

Optimization of Effective Parameters on Hydrogen-Producing Bioreactor Performance Using Genetic Algorithm

Mohammad Ali Moshtaghi¹, Ali Farzi^{2*}

¹ Ph.D. Student of Chemical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Associate Professor of Chemical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Corresponding author: a-farzi@tabrizu.ac.ir

Abstract

Biological hydrogen production in stirred-tank bioreactors depends strongly on mixing conditions and impeller energy consumption. In this study, a data-driven framework was developed to optimize the impeller-speed schedule using hourly hydrogen-production data and the process energy balance. The decision variables included the impeller speed in the first stage, the impeller speed in the second stage, and the switching time. The problem was solved in a single-objective mode, aiming to maximize net energy, and in a multi-objective mode, aiming to increase hydrogen production while reducing mixing-energy consumption, using a genetic algorithm and NSGA-II, respectively. The single-objective results showed that operating the impeller at 100 rpm during the first 10 h and reducing the speed to 10 rpm during the remaining 14 h produced the maximum net energy of 26.0737 KJ/L_{POME}. This solution was reproduced in 30 independent runs and matched the result obtained from the exhaustive evaluation of all 368 feasible schedules. In the multi-objective case, a Pareto front containing 22 non-dominated solutions was obtained. The knee-point solution consisted of operating at 100 rpm during the first 7 h and at 10 rpm during the remainder of the process, providing a suitable balance between hydrogen production and energy consumption. The results demonstrated that stagewise control of impeller speed can maintain favorable hydrogen production while reducing mixing-energy consumption.

Keywords: Biohydrogen, Stirred-tank bioreactor, Impeller-speed control, Genetic algorithm, multi-objective optimization, Pareto front

بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر عملکرد بیوراکتور تولید هیدروژن با الگوریتم ژنتیک

محمدعلی مشتاقی^۱، علی فرضی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*عهده‌دار مکاتبات: a-farzi@tabrizu.ac.ir

چکیده

تولید زیستی هیدروژن در بیوراکتورهای همزن‌دار به شرایط اختلاط و انرژی مصرفی همزن وابسته است. در این پژوهش، یک چارچوب داده‌محور برای بهینه‌سازی برنامه زمانی سرعت همزن با استفاده از داده‌های ساعتی تولید هیدروژن و تراز انرژی فرایند ارائه شد. متغیرهای تصمیم شامل سرعت همزن در مرحله اول، سرعت همزن در مرحله دوم و زمان تغییر سرعت بودند. مسئله در حالت تک‌هدفه با هدف بیشینه‌سازی انرژی خالص و در حالت چندهدفه با هدف افزایش تولید هیدروژن و کاهش انرژی مصرفی اختلاط، به ترتیب با الگوریتم ژنتیک و NSGA-II حل شد. نتایج تک‌هدفه نشان داد که کارکرد همزن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ۱۰ ساعت نخست و کاهش آن به ۱۰ دور بر دقیقه در ۱۴ ساعت باقی‌مانده، بیشترین انرژی خالص برابر با 26.0737 KJ/Lpome را ایجاد می‌کند. این پاسخ در ۳۰ اجرای مستقل تکرار شد و با نتیجه جست‌وجوی کامل تمام ۳۶۸ برنامه ممکن مطابقت داشت. در حالت چندهدفه، جبهه پارتو شامل ۲۲ پاسخ نامغلوب به دست آمد. پاسخ زانویی شامل سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ۷ ساعت نخست و سرعت ۱۰ دور بر دقیقه در ادامه فرایند بود که تعادل مناسبی میان تولید هیدروژن و مصرف انرژی فراهم کرد. نتایج نشان داد که کنترل مرحله‌ای سرعت همزن می‌تواند ضمن حفظ تولید مطلوب هیدروژن، مصرف انرژی اختلاط را کاهش دهد.

کلمات کلیدی: بیوهیدروژن، بیوراکتور همزن‌دار، کنترل سرعت همزن، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه، جبهه پارتو

افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، محدودیت منابع انرژی تجدیدناپذیر و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌ها، ضرورت توسعه منابع انرژی پاک و پایدار را پررنگ‌تر کرده است. در میان حامل‌های انرژی جایگزین، هیدروژن به دلیل چگالی انرژی بالا و تولید آب به عنوان محصول نهایی مصرف، یکی از گزینه‌های مهم برای سامانه‌های انرژی آینده محسوب می‌شود. تولید زیستی هیدروژن از طریق فرایندهای تخمیری نیز به دلیل امکان استفاده از مواد آلی و پسماندها به عنوان خوراک، مصرف انرژی کمتر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست، مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳].

عملکرد فرایند تولید بیوهیدروژن به مجموعه‌ای از عوامل زیستی، شیمیایی و فیزیکی وابسته است. پارامترهایی مانند نوع و غلظت سوستر، pH، دما، نوع تلقیح، شرایط بهره‌برداری و پیکربندی راکتور می‌توانند فعالیت میکروارگانیسم‌ها، مسیرهای متابولیکی و بازده تولید هیدروژن را تحت تأثیر قرار دهند [۲، ۳]. با این حال، در کنار این عوامل، رفتار هیدرودینامیکی راکتور نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد فرایند دارد. میدان سرعت، شدت آشفتگی، نرخ کرنش برشی، کسر حجمی بیوگاز و الگوی اختلاط می‌توانند بر تماس مؤثر میان سوستر و زیست‌توده، خروج گاز تولیدی و پایداری محیط واکنش اثرگذار باشند [۱، ۴].

در راکتورهای همزن‌دار، اختلاط مناسب موجب بهبود انتقال جرم، کاهش نواحی مرده و افزایش تماس میان فازهای مختلف می‌شود. با این وجود، افزایش شدت اختلاط همواره به معنی بهبود عملکرد نیست؛ زیرا سرعت‌های بالای همزن می‌توانند باعث افزایش تنش برشی، مصرف انرژی، تشکیل گردابه‌های شدید و تجمع نامطلوب بیوگاز شوند [۱]. بنابراین، انتخاب شرایط مناسب اختلاط باید به گونه‌ای انجام شود که ضمن فراهم کردن شدت اختلاط کافی، از آثار نامطلوب هیدرودینامیکی جلوگیری شود. مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی نشان داده‌اند که نوع همزن و شرایط بهره‌برداری آن می‌توانند میدان جریان، زمان اختلاط و توان مصرفی مخازن همزن‌دار را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند [۵]. در بیوراکتورهای تولید هیدروژن، این تغییرات هیدرودینامیکی می‌توانند بر توزیع بیوگاز و عملکرد فرایند اثرگذار باشند [۱، ۴].

از سوی دیگر، بررسی مستقیم همه ترکیب‌های ممکن از متغیرهای عملیاتی و هندسی با استفاده از شبیه‌سازی یا آزمایش، زمان‌بر و پرهزینه است. در چنین شرایطی، روش‌های بهینه‌سازی می‌توانند برای جست‌وجوی مؤثر فضای پاسخ و تعیین شرایط مناسب بهره‌برداری به کار گرفته شوند. الگوریتم ژنتیک به دلیل عدم نیاز مستقیم به مشتق تابع هدف، توانایی جست‌وجوی سراسری و قابلیت حل مسائل غیرخطی و چندمتغیره، در بهینه‌سازی فرایندهای مهندسی شیمی، بیوراکتورها، فرایندهای تخمیری، راکتورهای صنعتی و سامانه‌های جداسازی کاربرد گسترده‌ای داشته است [۲، ۳، ۶، ۷، ۸]. همچنین، الگوریتم‌های ژنتیک و روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی و بهینه‌سازی فرایندها و راکتورهای شیمیایی به کار گرفته شده‌اند [۹، ۱۰].

بسیاری از مسائل فرایندی ماهیت چندهدفه دارند؛ به طوری که بهبود یک شاخص عملکردی ممکن است با تضعیف شاخص دیگر همراه باشد. در چنین مواردی، استفاده از جبهه پارتو امکان تحلیل مصالحه میان اهداف مختلف را فراهم می‌کند و به جای ارائه یک پاسخ منفرد، مجموعه‌ای از پاسخ‌های نامغلوب را در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد [۱۱-۱۳]. این موضوع در بیوراكتورهای همزن‌دار تولید هیدروژن نیز اهمیت دارد؛ زیرا افزایش سرعت همزن می‌تواند با بهبود اختلاط، تولید هیدروژن را افزایش دهد، اما هم‌زمان موجب افزایش انرژی مصرفی اختلاط شود.

در این پژوهش، یک چارچوب داده‌محور برای بهینه‌سازی برنامه زمانی سرعت همزن در بیوراكتور تولید هیدروژن ارائه می‌شود. در این چارچوب، سرعت همزن در مرحله اول، سرعت همزن در مرحله دوم و زمان تغییر سرعت به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند. مدل بر اساس داده‌های ساعتی تولید هیدروژن و تراز انرژی فرایند توسعه یافته و مسئله در حالت تک‌هدفه با هدف پیشینه‌سازی انرژی خالص و در حالت چندهدفه با هدف افزایش تولید هیدروژن و کاهش انرژی مصرفی اختلاط حل می‌شود. برای حل مسائل به‌ترتیب از الگوریتم ژنتیک و NSGA-II استفاده شده و نتایج با جست‌وجوی کامل فضای پاسخ و استخراج جواب بهینه و جبهه پارتوی دقیق ارزیابی می‌شوند.

۲- مدل‌سازی و روش بهینه‌سازی

در این بخش، چارچوب مدل‌سازی و بهینه‌سازی برنامه زمانی سرعت همزن در بیوراكتور تولید هیدروژن ارائه می‌شود. مدل بر پایه داده‌های ساعتی تولید هیدروژن و تراز انرژی فرایند تعریف شده است تا اثر تغییر سرعت همزن بر تولید هیدروژن و انرژی مصرفی اختلاط به‌صورت کمی بررسی شود [۱۴]. متغیرهای تصمیم شامل سرعت همزن در مرحله اول، سرعت همزن در مرحله دوم و زمان تغییر سرعت هستند و مقادیر آن‌ها بر اساس شرایط آزمایش شده در مطالعه مرجع تعیین می‌شوند [۱۴، ۱۵]. در ادامه، ابتدا روابط محاسبه تولید هیدروژن، انرژی اختلاط و انرژی خالص معرفی شده و سپس مسئله در دو حالت تک‌هدفه و چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و NSGA-II حل می‌شود.

۲-۱- تعریف مسئله و متغیرهای تصمیم

هدف این پژوهش، تعیین یک برنامه دومرحله‌ای مناسب برای سرعت همزن در تولید بیوهیدروژن است؛ به‌گونه‌ای که ضمن تأمین اختلاط کافی و افزایش تولید هیدروژن، مصرف انرژی مکانیکی همزن نیز کاهش یابد. سامانه مورد بررسی یک بیوراكتور مخزن همزن‌دار پیوسته با حجم کاری ۵ لیتر، خوراک پساب کارخانه روغن پالم و همزن توربین راشتون است. شرایطی مانند دما، زمان ماند هیدرولیکی، نوع و قطر همزن و بارگذاری آلی در طول بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند [۱۴، ۱۵]. در برنامه دومرحله‌ای، همزن ابتدا با سرعت N_1 کار می‌کند و پس از زمان t_s ، سرعت آن به N_2 تغییر می‌یابد. بردار متغیرهای تصمیم به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$x = [N_1, N_2, t_s] \quad (1)$$

که در آن، N_1 و N_2 به ترتیب سرعت دوران همزن در مراحل اول و دوم و t_s زمان تغییر سرعت از مرحله اول به مرحله دوم است. با توجه به محدود بودن داده‌های تجربی، سرعت همزن در هر مرحله از میان مقادیر آزمایش شده ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه انتخاب می‌شود. همچنین، از آنجا که دوره عملیاتی فرایند ۲۴ ساعت است، زمان تغییر سرعت به صورت یک مقدار صحیح از ساعت ۱ تا ساعت ۲۳ در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. برنامه زمانی سرعت همزن مطابق رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$N(t; x) = \begin{cases} N_1 & 1 \leq t \leq t_s \\ N_2 & t_s < t \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

سرعت همزن مستقیماً بر شدت اختلاط، تماس زیست‌توده با سوپسترا، تولید هیدروژن و مصرف انرژی اثر دارد. سرعت‌های بالا می‌توانند تولید هیدروژن را افزایش دهند، اما ادامه اختلاط شدید پس از کاهش نرخ تولید گاز، موجب مصرف غیرضروری انرژی می‌شود. از این رو، تعیین سرعت‌های مناسب و زمان تغییر آن‌ها می‌تواند عملکرد انرژی فرایند را بهبود دهد [۱۴-۱۶].

۲-۲- مدل داده‌محور تولید هیدروژن و تراز انرژی

مدل بهینه‌سازی بر پایه داده‌های ساعتی تولید هیدروژن در سرعت‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه تعریف شده است [۱۴]. برای سازگار کردن داده‌های استخراج شده از نمودار با مقادیر تجمعی گزارش شده، نرخ تولید هیدروژن در هر سرعت مطابق رابطه ۳ نرمال‌سازی می‌شود:

$$r_{j,t} = r_{j,t}^* \left(\frac{Y_j^{\text{exp}}}{\sum_{t=1}^{24} r_{j,t}^*} \right) \quad (3)$$

که در آن، $r_{j,t}^*$ مقدار اولیه استخراج شده، $r_{j,t}$ مقدار نرمال شده و Y_j^{exp} تولید تجمعی تجربی هیدروژن در سرعت N_j است. همچنین برای یک برنامه دومرحله‌ای، تولید کل هیدروژن از رابطه ۴ و انرژی معادل هیدروژن تولید شده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$Y_{H_2}(x) = \sum_{t=1}^{t_s} r(N_1, t) + \sum_{t=t_s+1}^{24} r(N_2, t) \quad (4)$$

$$E_{H_2}(x) = C_{H_2} Y_{H_2}(x) \quad (5)$$

که در آن، CH_2 ضریب تبدیل حجم هیدروژن تولیدشده به انرژی است. برای محاسبه انرژی مصرفی اختلاط، وابستگی توان همزن به سرعت دوران مطابق رابطه ۶ با استفاده از یک تابع توانی بیان می‌شود:

$$P_{mix}(N) = aN^b \quad (۶)$$

در رابطه ۶، a و b ضرایب مدل مصرف انرژی هستند. با توجه به دومرحله‌ای بودن برنامه اختلاط، انرژی مصرفی همزن طی دوره عملیاتی ۲۴ ساعته مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$E_{mix}(x) = aN_1^b t_s + aN_2^b (24 - t_s) \quad (۷)$$

در رابطه ۷، جمله اول بیانگر انرژی مصرفی همزن در مرحله اول و جمله دوم نشان‌دهنده انرژی مصرفی در مرحله دوم است. ضرایب CH_2 ، a و b با استفاده از داده‌های تجربی تولید هیدروژن و انرژی خالص در آزمایش‌های سرعت ثابت برازش می‌شوند. در نهایت، انرژی خالص فرایند مطابق رابطه ۸، از اختلاف انرژی حاصل از هیدروژن تولیدشده و انرژی مصرفی همزن به دست می‌آید:

$$E_{net}(x) = E_{H_2}(x) - E_{mix}(x) \quad (۸)$$

رابطه ۸ تعادل میان انرژی حاصل از تولید هیدروژن و انرژی مصرفی ناشی از اختلاط را نشان می‌دهد. بنابراین، شرایط عملیاتی مطلوب حالتی است که ضمن حفظ تولید مناسب هیدروژن، مصرف انرژی همزن را نیز محدود کند.

۲-۳- تابع هدف پیشنهادی برای مسئله تک‌هدفه

در حالت تک‌هدفه، هدف تعیین برنامه‌ای است که بیشترین انرژی خالص را در دوره عملیاتی ۲۴ ساعته ایجاد کند. این هدف مطابق رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$\max_x E_{net}(x) \quad (۹)$$

از آنجا که الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در قالب کمینه‌سازی اجرا می‌شود، تابع هزینه مطابق رابطه ۱۰ برابر با منفی انرژی خالص در نظر گرفته می‌شود:

$$F(x) = -E_{net}(x) \quad (۱۰)$$

در نتیجه، مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه مطابق رابطه ۱۱ فرمول‌بندی می‌شود:

$$\min_x F(x) \quad (۱۱)$$

در این فرمول‌بندی، کاهش مقدار تابع هزینه معادل افزایش انرژی خالص فرایند است. همچنین، از آنجا که تابع هدف مستقیماً بر پایه تراز انرژی تعریف شده است، نیازی به استفاده از ضرایب وزنی دلخواه وجود ندارد.

۲-۴- تابع هدف پیشنهادی برای مسئله چندهدفه

در حالت چندهدفه، تولید هیدروژن و انرژی مصرفی همزن به صورت دو هدف مستقل در نظر گرفته می شوند. بردار توابع هدف مطابق رابطه ۱۲ تعریف می شود:

$$\min_x Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x)] \quad (12)$$

هدف اول، بیشینه کردن تولید هیدروژن است. از آنجا که الگوریتم چندهدفه در قالب کمینه سازی اجرا می شود، این هدف مطابق رابطه ۱۳ با علامت منفی تعریف می شود:

$$Z_1(x) = -Y_{H_2}(x) \quad (13)$$

هدف دوم، کمینه کردن انرژی مصرفی اختلاط است که مطابق رابطه ۱۴ تعریف می شود:

$$Z_2(x) = E_{mix}(x) \quad (14)$$

بنابراین، بردار نهایی توابع هدف مطابق رابطه ۱۵ به صورت زیر نوشته می شود:

$$Z(x) = \begin{bmatrix} -Y_{H_2}(x) \\ E_{mix}(x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

این دو هدف با یکدیگر تعارض دارند؛ زیرا افزایش سرعت همزن ممکن است موجب افزایش تولید هیدروژن شود، اما هم زمان مصرف انرژی اختلاط را نیز افزایش می دهد [۱۵، ۱۴]. در نتیجه، خروجی مسئله چندهدفه یک پاسخ منفرد نیست، بلکه مجموعه ای از پاسخ های نامغلوب در قالب جبهه پارتو است که مصالحه میان تولید بیشتر هیدروژن و مصرف کمتر انرژی را نشان می دهد [۱۳، ۱۱].

۲-۵- روش حل و تنظیمات الگوریتم ژنتیک

با توجه به گسسته بودن سرعت های همزن، صحیح بودن زمان تغییر سرعت و غیرخطی بودن روابط تولید هیدروژن و مصرف انرژی، از الگوریتم های تکاملی برای حل مسئله استفاده شد. متغیرهای تصمیم در هر دو حالت شامل سرعت همزن در مرحله اول N_1 ، سرعت همزن در مرحله دوم N_2 و زمان تغییر سرعت t_s بودند. سرعت های N_1 و N_2 از میان مقادیر ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه انتخاب شدند و t_s به صورت عدد صحیح بین ۱ تا ۲۳ ساعت در نظر گرفته شد [۱۴].

در حالت تک هدفه، ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی از میان مقادیر مجاز متغیرهای تصمیم تولید شد و مقدار تابع هزینه برای هر عضو محاسبه گردید. سپس پاسخ ها بر اساس مقدار تابع هزینه مرتب شده و والدین با استفاده از روش چرخ رولت انتخاب شدند. در ادامه، اعضای جدید با استفاده از عملگرهای تقاطع حسابی و جهش تولید شدند [۶-۸]. برای حفظ ماهیت گسسته مسئله، مقادیر متغیرهای تصمیم پس از اعمال عملگرها به نزدیک ترین

مقدار مجاز گرد شده و حدود آن‌ها کنترل شد. پس از ادغام جمعیت قبلی، فرزندان و اعضای جهش‌یافته، بهترین پاسخ‌ها برای تشکیل نسل بعد انتخاب شدند. الگوریتم تک‌هدفه در ۳۰ اجرای مستقل اجرا شد و برای بررسی دستیابی به بهینه سراسری، تمام ۳۶۸ برنامه ممکن نیز به‌صورت مستقیم ارزیابی شدند.

در حالت چندهدفه، برای هر عضو جمعیت، مقدار تولید هیدروژن و انرژی مصرفی اختلاط محاسبه شد. سپس پاسخ‌ها بر اساس مفهوم غلبه در جبهه‌های مختلف پارتو مرتب شدند و برای حفظ پراکندگی مناسب آن‌ها، فاصله ازدحامی مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. انتخاب والدین با روش مسابقه‌ای و بر اساس رتبه نامغلوب و فاصله ازدحامی انجام شد. اعضای جدید نیز با استفاده از تقاطع یکنواخت، بازترکیب زمان تغییر سرعت و جهش متغیرهای گسسته تولید شدند. خروجی این بخش مجموعه‌ای از پاسخ‌های نامغلوب بود که امکان بررسی مصالحه میان افزایش تولید هیدروژن و کاهش انرژی مصرفی همزن را فراهم می‌کرد. الگوریتم چندهدفه نیز در ۳۰ اجرای مستقل ارزیابی شد و جبهه پارتوی دقیق با بررسی تمام ۳۶۸ حالت ممکن به دست آمد.

تمام محاسبات عددی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شد و تنظیمات عددی الگوریتم‌های تک‌هدفه و چندهدفه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- تنظیمات اصلی الگوریتم‌های تک‌هدفه و چندهدفه

Table 1. Main settings of the single-objective and multi-objective algorithms

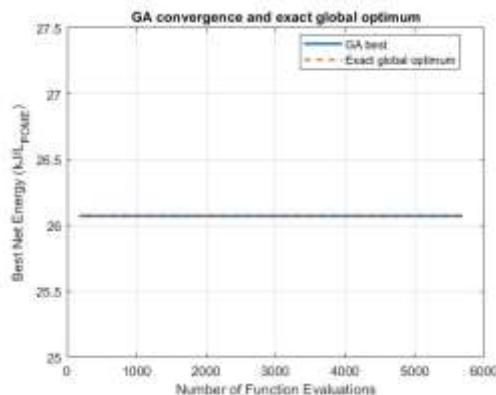
Parameter	Single-objective GA	NSGA-II
Population size	80	80
Maximum number of iterations	300	200
Number of independent runs	30	30
Crossover percentage	0.80	0.90
Mutation percentage	0.35	0.40
Mutation probability for each variable	0.40	0.40
Crossover parameter, (γ)	0.10	—
Mutation step relative to variable range	0.20	—
Selection pressure, (β)	8	—
Maximum stagnant iterations	60	45
Stopping tolerance	10^{-10}	10^{-10}

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج اجرای الگوریتم ژنتیک در حالت‌های تک‌هدفه و چندهدفه ارائه می‌شود. در حالت تک‌هدفه، برنامه زمانی سرعت همزن با هدف بیشینه‌سازی انرژی خالص تعیین می‌شود؛ درحالی‌که در حالت چندهدفه، مصالحه میان افزایش تولید هیدروژن و کاهش انرژی مصرفی اختلاط بررسی خواهد شد.

۳-۱- نتایج و تحلیل حالت تک‌هدفه

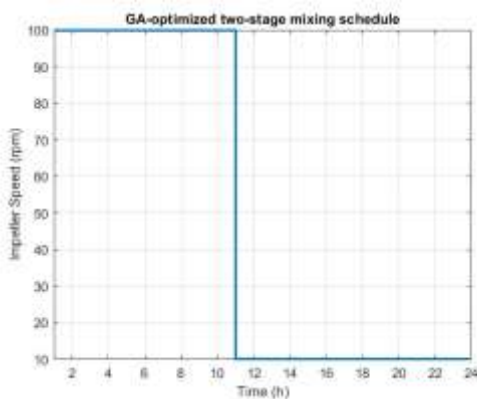
پس از اجرای الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه، مقدار انرژی خالص در تکرارهای اولیه به سرعت افزایش یافت و سپس در مقدار ثابتی همگرا شد. روند همگرایی ارائه‌شده در شکل ۱ نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته است در تعداد محدودی ارزیابی به بهترین ناحیه فضای جست‌وجو دست یابد.



شکل ۱- روند همگرایی الگوریتم ژنتیک و مقایسه با بهینه سراسری

Figure 1. GA convergence and comparison with the exact global optimum

مطابق شکل ۲، برنامه بهینه شامل کارکرد همزن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ۱۰ ساعت نخست و کاهش سرعت آن به ۱۰ دور بر دقیقه در ۱۴ ساعت باقی‌مانده است. انرژی خالص حاصل از این برنامه برابر با ۲۶.۰۷۳۷ KJ/L_{pome} به دست آمد. مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- برنامه زمانی بهینه سرعت همزن در حالت تک‌هدفه

Figure 2. Optimal impeller-speed schedule in the single-objective optimization

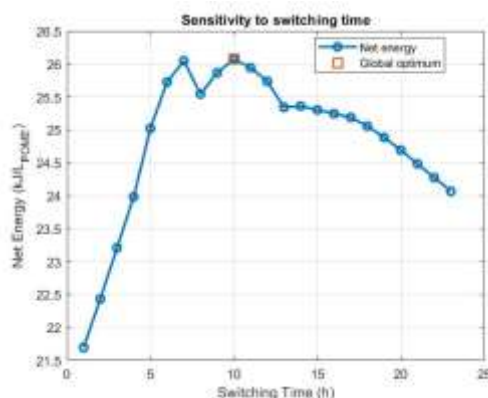
جدول ۲- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در حالت تک‌هدفه

Table 2. Optimal decision variables in the single-objective optimization

Parameter	Optimum value	Unit
First-stage impeller speed, N_1	100	rpm
Second-stage impeller speed, N_2	10	rpm
Switching time, t_s	10	h
Maximum net energy, E_{net}	26.0737	kJ/L _{POME}

استفاده از سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ساعات ابتدایی، اختلاط مناسب را در دوره‌ای فراهم می‌کند که پتانسیل تولید هیدروژن بیشتر است. پس از ساعت دهم، کاهش سرعت به ۱۰ دور بر دقیقه موجب محدود شدن مصرف انرژی اختلاط می‌شود، بدون آنکه افت قابل توجهی در تولید هیدروژن ایجاد شود.

تحلیل حساسیت ارائه شده در شکل ۳ نشان داد که انرژی خالص با افزایش زمان تغییر سرعت تا ساعت دهم افزایش یافته و در این زمان به بیشترین مقدار می‌رسد. پس از ساعت دهم، ادامه کارکرد همزن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه موجب افزایش مصرف انرژی و کاهش تدریجی انرژی خالص می‌شود.



شکل ۳- تحلیل حساسیت انرژی خالص نسبت به زمان تغییر سرعت

Figure 3. Sensitivity of net energy to switching time

به منظور ارزیابی پایداری الگوریتم، بهینه‌سازی در ۳۰ اجرای مستقل انجام شد. تمام اجراها به انرژی خالص یکسانی رسیدند و نرخ دستیابی به بهترین پاسخ برابر با ۱۰۰ درصد بود. همچنین، انحراف معیار پاسخ‌های نهایی تقریباً صفر به دست آمد که نشان‌دهنده پایداری الگوریتم و عدم وابستگی پاسخ به جمعیت اولیه است.

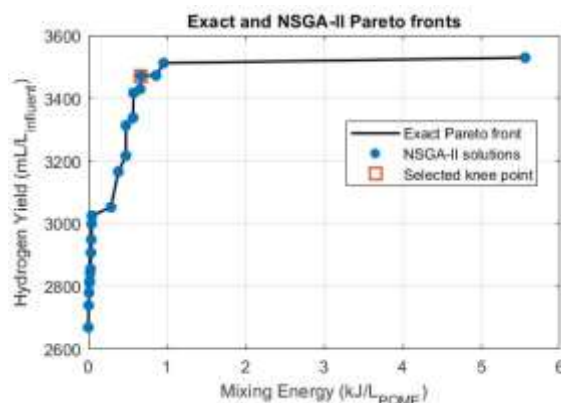
برای بررسی بهینه سراسری، تمام ۳۶۸ برنامه ممکن نیز با روش جست‌وجوی کامل ارزیابی شدند. نتیجه جست‌وجوی کامل دقیقاً با پاسخ الگوریتم ژنتیک مطابقت داشت و اختلاف میان دو روش برابر صفر بود. بنابراین، برنامه شامل سرعت‌های ۱۰ و ۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان تغییر ۱۰ ساعت، بهترین پاسخ موجود در فضای جست‌وجوی تعریف شده است.

در مقایسه مدل با راهبردهای محاسباتی A تا D، مقدار میانگین درصد خطای مطلق برابر با ۳.۱۵ درصد به دست آمد. همچنین، برای راهبرد آزمایش شده E، مقادیر انرژی خالص گزارش شده و پیش‌بینی شده به ترتیب برابر با ۲۵.۸۸ و ۲۵.۴۴۹ KJ/L_{pome} بود که معادل خطای نسبی ۱.۶۶ درصد است. این نتایج نشان می‌دهند که مدل توانسته است عملکرد انرژی برنامه‌های متغیر سرعت را با دقت مناسبی بازنمایی کند [۱۴].

۳-۲- نتایج و تحلیل حالت دو هدفه

در حالت چندهدفه، تولید هیدروژن و انرژی مصرفی اختلاط به صورت دو هدف مستقل در نظر گرفته شدند. الگوریتم NSGA-II توانست مجموعه‌ای شامل ۲۲ پاسخ نامغلوب ایجاد کند که مصالحه میان افزایش تولید

هیدروژن و کاهش مصرف انرژی همزن را نشان می‌دهد. جبهه پارتوی حاصل از الگوریتم و مقایسه آن با جبهه پارتوی دقیق در شکل ۴ ارائه شده است.

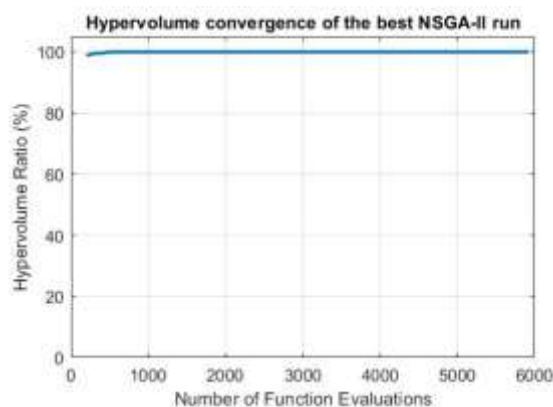


شکل ۴- مقایسه جبهه پارتوی حاصل از الگوریتم NSGA-II با جبهه پارتوی دقیق

Figure 4. Comparison of the NSGA-II Pareto front with the exact Pareto front

مطابق شکل ۴، نقاط حاصل از الگوریتم NSGA-II با جبهه پارتوی دقیق هم‌پوشانی کامل دارند. نسبت Hypervolume و میزان پوشش جبهه دقیق هر دو برابر با ۱۰۰ درصد به دست آمدند. همچنین، مقادیر شاخص‌های فاصله نسلی GD و فاصله نسلی معکوس IGD برابر صفر بودند که نشان می‌دهد میان پاسخ‌های الگوریتم و جبهه پارتوی دقیق اختلافی وجود ندارد. نسبت تنوع نیز برابر با ۱۰۰ درصد و مقدار شاخص فاصله‌گذاری برابر با ۰.۱۷۳۱ محاسبه شد.

روند همگرایی Hypervolume در شکل ۵ نشان می‌دهد که الگوریتم در تکرارهای اولیه به سرعت به جبهه پارتوی دقیق نزدیک شده و سپس مقدار Hypervolume در ۱۰۰ درصد تثبیت شده است.



شکل ۵- روند همگرایی شاخص Hypervolume در بهینه‌سازی چندهدفه

Figure 5. Hypervolume convergence trend in the multi-objective optimization

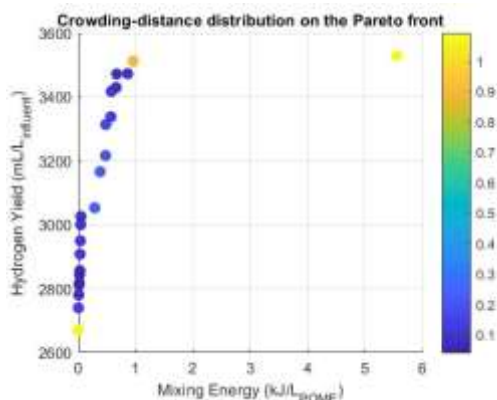
از میان پاسخ‌های نامغلوب، نقطه زانویی به‌عنوان پاسخ متعادل میان تولید هیدروژن و مصرف انرژی انتخاب شد. در این پاسخ، تولید هیدروژن برابر با $3471.3892 \text{ mL/L}_{\text{influent}}$ ، انرژی مصرفی اختلاط برابر با $0.6706 \text{ kJ/L}_{\text{POME}}$ و انرژی خالص برابر با $26.0484 \text{ kJ/L}_{\text{POME}}$ به دست آمد. مشخصات کامل پاسخ زانویی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات پاسخ زانویی در بهینه‌سازی چندهدفه

Table 3. Characteristics of the knee-point solution in the multi-objective optimization

Parameter	Value	Unit
First-stage impeller speed, N_1	100	rpm
Second-stage impeller speed, N_2	10	rpm
Switching time, t_s	7	h
Hydrogen yield, Y_{H_2}	3471.3892	$\text{mL/L}_{\text{influent}}$
Mixing energy	0.6706	$\text{kJ/L}_{\text{POME}}$
Net energy	26.0484	$\text{kJ/L}_{\text{POME}}$

توزیع فاصله ازدحامی پاسخ‌های نامغلوب در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل، رنگ هر نقطه بیانگر مقدار فاصله ازدحامی آن پاسخ است. مقادیر بزرگ‌تر مربوط به نقاط واقع در نواحی کم‌تراکم یا دو انتهای جبهه پارتو هستند، درحالی‌که مقادیر کوچک‌تر نشان‌دهنده تراکم بیشتر پاسخ‌ها در بخش‌های میانی جبهه است. این توزیع نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته است پراکندگی مناسبی از پاسخ‌های نامغلوب را در سراسر جبهه پارتو حفظ کند.



شکل ۶- توزیع فاصله ازدحامی پاسخ‌ها روی جبهه پارتو

Figure 6. Crowding-distance distribution of solutions on the Pareto front

پاسخ دارای بیشترین انرژی خالص روی جبهه پارتو شامل سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ۱۰ ساعت نخست و سرعت ۱۰ دور بر دقیقه در ۱۴ ساعت باقی مانده بود. تولید هیدروژن، انرژی اختلاط و انرژی خالص این پاسخ به ترتیب برابر با $3512.0123 \text{ mL/L}_{\text{influent}}$ ، $0.9580 \text{ kJ/L}_{\text{pome}}$ و $26.0737 \text{ kJ/L}_{\text{pome}}$ به دست آمد. این پاسخ با نتیجه بهینه سازی تک هدفه مطابقت داشت.

در دو انتهای جبهه پارتو، بیشترین تولید هیدروژن برابر با $3529.2113 \text{ mL/L}_{\text{influent}}$ برای برنامه شامل سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه در ۱۰ ساعت نخست و سرعت ۱۰ دور بر دقیقه در ادامه فرایند حاصل شد. با این حال، انرژی مصرفی اختلاط در این حالت به $5.5537 \text{ kJ/L}_{\text{pome}}$ افزایش یافت. در مقابل، کمترین انرژی اختلاط در شرایط کارکرد ثابت با سرعت ۱۰ دور بر دقیقه به دست آمد که در آن تولید هیدروژن به $2669 \text{ mL/L}_{\text{influent}}$ کاهش پیدا کرد. بنابراین، افزایش تولید هیدروژن با افزایش مصرف انرژی همراه است و نقطه زانویی تعادل مناسب تری میان این دو هدف فراهم می کند.

به منظور ارزیابی پایداری الگوریتم، بهینه سازی چندهدفه در ۳۰ اجرای مستقل انجام شد. در تمامی اجراها، نسبت Hypervolume و میزان پوشش جبهه دقیق برابر با ۱۰۰ درصد و انحراف معیار آن ها برابر صفر بود. متوسط زمان اجرای الگوریتم نیز حدود ۱۱.۴۵ ثانیه به دست آمد. این نتایج نشان می دهند که الگوریتم نسبت به جمعیت اولیه پایدار بوده و در تمام اجراها مجموعه کامل پاسخ های نامغلوب را شناسایی کرده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک چارچوب داده محور برای بهینه سازی برنامه زمانی سرعت همزن در بیوراکتور تولید هیدروژن ارائه شد. متغیرهای تصمیم شامل سرعت همزن در مراحل اول و دوم و زمان تغییر سرعت بودند و مسئله در دو حالت تک هدفه و چندهدفه حل شد. نتایج حالت تک هدفه نشان داد که کارکرد همزن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ۱۰ ساعت نخست و کاهش آن به ۱۰ دور بر دقیقه در ادامه فرایند، بیشترین انرژی خالص برابر با $26.0737 \text{ kJ/L}_{\text{pome}}$ را ایجاد می کند. تطابق کامل پاسخ الگوریتم ژنتیک با نتیجه جست و جوی کامل ۳۶۸ حالت و دستیابی تمام ۳۰ اجرای مستقل به پاسخ یکسان، پایداری و دقت روش را تأیید کرد.

در حالت چندهدفه، جبهه پارتو شامل ۲۲ پاسخ نامغلوب به دست آمد که مصالحه میان افزایش تولید هیدروژن و کاهش انرژی مصرفی اختلاط را نشان داد. پاسخ زانویی شامل سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در ۷ ساعت نخست و سرعت ۱۰ دور بر دقیقه در ساعات باقی مانده بود و شرایط متعادل تری میان دو هدف فراهم کرد. هم پوشانی کامل جبهه حاصل از NSGA-II با جبهه پارتوی دقیق نیز عملکرد مناسب الگوریتم را نشان داد. به طور کلی، کنترل

مرحله‌ای سرعت همزن می‌تواند ضمن حفظ تولید مطلوب هیدروژن، مصرف انرژی فرایند را کاهش دهد. در مطالعات آینده، استفاده از داده‌های تجربی گسترده‌تر، بررسی برنامه‌های چندمرحله‌ای و واردکردن متغیرهای عملیاتی و زیستی دیگر پیشنهاد می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Ding, J., Wang, X., Zhou, X.F., Ren, N.Q. and Guo, W.Q., CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production, *Bioresource Technology*, 101, 7005–7013 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.146>
- [2] Wang, J. and Wan, W., Optimization of fermentative hydrogen production process using genetic algorithm based on neural network and response surface methodology, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 255–261 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.010>
- [3] Prakasham, R.S., Sathish, T. and Brahmaiah, P., Imperative role of neural networks coupled genetic algorithm on optimization of biohydrogen yield, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 4332–4339 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.031>
- [4] Hoseini, S.S., Najafi, G., Ghobadian, B. and Akbarzadeh, A.H., Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses, *Chemical Engineering Journal*, 413, 127497 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127497>
- [5] Basereh, Y. and Beigzadeh, R., CFD Simulation to Evaluate the Mixing Quality by Mixers with Different Blade Shapes, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(139), 136–147 (2025). <https://doi.org/10.22034/ijche.2024.446615.1402>
- [6] Rezende, M.C.A.F., Costa, C.B.B., Costa, A.C., Maciel, M.R.W. and Maciel Filho, R., Optimization of a large-scale industrial reactor by genetic algorithms, *Chemical Engineering Science*, 63, 330–341 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.09.001>
- [7] Sarkar, D. and Modak, J.M., Optimisation of fed-batch bioreactors using genetic algorithms, *Chemical Engineering Science*, 58, 2283–2296 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00095-2)
- [8] Sarkar, D. and Modak, J.M., Optimization of fed-batch bioreactors using genetic algorithm: Multiple control variables, *Computers and Chemical Engineering*, 28, 789–798 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.02.018>
- [9] Pirzadeh, Z., Soltani, H., Fallahi-Sambran, M., Haji-Mohammadi, R. and Memarmaher, B., A Relatively Linear Approach for Heat Exchanger Network Design with the Possibility of Using Internal Utility Exchangers, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(134), 96–108 (2024). <https://doi.org/10.22034/ijche.2023.395715.1308>
- [10] Zohdi, S.H. and Mansouri, S., Modeling and Optimization of Selectivity and Activity of Co/Al₂O₃ Catalyst in the Fischer–Tropsch Synthesis, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(129), 26–38 (2023). <https://doi.org/10.22034/ijche.2022.346635.1213>

- [11] Sarkar, D. and Modak, J.M., Pareto-optimal solutions for multi-objective optimization of fed-batch bioreactors using nondominated sorting genetic algorithm, *Chemical Engineering Science*, 60, 481–492 (2005).
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.07.130>
- [12] Vazquez-Castillo, J.A., Venegas-Sánchez, J.A., Segovia-Hernández, J.G., Hernández-Escoto, H., Hernández, S., Gutiérrez-Antonio, C. and Briones-Ramírez, A., Design and optimization, using genetic algorithms, of intensified distillation systems for a class of quaternary mixtures, *Computers and Chemical Engineering*, 33, 1841–1850 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.04.011>
- [13] Silva, C.M. and Biscaia, E.C. Jr., Genetic algorithm development for multi-objective optimization of batch free-radical polymerization reactors, *Computers and Chemical Engineering*, 27, 1329–1344 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00056-5)
- [14] Srirugsa, T., Prasertsan, S., Theppaya, T., Leevijit, T. and Prasertsan, P., Appropriate mixing speeds of Rushton turbine for biohydrogen production from palm oil mill effluent in a continuous stirred tank reactor, *Energy*, 179, 823–830 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.210>
- [15] Srirugsa, T., Prasertsan, S., Theppaya, T., Leevijit, T. and Prasertsan, P., Comparative study of Rushton and paddle turbines performance for biohydrogen production from palm oil mill effluent in a continuous stirred tank reactor under thermophilic condition, *Chemical Engineering Science*, 174, 354–364 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.024>
- [16] Niño-Navarro, C., Chairez, I., Torres-Bustillos, L., Ramírez-Muñoz, J., Salgado-Manjarrez, E. and Garcia-Peña, E.I., Effects of fluid dynamics on enhanced biohydrogen production in a pilot stirred tank reactor: CFD simulation and experimental studies, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 14630–14640 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.236>