

تحلیل فرآیند تولید هیدروژن از واکنش آلومینیوم با آب در یک واحد صنعتی به منظور بررسی میزان تأثیر عوامل شکست بر راندمان سیستم

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، shababi141351@gmail.com
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، i.mirzaee@urmia.ac.ir
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، paper102.sub@gmail.com
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، s.jafarmadar@urmia.ac.ir

زاهد شبابی
ایرج میرزایی
مرتضی خلیلیان*
صمد جعفر مدار

چکیده

با توجه به اهمیت و ضرورت بالای جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع سوختی تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست، سالیان متمادی است که محققین بر روی روش‌های تولید هیدروژن به‌عنوان یکی از پاک‌ترین و در دسترس‌ترین سوخت‌های جایگزین، کارهای تحقیقاتی خود را متمرکز نموده‌اند. یکی از این روش‌های مورد مطالعه تولید هیدروژن با بهره‌گیری از آب و آلومینیوم می‌باشد. در پژوهش حاضر، تحلیل عددی بر روی این روش صورت می‌پذیرد و چگالنده لیبیگ فرآیند تولید بررسی می‌گردد. راندمان چگالنده و کل سیستم محاسبه می‌گردد. در گام بعدی، فاکتورهای شکست سیستم بر اساس ادبیات فن و نظرات خبرگان شناسایی شده و با بهره‌گیری از یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به نام روش بهترین - بدترین، فاکتورهای شناسایی شده وزن دهی و رتبه بندی می‌گردد و تأثیر مهم‌ترین شاخص بر عملکرد سیستم مطالعه می‌شود و راهکارهای افزایش راندمان سیستم ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نتایج عددی به دست آمده در قیاس با کار ژوکائوسکاس به طور متوسط ۴/۲ درصد خطا دارد که مقدار مطلوبی است. همچنین کسر حجمی بخار در ۷ ثانیه اول نشان می‌دهد که سیال خنک کن ابتدا به محض ورود به مبادله کن تغییر فاز می‌دهد. با پیشروی زمان و افزایش حجم آب این تغییر فاز کاهش می‌یابد ولی در مدت زمان ۷ ثانیه بخار داخلی تغییر فاز نمی‌دهد. برای رسیدن به تغییر فاز بخار لوله داخلی زمان بیشتری لازم است. نمودارها این زمان را بعد از ۵۰ ثانیه نشان می‌دهند. علاوه بر این، راندمان چگالش، بر اساس نمودار به دست آمده بعد از ۵۰ ثانیه افزایش می‌یابد و در ۱۵۰ ثانیه به ۸۹ درصد می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: تولید هیدروژن، واکنش آلومینیوم آب، روش بهترین - بدترین، دینامیک سیالات محاسباتی، فرآیند تولید، راندمان چگالنده.

Analysis of the process of hydrogen production from the reaction of aluminum with water in an industrial unit in order to investigate the impact of failure factors on system efficiency

Z. Shababi	The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.
I. Mirzaee	The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.
M. Khalilian	The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.
S. Jafar Madar	The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.

Abstract

Considering the high importance and necessity of replacing fossil fuels with renewable and environmentally friendly fuel sources, for many years researchers have been working on hydrogen production methods as one of the cleanest and most available alternative fuels. have focused their research. One of these studied methods is hydrogen production using water and aluminum. In the current research, thermodynamic analysis is done on this method and the Liebig condenser is the production process of thermodynamic analysis. The efficiency of the condenser and the whole system is calculated. In the next step, system failure factors are identified based on technical literature and experts' opinions, and using one of the multi-criteria decision making methods called the best-worst method, the identified factors are weighted and ranked, and the impact The most important index on system performance is studied and solutions to increase system efficiency are provided.

Keywords: Hydrogen production, Aluminum-water reaction, Best-worst method, Computational fluid dynamics, Production Process Condenser efficiency.

۱- مقدمه

عامل آلودگی هوا در بسیاری از کشورها از جمله کانادا می‌باشند و می‌توانند منجر به دود و همچنین باران اسیدی شوند [۱]. استفاده از سوخت‌های فسیلی به طور قابل توجهی در مقیاس جهانی مشکل ساز است ولی باید توجه داشت که ۴۰ درصد برق دنیا را همین منابع سوختی تامین می‌کند، و تقاضای جهانی انرژی طبق آمار تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۱۰۰ درصد افزایش خواهد یافت. بر همین مبنا در ارتباط با تولید هیدروژن تحقیقاتی زیادی صورت گرفته است [۱-۵].

هیدروژن این پتانسیل را دارد که از طریق تکنیک هایی مانند

در حال حاضر، علاقه فزاینده ای برای تغییر به منابع تجدید پذیر انرژی برای رسیدن به راه حل‌های پایدار وجود دارد. یکی از حوزه‌های بارز در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر استحصال هیدروژن به‌عنوان منبع سوخت اولیه است. همان‌طور که کشورها همچنان از انرژی‌های تجدیدناپذیر استفاده می‌کنند منابع انرژی همانند سوخت‌های فسیلی باعث ایجاد آسیب چشمگیر به محیط زیست می‌شوند. برای نمونه، انتشار گازهای گلخانه ای تولید شده از سوختن سوخت‌های فسیلی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.khalilian@urmia.ac.ir

زیست توده، آب و سوخت‌های فسیلی تولید شود [۶]. اگرچه روش‌های غیر قابل تجدید موثری برای تولید هیدروژن وجود دارد مانند اصلاح بخار [۷]، ولی اگر هدف کاهش انتشار آلاینده‌گی و توسعه پایدار باشد، نتیجه معکوس خواهد بود. به دلیل فراوانی، هیدروژن را می‌توان از طریق تفکیک آب توسط تکنیک‌های متعددی که از منابع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند [۸] استحصال نمود. از جمله روش‌های تجدیدپذیر تولید هیدروژن، الکترولیز است. در این روش، سیستم الکترولیز از یک آند و کاتد غوطه ور در آب تشکیل می‌شود. بین آند و کاتد، یک الکترولیت پلیمری برای تسهیل جریان یون‌های هیدروژن قرار می‌گیرد [۹]. استفاده از آب برای تولید هیدروژن تنها سهم ۴ درصدی را داراست اگرچه تقریباً ۷۱ درصد سطح کره زمین را آب پوشانده است [۱۰]. با این حال، روش دیگر برای تولید هیدروژن، استفاده از آلومینیوم می‌باشد. برای استخراج هیدروژن از آب آلومینیوم به‌عنوان یک واکنش دهنده استفاده می‌گردد. این فلز به سبب قیمت کم و فراوانی آن نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. این عنصر سومین عنصر فراوان در پوسته زمین به شمار می‌رود [۱۱].

سولر و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۰ مطالعه‌ای را در مورد تغییر خواص ارتقا دهنده هیدروکسید انجام دادند. مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش شامل ۰/۱ گرم فویل آلومینیوم فشرده شده به شکل کروی بود که در ظرف واکنش حاوی ۷۵ سانتی متر مکعب آب فرو برده شد. ایشان از دو هیدروکسید KOH و NaOH استفاده نمودند. فاکتور دیگری که به مطالعه اضافه شد، تغییر غلظت ارتقا دهنده واکنش بود. ایشان توانستند حداکثر نرخ تولید هیدروژن را با استفاده از NaOH به‌عنوان ارتقادهنده هیدروکسید، با غلظت ۵ مولار، و در دمای آب ۷۵ درجه سلسیوس به دست آورند.

در مطالعه دیگری که توسط پورسیونکولا و همکاران [۱۳] انجام شد محققان NaOH را با KOH مقایسه کردند تا قابلیت زیست پذیری آن را شناسایی کنند. دو پارامتر اصلی غلظت ارتقا دهنده هیدروکسید و دمای شروع آب توسط ایشان بررسی گردید. دمای واکنش بین ۲۲ تا ۷۲ درجه سلسیوس متغیر بود، در حالی که غلظت ارتقا دهنده بین ۱ تا ۳ مول بر لیتر تغییر می‌کرد. نتایج نشان داد که هر دو ارتقا دهنده، قادر به دستیابی تولید هیدروژن بالای ۹۹ درصد، عمدتاً در دمای واکنش ۷۲ درجه سلسیوس بودند.

در کار انجام شده توسط پانگ و همکاران [۱۴] از آلومینیوم دور ریز به شکل قوطی که به صورت پودر آسیاب شد، استفاده گردید. مشابه مطالعات انجام شده قبلی، NaOH به آن اضافه شد. NaOH بین ۰ و ۱ مول بر لیتر متغیر بود و افزایش ۰/۲۵ مول بر لیتر اعمال گردید. وانگ و همکاران [۱۵] اثر استفاده از اکسیدها در ارتباط با محرک‌های نمک را با استفاده از آلومینیوم با CaO و NaCl بررسی کردند.

ایشان مشاهده کردند که در دمای آب تقریباً ۶۰ درجه سلسیوس، این ترکیب که بیشترین بازده هیدروژن را فراهم کرد - 9% Al, NaCl, 9% بود. لازم به ذکر است که کیانو و همکاران [۱۶] آلومینیوم را با آلیاژهای حاوی Sn و Ga برای شناسایی یک آلومینیوم قابل دوام آزمایش کردند.

تکاد و همکاران [۱۷] از آلومینیوم همراه با گالیم برای تسهیل فرآیند جداسازی آب استفاده کردند. در این مطالعه از هیدروکسید

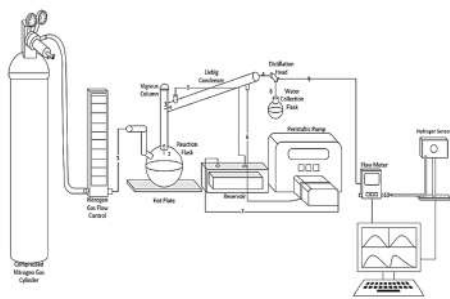
پتاسیم در فرآیند به‌عنوان یک ارتقا دهنده واکنش استفاده گردید. آنها دمای شروع واکنش را نیز تغییر دادند و تاثیر آن را بررسی نمودند. در مطالعه دیگری که توسط تکاد و همکاران [۱۸] صورت گرفت، از هیدروکسید سدیم به‌عنوان محرک واکنش استفاده شد. با این حال، هدف اولیه این مطالعه تعیین تأثیر غلظت ارتقا دهنده واکنش بر فرآیند بود. ایشان توانستند تشخیص دهند که ۰/۶۵ مول بر لیتر هیدروکسید سدیم بالاترین نرخ واکنش را در مقایسه با غلظت‌های ۰/۱۸۵، ۰/۳۷ و ۰/۵۰ مول بر لیتر دارد.

ایرانخواه و همکاران [۱۹] و لی و همکاران [۲۰] نیز مطالعاتی انجام دادند که تولید هیدروژن از طریق واکنش شیمیایی آب آلومینیوم بررسی نمودند. لی و همکاران به حداکثر نرخ تولید هیدروژن ۶۳/۹۵ میلی لیتر در ثانیه زمانی که از نمونه آلومینیوم حاوی لیتیوم و گالیم که به مدت ۵ ساعت آسیاب شده بود، دست یافتند. ایرانخواه و همکاران نیز به حداکثر تولید هیدروژن بل نرخ ۱۵/۰۷ میلی‌لیتر بر ثانیه زمانی که نمونه آلومینیومی ۲ درصد وزنی NaCl بود که به مدت ۱ ساعت آسیاب شده بود استفاده شد.

پژوهش‌های پیشین نشان داد که مطالعات عددی و تجربی در مورد فرآیند تولید هیدروژن از آلومینیوم و آب صرفاً به پدیده واکنش‌های شیمیایی معطوف می‌باشد و بررسی فرآیند تولید و محاسبه بازدهی آن امری است که مورد بررسی قرار نگرفته است. ضمناً در تحقیق پیشرو هدف تعیین فاکتورهای شکست موجود در تولید هیدروژن از واکنش آلومینیوم با آب می‌باشد که می‌تواند بازدهی را تحت تاثیر قرار دهند. پس از تعیین فاکتورهای شکست، رتبه بندی آنها با بهره گیری از روش‌های موجود در ادبیات فن صورت می‌پذیرد و فاکتوری که حائز رتبه نخست باشد بر روی راندمان قانون دوم مطالعه می‌گردد و راهکارهای مناسب جهت ارتقا راندمان ارائه می‌شود.

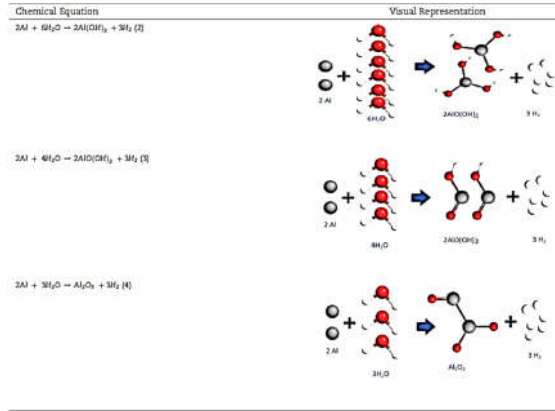
۱-۱ بیان مسأله

در کار حاضر خط تولید هیدروژن با آلومینیوم و آب به صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تحلیل انرژی و انرژی بر روی آن صورت می‌پذیرد. شکل (۱) طرحواره از فرآیند تولید هیدروژن را با روش مذکور نشان می‌دهد.



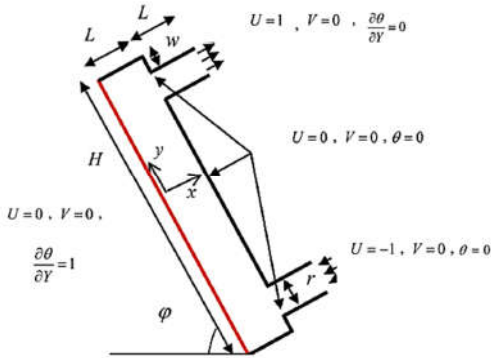
شکل ۱- طرحواره فرآیند تولید هیدروژن با آلومینیوم و آب [۲۱]

شکل (۲) نیز واکنش‌های ممکن صورت گرفته برای آلومینیوم را برای تولید هیدروژن نمایش می‌دهد.



شکل ۲- واکنش‌های آلومینیوم با آب برای تولید هیدروژن

روابط حاکم بیان می‌گردد.



شکل ۴- شرایط مرزی

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \sin \phi \frac{Ra}{Pr \cdot Re^2} \theta$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) - \cos \phi \frac{Ra}{Pr \cdot Re^2} \theta$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr \cdot Re} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right)$$

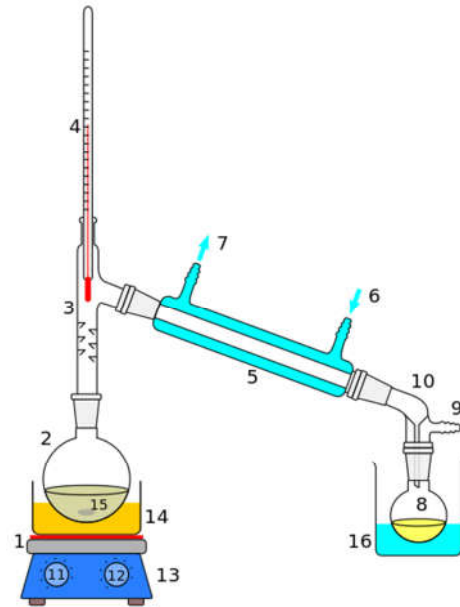
(۱)

که

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{U_0}, V = \frac{v}{U_0}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}, P = \frac{P}{\rho U_0^2}, \tau = \frac{t \cdot U_0}{H}, Ra = \frac{g \beta \Delta T H^3}{\alpha \nu}$$

$$\Delta T = (T_H - T_c), Re = H U_0 / \nu, Pr = \frac{v}{\alpha}, Gr = \frac{Ra}{Pr}, Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$



شکل ۳- طرحواره چگالنده لیبیگ

گام نخست این نوشتار مدل‌سازی چگالنده لیبیگ بکار رفته در این فرآیند است که به کمک تحلیل‌های عددی راندمان آن محاسبه می‌گردد و سپس بازدهی کل سیستم بررسی و برآورد می‌شود. شکل (۳) طرحواره چگالنده لیبیگ را نشان می‌دهد. چگالنده لیبیگ از دو لوله متمرکز تشکیل شده است که در هر دو انتها مهر و موم شده اند. بخار حاصل از فلاسک در امتداد لوله داخلی حرکت می‌کند و به دلیل گردش آب در ژاکت بیرونی متراکم می‌شود. مایع تغلیظ شده در ظرف دیگری جمع می‌شود.

۲- روابط ترمودینامیکی حاکم

۲-۱- تعادل جرم

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \text{ (kg/s)} \quad (2)$$

۲-۲- تعادل انرژی

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} h - \sum_{out} \dot{m} h = 0 \text{ (kW)} \quad (3)$$

در گام دوم پارامترهای موثر در راندمان سیستم بر اساس مطالعات پیشین و استفاده از نظرات تیم خبره استخراج شده و با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره و روش وزن دهی بهترین - بدترین [۲۲] فاکتورهای استخراجی وزن دار شده و رتبه بندی می‌گردد. تاثیر پارامتری که حائز رتبه نخست باشد بر روی راندمان قانون دوم مطالعه می‌گردد و راهکارهای مناسب جهت ارتقا راندمان ارائه می‌شود. شکل (۴) شرایط مرزی حاکم بر چگالنده را نشان می‌دهد که در ادامه

۳- روش بهترین - بدترین

بر اساس روش بهترین- بدترین، بهترین و بدترین شاخص به وسیله تصمیم گیرنده مشخص شده و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شاخص بهترین و بدترین و دیگر شاخصها انجام می‌شود. سپس یک مدل ریاضی حداکثر حداقل برای مشخص کردن وزن شاخصهای مختلف فرموله و حل می‌گردد. همچنین در این روش یک فرمول برای محاسبه نرخ ناسازگاری جهت بررسی اعتبار مقایسات در نظر گرفته شد [۲۳].

۳-۱- گام‌های روش بهترین - بدترین

گام ۱: مجموعه شاخصهای تصمیم‌گیری تعیین شود. در این گام، مجموعه شاخصها به صورت $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ تعریف می‌شود که توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌گردد.

گام ۲: تعیین بهترین و بدترین شاخص، در این مرحله تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین شاخص را به طور کلی تعریف می‌کند و هیچ مقایسه‌ای در این مرحله صورت نمی‌گیرد.

گام ۳: ارجحیت بهترین شاخص را نسبت به سایر شاخصها و ارجحیت سایر شاخصها نسبت به بدترین معیار با اعداد ۱ تا ۹ مشخص نمایید. بردار ارجحیت بهترین شاخص نسبت به دیگر شاخصها و بردار ارجحیت سایر شاخصها نسبت به بدترین شاخص بصورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})^T \text{ و } A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$$

که a_{Bj} نشان دهنده ارجحیت بهترین شاخص B نسبت به شاخص z و a_{jW} ارجحیت شاخص z نسبت به بدترین شاخص W میباشد. واضح است $a_{Bj} = a_{jW} = 1$

گام ۴: تعیین وزن بهینه شاخصها $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ برای تعیین وزن بهینه هر یک از شاخصها، زوجهای a_{Bj} و a_{jW} را برای تشکیل شده، سپس برای برآورده کردن این شرایط در همه z ها، باید راه حلی پیدا شود تا عبارات $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ و $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ را برای همه z هایی که حداقل شده است، حداکثر نماید. با توجه به غیر منفی بودن وزنها و مجموع اوزان میتوان مدل ریاضی را به صورت زیر فرموله کرد:

$$\text{Min} \left\{ \text{Max} \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \right\} \quad (۴)$$

$$\text{s. to: } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \\ w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

همچنین می‌توان مدل ریاضی فوق را به مدل ریاضی زیر تبدیل کرد:

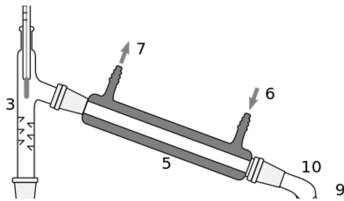
$$\text{Min } z \\ \text{s. to: } \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq z \\ \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq z \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1 \\ w_j \geq 0, z \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (۵)$$

با حل مدل فوق، مقادیر بهینه $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ و z^* به دست می‌آید.

۴- حل مساله

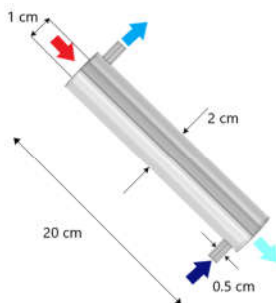
۴-۱- مدل سازی مبادله کن لیبیگ

شکل طرحواره ۵ مبادله کن لیبیگ را در سیستم نشان می‌دهد. مسیر ۵ نشان داده شده در شکل مسیر عبور محلول داغ می‌باشد که در مبادله کن لیبیگ چگالیده می‌شود. مسیر ۶ ورودی آب خنک کن مبادله کن و مسیر ۷ خروجی آب خنک کننده می‌باشد.



شکل ۵- مبادله کن لیبیگ در سیستم

در کار حاضر از نرم افزار Ansys Fluent برای شبیه سازی بهره گرفته می‌شود. گام نخست در کار شبکه بندی موثر مساله می‌باشد. شکل ۶ مدل هندسی کار را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مبادله کن لیبیگ مدل شده

۵- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر از مدل جریان آرام برای حل مسئله استفاده می‌شود. روش مورد استفاده برای حل معادلات روش حجم محدود است که به صورت مستقیم با فرم انتگرالی معادلات بقا سر و کار دارد. ایده اصلی این روش این است که ناحیه‌ای که محاسبات در آن انجام می‌شود را به چندین حجم محدود یا سلول تقسیم کنیم و انتگرال معادلات مربوط به قوانین بقا را در هرکدام از حجم کنترلها تقریب بزنیم. بنابراین معادلات حاکم همانند جریان سیالات متداول است. برای جریان پایا که خواص فیزیکی سیال تابع دما است، معادله بقا جرم، بقا مومنتم و انرژی به صورت زیر خواهد بود.

۵-۱- معادله بقای جرم:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (۶)$$

معادله بقای مومنتم:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (۷)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}$$

شکل ۹ نتایج را برای دمای خروجی لوله اصلی در زمان ۴ ثانیه می‌باشد. در اینکار همان‌طور که مشخص است ۸ مش مختلف با اندازه‌های ۵۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰، ۳۵۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰۰ سلول برای به دست آوردن حد مستقل از مش بودن بکار گرفته شده است. نمودار نشان می‌دهد که نتایج از تعداد ۲۵۰۰۰۰ مش به بعد تقریباً تغییر چندانی ندارند و شبیه نمودار تقریباً صفر است برای همین، این تعداد از سلول برای شبیه سازی حاضر استفاده می‌شود.

۷- نتایج

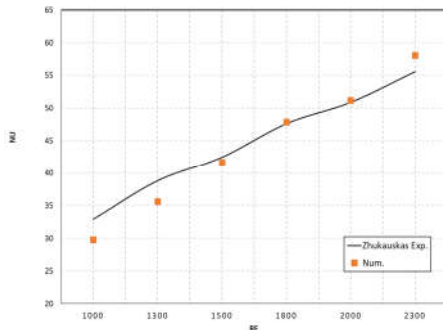
۷-۱- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی کار عددی صورت پذیرفته از رابطه تجربی ارائه شده توسط ژوکائوسکاس^۳ [۲۴] بهره گرفته می‌شود. این رابطه در معادله (۱۱) آورده شده است.

$$\overline{Nu}_D = 0.27 \cdot Re_{D,max}^{0.63} \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

$$\left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 500 \\ 1000 \leq Re_{D,max} \leq 2 \times 10^5 \end{array} \right]$$

شکل ۱۰ مقایسه نتایج عددی به دست آمده و کار ژوکائوسکاس می‌باشد. با توجه به اینکه رابطه تجربی برای دامنه گسترده‌ای از اعداد صادق است داده‌های آن با خط ممتد و نتایج عددی با توجه به ماهیت گسسته آن با نقاط مشخص شده است.



شکل ۱۰- نتایج عددی و تجربی برای عدد نوسلت

داده‌های عددی نمودار (۱۰) با داده‌های مربوط به کار تجربی در مجموع به طور متوسط ۴/۲ درصد خطا را نشان می‌دهد که خطای مطلوبی است. و لذا می‌توان به الگوریتم‌های بکار رفته در کار و شبکه بندی ایجاد شده اعتماد کافی را داشت.

برای بررسی عملکرد مبادله کن ابتدا باید کانتورهای درصد حجمی سیال مورد مطالعه قرار گیرد. شکل ۱۱ کسر حجمی بخار را در ۷ ثانیه اول نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که سیال خنک کن ابتدا به محض ورود به مبدل تغییر فاز می‌دهد. با پیشروی زمان و افزایش حجم آب این تغییر فاز کاهش می‌یابد ولی در مدت زمان ۷ ثانیه بخار داخلی تغییر فاز نمی‌دهد.

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z}$$

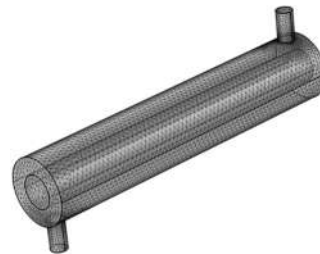
معادله بقای انرژی:

$$\rho \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

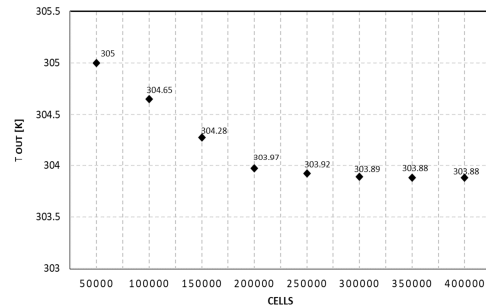
که \vec{V} ، P و T به ترتیب بردار سرعت، فشار و دما هستند. در این مساله تمامی ورودی‌ها دبی جرمی مشخص لحاظ شده اند و خروجی‌ها دارای فشار معین هستند. دیواره بیرونی عایق فرض شده است و مساله به صورت ناپایا حل گردیده است. در این شبیه سازی از مدل PCS^۱ برای کوپل سرعت و فشار و گسسته سازی LSCB^۲ بهره گرفته شده است. همچنین روش گسسته سازی بالادست مرتبه دوم می‌باشد و نیز گام زمانی ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.

۶- شبکه بندی

به طور کلی شبکه بندی مدل محاسباتی یکی از مهمترین قسمت‌های یک شبیه سازی می‌باشد. یک شبکه با کیفیت می‌تواند روند حل را تسریع بخشیده و حتی جواب‌های دقیق تری از شبیه سازی حاصل شود. در مقابل یک شبکه بی کیفیت باعث رسیدن به پاسخ‌های نادرست و همگرایی ضعیف و حتی عدم همگرایی می‌شود. در پژوهش حاضر با توجه به هندسه غیر یکنواخت مدل و همچنین برای همگرایی سریعتر از مدل شبکه بندی بی سازمان برای مبادله کن بهره گرفته شده است که شکل (۸) نمایی از آن را نشان می‌دهد. همچنین استقلال از شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته است که در نمودار (۹) نمایان است.



شکل ۸- نمایی از شبکه بندی ایجاد شده



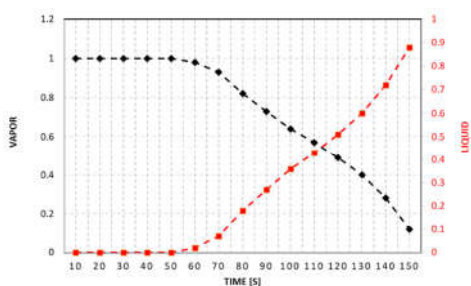
شکل ۹- نمودار استقلال از شبکه

¹ Phase Coupled SIMPLE

² Least Square Cell Based

³ Zhukauskas

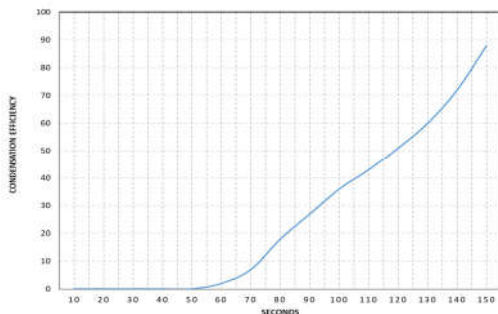
است. نمودار ۱۲ این زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نمودار زمانی تغییر فاز

یکی از پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه، راندمان چگالش، نسبت وزن درصد کل نرخ چگالش به نرخ جریان بخار آب ورودی است. این پارامتر برای ارزیابی عملکرد مبادله کن های گرمایی چگالشی استفاده می‌شود. راندمان چگالش به صورت زیر بیان می‌شود [۲۵]:

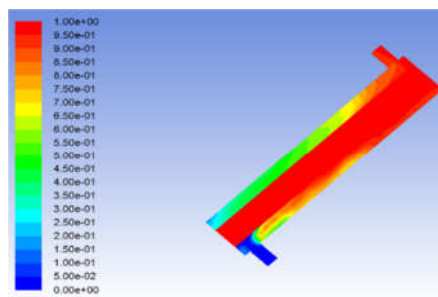
$$\eta_{cd} [wt\%] = \frac{\dot{m}_{cd}}{\dot{m}_{H_2O,in}} \times 100 \quad (10)$$



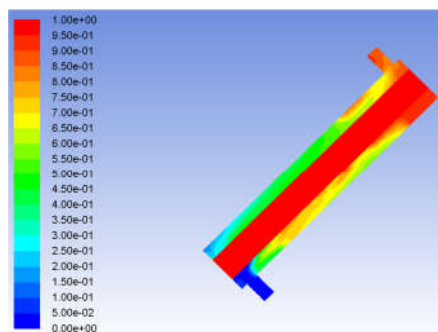
شکل ۱۳- نمودار راندمان چگالشی مبدل لیبیگ

۸- آنالیز شکست

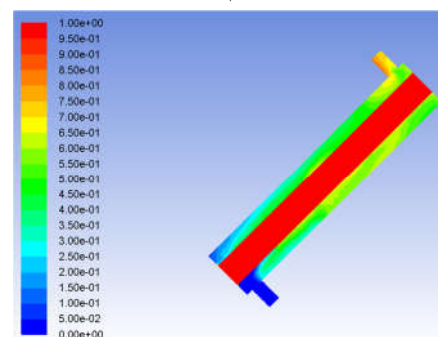
معیارهای انتخابی توسط تصمیم گیرنده در ارتباط با مبادله کن لیبیگ عبارتند از: تنش‌های حرارتی، فضای اشغال شده، خوردگی، پایداری سیستم و رسوب. بر اساس گام‌های روش بهترین - بدترین، ابتدا بهترین و بدترین معیار و مقایسات زوجی معیار در قالب جدول ۵-۱ ارائه می‌شود. سپس با استفاده از مدل ریاضی وزن معیارها تعیین می‌گردد.



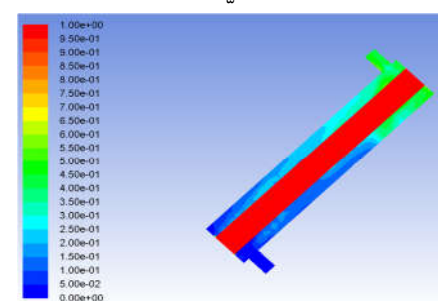
۳



۴



۵



۷

شکل ۱۱- کسر حجمی بخار

برای رسیدن به تغییر فاز بخار لوله داخلی زمان بیشتری لازم

جدول ۱- مقایسات زوجی بین معیارها

خوردگی (w_1)	تنش (w_2)	پایداری (w_3)	رسوب (w_4)	فضای اشغال شده (w_5)
۱	۲	۳	۵	۷
۷	۵	۴	۲	۱

شکل ۱۴ اختلافی حدود ۴۷/۳ درصدی را در راندمان واقعی نسبت به راندمان ایده آل نشان می‌دهد. و می‌توان گفت همین امر است که همیشه طراحی اسمی و طراحی واقعی یک مبادله کن نتایج مغایر به دست می‌دهند و آنچه که بر روی کاغذ به دست می‌آید هیچگاه در واقعیت عملی نمی‌شود. بنابراین چنین می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر سیال مورد استفاده و محیط مورد تست از خوردگی کمتری برخوردار باشد این اختلاف کمتر خواهد شد.

۹- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد مقایسه نتایج عددی به دست آمده و کار ژوکانوسکاس انجام می‌گیرد. داده‌های عددی با داده‌های مربوط به کار تجربی در مجموع به طور متوسط ۴/۲ درصد خطا را نشان می‌دهد که خطای مطلوبی است و لذا می‌توان به الگوریتم‌های بکار رفته در کار و شبکه بندی ایجاد شده اعتماد کافی را داشت. کسر حجمی بخار در ۷ ثانیه اول نشان می‌دهد که سیال خنک کن ابتدا به محض ورود به مبادله کن تغییر فاز می‌دهد. با پیشروی زمان و افزایش حجم آب این تغییر فاز کاهش می‌یابد ولی در مدت زمان ۷ ثانیه بخار داخلی تغییر فاز نمی‌دهد. برای رسیدن به تغییر فاز بخار لوله داخلی زمان بیشتری لازم است. نمودارها این زمان را بعد از ۵۰ ثانیه نشان می‌دهند. یکی از پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه، راندمان چگالش، نسبت وزن درصد کل نرخ چگالش به نرخ جریان بخار آب ورودی است. این پارامتر برای ارزیابی عملکرد مبادله کن های گرمایی چگالشی استفاده می‌شود. این پارامتر بر اساس نمودار به دست آمده بعد از ۵۰ ثانیه افزایش می‌یابد و در ۱۵۰ ثانیه به ۸۹ درصد می‌رسد.

معیارهای شکست انتخابی توسط تصمیم گیرنده در ارتباط با مبادله کن لیبیگ عبارتند از: تنش‌های گرمایی، فضای اشغال شده، خوردگی، پایداری سیستم و رسوب. بر اساس گام‌های روش بهترین - بدترین، ابتدا بهترین و بدترین معیار و مقایسات زوجی معیار ارائه می‌شود. سپس با استفاده از مدل ریاضی وزن معیارها تعیین می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تاثیر خوردگی ۴۷/۳ درصد می‌باشد که بیشترین تاثیر را در مقایسه با فاکتورهای شکست دیگر دارد. بنابراین بر اساس هدف گذاری قبلی این ضریب را در رابطه راندمان چگالشی مبادله کن دخالت می‌دهیم تا رابطه ای جدید ظاهر گردد. فیزیک مساله بیان می‌کند که در صورت وجود خوردگی در سطح مبادله کن عبور جریان دچار اختلال می‌گردد و اتلاف انرژی در مسیر رخ می‌دهد که این امر سبب کاهش سرعت جریان در مسیر حرکت خود می‌شود که سبب کاهش عدد رینولدز و در نتیجه سبب کاهش عدد نوسلت می‌شود همچنین وجود خوردگی در مسیر می‌تواند جایگاه هایی را برای به تله انداختن سیال ایجاد کند که سبب گردد سیال در گرمای یکنواخت در محل مشخصی محبوس شود و عایق گرمایی تولید شود که هر دوی این امور به ضرر امر انتقال گرما بوده و نرخ چگالش را کاهش می‌دهد. نمودار راندمان ایده آل و واقعی اختلافی حدود ۴۷/۳ درصدی را در راندمان واقعی نسبت به راندمان ایده آل نشان می‌دهد و می‌توان گفت همین امر است که همیشه طراحی اسمی و طراحی واقعی یک مبادله کن نتایج مغایر به دست می‌دهند و آنچه که بر روی کاغذ به دست می‌آید هیچگاه در واقعیت عملی نمی‌شود.

مدل ریاضی برای تعیین وزن فاکتورهای شکست بصورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} & \text{Min } z \\ & \text{s. to:} \\ & \left| \frac{w_1}{w_1} - 1 \right| \leq z, \left| \frac{w_1}{w_2} - 2 \right| \leq z, \left| \frac{w_1}{w_3} - 3 \right| \leq z, \left| \frac{w_1}{w_5} - 5 \right| \leq z \\ & z \left| \frac{w_1}{w_5} - 7 \right| \leq z \\ & \left| \frac{w_1}{w_5} - 7 \right| \leq z, \left| \frac{w_2}{w_5} - 5 \right| \leq z, \left| \frac{w_3}{w_5} - 4 \right| \leq z, \left| \frac{w_4}{w_5} - 2 \right| \\ & \leq z \left| \frac{w_5}{w_5} - 1 \right| \leq z \\ & w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1, w_1 \geq 0, w_2 \geq 0, w_3 \geq 0, w_4 \geq 0, w_5 \geq 0, z \geq 0 \end{aligned}$$

با حل مدل فوق جواب مقدار بهینه بصورت زیر می‌باشد:

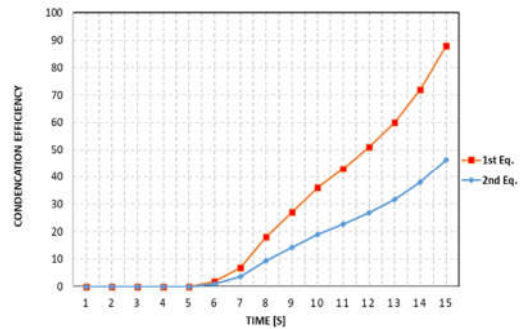
$$\begin{aligned} w_1^* &= 0.473, w_2^* = 0.209, w_3^* = 0.182 \\ w_4^* &= 0.079, w_5^* = 0.056, z^* = 0.078 \end{aligned} \quad (10)$$

نسبت ساز گاری بصورت $CR = \frac{z^*}{CI} = \frac{0.078}{3.73} = 0.021$ می‌باشد و نشان می‌دهد مقایسات زوجی سازگاری بالاتری دارند.

در گام نخست مقدار کیفی پارامترهای شکست به مقادیر کمی تبدیل گردید. در ادامه تاثیر مهم ترین پارامتر بر راندمان چگالشی مبادله کن به دست خواهد آمد. راندمان چگالشی مبادله کن لیبیگ، درصد نرخ چگالش به بخار آب ورودی را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر خوردگی ۴۷/۳ درصد می‌باشد که بیشترین تاثیر را در مقایسه با فاکتورهای شکست دیگر دارد. بنابراین بر اساس هدف گذاری قبلی این ضریب را دخالت می‌دهیم تا رابطه ای جدید ظاهر گردد. فیزیک مساله بیان می‌کند که در صورت وجود خوردگی در سطح مبدل عبور جریان دچار اختلال می‌گردد و اتلاف انرژی در مسیر رخ می‌دهد که این امر سبب کاهش سرعت جریان در مسیر حرکت خود می‌شود که سبب کاهش عدد رینولدز و در نتیجه سبب کاهش عدد نوسلت می‌شود همچنین وجود خوردگی در مسیر می‌تواند جایگاه هایی را برای به تله انداختن سیال ایجاد کند که سبب گردد سیال در دمای یکنواخت در محل مشخصی محبوس شود و عایق گرمایی تولید شود که هر دوی این امور به ضرر امر انتقال گرما بوده و نرخ چگالش را کاهش می‌دهد در نتیجه با احتساب ضریب خوردگی می‌توان بیان داشت:

$$\eta_{cd}[\text{wt}\%] = \frac{m_{cd}(1 - w_1^*)}{m_{H_2O,m}} \times 100 \quad (11)$$

در نتیجه این رابطه نمودار ۱۳ می‌تواند به قرار زیر تغییر یابد.



شکل ۱۴- نمودار راندمان چگالش مبادله کن لیبیگ با احتساب فاکتور شکست

- for hydrogen production in pure water. Mater Trans. 2014; 55(6):892-8.
- [16] Qiao D, Yiping L, Zhongyi T, Xuesong F, Tongmin W, Tingju L, Peter KL. The superior hydrogen-generation performance of multi-component Al alloys by the hydrolysis reaction. International Journal of Hydrogen Energy. 2019; 44(7): 3527-3537.
- [17] Tekade SP, Pednekar AS, Jadhav GR, Kalekar SE, Shende DZ, Wasewar KL, Hydrogen generation through water splitting reaction using waste aluminum in presence of gallium. Int J Hydrogen Energy. 2020.
- [18] Tekade SP, Shende DZ, Wasewar KL, Hydrogen generation in water splitting reaction using aluminum: effect of NaOH concentration and reaction modelling using SCM. Int J Chem React Eng. 2018; 16(7):1-8.
- [19] Irankhah, A., Seyed Fattahi, S.M., Salem, M., Hydrogen generation using activated aluminum/water reaction. Int J Hydrogen Energy. 2018; 43(33):15739-48.
- [20] Li P, Fen X, Lixian S, Yongpeng X, Jun C, Xia Y, Yipeng W, Fang, Y, Yumei L. Hydrogen generation performance of novel Al-LiH-metal oxides. Inorganic Chemistry Frontiers. 2018; 5(7): 1700-1706.
- [21] Bolt A, Dincer I, Agelin-Chaab M, Experimental study of hydrogen production process with aluminum and water. International Journal of Hydrogen Energy. 2020; 45(28): 14232-14244. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.160>
- [22] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega. 2015; 53: 49-57.
- [23] Morabbi Heravi H, Bayrami M, Mamegani S, Pashae Golmarz T. Risk management based on fuzzy BWM and fuzzy MOORA: Case study-Food industry, 9th International Conference on Management, World Trade, Economics, Finance and Social Sciences, France, 2021.
- [24] Ram, B. Gupta. Hydrogen fuel: production, transport, and storage. 1st ed. New York: CRC Press, 2008.
- [۲۵] حسین خانی ح، خندان ن، ایکانی مح، الباسی، ع، مروری بر تولید هیدروژن با استفاده از تکنولوژی حلقه شیمیایی، ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۳۹۸؛ ش ۱۶۷.
- بنابراین چنین می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر سیال مورد استفاده و محیط مورد تست از خوردگی کمتری برخوردار باشد این اختلاف کمتر خواهد شد.
- شبه سازی کامل فرآیند تولید هیدروژن و بررسی تاثیر فاکتورهای شکست بر راندمان کل پیشنهاد می‌شود.
- ### ۱۰- مراجع
- [1] Government of Canada. *Sources of pollution*. electricity; 2019.
- [2] Berger M, Goldfarb JL. Understanding our energy footprint: undergraduate chemistry laboratory investigation of environmental impacts of solid fossil fuel wastes. J Chem Educ. 2017; 94(8):1124e8, 2017.
- [3] Government of Canada. Government of Canada sets ambitious GHG reduction targets for federal operations, https://www.canada.ca/en/treasury-board-secretariat/news/2017/12/government_of_canadasetambitiousghgreductiontargetsforfederalop.html.
- [4] Pashae Golmarz T, Rezazadeh S, Yaldagard M, Bagherzadeh, N. The Effect of Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Configuration Changing from Straight to Cylindrical State on Performance and Mass Transport: Numerical Procedure. Journal of Renewable Energy and Environment. 2021; 8(2): 39-53, doi: 10.30501/jree.2020.253825.1152.
- [5] Pashae Golmarz, T, Rezazadeh, S, Bagherzadeh, N. Numerical Study of Curved-Shape Channel Effect on Performance and Distribution of Species in a Proton-Exchange Membrane Fuel Cell: Novel Structure. Journal of Renewable Energy and Environment. 2018; 5(2): 10-21, doi: 10.30501/jree.2018.88506.
- [6] Bakenne A, Nuttall W, Kazantzis N. Sankey-Diagram-based insights into the hydrogen economy of today. Int J Hydrogen Energy. 2016; 41(19): 7744e53.
- [7] Office of energy efficiency & renewable energy. Hydrogen production: natural gas reforming. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-productionnatural-gas-reforming>.
- [8] Nikolaidis P, Poullikkas A, A comparative overview of hydrogen production processes. Renew Sustain Energy Rev. 2017; 67: 597e611.
- [9] Godula-Jopek, Agata. Hydrogen production: by electrolysis. John Wiley & Sons, 2015.
- [10] Peslier AH, Maria S, Henner B, Shun-Ichiro K. Water in the Earth's interior: distribution and origin. Space Science Reviews. 2017; 212: 743-810.
- [11] Fleischer M. The abundance and distribution of the chemical elements in the earth's crust. Journal of Chemical Education. 1954; 31(9): 446.
- [12] Soler L, Macanas J, Mu-noz M, Casado J, Aluminum and aluminum alloys as sources of hydrogen for fuel cell applications. J Power Sources. 2007;169(1): 144-9.
- [13] Porciu' ncula, C.B., Marcilio, N.R., Tessaro, I.C., Gerchmann, M., Production of hydrogen in the reaction between aluminum and water in the presence of NaOH and KOH. Braz J Chem Eng. 2012; 29(2): 337-48.
- [14] Yang H, Zhang H, Peng R, Zhang S, Huang X, Zhao Z, Highly efficient hydrolysis of magnetic milled powder from waste aluminum (Al) cans with low-concentrated alkaline solution for hydrogen generation. Int J Energy Res. 2019; 43(9): 4797-806.
- [15] Wang H, Lu J, Dong SJ, Chang Y, Fu YG, Luo P, Preparation and hydrolysis of aluminum-based composites