



## تحلیل مبدل جریان کرشیو به عنوان نیروگاه تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست

امیر قاندى\*

دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران.

### چکیده مبسوط

**مقدمه:** جریان های کرشیو، نمونه ای از جریان های اقیانوس بوده که در نزدیکی سواحل ژاپن وجود دارد. این جریان ها دارای سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی می باشد و می توانند به منظور تولید برق مورد استفاده قرار بگیرند. مشکل اصلی این مبدل های انرژی جریان کرشیو این است که به دلیل تغییر سرعت جریان های کرشیو، توان تولیدی آن ها نیز تغییر کرده و بر جنبه های مختلف آن ها از جمله قابلیت اطمینان تاثیر می گذارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

**مواد و روش ها:** به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشیو هم خرابی اجزای تشکیل دهنده بر خرابی کل سیستم مورد مطالعه قرار می گیرد و هم تغییرات توان خروجی این مبدل ها که ناشی از تغییر سرعت جریان های کرشیو می باشد. شاخص های قابلیت اطمینانی که در این سطح محاسبه می گردد عبارت است از: احتمال قطع بار، متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشد.

**نتایج و بحث:** در این قسمت، یک مبدل انرژی جریان کرشیو که شامل یک توربین به قطر ۲ متر است در نظر گرفته شده. شاخص های قابلیت اطمینان یک سیستم تست نمونه به دست آورده می شود. نتایج نشان می دهد با زیاد شدن پیک بار سیستم، احتمال قطع بار، متوسط زمان قطع بار و انرژی تامین نشده سیستم افزایش پیدا کرده و به عبارت دیگر قابلیت اطمینان سیستم بدتر می شود. بنابراین لازم است نیروگاه های جدید به مدار بیابند تا شاخص های قابلیت اطمینان بهبود پیدا کنند.

واژه های کلیدی: مبدل جریان

کرشیو، قابلیت اطمینان، سرعت جریان های کرشیو، خوشه بندی فازی

**نتیجه گیری:** در این تحقیق با استفاده از روش خوشه بندی فازی C میانگین، تعداد حالت ها کاهش داده شده است و یک مدل چند حالتی برای مبدل های انرژی جریان کرشیو به دست آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد اضافه شدن نیروگاه های جریان کرشیو به سیستم قدرت سبب بهبود شاخص های قابلیت اطمینان این سیستم می گردد.

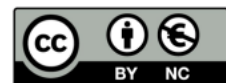
نویسنده مسئول: امیر قاندى

نشانی: شیراز، داریون، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت تلفن: ۰۹۱۲۷۹۴۸۹۶۱ پست الکترونیکی: amir\_ghaedi\_63@yahoo.com

استناد: قاندى امیر. تحلیل مبدل جریان کرشیو به عنوان نیروگاه تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۲؛ ۱ (۳)، ۱۵-۲۷.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



## مقدمه

(۲۰۱۹)، به مطالعه عددی جریان کرشيو در تنگه توکارو پرداخته‌اند. این مقاله شامل توپوگرافی مناطق مورد مطالعه است و بر اساس مدل پیشنهادی، جریان‌های کرشيو شبیه‌سازی شده و اندازه آن‌ها به دست آورده شده است. بارنیرو و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر توربین‌های جریانی بر جریان‌های دریایی بررسی کرده و پتانسیل جریان‌های دریایی بر اساس میزان انرژی قابل استخراج از آن‌ها به دست آمده است. با داشتن توزیع سرعت جریان‌های دریایی در مناطق مختلف می‌توان مشخص نمود که توربین‌های جریانی را کجا نصب نمود تا بتوان میزان انرژی بیشتری را استخراج نمود. در پژوهش کوبوتا و همکاران (۲۰۱۷) به تغییرات دمای آب‌های واقع در سطح اقیانوس مورد توجه قرار گرفته و تأثیر آن بر جریان‌های کرشيو در منطقه اکیناوا در طول ۳۸۵۰۰ سال گذشته بررسی شده است. ونگ و همکاران (۲۰۲۰) نیز تحولات جریان‌های کرشيو در طول ۵ میلیون سال را تجزیه و تحلیل کرده‌اند. در این مقاله از جریان‌های کرشيو به عنوان یکی از عوامل کلیدی در تغییر اقلیم جهانی نام برده شده است که کنترل تغییرات دمای بین مناطق با عرض جغرافیایی کم و شمال اقیانوس آرام را انجام می‌دهد و تأثیر زیادی بر تقابل‌های اقیانوس و اتمسفر در مناطق مختلف دارد. در مقاله تانیگوچی و همکاران (۲۰۱۳) نحوه اندازه‌گیری جریان‌های کرشيو با استفاده از توموگرافی آکوستیک بیان شده است. در این مقاله با استفاده از توموگرافی آکوستیک میزان جریان‌های کرشيو در جنوب تایوان از آگوست تا سپتامبر ۲۰۰۹ اندازه‌گیری شده است. هو و همکاران (۲۰۱۳) تغییرات جریان‌های دریایی واقع بر سطح اقیانوس در کانال پنگو در جنوب شرقی تنگه تایوان را بررسی کردند.

در زمینه مطالعه قابلیت اطمینان نیروگاه‌های جریان کرشيو کار خاصی انجام نشده است. بنابراین بایستی از مقالاتی که مدل قابلیت اطمینان سایر نیروگاه‌های مشابه با این نیروگاه‌ها را به دست آورده‌اند استفاده کرد. نیروگاه‌های جزرومدی جریانی از طریق توربین‌هایی که با سرعت جریان‌های جزرومدی می‌چرخند برق تولید می‌کنند شباهت زیادی به توربین‌های جریان کرشيو دارند. توربین‌های بادی نیز به مانند توربین‌های جریانی بر اثر جریان هوا می‌چرخند. تنها تفاوت آن‌ها با توربین‌های جریان دریایی این است که در توربین‌های بادی، توده هوا که گاز است سبب چرخش توربین می‌شود اما در توربین‌های جریانی، جریان آب توربین را به چرخش درمی‌آورد. در توربین‌های بادی، سرعت توده‌های هوا سبب چرخش توربین شده و برق تولید می‌شود و در توربین‌های جریان دریایی، جریان‌های دریایی توربین را می‌چرخاند و برق تولید می‌شود. بنابراین از مقالاتی که قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی و جزرومدی نوع جریانی را مطالعه کرده‌اند می‌توان ایده گرفت. در پژوهش قائدی و همکاران

در سال‌های اخیر به دلیل الودگی زیست محیطی ناشی از سوخت-های فسیلی، توجه بسیاری از کشورهای جهان به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف شده است. این منابع انرژی شامل انرژی‌های باد، خورشید، اقیانوس و ... می‌باشند. به دلیل گسترده بودن اقیانوس‌ها در جهان، پتانسیل این انرژی زیاد بوده و شامل جزرومد، امواج، انرژی حرارتی اقیانوس، جریان‌های دریایی و گرادیان شوری می‌باشند. جریان‌های کرشيو، نمونه‌ای از جریان‌های اقیانوس بوده که در نزدیکی سواحل ژاپن وجود دارد. این جریان‌ها دارای سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی می‌باشند و می‌توانند به منظور تولید برق مورد استفاده قرار بگیرند. مشکل اصلی این مبدل‌های انرژی جریان کرشيو این است که به دلیل تغییر سرعت جریان‌های کرشيو، توان تولیدی آن‌ها نیز تغییر کرده و بر جنبه‌های مختلف آن‌ها از جمله قابلیت اطمینان تأثیر می‌گذارد. در زمینه مبدل‌های جریان کرشيو کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است.

تاو و همکاران (۲۰۱۷) توانایی مرتبط با جریان‌های دریایی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مقاله همچنین سرعت جریان‌های کرشيو در اعماق مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. تاو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی طراحی سیستم نگهدارنده مرتبط با توربین‌های دریایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش بر اساس معادلات مختلف، ترکیب آرایه توربین‌های دریایی پیشنهاد شده است سیراساوا و همکاران (۲۰۱۶)، نتایج آزمایشگاهی مربوط به یک توربین جریانی اقیانوس که دارای یک روتور است و در اقیانوس شناور است، مورد بررسی قرار دادند. این توربین به منظور تبدیل انرژی جنبشی از جریان‌های کرشيو به انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله بیان شده است که جریان‌های کرشيو نسبت به سایر جریان‌های دریایی نوسانات کمتری در طول روز یا فصول مختلف سال دارند. بنابراین، مزایای پایداری، ثبات جریان‌های دریایی کرشيو، دسترس‌پذیری، زیاد بودن حجم آب، و قابلیت پیش‌بینی را می‌توان برای این جریان‌های کرشيو نام برد.

لیو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهش خود به بررسی چگونگی مدل‌سازی توان تولیدی حاصل از جریان‌های کرشيو در جنوب ژاپن پرداخته‌اند. این پژوهش به بررسی سرعت جریان‌های کرشيو و میزان توان تولیدی ناشی از این جریان‌ها می‌پردازد. آنو و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه توان تولیدی از جریان‌های کرشيو پرداخته‌اند. این مقاله به معرفی توربین‌های غوطه‌ور در آب دریا می‌پردازد که با استفاده از آن‌ها، امکان تبدیل انرژی جنبشی جریان‌های کرشيو به انرژی الکتریکی وجود دارد. لیو و همکاران

اطمینان این مبدل‌ها تعیین می‌گردد. در بخش چهارم تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور این مبدل‌ها و در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی آورده می‌شود. بخش ششم نیز به نتیجه‌گیری تحقیق می‌پردازد.

## مواد و روش‌ها

### مبدل جریان کرشيو

جریان‌های کرشيو یک نمونه از جریان‌های اقیانوس هستند که در نزدیکی سواحل ژاپن قرار دارند. این جریان‌ها دارای سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی می‌باشند. بنابراین می‌توان با نصب توربین‌های جریانی که در اعماق اقیانوس نصب می‌شوند برق تولید کرد (قائدی ۲۰۲۳). در شکل (۱)، یک نمونه توربین جریانی که به منظور تولید برق از جریان‌های کرشيو مورد بهره‌برداری قرار گرفته است نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است این سیستم دارای دو توربین جریانی می‌باشد که در آب دریا غوطه‌ور می‌شود. با عبور جریان‌های کرشيو از توربین‌ها، این توربین‌ها به چرخش درآمده و برق تولید می‌کنند. در شکل (۲) اصول کار سیستم تبدیل انرژی جریان کرشيو به خوبی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است این توربین‌ها در زیر آب قرار گرفته و توسط یک سیستم نگهدارنده به کف دریا محکم می‌شوند. با چرخش توربین، ژنراتور متصل به توربین نیز به چرخش درآمده و برق تولید می‌شود. برق تولیدی توسط کابل زیردریایی به ساحل منتقل می‌شود. به منظور انتقال برق تولیدی این سیستم به شبکه، نیاز است توسط یک مبدل الکترونیک قدرت، دامنه ولتاژ و فرکانس تنظیم گردد. همچنین به منظور اتصال تولیدی این سیستم به شبکه، نیاز است توسط یک ترانسفورماتور، دامنه ولتاژ به مقدار مورد نیاز شبکه تغییر داده شود. توان تولیدی جریان کرشيو که با سرعت  $v$  حرکت می‌کند برابر است با:

$$P = \frac{1}{2} C_B \rho A v^3 \quad \text{رابطه (۱)}$$

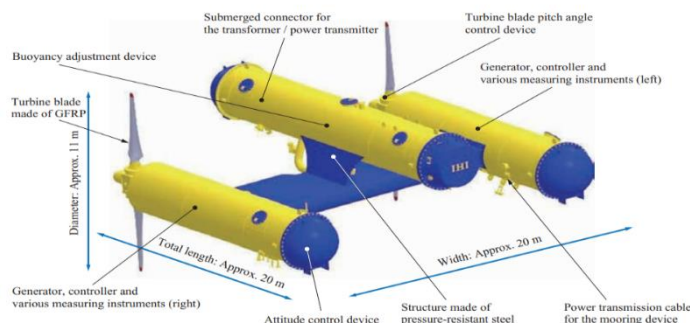
در رابطه فوق،  $P$  توان تولیدی مبدل انرژی جریان کرشيو،  $C_B$  عدد بتز،  $\rho$  چگالی آب دریا و  $A$  مساحتی است که روتور توربین در بر می‌گیرد.

(۲۰۱۳) مدل قابلیت اطمینان نیروگاه بادی با تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه و در پژوهشی دیگر قائدی و همکاران (۲۰۲۱) مدل قابلیت اطمینان نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به دست آورده شده است. در این مقالات مدل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن خرابی اجزا و تغییرات سرعت باد به دست آمده است. قائدی و همکاران (۲۰۲۱)، همچنین تاثیر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی اجزای تشکیل دهنده نیروگاه بادی و در نتیجه خود نیروگاه بادی مورد بررسی قرار دادند. میرزاده و همکاران (۲۰۲۰) نیز مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های جزرومدی نوع جریانی با در نظر گرفتن خرابی تجهیزات تشکیل دهنده شامل توربین، ژنراتور، مبدل‌های الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل به دست آورده شده است. در این مقاله اثر تغییرات توان خروجی که ناشی از تغییر سرعت جریان‌های جزرومدی می‌باشد نیز لحاظ شده است. مقاله لیو و همکاران (۲۰۱۵) اثر تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی بر نرخ خرابی مبدل الکترونیک قدرت که در روتور قرار دارد را مورد بررسی قرار داده است.

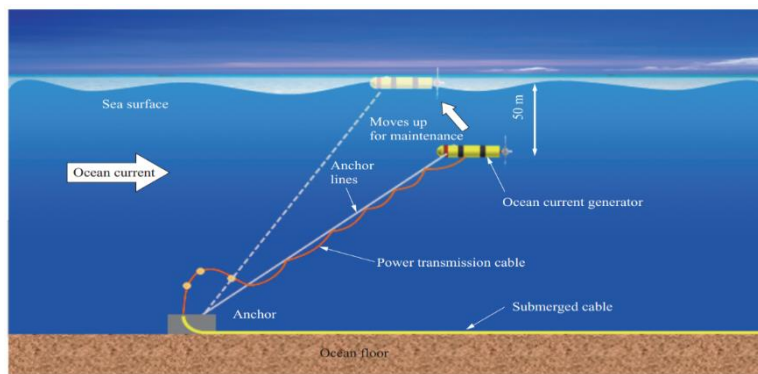
با مطالعه مقالات مختلفی که در زمینه جریان کرشيو چاپ شده است مشخص است که قابلیت اطمینان مبدل‌های جریان کرشيو تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بر همین اساس این مقاله به مطالعه قابلیت اطمینان این مبدل‌ها می‌پردازد. بنابراین نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- تعیین مدل قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشيو با در نظر گرفتن اثر خرابی تجهیزات تشکیل دهنده و تغییرات توان خروجی به دلیل تغییر سرعت جریان‌های کرشيو
- کاهش تعداد حالت‌های توان در مدل قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشيو با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی
- تعیین تعداد حالت‌های مناسب در مدل قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشيو
- مطالعه تاثیر مبدل جریان کرشيو بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت

با توجه به موضوع مقاله و اهدافی که این مقاله در زمینه مطالعه قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشيو دنبال می‌کند، ساختار آن به صورت زیر می‌باشد: در بخش دوم مبدل جریان کرشيو و اجزای تشکیل دهنده آن معرفی می‌شود. در بخش سوم مدل قابلیت



شکل ۱- توربین‌های جریان کرشیو

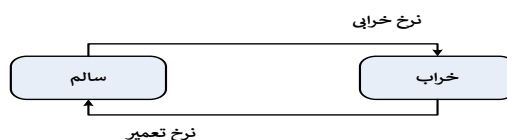


شکل ۲- سیستم تبدیل انرژی جریان کرشیو

از تغییر سرعت جریان‌های کرشیو می‌باشد. در این تحقیق برای هر کدام از اجزای تشکیل دهنده مبدل انرژی جریان کرشیو یک مدل مارکوف دو حالت در نظر گرفته می‌شود. این مدل از دو حالت سالم و خراب تشکیل شده است. این مدل در شکل (۳) نشان داده شده است (نرگسزار و همکاران ۲۰۲۳).

### مدل قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشیو

به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشیو هم‌خرابی اجزای تشکیل دهنده بر خرابی کل سیستم مورد مطالعه قرار می‌گیرد و هم‌تغییرات توان خروجی این مبدل‌ها که ناشی



شکل ۳- مدل مارکوف دو حالت

در رابطه فوق  $A$  دسترس‌پذیری،  $\lambda$  نرخ خرابی و  $\mu$  نرخ تعمیر می‌باشد. عدم دسترس‌پذیری ( $U$ ) که احتمال خراب بودن تجهیز است از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$U = 1 - A \quad \text{رابطه (۳)}$$

اجزای اصلی تشکیل دهنده مبدل انرژی جریان کرشیو عبارتند از سیستم نگهدارنده، توربین جریان کرشیو، ژنراتور، کابل‌های انتقال توان الکتریکی، مبدل الکترونیک قدرت، سیستم کنترل و ترانسفورماتور. در این قسمت بایستی تاثیر خراب شدن هر کدام از این اجزا بر خرابی مبدل انرژی جریان کرشیو بررسی گردد:

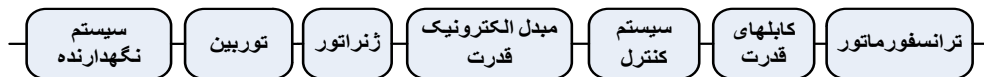
سیستم نگهدارنده: با خراب شدن این سیستم امکان متعادل نگه داشتن مبدل وجود ندارد و بنابراین تجهیزات بر اثر ضربه‌های وارد

همانگونه که در این شکل مشخص است نرخ خرابی که نرخ انتقال از حالت سالم به خراب است برابر با تعداد دفعاتی است که تجهیز در یک مدت زمان مشخص خراب می‌شود. نرخ تعمیر نیز که نرخ انتقال از حالت خراب به حالت سالم است برابر با تعداد دفعاتی است که تجهیز می‌تواند در یک مدت زمان معین تعمیر شود. معمولاً نرخ خرابی و نرخ تعمیر به صورت تعداد در سال بیان می‌شوند. به منظور تعیین احتمال سالم بودن که دسترس‌پذیری نامیده می‌شود از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \text{رابطه (۲)}$$

ترانسفورماتور: با خراب شدن ترانسفورماتور امکان رسانیدن دامنه ولتاژ مربوط به برق تولیدی میدل انرژی جریان کرشيو به مقدار مورد نیاز شبکه وجود ندارد و لذا توان الکتریکی دریافتی شبکه صفر خواهد شد.

با توجه به موارد بیان شده نتیجه می‌گیریم که در صورت خراب شدن هر کدام از اجزای میدل انرژی جریان کرشيو شامل سیستم نگهدارنده، توربین، ژنراتور، میدل الکترونیک قدرت، سیستم کنترل، کابل‌های قدرت و ترانسفورماتور امکان تولیدی توان الکتریکی یا انتقال آن به شبکه قدرت میسر نخواهد بود. بنابراین از نظر قابلیت اطمینان تمامی این اجزا در مدل قابلیت اطمینان میدل انرژی جریان کرشيو با هم سری هستند. زمانی که اجزای یک سیستم از نظر قابلیت اطمینان با هم سری هستند به این معنا است که با خراب شدن هر کدام از اجزا، سیستم خراب خواهد بود و برای اینکه سیستم بتواند به درستی کار کند بایستی همه اجزا سالم باشند. در شکل (۴) مدل قابلیت اطمینان میدل انرژی جریان کرشيو که همه اجزا در آن با هم سری هستند نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل قابلیت اطمینان میدل انرژی جریان کرشيو

اطمینان میدل انرژی جریان کرشيو در نظر گرفته شود. به دلیل تغییرات سرعت جریان‌های کرشيو، با توجه به اینکه توان تولیدی میدل انرژی جریان کرشيو به مکعب این سرعت‌ها وابسته است، توان تولیدی میدل نیز متغیر خواهد بود. به دلیل تغییرات زیاد توان تولیدی میدل انرژی جریان کرشيو نمی‌توان در میدل قابلیت اطمینان این میدل‌ها، همه حالات توان را در نظر گرفت. بنابراین به کمک تکنیک خوشه‌بندی تعداد حالت‌های توان میدل انرژی جریان کرشيو را کاهش می‌دهیم. روشی که در این مقاله استفاده می‌کنیم روش خوشه‌بندی فازی C میانگین می‌باشد. در این روش بایستی تعداد خوشه‌ها از قبل مشخص باشد. به همین خاطر مقدار تابع هدف را که به صورت رابطه زیر می‌باشد با تغییر تعداد خوشه‌ها از ۲ تا مقدار مثلاً ۱۵ به دست می‌آوریم و با هم مقایسه می‌کنیم. با افزایش تعداد خوشه‌ها مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. اما میزان این کاهش ابتدا زیاد است و بعد از چندین افزایش کمتر می‌شود. مقدار مناسب تعداد خوشه‌ها، مقداری است که میزان

از طرف امواج ممکن است نسبت به هم حرکت کنند و بنابراین امکان تولید توان الکتریکی وجود ندارد و بایستی بلافاصله نسبت به تعمیر قسمت آسیب دیده اقدام گردد.

توربین: در صورت خراب شدن توربین، امکان تبدیل انرژی جنبشی جریان‌های کرشيو به انرژی الکتریکی وجود ندارد و بنابراین توان تولیدی میدل صفر خواهد شد.

ژنراتور: با خراب شدن ژنراتور فرایند تبدیل انرژی جنبشی توربین به انرژی الکتریکی متوقف شده و بنابراین توان تولیدی میدل انرژی جریان کرشيو صفر خواهد شد.

میدل الکترونیک قدرت: با توجه به اینکه فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی ژنراتور با مقادیر مورد نیاز جهت انتقال این توان به شبکه برابر نیست با خراب شدن میدل الکترونیک قدرت امکان انتقال توان الکتریکی به شبکه وجود ندارد و بنابراین توان دریافتی شبکه صفر خواهد بود.

سیستم کنترل: با خراب شدن سیستم کنترل امکان رسانیدن دامنه و فرکانس برق تولیدی میدل به مقادیر مورد نیاز شبکه وجود ندارد و لذا در این صورت نیز برق دریافتی شبکه صفر خواهد بود.

کابل‌های قدرت: با خراب شدن کابل‌های قدرت امکان انتقال توان الکتریکی تولیدی میدل انرژی جریان کرشيو به شبکه وجود ندارد و لذا توان دریافتی شبکه صفر خواهد شد.

با توجه به اینکه تمامی اجزای تشکیل دهنده میدل انرژی جریان کرشيو با هم سری هستند می‌توان کل میدل انرژی جریان کرشيو را به یک مدل دو حالت معادل با دو حالت سالم و خراب تبدیل کرد. مقدار نرخ خرابی و نرخ تعمیر معادل این سیستم که اجزای آن با هم سری هستند از روابط زیر به دست می‌آید (نرگسزار و همکاران ۲۰۲۳):

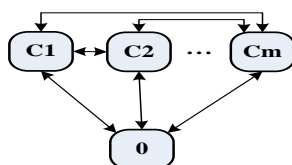
$$\lambda = \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\mu = \frac{\lambda}{\sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k}{\mu_k}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط فوق  $\lambda$  و  $\mu$  نرخ خرابی و نرخ تعمیر معادل میدل انرژی جریان کرشيو و  $\lambda_k$  و  $\mu_k$  نرخ خرابی و نرخ تعمیر هر کدام از اجزای تشکیل دهنده میدل انرژی جریان کرشيو می‌باشند. حال بایستی اثر تغییرات توان تولیدی میدل انرژی جریان کرشيو که به دلیل تغییرات سرعت جریان‌های کرشيو اتفاق می‌افتد در مدل قابلیت

بنابراین مدل قابلیت اطمینان یک مبدل انرژی جریان کرشيو به صورت نشان داده شده در شکل (۵) خواهد بود. در این مدل به دلیل تغییرات توان خروجی و اعمال روش خوشه‌بندی تعداد حالت‌های توان به تعداد  $m$  حالت کاهش یافته است. احتمال هر کدام از این حالت‌ها نیز از رابطه زیر به دست آورده می‌شود. همانگونه که در شکل (۵) نشان داده شده است  $C1$  تا  $Cm$  نشان دهنده ظرفیت یا توان تولیدی هر کدام از حالت‌های  $m$  گانه می‌باشد.

$$P_k = \sum_{i=1}^n u_{ik} \quad \text{رابطه (۷)}$$



شکل ۵- مدل کامل قابلیت اطمینان مبدل انرژی جریان کرشيو

در مرحله بعد بایستی بار سیستم با مدل نیروگاه‌ها مقایسه گردد. در هر حالت اگر توان مربوط به آن حالت از بار سیستم کمتر بود قطعی بار اتفاق می‌افتد و بایستی در تعیین شاخص‌ها در نظر گرفته شود.

شاخص‌های قابلیت اطمینانی که در این سطح محاسبه می‌گردد عبارت است از: احتمال قطع بار، متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشده.

### نتایج و بحث

#### نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت از مقاله، با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم قدرت و تاثیر نیروگاه‌های کرشيو بر قابلیت اطمینان این سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. بر همین اساس یک مبدل انرژی جریان کرشيو که شامل یک توربین به قطر ۲ متر است در نظر گرفته شده است. بنابراین مساحتی که سطح مقطع توربین در بر می‌گیرد دایره‌ای به قطر ۲ متر می‌باشد. مساحت این دایره  $3/14$  مترمربع خواهد بود. چگالی آب دریا نیز در این منطقه  $1025$  کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. عدد بتز نیز همان  $0/59$  در نظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین توان تولیدی مبدل انرژی جریان کرشيو لازم است که سرعت جریان‌های کرشيو در دسترس باشد. در شکل (۶) سرعت

کاهش تابع هدف به ازای آن تعداد و تعداد بیشتر، محسوس نباشد. به عبارت دیگر تقریباً کاهش تابع هدف به اشباع رسیده باشد.

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m |x_k - v_i| \quad \text{رابطه (۶)}$$

در فرمول فوق  $m$  یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برای  $m$  عدد ۲ انتخاب می‌شود. در صورتی که در فرمول فوق  $m$  برابر ۱ قرار داده شود تابع هدف خوشه‌بندی  $c$  میانگین (کلاسیک) غیرفازی بدست می‌آید. در فرمول فوق  $x_k$  نمونه  $k$  ام که همان توان خروجی مبدل انرژی جریان کرشيو می‌باشد است،  $v_i$  نماینده یا مرکز خوشه  $i$  ام،  $n$  تعداد نمونه‌ها یا همان تعداد حالت‌های توان خروجی مبدل انرژی جریان کرشيو می‌باشد و  $u_{ik}$  میزان تعلق نمونه  $i$  ام در خوشه  $k$  ام را نشان می‌دهد.

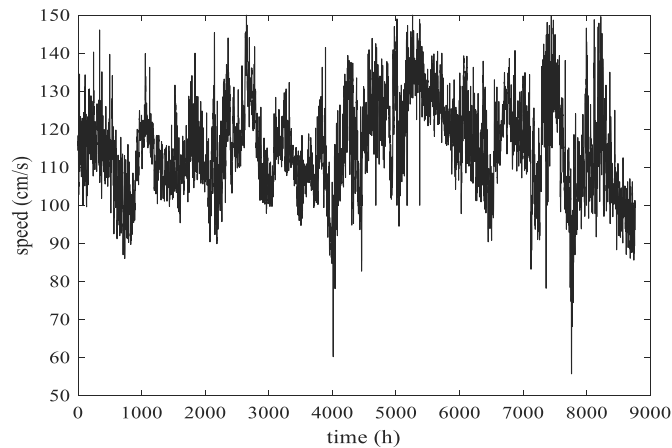
#### تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل جریان کرشيو

به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح تولید، از سیستم انتقال و توزیع صرف‌نظر می‌گردد. کلیه نیروگاه‌ها و بار به یک شین مشترک متصل می‌شوند و شاخص‌های قابلیت اطمینان به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

برای هر کدام از نیروگاه‌ها یک جدول شامل توان هر حالت به همراه احتمال مربوطه تعیین می‌گردد. این جدول به نام جدول ظرفیت‌ها موسوم است. برای نیروگاه‌های متعارف که توان تولیدی ثابتی دارند این جدول دو حالت است. یعنی در این نیروگاه‌ها، یا نیروگاه سالم است یا خراب. اگر سالم باشد توان نامی را تولید می‌کند و اگر خراب باشد توان تولیدی آن صفر می‌باشد. بنابراین جدول ظرفیت نیروگاه‌های متعارف شامل دو حالت یکی با ظرفیت نامی و دیگری توان صفر است. اما در مورد نیروگاه‌های تجدیدپذیر به مانند مبدل جریان کرشيو چون سرعت جریان‌های دریایی در حال تغییر است مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها چند حالت خواهد بود. بنابراین جدول ظرفیت مبدل انرژی جریان کرشيو بیش از دو حالت دارد.

پس از اینکه جدول ظرفیت نیروگاه‌های مختلف به دست آمد بایستی این جداول را با هم ترکیب نمود و یک جدول ظرفیت کلی برای تمام نیروگاه‌ها به دست آورد. در این جدول تمامی حالت‌های ممکن وجود دارد. برای هر حالت نیز هم توان مربوطه مشخص شده است و هم احتمال مبوط به آن.

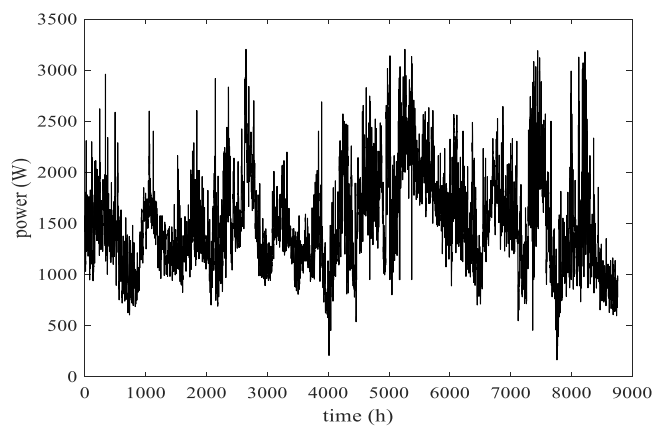
جریان‌های کرشيو به صورت ساعت به ساعت در طول یک سال نشان داده شده است.



شکل ۶- سرعت جریان‌های کرشيو در طول سال به صورت ساعت به ساعت

شده است تعداد حالات توان در نیروگاه زیاد باشد. بر همین اساس لازم است تعداد حالات توان را کاهش دهیم تا بتوانیم مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای این نیروگاه به دست بیاوریم. برای این کار از روش خوشه‌بندی فازی c میانگین استفاده می‌شود.

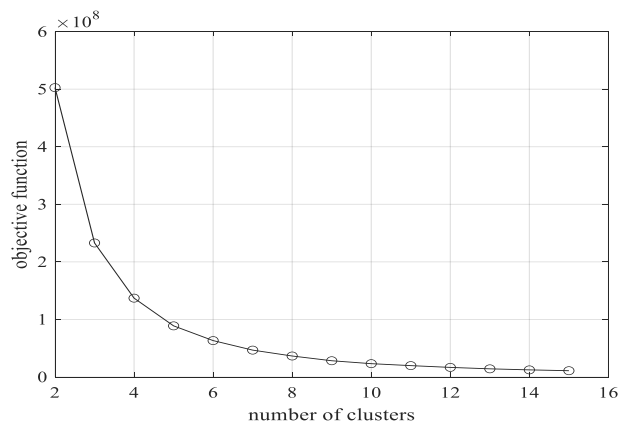
به منظور تعیین توان تولیدی نیروگاه جریان کرشيو از رابطه (۱) استفاده می‌شود. در شکل (۷) توان تولیدی نیروگاه جریان کرشيو به صورت ساعت به ساعت در طول سال نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است توان تولیدی نیروگاه جریان کرشيو در طول سال تغییرات زیادی دارد و این امر منجر



شکل ۷- توان تولیدی نیروگاه جریان کرشيو

کتر می‌شود. در این شکل می‌توان تعداد خوشه یا کلاسترها را ۶ عدد گرفت. با اعمال خوشه‌بندی فازی c میانگین مرکز خوشه‌ها و احتمال هر کدام از این حالت‌ها به صورت جدول (۱) به دست می‌آید.

در تعیین تعداد حالت‌های توان، نمودار تابع هدف روش خوشه‌بندی فازی c میانگین بر حسب تعداد خوشه‌ها رسم می‌شود. در شکل (۸) این نمودار نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۸) مشخص است تابع هدف ابتدا با زیاد شدن تعداد کلاسترها کاهش زیادی داشته اما پس از چند کلاستر میزان کاهش آن



شکل ۸- نمودار تابع هدف بر حسب تعداد کلاسترها

جدول ۱- مدل ۶ حالتی حاصل از خوشه‌بندی

حالت	توان بر حسب وات	احتمال
۱	۲۵۵۰	۰/۰۵۶۵
۲	۱۴۲۰	۰/۲۴۱۲
۳	۲۰۸۰	۰/۱۳۴۱
۴	۱۷۲۰	۰/۱۹۶۸
۵	۸۶۰	۰/۱۳۶۶
۶	۱۱۶۰	۰/۲۳۴۸

دهنده نیروگاه جریان کرشيو، نرخ خرابی معادل و نرخ تعمیر معادل این نیروگاه محاسبه شده است. بر اساس روابط بیان شده در مقاله، این پارامترها محاسبه و در جدول (۳) نرخ خرابی معادل، نرخ تعمیر معادل و دسترس پذیری نیروگاه نشان داده شده است. در مرحله دوم بایستی مدل قابلیت اطمینان کامل نیروگاه جریان کرشيو را با ترکیب مدل قابلیت اطمینان به دست آمده از خوشه‌بندی و مدل قابلیت اطمینان به دست آمده از تاثیر خرابی اجزا به دست بیاوریم. این کار انجام شده و مدل نهایی قابلیت اطمینان نیروگاه جریان کرشيو در جدول (۴) نشان داده شده است.

حال بایستی اثر خراب شدن اجزای تشکیل دهنده مبدل انرژی جریان کرشيو در این مدل قابلیت اطمینان در نظر گرفته شود. در جدول (۲) نرخ خرابی و نرخ تعمیر اجزای تشکیل دهنده نیروگاه جریان کرشيو آورده شده است. بسیاری از تجهیزاتی که در این نیروگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرند در نیروگاههای بادی و یا نیروگاه جزرومدی نوع جریانی نیز استفاده شده‌اند. لذا می‌توان در دسترس نبودن داده‌ها، از داده‌های نرخ خرابی و نرخ تعمیر مربوط به تجهیزات به کار رفته در نیروگاههای بادی، جزرومدی نوع جریانی و ... استفاده نمود. با توجه به سری بودن تجهیزات تشکیل

جدول ۲- نرخ خرابی و نرخ تعمیر اجزای تشکیل دهنده مبدل جریان کرشيو

نام تجهیز	نرخ خرابی (تعداد در سال)	نرخ تعمیر (تعداد در سال)
سیستم نگهدارنده	۱	۱۰۰
توربین	۰/۵	۱۵۰
ژنراتور	۰/۵	۱۵۰
مبدل الکترونیک قدرت	۰/۴	۲۰۰
کابل‌های قدرت	۲	۱۰۰
سیستم کنترل	۰/۲	۳۰۰
ترانسفورماتور	۰/۵	۱۰۰



**جدول ۳- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جریان کرشيو با در نظر گرفتن خرابی اجزا**

نرخ خرابی معادل (تعداد در سال)	نرخ تعمیر معادل (تعداد در سال)	دسترس پذیری	دسترس ناپذیری
۵/۱	۱۱۵/۱۲	۰/۹۵۷۶	۰/۰۴۲۴

**جدول ۴- مدل قابلیت اطمینان نهایی نیروگاه جریان کرشيو**

حالت	توان بر حسب وات	احتمال
۱	۰	۰/۰۴۲۴
۲	۲۵۵۰	۰/۰۵۴۱
۳	۱۴۲۰	۰/۲۳۰۹
۴	۲۰۸۰	۰/۱۲۸۴
۵	۱۷۲۰	۰/۱۸۸۵
۶	۸۶۰	۰/۱۳۰۸
۷	۱۱۶۰	۰/۲۲۴۹

که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد به صورت نشان داده شده در جدول (۵) می‌باشد.

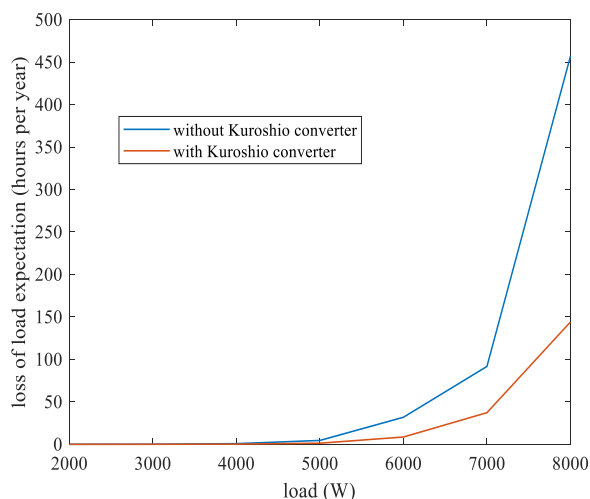
در این قسمت شاخص‌های قابلیت اطمینان یک سیستم تست نمونه به دست آورده می‌شود و سپس تاثیر نیروگاه‌های جریان کرشيو بر این شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سیستم تستی

**جدول ۵- مشخصات سیستم تست**

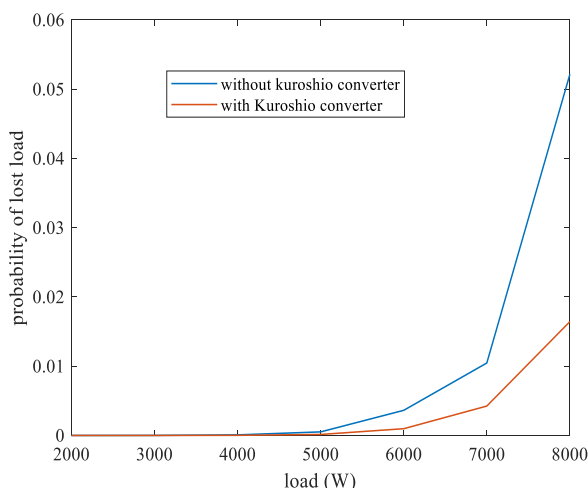
تعداد نیروگاه	توان نامی	احتمال سالم بودن
۳	۱۰۰۰ وات	۰/۹۵
۲	۲۰۰۰ وات	۰/۹۶
۱	۳۰۰۰ وات	۰/۹۶

اساس روش پیشنهادی، تاثیر اضافه نمودن نیروگاه جریان کرشيو بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم تست مورد ارزیابی قرار گرفته است. با اضافه نمودن نیروگاه جریان کرشيو، جدول ظرفیت سیستم محاسبه شده و با اضافه شدن نیروگاه جریان کرشيو به سیستم تست مقدار عددی شاخص‌های قابلیت اطمینان به ازای پیک بارهای مختلف بدست آورده می‌شود. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) این شاخص‌ها در کنار شاخص‌های مربوط به سیستم تست اولیه رسم شده است. همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است با اضافه شدن نیروگاه جریان کرشيو شاخص‌های قابلیت اطمینان بهبود پیدا کرده است. به این معنا که احتمال قطع بار، متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشده نسبت به حالت قبل فقط سیستم تست وجود داشت، کمتر شده است.

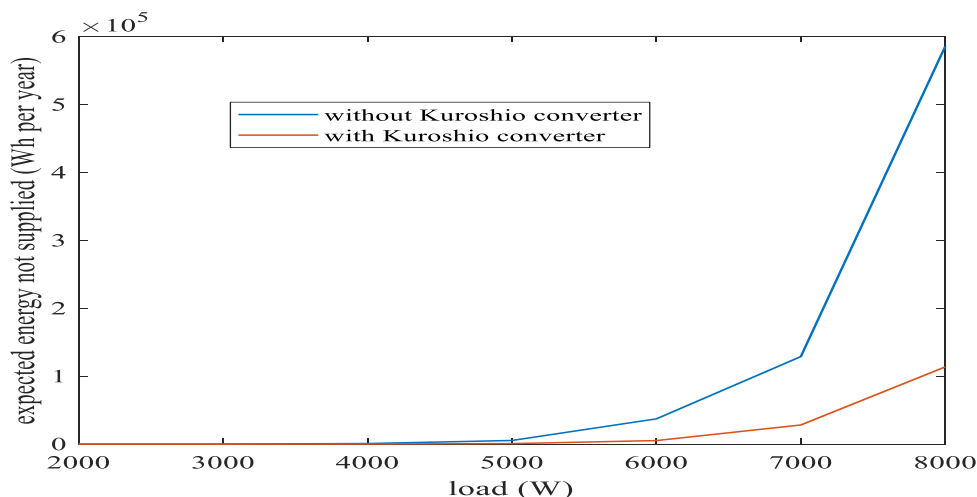
با توجه به سیستم تست، جدول ظرفیت هر کدام از این نیروگاه‌ها به دست آورده شده و سپس با هم ترکیب می‌شوند تا جدول کلی سیستم تست به دست آورده شود. فرض می‌کنیم بار سیستم از ۲۰۰۰ وات تا ۸۰۰۰ وات تغییر می‌کند. بر این اساس شاخص‌های احتمال قطع بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تامین نشده به ازای پیک بارهای مختلف محاسبه شده و به دست آورده شده است. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نمودار مربوط به این شاخص‌ها بر حسب پیک بار رسم شده است. همانگونه که در این شکل به خوبی مشخص است با زیاد شدن پیک بار سیستم، احتمال قطع بار، متوسط زمان قطع بار و انرژی تامین نشده سیستم افزایش پیدا کرده و به عبارت دیگر قابلیت اطمینان سیستم بدتر می‌شود. بنابراین لازم است نیروگاه‌های جدید به مدار بیایند تا شاخص‌های قابلیت اطمینان بهبود پیدا کنند. در این شکل‌ها همچنین، بر



شکل ۱۰- متوسط زمان قطع بار



شکل ۹- نمودار احتمال قطع بار برای سیستم تست و سیستم تست با حضور مبدل کرشیو



شکل ۱۱- متوسط انرژی تامین نشده بر حسب بار

جریان‌های کرشیو، توان تولیدی توربین‌های جریان کرشیو را به دست آورد. به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان مبدل انرژی جریان کرشیو هم خرابی اجزای تشکیل دهنده و هم تغییرات سرعت جریان‌های کرشیو که منجر به تغییرات توان تولیدی این نیروگاه‌ها می‌شد در نظر گرفته شد. اجزای تشکیل دهنده نیروگاه جریان کرشیو شامل توربین، سیستم نگهدارنده، ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، سیستم کنترل، کابل‌های قدرت و ترانسفورماتور بودند. خراب شدن هر کدام از این تجهیزات سبب خرابی نیروگاه می‌شود و بنابراین در مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه تمامی این اجزا به صورت سری قرار می‌گیرند و به راحتی نرخ خرابی و نرخ تعمیر معادل نیروگاه به دست آورده می‌شود. سپس اثر تغییرات سرعت جریان‌های کرشیو بر مدل قابلیت اطمینان در نظر گرفته

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق قابلیت اطمینان مبدل‌های انرژی جریان کرشیو مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا این مبدل‌های انرژی معرفی شدند و اجزای تشکیل دهنده آن‌ها مشخص شد. جریان‌های کرشیو از جمله جریان‌های دریایی هستند که در کشورهای ژاپن و تایوان وجود دارند. این جریان‌ها به دلیل سرعتی که دارند دارای انرژی جنبشی هستند و بنابراین می‌توانند با چرخاندن توربین‌های جریانی که در اعماق اقیانوس نصب می‌شوند برق تولید کنند. توان تولیدی این مبدل‌ها به مکعب سرعت این جریان‌ها، چگالی آب دریا، مساحتی که توربین در بر می‌گرفت و عدد بتز بستگی داشت. بنابراین می‌توان با داشتن سرعت

قطعی بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تامین نشده به دست آورده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد اضافه شدن نیروگاه‌های جریان کرشیو به سیستم قدرت سبب بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان این سیستم می‌گردد. پیشنهاد می‌گردد جهت ادامه این تحقیق با استفاده از روش‌های عددی نظیر مونت کارلو نیز قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها بررسی شود. همچنین می‌توان تاثیر خطوط انتقال و توزیع را نیز بر شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی نمود.

شد. به خاطر تغییرات سرعت جریان‌های کرشیو، توان تولیدی نیروگاه نیز متغیر بود که منجر به وجود تعداد زیاد حالت در توان خروجی نیروگاه می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی C میانگین، تعداد حالت‌ها کاهش داده شده است و یک مدل چند حالتی برای مدل‌های انرژی جریان کرشیو به دست آورده شده است. به منظور بررسی اثر نیروگاه جریان کرشیو بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت، یک سیستم تست مطالعه شد و شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان شامل احتمال

## References

- Barnier, Bernard, et al. "Modelling the impact of flow-driven turbine power plants on great wind-driven ocean currents and the assessment of their energy potential." *Nature Energy* 5.3 (2020): 240-249. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0580-2>
- Ghaedi, Amir, and Hamed Gorginpour. "Reliability evaluation of permanent magnet synchronous generator-based wind turbines considering wind speed variations." *Wind Energy* 24.11 (2021): 1275-1293. <https://doi.org/10.1002/we.2631>
- Ghaedi, Amir, et al. "Toward a comprehensive model of large-scale DFIG-based wind farms in adequacy assessment of power systems." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5.1 (2013): 55-63. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2272947>
- Ghaedi, Amir. "Reliability modelling of ocean current energy conversion systems through both analytical and Monte Carlo methods." *Ocean Engineering* 286 (2023): 115457. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115457>
- Hsu, Po-Chun. "Surface Current Variations and Hydrological Characteristics of the Penghu Channel in the Southeastern Taiwan Strait." *Remote Sensing* 14.8 (2022): 1816. <https://doi.org/10.3390/rs14081816>
- Kubota, Yoshimi, et al. "Variation in subsurface water temperature and its link to the Kuroshio Current in the Okinawa Trough during the last 38.5 kyr." *Quaternary International* 452 (2017): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.021>
- Liu, Mingjun, et al. "Reliability evaluation of a tidal power generation system considering tidal current speeds." *IEEE Transactions on Power Systems* 31.4 (2015): 3179-3188. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2473797>
- Liu, Tianran, et al. "High-resolution modeling of the Kuroshio current power south of Japan." *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* 4 (2018): 37-55. <https://doi.org/10.1007/s40722-017-0103-9>
- Liu, Zhao-Jun, et al. "Tempo-spatial variations of the Kuroshio current in the Tokara Strait based on long-term ferryboat ADCP data." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124.8 (2019): 6030-6049. <https://doi.org/10.1029/2018JC014771>
- Mirzadeh, Mostafa, Mohsen Simab, and Amir Ghaedi. "Reliability evaluation of power systems containing tidal power plant." *Journal of Energy Management and Technology* 4.2 (2020): 28-38. <https://doi.org/10.22109/jemt.2020.176501.1167>
- Nargeszar, Ayoub, et al. "Reliability evaluation of the renewable energy-based microgrids considering resource variation." *IET Renewable Power Generation* 17.3 (2023): 507-527. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12611>
- Shirasawa, Katsutoshi, et al. "Experimental verification of a floating ocean-current turbine with a single rotor for use in Kuroshio currents." *Renewable Energy* 91 (2016): 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.035>
- Taniguchi, Naokazu, et al. "Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography." *The Journal of the Acoustical Society of America* 134.4 (2013): 3272-3281. <https://doi.org/10.1121/1.4818842>
- Tsao, Che-Chih, et al. "Marine current power with cross-stream active mooring: Part I." *Renewable Energy* 109 (2017): 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.065>
- Tsao, Che-Chih, et al. "Marine current power with cross-stream active mooring: Part II." *Renewable Energy* 127 (2018): 1036-1051. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.024>
- Ueno, Tomohiro, et al. "Development and demonstration test for floating type ocean current turbine system conducted in kuroshio current." *2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*. IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2018.8558792>

17. Wang, Jia, et al. "The evolution of the Kuroshio Current over the last 5 million years since the Pliocene: Evidence from planktonic foraminiferal faunas." *Science China Earth*

*Sciences* 63.11 (2020): 1714-1729.  
<https://doi.org/10.1007/s11430-019-9641-9>



## Analysis of Kuroshio Current Converter as Renewable and Environmentally Friendly Power Plant

Amir Ghaedi\*

Associate professor, Department of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran

Received: 6 Sep 2023

Accepted: 11 Nov 2023

**Keywords:** Kuroshio Current converter, reliability, stream speed, fuzzy c-means clustering.

### Extended Abstract

**Introduction:** Among different renewable energy sources, ocean is considered as one of the renewable energy sources that has a wide geographical range. Marine currents have different categories that tidal currents are among these currents. Near Japan, there is a current in the ocean known as the Kuroshio Current, which has a high potential for generating electricity. These currents have speed and consequently kinetic energy and can generate electricity by using turbines installed deep in the ocean. One of the problems that these currents have is that they change over time and therefore the power generation of energy converters of Kuroshio currents also varies. Therefore, the effect of these changes on different aspects of these converters such as reliability should be investigated.

**Materials and Methods:** In the reliability model of the current converter, both the component failure and output power variations, which are caused by the change in the speed of ocean currents are considered.

**Results and Discussion:** In this part, a Kuroshio Current energy converter that includes a turbine with a diameter of 2 meters is considered. In this part, the reliability indices of a sample test system are obtained, and then the effect of Kuroshio Current power plants on these indices is evaluated. The results show that as the peak load of the system increases, the reliability of the system deteriorates.

**Conclusion:** In this paper, the reliability model of Kuroshio Current converters is obtained. Numerical results conclude that the Kuroshio Current converters can improve reliability indices of power system.

**Corresponding author:** Amir Ghaedi

**Address:** Shiraz, Dariun Branch, Islamic Azad University, Department of Power Electrical Engineering. **Tel:** +989127948961

**Email:** amir.ghaedi@iau.ac.ir

**Citation:** Ghaedi A. Analysis of Kuroshio Current Converter as Renewable and Environmentally Friendly Power Plant. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2023; 1(3): 15-27.



© 2023, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.