

## شبیه‌سازی عددی جریان دوبعدی در ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی مقطع ثابت فروصوت و بررسی اثر آن بر عملکرد سیکل ترکیبی سه‌گانه

صوفیا خلیلی<sup>۱</sup>، علی جعفریان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

sufia.khalili@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

jafarian@modares.ac.ir

**چکیده:** در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیک مغناطیسی (Magneto Hydro Dynamics) فروصوت در ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی صورت گرفته و اثر آن بر راندمان و توان الکتریکی سیکل ترکیبی سه‌گانه بررسی شده است. یک کانال فارادی دوبعدی مقطع ثابت با الکترودهای گسسته به‌عنوان ژنراتور ام.ا.ج.دی در نظر گرفته شده است. جریان هیدرودینامیک مغناطیسی پایا، تراکم‌پذیر و با معادلات هیدرودینامیک مغناطیسی پنج-معادله‌ای ایدئال در نظر گرفته شده که برای حل معادلات ناویر استوکس (Navier-Stokes)، از حل گر مبتنی بر چگالی به صورت ضمنی و برای حل معادله پواسون (Poisson)، از روش پتانسیل الکتریکی استفاده شده است. سیکل ترکیبی سه‌گانه پیشنهادی در تحقیق حاضر، شامل سیکل باز ژنراتور ام.ا.ج.دی به‌عنوان مولد بالادستی، سیکل توربین گاز به‌عنوان سیکل میانی و چرخه توربین بخار به‌عنوان سیکل پایین‌دستی است. یک کد برای روابط ترمودینامیکی حاکم بر سیکل ترکیبی سه‌گانه نوشته شده و عملکرد سیکل بر پایه ژنراتور ام.ا.ج.دی تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای ژنراتور ام.ا.ج.دی مقطع ثابت فروصوت حالت بهینه در ماخ ۰٫۳ تا ۰٫۴ تحت شدت میدان مغناطیسی ۴ تا ۶ تسلا اتفاق می‌افتد. نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.ا.ج.دی در ماخ ۰٫۳ و شدت میدان مغناطیسی ۶ تسلا به ۱۲٫۲۷ درصد می‌رسد که این ژنراتور راندمان بهینه سیکل ترکیبی سه‌گانه را با افزایش ۲۲٫۷ درصدی نسبت به سیکل دوگانه فاقد ژنراتور ام.ا.ج.دی، به ۶۳٫۵۹ درصد می‌رساند.

**واژه‌های کلیدی:** ژنراتور ام.ا.ج.دی فارادی مقطع ثابت، سیکل ترکیبی سه‌گانه، پارامتر مؤثر، جریان ام.ا.ج.دی مادون صوت.

## ۱. مقدمه

با توجه به نقش اساسی صنعت برق در اقتصاد و مصرف انرژی در جهان، گسترش روش‌های تولید برق با بازده بالاتر و ارتقای فناوری‌های موجود یکی از گام‌های اساسی در توسعه بیشتر یک جامعه است که با افزایش نیاز روزافزون به انرژی و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، بر اهمیت آن افزوده می‌شود. با توجه به مزایای نیروگاه‌های ام.اچ.دی<sup>۱</sup> از جمله افزایش راندمان نیروگاه‌ها به واسطه کاهش مصرف سوخت، این نیروگاه‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. ژنراتورهای ام.اچ.دی سیستم‌های پربازده تبدیل انرژی هستند که انرژی جنبشی گاز هادی الکتریسته یا مایع را، بدون نیاز به هیچ قسمت چرخانی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند [۱]. تولید توان الکتریکی در این ژنراتورها از قانون فارادی مربوط به القای الکترومغناطیس متحرک نشئت می‌گیرد [۲]. مهم‌ترین پارامتر ارزیابی ژنراتورهای ام.اچ.دی نسبت استخراج آنتالپی است که معمولاً کمتر از ۳۰ درصد است [۳ و ۴].

از آنجایی که دمای گازهای خروجی از ژنراتور ام.اچ.دی معمولاً حدود ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۵]، حرارت آن می‌تواند برای پیش‌گرمایش هوای احتراق در مبدل حرارتی دما بالا یا افزایش تولید بخار در بازیاب حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. یک نمونه از این موارد توسعه، یک سیکل ترکیبی شامل سیکل بالادستی ام.اچ.دی و سیکل پایین‌دستی توربین بخار با راندمان کلی ۳۳ درصد توسط کیریلین و همکاران بود [۶]. جکسون و همکاران نیز یک سیکل ترکیبی بخار-ام.اچ.دی را به صورت تحلیلی مطالعه کردند که با پیش‌گرم هوای احتراقی غنی‌شده با اکسیژن تا دمای ۱۰۰۰ کلوین، به راندمان الکتریکی ۴۷ درصد، برای این سیکل دست یافتند [۷]. کاپوکاوا و همکاران یک سیکل ترکیبی سه‌گانه ام.اچ.دی-گاز-بخار را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند که جریان درون ژنراتور ام.اچ.دی را با معادلات شبه یک‌بعدی ام.اچ.دی حل کردند. راندمان سیکل و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی را با صرف‌نظر از افت‌های حرارتی و توان الکتریکی مصرفی، به ترتیب ۶۵ و ۲۵ درصد به دست آوردند [۸]. کاپوکاوا و همکاران شش سیکل ترکیبی دوگانه و سه‌گانه بر پایه سیکل باز ام.اچ.دی را به صورت تحلیلی بررسی کردند و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی را ۳۰ درصد فرض کردند. در بهترین حالت، راندمان سیکل ترکیبی را ۶۵ درصد اعلام کردند که ۱۴ درصد نسبت به سیکل بدون ژنراتور ام.اچ.دی افزایش داشته است [۹]. سالواتور و همکاران دو سیکل دوگانه ام.اچ.دی-بخار و یک سیکل سه‌گانه ام.اچ.دی-بخار-گاز را بر پایه سیکل باز ام.اچ.دی مورد مطالعه قرار دادند و جریان

فروصوت درون ژنراتور ام.اچ.دی فارادی الکترومغناطیسی را به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی عددی کردند. آن‌ها بالاترین راندمان را برای هوای پیش‌گرم احتراق تا دمای ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در سیکل سه‌گانه، ۶۰ درصد به دست آوردند [۱۰].

مطالعه جریان سیال رسانا در کانال در حضور میدان مغناطیسی عمود بر جریان، به دلیل کاربردهای عملی آن در ژنراتورهای ام.اچ.دی، پمپ‌ها، شتاب‌دهنده‌ها و دبی‌سنج‌ها دارای اهمیت خاصی است. در همین راستا ایشیکاوا و همکاران جریان ام.اچ.دی سه‌بعدی درون ژنراتور ام.اچ.دی فارادی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. ایشان با فرض چگالی جریان الکتریکی ثابت روی الکترودها و شرایط پرئودیک در راستای  $x$  و  $z$  و اعمال میدان مغناطیسی  $4/8$  تسلا، به توان الکتریکی ۱۰ مگاوات برای ژنراتور ام.اچ.دی دست یافتند [۱۱]. آیسال یک حل تحلیلی برای توان بهینه خروجی از ژنراتور ام.اچ.دی با مقطع ثابت برای محدوده‌ای از عدد ماخ ورودی مادون صوت و مافوق صوت توسعه دادند. البته این حل تحلیلی، قادر به پیش‌بینی رفتار جریان ام.اچ.دی برای همه مقادیر پارامتر مؤثر<sup>۲</sup> نبود [۱]. شیومی و همکاران نیز یک ژنراتور ام.اچ.دی دوبعدی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. ایشان اختلاف پتانسیل برای همه جفت الکترودها را یکسان در نظر گرفتند که در محاسبه آن، ضریب بار برابر  $0/5$  و سرعت برابر سرعت ورودی فرض شده بود [۴].

در تحقیق حاضر، هدف اصلی بررسی پارامترهای عملکردی سیکل ترکیبی سه‌گانه بر پایه ژنراتور ام.اچ.دی است. حال از آنجایی که الگوی رفتاری مناسبی برای ژنراتور ام.اچ.دی فارادی بالادست این سیکل موجود نبوده است، جریان درون این ژنراتور به صورت دوبعدی شبیه‌سازی عددی شده و مشخصه‌های خروجی آن وارد یک کد ترمودینامیکی حاکم بر اجزای سیکل ترکیبی سه‌گانه شده است. سپس از طریق این کد ترمودینامیکی، عملکرد سیکل ترکیبی بر پایه ژنراتور ام.اچ.دی تجزیه و تحلیل شده است. در شبیه‌سازی عددی شرایط مرزی روی الکترودها اصلاح شده است. به این صورت که اختلاف پتانسیل میان هر جفت الکترودها به صورت جداگانه و تابعی از جریان ام.اچ.دی درون کانال در نظر گرفته شده است.

## ۲. معادله‌های حاکم

معادلات حاکم شامل دو بخش عمده، روابط هیدرودینامیک مغناطیسی مربوط به ژنراتور ام.اچ.دی و روابط ترمودینامیکی سیکل ترکیبی سه‌گانه است.

### ۱.۲ جریان درون ژنراتور ام.اچ.دی

$\vec{J} \cdot \vec{E}$ ، تولید گرمای ناشی از اتلافات اهمی و  $J_x B$  و  $J_y B$  مربوط به نیروی لورنتز<sup>۲</sup> ( $\vec{F}_L$ ) می‌باشد. طبق نیروی لورنتز  $\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}$  بر جریان الکتریکی که در یک میدان مغناطیسی عمود بر آن جریان دارد، نیرویی عمود بر میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی اعمال می‌شود. در مولد، جهت این نیرو و سرعت سیال در خلاف یکدیگر است [۱۲].

معادله حالت، معادله گاز ایدئال  $p = \rho RT$  است.

#### ۱.۱.۲ معادلات هیدرودینامیکی

معادلات ام.اچ.دی مربوط به ژنراتور در حالت کلی شامل معادلات ناویر-استوکس دارای ترم‌های چشمه<sup>۳</sup> الکترومغناطیسی، معادلات ماکسول و قانون اهم<sup>۴</sup> تعمیم‌یافته‌اند. معادلات بقایی ناویر استوکس با ترم‌های چشمه الکترومغناطیسی برای جریان تراکم‌پذیر دوبعدی با رینولدز مغناطیسی ( $Re_m = \bar{\mu} \sigma u d_h$ ) کوچک، مطابق معادله (۱) است [۱۱]:

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}_v}{\partial y} + S = 0 \quad (1)$$

که در آن

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} (E_t + p)u \\ \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \end{pmatrix}, \vec{G} = \begin{pmatrix} (e + p)v \\ \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \end{pmatrix}$$

$$\vec{F}_v = - \begin{pmatrix} u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + k \frac{\partial T}{\partial x} \\ 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \end{pmatrix}, \vec{G}_v = - \begin{pmatrix} u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + k \frac{\partial T}{\partial y} \\ 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} -\vec{J} \cdot \vec{E} \\ 0 \\ -J_y B \\ J_x B \end{pmatrix}$$

و تانسورهای تنش برشی و آنتالپی کل به ترتیب طبق معادلات (۲) تا (۵) تعریف می‌شوند:

$$\tau_{xx} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$\tau_{yy} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$E_t = \rho e_0 + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \quad (5)$$

عبارت S در معادله (۱)، ترم‌های منبع الکترومغناطیسی را بیان می‌کند که

#### ۲.۱.۲ معادلات الکترومغناطیسی

معادلات الکترومغناطیسی شامل معادلات ماکسول، معادله پیوستگی جریان الکتریکی و قانون اهم تعمیم‌یافته است. چگالی جریان الکتریکی مطابق قانون اهم با صرف‌نظر از پارامتر هال الکترون و یون، مطابق رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (6)$$

چون تحرک‌پذیری الکترون و لذا پارامتر هال<sup>۳</sup> در گازهای احتراق کوچک است، از پارامتر هال الکترون صرف‌نظر شده است. از طرفی پارامتر لغزش یون حدود ۴۰ تا ۳۰۰ مرتبه از پارامتر هال الکترون کمتر است، پس پارامتر هال یون نیز قابل صرف‌نظر است [۱۳]. معادله پیوستگی جریان الکتریکی نیز به صورت رابطه (۷) است:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (7)$$

که طبق آن، چگالی جریان الکتریکی خروجی از آند برابر چگالی جریان الکتریکی به کاتد است.

معادلات ماکسول، روابط مربوط به کوپل شدن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به یکدیگر را نشان می‌دهد که به ترتیب در معادلات (۸) تا (۱۱) آورده شده است [۱۴]:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (11)$$

با فرض رینولدز مغناطیسی<sup>۴</sup> خیلی کوچک، معادله (۱۰) از روابط چهارگانه ماکسول به صورت معادله (۱۲) ساده می‌شود:

2. Lorentz  
3. Hall  
4. Magnetic Reynolds

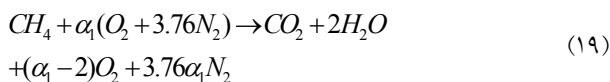
1. Five-wave model

گرمکن هوای دمابالا برای پیش‌گرمایش هوای ورودی به محفظه احتراق و سیستم تمیزکننده گازهای خروجی از دودکش است. مرحله تراکم هوا در سیکل برایتون در دو مرحله انجام می‌شود که در بین دو مرحله از یک خنک‌کن میانی استفاده شده است. این خنک‌کن بخشی از گرمای گرفته از سیال هوا را برای گرمایش سوخت استفاده می‌کند. سیکل توربین بخار شامل پمپ آب، بویلر بازیاب<sup>۲</sup> توربین بخار و کندانسور است.

### ۱.۲.۲. موازنه جرم و انرژی

#### محفظة احتراق

حرارت ورودی به سیکل ترکیبی سه‌گانه از طریق محفظه احتراق تأمین می‌شود، به این صورت که هوای پیش‌گرم‌شده با سوخت گازی متان واکنش می‌دهد و سیال ورودی به کانال ام.اچ.دی را به دمای مورد نیاز می‌رساند. معادله احتراق گاز متان در حالت کلی، به صورت معادله (۱۹) در نظر گرفته می‌شود [۲۰]:



ورودی به محفظه احتراق، سوخت گازی متان و هواست که سوخت در خنک‌کن میانی سیکل توربین گاز تا دمای  $T_{CH_4}$  و هوا در مبدل حرارتی دما بالا تا دمای  $T_{th}$  پیش‌گرم می‌شود. دبی جرمی هوا با فرض کردن آلفا ( $\alpha$ ) معلوم می‌شود و دبی جرمی سوخت از حاصلضرب دبی مولی متان حاصل از معادله (۲۱) و جرم مولکولی آن حاصل می‌شود. دما و دبی جرمی گازهای خروجی از محفظه احتراق که همان دبی جرمی و دمای ورودی به نازل است، به ترتیب با  $\dot{m}_{Flue}$  و  $T_{Flue}$  نمایش داده می‌شود. حال با توجه به معادله پیوستگی دبی جرمی در محفظه احتراق، رابطه (۲۰) برقرار است:

$$\dot{m}_{R-CC} = \dot{m}_{P-CC} = \dot{m}_{Flue} \quad (20)$$

که با استفاده از دبی جرمی مواد واکنش‌دهنده در معادله احتراق، تعداد مول مورد نیاز سوخت از رابطه (۲۱) حاصل می‌شود:

$$\dot{n}_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{R-CC}}{M_{CH_4} + \alpha(M_{O_2} + 3.76M_{N_2})} \quad (21)$$

برای یافتن دمای هوای ورودی به محفظه احتراق از موازنه انرژی برای واکنش احتراق مطابق معادله (۲۲)، با فرض آدیاباتیک بودن محفظه احتراق استفاده شده است [۲۱]:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (12)$$

از معادله (۱۲) می‌توان دریافت که  $\vec{E} = -\nabla\phi$  و پتانسیل میدان الکتریکی است. حال با جایگذاری معادله (۶) در معادله (۷) و جایگذاری  $-\nabla\phi$  به جای  $\vec{E}$ ، معادله پواسون به صورت معادله (۱۳) می‌شود:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = -\sigma [\nabla \cdot (\vec{u} \times \vec{B})] \quad (13)$$

که از رابطه (۱۳)، پتانسیل الکتریکی به دست می‌آید.

پارامترهای عمده کارایی ژنراتور ام.اچ.دی، ضریب بار، توان الکتریکی و نسبت استخراج آنتالپی است. ضریب بار برای مولد برابر با نسبت ولتاژ خارجی بار به ولتاژ تولیدی در مولد است که از رابطه (۱۴) حاصل می‌شود [۱۵ و ۱۶]:

$$k = E_y / uB \quad (14)$$

و از آنجایی که همیشه مقداری افت ولتاژ درون ژنراتور ام.اچ.دی وجود دارد،  $0 < k < 1$  [۱۷] است. اختلاف پتانسیل میان یک آند و کاتد که به فاصله  $d_g$  از هم قرار دارند، مطابق رابطه (۱۵) حاصل می‌شود [۱۸]:

$$\Delta\phi_y = kBud_g \quad (15)$$

توان الکتریکی خروجی و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور نیز به ترتیب مطابق روابط (۱۶) و (۱۷) حاصل می‌شود [۱۶ و ۱۹]:

$$P_M = \int_V \vec{J} \cdot \vec{E} dV \quad (16)$$

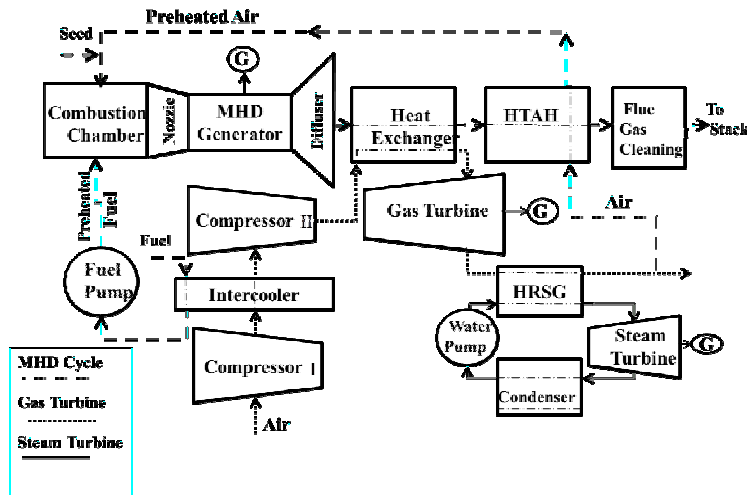
$$EE = \frac{P_M}{\dot{m}h_{i-MHD}} \quad (17)$$

عدد بی‌بعد مناسب برای بررسی اثر الکترومغناطیس بر جریان هیدرودینامیک در راستای طولی، پارامتر مؤثر است. این پارامتر نسبت نیروهای ام.اچ.دی به نیروهای اینرسی است که مطابق رابطه (۱۸) حاصل می‌شود [۱]:

$$\delta = \frac{\sigma B^2 L_{MHD} d_g}{\dot{m}} \quad (18)$$

### ۲.۲. سیکل ترکیبی سه‌گانه<sup>۱</sup>

سیکل ترکیبی سه‌گانه (TC) پیشنهادی مطابق شکل (۱) شامل سیکل باز ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی به‌عنوان مولد بالادستی، سیکل توربین گاز به‌عنوان سیکل میانی و چرخه توربین بخار به‌عنوان سیکل پایین‌دستی می‌باشد. سیکل باز ام.اچ.دی شامل محفظه احتراق، مولد ام.اچ.دی، مبدل حرارتی برای گرم کردن سیال عامل سیکل برایتون،



شکل (۱): شماتیک سیکل ترکیبی سه گانه پیشنهادی (TC)

### مبدل حرارتی<sup>۲</sup>

در این مبدل حرارتی، گازهای گرم خروجی از مولد ام.اچ.دی سیال عامل سیکل برایتون را گرم می‌کند. طبق رابطه کارایی مبدل حرارتی، مقادیر  $T_{e-flue-HE-min}$  (حداقل دمای محصولات احتراقی خروجی از مبدل حرارتی) مطابق رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{HE} = \frac{\dot{m}_{Flue} \int_{T_{e-flue-HE}}^{T_{e-flue-HE-min}} C_{P-flue}(T) dT}{\dot{m}_{Flue} \int_{T_{e-flue-HE}}^{T_{air-HE}} C_{P-flue}(T) dT} \quad (26)$$

با نوشتن معادله انرژی برای مبدل حرارتی به صورت معادله (۲۷)، دمای محصولات احتراق خروجی از این مبدل به دست می‌آید:

$$\dot{m}_{Flue} \int_{T_{e-flue-HE}}^{T_{air-HE}} C_{P-flue}(T) dT = \dot{m}_{air} \int_{T_{air-GT}}^{T_{air-HE}} C_{P-air}(T) dT \quad (27)$$

### بازیاب حرارتی

در شکل (۲) دیاگرام دما-سرخ حرارتی، بازیاب حرارتی ژنراتور بخار فشار تک-مرحله‌ای نشان داده شده است. با اعمال قانون اول ترمودینامیک برای سوپرهیتر<sup>۳</sup> و تبخیر کننده<sup>۴</sup>، موازنه انرژی برای این قسمت از بازیاب حرارتی ژنراتور بخار، به صورت معادله (۲۸) نوشته می‌شود و دبی جرمی سیال آب ورودی به توربین بخار به دست می‌آید:

$$\dot{m}_{air} \int_{T_2}^{T_1} C_{P-air} dT = \dot{m}_s (h_6 - h_5) \quad (28)$$

که  $h_6$  آنتالپی آب مافوق‌گرم ورودی به توربین بخار و  $T_2$  دمای هوا در نقطه ۲ می‌باشد و از رابطه (۲۹) حاصل می‌شود [۵]:

$$T_2 = T_5 + PP \quad (29)$$

2. Heat Exchanger
3. Super heater
4. Evaporator

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4} + \dot{m}_{CH_4} h_{CH_4} + \dot{m}_{O_2-R} h_{O_2-R} \\ + \dot{m}_{N_2-R} h_{N_2-R} = \dot{m}_{CO_2} h_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} h_{H_2O} \\ + \dot{m}_{O_2-P} h_{O_2-P} + \dot{m}_{N_2-P} h_{N_2-P} \end{aligned} \quad (22)$$

### مبدل حرارتی دما بالا<sup>۱</sup>

کارایی مبدل حرارتی نسبت مقدار حرارت واقعی منتقل شده به مقدار حرارت قابل انتقال در اندازه بی‌نهایت است که در مبدل حرارتی دما بالای در نظر گرفته شده در سیکل پیشنهادی، طبق رابطه (۲۳) بیان می‌شود [۲۱]. مقادیر  $T_{e-flue-HTAH-min}$  (حداقل دمای محصولات احتراقی خروجی از مبدل حرارتی دما بالا) به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{HTAH} = \frac{\dot{m}_{Flue} \int_{T_{e-flue-HTAH-min}}^{T_{e-flue-HE}} C_{P-flue}(T) dT}{\dot{m}_{air} \int_{T_{e-flue-HTAH}}^{T_{air-HE}} C_{P-air}(T) dT} \quad (23)$$

حال با نوشتن معادله انرژی برای این مبدل، دمای هوای خروجی از آن مطابق رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$\dot{m}_{Flue} \int_{T_{e-flue-HTAH}}^{T_{e-flue-HE}} C_{P-flue}(T) dT = \dot{m}_{air} \int_{T_{ph-i-HTAH}}^{T_{ph}} C_{P-air}(T) dT \quad (24)$$

که  $T_{air-i-HTAH}$  برابر با دمای هوای خروجی از بویلر بازیاب است.

که  $C_{P-Flue}$  از رابطه (۲۵) حاصل می‌شود [۲۱]:

$$C_{P-Flue} = \frac{1}{\dot{m}_{Flue}} (\dot{m}_{CO_2} C_{P-CO_2} + \dot{m}_{H_2O} C_{P-H_2O} + \dot{m}_{O_2-P} C_{P-O_2} + \dot{m}_{N_2-P} C_{P-N_2}) \quad (25)$$

1. High Temperature Air Heater

$$P_{Mag} = V \rho_{SC} J_c^2 \quad (32)$$

که مقاومت ویژه نیوبیوم-تیتانیوم  $\rho_{NbTi}$  در دمای ۴٫۲ کلوین، حدوداً بین  $10^{-4}$  تا  $10^{-2}$  اهم متر [۲۵] می‌باشد و در این تحقیق، مقاومت ویژه نیوبیوم-تیتانیوم  $10^{-4}$  فرض شده است. تغییرات چگالی جریان الکتریکی بحرانی آن با شدت میدان مغناطیسی با برآزش از نمودار (۱) [۲۴]، مطابق رابطه (۳۳) به دست آمده است:

$$J_{c-NbTi} = -4 \times 10^8 B + 9 \times 10^9 \quad (33)$$

### ۳.۲.۲. راندمان حرارتی بهینه

راندمان حرارتی بهینه سیکل ترکیبی برابر با نسبت کار خالص به انرژی ورودی به سیکل ترکیبی است که به صورت خلاصه در این تحقیق راندمان گفته شده است. از آنجایی که ضریب آلفا در معادله (۲۱)، به گونه‌ای محاسبه شده که از حداکثر حرارت گازهای حاصل از احتراق ورودی به مبدل حرارتی دمابالا استفاده شده است. پس دبی جرمی متان و در پی آن راندمان سیکل ترکیبی، بهینه می‌شود. این راندمان مطابق رابطه (۳۴) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}} \quad (34)$$

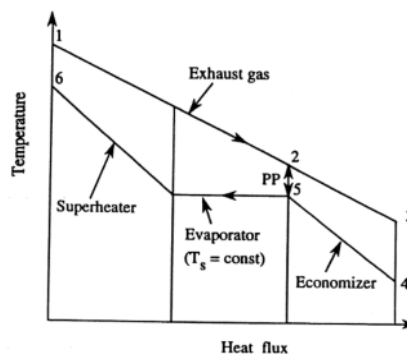
که  $\dot{Q} = \dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4}$  انرژی ورودی به سیکل سه‌گانه است و از طریق گاز متان ورودی به محفظه احتراق تأمین می‌شود.

## ۳. راست‌آزمایی

### ۱.۳. راست‌آزمایی شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی ژنراتور ام.اچ.دی پنج جفت الکترودی مربوط به کار شیومی و همکاران، با نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفته است. این کانال دارای طول ۰٫۲ متر و عرض ۰٫۰۴ و اندازه شبکه  $250 \times 50$  می‌باشد. شرایط جریان ورودی به کانال با ویژگی‌های دما، فشار و ماخ به ترتیب ۱۰۰۰ کلوین، ۱ بار و ۴ و همچنین دیواره‌های عایق با دمای ۱۰۰۰ کلوین تعیین شده است. هدایت الکتریکی برابر ۲۰ زیمنس بر متر و ثابت فرض شده است. میدان مغناطیسی ۸ تسلا یکنواخت اعمال شده است. اختلاف پتانسیل بین دو الکترودی با استفاده از رابطه (۱۵) و فرض ضریب بار ۰٫۵، برابر با ۳۰۰ ولت شده است. مطابق شکل (۳) گرمای ژول در طول کانال روی دیواره الکترودها در تحقیق حاضر، با کار شیومی و همکاران، با خطای ناچیزی بر یکدیگر منطبق‌اند.

که  $T_3$  دمای آب اشباع در فشار بازیاب حرارتی ژنراتور بخار و پینچ پوینت<sup>۱</sup> (PP) کمترین اختلاف دما بین دمای گاز خروجی از توربین گاز و دمای مایع اشباع ورودی اوپراتور است. مقدار این پارامتر برای بازیاب حرارتی بدون مشعل معمولاً بین ۵ تا ۱۶٫۶ کلوین [۲۳] می‌باشد که در اینجا ۱۰ کلوین فرض شده است. دمای هوای خروجی از بازیاب حرارتی ژنراتور بخار ( $T_3$ ) با نوشتن موازنه انرژی برای کل مبدل طبق معادله (۳۰) به دست می‌آید [۵].



شکل (۲): نمودار تغییرات دما با شار حرارتی در بازیاب حرارتی

تک‌مرحله‌ای [۵]

$$Q_{HRSG} = \dot{m}_{air} \int_{T_3}^{T_1} C_{p-air} dT = \dot{m}_s (h_6 - h_4) \quad (30)$$

که  $h_4$  آنتالپی آب متراکم ورودی به بازیاب حرارتی ژنراتور بخار است.

### ۲.۲.۲. کار تولیدی و کار مصرفی

کار مورد نیاز این سیکل ترکیبی از طریق ژنراتور ام.اچ.دی، توربین گاز و توربین بخار تأمین می‌شود که درصدی از این کار در آهن‌ربای ابر رسانا، کمپرسورهای سیکل توربین گاز و پمپ در سیکل توربین بخار مصرف می‌شود. مقدار کار ژنراتور ام.اچ.دی از شبیه‌سازی حاصل می‌شود، ولی کار تولیدشده در توربین گاز و توربین بخار و کار مصرفی کمپرسور و پمپ، طبق قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل در حالت پایا و طی فرایند آیزنتروپیک محاسبه می‌شود. کار خالص سیکل سه‌گانه پیشنهادی مطابق رابطه (۳۱) حاصل می‌شود:

$$\dot{W}_{net} = P_M - P_{Mag} + \dot{m}_{air-GT} (w_{GT} - w_{Cl} - w_{CH}) + \dot{m}_s (w_{ST} - w_P) \quad (31)$$

آهن‌ربای ابر رسانا یک آهن‌ربای الکتریکی است که از سیم‌پیچ با سیم‌های ابر رسانا تشکیل شده است. این سیم‌های ابر رسانا که معمولاً از جنس نیوبیوم-تیتانیوم<sup>۲</sup> هستند، نسبت به سیم‌های معمولی، جریان الکتریکی بسیار بیشتری از خود می‌گذرانند و البته یک میدان مغناطیسی قوی تری پدید می‌آورد. توان الکتریکی مصرفی آهن‌ربای ابر رسانا مطابق رابطه (۳۲) حاصل می‌شود [۲۴]:

1. Pinch Point  
2. NbTi

دو طرفه ۱/۰۲ به سمت میانه کانال و طول الکترودها با ضریب رشد دو طرفه ۱/۰۱ به سمت میانه الکترودها تقسیم بندی شده است.

برای شبیه سازی عددی جریان درون مولد ام.اچ.دی از ماژول هیدرو دینامیک مغناطیسی در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. به منظور حل معادلات ناویر استوکس، از حل گر مبتنی بر چگالی (Density Based) به صورت ضمنی و برای حل معادله پواسون، از ماژول هیدرو دینامیک مغناطیسی روش پتانسیل الکتریکی استفاده شده است. شرط مرزی ورودی و خروجی کانال به ترتیب فشار ورودی (Pressure Inlet) و فشار خروجی (Outlet Pressure) در نظر گرفته شده است و دبی جرمی ورودی و دمای آن نیز به ترتیب برابر با ۵۴ کیلوگرم بر ثانیه و ۲۵۰۰ کلون در نظر گرفته شده است. روی دیواره های عایق، ورودی و خروجی مؤلفه عمودی جریان الکتریکی صفر است [۱۱]، پس در این مرزها روابط (۳۵) و (۳۶) برقرار می باشد [۲۶ و ۲۷]:

$$\vec{J} \cdot \vec{n} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = (\vec{u} \times \vec{B}) \cdot \vec{n} \quad (36)$$

روی الکترودها نیز مؤلفه مماسی میدان الکتریکی صفر است ( $\vec{E} \times \vec{n} = 0$ ) و پتانسیل الکتریکی در آن ثابت است. اختلاف پتانسیل میان هر جفت الکترودها، تابعی از جریان ام.اچ.دی درون کانال در نظر گرفته شده است که شرایط مرزی روی تأمین جفت الکترودها طبق روابط (۳۷) تا (۳۹) به دست آمده است:

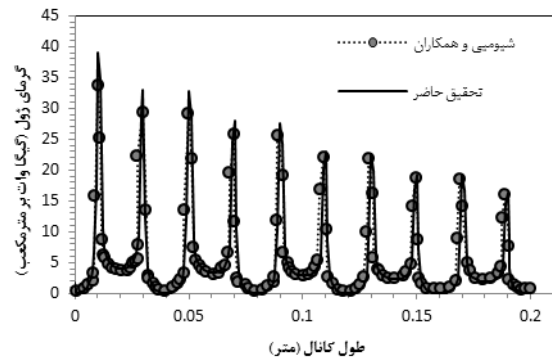
$$\int_{i+} \vec{J} \cdot \vec{n} = \int_{i-} \vec{J} \cdot \vec{n} \quad (37)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} > 0 \quad (38)$$

$$\Delta \phi_i = E_{y-i} d_{g-i} \quad (39)$$

### ۵. کد ترمودینامیکی سیکل ترکیبی سه گانه

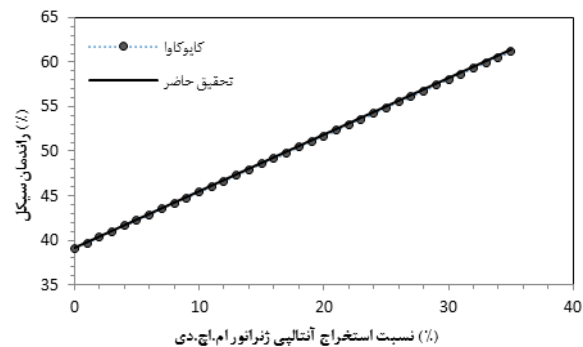
اساس طراحی این سیکل سه گانه، سیکل ۲۵ مگاواتی توربین گاز است. ژنراتور ام.اچ.دی باید قابلیت تأمین انرژی ورودی به این توربین گاز را دارا باشد و همه انرژی مورد نیاز توربین بخار نیز از انرژی خروجی این توربین تأمین می شود. یک کد برای روابط ترمودینامیکی حاکم بر سیکل ترکیبی سه گانه نوشته شده و عملکرد سیکل بر پایه ژنراتور هیدرو دینامیک مغناطیسی تجزیه و تحلیل شده است. مهم ترین قسمت از کد ترمودینامیکی، مربوط به سیکل باز ژنراتور ام.اچ.دی است. این کد به گونه ای نوشته شده است که بتوان از حداکثر پتانسیل هیدرو دینامیکی سیال خروجی ژنراتور ام.اچ.دی استفاده کرد و در واقع راندمان بهینه سیکل ترکیبی را به دست آورد که دیاگرام آن در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۳): تغییرات گرمای ژول در طول کانال روی دیواره الکترودها

### ۲.۳. راست آزمایی کد ترمودینامیکی سیکل ترکیبی سه گانه

به منظور راست آزمایی کد ترمودینامیکی، سیکل ترکیبی دو گانه I در تحقیق کایوکاوا انتخاب شده است. تغییرات راندمان حرارتی کل بر حسب نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی مربوط به این سیکل، با این کد به دست آورده و نمودار آن در شکل (۴) نشان داده شده است. سیکل دو گانه I، شامل سیکل باز ام.اچ.دی به عنوان سیکل بالادستی و سیکل پایین دستی توربین بخار است. محصولات حاصل از احتراق سوخت جامد با هوای غنی شده با اکسیژن وارد ژنراتور ام.اچ.دی می شوند و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی نیز بین صفر تا ۳۵ درصد فرض شده است.

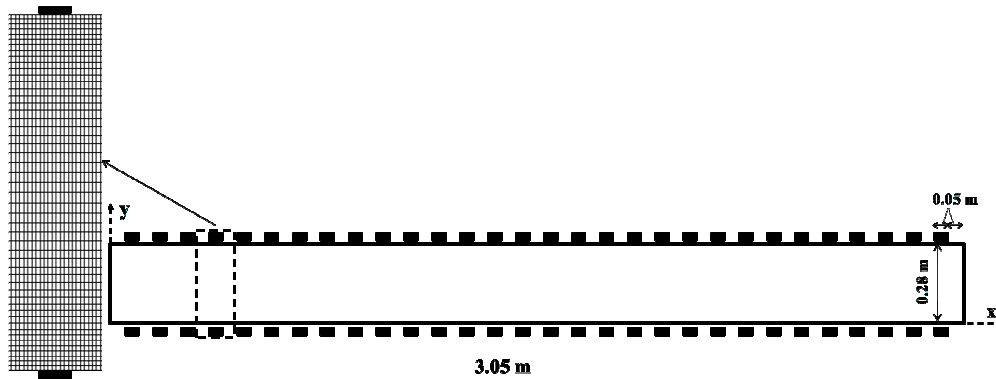


شکل (۴): تغییرات راندمان سیکل دو گانه I با نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی

### ۴. هندسه مولد ام.اچ.دی، شبیه سازی عددی و شرایط

#### مرزی

یک کانال با طول ۳ متر و عرض ۰/۲۸ متر به عنوان ژنراتور ام.اچ.دی الکترودها گسسته در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۵) این مولد دارای ۳۰ جفت الکترودها است که طول هریک و دیواره های عایق میانی آن ها برابر با ۰/۰۵ متر است. با بررسی استقلال از شبکه، این کانال با ۱۰۲۴×۵۰ سلول شبکه بندی شده است. مطابق شکل (۵) عرض کانال با ضریب رشد



شکل (۵): شماتیک هندسه کانال ژنراتور ام.اچ.دی با مقطع ثابت

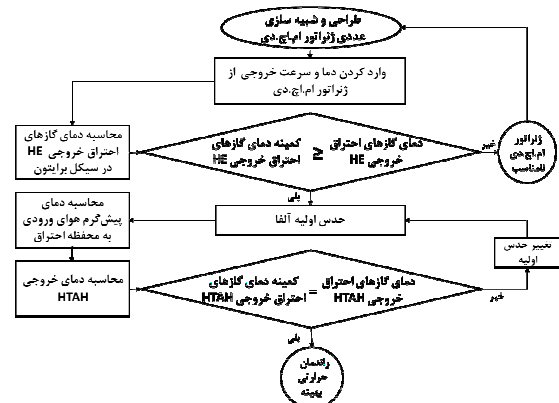
فشار ورودی و راندمان آیزنتروپیک، فرضیات سیکل می‌باشند و دمای خروجی، دبی جرمی و کار با استفاده از کد ترمودینامیکی محاسبه شده‌اند.

### ۱.۶. مشخصه شدت میدان مغناطیسی

به منظور بررسی اثر شدت میدان مغناطیسی، ژنراتور ام.اچ.دی مقطع ثابت با ماخ ورودی ۰٫۳ و اعمال شدت میدان مغناطیسی در بازه ۱ تا ۸ تسلا شبیه‌سازی شده که مقادیر پارامتر مؤثر متناظر با آن در بازه ۰٫۳ تا ۱۹٫۵ است.

مطابق شکل (۷) از ۱ تا ۳ تسلا، توان الکتریکی حدود ۱٫۴۵ مگاوات افزایش داشته است، در حالی که از ۳ تا ۵ تسلا این افزایش می‌تواند به ۶٫۵ مگاوات رسیده است. علت این امر در افزایش برآیند اثر اصطکاکی نیروی لورنتز و افت گرمای اهمی بر افزایش سرعت در شدت میدان مغناطیسی‌های بزرگ‌تر از ۳ تسلاست؛ زیرا مطابق شکل (۸) متوسط عدد ماخ در کانال از ۰٫۳۶ برای ۳ تسلا به ۰٫۴۵ برای ۵ تسلا افزایش یافته است. در شدت میدان مغناطیسی، بین ۵ تا ۶ تسلا در خروجی خفگی اتفاق می‌افتد که پارامتر مؤثر معادل آن پارامتر مؤثر بحرانی ( $\delta_{crit}$ ) است. با افزایش شدت میدان مغناطیسی توان تولیدی کم می‌شود، چون ماخ در خروجی نمی‌تواند بیشتر از ۱ شود، بدون اینکه مقدار آنتروپی کاهش یابد. طبق قانون دوم ترمودینامیک کاهش آنتروپی و در نتیجه افزایش عدد ماخ به بیشتر از ۱ غیرممکن است که در شکل (۸) نیز مشهود است. بنابراین این افزایش اضافی اصطکاک و حرارت باعث کاهش دبی جرمی و عدد ماخ خواهد شد که جریان به یک خط فانو<sup>۱</sup> و ریلی<sup>۲</sup> دیگر پرش می‌کند.

مطابق شکل (۶) اولین گام، انتخاب ژنراتور ام.اچ.دی مناسبی است دمای گازهای احتراق خروجی از آن، پس از تأمین حرارت مورد نیاز ورودی به توربین گاز بیشتر از  $T_{e-flue-HE-min}$  باشد. گام دوم حداکثر استفاده از حرارت باقیمانده گازهای خروجی از مبدل حرارتی در مبدل حرارتی دما بالاست که این حرارت صرف افزایش درصد هوای اضافه ورودی به محفظه احتراق و افزایش دمای پیش‌گرم آن می‌شود. در واقع درصد هوای اضافه تا حدی قابل افزایش است که دمای گازهای احتراق خروجی از مبدل حرارتی دما بالا از  $T_{e-flue-HTAH-min}$  کمتر نشود.



شکل (۶): دیاگرام کد سیکل باز ام.اچ.دی

## ۶. نتایج

در این بخش، اثر دو پارامتر عمده: شدت میدان مغناطیسی و عدد ماخ ورودی در ژنراتور ام.اچ.دی نشان داده شده در شکل (۵) بررسی شده است. به دلیل کاربرد این ژنراتور در بالادست سیکل، به منظور تولید توان و تأمین انرژی سیکل‌های پایین‌دستی، مهم‌ترین مشخصه‌های خروجی از آن توان الکتریکی و آنتالپی کل خروجی از آن می‌باشد. برای بررسی اثر این ژنراتور بر عملکرد سیکل ترکیبی، دو پارامتر مهم توان خالص سیکل و راندمان کل آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

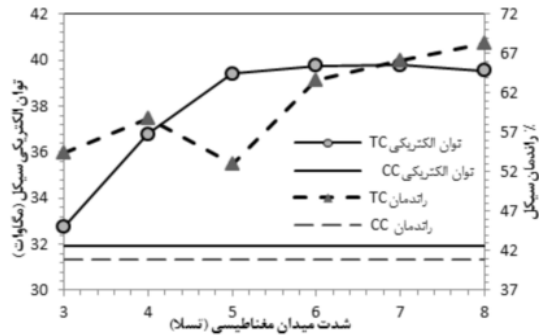
در ابتدا مشخصه‌های ترمودینامیکی اجزای اصلی سیکل‌های توربین گاز و توربین بخار در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول، دما و

1. Fanno  
2. Rayleigh

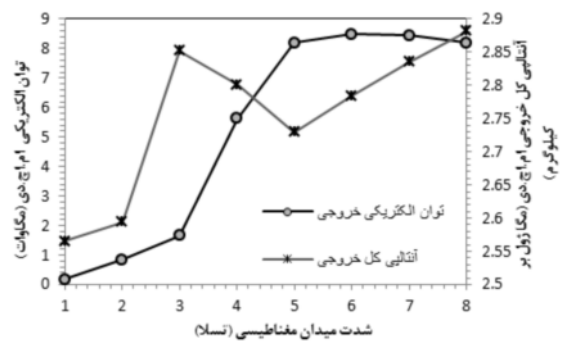


جدول (۱): مشخصه‌های ترمودینامیکی اجزای اصلی سیکل ترکیبی سه‌گانه

اجزا	دما ورودی (کلوین)	دما خروجی (کلوین)	فشار ورودی (بار)	دبی جرمی ورودی (کیلوگرم بر ثانیه)	راندمان آیزنتروپیک (%)	کار (مگاوات)
کمپرسور I	۲۹۸	۵۱۶٫۷۱۷	۱	۶۰	۹۰	-۱۳٫۳۱۹
کمپرسور II	۳۴۱٫۷۴	۵۸۳٫۸۳۸	۶	۶۰	۹۰	-۱۵٫۱۲۷
توربین گاز	۱۵۵۰	۷۹۰٫۶۶۸	۳۶	۶۰	۹۰	۵۳٫۱۶۲
توربین بخار	۸۷۳	۳۰۱٫۹۶	۶۰	۶٫۰۹	۹۰	۹٫۰۷۶
پمپ	۳۰۱٫۹۶	۳۸۳	۰٫۰۴	۶٫۰۹	۸۰	-۲٫۰۲۶



شکل (۹): نمودار تغییرات توان خالص و راندمان با شدت میدان مغناطیسی در  $Ma = 0.3$ ؛ سیکل ترکیبی سه‌گانه با ژنراتور ام.اچ.دی (TC) و سیکل ترکیبی دوگانه بدون ژنراتور ام.اچ.دی (CC)



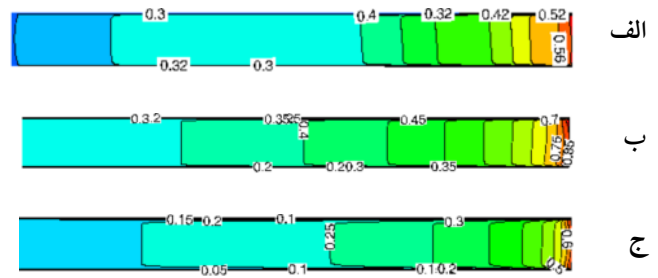
شکل (۷): نمودار تغییرات توان تولیدی و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی با تغییر شدت میدان مغناطیسی در  $Ma = 0.3$

## ۲.۶. مشخصه ماخ ورودی

در این قسمت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی در پنج ماخ ورودی مختلف  $0.3$ ،  $0.4$ ،  $0.5$ ،  $0.6$  و  $0.7$  آورده شده است. دمای ورودی در همه شبیه‌سازی‌ها برابر  $2500$  کلوین و شدت میدان مغناطیسی  $4$  تسلا در نظر گرفته شده است.

توان الکتریکی مطابق رابطه (۱۶) تابعی از چگالی جریان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی است که این دو پارامتر نیز با توجه به روابط (۶) و (۱۳)، تابعی از سرعت هستند. مطابق شکل (۱۰) با افزایش ماخ از  $0.3$  به  $0.4$ ، توان خروجی ژنراتور حدود  $0.7$  مگاوات افزایش می‌یابد، ولی از ماخ  $0.4$  تا ماخ  $0.7$  برخلاف انتظار توان الکتریکی کاهش می‌یابد. کاهش سرعت در کانال به دلیل افزایش اثر اصطکاکی نیروی لورنتز و افت گرمای اهمی به مقداری بیش از حالت خفگی است که در قسمت قبل توضیح داده شد.

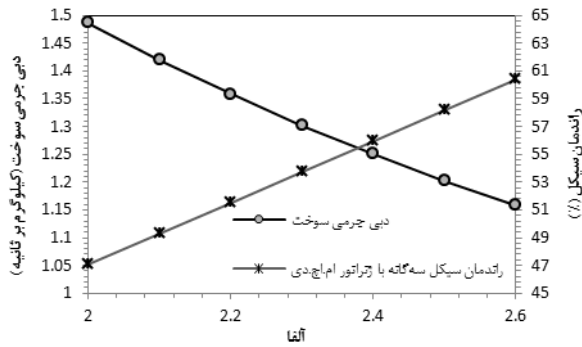
مطابق شکل (۱۱) وجود سیکل باز ژنراتور ام.اچ.دی در ماخ‌های مختلف، توان الکتریکی و راندمان سیکل TC را به ترتیب حداقل  $3$  مگاوات و  $9/5$  درصد نسبت به سیکل CC افزایش داده است. توان مصرفی آهن‌ربای ابرسانا ثابت است، پس تغییرات توان سیکل TC مطابق تغییرات توان در ژنراتور ام.اچ.دی می‌باشد. ولی اینکه چرا برخلاف توان الکتریکی، راندمان سیکل تا ماخ  $0.4$  کاهش و از آن به بعد افزایش یافته است، مربوط به مقدار دبی مصرف سوخت است.



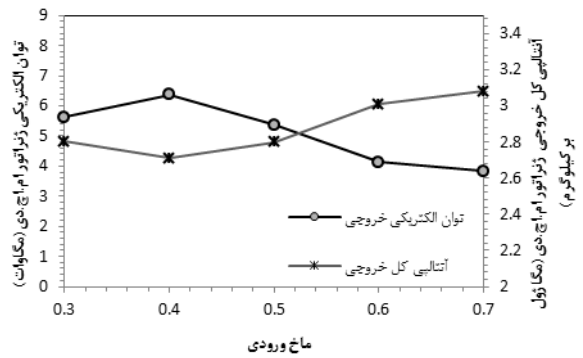
شکل (۸): کاناتور ماخ در کانال مقطع ثابت در  $Ma = 0.3$ ؛

الف.  $B = 3$  تسلا، ب.  $B = 5$  تسلا، ج.  $B = 8$  تسلا

مطابق شکل (۹) توان و راندمان سیکل از شدت میدان مغناطیسی  $3$  تسلا شروع شده است؛ زیرا انرژی خروجی ژنراتور ام.اچ.دی در شدت میدان مغناطیسی کمتر از این مقدار از انرژی مورد نیاز سیکل توربین گاز کمتر است. تغییرات توان خالص سیکل TC تابع تغییرات توان تولیدی ژنراتور ام.اچ.دی و توان مصرفی آهن‌ربای ابرسانا می‌باشد. تحت شدت میدان مغناطیسی  $5$  تسلا، هم حداکثر توان تولیدی خالص و هم حداقل راندمان سیکل اتفاق می‌افتد. این در حالی است که حداکثر مقدار راندمان سیکل ترکیبی در  $8$  تسلا می‌باشد؛ زیرا افزایش دبی جرمی سوخت مصرفی در پی کاهش آنتالپی کل خروجی ژنراتور می‌باشد که با افزایش دبی جرمی طبق معادله (۳۴) راندمان سیکل ترکیبی کاهش می‌یابد.



شکل (۱۲): نمودار تغییرات دبی جرمی سوخت و راندمان سیکل سه‌گانه با ژنراتور ام.اچ.دی با آلفا در  $B=4$  تسلا



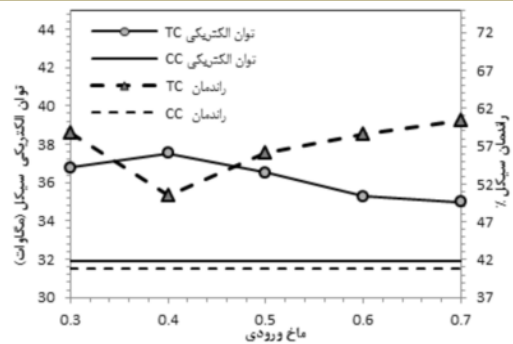
شکل (۱۰): نمودار تغییرات توان تولیدی و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی با تغییر ماخ ورودی در  $B=4$  تسلا

### ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی اثر ژنراتور ام.اچ.دی بر یک سیکل سه‌گانه پیشنهادی پرداخته شد، به همین منظور، جریان درون ژنراتور ام.اچ.دی با نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی شد. یک کد برای روابط ترمودینامیکی حاکم بر اجزای سیکل ترکیبی سه‌گانه با نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> نیز نوشته شد، تا بتوان عملکرد سیکل ترکیبی را بر پایه ژنراتور ام.اچ.دی تجزیه و تحلیل کرد. مهم‌ترین قسمت این کد ترمودینامیکی مربوط به سیکل باز ژنراتور ام.اچ.دی بود که به‌گونه‌ای نوشته شد که بتوان از حداکثر پتانسیل هیدروپنامیکی سیال خروجی ام.اچ.دی تجزیه و تحلیل کرد. نتایج حاصل به‌صورت کلی شامل موارد زیر است:

الف. در طراحی ژنراتور ام.اچ.دی مادون صوت، مهم‌ترین پارامتری که باید در نظر داشت، پارامتر مؤثر بحرانی ( $\delta_{crit}$ ) است. در این پارامتر ماخ خروجی کانال به ۱ می‌رسد و خفگی ایجاد می‌شود. نکتهٔ حائز اهمیت این است که برای ژنراتور ام.اچ.دی فروصوت بالادست سیکل ترکیبی علاوه بر حداکثر استخراج آنتالپی، دمای خروجی نیز به‌منظور تأمین انرژی مورد نیاز سیکل پایین دستی نیز مهم است. از این‌رو حالت بهینه برای طراحی ژنراتور ام.اچ.دی فروصوت بالادست سیکل ترکیبی حالتی است که در خروجی خفگی اتفاق افتاده و همچنین به دلیل زیاد بودن اثر اصطکاکی نیروی لورنتز و افت گرمای اهمی، دبی جرمی کانال کم شده باشد ( $\delta > \delta_{crit}$ ). که در این حالت هم توان تولیدی و هم دمای خروجی مناسب هستند. البته کاهش دبی جرمی نباید به حدی باشد که منجر به کاهش متوسط سرعت در کانال و در پی آن کاهش توان تولیدی ژنراتور ام.اچ.دی شود.

ب. ژنراتور ام.اچ.دی مقطع ثابت مادون صوت، برای ماخ ورودی بیشتر از ۰٫۴ نامناسب است. چون در ماخ‌های بیشتر پارامتر مؤثر بحرانی



شکل (۱۱): نمودار تغییرات توان خالص و راندمان با ماخ ورودی در  $B=4$  تسلا؛ سیکل ترکیبی سه‌گانه با ژنراتور ام.اچ.دی (TC) و سیکل ترکیبی دوگانه بدون ژنراتور ام.اچ.دی (CC)

مطابق جدول (۲) تا ماخ ۰٫۴ دبی سوخت افزایش و بعد از آن کاهش یافته است. کاهش مصرف سوخت ناشی از افزایش آنتالپی کل خروجی ژنراتور است و در نتیجه افزایش انرژی ورودی به مبدل حرارتی دما بالاست. همچنین آلفاهای به‌دست‌آمده در جدول (۲)، مقدار بیشینهٔ آن برای هر ماخ است؛ زیرا در مقادیر بیشتر از این آلفا، دمای محصولات احتراق خروجی از مبدل حرارتی دما بالا کمتر از  $T_{e-flue-HTAH-min}$  می‌شود. مطابق شکل (۱۲) در ماخ ورودی ۰٫۷ مقدار آلفا بیشینه برابر با ۲٫۶ است و دبی جرمی متان در این مقدار از آلفا به کمترین مقدار رسیده است.

جدول (۲): تغییرات مشخصه‌های محفظه احتراق با ماخ ورودی ژنراتور ام.اچ.دی در سیکل ترکیبی سه‌گانه

ماخ ورودی	آلفای بیشینه	دمای پیش‌گرم هوا (کلوین)	دبی جرمی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه)
۰٫۳	۲٫۴	۹۵۱٫۲	۱٫۲۵
۰٫۴	۲٫۱	۶۳۰٫۹	۱٫۴۹
۰٫۵	۲٫۳	۹۵۰٫۸	۱٫۳
۰٫۶	۲٫۵	۱۱۴۲٫۱	۱٫۲۱
۰٫۷	۲٫۶	۱۲۶۰٫۹	۱٫۱۵

د. ژنراتور ام.اچ.دی مناسب، راندمان سیکل ترکیبی سه گانه را نسبت به سیکل دوگانه فاقد ژنراتور ام.اچ.دی افزایش می دهد. این افزایش راندمان هم ناشی از افزایش توان تولیدی کل سیکل و هم کاهش مصرف سوخت است.

در شدت میدان مغناطیسی ۱ تا ۲ تسلا رخ می دهد، و نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی تنها حدود ۱ تا ۲ درصد است. ج. برای مطالعات تحلیلی ژنراتور ام.اچ.دی مقطع ثابت مادون صوت، نسبت استخراج آنتالپی ۱۰ درصد مناسب است.

### فهرست علائم و نشانه‌ها

$V$	حجم ( $m^3$ )	$\bar{B}$	بردار شدت میدان مغناطیسی (T)
$\dot{W}$	توان تولیدی (W)	$CH_4$	گاز متان
$x$	محور مختصات طولی	$CO_2$	گاز دی اکسید کربن
$y$	محور مختصات عرضی	$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
	<b>نشانه‌های یونانی</b>	$d_h$	قطر هیدرولیکی (m)
$\alpha$	درصد هوای اضافه	$d_g$	فاصله میان آند و کاتد (m)
$\delta$	پارامتر مؤثر	$e_0$	انرژی درونی ( $J \cdot kg^{-1}$ )
$\delta_{crit}$	پارامتر مؤثر بحرانی	$\bar{E}$	میدان الکتریکی ( $V \cdot m^{-1}$ )
$\varepsilon$	ضریب عملکرد مبدل حرارتی	$EE$	نسبت استخراج آنتالپی
$\varepsilon_0$	ضریب گذردهی خلأ ( $C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$ )	$\bar{F}_L$	بردار نیروی لورنتز (N)
$\phi$	پتانسیل الکتریکی (V)	$H_2O$	آب
$\mu$	نفوذ پذیری مغناطیسی ( $H \cdot m^{-1}$ )	$\bar{J}$	چگالی جریان الکتریکی ( $A \cdot m^{-2}$ )
$\bar{\mu}$	لرجهت دینامیکی ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )	$k$	ضریب هدایت حرارتی سیال ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\sigma$	هدایت الکتریکی ( $S \cdot m^{-1}$ )	$K$	ضریب بار
$\rho$	چگالی سیال ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$L_{MHD}$	طول کانال (m)
$\rho_{sc}$	مقاومت ویژه ابرسانا	$LHV$	ارزش حرارتی پایین ( $J \cdot kg^{-1}$ )
	<b>پایین نویس</b>	$\dot{m}$	دبی جرمی ( $kg \cdot s^{-1}$ )
$CC$	محفظه احتراق	$n_{CH_4}$	تعداد مول متان
$e$	خروجی	$O_2$	اکسیژن
$Flue$	گازهای حاصل از احتراق	$p$	فشار استاتیکی ( $N \cdot m^{-2}$ )
$GT$	توربین گاز	$P_M$	توان الکتریکی ژنراتور ام.اچ.دی (W)
$HE$	مبدل حرارتی	$P_{Mag}$	توان مصرفی آهن ربای ابرسانا (W)
$HTAH$	مبدل حرارتی دما بالا	$R$	ثابت جهانی خاص گازها ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$P$	محصولات واکنش	$Re_m$	عدد رینولدز مغناطیسی
$ph$	پیش گرم	$T$	دمای استاتیکی (K)
$R$	مواد واکنش دهنده	$\bar{u}$	بردار سرعت سیال ( $m \cdot s^{-1}$ )
$ST$	توربین بخار	$\dot{Q}_j$	افت گرمای ژول ( $W \cdot m^{-3}$ )

### مراجع

- [1] Aithal, S.M, "Characteristics of optimum power extraction in a MHD generator with subsonic and supersonic inlets". Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 765-771, 2009.
- [2] Kayukawa, N, "Open-cycle magnetohydrodynamic electrical power generation: a review and future perspectives". Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, pp. 33-60, 2004.
- [3] Malghan, V, "History of MHD power plant development" Energy Conversion and Management, Vol. 37, No. 5, pp. 569-590, 1996.
- [4] Xiaomei, ZH., Hoyu, LU., Dajun, XU., Guobiao, CAI., "Numerical Simulation of 2D Supersonic Magnetohydrodynamic Channel and Study on Hall Effect", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 24, No. 2, pp. 136-144, 2011.

- [5] Khartchenko, N., *Advanced Energy Systems*, Taylor & Francis, 1997.
- [6] Kirillin, V., Neporozhniy, P. S., Scheindlin, A. E., "A 25,000 kW Pilot MHD-Power Plant", *Energy Conversion*, Vol. 9, pp. 41-46, 1969.
- [7] Jackson W. D., Lawit R. A., Klett, M. G., Cutting, J. C., Maxwell, C. D., "Status of the Reference Dual Cycle MHD-Steam Power Plant", *Proceedings of the 16th SEAM*, Paper X.6, 1977.
- [8] Kayukawa, N., Aoki, Y., Ohtake, K., "MHD/Gas Turbine/Steam Turbine Triple Combined Cycle with Thermochemical Heat Recovery", *AIAA*, Vol. 97, pp. 6-1, 1997.
- [9] Kayukawa, N., "Comparisons of MHD Topping Combined Power Generation Systems", *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, No. 18, pp.1974-1953, 2000.
- [10] Salvatore P, C., Alessandra, P., "Performance Analysis of Integrated Systems Based on MHD Generators", *Energy Procedia*, Vol. 44, pp.1305-1314, 2014.
- [11] Ishikawa, M., Itoh, K., "Three Dimensional Constricted Electric Current near Anode and Cathode of Faraday MHD Generator", *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 2124-2111, 2003.
- [12] Ziegler, U., "An Adaptive Mesh Refinement Code for Gas Dynamics and MHD", *Computer Physics Communications*, Vol. 109, pp. 111-134, 1998.
- [13] Ju, ZX., Lu, YC., Jing, HB., "Open Cycle MHD Power Generation", Beijing University of Technology Press, pp. 45-65, 1998.
- [14] Bladel, J., *Electromagnetic Fields*, John Wiley & Sons, 2007.
- [15] Golovachev, Y.P., Sushchikh, S.Y., "Influence of Electrode Commutation on Magnetohydrodynamic Flow in a Supersonic Diffuser", *Technical Physic Letter*, Vol. 25, No. 5, pp. 337-340, 1999.
- [16] Gupta, G.P., Rohatgi, V.K., "Power Output Characteristics of a finitely Segmented Faraday MHD Generator", *Energy Conversion and Management*, Vol. 24, No. 2, pp. 137-142, 1984.
- [17] HaoYu, L.U., ChunHian, L., "Simulation of Three-Dimensional Nonideal MHD Flow at High Magnetic Reynolds Number", *Science China*, Vol. 53, No.1, pp. 206-212, 2010.
- [18] Trung, D.T., Messerle, H.K., "Power Output of Segmented MHD Faraday Generators with Hall Voltage Compensation", *Energy Conversion and Management*, Vol. 21, pp. 97-103, 1981.
- [19] Xiaomei, ZHENG., Hoayu, LU., Dajun, XU., Guobiao, CAI., "Numerical Simulation of 2D Supersonic Magnetohydrodynamic Channel and Study on Hall Effect", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, pp. 136-144, 2011.
- [20] Moran, M.J., Shapiro, H.N., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 2006.
- [21] Mc-Allister, S., Chen, J. Y., Fernandez-Pello, C., *Fundamentals of Combustion Processes*, Springer, 2011.
- [22] Bartlett, D.A., *The Fundamentals of Heat Exchangers*, American Institute of Physics, 1996.
- [23] Ganapathy. V., *Heat-Recovery Steam Generators: Understand the Basics*, Chemical Engineering Progress, 1996.
- [24] Weck, W., Ehrhart, P., Muller, A., Reiner, G., "Superconducting Inductive Pulsed Power Supply for Electromagnetic Launchers: Design Aspects and Experimental Investigation of Laboratory Set-up", *IEEE Transcation on Magnetic*, Vol. 33, No.1, pp. 524-527, 1997.
- [25] Musenich, R., Fabbriatore, P., Farinon, S., Greco, M., "Determination of the V-I Characteristic of NbTi Wires in a Wide Resistivity Range", *Physica C*, Vol. 401, pp. 260-264, 2004.
- [26] Gaitonde, D.V., "A High-Order Implicit Procedure for the 3-D Electric Field in Complex Magnetogasdynamic Simulations", *Computers & Fluids*, Vol. 33, pp. 345-374, 2004.
- [27] Fluent Inc, FLUENT 6.3., *Magnetohydrodynamics (MHD) Module Manual*, September 2006.