



مدلینگ و شبیه سازی ژنراتور به روش المان محدود جهت تولید برق از امواج دریا

عبدالکریم افروزه^{۱*}، رضا یزدان پناه^۲

*۱- دانشیار فیزیک، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران. afroozeh@lar.ac.ir

۲- استادیار مهندسی برق، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران. ryazdanpanah@lar.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳

چکیده

در این مطالعه برای مدل سازی ژنراتور از روش المان محدود به عنوان یکی از دقیق ترین روش های شبیه سازی برای محاسبات مورد نظر استفاده شده است که می تواند در سواحل و بندرگاهها و بدنه کشتی ها استفاده شود و حرکات نوسانی امواج آب رابه راحتی تبدیل به انرژی برق کند. در این مقاله مکانیزم این نوع مولد مدل سازی و شبیه سازی گردیده است. نتایج شبیه سازی ها نشان داد پیاده سازی و ساخت این مولد ها دارای بازدهی مناسب و صرفه اقتصادی بالایی است. ادر این مطالعه طراحی ژنراتور شامل روتور، استاتور و سیم بندی طور کامل بررسی خواهد شد. بدین منظور ابتدا روابط ریاضی مربوط به ژنراتور بیان گردیده و در انتها طراحی تحلیلی یک نمونه ژنراتور مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مطالعه بازده ژنراتور در حدود ۹۱/۸ درصد است. ژنراتور مورد نظر در سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه توانی معادل با ۱ کیلو وات تحویل می دهد.

* **عهده دار مکاتبات:** afroozeh@lar.ac.ir

کلمات کلیدی: انرژی تجدید پذیر، امواج دریا، انرژی موج

۱- مقدمه

انرژی ناشی از امواج دریا، یکی از انواع انرژی های تجدیدپذیر است که در کنار منابع دیگری نظیر انرژی خورشیدی و باد، مورد توجه قرار گرفته است. انرژی امواج و انرژی جزر و مد را می توان مهمترین زیر مجموعه های انرژی های دریایی به شمار آورد. به دلیل تفاوت های موجود در ویژگی ها و روش های فنی جذب آن ها، توسعه این دو منبع راه متفاوت و مستقلى را طی کرده است. نیروگاه های جزر و مدی به علت شباهت با نیروگاه های آبی و استفاده از فناوری های نو، به پیشرفت های شگرفی نایل آمده است. اما بروز مشکلات زیست محیطی باعث شده است که تحول و ایجاد تغییرات اساسی در روش کار ضروری شود [۱]. نیروگاه های امواج از تنوع زیادی برخوردار هستند. برخی بر روی آب شناورند و برخی دیگر در ساحل نصب می شوند. همچنین نحوه درگیری آن ها با امواج و در نتیجه نوع حرکتی که جذب می کنند با هم تفاوت بسیار دارد. علاوه بر کارهای مطالعاتی، نمونه های کوچکی نیز از برخی سیستم های موجی در نقاط مختلف جهان ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است.

امواج توسط ارتفاع، طول موج و دوره تناوبشان مشخص می شوند. قدرت امواج معمولاً بر حسب کیلووات بر متر بیان می شود که نمایانگر شدت انتقال یا عبور انرژی از یک خط فرضی به طول یک متر و موازی با جبهه موج است. امروزه فناوری

نحوه استناد به این مقاله: عبدالکریم افروزه، رضا یزدان پناه. مدلینگ و شبیه سازی ژنراتور به روش المان محدود جهت

تولید برق از امواج دریا. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱؛ ۹ (۴): ۵۹-۷۰.

DOR: [20.1001.1.20089813.1401.9.4.1.8](https://doi.org/10.20089813.1401.9.4.1.8)

تولید انرژی از موج اقیانوس ها وجود دارد، به طوری که بیش از ۴۰۰ اختراع در این زمینه به ثبت رسیده است که از آن ها به سه روش اصلی استفاده از کانالی به شکل مخروط ناقص، استفاده از حرکت عمومی امواج اقیانوس توسط مکانیزم های گوناگون و استفاده از یک ستون نوسانی آب می توان اشاره کرد [۲].

تولید انرژی از حرکت های نوسانی امواج دریا در سواحلی که سرعت باد زیاد هست توجیه پذیر است لذا جغرافیای محل نیز برای احداث این نوع مولدها مهم می باشد. چنین مکان هایی در همه جایافت نمی شوند. اما تا به حال تعداد نسبتاً زیادی شناسایی شده اند.

در حال حاضر تعداد کمی نیروگاه جزر و مدی در جهان احداث شده است. نخستین و بزرگ ترین آن ها که از نوع تک حوضچه ای و دو اثری بوده، با ظرفیت ۲۴۰ مگاوات در لارانس فرانسه تأسیس شده است که جنبه تجاری دارد. به غیر از آن، نیروگاه ۲۰ مگاواتی آنابولیس در کانادا، نیروگاه آزمایشی ۴۰۰ کیلوواتی کیسلایاگوبا در شوروی سابق و نیروگاه ۳/۲ مگاواتی جیانگزی در چین را می توان نامبرد. همچنین چند ایستگاه کوچک چند منظوره در چین احداث شده است. علاوه بر انرژی جزر و مد و امواج، انرژی حرارتی اقیانوس ها یا دریاها که از اختلاف دمای آب های سطحی و آب های عمق ۱۰۰۰ متری دریاها بزرگ استفاده کرده و یک سیکل کم راندمان و دما پایین ترمودینامیکی را بین این دو منبع حرارتی سرد و گرم برقرار می کند نیز مورد توجه و بهره برداری آزمایشی قرار گرفته است [3].

۲- اصول عملکرد مولد های انرژی از امواج

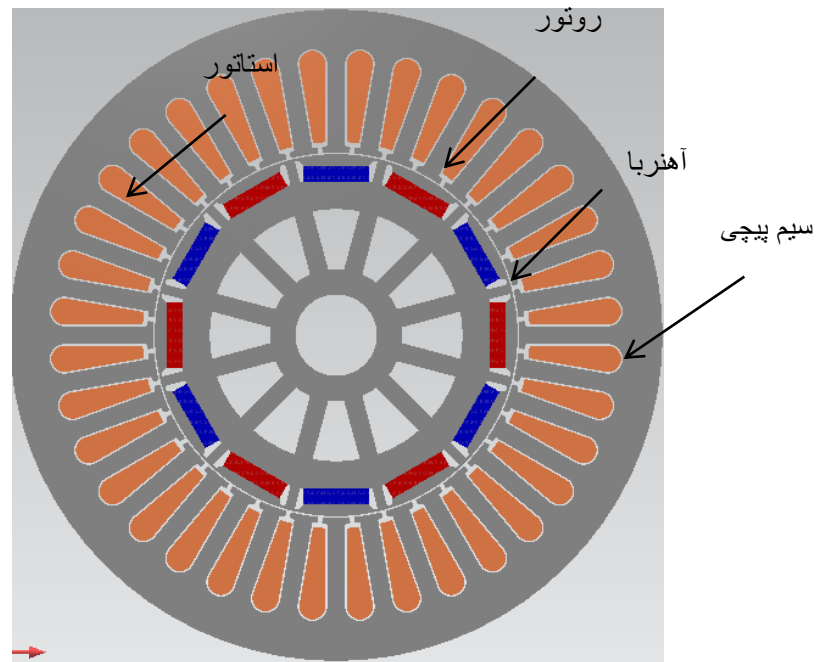
انرژی امواج عمدتاً ناشی از تاثیر باد روی سطح دریا است و باد، خود حالت خاصی از انرژی خورشیدی است که به عنوان منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر می تواند نقش مهمی در تامین نیازهای روزافزون انرژی جهان ایفا نماید. انرژی موج نامنظم، نوسانی و دارای فرکانس پایین است که قبل از اضافه شدن به شبکه باید به فرکانس ۶۰ هرتز تبدیل شود. بر اساس برآوردهای انجام شده، کل انرژی امواج در جهان ۲ تراوات (۲ میلیون مگاوات) انرژی الکتریکی باشد. به طور تقریبی حداکثر ۲۰ درصد از این انرژی قابل استحصال است. تا اواسط دهه ۹۰ بیش از ۱۲ سامانه متمایز برای استحصال این انرژی پیشنهاد شده و اکنون تعداد بیشتری از سامانه های جدید معرفی شده اند که تنها تعداد کمی از آن ها از نظر اقتصادی و فنی امکانپذیر هستند. انرژی موج را نمی توان در هر نقطه ای استحصال کرد. بهترین مناطق جهت احداث نیروگاه، نقاطی است که ارتفاع موج زیاد باشد بنابراین مناطق بادخیز که عموماً بین عرضهای جغرافیایی ۴۰ و ۶۰ درجه هستند، یا تنگه های باریک، حاشیه جزایر و قطعات خشکی مرتفع کنار دریا مناطق مناسبی محسوب می شوند. سواحل غربی اسکاتلند، شمال کانادا، جنوب آفریقا، و سواحل شمال شرقی و شمال غربی ایالات متحده آمریکا از نظر پتانسیل انرژی امواج غنی هستند. برآوردها حاکی از آن است که تنها در شمال غربی اقیانوس آرام امکان تولید ۴۰ تا ۷۰ کیلووات انرژی الکتریکی از هر متر از سواحل غربی وجود دارد. این سواحل بیش از ۱۶۰۰ کیلومتر طول دارند که به طور متوسط از هر کیلومتر سواحل لااقل می توان ۱۰ مگاوات انرژی تولید کرد [۴]. مروری بر ژنراتورهای بسیار کوچک برای استحصال انرژی از جزر و مد و امواج چه در رودخانه ها و چه در اقیانوسها در [۵] آمده است. همچنین می توان به سایر ملاحظات سیستم تولید برق از انرژی موج به عنوان مثال بحث الکترونیک قدرت آن اشاره نمود [۶]. مطالعاتی درخصوص تبدیل انرژی امواج در نقاط خاصی از زمین و با در نظر گرفتن ملاحظات و امکانات خاص نیز گزارش شده است [۷].

۳- مدل ریاضی

با توجه به اینکه مبدل دارای یک توربین می باشد که به یک ژنراتور سنکرون کوپل گردیده است در اینجا به بررسی این ژنراتور می پردازیم. مولدهای سنکرون طبق تعریف، سنکرون همزمان هستند، به این معنی که فرکانس الکتریکی تولید شده با سرعت چرخش مکانیکی مولد همزمان است. در این قسمت روابط ریاضی برای طراحی روتور و استاتور بیان شده است. هر ژنراتور الکتریکی متناسب با کاربردی که دارد، دارای مقادیر نامی و برخی ملاحظات طراحی می باشد برخی از مقادیر نامی ژنراتور به طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است. نمایی دو بعدی از ژنراتور مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است.

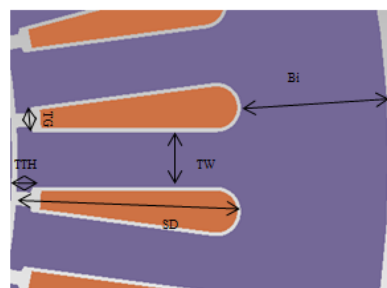
جدول ۱: مفروضات طراحی

مقدار	پارامتر
W1000	توان الکتریکی خروجی
V220	ولتاژ خروجی
Hz 50	فرکانس کاری
500rpm	سرعت نامی
N.m19/1	گشتاور نامی



شکل ۱: ژنراتور مورد نظر

طراحی استاتور شامل محاسبه‌ی قطر خارجی، قطر داخلی و ابعاد اساسی دندانه آن می‌باشد. قسمتی از استاتور به همراه ابعاد اساسی آن، که در شکل (۲) نشان داده شده است [۵].



شکل ۱: ابعاد اساسی استاتور

به منظور محاسبه‌ی قطر و طول محوری ژنراتور از رابطه‌ی (۱) استفاده می‌شود [۸].

$$P = C_0 D_o^2 L w \quad (1)$$

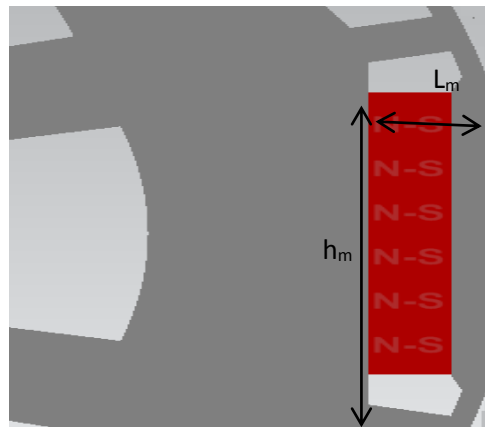
در این رابطه P توان خروجی ژنراتور (W)، D قطر ژنراتور (m)، L طول محوری ژنراتور (m)، w سرعت ژنراتور (rad/s) و C_0 از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$C_0 = 10.9624 \times B_{av} \times ac \times k_{sw} \quad (2)$$

در این رابطه B_{av} بارگذاری مغناطیسی (T)، ac بارگذاری الکتریکی (A/m) و k_{sw} ضریب سیم‌پیچ است. ضریب سیم‌پیچ معیاری است برای نشان دادن زاویه‌ی انحراف محور سیم‌پیچ‌های مربوط به هر فاز و در صورتی که ژنراتور شیار صحیح باشد برابر با ۱ است. مقدار بارگذاری الکتریکی با توجه به اطلاعات تجربی در نظر گرفته می‌شود [۹]. بعد از محاسبه‌ی C_0 از رابطه‌ی (۲) و جایگذاری در (۱) و با توجه به مقادیر معلوم توان و سرعت ژنراتور خواهیم داشت:

$$D_o^2 L = K \quad (3)$$

در این حالت با توجه به ملاحظات طراحی نسبتی برای قطر ژنراتور و طول محوری آن در نظر گرفته شده و مقدار آن‌ها با توجه به (۳) محاسبه خواهد شد. در نتیجه قطر خارجی استاتور و طول محوری ژنراتور بدین صورت محاسبه خواهد شد. تصویری از روتور ژنراتور رلوکتانسی سنکرون به همراه ابعاد اساسی آن در شکل (۳) نشان داده شده است. در این بخش روش محاسبه‌ی ابعاد مختلف روتور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۲: بخشی از روتور

اصولا در طراحی ژنراتورهای الکتریکی با توجه به تعداد قطب، یک نسبتی برای قطر استاتور به روتور در نظر گرفته می‌شود و با توجه به آن قطر خارجی روتور محاسبه می‌شود. برای محاسبه ضخامت آهنربا ابتدا باید مدار معادل مغناطیسی مناسب آن تشکیل شود. مدار معادل مغناطیسی یک قطب ژنراتور به صورت نشان داده شده در شکل (۴) خواهد بود. با توجه به این شکل R_g رلوکتانس فاصله هوایی، R_m رلوکتانس آهنربا، R_l رلوکتانس نشتی و ϕ_r شار پسماند آهنربا است. لازم به ذکر است که به دلیل بالا بودن رلوکتانس فاصله هوایی در برابر رلوکتانس هسته، از مقدار رلوکتانس های هسته روتور و استاتور در این مدار صرف نظر شده است. از طرفی رلوکتانس نشتی مقدار بسیار زیادی دارد و زمانی که به صورت موازی با یک رلوکتانس قرار می‌گیرد

قابل صرف نظر کردن است. در نتیجه می توان مدار معادل شکل ۴ را به صورت شکل ۵ ساده کرد. با دقت در این شکل شار فاصله هوایی برابر است با:

$$\phi_g = \frac{R_m}{R_m + R_g} \phi_r \quad (۴)$$

برای محاسبه عرض آهنربا با توجه به نسبت سطح مقطع آهنربا به فاصله هوایی داریم:

$$\frac{A_m}{A_g} = c_\emptyset \rightarrow \frac{h_m L}{2\pi R_o L} = c_\emptyset \rightarrow h_m = c_\emptyset \frac{2\pi R_o}{p} \quad (۵)$$

جریان نامی ژنراتور با توجه به توان ورودی و ولتاژ ژنراتور محاسبه می شود.

$$I = \frac{P_{out}}{3\eta V_{in} \cos \phi} \quad (۶)$$

بعد از محاسبه ی جریان با توجه به نوع خنک کنندگی ژنراتور چگالی جریانی برای آن در نظر گرفته می شود که مقدار آن با توجه به جدول (۲) انتخاب می گردد. بعد از انتخاب چگالی جریان سطح مقطع هادی شیار از رابطه ی (۷) بدست می آید.

$$A_w = \frac{I}{j} \quad (۷)$$

در نتیجه قطر هادی به کار رفته در استاتور برابر خواهد بود با:

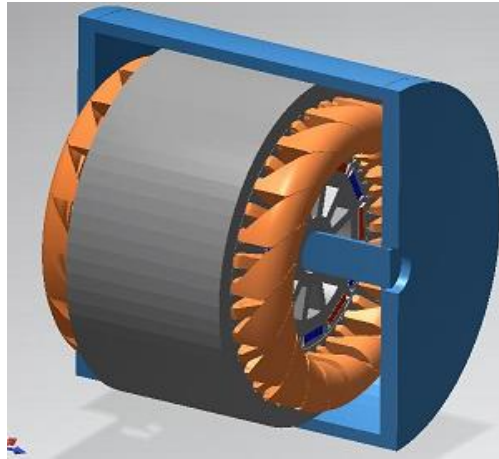
$$d_w = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \quad (۸)$$

۴-مراحل پیاده سازی در اجزای محدود

در اولین قدم می بایست نوع پروژه را مشخص نمود. انواع پروژه هایی که می توان تعریف کرد شامل طراحی دوبعدی، طراحی سه بعدی است. طراحی ۲ بعدی همان طور از نام آن پیداست، مختص تحلیل های در فضای دوبعدی است. بنابراین مش بندی ها در آن نیز به صورت دو بعدی خواهد بود. طراحی ۳ بعدی نیز برای شبیه سازی اشکال ۳ بعدی استفاده می شود. در گام اول با توجه به ابعاد قسمت های مختلف ماشین الکتریکی مورد نظر ساختار آن ترسیم می گردد. مدل دو بعدی از ژنراتور در شکل ۴ نشان داده شده است. با دقت در این شکل استاتور شامل ۳۶ شیار و روتور شامل ۱۲ آهنربا به صورت دهن شده است.

تصویری از استاتور ژنراتور به همراه ابعاد اساسی آن در شکل ۴ نشان داده شده است. این ابعاد شامل ارتفاع کفشک دندانه ی استاتور (Tth)، طول فاصله ی هوایی بین دو دندانه ی استاتور (Tg)، عرض دندانه ی استاتور (TW)، عمق شیار (SD) و ضخامت استاتور (BI) می باشد. با توجه به اینکه شبیه سازی مورد نظر دوبعدی بوده است هندسه ی نشان داده شده در شکل ۴ دوبعدی می باشد. علاوه بر این ابعاد اساسی روتور در شکل ۴ نشان داده شده است. برای ترسیم هندسه ی مورد نظر می توان از ابزارهای

موجود در نرم افزار استفاده کرد. علاوه بر این می توان ابتدا هندسه ی مورد نظر را در نرم افزار دیگری مانند اتوکد ۱ کشید و سپس به واسطه ی ابزارهای موجود به نرم افزار اصلی وارد کرد. اندازه ی پارامترهای مختلف نشان داده شده در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴: مدل سه بعدی ژنراتور

جدول ۲: پارامترهای اساسی روتور و استاتور

پارامتر	مقدار
BI	20 mm
Tth	1.2 mm
SD	32 mm
TW	5.5 mm
Tg	1.1 mm
W_{th}	3 mm
B	0.8 mm
M_L	20 mm
M_w	3 mm
P_{th}	1.75 mm

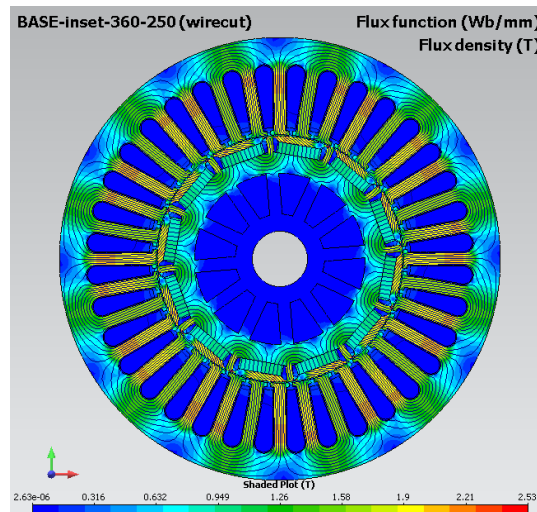
۵-راستی آزمایی طراحی و نتایج شبیه سازی

در این قسمت، به بررسی برخی از نتایج حاصل از شبیه سازی و مقایسه ی آن با مقادیر نامی می پردازیم. لازم به توضیح است که هدف این بخش از مقاله، راستی آزمایی نتایج تئوری حاصل از معادلات تحلیلی ساده شده با یک روش عددی است که نتایج بسار نزدیک به واقعیت را ارائه می دهد. چنان که می دانیم در بسیاری از سیستمهای مکانیکی، الکتریکی و ... به دلیل پرهزینه بودن از مودن بر روی نمونه واقعی و ساخته شده، از روشهای عددی مانند اجزا محدود و تفاضل محدود برای راستی آزمایی طرح اولیه استفاده می شود. این روشها با در نظر گرفتن شرایط و ابعاد واقعی مساله، شبیه سازی سیستم را با نتایج بسیار نزدیک به عملکرد واقعی سیستم با همان شرایط در نظر گرفته شده را ارائه می دهند. بنابراین انتظار می رود که نتایج شبیه سازی عددی،

¹ Auto Cad

به سیستم واقعی ساخته شده بسیار نزدیک باشد [۱۰]. انواع مختلفی از ژنراتورهای استحصال انرژی از امواج دریا در مقالات مختلف شبیه سازی شده اند که می توان به مقالات [۱۱]- [۱۳] اشاره کرد.

توزیع چگالی شار و مسیر حرکت شار ژنراتور در نشان داده شده است. با توجه شکل ۵ مشاهده می شود که چگالی شار برای نقطه داغ ۱ استاتور حدود $2/4$ T می باشد که مربوط به نقطه ی تیز روتور است. علاوه بر این مشاهده می شود که چگالی شار هسته در حدود $1/7$ T می باشد که کمتر از مقدار اشباع هسته است. با توجه به این شکل ملاحظه می گردد که هشت حلقه ی شار در ساختار ژنراتور تشکیل شده است (ژنراتور دوازده قطب).

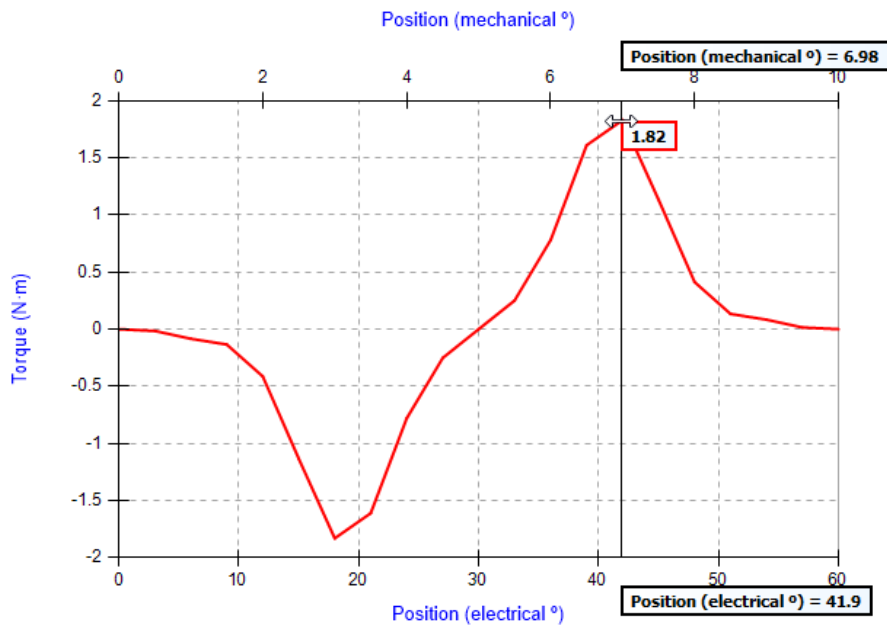


شکل ۵: چگالی و مسیر شار ژنراتور

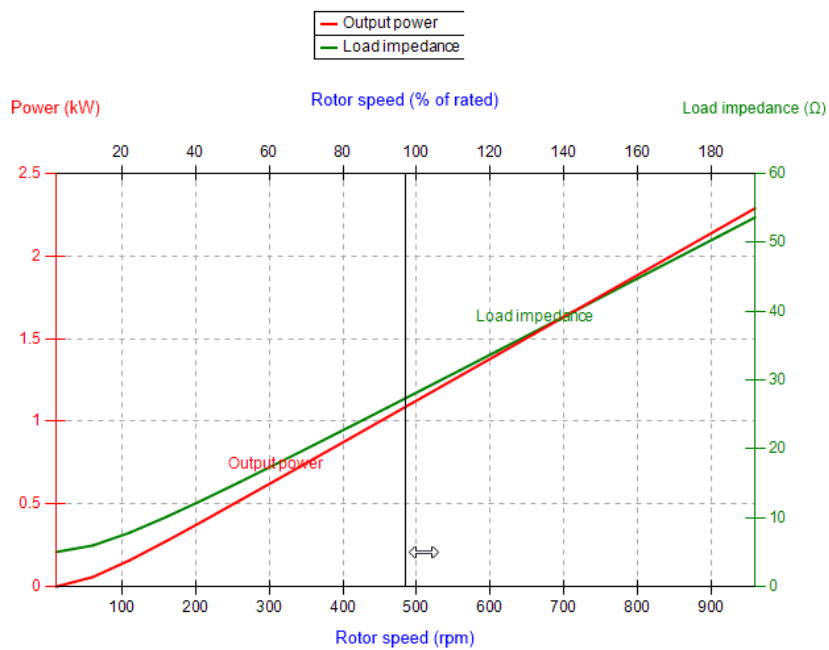
در ماشین های آهنربای دائم به واسطه ی برهم کنش بین میدان مغناطیسی آهنربا و دندانه های استاتور گشتاور مزاحمی به وجود می آید که به آن گشتاور دندانه ای گفته می شود. با توجه به اطلاعات موجود در مراجع مقدار بیشینه ی گشتاور دندانه ای باید کمتر از ۱۰ درصد گشتاور نامی باشد. جهت محاسبه ی این گشتاور تحریک سیم پیچ های استاتور را صفر می کنیم و روتور را با سرعت کمی می گردانیم و گشتاور را به ازای موقعیت های مختلف روتور محاسبه می کنیم. گشتاور دندانه ای ژنراتور به ازای تغییرات موقعیت روتور در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مقدار بیشینه ی گشتاور دندانه ای کمتر از $1/6$ درصد گشتاور نامی می باشد که مقدار قابل قبولی است.

همان طور که می دانیم آهنرباهای دائم میدان مغناطیسی را در محیط اطراف خود ایجاد می کنند. زمانی که روتور می چرخد میدان گردانی در ساختار ماشین ایجاد می گردد که این میدان سیم پیچ های استاتور را قطع کرده و در آن ها ولتاژی را القا می کند. به ولتاژ القا شده در این حالت نیروی ضد محرکه ی الکتریکی گفته می شود. منحنی توان ژنراتور به ازای تغییر سرعت در شکل ۷ نشان داده شده است. با دقت در این شکل ملاحظه می شود که ژنراتور مورد نظر در سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه توانی معادل با ۱ کیلووات تحویل می دهد. علاوه بر این مشاهده می شود که با افزایش سرعت توان ژنراتور بیشتر می شود.

¹ Hot spot

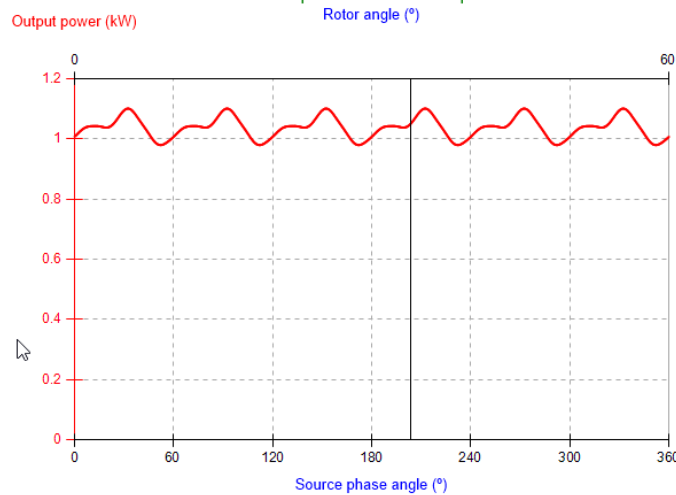


شکل ۶: گشتاور ژنراتور سنکرون آهنربای دائم



شکل ۷: توان خروجی ژنراتور بر حسب سرعت

توان خروجی ژنراتور در بار ۴۵ اهم و ضریب توان ۰/۹۶ در شکل ۸ نشان داده شده است. با دقت در این شکل میانگین توان ژنراتور در حدود ۱/۰۵ کیلووات است که نزدیک به توان نامی در نظر گرفته شده برای ژنراتور است.



شکل ۸: توان خروجی ژنراتور

برای محاسبه بازده ژنراتور قبل از هر چیز باید تلفات ژنراتور محاسبه شود. این تلفات شامل تلفات اهمی، تلفات هسته و تلفات مکانیکی است که دو مورد اول با استفاده از روش اجزای محدود قابل محاسبه است که در ادامه به بررسی آن خواهیم پرداخت. عبور جریان الکتریکی از یک هادی منجر به تولید تلفات به فرم گرما در هادی می‌شود که به آن تلفات مسی گفته می‌شود. تلفات مسی از رابطه ۹ بدست می‌آید که در این رابطه R مقاومت DC سیم پیچ (Ω) و I مقدار مؤثر (rms) جریان عبوری (A) از سیم پیچی است.

$$P_{cu} = RI^2 \quad (9)$$

با توجه به مقاومت اهمی و جریان نامی دو ژنراتور، تلفات اهمی دو ژنراتور با توجه به رابطه ۲ قابل محاسبه خواهد بود. تلفات ژنراتور در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به تلفات محاسبه شده بازده ژنراتورها در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول بازده ژنراتور در حدود ۹۱/۸ درصد است.

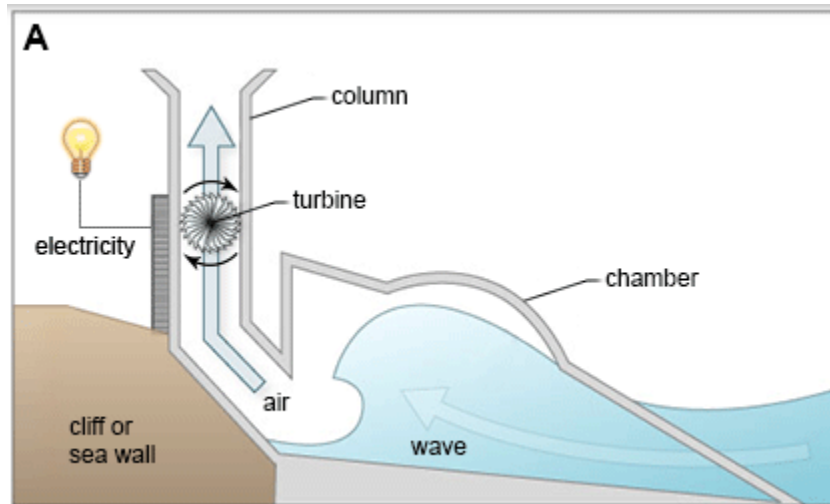
جدول ۳: تلفات ژنراتور

تلفات اهمی (KW)	۷۸/۴
تلفات هسته (KW)	۱۴/۶
تلفات جریان گردابی در آهنربا (KW)	۰/۰۰۱۶۴
مجموع (KW)	۹۳

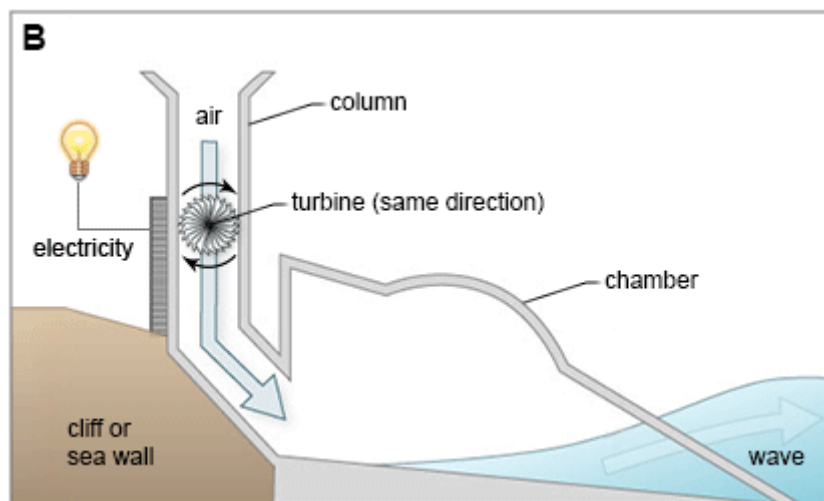
۶- کاربرد

شکل ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از بالا و پایین آمدن آب ناشی از امواج دریا برق تولید کرد. فرآیند شامل سازه ای است که در کنار صخره یا دیواره دریا نصب شده است. این سازه از یک محفظه بزرگ تشکیل شده است. یک سر آن به دریا باز است، و سر دیگر به یک ستون عمودی منتهی می‌شود، که به جو باز است. در داخل این ستون یک توربین نصب شده است و برای تولید برق در دو مرحله استفاده می‌شود. شکل ۹ نشان می‌دهد که وقتی موجی به دستگاه نزدیک می‌شود، آب به داخل محفظه وارد می‌شود و به هوا در داخل ستون فشار می‌آورد. این هوا از طریق توربین به جو فرار می‌کند و در نتیجه برق تولید می‌کند. شکل ۱۰ قسمت بعدی فرآیند را هنگام عقب نشینی موج نشان می‌دهد. با پایین آمدن سطح آب، هوای خارج از ستون از طریق توربین مکیده می‌شود. در نتیجه، تولید برق همچنان ادامه دارد. توربین صرف نظر از جهت جریان هوا فقط در

یک جهت می چرخد. در نتیجه، می توانیم ببینیم که این ساختار مفید است زیرا برق در هر دو مرحله ورود و عقب نشینی آب تولید می شود.



شکل ۹: ساختار الف در تولید برق



شکل ۱۰: ساختار ب در تولید برق

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه سعی شده ژنراتوری شبیه سازی شود که بیشترین بازده را داشته باشد و قابلیت نصب در مزارع های جذب انرژی مانند سواحل را داشته باشد. بازده ژنراتور در حدود $91/8$ درصد است. ژنراتور مورد نظر در سرعت 500 دور بر دقیقه توانی معادل با 1 کیلو وات تحویل می دهد. علاوه بر این مشاهده می شود که با افزایش سرعت توان ژنراتور بیشتر می شود. میانگین توان ژنراتور در حدود $1/05$ کیلووات است که نزدیک به توان نامی در نظر گرفته شده است و بیشینه ی گشتاور دندانه ای کمتر از $8/6$ درصد گشتاور نامی می باشد که مقدار قابل قبولی است. جذابیت یک سایت خاص به عواملی مانند ارتفاع و جهت موج بستگی دارد و همچنین به این دلیل که سایت در منطقه حفاظت شده یا نزدیک مسیرهای حمل و نقل باشد، محدود می شود.

از آنجا که تولید کننده انرژی امواج هنوز در مراحل ابتدایی است یک راه حل عملی استفاده از سایر پروژه های دریایی برای تسریع در توسعه صنعت است.

مراجع

- [1] Naeeni, S. and Amini, E., "Numerical Optimization of Positioning and Performance of Oscillating Surge Wave Energy Converter, Case study: Nowshahr, Anzali and Amirabad Ports," J. Maritime Trans.Indust., 6 (2020) 25-37.
- [2] De Backer, G., "Hydrodynamic Design Optimization of Wave Energy Converters Consisting of Heaving Point Absorbers", Dep. Civil Eng., Ghent Univ.: Ghent, Belgium, (2009).
- [3] Masutani, S., and Takahashi, P., "Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)", Oceanography, 22 (2001) 625.
- [4] Polagye, B., Copping, A., Kirkendall, K., Boehlert, G., Walker, S., Wainstein, M., "Environmental Effects of Tidal Energy Development: a Scientific Workshop", Univ. Washington, Seattle, Seattle, WA, USA, NMFS F/SPO-116, NOAA, (2010).
- [5] Suwanapingkarl, P., Srivallop, K., "Reviews Existing Technologies and Proposes 'E8-PowerBuoys' Nano-Scale Generator Of Tidal And Wave Energy For River And Ocean", Int. Conf. Power, Energy and Innov. (ICPEI), (2020).
- [6] Burhanudin, J., Shukri, A., Hasim, A., "Review of Power Electronics for Nearshore Wave Energy Converter Applications", IEEE Access, (2022).
- [7] Aji, N., Ekawati, E., Nashirul Haq, I., "The Simulation of Wave Energy Conversion by Floating Point Absorber Buoy in Indonesian Sea Waves", Int. Conf. Instrum., Cont. Auto. (ICA), (2021).
- [8] Martínez, M., Molina, M., Machado, I., Mercado, P., and Watanabe, E., "Modelling and Simulation of Wave Energy Hyperbaric Converter (WEHC) for Applications in Distributed Generation," Int. J. Hydrogen Energy, 37 (2012) 14945-14950.
- [9] Zheng, C.-w., Pan, J., and Li, J.-x., "Assessing the China Sea wind Energy and Wave Energy Resources from 1988 to 2009", Ocean engineering, 65 (2013) 39-48.
- [10] Naghavi, F., Sheshaprasad, Sh., Gardner, M., Meduri, A., Kang, H., Toliyat, H., "Permanent Magnet Linear Generator Design for Surface Riding Wave Energy Converters", IEEE Energy Conv. Cong. Exp. (ECCE), (2021).
- [11] Curto, D., Franzitta, V., Guercio, A., Trapanese, M., "Testing a Linear Ironless Generator for the Sea Wave Energy Harvesting", OCEANS Chennai, (2022).
- [12] Zhang, Z., Wu, B., Lu, Q., Xu, W., "Novel Linear Generator Concepts and Topologies for Wave Energy Conversion Systems: A Review", 13th Int. Symp. Linear Drives for Industry Appl. (LDIA), (2021).
- [13] Barua, A., Pada Bhadra, G., Salauddin Rasel, Md., "Energy Harvesting From Water Wave Using Electromagnetic Generator", 2nd Int. Conf. Sustainable Tech. Industry (STI), (2020).

Modeling and simulation of generators by finite element method to generate electricity from sea waves

AbdulKarim Afroozeh^{1*}, Reza Yazdanpanah²

1-Department of Physics, University of Larestan, Lar, Iran.

2-Department of Electrical Engineering, University of Larestan, Lar, Iran

Received: May 2022

Accepted: August 2022

Abstract

Coasts and harbors can be considered huge sources of energy, which can be seen in the form of waves, tides and constant surface or underwater currents, due to the temperature difference between different points. Energy production in this way does not involve pollution. These power plants can generate energy throughout the year. In this study, finite element method has been used to model the generator as one of the most accurate simulation methods for the desired calculations, which can be used on shores, ports and ship hulls, and the oscillating movements of water waves can be easily converted into energy. Lightning. In this paper, the mechanism of this type of generator is modeled and simulated. The simulation results showed that the implementation and construction of these generators have good efficiency and high economic efficiency. Reliable simulation tools are essential for studying the performance and viability of wave energy devices, as experiments are both costly and difficult. In particular, the ability to survive in nonlinear waves is one of the biggest challenges to wave energy, and since waveforms and dynamics are highly dependent on the model, each device must be studied separately with approved instruments. To take. In this study, the design of the generator including rotor, stator and wiring will be fully investigated. For this purpose, first the mathematical relations related to the generator are stated and at the end, the analytical design of a generator example will be examined. In this study, the finite element method has been used as one of the most accurate simulation methods for the calculations.

Key words: Renewable energy ,Sea waves, Wave energy.

*corresponding author: afroozeh@lar.ac.ir

Cite this article as: AbdulKarim Afroozeh, Reza Yazdanpanah. Modeling and simulation of generators by finite element method to generate electricity from sea waves. Journal of Energy Conversion, 2023, 9 (4), 59-70. DOR: [20.1001.1.20089813.1401.9.4.1.8](https://doi.org/10.20089813.1401.9.4.1.8)