

## تخمین انرژی قابل استحصال از امواج با ایجاد جریان‌های شکافنده مصنوعی

بهارک صباحی نمینی<sup>۱</sup>، مجید قدسی حسن آباد<sup>۲\*</sup>، سارا اله یاری بیک<sup>۳</sup>، مجتبی عظام<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی،

baharaksabahi@gmail.com

واحد علوم و تحقیقات، تهران

m.ghodsi@srbiau.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه صنایع دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی،

s.allahyari@srbiau.ac.ir

واحد علوم و تحقیقات، تهران

<sup>۴</sup> استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی،

ezam@srbiau.ac.ir

واحد علوم و تحقیقات، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۱۲

### چکیده

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله انرژی‌های اقیانوسی به یک ضرورت تبدیل شده است. امواج دریای خزر برای استخراج انرژی، توان قابل ملاحظه‌ای ندارند، اما اگر بتوان انرژی امواج را جمع نمود، انرژی قابل توجهی در دسترس خواهد بود. با الگوگیری از یک پدیده طبیعی به نام جریان شکافنده می‌توان به این هدف دست یافت. پس با مدل‌سازی جریان‌های شکافنده و در نظر گرفتن متغیرهای ارتفاع شاخص موج، پرپود موج، شیب بستر، ارتفاع کانال جریان شکافنده، فاصله کانال تا ساحل و فاصله بین کانال‌ها به محاسبه میزان توان قابل استحصال با استفاده از نرم‌افزارهای مایک و متلب پرداخته می‌شود. در این تحقیق، ابتدا با نرم‌افزار متلب، کانال شبیه‌سازی شد، سپس با استفاده از نرم‌افزار مایک، مش‌بندی و توپوگرافی پیاده‌سازی شد. نتایج شامل سرعت آب در ۳۶ نقطه بین کانال در عمق‌های مختلف استخراج شد و در نهایت با استفاده از محاسبات نرم‌افزار متلب، دبی و توان حاصل از کانال شبیه‌سازی شده، محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که بهترین حالت، ارتفاع شاخص موج ۱/۵ متر، پرپود ۵ ثانیه، شیب بستر ۷/۵٪، ارتفاع کانال ۴/۹۵ متر، فاصله کانال تا ساحل، ۷۵ متر و فاصله کانال‌های جریان شکافنده ۱۰ متر است که با مشخصات امواج برخی نقاط سواحل مازندران مطابقت دارد و توانی حدود ۳۰ کیلووات از آن قابل استحصال است. این حالت از بین ۲۳ حالت بررسی شده به دست آمده است. مهم‌ترین پارامترهایی که بیشترین تغییر را در استخراج توان ایجاد می‌کنند، ارتفاع شاخص موج و ارتفاع کانال هستند. در حالت‌های بررسی شده، توان تقریباً از صفر تا ۲۹/۲ کیلووات تغییر می‌کند و برای تنها چهار حالت توان بالاتر از ۱۷ کیلووات بوده و قابل بررسی است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان‌های شکافنده، استحصال انرژی، کانال مصنوعی، دریای خزر

## ۱. مقدمه

جریان‌های شکافنده، جریان‌های عمود بر ساحل، باریک و جاری به سمت دریا هستند که از درون منطقه خیزاب ساحلی سرچشمه می‌گیرند تا منطقه شکست موج (سرقارچی جریان شکافنده) پیش می‌روند و می‌توانند سرعت‌های نسبتاً زیادی هم داشته باشند. این جریان‌ها درون ناحیه خیزاب ساحلی به صورت طبیعی افت پیدا می‌کنند؛ سپس به سمت دریا جهت‌گیری کرده و حرکت می‌کنند. همچنین این جریان‌ها، تقریباً عمود بر ساحل و به سمت دریا هستند و اغلب سرعتی حدود ۰/۱ تا یک متر بر ثانیه دارند و در جریان‌های بزرگ مقیاس مثلاً پالم بیچ استرالیا به ۲ متر بر ثانیه نیز می‌رسد [۱-۲]. داده‌های آزمایشگاهی و میدانی مبین آن است که با افزایش انرژی موج و کاهش عمق آب، جریان شکافنده قدرت بیشتری می‌گیرد. این جریان در داخل منطقه خیزاب ساحلی به سبب از میان رفتن امواج به بیشترین مقدار خود می‌رسد [۳].

روش‌های اولیه شناسایی جریان شکافنده عبارت‌اند از:

- وجود کانالی از آب متلاطم و خروشان؛
- تفاوت در رنگ آب (ممکن است رسوب‌های معلق به وسیله جریان شکافنده به دریا بازگردانده شوند)؛
- وجود خطی کف آلود دارای خزه و لجن به سمت دریا؛
- شکست در الگوی امواج فرودی [۴-۵].

زاویه امواج فرودی با خط ساحلی، بر احتمال وقوع جریان شکافنده تأثیرگذار است. امواجی که با زاویه‌ای تقریباً عمود به سمت ساحل می‌آیند، بیش از امواج فرودی با زوایای دیگر، احتمال تشکیل جریان‌های شکافنده را دارند. فعل و انفعالات مرزی موج، ریخت‌شناسی بستر منطقه خیزاب ساحلی، شیب ملایم ساحل، سازه‌های ساحلی و برآمدگی‌های شنی در طول ساحل و جزر و مد در تشکیل و تقویت جریان‌های شکافنده نقش دارند [۶]. علیزاده در سال ۱۳۸۳ نیز به بحث کوتاهی در مورد جریان‌های شکافنده و راهکارهای اجتناب از آن، همچنین به بررسی ویژگی‌های اقلیمی و زمین‌شناختی خزر پرداخته است [۷]. شافعی ثابت به بررسی میدانی جریان‌های شکافنده در امتداد ساحل جنوبی

دریای خزر پرداخت و منطقه مورد مطالعه بندر انزلی را انتخاب نمود. وی در دو روز از تابستان سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ با شرایط مختلف موجی و استفاده از پنج جی‌پی‌اس<sup>۱</sup> شناور به بررسی این جریان پرداخت و ۹ جریان‌سنج آر. سی. ام<sup>۲</sup> را برای تعیین سرعت شناورها در کانال جریان شکافنده نصب کرد و نشان داد که در سواحل شنی، موقعیت‌هایی که برای این کانال روی می‌دهد با مکانیزم‌های هیدرودینامیکی تعیین می‌شود [۸]. ولی‌پور در سال ۱۳۹۲ با مدل‌سازی فیزیکی به بررسی عوامل مؤثر بر تغییر فاصله بین کانال‌های جریان شکافنده و عرض آن‌ها با مطالعه پارامترهای هیدرودینامیکی پرداخت و در نهایت با کمک نرم‌افزارهای مربوط به مدل‌سازی عددی از جمله نرم‌افزار مایک ۳۲۱ از طریق مقایسه نتایج آزمایشگاهی با داده‌های مدل، رابطه مناسب برای محاسبه فاصله و عرض کانال‌های جریان شکافنده بر حسب پارامترهای موج و بستر ارائه داد [۹]. چابود در سال ۲۰۱۱ در یک فلوم آزمایشگاهی میزان انرژی حاصل از جریان شکافنده را اندازه‌گیری کرد و نتیجه گرفت که قدرت جریان شکافنده طبیعی برای تولید برق در مقیاس بزرگ مناسب نیست [۱۰]. کومار و ولگاریس در سال ۲۰۱۲ مدل اقیانوسی سه‌بعدی رامز<sup>۴</sup> را با مدل‌های انتشار موجی سوان<sup>۵</sup> و راف/دیف<sup>۶</sup> ترکیب کرده و برای مدل‌سازی جریان شکافنده در آب کم عمق استفاده نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق الگوهای گردش منطقه خیزاب ساحلی را نشان داده و این مدل نشان داد که شدت جریان شکافنده در امواجی که با زوایای ۱ تا ۵ درجه به ساحل می‌رسند، نسبت به امواج عمودی بیشتر است [۱۱]. کستل و رینرز در سال ۲۰۱۳ با استفاده از مدل عددی به بررسی تأثیر ریخت‌شناسی سدهای رسوبی در بقا و دوام منطقه خیزاب در سواحل با کانال‌های جریان شکافنده، تحت تأثیر امواج عمود بر ساحل پرداختند و در نتیجه مطالعاتشان دریافتند، فواصل بین کانال‌های جریان شکافنده مبنای مناسبی برای سنجش میزان دوام منطقه خیزاب ساحلی است به طوری که دوام خیزاب با افزایش فواصل بین کانال‌ها کاهش می‌یابد [۱۲]. براساس تحقیقات یادشده، همچنین مطالعات زیادی که توسط محققان مختلف صورت گرفته، در مجموع می‌توان گفت شیب بستر، عمق کانال

قله پشته از موج ساز ۱۲ متر، عمق آب در مرز دریا ۴۰ سانتی متر و در بالای پشته برابر ۵ سانتی متر است. همچنین امواج منظم با پریود یک ثانیه و ارتفاع ۴/۵ سانتی متر، ابعاد مدل انتخابی با آن‌ها با ۱۸/۲ متر و عرض ۱۷/۲ متر است [۱۹].

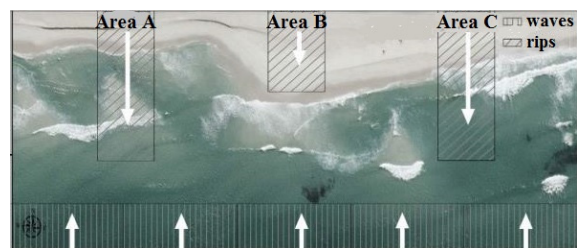
در این تحقیق جریان‌های شکافنده را با دیدگاهی متفاوت نسبت به سایر تحقیقات مورد مطالعه قرار داده شد؛ علی‌رغم این که جریان‌های شکافنده خطراتی نیز دارند در این تحقیق به‌عنوان یک پدیده مفید معرفی می‌شوند و اثر پارامترهای مختلف، برای افزایش قدرت جریان شکافنده به‌صورت مصنوعی برای استخراج انرژی جریان بررسی می‌شود. در این راستا کانالی مصنوعی از جنسی مستحکم مانند فولاد در فاصله‌ای از ساحل برای مطالعه جریان شکافنده با نرم‌افزار متلب<sup>۸</sup> مدل شده، سپس تأثیر عوامل مختلف از جمله پریود موج، ارتفاع شاخص موج، فاصله بین دو کانال و ارتفاع کانال، شیب بستر و فاصله کانال از ساحل بر جریان شکافنده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق ضمن بازنگری مطالعات سایر محققان، به بررسی تأثیر این عوامل بر جریان شکافنده از طریق ماژول کوپل<sup>۹</sup> نرم‌افزار مایک<sup>۳</sup> پرداخته می‌شود. همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق سدی که عامل ایجاد جریان شکافنده است، به‌صورت مصنوعی و از جنسی مانند فولاد است. بنابراین؛ سد رسوبی که عامل ایجاد جریان شکافنده طبیعی است، در این مطالعه در نظر گرفته نمی‌شود.

در نهایت بیشینه توان ناشی از جریان بر اساس پارامترهای تأثیرگذار بر جریان شکافنده به دست آمده است. لازم به توضیح است اگرچه انرژی زیادی در امواج دریای خزر نهفته است، ولی استحصال انرژی از امواج آن (به دلیل کوتاه بودن دامنه امواج) با استفاده از تجهیزات مرسوم امکان‌پذیر نیست. ایده تجمیع انرژی امواج کوچک و تبدیل آن به انرژی قابل توجه برای استحصال، محققان تحقیق حاضر را بر آن داشت تا با الگوگیری از یک پدیده طبیعی به نام جریان شکافنده در دریای خزر و شبیه‌سازی آن در این راه مهم قدمی بردارند.

موازی با ساحل، فاصله تپه شنی یا کانال رسوبی تشکیل شده تا ساحل، فاصله بین کانال‌ها، ارتفاع تپه رسوبی، عمق آب و مشخصات موج فرودی بر میزان سرعت جریان شکافنده و به دنبال آن انرژی این جریان تأثیر مستقیم دارند [۱۳-۱۷].

غلامی، پهنه‌بندی جریان‌های شکافنده در سواحل غربی استان گیلان را مورد مطالعه قرار داده است. یکی از نتایج این تحقیق، استخراج سرعت‌های مختلف جریان‌های شکافنده با توجه به ارتفاع امواج است که موجب تغییر شکل بستر ماسه‌ای می‌شود. همچنین وی دریافت که می‌توان هر ۸۰۰ متر یک کانال ثابت مشاهده کرد [۵].

کریاد و سودا در سال ۲۰۱۹ با مطالعه روی سواحل شهر ریودوژانیرو (برزیل) رابطه‌ای بین پارامترهای جریان‌های شکافنده (بزرگی و جهت)، جزر و مد (دامنه و فاز) و موج (ارتفاع، دوره تناوب و زاویه ورودی) برقرار کردند. براساس این تحقیق شدیدترین جریان‌های شکافنده اغلب در طول موج‌های بزرگ مشاهده می‌شود. همچنین ساحل رسوبی<sup>۷</sup> با توجه به جریان‌های شکافنده شدیدی که در آن رخ می‌دهد، مطابق شکل ۱، به سه منطقه تقسیم می‌شود. دو منطقه جانبی به‌عنوان "مناطق خطرناک" و یک منطقه مرکزی به‌عنوان "منطقه امن" [۱۸].



شکل ۱. سه ناحیه تشکیل جریان شکافنده (نواحی A و C خطرناک و ناحیه B امن هستند) [۱۸]

در سال ۱۹۹۷ مدلی توسط هالر و همکاران برای محاسبه سرعت جریان شکافنده در یک کانال ارائه شد. آن‌ها یک مدل آزمایشگاهی برای مشاهده و بررسی جریان‌های شکافنده از روی یک پشته با کانال‌های برگشتی ایجاد کردند که مشخصات آن شامل ژرفای مدل با شیب ساحل ۱:۳۰ و ۱:۵ با پشته‌ای به موازات ساحل و دو شکاف کانالی به عرض ۱/۸ متر در فاصله ۳/۶ متر از لبه بیرونی مدل بر پشته، فاصله

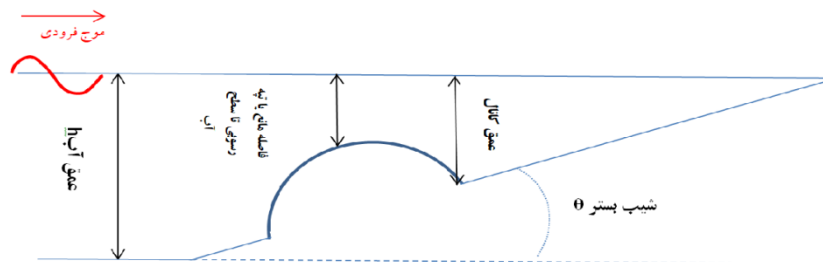
## ۲. مواد و روش‌ها

## ۱-۲. تشریح کانال و ابعاد

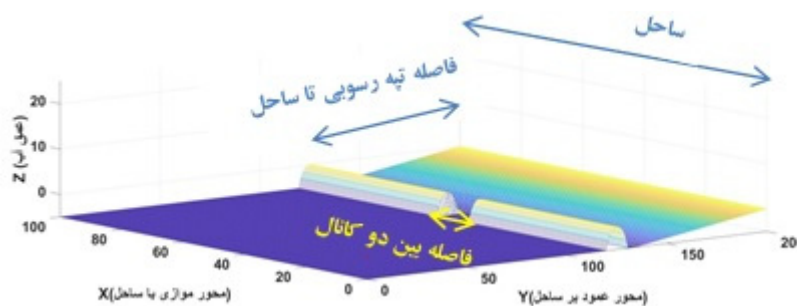
در این تحقیق، ابعاد منطقه مورد مطالعه  $200 \times 100$  مترمربع همراه با یک کانال جریان شکافنده است. محورهای مختصات طوری در نظر گرفته شدند که محور X عمود بر ساحل و محور Y در طول ساحل است. با توجه به پارامترهایی مانند ارتفاع شاخص موج و پریود موج، شیب ساحل و عرض ناحیه خیزاب ساحلی در منطقه مورد مطالعه (دریای خزر)، نرم‌افزارهای مورد استفاده در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان‌ات شکافنده و بررسی عوامل هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی، شامل نرم‌افزارهای متلب و مایک است. فاصله و عرض کانال‌های جریان شکافنده بعد از مطالعه الگوی کلی جریان با تغییر پارامترهای موج، به مدت ۱۰۰۰

ثانیه در معرض امواجی با ارتفاع شاخص موج‌های مختلف قرار داده شد. شکل ۲ متغیرهای شیب بستر، عمق کانال، موج فرودی و فاصله مانع تا سطح آب را در نمای چپ کانال به خوبی نشان می‌دهد، همچنین شکل ۳ که با کانال فرضی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است، فاصله بین کانال‌ها و محورهای مختصات را نشان می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه از طریق یک شبکه‌بندی با  $3302$  گره محاسباتی و  $6345$  المان شبیه‌سازی شد. در ماژول هیدرودینامیک ۱ مقاومت بستر با انتخاب عدد مانینگ مقدار ثابتی به اندازه ۳۲ انتخاب شد. همچنین گام زمانی برای اقصاء شرط همگرایی با توجه به عدد کورانت ۱، ۲ ثانیه و کل زمان اجرا ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. متغیرهای مدل نیز در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲. شماتیک نمای چپ کانال



شکل ۳. نمونه‌ای از کانال مدل‌سازی شده در نرم‌افزار متلب

## ۲-۲. مراحل اجرای مدل

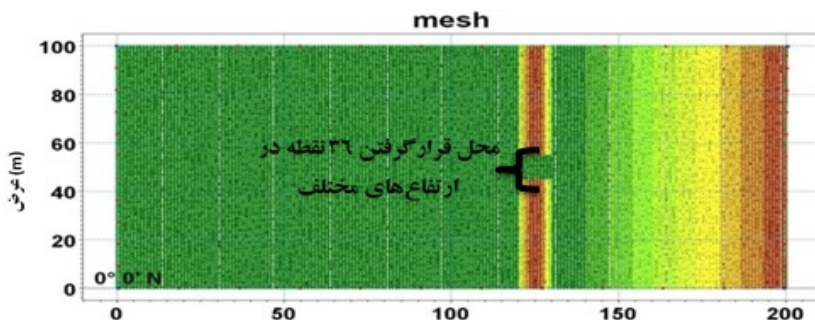
در این تحقیق ابتدا خصوصیات امواج شامل ارتفاع شاخص و پریود موج فرودی در چند منطقه ساحلی دریای خزر، همچنین ویژگی‌های ساحلی شامل شیب منطقه ساحلی، عرض ناحیه خیزاب ساحلی، فاصله بین دو کانال جریان شکافنده، عمق آب و فاصله کانال تا ساحل مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب یک

کانال مصنوعی شبیه‌سازی شد، سپس فایلی در قالب (XYZ\*) از خروجی‌های متلب برای ورود داده‌ها به نرم‌افزار مایک آماده شد. با اعمال شرایط مرزی مش‌بندی و توپوگرافی بستر انجام شد که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. سپس با استفاده از مدل مایک با ماژول مایک ۳، سرعت‌های ۳۶ نقطه در فاصله بین دو کانال در عمق‌های مختلف استحصال شد. نتایج حاصل از محاسبه سرعت‌ها با

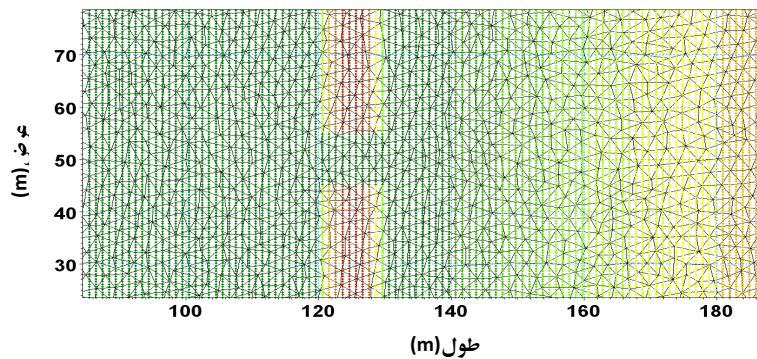
حداقل شامل سه اجرا است؛ مرحله اول بر اساس تغییرات پیروید موج و ارتفاع شاخص موج، مرحله دوم تغییرات شیب بستر، مرحله سوم تغییرات ارتفاع پشته‌ها، مرحله چهارم فاصله کانال از ساحل و در نهایت مرحله پنجم تغییرات فاصله بین دو مانع است. مدل در حال بررسی در مجموع ۲۳ بار اجرا شد. البته در اجرای مدل از شرایط موج فرودی در خزر جنوبی (سواحل مازندران) استفاده شد [۲۰]. جدول ۱ مقادیر متغیرها را در هر یک از مراحل اجرا نشان می‌دهد.

کدنویسی در نرم‌افزار متلب میزان دبی و توان محاسبه شد. لازم به یادآوری است که با تغییر متغیرهای تعریف‌شده در جدول ۱ به محاسبه مقدار بهینه انرژی پرداخته شد.

در جدول ۱، زاویه کانال با خطی به موازات خط ساحل است، ارتفاع شاخص موج (a) و برحسب متر است، پیروید موج (T) برحسب ثانیه، (θ) شیب بستر، شعاع کانال یا ارتفاع پشته‌ها برحسب متر، فاصله بین کانال‌ها برحسب متر است. طبق جدول ۱ برای بررسی سرعت و انرژی جریان در کانال شبیه‌سازی‌شده، پنج مرحله اجرا شد که هر مرحله

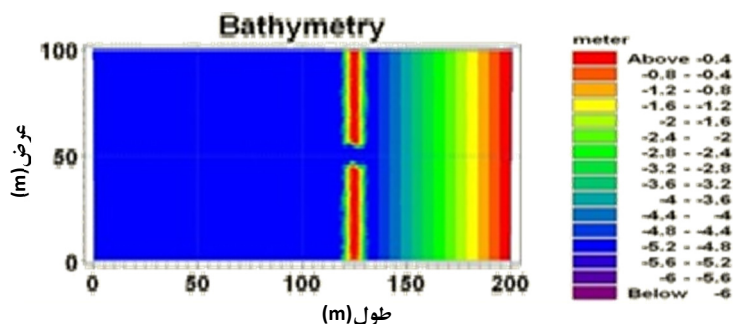


الف



ب

شکل ۴. شبکه‌بندی مثلثی کانال مورد استفاده در مدل‌سازی الف) کل ناحیه حل ب) بزرگ‌نمایی بخشی از ناحیه حل



شکل ۵. توپوگرافی کانال مصنوعی



این معادلات با گسسته‌سازی به روش تفاضل محدود بر روی یک شبکه پیشنهادی مستطیلی حل می‌شوند. امواج پس از رسیدن به منطقه کم عمق ساحلی، تحت تأثیر انکسار و شرایط کم عمقی قرار می‌گیرند و سرانجام می‌شکنند. در اثر شکست امواج در این ناحیه و تغییرات تنش‌های برشی، دو جریان یکی به موازات ساحل و دیگری عمود بر ساحل پدید می‌آید [۲۱].

نتیجه نهایی حاصل از این تحقیق برآورد توانی است که از انرژی جریان‌های شکافنده می‌توان استحصال کرد مقدار توان آب ورودی از سطحی معین با توان سوم سرعت به شکل رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4)$$

که در آن  $P_w$  توان در آب و بر حسب وات،  $\rho$  چگالی آب و بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $A$  سطحی است که با توربین آبی جاروب می‌شود و بر حسب مترمربع،  $V$  سرعت آب بر حسب متر بر ثانیه است. این انرژی، مقدار انرژی است که در آب موجود است.

با توجه به معادله توان توربین رابطه (۴) و معادله‌های ضریب توان توربین آبی، توان مکانیکی اعمالی به توربین آبی که همان توان مکانیکی جذب شده از آب است از رابطه (۵) به دست می‌آید [۲۲]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

که در رابطه (۵)،  $P_m$  توان مکانیکی توربین با واحد وات،  $C_p(\lambda, \beta)$  ضریب توربین آبی (که به طراحی توربین وابسته است) و در آن  $\beta$  زاویه گام پره‌ها و  $\lambda$  نسبت سرعت لبه پره است.  $\rho$  چگالی آب به طور متوسط برای خزر ۱۰۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و  $A$  سطح مقطع پره‌های توربین بر حسب مترمربع و  $V$  سرعت ورودی آب بر حسب متر بر ثانیه است. ماکزیم مقدار  $C_p$  در حالت ایده آل مقدار حد بتز که برابر ۰/۵۹ است. مقدار ماکزیم  $C_p$  برای توربین‌های آبی ۴۸ تا ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

### ۳. تئوری و محاسبات

#### ۳-۱. معادله‌ها در مازول هیدرودینامیک مایک

در مازول هیدرودینامیک معادله‌های زیر پایداری جرم و تکانه را نشان می‌دهد که نرم‌افزار با انتگرال‌گیری از این معادله‌ها در راستای قائم، تغییرات تراز آب و جریان‌ها را در منطقه مدل محاسبه می‌کند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

معادله تکانه در جهت x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] \\ - \Omega q - fvv_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

معادله تکانه در جهت y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] \\ - \Omega p - fvv_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

که در این روابط:  $h$  عمق آب بر حسب متر و برابر  $d - \xi$  است،  $\xi$  تراز سطح آب بر حسب متر،  $d$  تغییر زمانی عمق آب بر حسب متر،  $q, p$  چگالی‌های شار در جهت‌های  $x$  و  $y$  است،  $C$  ضریب شزی<sup>۱۲</sup> بر حسب جذر متر بر ثانیه،  $g$  شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه،  $f$  فاکتور اصطکاک باد، همچنین  $v_x, v_y, v$  سرعت باد و مؤلفه‌های آن در جهت‌های  $x$  و  $y$  بر حسب متر بر ثانیه،  $\Omega$  نیروی کوریولیس وابسته به عرض جغرافیایی،  $p_a$  فشار جو و  $\rho_w$  چگالی آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $t$  زمان بر حسب ثانیه و  $\tau_{xy}, \tau_{yy}, \tau_{xx}$  مؤلفه‌های تنش برشی بر حسب نیوتن بر مترمربع هستند.

### ۲-۳. پایداری مدل

در تمامی مدل‌هایی که با روش تفاضل محدود کار می‌کنند، پایداری و همگرایی مدل به مشخصات پارامترهای خاصی همچون گام زمانی و گام مکانی مدل بستگی دارد. در ماژول هیدرودینامیک برای تعیین شرایط پایداری ماژول، عدد کورانت تعریف شده است. به منظور دستیابی به پایداری کامل، عدد کورانت در حدود ۰/۸ باید در نظر گرفته شود. در حالت کلی با افزایش عدد کورانت تا زمانی که پایداری مطلوب قابل حصول باشد، به دلیل افزایش طول گام زمانی، سرعت محاسبات افزایش یافته و شرایط مطلوب‌تری ایجاد می‌شود. عدد کورانت طبق رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$C_R = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6)$$

$$c = \sqrt{gh} \quad (7)$$

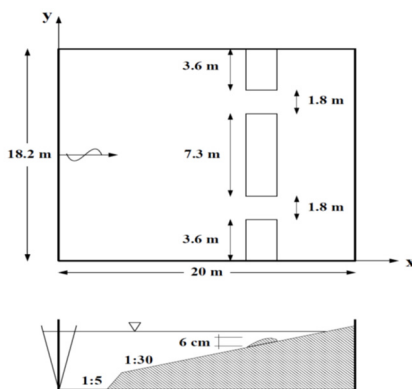
که در آن،  $h$  عمق آب،  $c$  سرعت امواج،  $\Delta x$  گام مکانی در جهت  $x$  و  $\Delta t$  گام زمانی است.

### ۳-۳. کالیبراسیون مدل

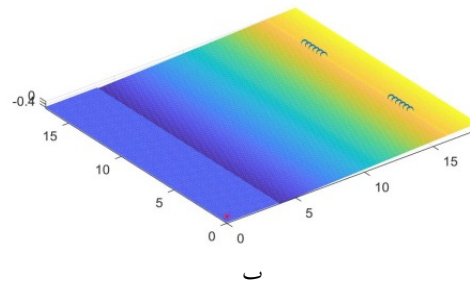
به کمک نتایج حاصل از آنالیز حساسیت می‌توان مدلی با دقت بالا برپا نمود، این کار به‌طور کلی نشان می‌دهد که کدام‌یک از ضرایب ورودی بیشترین تأثیر را بر تغییرات نتایج خروجی دارد. بر اساس نتایج این قسمت، کالیبراسیون بر اساس تعداد ضرایب ورودی مدل انجام می‌گیرد. در این

مرحله از نتایج یک‌سری اجراهای اولیه برای سنجش میزان حساسیت تراز آب نسبت به ضرایب ورودی مدل نظیر عدد کورانت انجام می‌شود.

به منظور بررسی اثر کورانت بر تراز آب نتایج مدل‌سازی، مدل حاضر با ضرایب ویسکوزیته مختلف (۰/۲، ۰/۲۸، ۰/۴ و ۰/۸) برای یک دوره مشخص اجرا شده و نتایج به‌دست آمده در مناطق مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. مقایسه ترازهای آب در شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نسبت به ضریب ویسکوزیته حساسیت ندارند. از آنجاکه شبیه‌سازی‌های انجام شده، نشان دادند که ضریب ویسکوزیته بر نتایج ترازهای آب ناشی از جریان، تأثیری نداشته، بنابراین؛ مقدار ثابت ۰/۲۸ که در راهنمای نرم‌افزار پیشنهاد شده برای استفاده در شبیه‌سازی این مطالعات به کار گرفته شده است. پس از تعیین مقادیر مناسب ضرایب، مدل حاضر با مدل هالر و همکاران [۱۹] با مشخصات اشاره شده در بخش مقدمه و طبق شکل ۶ مقایسه و صحت‌سنجی شده است. پس از شبیه‌سازی کانال توسط متلب و با استفاده از مدل عددی مایک ۳ و به دست آمدن میانگین سرعت با توجه به سری زمانی، سرعت متوسط ۰/۴ متر بر ثانیه بود ولی متوسط نتیجه توسط هالر ۰/۵ متر بر ثانیه گزارش شده بود که حدود ۲۰٪ خطا وجود داشت.



الف.



ب

شکل ۶. الف. ابعاد فلوم طراحی شده توسط هالر و همکارانش [۱۹]، ب. شبیه‌سازی فلوم با استفاده از نرم‌افزار متلب

## ۴. یافته‌ها و بحث

در این تحقیق برای استخراج نتایج، از شرایط موج فرودی در دریای خزر جنوبی (سواحل مازندران) استفاده شد [۲۰]. همچنین حالت بهینه (بیشترین توان استحصال شده با توجه به متغیر در نظر گرفته شده) در هر مرحله، به عنوان پارامتر ثابت مراحل بعدی لحاظ شده است.

در مرحله اول پارامترهای موج فرودی (ارتفاع شاخص موج و پرپود) متغیر و پارامترهای دیگر ثابت فرض شدند. مشاهده شد که در ارتفاع موج کمتر از یک متر، مقدار توان کمی حاصل می‌شود در صورتی که در فاصله ارتفاعی بین یک تا ۱/۲۵ متر تغییرات ناگهانی در مقدار توان استخراجی صورت پذیرفت. ارتفاع موج بالاتر از ۱/۲۵ متر نیز تغییرات بسیار کمی را در توان خروجی نشان داده است. با توجه به موقعیت منطقه بیان شده ارتفاع شاخص موج ۱/۵ متر در نظر گرفته شد که پرپود وقوع این نوع امواج در حدود ۵ ثانیه بوده است. شکل ۷ این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد.

در مرحله دوم شیب بستر متغیر و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شدند. مشاهده شد که اگر شیب بستر کمتر از ۰/۵ باشد، مقدار توان کمی استحصال می‌شود، در صورتی که در شیب بستر از ۰/۵ تا ۰/۷/۵ افزایش زیادی در توان خروجی وجود دارد. در شیب‌های بیشتر از ۰/۷/۵ تغییرات زیادی در مقدار توان خروجی وجود نداشت. بنابراین، با توجه به مشخصه‌های مورفولوژیکی منطقه مورد بحث، شیب ۰/۷/۵ لحاظ شده است که شکل ۸ به خوبی بیانگر این موضوع است.

در مرحله سوم ارتفاع کانال‌ها متغیر و پارامترهای دیگر ثابت فرض شده است. نتایج حاصل نشان داد که هرچه قدر ارتفاع کانال بیشتر باشد، مقدار توان استحصال بیشتر است، با در

نظر گرفتن پدیده شکست و عمق آب، نزدیک‌ترین فاصله به سطح آب بهترین حالت برای دریافت بیشینه مقدار توان است. در این تحقیق عمق آب ۵ متر و ارتفاع کانال ۴/۹۵ متر در نظر گرفته شده که شکل ۹ گویای این مطلب است.

در مرحله چهارم با متغیر فرض کردن فاصله کانال یا پشته از ساحل، پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده است. مشاهدات نشانگر آن است که با افزایش فاصله کانال‌ها از ساحل تا حدود ۷۵ متر دور از ساحل، بیشترین مقدار توان به دست می‌آید ولی با افزایش بیشتر از این مقدار برای فاصله کانال از ساحل روند، نزولی در مقدار توان استحصال شده به دست می‌آید. در این تحقیق با توجه به موقعیت منطقه بیان شده حالت بهینه ۷۵ متر است که شکل ۱۰ به خوبی این مطلب را نشان می‌دهد.

در مرحله پنجم با متغیر در نظر گرفتن پارامتر فاصله بین کانال‌ها، پارامترهای دیگر ثابت فرض شدند، نتیجه حاصل از محاسبات بیانگر این مطلب بود که اگر فاصله بین دو کانال ۱۰ متر باشد، بیشترین مقدار توان حاصل خواهد شد ولی اگر فاصله کانال‌ها بیشتر از این مقدار باشد، با هم مقدار توان خروجی کم خواهد شد که در شکل ۱۱ به خوبی نشان داده شده است.

در نهایت حالت بیشینه مقدار توان حاصل از جریان شکافنده در جدول ۱ با علامت \* نشان داده شده است. سرعت، دبی و الگوی جریان در این حالت بیشینه با شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نشان داده شده‌اند.

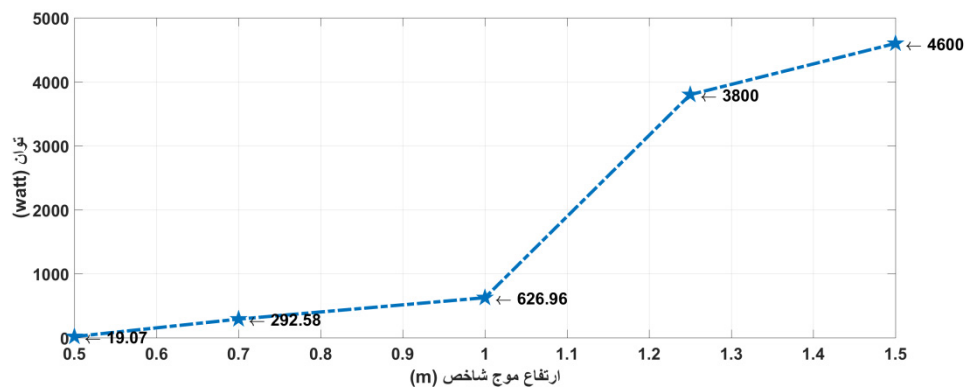
مقادیر تشریح شده در مراحل بالا در جدول ۱ به همراه مقادیر پتانسیل توان استخراجی آمده‌اند.

جدول ۱: مقادیر متغیرها در سناریوهای مختلف

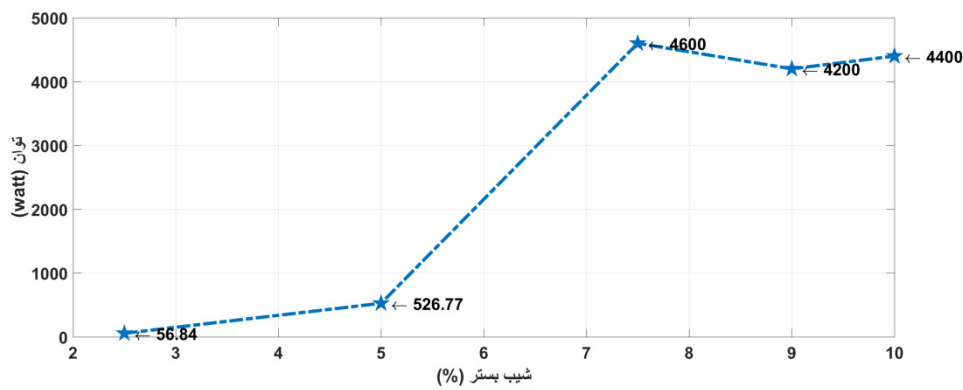
توان جریان شکافنده (watt)	سرعت متوسط جریان شکافنده (m/s)	ارتفاع شاخص موج فرودی (m)	پرپود موج فرودی (s)	فاصله بین دو کانال (m)	ارتفاع کانال‌ها (m)	شیب بستر (%)	فاصله کانال از ساحل (m)
۱۹۰۰۷	۰/۱۴	۰/۵	۳	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰
۲۹۲/۵۸	۰/۳۵	۰/۷	۴	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰
۶۲۶/۹۶	۰/۴۵	۱	۴	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰
۳۸۰۰	۰/۸۳	۱/۲۵	۵	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰



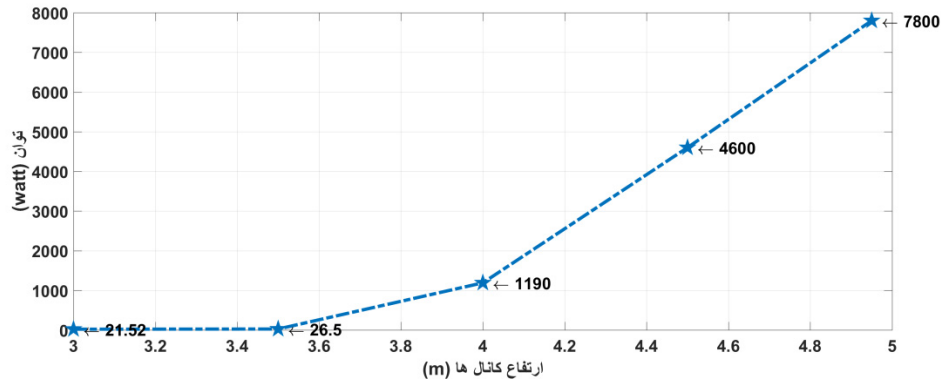
توان جریان شکافنده (watt)	سرعت متوسط جریان شکافنده (m/s)	ارتفاع شاخص موج فرودی (m)	پریود موج فرودی (s)	فاصله بین دو کانال (m)	ارتفاع کانال‌ها (m)	شیب بستر (%)	فاصله کانال از ساحل (m)
۴۶۰۰	۰/۸۸	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰
۵۶/۸۴	۰/۳	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۲/۵	۵۰
۵۲۶/۷۷	۰/۵۶	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۵	۵۰
۴۶۰۰	۰/۸۸	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰
۴۲۰۰	۰/۷۶۳	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۹	۵۰
۴۴۰۰	۰/۷۶۴	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۱۰	۵۰
۲۱/۵۲	۰/۱۵	۱/۵	۵	۵	۳	۷/۵	۵۰
۲۶/۵	۰/۱۶	۱/۵	۵	۵	۳/۵	۷/۵	۵۰
۱۱۹۰	۰/۵۶	۱/۵	۵	۵	۴	۷/۵	۵۰
۴۶۰۰	۰/۸۸	۱/۵	۵	۵	۴/۵	۷/۵	۵۰
۷۸۰۰	۱/۰۵	۱/۵	۵	۵	۴/۹۵	۷/۵	۵۰
۱۷۲۰۰	۱/۲	۱/۵	۵	۵	۴/۹۵	۷/۵	۷۵
۱۲۴۰۰	۱/۰۷	۱/۵	۵	۵	۴/۹۵	۷/۵	۱۰۰
۹۴۶۰	۰/۹۸	۱/۵	۵	۵	۴/۹۵	۷/۵	۱۵۰
۱۷۲۰۰	۱/۲	۱/۵	۵	۵	۴/۹۵	۷/۵	۷۵
۲۹۲۰۰*	۱/۱۴*	۱/۵*	۵*	۱۰*	۴/۹۵*	۷/۵*	۷۵*
۲۴۵۰۰	۰/۹۳	۱/۵	۵	۱۵	۴/۹۵	۷/۵	۷۵
۱۵۷۰۰	۰/۷۳	۱/۵	۵	۲۰	۴/۹۵	۷/۵	۷۵
۷۴۳۰	۰/۵۳	۱/۵	۵	۲۵	۴/۹۵	۷/۵	۷۵



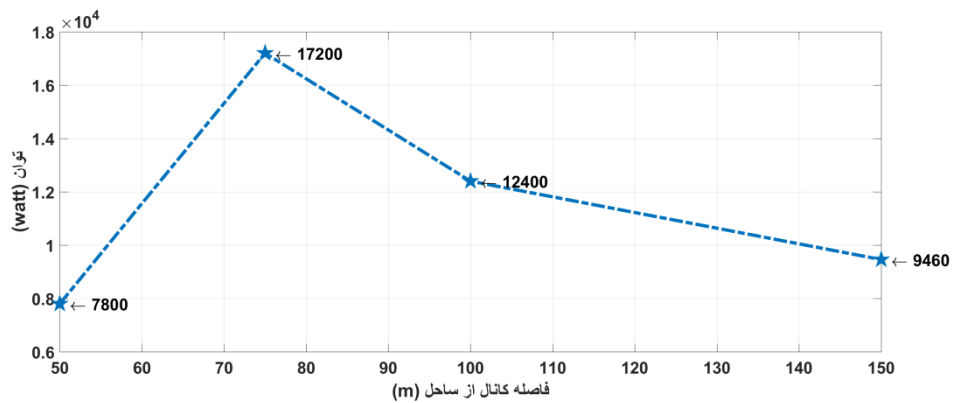
شکل ۷. نتایج حاصل از توان خروجی با تغییرات ارتفاع شاخص موج



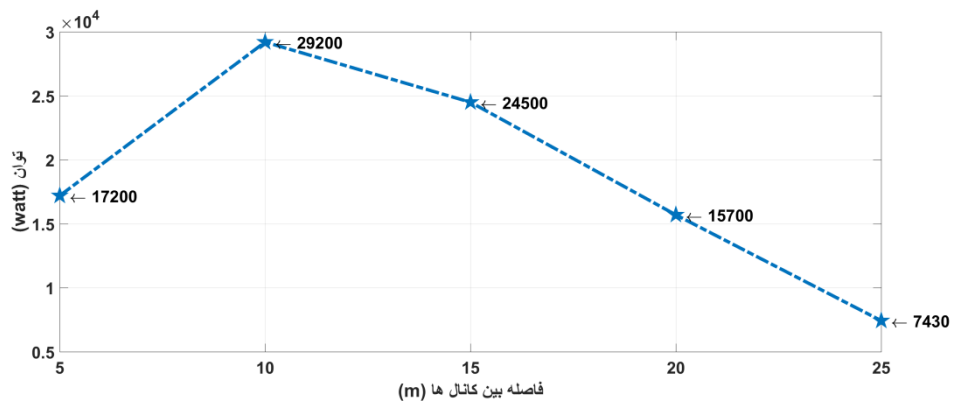
شکل ۸. نتایج حاصل از مقدار توان خروجی با تغییرات شیب بستر



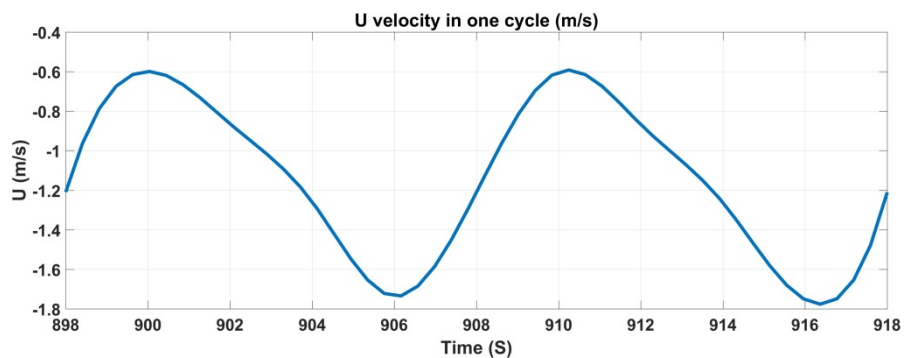
شکل ۹. نتایج حاصل از مقدار توان خروجی با تغییرات ارتفاع کانال‌ها



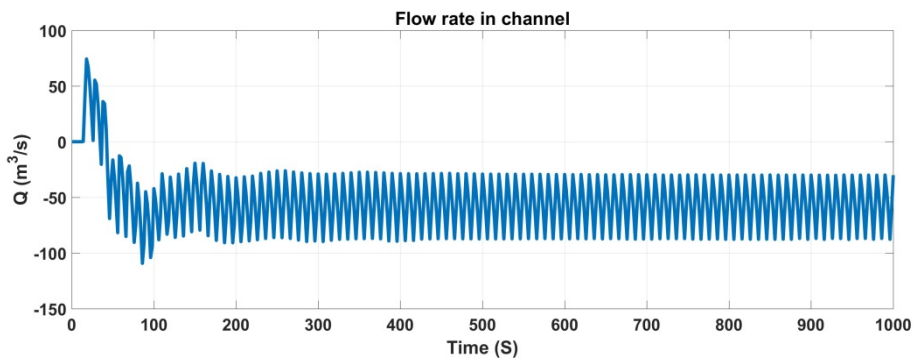
شکل ۱۰. تغییرات توان خروجی با تغییرات فاصله کانال از ساحل



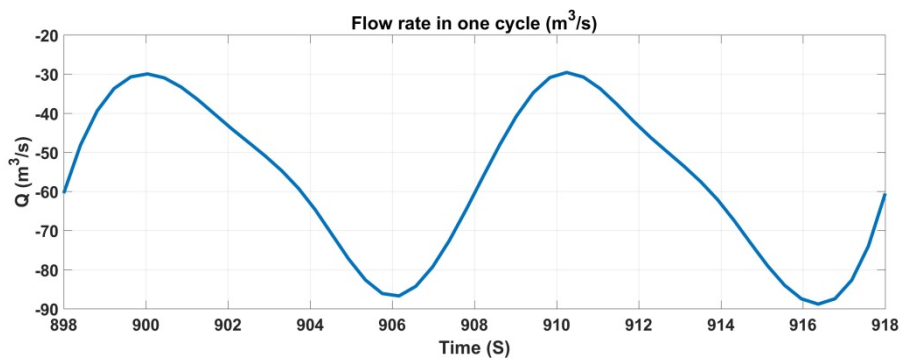
شکل ۱۱. تغییرات مقدار توان خروجی با تغییرات فاصله بین کانال‌ها



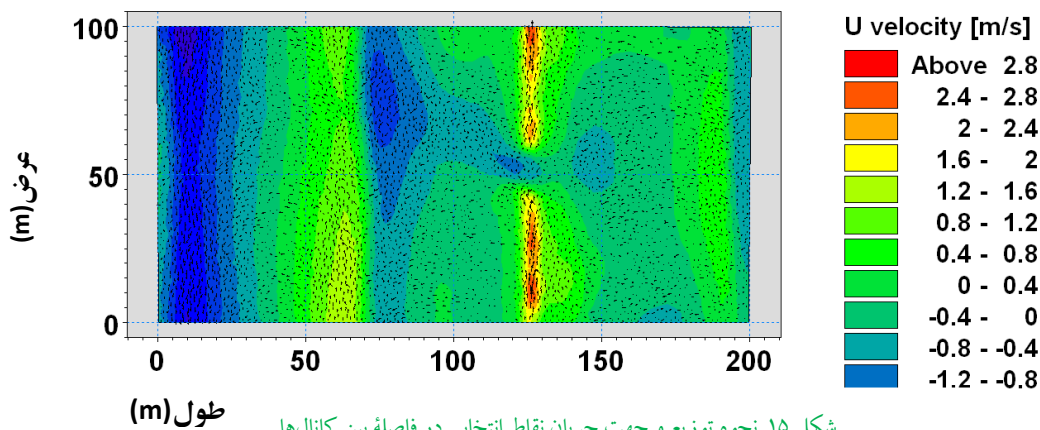
شکل ۱۲. سرعت متوسط جریان خروجی از دهانه بین کانال‌ها در یک نوسان کامل موج



شکل ۱۳. دبی عبوری از فاصله بین دو کانال در طول زمان



شکل ۱۴. دبی عبوری از فاصله بین دو کانال در یک نوسان موج



شکل ۱۵. نحوه توزیع و جهت جریان نقاط انتخابی در فاصله بین کانال‌ها

- حالت بهینه در اثر تغییرات شیب بستر، شیب بستر ۷/۵٪ است که در این حالت مقدار توان ۴۶۰۰ وات و میزان سرعت خروجی آب ۰/۸۸ متر بر ثانیه است. چون در مرحله اول هم شیب ۷/۵٪ در نظر گرفته شده بود برای همین مقدار توان و سرعت خروجی با مرحله اول برابر است؛
- حالت بهینه ارتفاع پشته ۴/۹۵ متر یعنی حدود ۹۹٪ عمق آب است که در این حالت مقدار توان ۷۸۰۰ وات و میزان سرعت خروجی آب ۱/۰۵ متر بر ثانیه است؛

## ۵. نتیجه گیری

- پس از بررسی‌های کلی در ۵ مرحله مختلف نتایج به صورت زیر است:
- حالت بهینه بعد از تغییرات ارتفاع شاخص و پرپود موج به صورت ارتفاع شاخص موج ۱/۵ متر و پرپود ۵ ثانیه است که در این حالت مقدار توان ۴۶۰۰ وات و میزان سرعت خروجی آب ۰/۸۸ متر بر ثانیه است؛

[8] Shafiei Sabet D, Barani GA. Field investigation of rip currents along the southern coast of Caspian Sea. *Scientia Iranica*. 2011;18(4):878-84.

[۹] ولی پور آزاده. بررسی تأثیر عوامل مختلف هیدرودینامیکی بر فاصله و عرض کانال‌های جریان برگشتی با استفاده از همانندسازی فیزیکی و عددی [رساله دکترا]. تهران: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ ۱۳۹۲.

[10] Chabaud V. The potential of extracting wave energy from rip currents. Master of science thesis, Norwegian university of science and technology. 2011.

[11] Kumar N, Voulgaris G, Warner JC. Implementation and modification of a three-dimensional radiation stress formulation for surf zone and rip-current applications. *Coastal Engineering*. 2011; 58(12):1097-117.

[12] Castelle B, Reniers AJ, MacMahan JH. Numerical modeling of surfzone retention in rip current system: on the impact of the surfzone sandbar morphology. *Coastal Dynamics*. 2013; 13:295-304.

[13] Bruneau N, Bonneton P, Castelle B, Pedreros R. Modeling rip current circulations and vorticity in a high-energy mesotidal-macrotidal environment. *Journal of geophysical research*. 2011; 116(C7): 1-20.

[14] Jie Yu. Effects of wave-current interaction on rip currents. *Journal of geology research*. 2003; 108(C3):1-19.

[15] MacMahan JH, Thornton EB, Reniers AJ, Stanton TP, Symonds G. Low-energy rip currents associated with small bathymetric variations. *Marine Geology*. 2008 Dec 5;255(3-4):156-64.

[16] MacMahan JH, Thornton EB, Reniers AJ. Rip current review. *Coastal Engineering*. 2006 Feb 1;53(2-3):191-208.

[17] Ghorbani A, Rasulyjamnany A. The modelling of rip channel in creation of rip currents. *Indian journal of science and technology*. 2012;5(4): 2529-33.

[18] Criado-Sudau FF, Nemes DD, Gallo MN. Rip currents dynamic of a swell dominated microtidal beach. *Journal of Coastal Research*. 2019 Jul;92(sp1):121-7.

[19] Haller MC, Dalrymple RA, Svendsen IA. Rip Channels and Nearshore Circulation. Proceedings of the international conference on coastal research through large scale experiments Plymouth; 1997 23-27 Jun; UK.

• حالت بهینه فاصله پشت‌ها از ساحل، ۷۵ متر از ساحل است که در این حالت مقدار توان ۱۷۲۰۰ وات و میزان سرعت خروجی آب ۱/۲ متر بر ثانیه است؛

• حالت بهینه فاصله دو دهانه کانال از هم ۱۰ متر حاصل شد که در این حالت مقدار توان ۲۹۲۰۰ وات و میزان سرعت خروجی آب ۱/۲۴ متر بر ثانیه است.

در بعضی سواحل دنیا امواج خوبی برای استحصال انرژی وجود ندارد. از جمله سواحل جنوبی خزر دارای این ویژگی هستند. تاکنون در پتانسیل سنجی، این سواحل برای استخراج انرژی در نظر گرفته نشده‌اند.

با راه‌حل ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان حدود ۳۰ Kw انرژی از یک عرض ۱۰۰ متری با ارتفاع موج ۱/۵ متر استخراج نمود که توان چشمگیری برای دستگاه‌های مبدل انرژی امواج<sup>۱۳</sup> است. بنابراین مسیر جدیدی برای محققان در این راستا باز شده است.

## مراجع

[1] Short AD. Rip current type, spacing and persistence Narrabeen beach, Australia. *Marine Geology*. 1985;65(1-2): 47-71.

[2] MacMahan JH, Thornton EB, Stanton TP, Reniers AJ. RIPEX: Observations of a rip current system. *Marine Geology*. 2005 Jun 30;218(1-4):113-34.

[3] Bruneau N. Field observations of an evolving rip current on a meso-macrotidal well-developed inner bar and rip morphology. *Continental shelf research*. 2009;29(14): 1650-62.

[4] Dongeren AV. Rip current predictions through model-data assimilation on two distinct beaches. *Coastal dynamics*. 2013; 1775-1786.

[۵] غلامی زهرا، چگینی وحید، لاری کامران. پهنه‌بندی جریان‌های شکافنده در سواحل غرب گیلان. یازدهمین همایش صنایع دریایی؛ ۱۳۸۸؛ جزیره کیش، ایران.

[6] Castelle B, Marieu V, Cocco G, Bonneton P, Ruessink B.G. On the impact of an offshore bathymetric anomaly on surf zone rip channels. *Journal of geophysical research: Earth surface*. 2012; 117(F1):1029-38.

[۷] علیزاده حمید. مقدمه‌ای بر ویژگی‌های دریای خزر. تهران: انتشارات نوربخش؛ ۱۳۸۳.

پی‌نوشت

1. GPS
2. RCM flowmeter
3. Mike 21
4. ROMS
5. SWAN
6. REF/DIF
7. Reserva beach
8. Matlab
9. coupled
10. Hydrodynamic (HD) modules
11. Courant number
12. Chezy's coefficient
13. Wave Energy Converters (WEC)

[۲۰] کمیجانی فرشته. طبقه‌بندی هیدرودینامیکی سواحل جنوبی دریای خزر- استان مازندران. نشریه مهندسی دریا. ۱۳۹۵؛ ۱۲؛ (۹۵): ۵۳-۶۴.

[21] MIKE21 & MIKE3 FLOW MODEL manual [Internet]. 2017. Available from: [http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast\\_and\\_Sea/MIKE\\_FM\\_HD\\_Step\\_By\\_Step.pdf](http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/MIKE_FM_HD_Step_By_Step.pdf).

[22] Hansen MO. Aerodynamics of wind turbines. 2nd edition. Earthscan; 2008.