010>.
- [19] F. J. Salvador, M. Carreres, D. Jaramillo, and J. Martínez-López, "Analysis of the combined effect of hydrogrinding process and inclination angle on hydraulic performance of diesel injection nozzles," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 1352-1365, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.035>.
- [7] R. Khodaverdian *et al.*, "Evaporation of Injected Oxidizer from a Pressure-Swirl Injector in a Low Pressure Combustion Chamber," (in persian), *Fuel and Combustion*, vol. 14, no. 1, pp. 95-116, 2021, doi: <https://doi.org/10.22034/jfnc.2021.250402.1248>.
- [8] S. Marčič, M. Marčič, and Z. Praunseis, "Mathematical model for the injector of a common rail fuel-injection system," *Engineering*, vol. 7, no. 06, pp. 307, 2015, doi: <https://doi.org/10.4236/eng.2015.76027>.
- [9] V. G. Kamaltdinov *et al.*, "Experimental studies of fuel injection in a diesel engine with an inclined injector," *Energies*, vol. 12, no. 14, pp. 2643, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12142643>.
- [10] C. J. Mueller, C. W. Nilsen, D. E. Biles, and B. F. Yraguen, "Effects of fuel oxygenation and ducted fuel injection on the performance of a mixing-controlled compression-ignition optical engine with a two-orifice fuel injector," *Applications in Energy and Combustion Science*, vol. 6, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100024>.
- [11] R. Payri, G. Bracho, P. Marti-Aldaravi, and A. Viera, "Near field visualization of diesel spray for different nozzle inclination angles in non-vaporizing conditions," *Atomization and Sprays*, vol. 27, no. 3, pp. 251-267, 2017, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2017017949>.
- [12] M. R. Herfatmanesh, P. Lu, M. A. Attar, and H. Zhao, "Experimental investigation into the effects of two-stage injection on fuel injection quantity, combustion and emissions in a high-speed optical common rail diesel engine," *Fuel*, vol. 109, pp. 137-147, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.013>.
- [13] R. Payri, F. J. Salvador, G. Bracho, and A. Viera, "Differences between single and double-pass schlieren imaging on diesel vapor spray characteristics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 220-231, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.140>.

تحلیل عددی جریان گاز در شیرهای صنعتی جهت کاهش اثرات حباب زایی در شبکه گازرسانی کشور

چکیده: شیرهای صنعتی با طراحی دقیق، نقش مهمی در کنترل جریان سیال و کاهش پدیده کاویتاسیون ایفا می کنند. کاویتاسیون، با کاهش فشار محلی سیال، منجر به تشکیل و انفجار حباب ها شده که سطوح را فرسایش داده و عملکرد شیرها را مختل می سازد. این پژوهش به شبیه سازی کاویتاسیون در شیرهای پروانه ای و کروری پرداخته و تأثیر پارامترهایی نظیر افت فشار، دمای سیال و درجه باز شدگی شیر بر شدت کاویتاسیون را بررسی می کند. مدل سازی جریان و تحلیل پارامترهای کلیدی با رویکرد گسسته سازی مرتبه دوم انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل اغتشاشی $\gamma - Re_{\theta}$ دقیق ترین پیش بینی ها را ارائه می دهد. استقلال تحلیل از مش بندی و اعتبارسنجی با داده های آزمایشگاهی نیز تأیید شد. مقاله حاضر با بهره گیری از مدل های شبیه سازی عددی پیشرفته و تحلیل های پارامتریک دقیق، نوآوری هایی در درک پدیده کاویتاسیون در شیرهای پروانه ای و کروری ارائه می کند. استفاده از مدل $\gamma - Re_{\theta}$ برای پیش بینی دقیق رفتار کاویتاسیون، همچنین بررسی اثرات افت فشار و دما بر شدت این پدیده، به طور خاص در شرایط صنعتی، از جمله دستاوردهای این تحقیق به شمار می رود.

واژه های راهنما: کاویتاسیون، شیرهای صنعتی، شبیه سازی عددی، جریان سیال، تحلیل پارامتریک

مسعود درفشان*
استادیار

صادق ستوده

دانشجوی کارشناسی ارشد،
گروه سیستم های انرژی، دانشکده
مهندسی،
دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء،
بهبهان

پیام پرواسی

دانشیار،
گروه مهندسی شیمی،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه صنعتی شیراز،
شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

Masoud Dorfeshan*
Assistant Professor

Sadegh Sotoudeh

MSc. Student,
Department of Energy
Systems, Faculty of
Engineering, Khatam
Alania University of
Technology, Behbahan

Payam Parvasi

Associate Professor,
Department of Chemical
Engineering, Faculty of
Engineering, Shiraz
University of Technology,
Shiraz

Numerical analysis of gas flow in industrial valves for mitigating cavitation effects in the national gas distribution network

Abstract: Industrial valves, with precise design, play a significant role in controlling fluid flow and mitigating cavitation phenomena. Cavitation, by reducing the local fluid pressure, leads to the formation and collapse of bubbles, which erode surfaces and disrupt valve performance. This study simulates cavitation in butterfly and ball valves and investigates the impact of parameters such as pressure drop, fluid temperature, and valve opening degree on the intensity of cavitation. Flow modeling and analysis of key parameters were carried out using second-order discretization methods. The results showed that the $\gamma - Re_{\theta}$ turbulence model provides the most accurate predictions. The independence of the analysis from meshing and its validation with experimental data were also confirmed. This study, by utilizing advanced numerical simulation models and precise parametric analyses, presents innovations in understanding the cavitation phenomenon in butterfly and spherical valves. The use of the turbulence model $\gamma - Re_{\theta}$ for accurate cavitation predictions, along with the investigation of the effects of pressure drop and temperature on the intensity of this phenomenon, particularly in industrial conditions, are key contributions of this research.

Keywords: Solar greenhouse, Photovoltaic panel, Coverage ratio, Shading factor, DLI factor, Design Builder software, Daylighting simulation

۱- مقدمه

پوزار و همکاران در تحقیق خود برای نظارت صنعتی بر جریان سیالات، نشان دادند که انتقال از یک جریان تک‌فاز به حالت کاویتاسیون معمولاً از طریق میکروفونی شناسایی می‌شود که صدای ساطع شده در نزدیکی نواحی بحرانی مانند باز شدن دریچه‌های کنترل را اندازه‌گیری می‌کند. برای اندازه‌گیری آستانه کاویتاسیون، آنها یک روش تشخیص پیزوالکتریک آنالوگ و کارآمد توسعه دادند. ارزیابی این روش، هم در صفحه دهانه آزمایش مرجع و هم در یک شیر کنترل منتخب، نشان داد که این روش قادر است نویز صوتی در محیط‌های صنعتی را کاهش دهد، وابستگی به قضاوت اپراتور را تا حد زیادی کم کند و امکان مشاهده دقیق‌تر پدیده کاویتاسیون را فراهم سازد [۲].

یانگ و همکاران نشان دادند که کاویتاسیون در نازل فلپر شیر صنعتی، عامل اصلی لرزش فلپر و افت عملکرد آن است. آن‌ها تأثیر کاهش کاویتاسیون را با استفاده از دو میکروجت پیوسته در اطراف جت اصلی نازل بررسی کردند. این روش از طریق شبیه‌سازی عددی و مقایسه کسر بخار در شرایط مختلف ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که میکروجت‌ها توانستند کاویتاسیون را کاهش دهند و این تأثیر به عواملی مانند فشار ورودی، قطر محفظه و فاصله پوچی وابسته است. در شرایط مشابه، ساختار نازل مجهز به میکروجت‌ها کاویتاسیون را به طور مؤثری مهار می‌کند [۳].

لیو و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی پویایی سیالات محاسباتی، فرسایش ناشی از کاویتاسیون و ذرات را در شیر پروانه‌ای سیستم تصفیه آب یک رآکتور PWR^۱ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فرسایش، عمدتاً در نواحی جلو و عقب دیسک شیر رخ می‌دهد. همچنین، افزایش فشار ورودی منجر به تشدید فرسایش و افزایش شدت آشفته‌گی جریان می‌شود. از سوی دیگر، کاهش زاویه باز شدن شیر، میزان فرسایش را کاهش داده و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. این تحلیل به بهبود قابلیت اطمینان و عمر مفید شیر کمک می‌کند [۴].

چینایف و همکاران در پژوهش خود، بر پایه تجزیه و تحلیل فرآیندهای کاویتاسیون و روش‌های موجود تعیین خصوصیات آن، روشی آزمایشی برای تعیین ضریب کاویتاسیون ارائه کردند. آن‌ها همچنین تکنیک پردازش داده‌های تجربی را در توسعه این ضرایب ارزیابی نمودند. بر اساس داده‌های تجربی، نویسندگان تأثیر فشار قبل و بعد از شیر صنعتی و نیز جریان فشار دیفرانسیل را بر مشخصه پهنای باند و ویژگی‌های کاویتاسیون شیرها بررسی کردند [۵].

شیرهای صنعتی اجزایی با هندسه‌های متنوع هستند که برای کنترل جریان گاز در شبکه گازرسانی به کار می‌روند. با طراحی دقیق اجزای داخلی این شیرها، می‌توان پدیده کاویتاسیون را کنترل کرد. علاوه بر این، انتخاب مواد مناسب در ساخت اجزای شیر، امکان استفاده از آن‌ها را با انواع سیالات و در کاربردهای مختلف فراهم می‌سازد. یک شیر صنعتی معمولاً از یک دیسک تشکیل شده است که می‌تواند با چرخش یک‌چهارم دور توسط محوری که از درون آن عبور می‌کند، جریان را تنظیم کند. موقعیت نسبی بین مرکز هندسی دیسک و محور، نوع سپ را مشخص می‌کند: متقارن، خارج از مرکز یا مضاعف. چرخش دیسک، تعیین‌کننده میزان جریانی است که از طریق شیر عبور می‌کند؛ حداکثر جریان زمانی است که دیسک موازی با مسیر جریان قرار گیرد (حالت باز)، و حداقل جریان زمانی است که دیسک عمود بر جریان باشد (حالت بسته).

هنگامی که فشار محلی سیال کمتر از فشار بخار اشباع در دمای کاری شود، کاویتاسیون در جریان سیال رخ می‌دهد. رشد و انفجار حباب‌های ایجاد شده منجر به فرسایش سطح و جدا شدن ذرات گاز از سیال می‌شود که این امر مشکلاتی برای شیرهای صنعتی ایجاد می‌کند و در نتیجه، هزینه‌های زیادی برای جایگزینی آن‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه به همراه دارد؛ بنابراین، کاویتاسیون یکی از پارامترهای کلیدی در مسائل دینامیک سیالات و توربومشین‌ها به شمار می‌رود و بی‌توجهی به آن می‌تواند عواقب متعددی به دنبال داشته باشد. شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون در شیرها و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن، از اقدامات اساسی در طراحی و بهینه‌سازی شیرهای صنعتی است. برای کارخانه‌های سازنده شیرهای صنعتی، توجه به این نکات از اهمیت بالایی برخوردار است. براین اساس، بررسی پژوهش‌های پیشین در زمینه شبیه‌سازی و تحلیل پدیده کاویتاسیون در شیرهای صنعتی می‌تواند به شناسایی روش‌های مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد این تجهیزات کمک کند.

کر و همکاران با استفاده از یک روش المان محدود، برهم‌کنش‌های سیال و سازه در یک شیر کنترل را مورد بررسی قرار دادند. بردارهای جابه‌جایی، سرعت و متغیرهای فشار نسبت به زمان برای توصیف سیال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق، توصیف جامعی از میدان‌های سیال تحت موج یا شوک را ارائه داد [۱].

¹ Pressurized-Water Reactor

هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها همچنین تأثیر شبکه محاسباتی و مدل‌های مختلف توربولانس را بر همگرایی حل مطالعه کردند [۱۲].

چرن و همکاران جریان عبوری از یک شیر کروی با مقطع مدور را به طور آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آن‌ها در دو مورد، یعنی طول گردابه بی‌بُعد شده و شاخص کاویتاسیون، به‌عنوان مبنای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

ژیومی و همکاران جریان کاویتاسیونی ناپایدار و نوسانات فشار در شیرهای تنظیم‌کننده را به روش عددی-آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کاویتاسیون شامل حباب‌های ثابت و متحرک است که با جریان برگشتی جدا شده و متلاشی می‌شوند. نسبت طول به قطر تأثیر مستقیمی بر دوره نوسان حباب‌ها و نوسانات فشار دارد. در مراحل اولیه، جریان پایدار است، اما در مرحله فروپاشی حباب‌ها، ناپایداری افزایش یافته و افت فشار تشدید می‌شود [۱۴].

برای تشخیص فرسایش کاویتاسیون، یک پارامتر جدید به نام "سطح آستانه" پیشنهاد شد. این پارامتر ارتباط بین اثرات کاویتاسیون و مقاومت مواد را برقرار می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، اگر اثرات کاویتاسیون از حد آستانه بزرگ‌تر باشد، احتمال دارد که ماده تحت تأثیر قرار گرفته و دچار فرسایش شود [۱۵].

تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که کاویتاسیون را می‌توان از طریق انعکاس یا پراکندگی امواج مافوق صوت و با تجسم جریان مایع شبیه‌سازی کرد. برای مشاهده غیرمستقیم کاویتاسیون، از سنسورهای فشار، شتاب و ابزار صوتی استفاده می‌شود. در این تحقیقات مشخص شد که نوسانات مکرر، نشانه‌ای از کاویتاسیون ابتدایی هستند [۱۶].

حبیب‌نژاد و همکاران تأثیر چهار ساختار مختلف قفسه سوراخ‌دار در شیرهای گلوب را بر افت فشار و کاویتاسیون بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش باز شدن شیر، حتی در سرعت‌های پایین نیز کاویتاسیون ایجاد می‌شود و با افزایش سرعت ورودی، شدت کاویتاسیون بیشتر می‌شود. در نهایت، استفاده از قفسه سوراخ‌دار با سوراخ‌های به سمت پایین موجب کاهش کاویتاسیون بیشتر و حفاظت از اجزای داخلی شیر می‌شود [۱۷].

در تحقیق دیگری مازور و همکاران سایش بیش از حد شیر کنترلی در توربین ۲۵ مگاواتی زمین گرمایی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. مدل‌سازی انجام شد و جریان بخار حاوی ذرات جامد تحلیل گردید. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی فشار تغذیه و کندانسور، انرژی جریان

سونگ و پارک نتایج آزمایشگاهی یک شیر پروانه‌ای به قطر ۱/۸ متر را با شبیه‌سازی سه‌بعدی مقایسه کردند. سیال مورد بررسی آب، جریان آشفته لزج و غیر قابل تراکم، با شرایط مرزی سرعت ورودی و فشار اتمسفر در خروجی و مدل آشفتگی K-ε بود. نتایج شبیه‌سازی، به‌جز در زاویه‌های کمتر از ۲ درجه، با داده‌های تجربی مطابقت خوبی داشت [۶].

ابراهیم و همکاران شبیه‌سازی عددی دوبعدی جریان آب از میان یک شیر پروانه‌ای ۳۸ میلی‌متری تک دیسک را با نرم‌افزار فلونت و مدل آشفتگی K-ε انجام دادند. آن‌ها مشخصات جریان، پروفیل سرعت، و توزیع فشار را در زوایای مختلف بازشدگی و سرعت‌های مختلف ورودی بررسی کردند و پیشنهاد دادند که شیرهای پروانه‌ای در زوایای نزدیک به حالت بسته استفاده نشوند [۷].

وکیلی تهامی و همکاران رفتار هیدرودینامیکی انواع دیسک شیر پروانه‌ای به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر را شبیه‌سازی کردند. این شبیه‌سازی با فرض جریان پایای غیر قابل تراکم آشفته، مدل آشفتگی K-ε و شرایط مرزی ورودی در دو حالت سرعت ثابت و فشار ثابت و خروجی با فشار اتمسفر انجام شد و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شد [۸].

فرسایش کاویتاسیونی در پمپ‌ها و شیرآلات نیروگاه‌های هسته‌ای موجب کاهش بازدهی و عمر مفید آن‌ها شده است. زاو و همکاران [۹] گزارش کرده‌اند که این پدیده به ریزساختار، سختی و چقرمگی مواد وابسته بوده و در فولاد آستنیتی مقاومت بیشتری مشاهده شده است. همچنین، سایش-خوردگی تحت تأثیر ترکیب عناصر قرار دارد. برای بهبود مقاومت، استفاده از عناصر آلیاژی و پوشش‌های محافظ پیشنهاد شده است.

ژو و همکاران به بررسی مکانیزم‌های اتلاف انرژی در جریان‌های کاویتاسیونی شیرهای کنترلی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که کاویتاسیون می‌تواند منجر به افزایش قابل توجهی در اتلاف انرژی شود و طراحی بهینه شیرهای کنترلی می‌تواند به کاهش این اتلاف‌ها کمک کند [۱۰].

دیویس و استوارت با استفاده از نرم‌افزار فلونت جریان سیال در شیرهای کنترلی را مطالعه کردند. آن‌ها شیر کنترلی با فاکتور ظرفیت ۲،۵ تا ۱۳ را بررسی کرده و نتایج عددی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. یافته‌ها نشان داد که ضریب ظرفیت و سایر ویژگی‌های وابسته به‌راحتی از طریق مدل قابل‌پیش‌بینی هستند [۱۱].

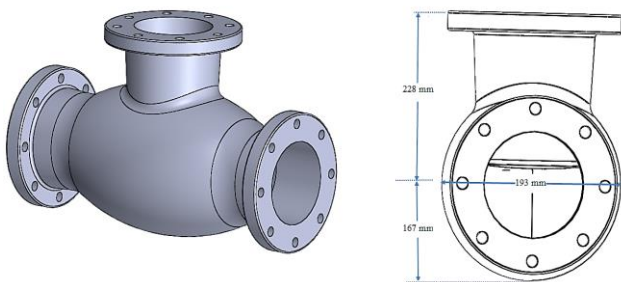
لینو و همکاران با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، فشار، سرعت و پدیده کاویتاسیون در یک شیر سوپاپ

نرم افزار انسیس فلونت، خواص گاز و فرآیند حباب‌زایی با استفاده از مدل چندجمله‌ای موجب در نرم‌افزار، به‌منظور اعمال خواص حرارتی متغیر با دما، اجرا می‌گردد. در گام نخست، استقلال تحلیل از اندازه مش و انتخاب مدل اغتشاشی مناسب مورد توجه قرار گرفته است. سپس نتایج با کارهای آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی شده و دقت پیش‌بینی نتایج با روش عددی نسبت به کار آزمایشگاهی تحلیل خواهد شد. در نهایت، به عنوان تحلیلی پارامتریک، تأثیر پارامترهایی همچون افت فشار، دمای ورودی جریان سیال و زبری بر پارامترهای بروز کایتاسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی این تحقیق، تحلیلی پارامتریک از متغیرهای بسیار مهم در طراحی شیرهای صنعتی خواهد بود که در تحلیل جریان شبکه گازرسانی کشور مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

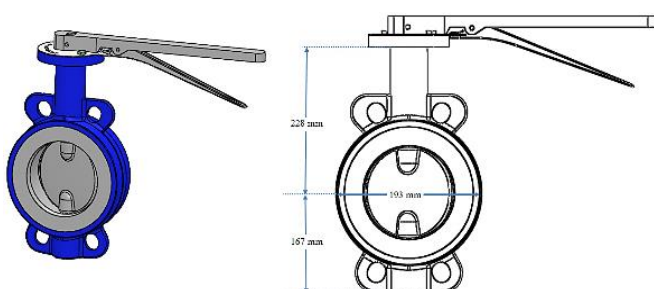
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- هندسه و طراحی مدل

در این پژوهش، در گام نخست هندسه دو نوع شیر انتخاب شده برای بررسی پدیده‌های آشفتگی و کایتاسیون مورد تحلیل قرار می‌گیرد. هندسه‌های انتخابی برای شیرهای مورد بررسی در این تحقیق، شیرهای کروی و پروانه‌ای هستند که به‌منظور مقایسه نمودارهای عملکردی طراحی شده‌اند. طراحی این هندسه‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیالیدورک انجام شده است.



شکل ۱ مدل CAD از شیر کروی



شکل ۲ مدل CAD از شیر محور چرخان دیسک پروانه‌ای

توربولانسی و نرخ سایش تا ۴۹٪ کاهش می‌یابد. همچنین، پیشنهادهایی برای پیشگیری از سایش ارائه شد [۱۸].

رومانگولو و همکاران تأثیر کایتاسیون بر عملکرد و تخریب شیر کنترل پروپورشنال را بررسی کردند. جریان روغن در یک شیر اسپولی با بدنه پلکسی‌گلاس به‌صورت تجربی ثبت و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش سطحی بر تغییر شکل حباب‌های کایتاسیون تأثیر دارد. همچنین، شاخصی برای ارزیابی ناپایداری کایتاسیون ارائه شده که می‌تواند به کاهش این پدیده کمک کند [۱۹].

کایتاسیون همواره برای بهره‌برداران و تعمیرکاران صنایع به عنوان یک مشکل نگران‌کننده مطرح است، زیرا این پدیده می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری و سودآوری سیستم شود. کایتاسیون نه‌تنها باعث کاهش ظرفیت حجمی تجهیزات می‌شود؛ بلکه موجب تخریب قطعات، نویز و ارتعاشات زیاد نیز می‌گردد. در شیرهای پروانه‌ای و کروی، به دلیل رفتار چرخشی جریان در این شیرها، بروز کایتاسیون امری ذاتی است. درک ماهیت طبیعی این پدیده و آشنایی با تکنیک‌ها و تجهیزات کنترل آن، بهترین راه برای جلوگیری از نتایج منفی کایتاسیون است. باتوجه‌به هزینه‌های سنگین خسارات ناشی از بروز کایتاسیون در شبکه گازرسانی و کاهش فشار به‌ویژه در اقلیم‌های سردسیر، طراحی شیرهای کنترلی جریان گاز و بررسی پدیده کایتاسیون از اهمیت بالایی برخوردار است که در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جنبه نوآوری این تحقیق در آن است که در بیشتر مطالعات پیشین در زمینه شیرهای صنعتی، پدیده کایتاسیون به‌طور جامع برای بهبود عملکرد شیرهای کنترلی و تعیین بهینه پارامترهای آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار نگرفته است. نوآوری‌های اصلی این پروژه به شرح زیر است: تحلیل دقیق عملکرد و رفتار شیرهای صنعتی در شرایط بروز پدیده کایتاسیون، بررسی تأثیر مقطع عبور جریان بر وقوع و شدت کایتاسیون، تعیین ضریب کایتاسیون و شدت آن در شیرهای مختلف، شبیه‌سازی عددی پدیده کایتاسیون و تحلیل پارامتریک شیرهای پروانه‌ای و کروی، و ارزیابی اثرات کایتاسیون بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان سیال در این شیرها.

روش کار این تحقیق به این صورت است که ابتدا یک مدل سه‌بعدی از هندسه شیرهای پروانه‌ای و کروی تهیه شده و به‌منظور تحلیل به نرم‌افزار انسیس فلونت ارسال می‌شود. تغییرات هندسه‌های مختلف شیر صنعتی با استفاده از نرم‌افزار CAD انجام می‌شود تا هندسه‌ای قابل بسط برای تحلیل پارامتریک به دست آید. پس از اعمال شرایط مرزی به مدل در

می‌کند. اگرچه عدد کاویتاسیون مستقیماً به هندسه شیر مرتبط نیست؛ اما هندسه شیر و موانع جریان می‌توانند با تغییر توزیع فشار و سرعت، شرایط کاویتاسیون را تحت تأثیر قرار دهند. عواملی مانند زبری سطح، اثرات ترمودینامیکی و کشش سطحی نیز بر شدت و شکل‌گیری کاویتاسیون تأثیرگذار هستند. تغییرات عدد کاویتاسیون معمولاً به تغییرات شرایط جریان بالادست مربوط می‌شود. در شیرهای صنعتی، رابطه بین چرخش میله و میزان بازشدگی شیر بسته به نوع طراحی شیر متفاوت است. در شیرهای کروی، چرخش میله باعث تغییرات غیرخطی در میزان بازشدگی می‌شود، که معمولاً از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$A = A_{max} \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right)^n \quad (3)$$

که در آن A مساحت عبور جریان است، θ زاویه چرخش میله و n یک ثابت تجربی است که در این تحلیل ۲ در نظر گرفته شده است. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش زاویه چرخش، جریان به‌طور نمایی افزایش می‌یابد و برای بازشدگی کامل نیاز به چرخش بیشتری است. در مقابل، در شیرهای پروانه‌ای، تغییرات بازشدگی به‌صورت خطی با چرخش میله صورت می‌گیرد که از رابطه زیر پیروی می‌کند.

$$A = A_{max} \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \quad (4)$$

θ زاویه چرخش دیسک پروانه‌ای است.

۲-۳- معادلات توصیف‌کننده حرکت حباب در حین بروز پدیده کاویتاسیون

در یک میدان جریان، مدل رایلی می‌تواند برای توصیف رفتار یک حباب کروی مورد استفاده قرار گیرد [۲]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[p_v - p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} - p \frac{2\gamma}{R} \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right] \quad (5)$$

اگر رفتار حباب بدون در نظر گرفتن حرارت اتلافی در نظر گرفته شود، مقدار $K = 0.25$ خواهد بود. در این معادله فرضیاتی چون تراکم‌ناپذیری سیال، یکنواختی فشار و دمای درون حباب و صرف‌نظر از انتقال جرم به داخل حباب در نظر گرفته شده است. اگر تغییرات در شعاع حباب نیز لحاظ شود، معادله حرکت با رابطه (۶) قابل توصیف است [۲۱].

سپس با بررسی برخی روابط تئوری مرتبط با ایجاد حباب‌های هوایی و نابجایی در جریان سیال، تحلیلی تئوری از پارامترهای پر اهمیت برای آشنایی با مبانی کاویتاسیون در جریان ارائه خواهد شد. در نهایت، با بیان روش‌شناسی شبیه‌سازی جریان در محیط فلونت از نرم‌افزار انسیس ورک بنچ، به پدیده آشفته‌گی و مدل‌های مختلف مورد استفاده در گذر جریان از حالت خطی به آشفته پرداخته خواهد شد. در شکل‌های (۱) و (۲) نقشه شیرهای طراحی شده مشاهده می‌شود. در این تحقیق از سایز ۸ اینچی (DIN200) استفاده شده است و به‌منظور انجام مطالعه مقایسه‌ای با شیر کروی، هندسه دهانه شیر کروی نیز با همین ابعاد انتخاب گردیده است.

۲-۲- بررسی پدیده کاویتاسیون

بروز پدیده کاویتاسیون و تشکیل حباب در شیرهای صنعتی به علت عواملی همچون افزایش دما (افزایش دمای کارکرد سیال، بروز پدیده جوش، تماس با جریان هوای گرم و ...) یا کاهش فشار نسبی رخ می‌دهد. در برخی موارد، هنگامی که جریان از یک بستر سیالاتی عبور می‌کند، تغییرات هندسی بستر جریان می‌تواند باعث تغییر در سرعت جریان شود و با کاهش فشار هیدرواستاتیکی، خطوط جریان از پیوستگی خود خارج می‌گردند که در نتیجه پدیده کاویتاسیون ایجاد می‌شود. حباب‌های موجود در جریان سیال حاوی گازهایی هستند که در حین عبور جریان در سیال حل شده‌اند. فشار گازهایی که در این حباب‌ها ایجاد می‌شود، نقش بسزایی در نوع تخریب حباب‌ها دارد. اگر فشار بخار داخل حباب‌ها کم باشد، تخریب حباب‌ها به‌صورت انفجاری و ناگهانی خواهد بود؛ در غیر این صورت، تخریب حباب‌ها به‌طور آهسته صورت می‌گیرد [۲۰]. برای حباب کروی شکل، معادله تعادل را به‌صورت زیر می‌توان نوشت [۲۱]:

$$p_g + p_v = p_{\infty} + \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

طبق این رابطه در صورت تغییر در فشار سیال، برای برقراری تعادل فیزیکی، شعاع حباب نیز تغییر می‌کند. در بررسی پدیده‌ی کاویتاسیون عدد بدون بعد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2} \quad (2)$$

عدد کاویتاسیون یک معیار بی‌بعد است که احتمال وقوع و سرعت موضعی بستگی دارد و در نقاط مختلف جریان تغییر

ضریبی برای اندازه‌گیری جریان گاز از شیر است برای شیرهای پروانه‌ای و کروی با ۲۵ درصد بازشدگی برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

۲-۴- شبیه‌سازی عددی

ساخت مدل سه‌بعدی و شبکه‌بندی مدل مطابق با شکل‌های (۳) و (۴) انجام شده است. همه قطعات شیرهای صنعتی از فولاد ضدزنگ ماشین‌کاری ساخته شده است. خصوصیات کلی شبیه‌سازی جریان در شیر صنعتی در جدول (۱) آمده است. برای شبیه‌سازی درصدهای مختلف بازشدگی شیر، مدل کروی و پروانه طراحی شده از شیرهای کروی و پروانه‌ای با نرم‌افزار سالیدورک برای پیکربندی‌های مختلف دوران داده شده و سپس به نرم‌افزار انسیس فلونت وارد شده است.

معمولاً تولید شبکه یکی از مهم‌ترین و زمان‌برترین بخش یک شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در بررسی توابع فلونت اغلب آنها در نزدیکی سطوح به‌خوبی قادر به تحلیل جریان نیستند، به همین جهت در نقاط حساس مانند نزدیکی دیواره‌ها، اطراف سوراخ‌ها، نواحی جدایش جریان، روی نقاط سکون و نقاط مورد توجه برای خنک‌کاری به دلیل ایجاد بی‌نظمی‌های کنار سطح و به‌منظور تحلیل درست رفتار جریان و همچنین دست‌یابی به نتایج با دقت بالاتر، از شبکه ریزتری استفاده شده است. در این نواحی اندازه شبکه‌های ایجاد شده با نرخ ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان عبارتند از: تعریف پروفیل فشار کل و دمای کل ورودی. جهت جریان در ورودی به‌صورت عمود بر سطح و بدون پیش‌فرض فرض شد و از شدت توربولانس به مقدار ۵ درصد به عنوان پارامتر ورودی استفاده شد. دبی جرمی در خروجی به عنوان شرط مرزی معین تعریف می‌گردد. تعریف شرط مرزی تمام دیواره‌های ساکن و چرخان به‌صورت آدیاباتیک و عدم لغزش برای بردارهای سرعت.

استفاده از روش دستگاه مختصات چرخان برای در نظر گرفتن حرکت نسبی دریاچه و محفظه شیر صنعتی. در مرز مشترک بین دریاچه و محفظه شیر صنعتی شرط مرزی اختلاط تعریف شده است. در این روش منطقه محاسباتی به دو بخش ساکن (پوسته) و متحرک (دریاچه) تقسیم شده و هرکدام از این نواحی به‌صورت یک مسئله دائم حل می‌شوند. هرچند تکرار مشخص، همه خواص جریان در صفحه اختلاط و در جهت محیطی روی خروجی

$$\rho_b V_b \frac{d\bar{U}_b}{dt} = V_b(\rho_b - \rho)g\bar{j} + V_b \bar{\nabla} p + \frac{1}{2} \rho A_b C_D (\bar{U} - \bar{U}_b) |\bar{U} - \bar{U}_b| \quad (6)$$

ضریب C_D نیز عبارت است از [۲۲]:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38}) \quad (7)$$

عدد بی‌بعد رینولدز به ترتیب زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{2R|\bar{U} - \bar{U}_b|}{\vartheta} \quad (8)$$

باتوجه به اینکه جریان کاپیتاسیون در شیر کنترلی دوفازی است، چگالی ρ_H و ویسکوزیته دینامیکی μ_{tp} در سیال دوفازی باید براساس کیفیت x برای فازهای بخار g و مایع l به صورت زیر تعریف شوند:

$$\rho_H = \varepsilon_H \rho_g + (1 - \varepsilon_H) \rho_l \quad (9)$$

$$\mu_{tp} = x \mu_g + (1 - x) \mu_l \quad (10)$$

در رابطه (۹)، ε_H کمیتی به نام کسر حجمی همگن^۱ بوده و بصورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

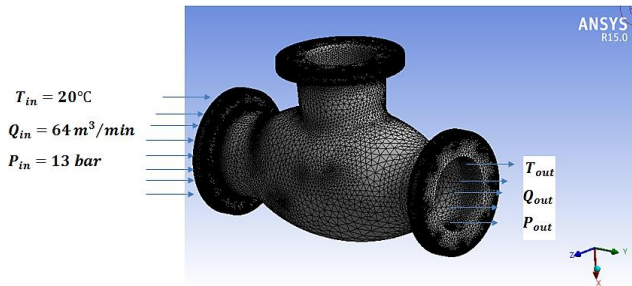
$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l} \right)} \quad (11)$$

با تعریف کمیت‌های لازم در این بخش، افت فشار ناشی از ممنونم را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد که بیان‌کننده اختلاف انرژی جنبشی بین ورودی و خروجی سیال دوفازی می‌باشد:

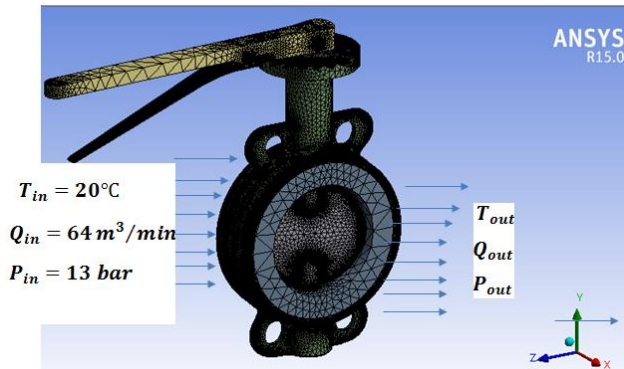
$$\Delta P_{mom} = G_r^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H \rho_g} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H \rho_g} \right]_{in} \right\} \quad (12)$$

در محاسبات پیش رو، چگالی گاز طبیعی در شرایط دمایی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۳ بار، برابر ۰/۸ کیلوگرم بر متر مکعب؛ ضریب فشار که نسبت فشار ورودی به خروجی یا فشار در نقطه طراحی است برابر با ۱/۲ و ضریب عبور گاز از شیر که

¹ Fraction Volume Hemogenous



شکل ۳ مش‌بندی و شبیه‌سازی مدل CAD شیر کروی



شکل ۴ مش‌بندی و شبیه‌سازی مدل CAD شیر پروانه‌ای

جدول ۱ مشخصات مرزی جریان ورودی و خروجی شیرها

مقدار	پارامتر
۲۵ درصد	درصد بازشدگی
۲۰ درجه سانتی‌گراد	دمای ورودی سیال
۲۰ دور بر دقیقه	دور گشودگی در نقطه طراحی
۶۴ متر مکعب بر ساعت	دبی جریان
۱۳ بار	فشار کل ورودی

در این پژوهش از مدل $\gamma - Re_{\theta}$ برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است تا بتوان به خوبی حباب ایجاد شده در قسمت مکش را مدل‌سازی نمود. همچنین از روش اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس با گسسته‌سازی مرتبه دوم در مکان و زمان برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شده است. به‌منظور کوپلینگ معادلات سرعت و فشار، الگوریتم تکرار سیمپل در این نرم‌افزار به کار گرفته می‌شود. مدل $\gamma - Re_{\theta}$ قادر است که حالت گذرا از جریان آرام به جریان مغشوش را به‌خوبی شبیه‌سازی کند.

این مدل در واقع مدل تصحیح شده‌ای از روش $k - \omega$ می‌باشد. مدل گذرای $\gamma - Re_{\theta}$ شامل دو معادله تناوب γ و معادله عدد رینولدز ضخامت مومنتوم گذرای انتقال یافته Re_{θ} می‌باشد که این معادله انتقال به صورت رابطه (۱۱) نوشته می‌شود.

دریچه و ورودی نازل متوسط‌گیری شده و سپس از یک ناحیه به ناحیه دیگر منتقل می‌شود. در بخش چرخان حل عددی شتاب گریز از مرکز و شتاب کوریولیس را به معادلات اضافه می‌کند. چون شیر متقارن محوری است، از شرایط مرزی متناوب برای دریچه و نازل استفاده شد؛ یعنی می‌توان با استفاده از شرایط مرزی متناوب تنها یک تکرار از مراحل حل را شبیه‌سازی کرد. به‌طور خلاصه شرایط مرزی عبارتند از:

شدت توربلانس معین در ورودی

$$I = \frac{K^{0.5}}{U_{in}} = 0.05 \quad (13)$$

عدم لغزش در دیواره‌ها

$$(U|_{wall}) = 0 \quad (14)$$

شرایط مرزی برای انرژی جنبشی توربلانس:

$$K_{in} = C_K U_{in}^2 I^2 \quad (15)$$

ضریب C_K برابر ۰/۰۹ در نظر گرفته شده است.

نرخ تخریب توربلانس:

$$\epsilon_{in} = C_{\epsilon} \cdot \frac{K_{in}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_{in}} \quad (16)$$

ضریب C_{ϵ} ۱/۴۴ در نظر گرفته شده است.

شرط مرزی آدیاباتیک برای دیواره‌های چرخان:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (17)$$

برای حل معادلات حاکم، نرم‌افزار انسیس بر اساس روش حجم محدود بکار رفته است. معادله فشار بر اساس طرح استاندارد و نیز معادلات مومنتوم و انرژی با استفاده از طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم و سایر معادلات با طرح مرتبه اول گسسته‌سازی شده‌اند. به‌منظور ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم جهت به‌دست‌آوردن معادلات تصحیح فشار و سرعت، الگوریتم سیمپل به کار رفته است. دقت حل برای معادله انرژی 10^{-6} و برای دیگر معادلات 10^{-3} در نظر گرفته شده است. جریان در شیرهای صنعتی دارای پیچیدگی‌های سیالاتی می‌باشد. در این میدان جریان، علاوه بر این که جریان حالت گذرا را تجربه می‌کند، بلکه شاهد پیدایش حباب جریان در قسمت مکش در شیرهای صنعتی نیز می‌باشد. در چنین جریانی لزوم انتخاب مناسب یک مدل جریان مغشوش می‌تواند به پیش‌بینی پیچیدگی‌های جریان کمک شایانی کند.

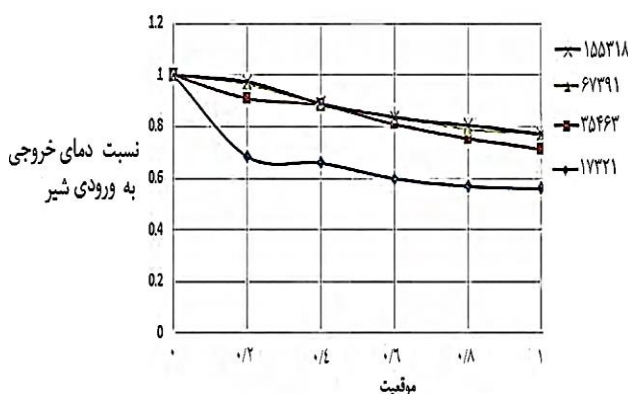
در رابطه (۱۲) کمترین سرعت صوت در سیال است و مقدار آن نقش تعیین کننده‌ای در تخمین ابعاد و ضخامت حفره‌های تشکیل شده در کاویتاسیون دارد. با توجه به مدل‌های تجربی، بهترین انتخاب برای این پارامتر عددی مابین ۱/۵ تا ۲/۵ است [۲۰].

۳- بررسی استقلال نتایج از مش بندی

به منظور کاهش خطا به علت درشتی یا ابعاد نامناسب مش بندی در میدان محاسباتی، مدل سازی با تعداد مش بندی مختلف بررسی شده است. استقلال از شبکه در مش زنی به مفهوم این است که با تغییر در ابعاد مش زنی، نتایج تغییر چندانی نداشته باشند. شبیه سازی شیر پروانه‌ای با درصد بازشدگی ۵۰ درصد و دمای ورودی سیال ۳۵ درجه برای چهار شبکه با تعداد ۱۷۳۲۱، ۳۵۴۶۳، ۶۷۳۹۱ و ۱۵۵۳۱۸ سلول استفاده شد و پارامتری که برای سنجش معیار همگرایی در نظر گرفته شده است، نسبت دمای خروجی به ورودی شیر می باشد. این پارامتر در نسبت‌های فواصل گوناگون موقعیت خطوط جریان نسبت به کل طول حجم کنترل انتخاب شده برای جریان سیال مورد سنجش قرار گرفت (طول حجم کنترل ۸۰۰ میلی متر انتخاب شده است).

مطابق با نتایج ترسیم شده در شکل (۶)، تعداد شبکه محاسباتی ۶۷۳۹۱ و ۱۵۵۳۱۸ دارای پاسخ‌هایی نزدیک به یکدیگر بوده‌اند.

محور افقی در شکل (۶) بیانگر موقعیت کانتور دما نسبت به کل دهانه حجم کنترل است. مقدار این بازه بین ۰ تا ۰/۶ در نظر گرفته شده است؛ زیرا در خارج از این بازه در خروجی شیر دیگر تغییراتی در میدان سرعت یا دما مشاهده نشده است. به دلیل نیاز کمتر به زمان برای شبیه سازی شبکه محاسباتی با ۶۷۳۹۱ سلول نسبت به شبکه با ۱۵۵۳۱۸ سلول، تصمیم گرفته شد که برای تمامی شبیه سازی‌ها از شبکه‌ای با ۶۷۳۹۱ سلول استفاده شود.

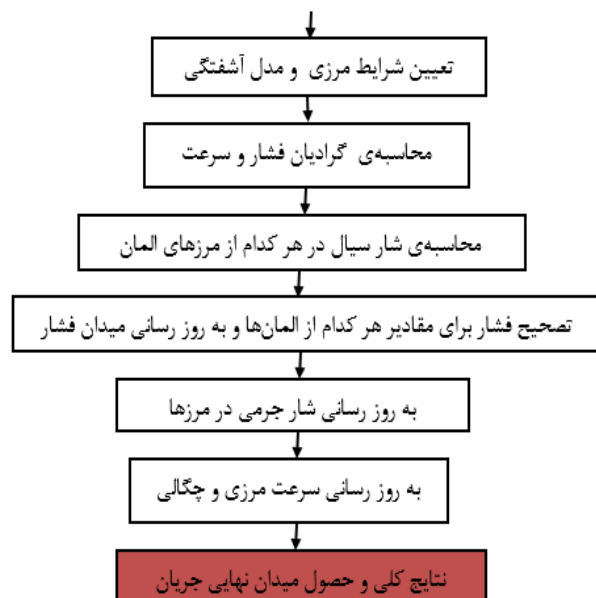


شکل ۶ بررسی نتایج استقلال از شبکه در فضای محاسباتی

$$\rho \frac{D\gamma}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] + F_L c_{a1} \rho S (\gamma F_{onset})^{0.5} (1 - c_{e1} \gamma) + F_{tur} c_{a2} \rho \Omega (\gamma F_{onset})^{0.5} (1 - c_{e2} \gamma) \quad (11)$$

الگوریتم تحلیل یک مسئله حرارتی-سیالاتی در شکل (۵) ترسیم شده است. همچنین لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از جریان دوفازی و در نظر گرفتن حباب‌های هوا به صورت یک گاز ایده آل، از فرمولاسیونی مبتنی بر چگالی موجود در نرم افزار فلوئنت برای شبیه سازی استفاده خواهد شد.

عنوان: الگوریتم شبیه سازی عددی کاویتاسیون در شیرهای صنعتی



شکل ۵ الگوریتم نحوه حل یک مسئله سیالاتی با روش عددی

مدل سازی پدیده کاویتاسیون علاوه بر تحلیل عملکرد شیرهای کنترل دبی جریان بر تجهیزات دیگر مانند توربوماشین‌ها نیز اثر دارد. این پدیده زمانی رخ می دهد که فشار محلی از فشار بخار سیال کمتر شود و هم زمان دوفاز مختلف سیال (مایع و بخار) یا فاز ترکیبی وجود داشته باشد. این شرایط مدل سازی کاویتاسیون را پیچیده می کند. چگالی جریان ترکیبی را می توان با استفاده از مدل باروتروپیک تخمین زد.

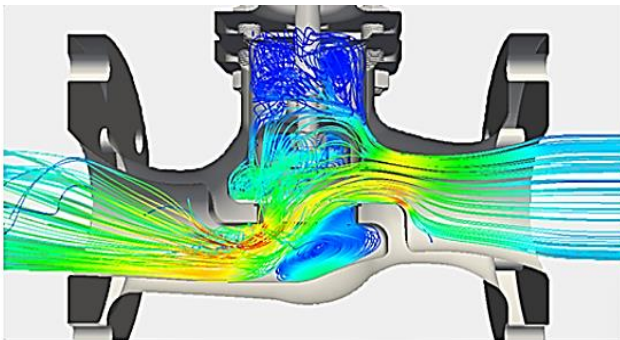
$$\rho = \left\{ \frac{\rho_l + \rho_v}{2} + \frac{\rho_l - \rho_v}{2} \sin \left(\frac{2}{C_{min}} \frac{p - p_{vap}}{\rho_l - \rho_v} \right) \right\} \quad (12)$$

۴- انتخاب مدل اغتشاشی مناسب

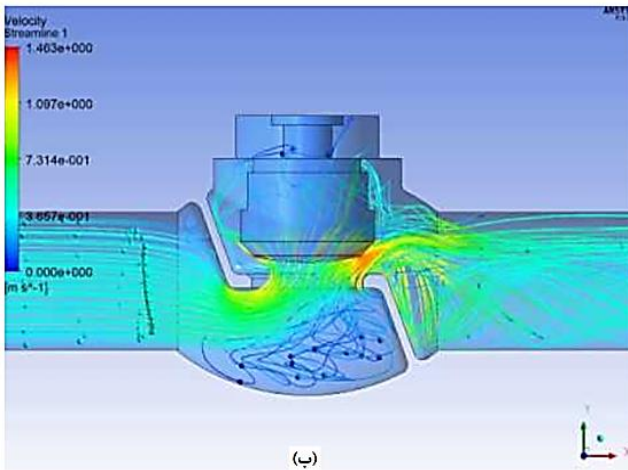
انتخاب مدل اغتشاشی تأثیر زیادی در پیش‌بینی دقیق پدیده کاویتاسیون دارد. هرچه مدل اغتشاشی بتواند جریان‌های برگشتی و عبوری از شیر صنعتی را بهتر شبیه‌سازی کند، نتایج به‌دست‌آمده برای احتمال بروز کاویتاسیون دقیق‌تر خواهند بود. در واقع، با ترسیم بردارهای سرعت و تحلیل جریان‌های برگشتی در شیرهای صنعتی، می‌توان با دقت بیشتری وقوع کاویتاسیون را پیش‌بینی کرد.

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی برای چهار مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ ، انتقال تنش برشی $k - \omega$ (SST)، مدل $\gamma - Re_{\theta}$ و مدل اسپالارت-آلماراس (S-A) برای شبیه‌سازی جریان در نظر گرفته شد که با توجه به تشابه نتایج جریان سرعت برای مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ و $k - \omega$ تنها یکی از این مدل‌ها برای مطالعات بعدی انتخاب شد. نتایج تحلیل نشان داد که در شیر کروی، تنها مدل $k - \omega$ پاسخ‌های همگرا حاصل کرده و در بقیه‌ی موارد با گام‌های بیش از ۲۰۰ تکرار همگرایی بین پاسخ‌ها بدست نیامده است. همگرا شدن جواب‌ها در مدل $k - \omega$ به لحاظ کردن پارامترهای تنش برشی در حل عددی نسبت داده می‌شود، چون با توجه به تغییر در جهت‌گیری جریان در این هندسه از شیر صنعتی، لحاظ کردن تنش برشی در فرمولاسیون امری ضروری به نظر می‌رسد. نتایج توزیع سرعت و خط جریان این مدل در شکل (۷) قابل مشاهده است. همگرایی نتایج در مدل $k - \omega$ بواسطه در نظر گرفتن پارامترهای تنش برشی در حل عددی حاصل می‌شود. این امر به‌ویژه در هندسه‌های پیچیده‌ای مانند شیرهای صنعتی اهمیت پیدا می‌کند؛ چرا که تغییرات در جهت‌گیری جریان در این نوع هندسه‌ها نیازمند توجه ویژه به تنش‌های برشی است. به این ترتیب، گنجاندن تنش برشی در فرمولاسیون مدل $k - \omega$ برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و معتبرتر امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

در شیر محور چرخان دیسک پروانه‌ای برای مدل کردن جریان برگشتی در زیر لایه ویسکوز برای سه مدل توربولانسی بر مبنای پارامتر سرعت، مدل $\gamma - Re_{\theta}$ برگشت جریان را به مراتب بهتر از مدل‌های دیگر نشان می‌دهد. در این شیر، با توجه به اینکه تشخیص سریع گذار جریان از رژیم جریان آرام به مغشوش اهمیت دارد، مدل $\gamma - Re_{\theta}$ بهتر از مدل‌های دیگر پدیده کاویتاسیون را پیش‌بینی کرده است. در واقع می‌توان گفت مدل توربولانسی $\gamma - Re_{\theta}$ تابع صریحی از عدد رینولدز می‌باشد و با لحاظ کردن مقدار معینی از زیری، مدل عددی جریان را پیش‌بینی کرده و حباب‌های ناشی از کاویتاسیون را حاصل کرده است. نتایج در شکل (۸) قابل مشاهده است.

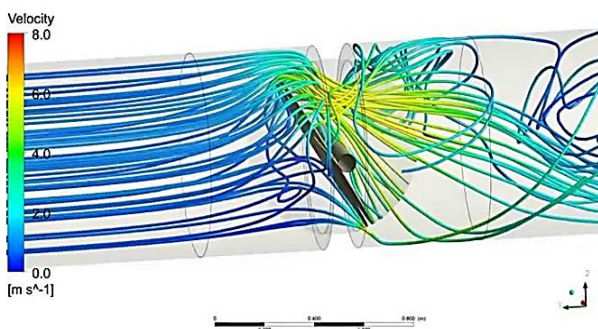
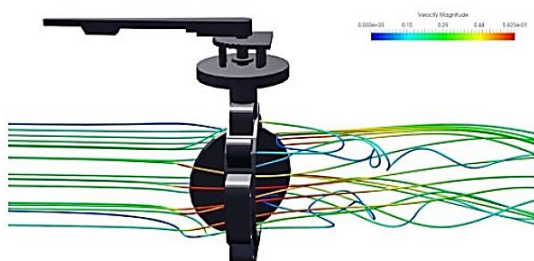


(الف)



(ب)

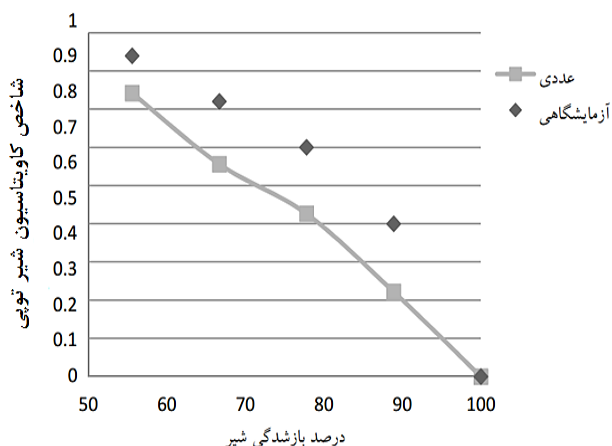
شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مدل $k - \omega$ در شیر کروی؛ الف- خط جریان، ب- توزیع سرعت



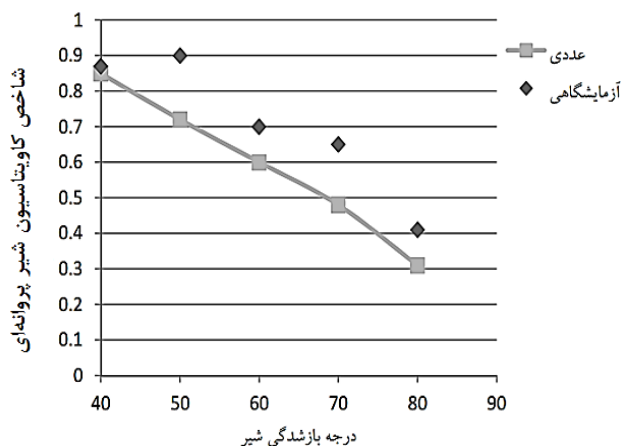
شکل ۸ پیش‌بینی پدیده کاویتاسیون در جریان شیر پروانه‌ای توسط مدل توربولانسی $\gamma - Re_{\theta}$

در شکل (۸) تعداد خطوط جریان در سمت چپ و راست تصویر نشان‌دهنده تغییرات فشار و سرعت جریان است و به‌طور غیرمستقیم می‌تواند میزان بخار ایجاد شده به‌علت کاویتاسیون

مقاطع کروی دارای تحلیل‌های دقیق‌تری خواهد بود. باتوجه به اینکه در شرایط مرزی اعمال شده، درصد بازشدگی شیر کمتر مورد نظر قرار گرفته است، نتایج مرتبط با شاخص کاویتاسیون برای درصد بازشدگی کمتر از ۳۰ درصد برای شیرهای کروی و پروانه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاکی از کمتر بودن میانگین این شاخص در شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی داشته است.



شکل ۹ مقایسه شاخص کاویتاسیون برای شیر کروی در تحقیق حاضر و کار آزمایشگاهی [۲۴].



شکل ۱۰ مقایسه شاخص کاویتاسیون برای شیر پروانه‌ای در تحقیق حاضر و کار آزمایشگاهی [۲۴].

جدول ۲ مقدار شاخص کاویتاسیون برای درصد‌های پایین بازشدگی شیرهای کروی و پروانه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

درصد بازشدگی	٪۳۰	٪۲۵	٪۲۰	٪۱۵	نوع شیر - درصد
شیر کروی	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۳	
شیر پروانه‌ای	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۹۰	
درصد اختلاف	۵/۶۱	۴/۴۹	۳/۲۹	۳/۲۲	

را مشخص کند. در نواحی که خطوط جریان به هم نزدیک‌تر هستند، سرعت جریان بالاتر است و فشار کاهش می‌یابد. این کاهش فشار ممکن است به اندازه‌ای برسد که باعث تبدیل مایع به بخار و ایجاد کاویتاسیون شود. در سمت راست تصویر، جایی که خطوط جریان از هم دورتر شده‌اند و تغییر جهت یافته‌اند، فشار کاهش می‌یابد و احتمالاً گردابه‌هایی به وجود آمده است که باعث افت فشار شدید و ایجاد کاویتاسیون می‌شوند. بنابراین، اختلاف تعداد خطوط جریان می‌تواند نشان‌دهنده نواحی با فشار پایین باشد که مستعد وقوع کاویتاسیون هستند.

۵- اعتبارسنجی نتایج عددی

به‌منظور اطمینان از دقت نتایج شبیه‌سازی عددی بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای کروی و پروانه‌ای، نتایج حاصل شده از این تحقیق باید تطابق قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی مقالات موجود داشته باشد. شاخص کاویتاسیون برای محاسبه نیاز به افت فشار و چگالی دارد. افت فشار که با کانتورهای فلونت قابل حصول است. از طرفی چگالی بر اساس افت فشار خوانده شده و مدل باروتروپیک معرفی شده در رابطه (۱۲) آورده می‌شود. با داشتن این مقادیر، مقادیر شاخص کاویتاسیون قابل حصول است. به‌منظور اجرای تحلیلی مقایسه‌ای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، شاخص کاویتاسیون مطابق با این مدل باروتروپیک و در درجات مختلف بازشدگی شیر با یکدیگر مقایسه شده است. شاخص کاویتاسیون ذکر شده برای شیرهای کروی و پروانه‌ای در شکل‌های (۹) و (۱۰) مطابق با نتایج عددی و کار آزمایشگاهی [۲۴] ترسیم شد.

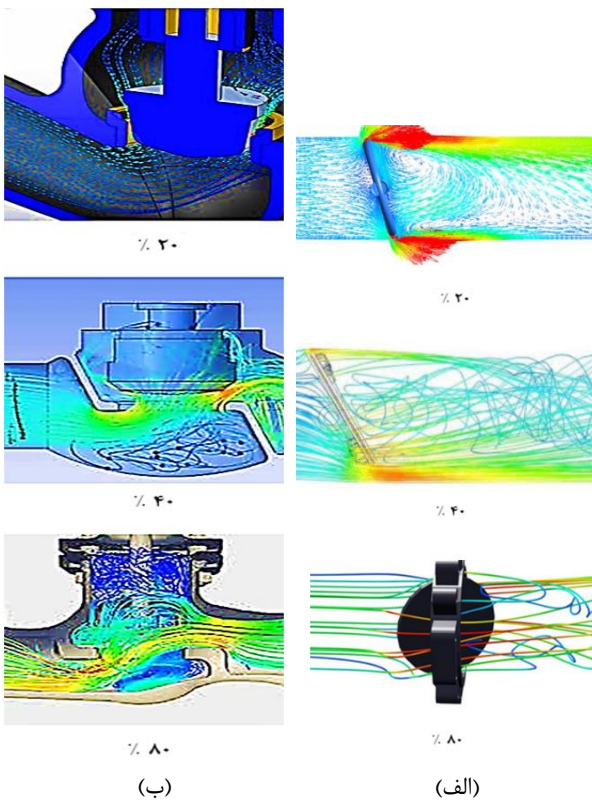
مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شاخص کاویتاسیون در داده‌های آزمایشگاهی بالاتر از مقدار به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی است. این اختلاف حاکی از آن است که علی‌رغم استفاده از مدل‌های اغتشاشی و در نظر گرفتن زبری سطح، شبیه‌سازی عددی هنوز تمامی عوامل مؤثر بر وقوع پدیده کاویتاسیون را به‌طور کامل لحاظ نکرده است. بنابراین، مدل‌های مورد استفاده نیازمند بازبینی و اصلاحات بیشتری هستند. شاخص کاویتاسیون برای شیر پروانه‌ای دارای اختلاف متوسط ۱۹ درصدی با نتایج آزمایشگاهی دارد و این در حالی است که این اختلاف برای شیر کروی اختلاف ۲۳ درصدی را نشان می‌دهد. در واقع شبیه‌سازی عددی بروز پدیده کاویتاسیون در شیر پروانه‌ای با دقت بهتری نسبت به شیر کروی انجام شده است. پیش‌بینی بهتر جریان در شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی نشان از این مطلب دارد که نرم‌افزار برای تحلیل جریان روی صفحات دیسکی به جریان روی

۴-۳ تحلیل تاثیر فشار، دمای جریان و درصد بازشدگی شیر بر بروز پدیده کاویتاسیون

مطابق با جدول (۳)، تغییر مقادیر افت فشار جریان عبوری از شیر کروی از مقدار ۴ به ۸ بار، موجب افزایش متوسط کسر حجمی بخار آب از ۰/۰۴۶۹۱ به ۰/۶۲۵۷۸ یعنی افزایش ۵۷ درصدی شده است. در حالیکه برای همین مقدار افت فشار (مطابق با جدول (۳))، افزایش ۵۱ درصدی در کسر حجمی بخار آب دیده می‌شود. با توجه به این نتیجه، در مدارهای هیدرولیکی و برای کنترل جریان‌هایی که دارای افت فشار ناگهانی باشند، استفاده از شیرهای پروانه‌ای نسبت به شیرهای کروی ارجحیت خواهد داشت. به دلیل اینکه مقادیر حباب‌زایی در شیرهای پروانه‌ای به ازای افت فشارهای یکسان، کمتر است. همچنین به منظور بررسی درصد بازشدگی شیر بر خطوط جریان حول حجم کنترل شیر کروی و پروانه‌ای، شکل (۱۲) برای شیرهای کروی و پروانه‌ای ترسیم شده است.

جدول (۳) مقدار متوسط کسر حجمی بخار آب بر حسب دما برای شیر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

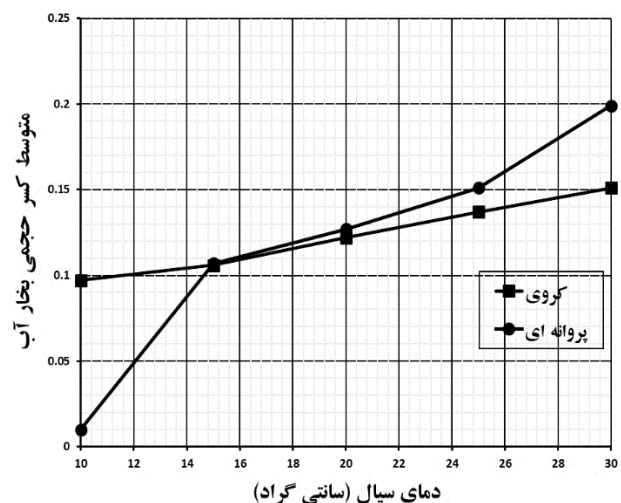
فشار (bar)	۴	۵	۶	۷	۸
کروی α	۰/۰۴۶	۰/۱۳۸	۰/۲۴۷	۰/۳۷۹	۰/۶۲۵
پروانه‌ای α	۰/۰۴۵	۰/۱۳۷	۰/۲۳۳	۰/۳۵۹	۰/۵۵۲
درصد اختلاف	۲/۱	۰/۷	۵/۶	۵/۳	۱۱/۷



شکل ۱۲ ترسیمی از خطوط جریان برای درصدهای مختلف بازشدگی؛ الف- شیر پروانه‌ای، ب- شیر کروی

مطابق با مباحث تئوریک مطرح شده در فصل قبل، فشار و دمای جریان سیال عبوری از شیرهای صنعتی از مهم‌ترین عوامل بروز پدیده کاویتاسیون و حباب‌زایی در جریان هستند.

در این بخش به منظور بررسی پارامترهای فشار و دمای جریان ورودی بر بروز پدیده کاویتاسیون، جریان با دماها و فشارهای اولیه وارد حجم کنترل شیر با درصد بازشدگی ۲۵ درصد شده و بررسی جریان عبوری در شیر اجرا خواهد شد. سپس پارامتر متوسط کسر حجمی بخار آب α تولید شده در شیر مورد سنجش قرار خواهد گرفت. مطابق با شکل (۱۱)، در شیر کروی افزایش دمای جریان سیال ورودی از ۱۰ به ۳۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش متوسط کسر حجمی بخار آب از ۰/۰۹۸ تا ۰/۱۶ را در پی داشته است. در واقع با افزایش ۳ برابری دمای جریان، کسر حجمی بخار افزایش ۶۰ درصدی خواهد داشت. از طرفی در شیر پروانه‌ای در دمای ۱۰ درجه تقریباً مقدار حباب تولید شده صفر است. با افزایش دما از ۱۰ به ۳۰ درجه، مقدار متوسط کسر حجمی بخار آب از ۰/۲۲ می‌رسد. در واقع این بررسی نشان از این نتیجه می‌دهد که شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی حساسیت بیشتری نسبت به دما برای بروز پدیده کاویتاسیون خواهد داشت. در واقع در صنایعی که دمای سیال دارای تغییرات ناگهانی باشد، استفاده از شیرهای کروی نسبت به شیرهای پروانه‌ای در اولویت خواهد بود. به منظور بررسی تأثیر فشار اختلاف فشار ورودی و خروجی بر روی متوسط کسر حجمی بخار آب، جدول (۲) برای شیر کروی و پروانه‌ای در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد تهیه شده است.



شکل ۱۱ متوسط کسر حجمی بخار آب بر حسب دما

Re_{θ} برای شیر پروانه‌ای توانستند پیش‌بینی‌های دقیقی از بروز کاویتاسیون و رفتار جریان ارائه دهند.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که حساسیت شیر پروانه‌ای به نوسانات دمایی نسبت به شیر کروی بیشتر است. در مقابل، شیر پروانه‌ای در مقایسه با شیر کروی در مواجهه با افت فشارهای زیاد کسر حجمی بخار کمتری تولید می‌کند که این ویژگی برای کاربردهای صنعتی که افت فشار جزئی از پروسه کنترل جریان است می‌تواند انتخاب شیر پروانه‌ای را توجیه‌پذیرتر کند. در نهایت، شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی از نظر عملکرد در برابر نوسانات فشار، به‌ویژه در شرایط صنعتی خاص، ویژگی‌های برجسته‌تری دارد. به‌طور کلی این تحقیق به درک بهتر رفتار جریان و بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای صنعتی کمک کرده و می‌تواند راهنمایی برای انتخاب بهینه نوع شیر و شرایط عملیاتی در صنایع مختلف باشد و تمایز اصلی در این پژوهش، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عددی پیشرفته و تحلیل دقیق‌تر پارامترهای عملیاتی به‌منظور بهینه‌سازی طراحی شیرها و کاهش خسارات کاویتاسیون است.

۴- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

P	فشار (Pa)
U	سرعت (m/s)
R	شعاع (m)
K	ضریب پلی تروپیک
A	مساحت (m^2)
V	حجم (m^3)
x	کیفیت
F	نیرو (N)
S	سطح مقطع (m^2)
T	دما ($^{\circ}C$)
Q	دبی حجمی (m^3/s)

علائم یونانی

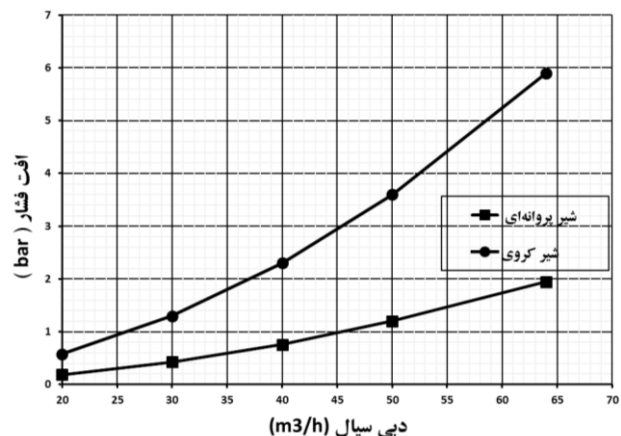
γ	تنش کششی سیال
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	لزجت ($kg/(m \cdot s)$)
Ω	سرعت زاویه‌ای (rad/s)
ϵ	کسر حجمی همگن

زیرنویس‌ها

g	گاز
v	بخار
∞	جریان آزاد
0	اولیه
b	حباب
l	مایع
tur	مغشوش

نتایج حاکی از گرایش رژیم جریان در شیر کروی از حالت آرام به مغشوش با افزایش درصد بازشدگی از ۴۰ به ۸۰ درصد دارد. این درحالی است که برای شیر پروانه‌ای تغییر رژیم جریان از جریان آرام به آشفته چنین تغییری مشاهده نمی‌شود. در واقع از این بررسی نتیجه می‌شود که شیر پروانه‌ای نسبت به تغییر رژیم جریان و بروز کاویتاسیون در اثر درصد بازشدگی مختلف، حساسیت کمتری خواهد داشت.

بررسی تغییرات افت فشار با دبی (شکل ۱۳)، نشان می‌دهد که افت فشار در شیر کروی به دلیل مسیر پیچیده‌تر، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از شیر پروانه‌ای است و با افزایش دبی، این اختلاف شدیدتر می‌شود. در دبی ۶۴ مترمکعب بر ساعت، افت فشار در شیر کروی تقریباً سه برابر بیشتر از شیر پروانه‌ای است. بنابراین، شیر پروانه‌ای به دلیل افت فشار کمتر، برای کاهش تلفات فشار مناسب‌تر است، در حالی که شیر کروی برای کنترل دقیق جریان کاربرد دارد، هرچند افت فشار بیشتری ایجاد می‌کند. انتخاب نوع شیر باید با در نظر گرفتن تغییرات دبی، فشار مجاز و نیازهای عملیاتی انجام شود.



شکل ۱۳ تغییرات افت فشار جریان در دبی‌های مختلف

۲- نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌طور کلی به بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای کروی و پروانه‌ای در جریان سیالات صنعتی پرداخته است. در این راستا، فرمولاسیون‌های مرتبط با شبیه‌سازی عددی جریان، مدل‌های اغتشاشی و پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که انتخاب پارامترهای مناسب در شبیه‌سازی جریان، مانند تعداد سلول‌های مش و مدل‌های اغتشاشی، تأثیر چشمگیری در دقت پیش‌بینی‌های عددی داشته است. به‌ویژه مدل اغتشاشی $k-\omega$ برای شیر کروی و مدل γ

L آرام
onset شروع کننده پدیده کاویتاسیون
in ورودی
out خروجی

butterfly valves and comparing results with AWWA C504 standard recommendations,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 9, pp. 2799–2806, Sep. 2012,
<https://doi.org/10.1007/s12206-012-0733-8>.

[9] G. Gao, S. Guo, D. Li, “A review of cavitation erosion on pumps and valves in nuclear power plants” , *Materials*, vol. 17, no. 5, pp1007, Feb. 2024,
<https://doi.org/10.3390/ma17051007>.

[10] X. Xu, L. Fang, A. Li, Wang Z, Li S, “Numerical analysis of the energy loss mechanism in cavitation flow of a control valve,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1;174:121331., Aug. 2021,
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121331>.

[11] A. Fiala and E. Kügeler, “ROUGHNESS MODELING FOR TURBOMACHINERY.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://torroja.dmt.upm.es/congresos/asme_2011/data/pdfs/trk-30/GT2011-45424.pdf.

[12] T. Leino, K. T. Koskinen, and M. Vilenius, “CFD-Modelling of a water hydraulic poppet valve - Comparison of different modelling parameters,” Tampere University Research Portal, pp. 277–286, 2025, Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/cfd-modelling-of-a-water-hydraulic-poppet-valve-comparison-of-dif>.

[13] M.-J. Chern, C.-C. Wang, and C.-H. Ma, “Performance test and flow visualization of ball valve,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, no. 6, pp. 505–512, May 2007,
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.04.019>

[14] L. Xiumei, H. Jie , L. Beibei, Z. Chi, X. Huawen, L. Wei, X. Fangwei, “Study on unsteady cavitation flow and pressure pulsation characteristics in the regulating valve,” *Shock and Vibration*, 2021, 2021(1):6620087. doi:
<https://doi.org/10.1155/2021/6620087>.

[15] T. Koivula, A. Ellman, and M. Vilenius, “EXPERIENCES ON CAVITATION DETECTION METHODS.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.imeko.org/publications/wc-2000/IMEKO-WC-2000-TC9-P239.pdf>.

[16] M. H. Tofighi, H. Sazegar, F. Najafi, and S. S. Hossein, “Modeling and Experimental Identification of a Rotary Servo-Hydraulic System in Presence of Noise and Structural Uncertainties,” *Journal of Control*, vol. 3, no. 4, pp. 1–10, Mar. 2010, Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://joc.kntu.ac.ir/browse.php?a_id=149&sid=1&slc_lang=en.

[1] T. Kerh, J. J. Lee, and L. C. Wellford, “Transient Fluid-Structure Interaction in a Control Valve,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 119, no. 2, pp. 354–359, Jun. 1997,
<https://doi.org/10.1115/1.2819141>.

[2] T. Požar, Ž. Pirc, E. Susič, and R. Petkovšek, “Simplified detection of cavitation threshold in control valves,” *Applied Acoustics*, vol. 165, p. 107320, Aug. 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107320>.

[3] H. Yang, W. Wang, K. Lu, and Z. Chen, “Cavitation reduction of a flapper-nozzle pilot valve using continuous microjets,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 133, pp. 1099–1109, Apr. 2019,
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.008>.

[4] B. Liu, J. Zhao, and J. Qian, “Numerical analysis of cavitation erosion and particle erosion in butterfly valve,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 80, pp. 312–324, Oct. 2017,
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.045>.

[5] I. R. Chinyaev, A. V. Fominykh, and E. A. Pochivalov, “Method for Determining of the Valve Cavitation Characteristics,” *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 260–265, Aug. 2016, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.759>.

[6] X. Guan Song, Y. Park, and S. Korea, “Numerical Analysis Of Butterfly Valve-Prediction Of Flow Coefficient And Hydrodynamic Torque Coefficient.” Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.iaeng.org/publication/WCECS2007/WCECS2007_pp759-763.pdf.

[7] G. Ibrahim, Z. Al-Otaibi, and H. Ahmed, “An Investigation of Butterfly Valve Flow Characteristics Using Numerical Technique,” *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, vol. 3, no. 2, pp. 151–166, 2013, Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=51c31a5ce36a1e4d5649934f4f787efd0828ae5c>.

[8] Farid Vakili-Tahami, M. Zehsaz, Mahdi Mohammadpour, and A. Vakili-Tahami, “Analysis of the hydrodynamic torque effects on large size

۵- مراجع

- [21] Md. M. Karim and M. S. Ahmmed, "Numerical study of periodic cavitating flow around NACA0012 hydrofoil," *Ocean Engineering*, vol. 55, pp. 81–87, Dec. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.06.034>.
- [22] M. Dular, R. Bachert, B. Stoffel, and B. Širok, "Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 24, no. 4, pp. 522–538, Jul. 2005, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2004.10.004>.
- [23] A. Fiala and E. Kügeler, "ROUGHNESS MODELING FOR TURBOMACHINERY." Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://torroja.dmt.upm.es/congresos/asme_2011/data/pdfs/trk-30/GT2011-45424.pdf.
- [24] G. Brett, M. Riveland, T. C. Jensen, and T. J. Heindel, "Cavitation From a Butterfly Valve: Comparing 3D Simulations to 3D X-Ray Computed Tomography Flow Visualization," " *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Jan. 2011, <https://doi.org/10.1115/ajk2011-33003>.
- [17] D. Habibnejad, P. Akbarzadeh, A. Salavatipour, V. Gheshmipour, "Cavitation reduction in the globe valve using oblique perforated cages: A numerical investigation," *Flow Measurement and Instrumentation*, 1;83:102110, Mar. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102110>.
- [18] Z. Mazur, L. M. Palacios, and G. Urquiza, "Numerical modeling of gland seal erosion in a geothermal turbine," *Geothermics*, vol. 33, no. 5, pp. 599–614, Oct. 2004, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.12.003>.
- [19] L. Romagnuolo, E. Frosina, A. Amoresano, G. Quaremba, M. Spirto, A. Senatore, "Instability measurement of cavitation conditions in a spool valve through the definition of a cavitation instability index," *Flow Measurement and Instrumentation*, 91:102366., Jun. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102366>.
- [20] D. Li, M. Grekula, and P. Lindell, "Towards numerical prediction of unsteady sheet cavitation on hydrofoils," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 22, no. S1, pp. 699–704, Oct. 2010, [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(10\)60024-8](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(10)60024-8).

بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر نکرور حرارتی استخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک

چکیده: این مقاله به تحلیل تأثیر پارامترهای مرتبط با سوراخکاری سرعت بالای استخوان، شامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر ایجاد نکرور حرارتی می پردازد. در این مقاله، ابتدا اثرات متقابل پارامترهای مؤثر بر دمای فرآیند سوراخکاری تحلیل شد. سپس، یک مدل رگرسیون غیرخطی با دقت بالا برای توصیف رابطه بین متغیرهای عملیاتی و دمای موضعی ارائه گردید. در نهایت، نتایج نشان داد که سرعت دورانی بالاتر از ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی بیش از ۳۰ میلی متر بر دقیقه دمای استخوان را به حد بحرانی نکرور حرارتی نزدیک می کند. بنابراین، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی، تنظیم پارامترها و حفظ دما در سطح ایمن ۳۷ درجه سانتی گراد استفاده شد. علاوه بر این، شبیه سازی‌ها توانستند ترکیب مناسبی از پارامترها را برای حفظ دما شناسایی کنند. همچنین، اعتبارسنجی تجربی نتایج نشان داد که اختلاف میان داده های پیش بینی شده و واقعی کمتر از ۱ درجه سانتی گراد است. در مجموع، این پژوهش اثربخشی الگوریتم ژنتیک را در بهینه سازی فرآیند سوراخکاری با کاهش آسیب های حرارتی نشان می دهد و نتایج حاصل از آن می تواند در جراحی های ارتوپدی و دندانپزشکی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های راهنما: سوراخکاری استخوان، نکرور حرارتی، الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی چندهدفه، روش سطح پاسخ

رضا سعیدی

ابواسحقی

دانشجوی کارشناسی ارشد
مهندسی برق

فرید ستوده*

دانشیار،
گروه مهندسی برق،
دانشگاه صنعتی اراک، اراک

قدرت اله طاهری

دانشجوی کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک

وحید طهماسبی

دانشیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی اراک، اراک

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

**Reza Saeidi
Abueshaghi**
MSc. Student in Electrical
Engineering

Farbod Setoudeh*
Associate Professor,
Mechanical Engineering
Department, Arak
University of Technology,
Arak

Ghodratollah Taheri
MSc. Student in Mechanical
Engineering

Vahid Tahmasbi
Associate Professor,
Mechanical Engineering
Department, Arak
University of Technology,
Arak

Optimization of parameters influencing bone thermal necrosis using genetic Algorithm

Abstract: This study investigates the influence of critical parameters in high speed bone drilling namely, rotation speed, feed rate, and drill diameter on the risk of thermal necrosis. In this paper Initially, the interactions among these parameters and their effects on drilling induced temperature were comprehensively analyzed. A high precision nonlinear regression model was then developed to accurately describe the relationship between operational variables and the resulting local temperature. Finally, The results demonstrated that rotation speeds exceeding 4000 rpm and feed rates above 30 mm/min elevated bone temperature dangerously close to the threshold for thermal necrosis. As a result, To mitigate this risk, genetic algorithm was applied to optimize these parameters, ensuring the bone temperature remained at a safe level of 37°C. Also, simulations identified optimal combinations of operational variables to maintain safe temperature levels, which were experimentally validated with discrepancies of less than 1°C between predicted and actual measurements. Also this research underscores the efficiency of genetic algorithm in optimizing drilling processes to minimize thermal damage, offering valuable implications for safer practices in orthopedic and dental surgeries.

Keywords: Bone, Drilling, Thermal necrosis, Optimization, Temperature reduction, Response surface methodology

۱- مقدمه

می‌شود. شایان توجه است که در این فرآیند، بخشی از گرمای تولید شده طی عملیات سوراخکاری استخوان می‌تواند از طریق جریان خون و مایعات میان‌بافتی پراکنده شده و قسمتی دیگر از آن نیز توسط براده‌ها به محیط بیرونی منتقل گردد. اما در عین حال، بخشی از حرارت از طریق انتقال حرارت رسانی، به استخوان می‌زبان منتقل می‌شود. از طرفی استخوان، رسانای ضعیف گرما محسوب می‌شود، به طوری که ضریب هدایت حرارتی قشر خارجی استخوان تازه، در محدوده ۰/۳۸ تا $2/3 \text{ W/Mk}$ گزارش شده است [۸]. این بدان معناست که حرارت تولیدشده در طول فرآیند قادر به انتشار سریع از استخوان به محیط اطراف نیست و در نتیجه دمای موضعی در محل سوراخکاری افزایش می‌یابد. افزایش دما در این نقطه سبب تغییر ماهیت آنزیم آلکالین فسفاتاز استخوان می‌شود که به نوبه خود منجر به بروز نکروز حرارتی و مرگ سلولی شده و در نهایت موجب تخریب بافت استخوانی و کاهش مقاومت مکانیکی محل سوراخکاری خواهد شد [۹]. این مسأله در جراحی‌های ارتوپدی حائز اهمیت می‌باشد، چرا که در مراحل بعد، پیچ‌های خودکار، درون این سوراخ‌ها جای خواهند گرفت تا پلاک، سیم و سایر تجهیزات مهار کننده شکستگی را نگه دارند. به طور کلی، آسیب حرارتی وارده به استخوان در موضع شکستگی، منجر به ایجاد مشکلاتی در برهم کنش بین پیچ نگهدارنده و استخوان می‌شود و نهایتاً جوش خوردگی استخوان در جهت و زاویه مطلوب صورت نخواهد پذیرفت. بنابراین، به دلیل فوق می‌بایست جوانب احتیاط برای به حداقل رسانیدن میزان ازدیاد دما در موضع سوراخکاری در نظر گرفته شود [۱۰ و ۱۱]. علاوه بر این، در جراحی ارتوپدی، تثبیت صحیح پیچ‌ها در استخوان برای تضمین بهبودی بیمار بسیار مهم است. با این حال، عوارضی مانند شل شدن پیچ‌ها، شکستگی استخوان یا تثبیت ضعیف می‌تواند ناشی از پروتکل‌های نامناسب درج پیچ‌ها باشد. یکی از مواردی که به منظور به حداقل رساندن آسیب حرارتی و شکست مکانیکی در روش‌های ارتوپدی حائز اهمیت است، تعیین قطر بهینه قبل از سوراخکاری در سرعت‌های بالا برای تثبیت ایمن پیچ‌ها می‌باشد [۱۲]. در این میان، شبیه سازی کامپیوتری سوراخکاری جهت پیش بینی دقیق نکروزهای حرارتی و نیروها، نظیر استفاده از روش المان محدود اهمیت بالایی دارد [۱۳].

افزون بر این، با توجه به اینکه در حین فرآیند سوراخکاری استخوان مهم‌ترین عارضه، آسیب گرمایی در بافت استخوان می‌باشد. جهت جلوگیری از آسیب گرمایی در بافت استخوان، افزایش سرعت چرخشی مته یا سوراخکاری سرعت بالا یکی از راهکارهای عملی می‌باشد، زیرا سوراخکاری سرعت بالا، میزان

سوراخکاری استخوان به‌عنوان یکی از مراحل حیاتی در جراحی‌های ارتوپدی، دندانپزشکی و ترمیم‌های استخوانی، همواره با چالش‌های فنی و بیولوژیکی همراه است. یکی از مهم‌ترین مخاطرات این فرآیند، افزایش دمای موضعی ناشی از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک براده‌ها است که در سرعت‌های بالا تشدید می‌شود. این افزایش دما در صورت عبور از آستانه بحرانی (حدود ۴۷ درجه سانتی‌گراد) می‌تواند منجر به نکروز حرارتی بافت، تاخیر در ترمیم و حتی عدم موفقیت جراحی شود. با وجود مطالعات گسترده در زمینه سوراخکاری استخوان، نقش پارامترهای عملیاتی (مانند سرعت دورانی، نرخ پیشروی مته، هندسه ابزار و روش‌های خنک‌سازی) در کنترل دمای تولیدشده هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است [۱ و ۲]. این پژوهش با هدف مدل‌سازی دمای سوراخکاری در سرعت‌های بالا و تحلیل پارامترهای کلیدی، به ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی فرآیند و کاهش آسیب‌های حرارتی می‌پردازد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به ارتقای استانداردهای جراحی و توسعه پروتکل‌های ایمن تر در حوزه پزشکی کمک کند. اصولاً فرآیند سوراخکاری استخوان و کنترل دمای آن به‌عنوان یک چالش کلیدی در جراحی‌های پزشکی، توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است. مطالعات پیشین با تمرکز بر پارامترهای مؤثر مانند سرعت دورانی مته، نرخ پیشروی، هندسه ابزار و روش‌های خنک‌سازی، راهکارهای متنوعی را برای بهینه‌سازی این فرآیند ارائه داده‌اند [۳]. به‌عنوان مثال سینک‌ها و همکارانش با استفاده از روش تاگوچی، سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه را به‌عنوان مقادیر بهینه برای کاهش آسیب حرارتی معرفی نمودند [۴]. به طور کلی فرآیند سوراخکاری استخوان در جراحی‌های ارتوپدی با هدف نمونه‌برداری یا ایجاد سوراخ‌هایی در استخوان برای مقاصد پزشکی و نصب ایمپلنت صورت می‌پذیرد [۵-۷]. با این حال، روش سوراخکاری سنتی نیاز به نیروی سوراخکاری بیشتری دارد که منجر به دمای سوراخکاری بالاتر می‌شود. همچنین، بهبودی بیماران پس از جراحی با این روش، زمان زیادی می‌برد و باعث آسیب حرارتی و حتی نکروز حرارتی استخوان انسان می‌شود که نیاز به مطالعه بیشتر دارد [۷]. در این فرآیند، جراح به منظور حصول اطمینان از نفوذ یکنواخت مته به استخوان، ملزم به اعمال فشار عمودی به ابزار سوراخکاری می‌باشد. این مسأله، منجر به تولید حرارت در اثر عوامل تغییر شکل پلاستیک براده‌ها، وجود اصطکاک بین مته و استخوان و همچنین وجود اصطکاک بین براده‌ها و جدار سوراخ

پیشین، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی است که نتایج مطلوبی ارائه نمی‌کنند و نتایج به‌دست آمده توسط این روش‌ها، اختلاف قابل توجهی با اهداف مورد نظر دارند [۲۴]. در نتیجه، در این پژوهش ابتدا تلاش شد یک مدل دقیق استخراج شود و سپس با بهره‌گیری از این مدل و یک روش بهینه‌سازی مناسب، مقادیر بهینه به گونه‌ای به‌دست آمد که انتظارات را برآورده سازد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با استناد به نتایج پژوهش‌های جامعی که در این زمینه انجام شده است [۸ و ۱۴]، سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به عنوان مهم‌ترین فاکتورهای ورودی فرآیند در نظر گرفته می‌شوند که طراحی آزمایشات در نرم افزار Design-Expert بر این اساس انجام شده است (جدول (۲))، به طور کلی طراحی آزمایشات در این نرم افزار بدین صورت انجام می‌شود که تعداد آزمایشات مطابق با رابطه (۱) به‌دست می‌آید و در نهایت بر اساس مقادیر اولیه مشخص شده برای هر یک از متغیرهای ورودی، باید آزمایشات به گونه‌ای طراحی شوند که مقدار متغیرهای مشخص شده برای هر یک از آزمایشات با سایر آزمایشات یکسان نباشد (جدول (۱)) [۲۵]. همچنین در این پژوهش، مقادیر اولیه برای هر آزمایش با دقت انتخاب شده است. برای مثال، با استناد به پژوهش‌های پینتر و همکارانش [۲۶] و دی کاتر و همکارانش [۲۷]، قطر مته‌ها با دقت بالا تعیین شده تا کاملاً با اندازه پیچ‌های مورد استفاده در اتل‌های پزشکی تناسب داشته باشد و نیازهای خاص این حوزه تخصصی را برآورده کند. در خصوص سرعت دورانی، باید توجه داشت که در فرآیند سوراخکاری سرعت بالا، سرعت معمولاً از ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه فراتر می‌رود. بنابراین، در طراحی آزمایشات، با در نظر گرفتن این مقدار و محدودیت حداکثر سرعت دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده که ۱۸۰۰۰ دور در دقیقه است، مقادیر مشخصی از سرعت شامل حداقل، حداکثر و متوسط انتخاب شده است. علاوه بر این، نرخ پیشروی در فرآیند سوراخکاری استخوان معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر در دقیقه است [۲۸]. بنابراین مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط این محدوده به‌عنوان معیارهایی برای طراحی و اجرای آزمایشات در نظر گرفته شده است.

$$N=2K(K-1)+C_0 \quad (1)$$

K: تعداد متغیرها

C₀: نقاط مرکزی که مقدار آن زمانی که تعداد متغیرها ۳ و بالاتر باشد معمولاً ۳ است و زمانی که تعداد متغیرها کمتر از ۳ باشد

ازدیاد دمای نسبتاً کمتری نسبت به سوراخکاری معمولی ایجاد می‌کند [۱۴]. از طرفی، سوراخکاری سرعت بالا منجر به افزایش میزان تخلیه حرارت به خارج به‌وسیله براده‌ها و در نتیجه کاهش میزان ازدیاد دمای موضع سوراخکاری تا حد مجاز می‌گردد که در نهایت این موضوع سبب جلوگیری از بروز نکرور حرارتی استخوان می‌شود [۱۵]. همچنین افزایش سرعت چرخشی مته و خنک‌کاری خارجی به میزان قابل توجهی از دمای بیشینه ایجاد شده می‌کاهد [۱۶]. طبق مطالعات صورت گرفته، افزایش سرعت چرخشی مته از ۴۰۰ دور در دقیقه تا ۷۰۰۰ دور در دقیقه تأثیر مستقیمی بر کاهش دمای فرآیند سوراخکاری استخوان دارد. همچنین افزایش سرعت چرخشی مته از ۷۰۰۰ دور در دقیقه تا ۲۴۰۰۰ دور در دقیقه باعث افزایش دمای فرآیند سوراخکاری استخوان شده و افزایش سرعت چرخشی مته تا ۴۰۰۰۰ دور در دقیقه نیز باعث کاهش دمای فرآیند سوراخکاری استخوان می‌شود [۱۷]. در مقابل، با توجه به اینکه افزایش بیش از حد و کنترل نشده سرعت چرخشی مته نیز می‌تواند باعث آسیب گرمایی در بافت استخوان گردد، لذا دستیابی به بهینه‌ترین مقدار سرعت دورانی بسیار پر اهمیت می‌باشد [۱۸]. در مطالعه‌ای، پژوهشگران با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، مناسب‌ترین مقادیر برای نرخ پیشروی، سرعت دورانی ابزار و قطر ابزار را تعیین کردند. نتایج در محدوده آزمایش‌ها نشان دادند که کمترین دمای ایجادشده در بافت استخوان ران گاو و کمترین نیروی محوری واردشده به استخوان ران گاو به نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دوران ابزار ۱۱۷۷۸ دور بر دقیقه و قطر ابزار ۲ میلی‌متر اختصاص دارد [۱۹]. همچنین در پژوهشی دیگر، با استفاده از روش تاگوچی، بهینه‌سازی سرعت دورانی و نیروی محوری انجام شد [۲۰]. اخیراً نیز مطالعه‌ای با هدف بهینه‌سازی پارامترهای سوراخکاری استخوان با سرعت بالا با آزمایش‌هایی بر روی استخوان خوک با استفاده از آرایه متعامد تاگوچی L27 انجام شده است، که در آن برای به حداقل رساندن افزایش دما و نیروی سوراخکاری، با استفاده از تحلیل رابطه‌ای خاکستری و ارزیابی تناسبی پیچیده تصمیم‌گیری چند معیاره انجام شده است [۲۱].

علاوه بر این، مطالعات دیگری نیز با مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ نشان دادند که افزایش سرعت چرخشی مته منجر به کاهش دمای فرآیند سوراخکاری استخوان می‌شود [۲۲] و [۲۳]. با این حال، همانگونه که مشاهده می‌شود، با وجود پژوهش‌های گسترده، تاکنون هیچ آزمایش دقیقی طراحی، اجرا و تحلیل نشده است. بنابراین، این پژوهش بصورت عمیق و جامع به این موضوع پرداخته است. یکی از مشکلات عمده پژوهش‌های

از سوی دیگر، پس از طراحی آزمایشات، اجرای عملی آن‌ها بصورت زیر انجام می‌شود تا دمای مورد نظر برای هر آزمایش تعیین گردد. البته باید توجه داشت که عوامل بیرونی نیز می‌توانند بر دمای خروجی تأثیر بگذارند و باعث نمایش دماهای متفاوت در مراحل مختلف فرآیند سوراخکاری استخوان شوند. بنابراین، بالاترین دمای اندازه‌گیری شده در حین سوراخکاری به عنوان دمای معتبر آزمایش فرآیند در نظر گرفته می‌شود تا به اطمینان‌پذیری داده‌های به‌دست‌آمده کمک کند.

در این پژوهش، در انجام آزمایشات از استخوان ران تازه گاو (سن حدود ۲/۵ الی ۴ سال) استفاده شده است. علاوه بر این، در انجام آزمایشات از بخش دیافیز ران گاو که طولی حدود ۱۳۵ میلی‌متر دارد (شکل (۱)) و ضخامت استخوان کورتیکال در این قسمت بین ۵ تا ۸ میلی‌متر است، بهره گرفته شده است. در شکل (۲) نمایی از نمونه استخوان برش خورده از وسط که در آزمایشات به کار رفته است، قابل مشاهده می‌باشد. از سوی دیگر، جهت انجام آزمایشات فرآیند سوراخکاری، از یک موتور سرعت بالای مجزا با برند Hertz و توان ۲/۲ کیلووات با حداکثر سرعت دورانی ۱۸۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. در شکل (۳) نمونه کامل تجهیزاتی که در آزمایشات استفاده شده است، قابل مشاهده می‌باشد.

همچنین به منظور اطمینان از حداکثر دقت در اندازه‌گیری، از یک سنسور کالیبره شده که از بهترین تجهیزات پردازنده برای اندازه‌گیری دما می‌باشد، استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری این سنسور ۰/۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در نهایت، پس از انجام آزمایشات سوراخکاری استخوان، دماهای حاصل برای سوراخکاری سرعت بالا در جدول (۳) آورده شده است.



شکل ۱ نمونه استخوان کامل ران گاو



شکل ۲ نمونه استخوان برش خورده

مقدار آن صفر می‌باشد. همچنین، فرآیند طراحی آزمایشات در جدول (۱) نشان داده شده است. افزون بر این، آزمایشات طراحی شده توسط نرم افزار Design-Expert برای فرآیند سوراخکاری سرعت بالا در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱ نمونه جدول طراحی آزمایشات

آزمایش	متغیر ۱	متغیر ۲
۱	a	c
۲	a	d
۳	b	c
۴	b	d

در جدول (۱) مقدار ورودی متغیرها برای متغیر ۱ برابر با (a, b) و برای متغیر ۲ برابر با (c, d) می‌باشد.

جدول ۲ آزمایشات طراحی شده توسط نرم افزار Design-Expert برای فرآیند سوراخکاری سرعت بالا

آزمایش	سرعت دورانی	نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	قطر (میلی‌متر)
۱	۱۰۰۰۰	۱۰	۲/۵
۲	۱۸۰۰۰	۱۰	۲/۵
۳	۱۰۰۰۰	۵۰	۲/۵
۴	۱۸۰۰۰	۵۰	۲/۵
۵	۱۰۰۰۰	۱۰	۴/۵
۶	۱۸۰۰۰	۱۰	۴/۵
۷	۱۰۰۰۰	۵۰	۴/۵
۸	۱۸۰۰۰	۵۰	۴/۵
۹	۱۰۰۰۰	۳۰	۴
۱۰	۱۸۰۰۰	۳۰	۴
۱۱	۱۴۰۰۰	۱۰	۴
۱۲	۱۴۰۰۰	۵۰	۴
۱۳	۱۴۰۰۰	۳۰	۲/۵
۱۴	۱۴۰۰۰	۳۰	۴/۵
۱۵	۱۴۰۰۰	۳۰	۴
۱۶	۱۴۰۰۰	۳۰	۴
۱۷	۱۴۰۰۰	۳۰	۴

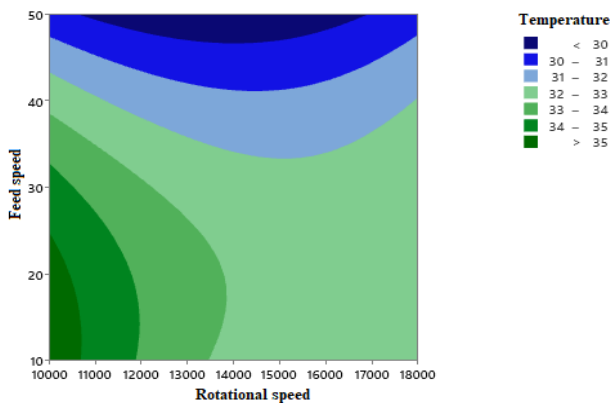
Minitab2023 و روش سطح پاسخ استفاده نمودیم. به طور کلی بر اساس نتایج حاصل از این روش، برای دستیابی به دمای مورد نظر (۳۷ درجه سانتی گراد)، نتایج به دست آمده در اشکال (۴) تا (۶) قابل مشاهده می باشد، در این حالت، سرعت دورانی ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۱۰ میلی متر بر دقیقه و قطر مته ۳ میلی متر می باشد. همچنین، با استفاده از مقادیر بهینه به دست آمده، یک آزمایش سوراخکاری استخوان با استفاده از دستگاه فرز مدل تبریز PF4 انجام دادیم، که ابتدا تجهیزات مورد نظر را دقیق تنظیم کردیم و با استفاده از مقادیر بهینه به دست آمده، به ترتیب اول پیشروی را تنظیم کردیم، دوم سرعت مدنظر را تنظیم کردیم، سوم گیره و نگهدارنده استخوان را ساعت کردیم، چهارم استخوان کورتیکال را بسته، پنجم سنسور دما را تنظیم کردیم، ششم سنسور مدنظر را در نقطه ای که سوراخکاری انجام شد نصب کردیم، سپس با فاصله استاندارد در نقطه ای که مقادیر دستگاهی همان مقادیر بهینه بودند، سوراخکاری را شروع و در پایان دما را ثبت نمودیم. در نتیجه، دمای ثبت شده ۵ درجه بالاتر از دمای مطلوب یعنی ۳۷ درجه سانتی گراد بود. لذا استفاده از روشی دقیق تر برای بهینه سازی فرآیند سوراخکاری استخوان ضروری است. برای این منظور، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی این فرآیند بهره بردیم که در ادامه به طور کامل به آن خواهیم پرداخت.



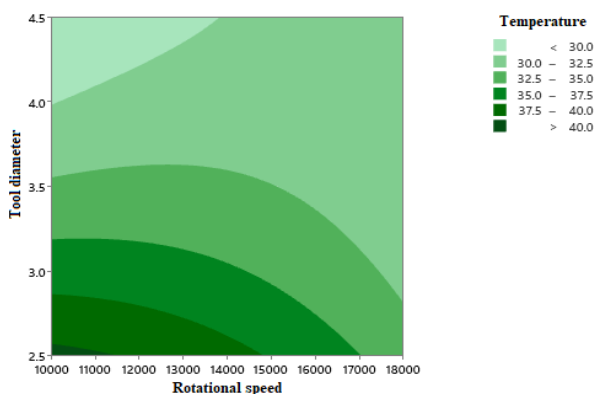
شکل ۳ نمونه کامل تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات

جدول ۳ میزان دمای اندازه گیری شده برای آزمایشات سوراخکاری سرعت بالا

آزمایش	دما (درجه سانتی گراد)
۱	۴۵/۱۳
۲	۳۴/۷۸
۳	۳۴/۵
۴	۳۲/۲
۵	۲۸/۴
۶	۳۰/۴۱
۷	۲۷/۶۳
۸	۳۰/۲
۹	۳۰/۱
۱۰	۳۲/۳
۱۱	۲۹/۶
۱۲	۲۷/۶
۱۳	۴۱/۲
۱۴	۲۹/۴۴
۱۵	۳۳/۴۳
۱۶	۲۹
۱۷	۳۳/۸



شکل ۴ سطوح پاسخ سرعت دورانی و نرخ پیشروی

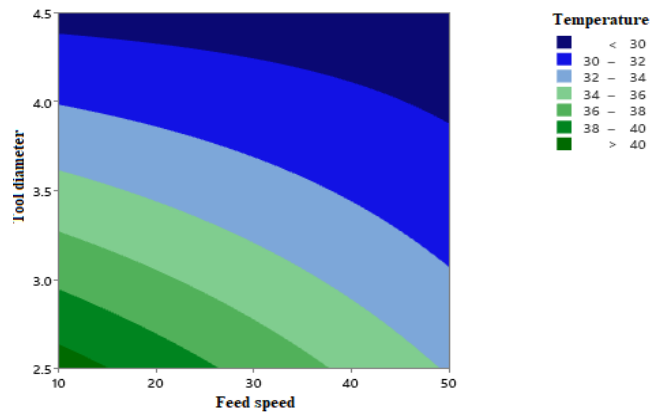


شکل ۵ سطوح پاسخ سرعت دورانی و قطر مته

۳- آنالیز تأثیر پارامترها روی دمای سوراخکاری

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف نظیر سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته روی دمای سوراخکاری، ابتدا از نرم افزار

$$Y = 111.973259073424 - 1.12855217014409E-06X_1 - 0.207397246902556X_2 - 37.2535191723495X_3 - 9.76406575755561E-08X_1^2 - 0.00571294767067169X_2^2 + 3.17109457564177X_3^2 + 1.18593750000000E-05X_1 * X_2 + 0.000604732142857143X_1 * X_3 + 0.0825535714285714X_2 * X_3 \quad (2)$$

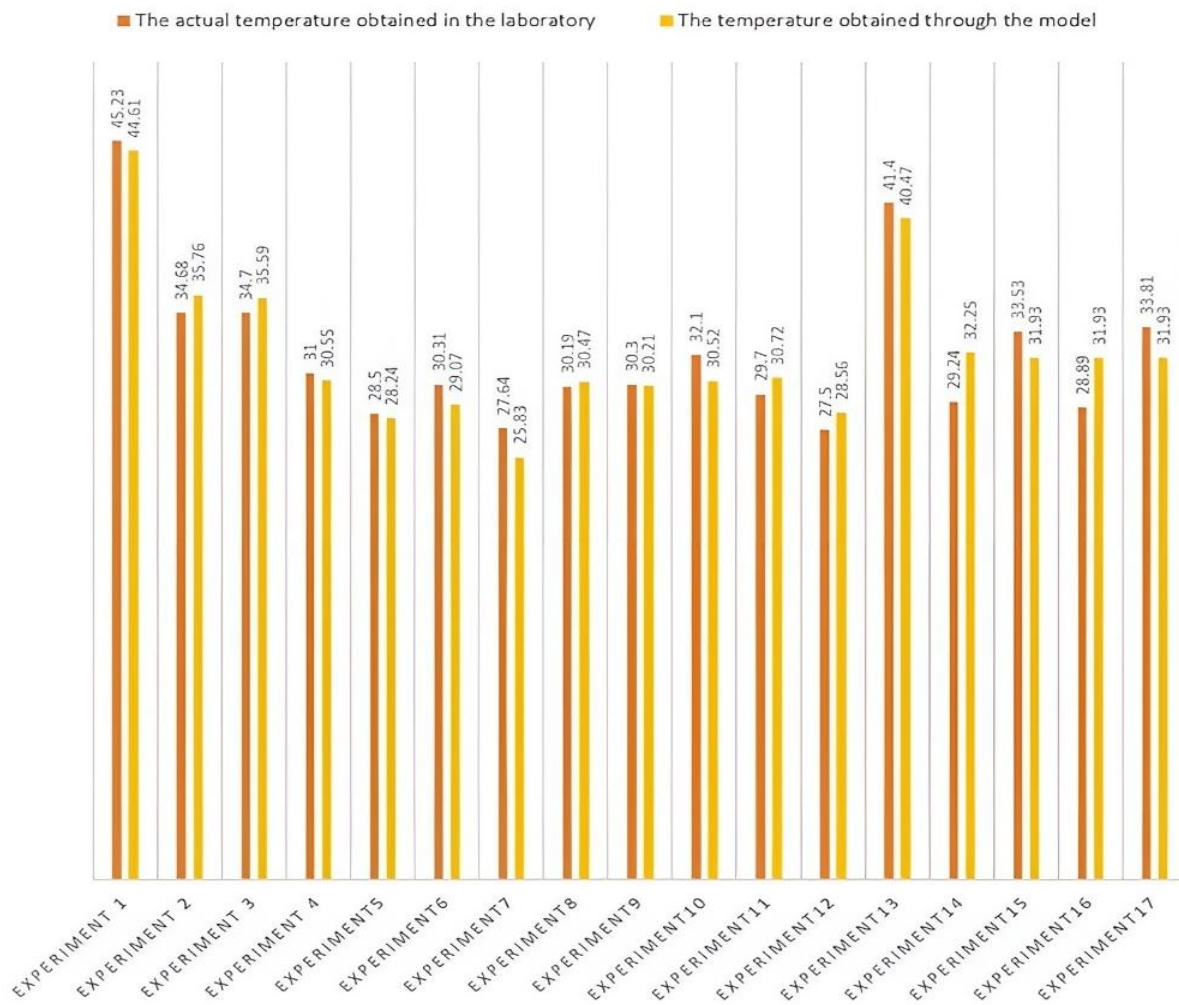


شکل ۶ سطوح پاسخ نرخ پیشروی و قطر مته

جهت ارزیابی دقت مدل به دست آمده، همان طور که در شکل (۷) قابل مشاهده می باشد، با مقایسه دماهای واقعی به دست آمده در آزمایشگاه و دماهای به دست آمده از طریق مدل که بسیار نزدیک به هم می باشند، می توان گفت مدل به دست آمده از دقت بسیار خوبی برخوردار می باشد.

۴- تنظیم دمای سوراخکاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

ابتدا با استفاده از روش کمترین مربعات خطا، مدل رگرسیون غیرخطی طبق رابطه زیر محاسبه می شود.



شکل ۷ مقایسه دماهای واقعی به دست آمده در آزمایشگاه با دماهای به دست آمده از مدل سوراخکاری سرعت بالا

در این رابطه p نشان دهنده فرزند، v_1 نشان دهنده والد ۱ و v_2 نشان دهنده والد ۲ می باشد.

۵- جهش

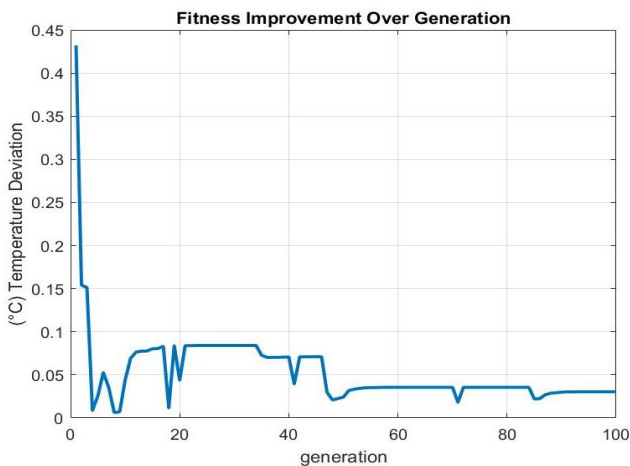
با احتمال ۵٪ مقدار یک ژن را بصورت تصادفی در محدوده مجاز تغییر می دهیم.

۶- جایگزینی نسل

نسل جدید را جایگزین نسل قدیم کرده و فرآیند را برای ۱۰۰ نسل تکرار می کنیم.

گام ۴: تحلیل نتایج

به منظور بهبود تابع هزینه در طول نسلها نمودار اختلاف دما در طول نسلها در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸ تغییر تابع هزینه بر حسب تعداد نسلها

به طور کلی، اختلاف دما در طول نسلها به طور مستمر کاهش می یابد. همچنین، مقادیر بهینه سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته در جدول (۵) نشان داده شده است. علاوه بر این، با انجام آزمایش سوراخکاری استخوان براساس مقادیر بهینه به دست آمده و صحت سنجی نتایج حاصل، اختلاف ناچیزی کمتر از ۱ درجه سانتی گراد نسبت به دمای هدف (۳۷ درجه سانتی گراد) مشاهده گردید. این امر نشان دهنده دقت بالای این روش بهینه سازی است.

جدول ۵ مقادیر بهینه پارامترها

سرعت	نرخ پیشروی	قطر مته	دمای محاسبه شده	دمای واقعی
۱۵۶۶۰/۶۴	۱۴/۸۸	۴/۱۶	۳۷/۰۱	۳۷/۵

همچنین، برای محاسبه پارامترهای بهینه (سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته) جهت رسیدن به دمای ۳۷ درجه سانتی گراد با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بصورت زیر عمل می شود:

گام ۱: تعریف تابع هدف (Fitness Function)

تابع هدف، اختلاف بین دمای تخمین زده شده توسط مدل و دمای مطلوب را کمینه می کند.

$$\text{fitness} = \left| T - 37 \right| \quad (3)$$

گام ۲: تعریف محدوده پارامترها

محدوده پارامترها براساس داده های جدول (۴) است.

جدول ۴ محدوده مجاز پارامترها

ردیف	پارامتر	نماد	محدوده مجاز	واحد
۱	سرعت دورانی	X_1	۱۰۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰	دور بر دقیقه
۲	نرخ پیشروی	X_2	۱۰ تا ۵۰	میلی متر بر دقیقه
۳	قطر مته	X_3	۲/۵ تا ۴/۵	میلی متر

گام ۳: پیاده سازی الگوریتم ژنتیک

۱- جمعیت اولیه

تعداد کروموزومها (اندازه جمعیت) به تعداد ۵۰ در نظر گرفته می شود. هر کروموزوم شامل سه ژن (X_1, X_2, X_3) در محدوده مجاز تعریف شده می باشد.

۲- محاسبه تابع هزینه

برای هر کروموزوم، دمای تخمین زده شده، توسط مدل ذکر شده در معادله (۲) در نظر گرفته می شود.

۳- انتخاب والدین

از روش چرخ رولت یا تورنومنت برای انتخاب والدین براساس تابع هزینه استفاده می شود.

۴- تقاطع

از روش تک نقطه ای یا یونیفرم برای ترکیب ژن های والدین طبق رابطه زیر استفاده می شود.

$$p = \alpha v_1 + (1 - \alpha) v_2 \quad (4)$$

۵- نتیجه گیری

2018, doi:
<https://doi.org/10.1177/09544119251321134>.

- [4] G. Singh, V. Jain, and D. Gupta, "Multi-objective performance investigation of orthopaedic bone drilling using Taguchi membership function," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 231, no. 12, pp. 1133-1139, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0954411917735129>.
- [5] D. C. Kim, D. M. Kim, and H. W. Park, "An analysis of bone drilling process using finite element analysis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 6, pp. 3237-3245, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0541-y>.
- [6] K. Alam, "Experimental and numerical analysis of conventional and ultrasonically-assisted cutting of bone," 2009, doi: https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/Experimental_and_numerical_analysis_of_conventional_and_ultrasonically-assisted_cutting_of_bone/9533540/files/17162594.pdf.
- [7] B. Zhang, G. Chen, Y. Lv, H. Li, and H. Wei, "Methods of bone drilling in surgery: current situation and prospects," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-23, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15177-8>.
- [8] M. T. Hillery and I. Shuaib, "Temperature effects in the drilling of human and bovine bone," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 92, pp. 302-308, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00155-7).
- [9] K. Alam, A. Mitrofanov, and V. V. Silberschmidt, "Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone," *Medical engineering & physics*, vol. 33, no. 2, pp. 234-239, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.10.003>.
- [10] G. Augustin, S. Davila, K. Mihoci, T. Udiljak, D. S. Vedrina, and A. Antabak, "Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited," *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, vol. 128, pp. 71-77, 2008, doi: <https://doi.org/10.1007/s00402-007-0427-3>.
- [11] G. Augustin, S. Davila, T. Udiljak, D. S. Vedrina, and D. Bagatin, "Determination of spatial distribution of increase in bone temperature during drilling by infrared thermography: preliminary report," *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, vol. 129, pp. 703-709, 2009, doi: <https://doi.org/10.1007/s00402-008-0630-x>.

این پژوهش ابتدا بر استخراج یک مدل دقیق و جامع متمرکز شده است. سپس با استفاده از این مدل و با به کارگیری یک روش بهینه سازی مناسب، تلاش شده است تا مقادیر بهینه حاصل شوند و بتوانند انتظارات را برآورده کنند. به طور خاص، این پژوهش عمدتاً توجه خود را بر کاهش میزان حرارت تولیدشده در طی فرآیند سوراخکاری استخوان متمرکز کرده است. یافته های حاصل از بکارگیری الگوریتم ژنتیک، همراه با داده های تجربی معتبر، نشان می دهد که دمای ایجاد شده در فرآیند در محدوده ی ۳۷ تا ۳۷/۵ درجه سانتی گراد باقی می ماند که این نتایج، اهمیت حیاتی تنظیم دقیق پارامترهای مؤثر در این فرآیند را روشن می کند. همچنین، نتایج نشان می دهد که انتخاب درست و مناسب پارامترهای سوراخکاری در چارچوب استانداردهای تعیین شده، به ویژه استفاده از متهای با قطر ۴/۵ میلی متر، سرعت دورانی ۱۵۶۶۰ دور در دقیقه و نرخ پیشروی ۱۵ میلی متر در دقیقه، می تواند به طور اثربخشی دما را به سطح ایمن ۳۷/۵ درجه سانتی گراد کاهش دهد و بدین ترتیب ریسک آسیب حرارتی به استخوان را به حداقل ممکن برساند. علاوه بر موارد مذکور، یافته ها حاکی از آن است که الگوریتم ژنتیک از لحاظ دقت و صحت عملکرد، نسبت به روش سطح پاسخ و دیگر روش های بهینه سازی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند، برتری قابل توجهی دارد.

۶- مراجع

- [1] A. Sousanabadi Farahani, M. Taheri, and M. J. Mohammadi, "Investigating the effectiveness of polymethyl methacrylate drilling parameters using coated tools," *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, pp. -, 2025, doi: <https://doi.org/10.61186/masm.2025.2042384.1136>.
- [2] G. Taheri, R. Saeidi Abueshaghi, F. Setoudeh, V. Tahmasbi, and M. Mohammadian, "Analysis and optimization of cortical bone drilling process based on stochastic optimization," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, p. 09544119251321134, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/09544119251321134>.
- [3] M. Ghoreishi, V. Tahmasbi, and H. Heydari, "Investigation, sensitivity analysis and multi objective optimization of effective parameters on temperature in robotic drilling bone," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 142-153,

- analyzing parameters affecting the bone drilling process using the Taguchi method," doi: <https://doi.org/10.61186/masm.4.1.139>.
- [21] A. Paul *et al.*, "High-Speed Swine Bone Drilling Parametric Optimization: Minimizing Temperature and Thrust Force using GRA and COPRAS Methods," *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-18, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10130-z>.
- [22] A. Gök, K. Gök, and M. A. Alkan, "The optimization of driller parameters for orthopedic surgery applications using multiobjective gray relational analysis and response surface method," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 22, no. 04, p. 2250021, 2022, doi: <https://doi.org/10.1142/S021951942250021X>.
- [23] R. P. Singh, P. M. Pandey, A. R. Mridha, and T. Joshi, "Experimental investigations and statistical modeling of cutting force and torque in rotary ultrasonic bone drilling of human cadaver bone," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 234, no. 2, pp. 148-162, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0954411919889913>.
- [24] R. S. Abueshaghi, F. Setoudeh, and V. Tahmasbi, "Thermomechanical Dynamics and Statistical Optimization in Bone Drilling: A Systematic Review on Mitigating Thermal Necrosis Through Multiscale Modeling and Clinical Validation," *Results in Engineering*, p. 104923, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104923>.
- [25] G. Taheri, R. Saeidi Abueshaghi, F. Setoudeh, V. Tahmasbi, and M. Mohammadian, "Analysis and optimization of cortical bone drilling process based on stochastic optimization," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, p. 09544119251321134, 2024, doi: <https://doi.org/10.1177/09544119251321134>.
- [26] G. Pintér, G. Braunitzer, E. Nagy, K. Boa, J. Piffkó, and M. A. Antal, "Heat Generation During Guided Bone Drilling: Bone Trepine Versus Pilot Drill," *Lubricants*, vol. 13, no. 3, p. 115, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants13030115>.
- [27] E. P. de Kater, P. Breedveld, and A. Sakes, "Drilling around the corner: a comprehensive literature review of steerable bone drills," *Frontiers in Medical Technology*, vol. 7, p. 1426858, 2025, doi: <https://doi.org/10.3389/fmedt.2025.1426858>.
- [28] T. M. Keaveny, E. F. Morgan, and O. C. Yeh, "Bone mechanics," *Standard handbook of biomedical engineering and design*, pp. 8.1-8.23, 2004, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.3.1.307>.
- [12] J. Zhao, Z. Zhang, X. Wu, Z. Zhang, Z. Li, and S. Liu, "Optimizing bone screw insertion: The impact of pre-drilling diameter, bone quality, and spindle speed on mechanical stability and thermal dynamics in synthetic models," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, p. 09544062251318099, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/09544062251318099>.
- [13] M. Khoran and H. Amirabadi, "Simulation and Finite Element Modeling Study of Bone Drilling," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 3-10, 2022, doi: <https://doi.org/10.30506/mmep.2022.538547.1949>.
- [14] R. P. Singh, P. M. Pandey, M. A. Mir, and A. R. Mridha, "Thermal changes during drilling in human femur by rotary ultrasonic bone drilling machine: A histologic and ultrastructural study," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 110, no. 5, pp. 1023-1033, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34975>.
- [15] N. Mondal *et al.*, "Optimization of high speed bone drilling with automated osteonecrosis avoidance using an ANN-GA hybrid method," *International Journal of Modelling and Simulation*, pp. 1-22, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/02286203.2024.2437827>.
- [16] O. Salomó-Coll, B. Auriol-Muerza, N. Lozano-Carrascal, F. Hernández-Alfaro, H.-L. Wang, and J. Gargallo-Albiol, "Influence of bone density, drill diameter, drilling speed, and irrigation on temperature changes during implant osteotomies: an in vitro study," *Clinical Oral Investigations*, vol. 25, pp. 1047-1053, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03398-y>.
- [17] Y. Reingewirtz, S. Szmukler-Moncler, and B. Senger, "Influence of different parameters on bone heating and drilling time in implantology," *Clinical oral implants research*, vol. 8, no. 3, pp. 189-197, 1997, doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1997.080305.x>.
- [18] Ö. Pazarıcı and F. Gündoğdu, "Temperature change during orthopedic drilling procedures: An experimental surgical internal fixation simulation study," *Journal of Orthopaedics*, vol. 46, pp. 58-63, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jor.2023.10.013>.
- [19] M. Sarparast, M. Ghoreishi, T. Jahangirpoor, and V. Tahmasbi, "Modelling and optimisation of temperature and force behaviour in high-speed bone drilling," *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, vol. 33, no. 1, pp. 1616-1625, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/13102818.2019.1684841>.
- [20] R. S. Abueshaghi, F. Setoudeha, V. Tahmasbi, M. Mohammadian, and G. Taheri, "Investigating and

ارزیابی عیب اولیه مجاز رینگ نگهدارنده ژنراتور تحت بارگذاری خستگی

چکیده: در تحقیق حاضر یک مدل تحلیلی جدید برای پیش بینی ابعاد ترک اولیه مجاز رینگ نگهدارنده ژنراتور تحت بارگذاری خستگی توسعه داده شده است. در این مدل، ابتدا با استفاده از روابط تجربی موجود، عیوب ناشی از فورجینگ با ترک های با هندسه مشخص معادل سازی می شود. در ادامه با استفاده از میدان تنش رینگ حین بارگذاری سیکلیک ژنراتور، نواحی بحرانی تعیین می گردد. سپس ابعاد ترک اولیه مجاز رینگ با استفاده از ابعاد ترک بحرانی و تعداد بارگذاری سیکلیک مشخص می شود. در انتها با استفاده از روابط تجربی موجود، اندازه اولیه ترک مجاز آزمایش های اولتراسونیک محاسبه می گردد. پس از انجام محاسبات، اندازه عیب اولیه مجاز برابر با ۵ میلیمتر محاسبه گردید. به منظور راستی آزمایی مدل، برای دو اندازه ترک مقادیر ضریب شدت تنش همزمان با روش اجزای محدود نیز تعیین گردیده و با مقادیر به دست آمده از روش تابع وزن مقایسه گردیده است. نتایج همخوانی مطلوبی را نشان می دهد. به طوریکه حداکثر اختلاف نتایج دو روش ۱۰ درصد است.

واژه های راهنما: عیوب فورجینگ، ارزیابی عمر خستگی، رینگ نگهدارنده ژنراتور، مکانیک شکست

میثم داود آبادی

رئیس گروه طراحی دینامیکی

علی رضا شماعی کاشانی

کارشناس طراحی دینامیکی

علی قاهری*

مدیر طراحی پایه،

معاونت مهندسی و تحقیق و توسعه،

شرکت مهندسی و ساخت ژنراتور

مینا (پارس)،

کرج

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

**Meysam
Davoudabadi**
Head of Dynamic Design
Group

**Alireza Shamaei-
Kashani**
Dynamic Design Specialist

Ali Ghaehri*
Basic Design Manager,
R&D Department, MAPNA
Generator Engineering and
Manufacturing Co. (PARS),
Karaj

Assessment of the permissible initial defect in the generator retaining ring under fatigue loading conditions

Abstract: This study presents a new analytical model developed to predict the dimensions of the allowable initial crack in the generator retaining ring under fatigue loading. In this model, defects resulting from forging are first represented as cracks with a specific geometry, based on existing empirical relationships. The critical regions are then identified using the stress field of the ring during cyclic loading of the generator. The dimensions of the allowable initial crack are subsequently determined using the critical crack dimensions and the number of cyclic loadings. Finally, the size of the allowable initial crack for ultrasonic testing is calculated using available empirical relationships. Upon completion of the calculations, the permissible initial defect size was calculated to be 5 millimeters. To validate the model, the stress intensity factor values for two crack sizes were also computed using the finite element method and compared with those obtained from the weight function method. The results demonstrate a good level of consistency, with the maximum discrepancy between the two methods not exceeding 10 percent.

Keywords: Forging defect, Fatigue life assessment, Generator retaining ring, Fracture mechanic

۱- مقدمه

شارما و همکاران [۹] با استفاده از تکنیک مدل جایگزین^۵ توانستند الگوی تنش رینگ نگهدارنده توربوژنراتور را در موقعیت‌های دلخواه محاسبه کنند. لی و همکاران [۱۰] بر اساس فرضیات مکانیک شکست الاستیک خطی عمر باقیمانده رینگ نگهدارنده ژنراتورهای بزرگ را ارزیابی کردند. نشان داده شده است که در نواحی شریک رینگ در روتور، تنش بسیار بالایی به هردو اعمال می‌گردد و فرض الاستیک خطی می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. بنابراین در تحقیق حاضر از روش منحنی تحلیل خرابی [۱۱] استفاده شده است.

مبنای طراحی ژنراتورها ۱۰۰۰۰ سیکل خاموش/روشن کردن و ۵۰۰ سیکل با سرعت‌های ۲۰ درصد بالاتر از سرعت نامی است [۱۲]. همچنین طراحی‌ها به نحوی است که در سرعت -Over speed هیچ یک از اجزای روتور ژنراتور دچار واماندگی نشود [۱۲]. در پروژه حاضر ابتدا مطالعات متالورژیکی متریال رینگ نگهدارنده ارائه می‌گردد. سپس با استفاده از روابط تجربی موجود در منابع، عیوب ناشی از فورجینگ با ترک‌های سطحی نیم-بیضی و محاط بیضی معادل سازی می‌شود. به منظور شناسایی عیوب از آزمایش اولتراسونیک استفاده می‌گردد. در ادامه با توجه به میدان تنش قطعه در حین فرآیند خاموش و روشن شدن ژنراتور، نواحی بحرانی از نظر رشد عیوب تعیین می‌گردد. در ادامه طول ترک بحرانی محاسبه می‌گردد. با مشخص بودن ابعاد ترک بحرانی و تعداد خاموش/روشن شدن‌های مجاز ژنراتور و با شبیه-سازی رشد ترک، ابعاد ترک اولیه مجاز تعیین می‌شود. سپس با استفاده از روابط تجربی موجود در مراجع، ابعاد عیب مجاز در تست التراسونیک تعیین می‌گردد.

۲- مطالعه‌های متالورژیکی

متریال سازنده رینگ نگهدارنده ژنراتور، 18Mn-18Cr است. فرآیند تولید قطعه به صورت فورج و از فولاد ESR بوده است. سیکل عملیات حرارتی این قطعه شامل عملیات انحلال‌سازی (1100-1020°C)، کار سرد و پایداری‌سازی (360-340°C) بوده است. دماغه رینگ نگهدارنده بر روی روتور شریک می‌شود. همزمان ناحیه انتهایی گوه‌های مسی نیز زیر دماغه رینگ قرار می‌گیرد. ناحیه انتهایی رینگ نگهدارنده نیز بر روی یک رینگ فولادی شریک می‌گردد. در شکل (۱) تصویر یک رینگ نگهدارنده نشان داده شده است.

به منظور محافظت از سیم‌پیچ ناحیه انتهایی روتور ماشین‌های الکتریکی در برابر نیروهای گریز از مرکز، از رینگ نگهدارنده^۱ استفاده می‌شود. روش ساخت این قطعات فورجینگ^۲ است. حین فرآیند ساخت قطعات فورج شده بزرگ، عیوب اولیه‌ای در قطعه ایجاد می‌گردد. این عیوب بر عمر نهایی قطعه اثرگذار بوده و می‌تواند عمر آن را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. اتصال رینگ نگهدارنده به روتور به روش شریک^۳ است و قطعه فوق در شرایط کاری در معرض تنش‌های ناشی از شریک و همچنین بارگذاری سیکلیک ناشی از خاموش/روشن کردن ماشین الکتریکی قرار دارد. در اثر چنین بارگذاری‌هایی عیوب اولیه قطعه امکان رشد پیدا می‌کند و در نهایت می‌تواند منجر به شکست ناگهانی قطعه گردد. پیامدهای وقوع چنین نوع حادثه‌ای برای قطعات بزرگی مانند روتور ژنراتورها و توربین‌ها بسیار شدید است [۱]. برای پیش‌گیری از وقوع خرابی ناگهانی لازم است پس از ساخت رینگ نگهدارنده، تست‌های غیرمخرب جهت تشخیص عیوب انجام گردد. به عنوان نمونه تست اولتراسونیک^۴ جهت تعیین اندازه عیوب ایجاد شده حین ساخت قطعات فورج استفاده می‌گردد. یک راه تبدیل عیوب نشان داده شده در تست اولتراسونیک به ترک معادل با استفاده از روش تحلیلی-آزمایشگاهی می‌باشد [۲، ۳]. در این روش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، ثوابت مادی مدل تحلیلی محاسبه می‌گردد.

در گذشته از متریال^۵ 18Mn5Cr برای ساخت رینگ نگهدارنده ماشین‌های الکتریکی مانند ژنراتورها استفاده می‌گردید. نشان داده شده است که این متریال مستعد ترک خوردگی از نوع خوردگی تنشی^۶ است [۴]. این موضوع محققان را بر آن داشت تا آن را با متریالی مقاوم به خوردگی تنشی جایگزین نمایند. بنابراین متریال 18Mn18Cr جایگزین این متریال گردید [۵، ۶]. با توجه به اینکه در پروژه حاضر از متریال 18Mn18Cr استفاده شده است، از رشد ترک ناشی از خوردگی تنشی صرف نظر گردیده است. بیشترین تنش در روتور توسط رینگ نگهدارنده تحمل می‌گردد و این قطعه بحرانی‌ترین جزء روتور است. نشان داده شده است که بخش قابل توجهی از ترک و آسیب در روتور ژنراتورها ناشی از مشکلات در سیم‌پیچی ناحیه انتهایی و رینگ نگهدارنده است [۷]. نیکفر و همکاران [۸] تاثیر پارامترهای مختلف رینگ نگهدارنده بر رفتار مکانیکی آن را بررسی کردند.

⁵ Material⁶ Stress Corrosion Cracking⁷ Surrogate model¹ Retaining Ring² Forging³ Shrink⁴ Ultrasonic



شکل ۱ سطح داخلی رینگ نگهدارنده



شکل ۲ دستگاه‌های آزمایش آنالیز شیمیایی، کشش و ضربه

جدول ۱ نتایج آنالیز شیمیایی رینگ نگهدارنده، متریال 18Mn-18Cr

	C	Si	Mn	Cr	Ni
Test	0.091	0.4	20.0	17.68	0.64
ASTM A289	<0.1	<0.8	>17.5; <20	>17.5; <20	<2
	Mo	V	N	other	Fe
Test	0.1	0.1	0.48	0.21	Base
ASTM A289		<0.25	<0.8	<0.21	

جدول ۲ نتایج آزمون‌های کشش و ضربه متریال 18Mn-18Cr

	E (GPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	I (J)
Test	200	1197	1212	219
ASTM A289		>1240	>1275	>68

۳- مطالعه‌های تحلیلی

در این بخش روند محاسبه طول ترک مجاز رینگ نگهدارنده ژنراتور بر اساس دیدگاه مکانیک شکست و منحنی تحلیل خرابی ارائه می‌گردد.

جهت بررسی رفتار مکانیکی رینگ نیاز است خواص الاستیک و استحکامی آن مشخص گردد. در ادامه خواص مکانیکی شامل آنالیز شیمیایی، خواص ضربه و خواص کششی متریال ارائه می‌گردد. شکل (۲)، تصویر دستگاه‌های آزمایشی جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی رینگ را نشان می‌دهد.

نتایج آزمون آنالیز شیمیایی قطعه به شرح جدول (۱) است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، متریال مطابق استاندارد ASTM A289 [۱۳] می‌باشد. مقادیر تمامی عناصر از جمله عنصرهای Cr و Mn در رنج تعریف شده استاندارد قرار دارد. این فولاد با نام فولاد 18-18 نیز شناخته می‌شود.

آزمون‌های کشش و ضربه نیز بر روی نمونه‌های استخراج‌شده در راستای مماسی رینگ انجام گردیده و نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است.

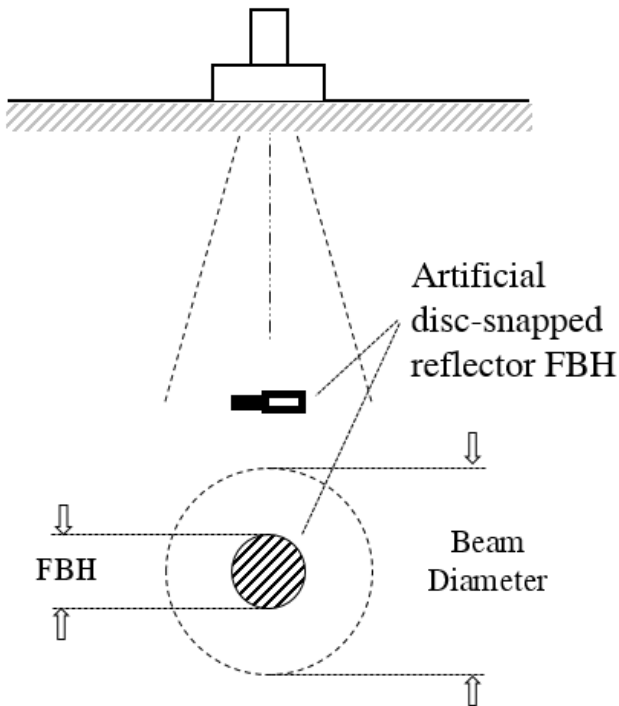
ویژگی رایج فولاد 18-18 نزدیک بودن استحکام تسلیم و استحکام نهایی آن است. با استفاده از نتایج آزمون‌های کشش و ضربه متریال، می‌توان با تقریب خوبی چقرمگی شکست متریال را محاسبه کرد. در استاندارد BS 7910 [۱۱] روند محاسبه چقرمگی شکست ماده از نتایج سایر خواص مکانیکی توضیح داده شده است.

از نتایج مدول الاستیک و خواص استحکامی متریال در ادامه در مدل تحلیلی استفاده می‌گردد.

۳-۱- تعیین ابعاد ترک معادل با عیب

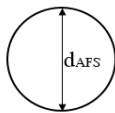
در رابطه (۱) به عنوان ضریب تصحیح تعریف شده است. مقدار این ضریب تابعی از اندازه عیب موجود در قطعه است.

$$\begin{aligned} \text{for } EFBH \leq 4 \text{ mm} \quad k &= 2 \\ \text{for } EFBH \geq 5 \text{ mm} \quad k &= 1.7 \end{aligned} \quad (2)$$



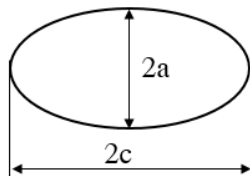
شکل ۴ شماتیکی از مفهوم طول مجازی پرتو صوت در محل عیب و مقدار EFBH [۲]

ابعاد واقعی ناپیوستگی هندسی:
 $d_{AFS} = k \times EFBH$



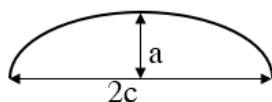
ترک بیضوی بحرانی با همان مساحت:

$$\frac{a}{c} = 0.4 \text{ and } a = \frac{d_{AFS}}{\sqrt{10}}$$



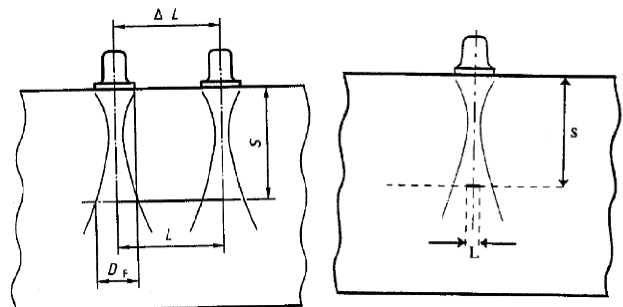
ترک بیضوی بحرانی با همان مساحت:

$$\frac{a}{c} = 0.4 \text{ and } a = \frac{d_{AFS}}{\sqrt{5}}$$



شکل ۵ شماتیک از ترک‌های داخل صفحه معادل با عیب

در این بخش محاسبات ترک معادل با عیب مشاهده شده در آزمایش اولتراسونیک ارائه می‌گردد. در تست اولتراسونیک، منفرد یا گروهی بودن عیب و ابعاد هندسی آن با دقت مطلوبی قابل تعیین است. در تحقیق حاضر، تحلیل‌ها بر عیوب منفرد قطعه متمرکز است. نشان داده شده است که عیوب منفرد به دو دسته عیوب کوچک^۱ و عیوب بزرگ^۲ دسته‌بندی می‌گردد. عیوبی در دسته اول قرار می‌گیرند که در محل تشخیص عیب، طول عیب از طول پرتو صوت که به صورت مجازی اندازه‌گیری می‌گردد، کوچکتر باشد. در غیر این صورت، عیب در دسته دوم قرار می‌گیرد.



شکل ۳ عیوب داخل صفحه با ابعاد کوچک و بزرگ [۱۴]

در رینگ نگهدارنده ژنراتور، عیوب داخل صفحه با ابعاد بزرگ قابل قبول نمی‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، تنها عیوب با اندازه کوچک بررسی می‌گردد. به طور معمول در آزمایش اولتراسونیک با استفاده از روش DGS^۳ عیب با یک حفره استوانه‌ای مسطح موسوم به EFBH^۴ معادل‌سازی می‌شود [۲]. شکل (۴) به صورت شماتیک مفهوم EFBH را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، عیب با یک دایره معادل‌سازی می‌شود که قطر آن دایره برابر با EFBH است. واحد این مفهوم میلی‌متر است. به بیان دیگر می‌توان گفت در صورتی یک دیسک یا یک حفره استوانه‌ای با قطر هم‌اندازه با EFBH در محل عیب وجود داشته باشد سیگنالی مشابه با سیگنال عیب موجود در قطعه را تولید می‌کند. به صورت آزمایشگاهی نشان داده شده است [۲] که اندازه قطر EFBH با اندازه قطر واقعی عیب رابطه مستقیم دارد. بنابراین، رابطه زیر برای تعیین قطر EFBH ارائه شده است.

$$d_{AFS} = k \cdot EFBH \quad (1)$$

³ Distance Gain Size

⁴ Equivalent Flat Bottom Hole

¹ Large discontinuity

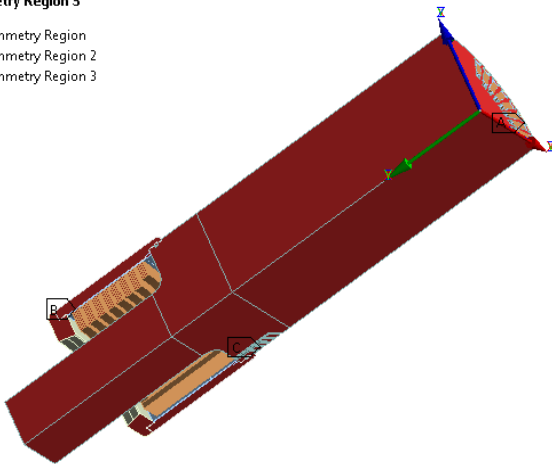
² Small discontinuity

افزار ANSYS انجام شده است. تحلیل شامل سه مرحله به شرح زیر می‌باشد.

- شرینگ رینگ نگهدارنده روی روتور و اینسرت رینگ^۱
 - سرعت دورانی و شرایط دمایی در شرایط کارکرد عادی روتور
 - سرعت دورانی در شرایط تست سرعت بالا
- با توجه به وجود تقارن و به منظور کاهش زمان حل، یک هشتم کل هندسه مدل می‌شود؛ به همین دلیل روی سطوح برش داده شده مشابه شکل (۷) شرط مرزی تقارن اعمال شده است.

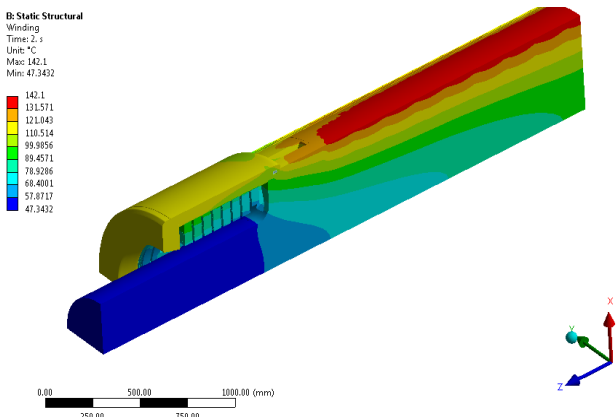
Symmetry Region 3

- A Symmetry Region
- B Symmetry Region 2
- C Symmetry Region 3



شکل ۷ شرط‌های تقارن اعمال شده بر روی هندسه

توزیع دمای شرایط کارکردی نیز که از خروجی تحلیل‌های CFX به دست آمده به عنوان شرط دمایی در مدل اعمال شده است. شکل (۸) توزیع دمای مجموعه روتور خروجی نرم‌افزار CFX نشان داده شده است.



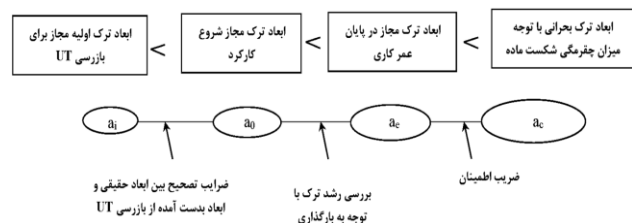
شکل ۸ توزیع دمای مجموعه روتور خروجی نرم‌افزار CFX

سرعت دورانی در شرایط کاری $\omega = 3000$ RPM و برای تست سرعت بالا $\omega = 3600$ RPM اعمال شده است. تماس

مطابق با روندی که در مرجع [۲] معرفی شده است، ترک‌های با شکل بیضی و نیم‌بیضی با نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ (a/c) برابر با 0.4 با سطح مقطع برابر با سطح مقطع واقعی عیب برای تحلیل مکانیک شکست در نظر گرفته می‌شود. نشان داده شده است که نسبت 0.4 نسبتی است که در آن ضریب شدت تنش بیشترین مقدار را در بین تمامی ترک‌های با این سطح مقطع دارد [۲]. با انجام محاسبات هندسی، ابعاد ترک‌های بیضی و نیم‌بیضی معادل تعیین می‌گردد. نحوه انجام این روند در شکل (۵) نشان داده شده است.

۲-۳- روند انجام آنالیز مکانیک شکست و تعیین ابعاد ترک اولیه مجاز

ابعاد ترک با فرض مکانیک شکست الاستیک خطی تعیین می‌گردد. در شکل (۶)، روندنمای تحلیل ایمنی با فرض مکانیک شکست الاستیک خطی و برای بارگذاری‌های کم‌چرخه ارائه شده است. روند کار بدین صورت است که ابتدا با در نظر گرفتن مقدار چقرمگی شکست متریال و میدان تنش، عمق ترک بحرانی شعاع کوچک بیضی (نسبت $a/c=0.4$) تعیین می‌شود. در ادامه ابعاد ترک مجاز در شروع کارکرد، a_0 ، با استفاده از ابعاد ترک بحرانی و بررسی رشد ترک در اثر بارگذاری سیکلیک ناشی از خاموش/روشن شدن ژنراتور تعیین می‌گردد. بر اساس داده‌های مرجع [۲] ضریب اطمینان برابر با $2/25$ در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از ضریب تصحیح تجربی، ابعاد اولیه مجاز بازرسی‌های اولتراسونیک تعیین می‌گردد. همان‌گونه که اشاره گردید، ژنراتور برای 10000 سیکل خاموش/روشن کردن طراحی شده است [۱۲].



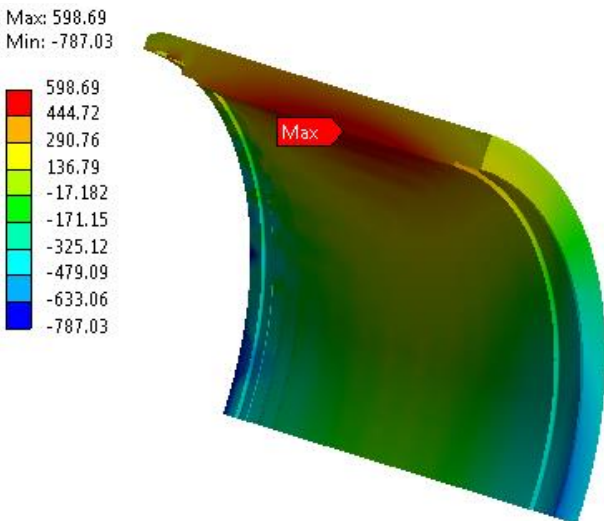
شکل ۶ روند آنالیز ایمنی بر مبنای مکانیک شکست [۲]

۳-۳- میدان تنش قطعه

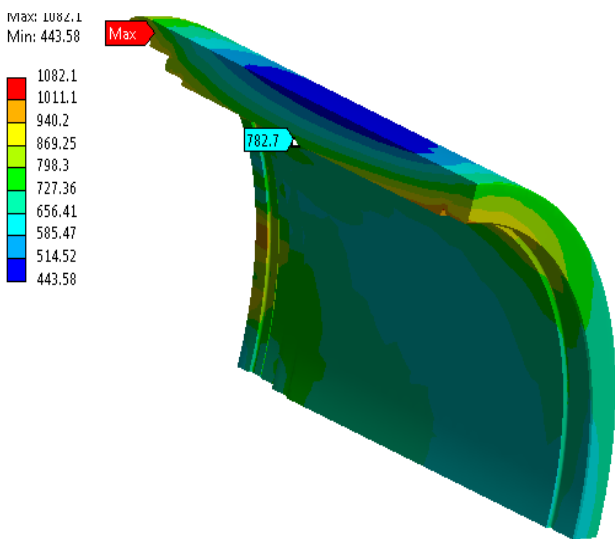
به منظور تعیین میدان تنش رینگ نگهدارنده تحلیل سه‌بعدی روتور ژنراتور با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم

¹ Insert ring

حداکثر تنش است. بنابراین لازم است حداکثر تنش شرایط Over speed مشخص گردد. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که تنش حداکثر نواحی میانی ۷۸۰ مگاپاسکال و در دماغه ۱۰۸۲ مگاپاسکال است.



شکل ۱۰ بازه تغییرات تنش محیطی بین دو حالت شرینگ و شرایط کارکرد نرمال ژنراتور



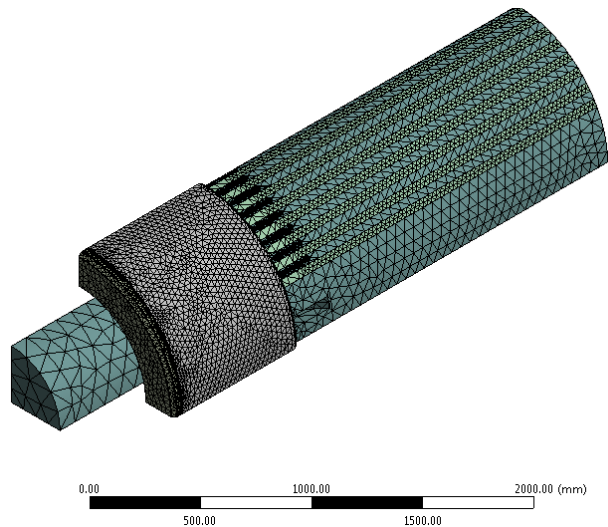
شکل ۱۱ کانتور تنش شرایط Over speed با سرعت 3600 دور بر دقیقه

۳-۴- تعیین ضریب شدت تنش

رینگ نگهدارنده دارای هندسه به شکل استوانه می‌باشد. بنابراین برای محاسبه ضریب شدت تنش، از ضریب شدت تنش ترک طولی نیم‌بیضی در هندسه استوانه (شکل (۱۲)) می‌توان استفاده کرد. یکی از روش‌های رایج برای تعیین ضریب شدت تنش در استوانه‌ها روش تابع وزن است. بر مبنای این روش با مشخص بودن تابع وزنی مربوط به هندسه استوانه‌ای مورد نظر و

بین قطعات مختلف از نوع اصطکاکی تعریف می‌شود. برای مش بندی مدل از ۱،۵۳۵،۴۴۹ گره (۸۱۵،۹۸۷ المان) استفاده شده است. شکل (۹) مش بندی کلی را نشان می‌دهد.

تنش‌های ناشی از شرینگ در شفت روتور و بارگذاری سیکلیک ناشی از خاموش/روشن کردن ژنراتور به رینگ نگهدارنده ژنراتور اعمال می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تغییرات تنش اصلی در زمان خاموش/روشن شدن ژنراتور در طول رینگ و در بخش میانی آن اتفاق می‌افتد.



شکل ۹ مش بندی مدل برای تحلیل المان محدود

تنش اصلی که می‌تواند منجر به ایجاد و رشد ترک در سطح داخلی رینگ نگهدارنده گردد، تنش محیطی است. بازه تغییرات تنش در نواحی میانی رینگ نگهدارنده در حدود ۶۰۰ مگاپاسکال و در ناحیه شرینگ ۴۸۰ مگاپاسکال است. کانتور تنش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بارگذاری بحرانی مسئله، حالت over-speed یا همان سرعت ۳۶۰۰ دور بر دقیقه است. کانتور تنش در این حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد از نظر تنش‌های استاتیکی، دماغه، ناحیه بحرانی رینگ نگهدارنده است. حداکثر تنش در ناحیه میانی رینگ ۷۸۰ مگاپاسکال و در نواحی شرینگ ۱۰۸۲ مگاپاسکال است. از بازه تغییرات تنش در محاسبه رشد ترک و از حداکثر تنش در تعیین ابعاد ترک بحرانی در پایان عمر کاری استفاده می‌شود.

بنابراین از بررسی میدان تنش مشاهده گردید که ناحیه میانی رینگ که بیشترین بازه تغییرات تنش در آن رخ می‌دهد به همراه ناحیه دماغه که حداکثر تنش در آن قسمت است، نواحی بحرانی مسئله هستند که در محاسبات تعیین ابعاد ترک اولیه مجاز به کار می‌روند. معیار تعیین ابعاد ترک بحرانی، مقدار

[۱۵] این ضرایب برای هندسه استوانه با نسبت شعاع به ضخامت ۱۰ تعیین و ارائه شده است.

$$M_{1A} = \frac{\pi}{\sqrt{2Q}} (4Y_0 - 6Y_1) - \frac{24}{5} \quad (۶)$$

$$M_{2A} = 3 \quad (۷)$$

$$M_{3A} = 2 \left(\frac{\pi}{\sqrt{2Q}} Y_0 - M_{1A} - 4 \right) \quad (۸)$$

$$M_{1B} = \frac{\pi}{\sqrt{4Q}} (30F_1 - 18F_0) - 8 \quad (۹)$$

$$M_{2B} = \frac{\pi}{\sqrt{4Q}} (60F_0 - 90F_1) + 15 \quad (۱۰)$$

$$M_{3B} = -(1 + M_{1B} + M_{2B}) \quad (۱۱)$$

ضرایب Q, Y_0, Y_1, F_0, F_1 در این روابط ضریب وابسته به هندسه ترک نیم‌بیضوی می‌باشد. بعد از تعیین تابع وزن برای نقاط عمقی و سطحی، $m_A(x, a)$ و $m_B(x, a)$ ضریب شدت تنش برای هر یک از نقاط سطحی و عمقی با استفاده از رابطه (۳) قابل تعیین خواهد بود.

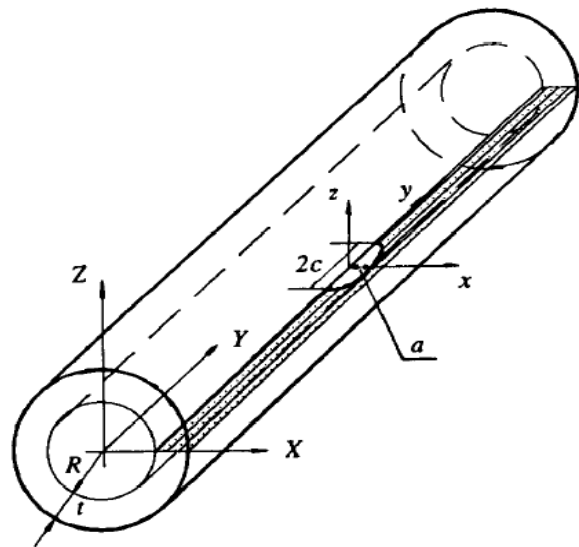
در رینگ نگهدارنده نسبت شعاع به ضخامت برای نواحی میانی در حدود $7/5$ و برای نواحی شیرینک در حدود 14 می‌باشد. علاوه بر آن روابط ارائه شده در این مرجع برای نسبت عمق به ضخامت $0.8 < a/t < 1$ و نسبت $0 < a/c < 1$ صادق است. به منظور اطمینان از کم بودن خطای روابط این مرجع برای هندسه رینگ نگهدارنده، برای دو ترک یکی با ابعاد کوچک و دیگری بزرگ، ضریب شدت تنش به صورت همزمان با استفاده از نرم افزار Ansys Workbench تعیین و با نتایج روابط تحلیلی مقایسه شده است. بارگذاری به صورت یکنواخت و برابر با ۱ مگاپاسکال بر روی سطح ترک در نظر گرفته شده و مدل‌سازی برای دو ناحیه دماغه و میانی انجام شده است. در هندسه و مش‌بندی ترک مدل‌سازی شده در نواحی دماغه رینگ نگهدارنده قابل مشاهده می‌باشد.

مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش تحلیل المان محدود و روابط نیمه‌تحلیلی برای کوچکترین ترک (عمق 0.5 میلی‌متر) و ترک بزرگ (عمق 8 میلی‌متر) در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

توزیع تنش، ضریب شدت تنش با استفاده از رابطه (۳) قابل تعیین است.

$$K_I = \int_0^a \sigma(x) m(x, a) dx \quad (۳)$$

در این رابطه $\sigma(x)$ توزیع تنش در طول جبهه ترک و $m(x, a)$ تابع وزن است که با استفاده از یک ضریب شدت تنش مرجع تعیین می‌شود. بر اساس اصل برهم‌نهی می‌توان از میدان تنش به‌دست آمده از تحلیل هندسه بدون ترک در محلی که ترک در آن در نظر گرفته شده استفاده نمود.



شکل ۱۲ هندسه و ابعاد ترک نیم‌بیضوی طولی در استوانه [۱۵]

فرم عمومی تابع وزن برای ترک‌های نیم‌بیضوی که در مرجع [۱۶] ارائه شده، به ترتیب برای نقاط عمقی و سطحی ترک به صورت روابط (۴) و (۵) می‌باشد.

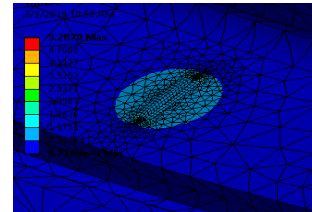
$$m_A(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_{1A} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + \dots + M_{2A} \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_{3A} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \quad (۴)$$

$$m_B(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_{1B} \left(\frac{x}{a}\right)^{1/2} + \dots + M_{2B} \left(\frac{x}{a}\right) + M_{3B} \left(\frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \quad (۵)$$

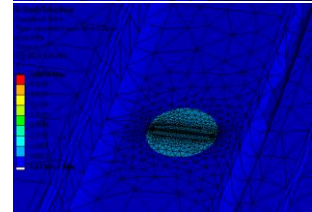
در اینجا $m_A(x, a)$ تابع وزن برای نقطه عمقی و $m_B(x, a)$ تابع وزن برای نقطه سطحی ترک است. ضرایب $M_{1A}, M_{2A}, M_{3A}, M_{1B}, M_{2B}, M_{3B}$ با استفاده از دو ضریب شدت تنش مرجع قابل تعیین هستند. در مرجع



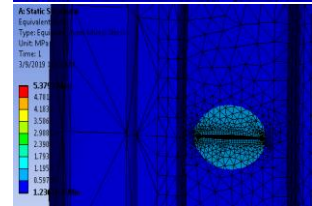
$a/c = 1$



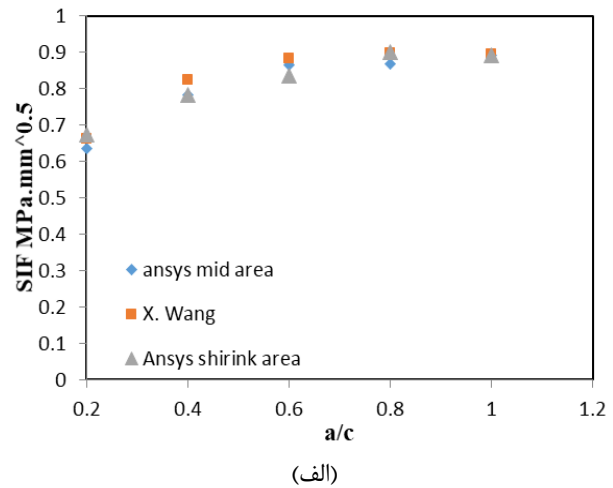
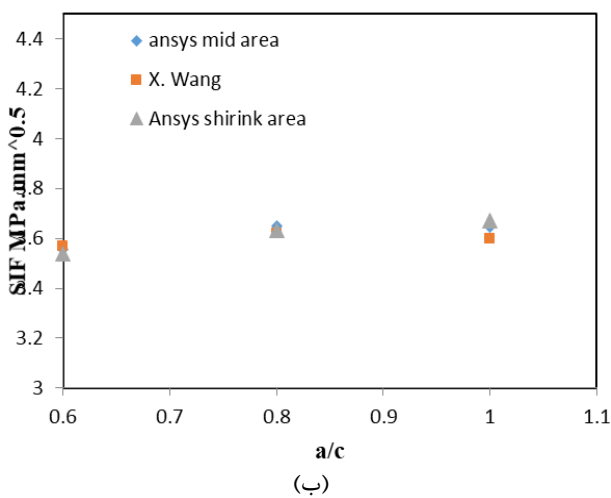
$a/c = 0.8$



$a/c = 0.6$



شکل ۱۳ مدل سازی ترک نیم بیضوی در نواحی دماغه رینگ با استفاده از Ansys Workbench

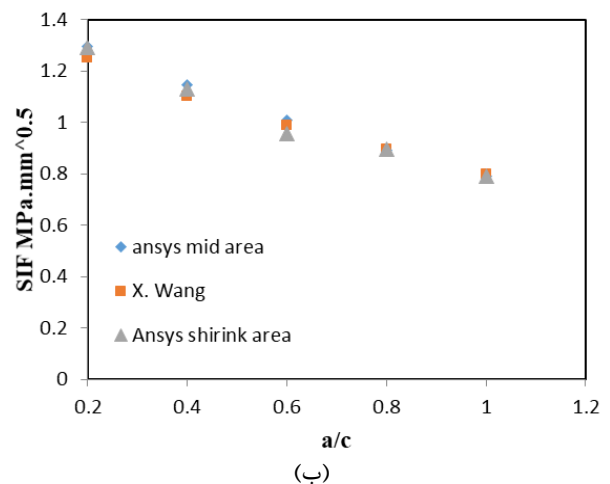


شکل ۱۵ مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش حاصل از تحلیل المان محدود با روابط نیمه تحلیلی ترک نیم بیضوی با عمق ۸ میلی متر برای؛ الف- نقطه عمقی ب- نقطه سطحی

با مقایسه نتایج حاصل از روابط نیمه تحلیلی و نتایج المان محدود، مشاهده می گردد حداکثر اختلاف نتایج دو روش برای حالت های مختلف کمتر از ۱۰ درصد است.

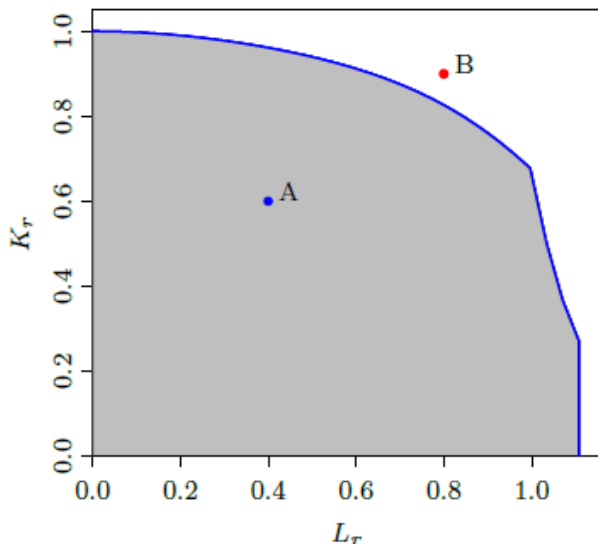
۳-۵- تعیین سائز ترک بحرانی

با استفاده از چقرمگی شکست ماده، سائز ترک بحرانی تعیین می گردد. نشان داده شده است که چقرمگی شکست آلیاژ 18Mn-18Cr با استحکام تسلیم آن رابطه معکوس دارد. مرجع [۱۷] ارتباط چقرمگی شکست و تنش تسلیم آلیاژهای 18Mn-18Cr و 18Mn-5Cr را نشان می دهد. این ارتباط در شکل (۱۶) نیز نشان داده شده است. چقرمگی شکست رینگ نگهدارنده با استحکام تسلیم ۱۱۹۷ مگاپاسکال (جدول (۲)) $250 MPa\sqrt{m}$ می باشد. اندازه ترک بحرانی بر اساس حداکثر تنش طراحی مشخص می شود. طراحی رینگ نگهدارنده برای



شکل ۱۴ مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش حاصل از تحلیل المان محدود با روابط نیمه تحلیلی ترک نیم بیضوی با عمق ۰/۵ میلی متر برای؛ الف- نقطه عمقی ب- نقطه سطحی

بروز واماندگی می‌شود. در ادامه و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲/۲۵ بر روی اندازه ترک بحرانی ابعاد مجاز در پایان عمر کاری تعیین می‌گردد. اندازه ترک مجاز در پایان عمر کاری برای نواحی میانی و نواحی دماغه رینگ نگهدارنده به ترتیب، ۱۳/۳ میلیمتر و ۶/۴۴ میلیمتر است.



شکل ۱۷ نمونه‌ای از یک دیاگرام FAD

۳-۶- شبیه‌سازی رشد ترک و تعیین سائز عیب اولیه مجاز

به منظور بررسی رشد ترک در رینگ از کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. با فرض یکسان بودن توزیع تنش در جهت ضخامت رینگ، ثابت رابطه پاریس برای متریال 18Mn-18Cr مطابق رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد. [۱۹].

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = 570 \left(\frac{\Delta K}{E} \right)^{2.7} \quad (13)$$

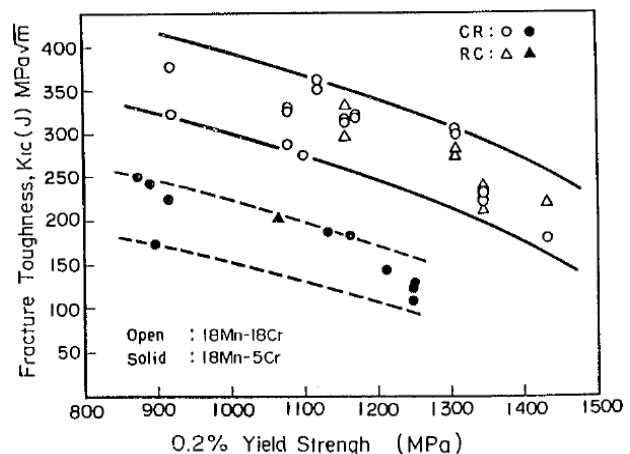
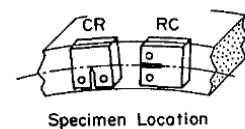
لازم به ذکر است که مقدار مدول یانگ رینگ مطابق مقادیر جدول (۲)، ۲۰۰ گیگاپاسکال بوده و ضریب شدت تنش و $\frac{\Delta a}{\Delta N}$ به ترتیب بر حسب $MPa\sqrt{m}$ و $\frac{m}{cycle}$ می‌باشد.

نمودار تغییرات عمق ترک بر حسب تعداد سیکل برای ابعاد ترک اولیه متفاوت در نواحی میانی و دماغه رینگ نگهدارنده به ترتیب در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود عمق ترک مجاز در شروع عمر کاری برای نواحی میانی و دماغه به ترتیب ۷/۲ میلی‌متر و ۴/۵ میلیمتر می‌باشد.

سرعت‌های ۱/۲ برابر سرعت نامی رینگ است و لازم است در این سرعت نیز هیچ‌گونه خرابی روی ندهد. فرضیات مکانیک شکست الاستیک خطی با توجه به بالا بودن سطح تنش در رینگ قابل استفاده نمی‌باشد. بنابراین در این قسمت، از دیاگرام تحلیل خرابی، $FAD^{[11]}$ ، استفاده می‌شود. در روش دیاگرام تحلیل خرابی، تحلیل رفتار پلاستیک ماده نیز در نظر گرفته می‌شود. یک نمونه از دیاگرام تحلیل خرابی در شکل (۱۷) نشان داده شده است. محور عمودی در این دیاگرام ضریب تصحیح مورد نیاز بر روی چقرمگی شکست ماده و محور افقی نیز بیانگر نسبت بار اعمالی به بار مورد نیاز برای ایجاد واماندگی در اثر ریزش پلاستیک^۲ است. با مشخص بودن ضریب تصحیح، حداکثر ضریب شدت تنش قابل تحمل قبل از ریزش پلاستیک با استفاده از رابطه (۱۲) قابل تعیین می‌باشد.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} \quad (12)$$

از آنجایی که نسبت بار نیز به میدان تنش اعمالی وابسته می‌باشد، ضریب تصحیح برای نواحی میانی و دماغه رینگ نگهدارنده متفاوت است. بر مبنای روش معرفی شده در مرجع [۱۸] ضریب تصحیح برای نواحی میانی رینگ نگهدارنده ۰/۸۷۸ و برای نواحی دماغه ۰/۷۶۷ تعیین گردید.

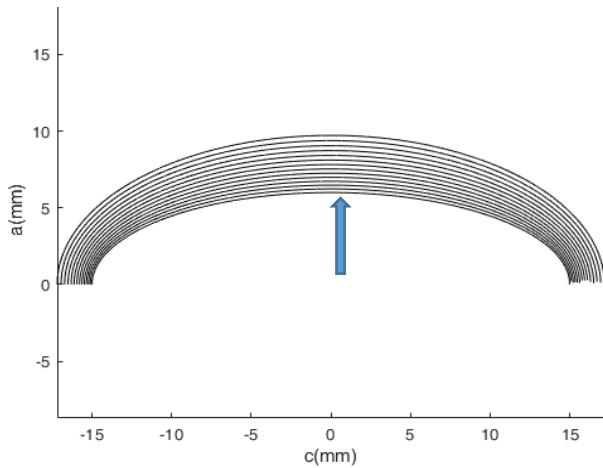


شکل ۱۶ تغییرات چقرمگی شکست ماده بر حسب تنش تسلیم برای دو آلیاژ 18Mn-5Cr و 18Mn-18Cr [۱۷]

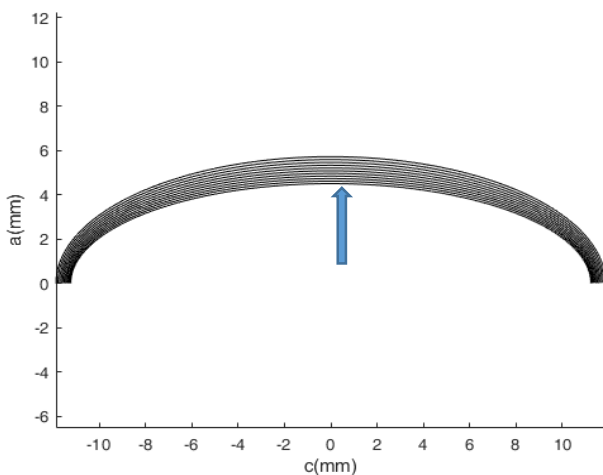
در شکل (۱۷) وضعیت تنشی نقطه A منجر به واماندگی نمی‌گردد؛ در حالی که در وضعیت تنشی نقطه B عیب منجر به

² Plastic collapse

¹ Failure Analysis Diagram



شکل ۲۰ الگوی رشد ترک در نواحی میانی



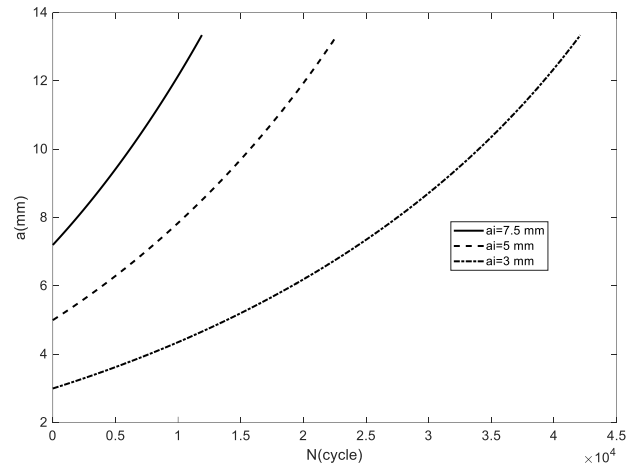
شکل ۲۱ الگوی رشد ترک در نواحی دماغه

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

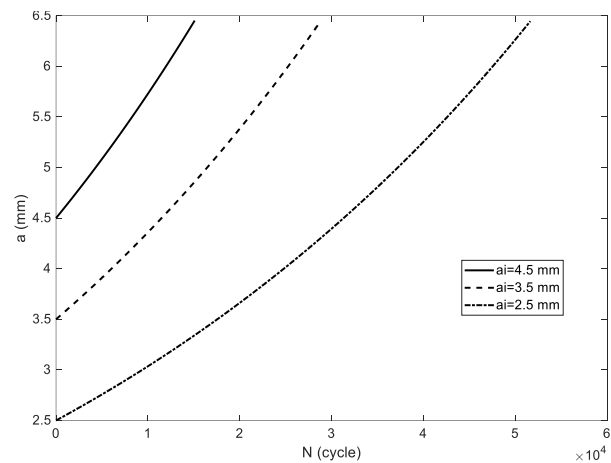
در این تحقیق متدولوژی جهت ارزیابی عمر رینگ نگهدارنده ژنراتور ارائه گردیده است. برای این منظور، دو بخش رینگ که از نظر تنش سیکلیک و تنش حداکثر بحرانی بودند، انتخاب شد. سپس تحلیل مکانیک شکست انجام گرفته و ابعاد ترک اولیه مجاز در نواحی بحرانی تعیین گردید. در ادامه با استفاده از روابط تجربی موجود، اندازه اولیه ترک مجاز تست‌های اولتراسونیک محاسبه گردید. محاسبات نشان می‌دهد سایز عیب اولیه مجاز برابر ۵ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که در محاسبات چقرمگی شکست ماده، تاثیر دما در نظر گرفته نشده است. همچنین رشد عیب تنها بر اساس پدیده خستگی در نظر گرفته شده است.

۵- مراجع

[1] F. Radaelli, C. Amann, A. Aydin, I. Varfolomeev, P. Gumbsch, and K. Kadau, "A probabilistic model for



شکل ۱۸ نمودار تغییرات عمق ترک بر حسب تعداد سیکل در نواحی میانی برای ابعاد ترک اولیه به ترتیب ۳، ۵، ۷/۵ میلی‌متر



شکل ۱۹ نمودار تغییرات عمق ترک بر حسب تعداد سیکل در نواحی دماغه برای ابعاد ترک اولیه به ترتیب ۲/۵، ۳/۵، ۴/۵ میلی‌متر

شکل (۲۰) الگوی رشد ترک در قسمت میانی رینگ را نشان می‌دهد. در این نواحی سرعت رشد ترک به علت بالا بودن دامنه تنش سیکلی، بالاتر است. اما در قسمت دماغه، به علت بالا بودن حداکثر تنش رینگ، ابعاد ترک بحرانی مجاز کمتر است. این موضوع در شکل (۲۱) نشان داده شده است.

بر اساس مشاهدات صورت گرفته، دماغه رینگ، قسمت بحرانی آن است. با استفاده از روابط تجربی مقدار مجاز EFBH حاصل از تست اولتراسونیک به منظور جلوگیری از واماندگی نواحی بحرانی، ۵ میلی‌متر حاصل می‌گردد.

اگرچه در ابتدای این تحقیق اشاره گردید که متریال 18Mn-18Cr به رشد ترک در اثر پدیده خوردگی تنشی مقاوم است، اما همچنان نمی‌توان به طور کامل از ریسک رشد عیب در اثر این پدیده صرف نظر کرد. بنابراین نیاز است اثر این پدیده نیز همراه با پدیده خستگی در نظر گرفته شود. موضوع دیگر به عدم در نظر گرفتن تاثیر دما بر چقرمگی شکست رینگ بر می‌گردد. برای این منظور لازم است ترک بحرانی بر اساس چقرمگی شکست کمترین دمای استارت مجاز ماشین محاسبه گردد.

- Engineering Conference*, 2005, pp. 673-679, <https://doi.org/10.1115/DETC2005-84974>.
- [11] B. S. Publication, "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures," ed: BSI Standards, 2019, <https://knowledge.bsigroup.com/products/guide-to-methods-for-assessing-the-acceptability-of-flaws-in-metallic-structures>.
- [12] I. K. Geoff Klempner, *Handbook of large turbogenerator operation and maintenance*: JOHN WILEY & SONS, 2008, <https://doi.org/10.1002/9780470382769>.
- [13] A. A289, "Standard Specification for Alloy Steel Forgings for Nonmagnetic Retaining Rings for Generators," ed, 2018, https://doi.org/10.1520/A0289_A0289M-97R18.
- [14] E. C. f. Standardization, "DINEN583 Ultrasonic examination," in *Part 5: Characterization and sizing of discontinuities*, ed, 2001, <https://dx.doi.org/10.31030/2102103>.
- [15] X. Wang and S. Lambert, "Stress intensity factors and weight functions for longitudinal semi-elliptical surface cracks in thin pipes," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 65, pp. 75-87, 1996, [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(94\)00160-K](https://doi.org/10.1016/0308-0161(94)00160-K).
- [16] G. Glinka and G. Shen, "Universal features of weight functions for cracks in mode I," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 40, pp. 1135-1146, 1991, [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(91\)90177-3](https://doi.org/10.1016/0013-7944(91)90177-3).
- [17] K. Orita, Y. Ikeda, T. Iwadata, and J. Ishizaka, "Development and production of 18Mn-18Cr non-magnetic retaining ring with high yield strength," *ISIJ International*, vol. 30, pp. 587-593, 1990, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.30.587>.
- [18] S. Webster, A. Bannister, "SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry)," *Brite-Euram Project*, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(00\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00070-9).
- [19] A. Balitskii, O. Krohmalny, and I. Ripey, "Hydrogen cooling of turbogenerators and the problem of rotor retaining ring materials degradation," *International journal of hydrogen energy*, vol. 25, pp. 167-171, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(99\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00023-3).
- forging flaw crack nucleation processes for heavy duty gas turbine rotor operations," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 144, p. 121026, 2022, <https://doi.org/10.1115/1.4056044>.
- [2] T.-U. Kern, J. Ewald, and K. Maile, "Evaluation of NDT-signals for use in the fracture mechanics safety analysis," *Materials at high temperatures*, vol. 15, pp. 107-110, 1998, <https://doi.org/10.1080/09603409.1998.11689587>.
- [3] K. Mayer, C. Berger, G. Gnirss, D. Heinrich, and W. Prestel, "Investigations by non-destructive inspection to determine the size of natural defects in large forgings of turbogenerators," *Nuclear engineering and design*, vol. 144, pp. 155-170, 1993, [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(93\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(93)90017-4).
- [4] R. Viswanathan, "Materials for generator retaining rings: a state-of-the-art review," 1980, <https://doi.org/10.1115/1.3225015>.
- [5] W. Moore, "Damage Mechanisms Found in Generator Rotor 18Mn18Cr Retaining Rings," in *ASME Power Conference*, 2016, p. V001T09A002, <https://doi.org/10.1115/POWER2016-59101>.
- [6] J. W. Noteboom, "Generator Retaining Rings: In Situ Inspection and Life Assessment," in *ASME Power Conference*, 2009, pp. 315-324, <https://doi.org/10.1115/POWER2009-81072>.
- [7] J. Hussa, "Failure Mechanisms of Turbo Generator Rotor," 2023 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023121336836>.
- [8] M. Nikfar, P. Amirimotlagh, and H. Kalantari, "Investigation of the retaining ring parameters in design," presented at the The 29th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers & 7th Conference on Thermal Power Plants 2021, <https://civilica.com/doc/1238302>.
- [9] A. Sharma, A. Khandelwal, and R. Relan, "Surrogate Modelling of the Retaining Ring Shrink Fit in a Turbogenerator," in *National Conference on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, 2021, pp. 241-252, https://doi.org/10.1007/978-981-19-3938-9_27.
- [10] J.-M. Lee, C.-H. Kim, and Y.-H. Ju, "Stress Analysis and Life Assessment of Rotor and Retaining Ring of Generator for Fossil Power Plant," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in*

استفاده از سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی برای پیش بینی خواص مکانیکی فولاد CK45 در نورد گرم

چکیده: فرآیند نورد یک فرآیند مهم تولید می باشد که می تواند علاوه بر عمل تولید بر روی خواص مکانیکی فولادها هم تأثیر بگذارد. هدف از این تحقیق، پیش بینی استحکام نهایی فولاد CK45 بر اساس پارامترهای فرآیند نورد گرم می باشد که به خاطر هزینه بالای عملیات نورد می تواند سبب کاهش هزینه ها و صرفه جویی در زمان تولید قطعات تولیدی شود. جهت انجام تحقیق، عملیات نورد گرم و سپس کوئنچ در دو محیط مختلف بر روی CK45 انجام شد. نمونه ها در دماهای مختلف نورد و در سرعت های غلطک 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. پس از عملیات کوئنچ، نمودار تنش-کرنش و استحکام نهایی آنها با استفاده از یک دستگاه کشش بررسی شد. در مرحله بعد با استفاده از روش سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مدلی برای پیش بینی استحکام نهایی فولادها بر اساس دو پارامتر دمای نورد و سرعت غلطک ها با استفاده از نرم افزار MATLAB ایجاد شد. سرعت غلطک و دمای نورد به عنوان ورودی و استحکام نهایی به عنوان خروجی به سیستم داده شد و پس از آموزش مدل نتایج بررسی گردید. مقایسه نتایج پیش بینی شده و اندازه گیری شده نشان داد که روش ANFIS می تواند نتایج را با دقت بالایی پیش بینی کند.

واژه های راهنما: نورد گرم، ANFIS، پارامترهای نورد، CK45

آیدین سلیمی اصل*
استادیار،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه پیام نور، تهران

اسماعیل صیدی
استادیار،
مهندسی مکانیزاسیون
دانشگاه پیام نور، تهران

مجتبی مروج
استادیار،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه پیام نور، تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

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

Esmail Seidy
Assistant Professor,
Department of t of
Mechanization
Engineering, University of
Peyame Noor, Tehran

Mojtaba Moravej
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, University of
Peyame Noor, Tehran

Using of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) for prediction the mechanical properties of CK45 hardness in hot rolling process

Abstract: Rolling is one of the most important manufacturing processes which can simultaneously effect on the mechanical properties of the steels. This is because of rolling effect on the grain size of the steel which in turn can change the mechanical properties. The aim of this research is to predict the ultimate strength of CK45 steel based on the rolling parameters which can decrease the operation costs and processing time of the rolling process. For conducting the research, the hot rolling operation and quenching in two different environments was carried out on CK45 steel. The samples were rolled under the same reduction percentage and in three temperatures and three rotational speeds of work-rolls. They were then quickly cooled down in room atmosphere and cold water and the ultimate strengths were measured by tensile testing machine. A prediction model was then designed using of an adaptive neuro fuzzy system based on the input parameters including rolling temperature and rotational speeds of the rollers in MATLAB program. The temperature and the rotational speeds were considered as the inputs and the measured ultimate strengths in two air and water environments were considered as the output of the ANFIS model. Comparing the measured and predicted results showed that the ANFIS model can predict the results with high accuracy.

Keywords: Hot rolling, ANFIS, Rolling parameters, CK45

۱- مقدمه

نیکان و همکارانش در پژوهش خود تأثیر پارامترهای مختلف نورد گرم را بر روی فولادهای دوفازی با و بدون عنصر نیوبیوم بررسی کرده‌اند. بر اساس این تحقیق دمای نورد و نرخ کرنش تأثیر محسوسی بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار دارند [۶]. ماندانا و همکارانش [۷] 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 [۸] 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.

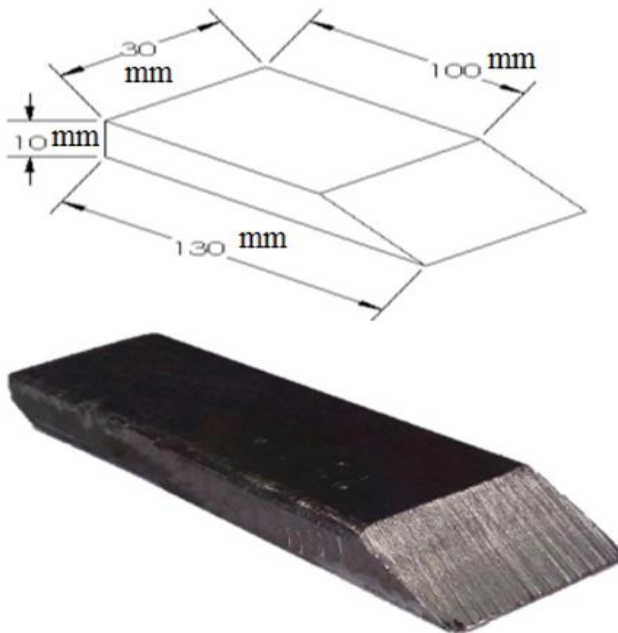
با توجه به زمان بر بودن و هزینه بر بودن فرایند نورد استفاده از ابزاری برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای نورد بر روی خواص مکانیکی در تعداد زیاد پارامترها از اهمیت خاصی برخوردار است. عبدالشکور محمد جایا همکاران در تحقیق خود روشی تازه برای پیش‌بینی سختی پوشش TiAlN با استفاده از سیستم نور-فازی تطبیقی انجام دادند [۹]. خلجی و همکاران از روش ANFIS برای پیش‌بینی سختی ۵ نمونه از فولاد استفاده کردند [۱۰]. Ly و همکاران از روش ANFIS برای پیش‌بینی استحکام کششی بتن استفاده کردند [۱۱]. زارع و همکاران از روش شبکه‌های عصبی و ANFIS برای پیش‌بینی استحکام تسلیم و استحکام نهایی پیش‌آلیاژ مولیبدن فشرده استفاده کردند [۱۲]. یدالهی و همکاران در تحقیقی دیگر روش ANFIS را برای پیش‌بینی استحکام فشاری یک کامپوزیت پلیمری به کار گرفته‌اند [۱۳]. کیان و همکاران در پژوهش خود از روش یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خواص مکانیکی چند فولاد پس از عملیات نورد استفاده کردند [۱۴]. نتایج نشان داد که درصد خطای پیش‌بینی بین ۲/۳۶ تا ۱۶/۲ درصد می‌باشد. مهدی سلیمانی و همکاران [۱۵] از روش شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی سختی قطعات تولیدی از جنس فولاد St37 در عملیات نورد پیچ استفاده کردند. نتایج پیش‌بینی قابل قبول اعلام شده است. هاوو و همکاران در پژوهش خود خواص مکانیکی یک فولاد با ترکیب شیمیایی مشخص را بعد از عملیات نورد پیش‌بینی کرده‌اند. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی استفاده شده است و ورودی مدل هم شامل پارامترهای فرآیند و هم شامل ترکیب شیمیایی فولاد می‌باشد [۱۶].

یکی از مهمترین روش‌های تولید مواد فولادی فرآیند نورد می‌باشد 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، به طوری که در کشورهای صنعتی ۴۰ تا ۶۰ درصد محصولات حاصل از فرآیندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد می‌شود [۱، ۲].

فرآیند نورد ممکن است به صورت گرم یا سرد انجام پذیرد که برگزیدن روش به نوع، اندازه، ویژگی‌های ماده و شکل پایانی و انتظارات تولیدکنندگان 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 برنامه کنترل جداگانه‌ای می‌بایست در نظر گرفته شود. از این رو 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 عبارت‌اند از: دمای تغییر شکل، میزان کرنش اعمالی و نرخ کرنش را به خوبی 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 استحکام‌بخشی هم به حساب می‌آید که این استحکام‌بخشی 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 گرفته است [۴] که هر دو در مقایسه با روش نورد جزو روش‌های گران‌قیمت و زمان‌بر محسوب می‌شوند. لذا انتخاب نورد گرم برای کنترل پارامترهای ذکر شده می‌تواند عملیاتی کم‌هزینه‌تر و با سرعت بیشتری ارائه دهد [۴]. تحقیقات زیادی در سراسر جهان در مورد تأثیر پارامترهای نورد بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار فولادها انجام شده است.

کوره به کار برده شده در این پژوهش یک کوره مقاومتی شرکت آذر فرنیس^۱ با مدل F11L و با دمای اسمی 1250°C می باشد (شکل (۲)).



شکل ۱ نمونه آماده شده برای عملیات



شکل ۲ کوره مورد استفاده برای آستینیته 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) آورده شده است. قطر هر غلتک ۳۴ سانتی متر بوده و سرعت حرکت دستگاه در سرعت های مختلف بین ۱۰ تا ۲۰ دور بر دقیقه قابل تنظیم است.

هدف از تحقیق حاضر پیش بینی استحکام نهایی فولاد CK45 بر اساس پارامترهای عملیات نورد می باشد. از آنجاییکه عملیات نورد جز فرآیندهای گران و زمان بر می باشد، پیش بینی نتایج حاصل از فرآیند قبل از انجام عملیات می تواند سبب کاهش هزینه و هدررفت زمان و افزایش بهره وری در کارگاه های نورد گردد. برای این منظور نورد گرم و سپس کوئنچ در دو محیط مختلف بر روی CK45 انجام شد. نمونه ها در دماهای مختلف نورد و در سرعت های غلطک 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. پس از عملیات کوئنچ، نمودار تنش-کرنش و استحکام نهایی آن ها با استفاده از یک دستگاه کشش بررسی شد. در مرحله بعد با استفاده از روش سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مدلی برای پیش بینی استحکام نهایی فولادها بر اساس دو پارامتر دمای نورد و سرعت غلطک ها با استفاده از نرم افزار MATLAB ایجاد شد. سرعت غلطک و دمای نورد به عنوان ورودی و استحکام نهایی به عنوان خروجی به سیستم داده شد و پس از آموزش مدل نتایج بررسی گردید. مقایسه نتایج پیش بینی شده و اندازه گیری شده نشان داد که روش ANFIS می تواند نتایج را با دقت بالایی پیش بینی کند.

۲- مواد و روش ها

در این تحقیق جهت انجام عملیات تغییر شکل گرم، فولاد ساده کربنی CK45 به عنوان ماده اصلی همراه با پودر آلومینای ۰/۳ و ۰/۰۵ میکرون، نمد و محلول نایتال ۰/۲٪ مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیب شیمیایی فولاد CK45 مورد استفاده در پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد CK45

Element	Fe	S	P	Si	Mn	C
% wt	بالانس	۰/۰۳۵	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۶۵	۰/۴۵

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

^۱ Azar Furnac

طبق استاندارد ASTM E8-M04 در جهت موازی با نورد (به صورت عرضی) تهیه شدند [۱۷، ۱۸]. طرحواره نمونه‌های کشش آماده شده و ابعاد دقیق آن‌ها به ترتیب در شکل (۵) و جدول (۲) ارائه شده است.

آزمون کشش در دمای محیط و با نرخ کرنش $۲/۷ \times ۱۰^{-۴}$ بر ثانیه و توسط دستگاه کشش SANTAM انجام شد. نرم‌افزار این دستگاه، مقادیر استحکام کششی و تسلیم، ازدیاد طول به همراه منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها را ارائه می‌دهد. داده‌های حاصل توسط نرم‌افزار تحلیلی اوریجین^۱ مورد تحلیل قرار گرفته و نمودارهای تنش-کرنش، بیشترین استحکام نمونه‌ها بدست می‌آید.



شکل ۳ دستگاه نورد مورد استفاده برای عملیات

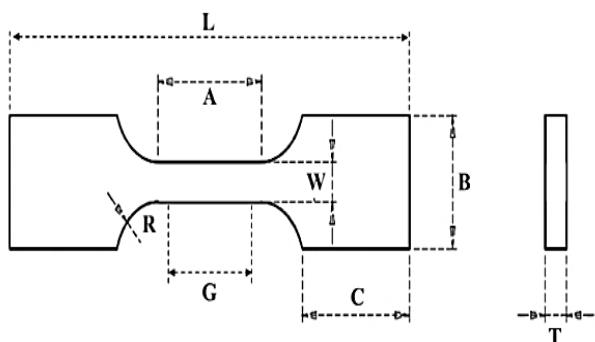
۲-۱- روش انجام آزمایش

پس از آماده کردن نمونه‌ها و برش پلاسمایی و سیمی آن‌ها، زوائد مربوط به برش پلاسمایی توسط سنگ‌زنی برقی زدوده شد تا نمونه به شکل منظم و به سطح مناسب برسد. سپس نمونه‌ها جهت عملیات آستنیته کردن به مدت ۱ ساعت درون کوره با دماهای مختلف قرار داده شدند. قبل از قرار دادن نمونه در کوره، ابتدا کوره با نرخ گرمایش آرام تا دمای ۶۵۰ درجه بالا برده شده و به مدت ۱ ساعت در این دما نگه‌داشته می‌شود. با رسیدن دمای کوره به ۶۵۰ درجه، نمونه به آرامی درون کوره قرار داده می‌شود. افزایش دمای کوره تا رسیدن به دمای مذکور با همان نرخ گرمایش انجام شده و با رسیدن به دمای موردنظر جهت توزیع یکنواخت دما در قطعه، کوره ۱ ساعت در این دما نگه‌داشته می‌شود، سپس نمونه جهت انجام فرآیند نورد از آن خارج شده و جهت جلوگیری از کاهش دمای نمونه، به سرعت تحت عملیات نورد قرار می‌گیرد. در مرحله نورد، نمونه توسط میله‌ی فولادی به آرامی به داخل غلتک هل داده می‌شود تا فرآیند نورد تنها یک پاس بر روی نمونه انجام گیرد. دستگاه نورد در این حالت با سرعت‌های مختلف و با فاصله $۳/۸$ میلی-متری بین غلتک‌ها در حال چرخش است. در نتیجه با ورود نمونه به فاصله میان غلتک‌ها، عملیات نورد گرم در دماهای و سرعت‌های مختلف و با ۶۲% تغییر شکل پلاستیک انجام گرفته و نمونه از طرف دیگر خارج می‌شود. پس از خروج نمونه از دستگاه نورد، اجازه داده می‌شود تا نمونه در دو محیط هوا و آب یخ سرد شده و به دمای محیط برسد. در شکل (۴) نمونه در حال نورد نشان داده شده است.

برای تعیین خواص کششی نمونه‌ها از آزمون کشش استفاده گردید؛ به این ترتیب که ابتدا نمونه‌ها توسط وایرکات و



شکل ۴ نمونه در حال نورد



شکل ۵ نمونه کشش استاندارد

جدول ۲ ابعاد نمونه کشش طبق استاندارد ASTM E8-M04 (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

L	A	G	W	T	C	B
۱۰۰	۳۲	۲۵	۶	۲/۵	۳۰	۱۰

^۱ Origin

۳- سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی

لایه اول (گره‌های ورودی^۲): هر گره از این لایه، مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تولید می‌کند.

$$O_j = \mu_{A_j}(x); \quad j = 1 \text{ و } 2 \dots$$

$$O_i = \mu_{B_i}(y); \quad i = 1 \text{ و } 2 \dots$$

که X و Y ورودی‌های غیرفازی به گره و A_i و B_i (کوچک، بزرگ و ...)، برچسب‌های زبانی هستند که به ترتیب با توابع عضویت مناسب μ_{A_i} و μ_{B_i} مشخص می‌شوند. O_j و O_i توابع خروجی را نشان می‌دهند.

لایه دوم (گره‌های قاعده^۳): در لایه دوم، عملگر "و" (AND) به کار برده می‌شود تا خروجی (قوه اشتعال^۴) که نمایانگر بخش مقدم آن قانون است، بدست می‌آید. قوه اشتعال به مقدار درجه‌ای که بخش مقدم یک قانون فازی برآورده شده، گفته می‌شود و به تابع خروجی آن قانون شکل می‌دهد. از این رو، خروجی‌های O_{2,i} این لایه، حاصل ضرب درجات مربوط به لایه اول هستند.

$$O_{2,ji} = w_i = \mu_{A_j}(x) \cdot \mu_{B_i}(y); \quad i = 1 \text{ و } 2 \dots$$

لایه سوم (گره‌های متوسط^۵): هدف اصلی در لایه سوم، تعیین نسبت هر قوه اشتعال^۴ آمین قانون به مجموع همه قوه اشتعال قوانین می‌باشد. در نتیجه \bar{w}_i به‌عنوان قوه اشتعال نرمال شده به دست می‌آید:

$$O_{3,ji} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}; \quad i = 1 \text{ و } 2 \dots$$

لایه چهارم (گره‌های نتیجه^۶): تابع گره چهارمین لایه توزیع آمین قانون را به کل خروجی محاسبه می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$O_{4,ji} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + z_i)$$

که \bar{w}_i خروجی آمین گره از لایه قبلی است. $\{p_i, q_i, r_i\}$ ضرایب این ترکیب خطی بوده، همچنین مجموعه پارامترهای بخش تالی مدل فازی تاکاگی-شوگنو نیز می‌باشند.

لایه پنجم (گره‌های خروجی^۷): این تک گره، خروجی کلی را با جمع کردن همه سیگنال‌های ورودی محاسبه می‌کند.

ANFIS قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی دارد و همچنین دارای این مزیت است که اجازه استخراج قوانین فازی را از اطلاعات عددی یا دانش متخصص می‌دهد و به‌طور تطبیقی یک قاعده-بنیاد می‌سازد. علاوه بر این، می‌تواند تبدیل پیچیده هوش بشری به سیستم‌های فازی را تنظیم کند. مشکل اصلی مدل پیش‌بینی ANFIS، احتیاج نسبتاً زیاد به زمان برای آموزش ساختار و تعیین پارامترها می‌باشد.

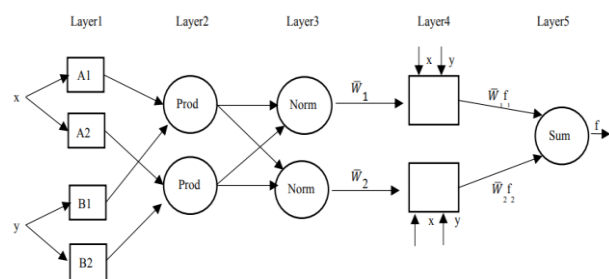
سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی توسط جانگ در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۹]. ANFIS یک نوع سیستم هوش مصنوعی بر پایه تاکاگی-شوگنو^۱ می‌باشد که برای حل سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌شود [۱۹]. در این سیستم یک مدل هیبرید بر اساس منطق فازی و شبکه‌های عصبی ایجاد می‌شود. بنابراین ANFIS، توانایی استنتاج و آموزش خود را دارد. قواعد فازی در ANFIS به‌صورت زیر شرح داده می‌شود. به منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که سیستم استنتاجی مورد نظر دو ورودی X و Y و یک خروجی Z دارد. برای یک مدل فازی تاکاگی-شوگنو درجه اول، می‌توان یک مجموعه قانون نمونه را با دو قانون اگر-آنگاه فازی به صورت زیر بیان کرد: قانون اول: اگر X برابر A₁ و Y برابر B₁ باشد.

$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$$

قانون دوم: اگر X برابر A₂ و Y برابر B₂ باشد.

$$f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$$

که P_i، q_i و r_i (i=1,2) پارامترهای خطی در بخش تالی مدل فازی تاکاگی-شوگنو درجه اول هستند. ساختار ANFIS شامل پنج لایه می‌شود [۲۲-۱۵]. شکل (۶) مدل عمومی برای دو ورودی را نشان می‌دهد.



شکل ۶ معماری مدل ANFIS

⁴ Firing strength

⁵ Consequent nodes

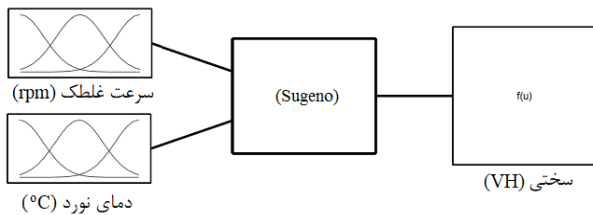
⁶ Average nodes

⁷ Output nodes

¹ Takagi-Sugeno

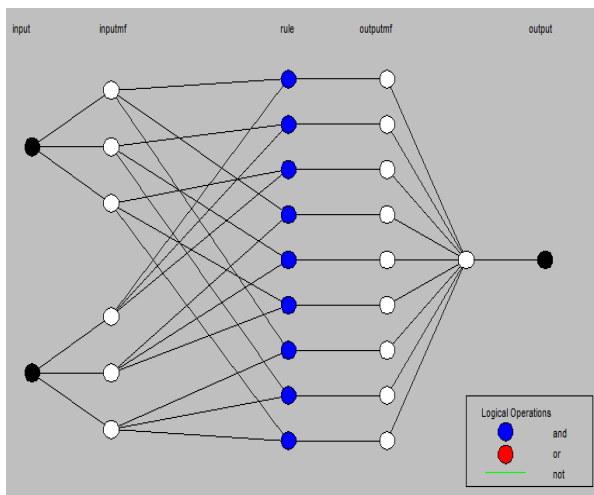
² Input nodes

³ Rule nodes



شکل ۴ ورودی و خروجی مدل ANFIS

برای فازی سازی پارامترها، سه مجموعه فازی بر اساس سه سطح از هر کدام از ورودی‌ها استفاده شد. از آنجاییکه تعداد آزمایش‌ها ۹ آزمایش می‌باشد؛ لذا در مجموع ۹ مجموعه فازی برای طراحی مدل تعریف گردید. بنابر این ۹ ق فازی پیش-بینی استحکام نهایی ایجاد شد. بعد از ایجاد مدل، آموزش عصبی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد. شکل (۵) ساختار مدل ANFIS را نشان می‌دهد.



شکل ۵ ساختار مدل ANFIS

همانطور که قبلاً هم ذکر شد، بعد از عملیات نورد، قطعه کار در دو محیط جداگانه شامل هوا و آب یخ سرد شد و سپس استحکام نهایی توسط دستگاه کشش محاسبه گردید. بنابراین برای هر محیط یک مدل ANFIS به صورت جداگانه ایجاد گردید. پس از ایجاد مدل، نتایج حاصل از مدل با نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها مقایسه گردید. جدول (۳) آزمایش‌ها و نتایج حاصل از آزمایش و تخمینی را نشان می‌دهد.

نتایج مدل به صورت سه بعدی هم بر اساس ورودی‌ها ایجاد شد. شکل (۶) نمودار سه بعدی رابطه بین دمای نورد، سرعت غلطک و استحکام نهایی را در محیط هوا نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود رابطه بین دمای نورد، سرعت غلطک و استحکام نهایی کاملاً غیرخطی می‌باشد و ارتباط همواره مستقیمی بین آنها دیده نمی‌شود.

بنابراین، در این لایه فرایند غیرفازی سازی، نتایج هر قانون فازی را به خروجی غیرفازی تغییر شکل می‌دهد.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

این شبکه بر اساس یادگیری با نظارت، آموزش داده می‌شود. تعداد مجموعه‌های فازی از طریق تعداد گره‌ها در لایه اول تعیین می‌گردد. از طرف دیگر، تعداد ابعاد لایه چهارم، تعداد قواعد مورد استفاده را نشان می‌دهد که با پیچیدگی و انعطاف-پذیری مدل ارتباط مستقیم دارد.

ویژگی متمایزکننده ANFIS، فراهم کردن الگوریتم یادگیری پیوندی، روش شیب گرادیان و روش حداقل مربعات، به منظور اصلاح پارامترها می‌باشد. روش شیب گرادیان-ن به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای غیرخطی مقدماتی (A_i, B_i) را تنظیم کند؛ در حالیکه روش حداقل مربعات به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای خطی بخش تالی را تعیین کند. روند آموزش دو مرحله دارد: در مرحله اول، در حالیکه پارامترهای بخش مقدم (توابع عضویت) ثابت فرض می‌شوند، با استفاده از روش حداقل مربعات پارامترهای بخش تالی تعیین می‌شوند. سپس سیگنال‌های خطا پس انتشار می‌یابند. روش شیب گرادیان استفاده می‌شود تا پارامترهای مقدماتی از طریق حداقل کردن تابع هزینه درجه دوم کلی، اصلاح شود.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- ایجاد مدل استنتاجی فازی عصبی تطبیقی

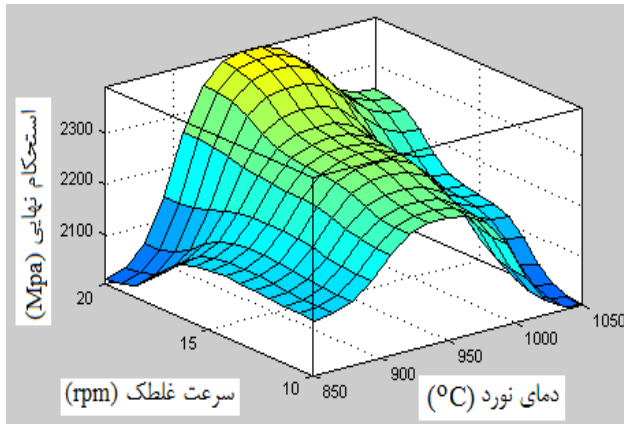
یک مدل استنتاجی فازی عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی استحکام نهایی بر اساس سرعت‌های مختلف غلطک و دمای نورد از طریق نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد. برای فازی سازی ورودی‌ها از تابع عضویت گوسی استفاده شده است؛ چون این تابع نسبت به دیگر توابع نتیجه دقیق‌تری داد. تابع عضویت گوسی با یک مقدار مرکزی m و انحراف استاندارد $k > 0$ به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2k^2}}$$

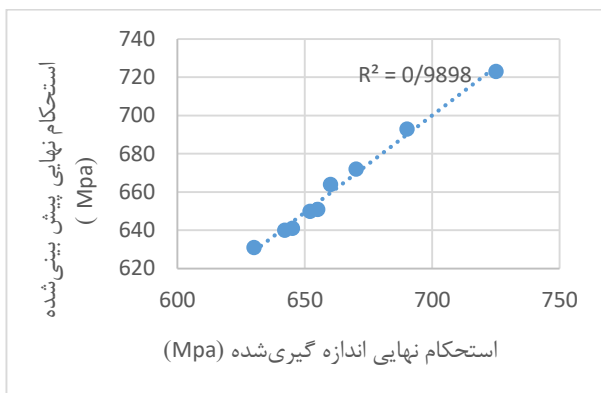
بعد از انتخاب تابع عضویت، مدل ANFIS بر اساس نتایج آزمایش‌ها و مجموعه‌های فازی ایجاد شد. در ساختار مدل، سرعت غلطک (V) و دمای نورد (T) به عنوان ورودی و استحکام نهایی (US) به عنوان خروجی مدل تعریف شدند. شکل (۴) ورودی و خروجی مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۳ طراحی آزمایش و نتایج بدست آمده از مدل

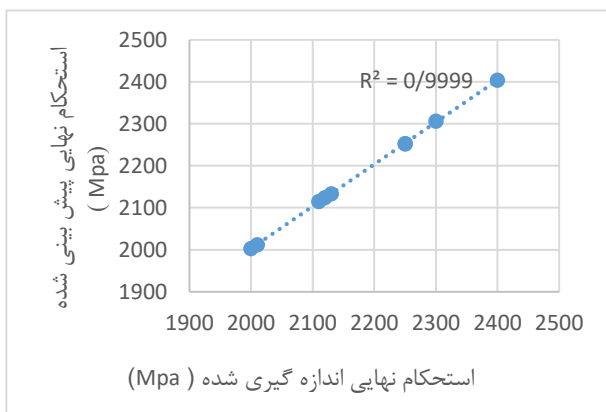
ردیف	سرعت غلطک (rpm)	دمای نورد (T)	سختی اندازه گیری شده هوا - (VH)	سختی تخمین شده - هوا (VH)	سختی اندازه گیری شده آب - (VH)	سختی تخمین شده - آب (VH)
۱	۱۰	۸۵۰	۶۵۲	۶۵۰	۲۱۱۰	۲۱۱۵
۲	۱۰	۹۵۰	۶۴۵	۶۴۱	۲۲۵۰	۲۲۵۲
۳	۱۰	۱۰۵۰	۶۴۲	۶۴۰	۲۰۰۰	۲۰۰۳
۴	۱۵	۸۵۰	۶۶۰	۶۶۴	۲۱۲۰	۲۱۲۴
۵	۱۵	۹۵۰	۶۵۵	۶۵۱	۲۳۰۰	۲۳۰۶
۶	۱۵	۱۰۵۰	۶۷۰	۶۷۲	۲۱۳۰	۲۱۳۳
۷	۲۰	۸۵۰	۶۳۰	۶۳۱	۲۰۱۰	۲۰۱۲
۸	۲۰	۹۵۰	۶۹۰	۶۹۳	۲۴۰۰	۲۴۰۴
۹	۲۰	۱۰۵۰	۷۲۵	۶۲۳	۲۲۵۰	۲۲۵۳



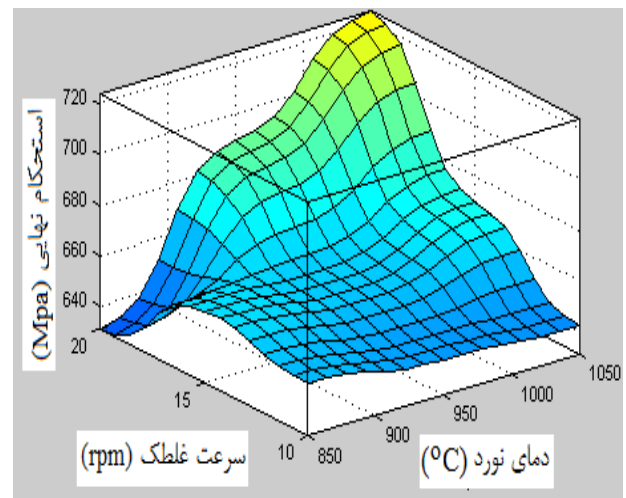
شکل ۷ تأثیر پارامترهای سرعت غلطک و دمای نورد بر روی استحکام نهایی فولاد پس از سرد کردن در آب یخ



شکل ۸ مقایسه نتایج حاصل از مدل استحکام نهایی با نتایج اندازه گیری شده پس از سرد کردن در آب



شکل ۹ مقایسه نتایج حاصل از مدل استحکام نهایی با نتایج اندازه گیری شده پس از سرد کردن در آب



شکل ۶ تأثیر پارامترهای سرعت غلطک و دمای نورد بر روی استحکام نهایی فولاد پس از سرد کردن در هوا

مقایسه نتایج اندازه گیری شده استحکام نهایی از طریق دستگاه کشش با مقدار تخمینی مدل ANFIS در شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب برای کوئچ در محیط هوا و آب داده شده است. همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل بسیار نزدیک به میزان اندازه‌گیری شده است و در محیط هوا این میزان برابر ۰/۹۸ و در محیط آب یخ برابر

شکل (۷) نمودار سه بعدی روابط بین ورودی و خروجی‌ها را در محیط آب یخ نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در اینجا هم رابطه بین سرعت غلطک، دمای نورد و استحکام نهایی کاملاً غیر خطی می‌باشد؛ بدین معنی که نسبت این پارامترها در فواصلی کاهش و در فواصلی افزایش را نشان می‌دهد. از طرف دیگر در این نمودار استحکام نهایی فولاد به خاطر کوئچ در آب نسبت به هوا به صورت محسوس بالا رفته است.

- [2] S.-F. Wang, Y. Peng, and Z.-J. Li, "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, 2013.
- [3] X. Zhang, H. Wang, R. O. Scattergood, J. Narayan, and C. C. Koch, "Modulated oscillatory hardening and dynamic recrystallization in cryomilled nanocrystalline Zn", *Acta Materialia*, vol. 50, no. 16, pp. 3995-4004, 2002, [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00199-4).
- [4] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino, and Y. Koizumi, "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, 2004, doi: 10.1016/j.stam.2003.10.017.
- [5] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino, and Y. Koizumi, "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, 2004, doi: 10.1016/j.stam.2003.10.017.
- [6] H. Niakan, and A. Najafizadeh, "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.\(2010\)](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.078.(2010)).
- [7] M. Zebarjadi Sar, S. Barella, A. Gruttadauria, D. Mombelli, and C. Mapelli, "Impact of Warm Rolling Process Parameters on Crystallographic Textures, Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon Boron-Bearing Steels," *Metals*, vol. 8, no. 11, art. 927, 2018, [Online], Available: [http://www.mdpi.com/2075-4701/8/11/927.\(2018\)](http://www.mdpi.com/2075-4701/8/11/927.(2018)).
- [8] P. U. Nwachukwu and O. O. Oluwole, "Effects of rolling process parameters on the mechanical properties of hot-rolled St60Mn steel," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 6, pp. 134-146, 2017, doi: [https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006.\(2017\)](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006.(2017)).
- [9] A. S. Mohamad Jaya, A. S. H. Basari, S. Z. M. Hashim, H. Haron, R. Muhamad, and M. N. A. Rahman, "Application of ANFIS in Predicting of TiAlN Coatings Hardness," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 9, pp. 1647-1657, 2011.
- [10] G. Khalaj, A. Nazari, and A. K. Livary, "Application of ANFIS for modeling of microhardness of high strength low alloy (HSLA) steels in continuous cooling," *Materials Research*,

۰/۹۹ بدست آمده که دقت مدل را برای تخمین نتایج تایید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر عملیات نورد گرم بر روی خواص مکانیکی یکی از پرکاربردترین فولادها یعنی فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفته و استحکام نهایی فولاد نورد شده توسط مدل ANFIS پیش‌بینی شده است. تحقیقاتی در این باب برای فولادهای دیگر انجام شده است و در این تحقیق هم برای فولاد CK45 انجام گردید. همچنین در این تحقیق روش ANFIS برای پیش‌بینی خواص مکانیکی استفاده گردیده است که بر اساس بررسی نویسندگان مقاله، هیچ پژوهشی قبلاً با این روش گزارش نشده است. با توجه به اینکه حجم آزمایش‌ها به خاطر هزینه بالا در عملیات نورد معمولاً پایین هست؛ لذا در مقایسه با پژوهش‌هایی که قبلاً برای موارد مشابه به روش‌های دیگر انجام شده است، روش فوق بخاطر استفاده از مزایای هر دو مدل فازی و عصبی نتایج را با دقت بالایی پیش‌بینی کرده است. برای بررسی تأثیر پارامترها، عملیات نورد گرم بر روی این فولاد بر اساس پارامترهای دمای نورد و سرعت غلطک‌ها انجام گرفت. نمونه‌ها در دماهای مختلف نورد و در سرعت‌های غلطک متفاوت، تحت کرنش‌های یکسان قرار گرفته و سپس در دو محیط مختلف آب یخ و هوا تا دمای هوای اتاق به سرعت سرد شدند. پس از عملیات کوپنچ، استحکام نهایی نمونه‌ها برای هر کدام از محیط‌ها به صورت جداگانه با استفاده از دستگاه کشش اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد با استفاده از روش سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مدلی برای پیش‌بینی استحکام نهایی فولادها بر اساس دو پارامتر دمای نورد و سرعت غلطک‌ها و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد. سرعت غلطک و دمای نورد به عنوان ورودی و استحکام نهایی به عنوان خروجی به سیستم داده شد و پس از آموزش مدل نتایج بررسی گردید. نتایج بدست آمده از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد و R^2 مربوط به هر دو محیط بدست آمد. نتایج نشان داد که مدل ANFIS می‌تواند با دقت بالا و قابل قبولی نتایج استحکام نهایی را تخمین بزند.

۶- مراجع

- [1] S. Ray, "Introduction to Rolling Process," in *Principles and Applications of Metal Rolling*, Cambridge University Press, pp. 1–29, 2016, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139879293.002>.

vol. 16, no. 4, pp. 721-730, 2013, doi: 10.1590/S1516-14392013005000052.

- [11] H.-B. Ly, B. T. Pham, D. V. Dao, and V. M. Le, "Improvement of ANFIS Model for Prediction of Compressive Strength of Manufactured Sand Concrete," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, art. 3841, 2019, doi: 10.3390/app9183841.
- [12] M. Zare and J. Vahdati Khaki, "Prediction of mechanical properties of a warm compacted molybdenum prealloy using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy models," *Materials & Design*, vol. 38, pp. 26–31, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.01.042.
- [13] M. M. Yadollahi, A. Benli, and R. Demirboga, "Application of adaptive neuro-fuzzy technique and regression models to predict the compressive strength of geopolymer composites," *Neural Computing and Applications*, vol. 28, no. 6, pp. 1453–1461, 2016, doi: 10.1007/s00521-015-2159-6.
- [14] Q. Xie, M. Suvarna, J. Li, X. Zhu, J. Cai, and X. Wang, "Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning," *Materials & Design*, vol. 197, art. 109201, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109201.
- [15] M. Soleymani, M. Khoshnevisan, and B. Davoodi, "Prediction of micro-hardness in thread rolling of St37 by convolutional neural networks and transfer learning," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 123, no. 9–10, pp. 3261–3274, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10355-4.
- [16] Xu, H., Xu, Z., and Zhang, K., "Mechanical Properties Prediction for Hot Roll Steel Using Convolutional Neural Network," in *Bio-inspired Computing: Theories and Applications*, Singapore, L. Pan, J. Liang, and B. Qu, Eds., 2020// 2020: Springer Singapore, pp. 565-575.
- [17] Japanese Standards Association, "Method of tensile test for metallic materials," 2004.
- [18] G. Di Bella, F. Favaloro, and C. Borsellino, "Effect of Process Parameters on Friction Stir Welded Joints between Dissimilar Aluminum Alloys: A Review," *Metals*, vol. 13, no. 7, art. 1176, 2023, doi: 10.3390/met13071176.
- [19] K. Mohammadi, S. Shamshirband, D. Petković, P. L. Yee, and Z. Mansor, "Using ANFIS for selection of more relevant parameters to predict dew point temperature", *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 311-319, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.081>.(2016).