



مرکز ملی باوردهای علمی و فناوری

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی

## ارزیابی انرژی جریان‌های جزرومدی در تنگه خوران

شایان کوچکیان صبوری<sup>۱\*</sup>، دکتر مرتضی کلاهدوزان، دکتر محمدهادی معینی

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۲۵

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۱۳

© نشریه صنعت حمل و نقل دریایی ۱۳۹۵، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل و نقل دریایی است.

### چکیده

یکی از مهم‌ترین پتانسیل‌های مطرح در رابطه با انرژی‌های تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست استفاده از انرژی جزرومد دریا است. استحصال انرژی از جزرومد در نقاطی عملی است که انرژی زیادی به صورت جزرومد‌های بزرگ در آنها متمرکز شده باشد و به علاوه جغرافیای محل نیز برای احداث نیروگاه جزرومدی سایت مناسبی فراهم کرده باشد. با توجه به اینکه در ایران نیز قرار است در طول برنامه پنجم توسعه بیش از ۵۰۰۰ مگاوات نیروگاه انرژی‌های تجدیدپذیر احداث شود، شناسایی سایت‌های مناسب برای این کار و ارزیابی انرژی قابل استحصال در این سایت‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در همین راستا این مطالعات با توجه به مشخصات هندسی کانال قشم و وجود جریان‌های جزرومدی قوی در این ناحیه، به بررسی قابلیت استحصال انرژی از جریان‌های جزرومدی در این منطقه پرداخته است. موضوع مهم دیگر که مطالعه شده است، استفاده از روش‌های عملی و نه صرفاً علمی استحصال انرژی، بر پایه آخرین نتایج و دستورالعمل‌های «مرکز انرژی‌های دریایی اروپا» و بر اساس مدل‌سازی جریان جزرومدی است. طبق یافته‌های این مطالعه در محدوده منتخب ۱۸۵۰ مگاوات انرژی قابل استحصال واقعی از جریان‌های جزرومدی برآورد شد. قابلیت استحصال این مقدار انرژی دولت‌های بسیاری را در جهان برای استحصال آن ترغیب نموده است. دیگر نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد استفاده صرف از معیار APD که مبنای قضاوت بسیاری از مطالعات واقع شده، مبنایی ناقص و غیرعملی است.

**واژه‌های کلیدی:** جزرومد، جریان جزر و مدی، انرژی جریان، تنگه خوران، انرژی تجدید پذیر، مدل‌سازی عددی

## ۱- مقدمه

فرضی مابین اسکله شهید حقانی بندرعباس و اسکله بهمن در جزیره قشم غرب به یک خط فرضی در طول جغرافیایی بندر باسعیدو محدود گردیده است، تنگه خوران نامیده می‌شود. در حاشیه این آبراه، شهرها و بنادر مهمی چون: بندرعباس، (پرجمعیت‌ترین شهر ساحلی ایران)، تأسیسات دریایی منطقه یکم نیروی دریایی ارتش، (مهم‌ترین پایگاه نیروی دریایی خلیج فارس)، بندر شهید رجایی (مهم‌ترین بندر تجاری شمال خلیج فارس)، منطقه حفاظت‌شده زیبا و منحصر به فرد جنگل حرا و ده‌ها بندر، شهر و تأسیسات دریایی دیگر واقع شده است. بیشینه پهنای این تنگه در مرز شرقی آن حدفاصل بندرعباس در سرزمین اصلی و اسکله بهمن معادل ۲۵ کیلومتر و کمینه پهنای آن (بدون در نظر گرفتن محدوده جنگل‌های حرا) در حدود ۲/۵ کیلومتر است که در حدفاصل بندر پهل در سرزمین اصلی و بندر لافت در جزیره قشم واقع شده است. بیشینه ژرفای آن در طول جغرافیایی ۵۵/۷۶۸ و عرض جغرافیایی ۲۶/۹۶۳ واقع شده و برابر ۵۳- متر است. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- داده‌های اندازه‌گیری شده جزرومدی

در محدوده مورد مطالعه اطلاعات اندازه‌گیری شده سطح آب در ۴ ایستگاه و اطلاعات سرعت جریان در ۳ ایستگاه تهیه شده است. شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری و موقعیت آنها را نشان می‌دهد. در شکل (۲) ایستگاه‌های مشخص شده بارنگ قرمز ایستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت و ایستگاه‌های مشخص شده بارنگ سفید ایستگاه‌های اندازه‌گیری سطح آب هستند. جداول (۱) و (۲) مشخصات کلی این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. این اطلاعات شامل موقعیت، عمق، تاریخ نصب و نوع دستگاه می‌باشند.

یکی از مهم‌ترین پتانسیل‌های مطرح در رابطه با انرژی‌های تجدید پذیر و سازگار با محیط‌زیست استفاده از انرژی جزرومد دریا است. استحصال انرژی از جزرومد در نقاطی عملی است که انرژی زیادی به صورت جزرومدهای بزرگ در آنها متمرکز شده باشد و به علاوه جغرافیای محل نیز برای احداث نیروگاه جزرومدی سایت مناسبی فراهم کرده باشد. اگرچه چنین مکان‌هایی در همه جا یافت نمی‌شوند، اما تا به حال مکان‌هایی نسبتاً زیادی برای این منظور شناسایی شده‌اند. لیکن در تعداد کمی از این مکان‌ها نیروگاه جزرومدی در جهان احداث شده است. نخستین و بزرگ‌ترین آنها که از نوع تک حوضچه‌ای و دو اثری بوده، با ظرفیت ۲۴۰ مگاوات در لارانس فرانسه تأسیس شده است، جنبه تجاری دارد. در ایران نیز قرار است در طول برنامه پنجم توسعه، بیش از پنج هزار مگاوات نیروگاه انرژی‌های تجدید پذیر احداث شود.

با علم به اینکه در راستای استحصال انرژی جریان‌های جزرومدی مطالعاتی در منطقه خورموسی انجام شده است و این منطقه در مجامع علمی کشور به عنوان یکی از پتانسیل‌های شناخته شده مطرح است. در این مطالعات برای یافتن منطقه دیگری که پتانسیل‌های لازم استحصال انرژی را دارد، اهتمام شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شکل (۱)، تنگه‌ای است در خلیج فارس که از شمال به سرزمین اصلی ایران، از جنوب به جزیره قشم، از شرق به خط از



شکل (۱): موقعیت قرارگیری تنگه هرمز، تنگه خوران و جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری، نقاط مشخص شده بارنگ قرمز ایستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت و نقاط مشخص شده بارنگ سفید ایستگاه‌های اندازه‌گیری سطح آب هستند.



شکل (۲): جانمایی ایستگاه های اندازه گیری از نمای نزدیک در تنگه خوران

جدول (۱): مشخصات کلی ایستگاه های اندازه گیری سطح آب

نام ایستگاه	نوع دستگاه	تاریخ نصب	عمق نصب (m)	مختصات	
				X	Y
Pohl	RBR	۱۳۸۸/۵/۱۶	۵/۸	۵۵/۷۴۷۹۲۸۷۳۴۵۶	۲۶/۹۷۳۰۰۳۳۱۷۷
Rajae	RBR	۱۳۸۸/۵/۱۸	۵/۲	۵۶/۰۷۴۳۴۳۲۲۱۵	۲۷/۱۰۲۶۸۱۹۴۴۵
Dargahan	RBR	۱۳۸۸/۵/۱۷	۷	۵۶/۰۵۳۴۶۷۵۵۷	۲۶/۹۶۸۵۹۷۰۸۰۴۱
Basaeedu	RBR	-	-	۵۵/۲۶۵۳۴۸	۲۶/۷۷۸

جدول (۲): مشخصات کلی ایستگاه های اندازه گیری سرعت جریان

نام ایستگاه	نوع دستگاه	تاریخ نصب	عمق نصب (m)	مختصات	
				X	Y
Arg Dargahan	Argonaut	۱۳۸۸/۷/۲۱	۱۵	۵۶/۰۷۴۰۴۱۰۳۹	۲۷/۰۱۷۹۰۸۷۰۳
Mini Rajae	Mini ADP	۱۳۸۸/۷/۲۰	۸	۵۶/۱۰۴۶۹۶۹۱	۲۷/۰۷۸۵۳۹۵۹
Laft	-	-	-	۵۵/۷۲۹۰۷۰۳۱۷	۲۶/۹۶۹۱۹۶۵۴۱۹

ثانیه در ایستگاه های مختلف با یکدیگر مقایسه می گردد. جدول (۳) بر اساس میانگین سرعت های اندازه گیری شده به این مقایسه پرداخته است.

جدول (۳): مقایسه سرعت جریان در ایستگاه های اندازه گیری

نام ایستگاه	بیشینه سرعت ثبت شده در ایستگاه (m/s)	درصد تداوم سرعت بیش از ۰/۵ متر بر ثانیه	نام ایستگاه	بیشینه سرعت ثبت شده در ایستگاه (m/s)	درصد تداوم سرعت بیش از ۰/۵ متر بر ثانیه
رجایی	۱/۱۸	۲۵	۱	۱/۱۸	۲۵
درگهان	۱/۷۰	۲۹	۲	۱/۷۰	۲۹
لافت	۲/۰۳	۵۲	۳	۲/۰۳	۵۲

همان گونه که در جدول فوق مشاهده می شود سرعت جریان های جزرومدی در ایستگاه لافت بیش از دو ایستگاه دیگر است، که این موضوع با توجه به موقعیت ایستگاه ها تا حدودی قابل پیش بینی است.

## ۲-۳- مشخصات داده های اندازه گیری شده

از آنجاکه خروجی بررسی های هیدرودینامیکی، ورودی میحث استحصال انرژی است و بررسی استحصال انرژی در این مطالعات، بر مبنای آخرین دستاوردها و دستورالعمل های (مرکز انرژی های دریایی اروپا) مبتنی بر سرعت جریان است. مشخصات سرعت در داده های اندازه گیری شده بسیار مهم است. لذا به منظور به دست آوردن ایده ای در جهت گیری مطالعات و یافتن رهیافت های مناسب، ایستگاه های اندازه گیری سرعت بررسی شده است.

از آنجاکه در میحث استحصال انرژی سرعت های کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه به لحاظ عدم کارایی در به حرکت درآوردن پره توربین ها نادیده گرفته می شوند، درصد زمان های تداوم جریان با سرعت های بیش از ۰/۵ متر بر

دیگر تداوم بیشتری دارد، لیکن در ایستگاه درگهان فقط در یک جهت سرعت بیش از ۰/۸ متر بر ثانیه وجود دارد.

### ۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

#### ۳-۱- شبیه‌سازی عددی

از آنجاکه مهم‌ترین پارامتر مورد توجه در انجام شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان به نرم‌افزار شبیه‌ساز است، در این مطالعات برای مدل‌سازی جریان‌های جزرومدی در محدوده مورد مطالعه، از مدل جریان مایک ۲۱ از بسته نرم‌افزاری انستیتو هیدرولیک دانمارک<sup>۳</sup> (DHI) استفاده شده است. برای برپاسازی مدل، ابتدا محدوده انجام مطالعات را تعیین کرده و آنگاه مرزهای باز را تعیین می‌کنیم و در مرحله بعد، نسبت به شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه اقدام می‌نماییم. برای صحت‌سنجی از آنجاکه اندازه‌گیری‌های سطح آب و سرعت در دو بازه زمانی مختلف در دسترس است تغییرات سطح آب در جزرومد، در بازه ۲۹ روزه، (۱۳۸۸/۸/۱۰) تا (۱۳۸۸/۹/۷) و سرعت جریان جزرومد در بازه زمانی ۲۵ روزه (۱۳۸۹/۱/۲۹) تا (۱۳۸۹/۲/۲۳)، به‌ناچار در دو بازه زمانی مدل اجرا شد و از نتایج آن برای صحت‌سنجی و واسنجی استفاده گردید.

#### ۳-۲- شرایط مرزی

در این مطالعات به دلیل اهمیت شرایط مرزی، با حساسیت ویژه‌ای به مشخصات مرزهای باز پرداخته شده است. به دلیل موجود بودن اطلاعات اندازه‌گیری شده سطح آب در ایستگاه‌های درگهان، رجایی و باسعیدو امکان تولید ۳۰ مؤلفه جزرومدی<sup>۴</sup> جداول (۴ و ۵) وجود دارد.

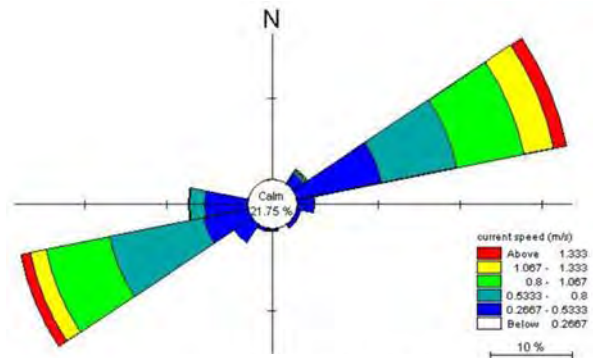
لازم به ذکر است مؤلفه‌های ارائه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کل کشور صرفاً مؤلفه‌های  $M_2, S_2, K_1, O_1$  و  $M_2$  را در برمی‌گیرد. این در حالی است که مؤلفه‌های تولید شده در این مطالعات، نشان می‌دهد که مؤلفه  $N_2$  نیز نقش بارزی در جزرومد ایفا می‌نماید و مجموع ۲۵ مؤلفه دیگر نیز تأثیرگذار هستند.

با در دست داشتن این مؤلفه‌ها، توانایی تولید جزرومد در هر زمانی و برای هر بازه زمانی وجود دارد؛ بنابراین در صورت استفاده از مشخصات سطح آب به‌عنوان شرایط مرز باز اطلاعات کافی موجود است؛ بنابراین با در اختیار داشتن مشخصات سطح آب در هر دو مرز شرقی و غربی به برپاسازی مدل عددی پرداخته می‌شود. شکل (۶) مرزهای باز شرقی، غربی و مرز بسته خشکی را نشان می‌دهد.

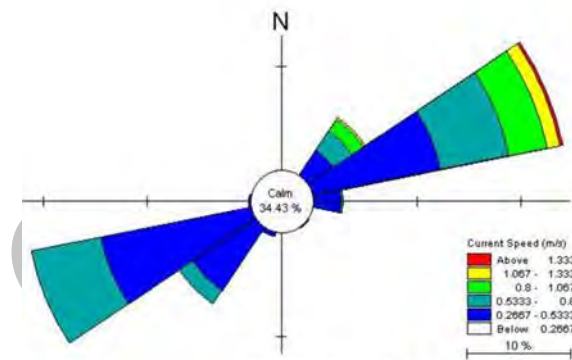
#### ۳-۳- حساسیت سنجی

در این بخش پارامترهایی معرفی می‌شوند که در هیدرودینامیک محدوده مورد مطالعه نقش دارند و احتمال دارد مدل نسبت به آنها حساس باشد. یکی از این پارامترها باد و امواج ناشی از وزش باد است. از آنجاکه

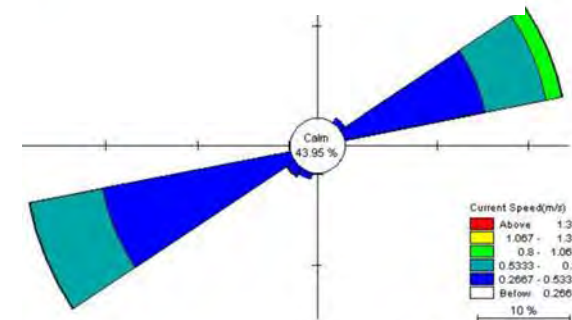
به‌منظور شناخت الگوی کلی جریان با توجه به اطلاعات میدانی اندازه‌گیری شده، گل‌جریان‌های ایستگاه‌های مختلف در شکل‌های (۳) الی (۵) رسم گردیده است. گفتنی است که این شکل‌ها بر مبنای سرعت جریان متوسط‌گیری شده در عمق رسم شده‌اند.



شکل (۳) گل جریان در ایستگاه لافت



شکل (۴): گل جریان در ایستگاه درگهان



شکل (۵) گل جریان در ایستگاه رجایی

همان‌طور که از مقایسه گل‌جریان‌ها مشخص است بیشترین متوسط سرعت‌ها کمی بیش از ۱/۳۳ متر بر ثانیه است که در ایستگاه‌های درگهان و لافت اتفاق می‌افتد لیکن از آنجاکه در ایستگاه لافت عرض کانال بسیار کم می‌شود، جریان‌های با سرعت‌های بیشتر در زمان‌های بیشتری اتفاق می‌افتد. درصد وقوع سرعت‌های کمینه نیز در ایستگاه لافت کمتر از ایستگاه درگهان است.

نکته جالب توجه دیگر این است که در ایستگاه لافت هم در رفت و هم در برگشت سرعت‌های بیش از ۰/۸ متر بر ثانیه نسبت به دو ایستگاه

2. MIKE21

3. Danish Hydraulic Institute

4. Tidal Constituents

جدول (۵): مؤلفه‌های جزرومدی تولیدشده در ایستگاه باسعیدو

Basaeedu Constituents from analysis:			
Name	Amp.	Phase	
Z0	1.7293	0.00	۱
MSF	0.0118	318.38	۲
Q1	0.0051	289.81	۳
Q1	0.0334	72.54	۴
O1	0.2056	85.95	۵
NO1	0.0054	289.58	۶
K1	0.3766	100.99	۷
J1	0.0024	31.00	۸
OO1	0.0187	195.17	۹
UPS1	0.0040	154.19	۱۰
N2	0.1704	325.89	۱۱
M2	0.8243	337.41	۱۲
S2	0.2850	4.31	۱۳
ETA2	0.0082	88.91	۱۴
MO3	0.0161	34.20	۱۵
M3	0.0158	86.10	۱۶
MK3	0.0330	16.37	۱۷
SK3	0.0169	254.86	۱۸
MN4	0.0159	243.41	۱۹
M4	0.0323	273.02	۲۰
MS4	0.0121	302.01	۲۱
S4	0.0026	111.48	۲۲
MK5	0.0212	231.81	۲۳
SK5	0.0021	209.61	۲۴
MN6	0.0081	219.77	۲۵
M6	0.0136	217.08	۲۶
MS6	0.0154	254.10	۲۷
SM6	0.0015	326.32	۲۸
MK7	0.0022	160.70	۲۹
M8	0.0009	101.03	۳۰

جدول (۴): مؤلفه‌های جزرومدی تولیدشده در ایستگاه‌های درگهان و رجایی

Dargahan Constituents from analysis:			
Name	Amp.	Phase	
Z0	2.1727	0.00	۱
MSF	0.0127	49.72	۲
Q1	0.0155	3.61	۳
Q1	0.0473	51.09	۴
O1	0.2358	75.24	۵
NO1	0.0134	138.75	۶
K1	0.2538	85.49	۷
J1	0.0332	131.86	۸
OO1	0.0185	116.99	۹
UPS1	0.0044	213.31	۱۰
N2	0.2404	301.37	۱۱
M2	1.1269	332.74	۱۲
S2	0.5866	4.74	۱۳
ETA2	0.0116	90.03	۱۴
MO3	0.0255	93.16	۱۵
M3	0.0226	89.15	۱۶
MK3	0.0239	112.42	۱۷
SK3	0.0079	187.22	۱۸
MN4	0.0185	146.51	۱۹
M4	0.0306	181.75	۲۰
MS4	0.0216	178.15	۲۱
S4	0.0112	188.95	۲۲
MK5	0.0034	170.78	۲۳
SK5	0.0048	125.99	۲۴
MN6	0.0048	177.69	۲۵
M6	0.0079	223.96	۲۶
MS6	0.0120	255.45	۲۷
SM6	0.0081	270.81	۲۸
MK7	0.0039	277.65	۲۹
M8	0.0025	346.60	۳۰

Rajae Constituents from analysis:			
Name	Amp.	Phase	
Z0	2.1184	0.00	۱
MSF	0.0098	143.42	۲
Q1	0.0114	79.80	۳
Q1	0.0265	10.48	۴
O1	0.2490	59.74	۵
NO1	0.0384	3.89	۶
K1	0.4040	58.96	۷
J1	0.0293	339.06	۸
OO1	0.0225	96.98	۹
UPS1	0.0060	160.63	۱۰
N2	0.1924	280.42	۱۱
M2	1.1255	300.15	۱۲
S2	0.3739	326.97	۱۳
ETA2	0.0210	23.79	۱۴
MO3	0.0120	41.84	۱۵
M3	0.0334	39.83	۱۶
MK3	0.0300	72.16	۱۷
SK3	0.0114	128.73	۱۸
MN4	0.0150	142.07	۱۹
M4	0.0221	152.27	۲۰
MS4	0.0073	350.82	۲۱
S4	0.0073	293.87	۲۲
MK5	0.0035	90.27	۲۳
SK5	0.0011	49.58	۲۴
MN6	0.0008	314.77	۲۵
M6	0.0043	233.46	۲۶
MS6	0.0023	77.51	۲۷
SM6	0.0022	137.61	۲۸
MK7	0.0025	270.48	۲۹
M8	0.0010	236.87	۳۰

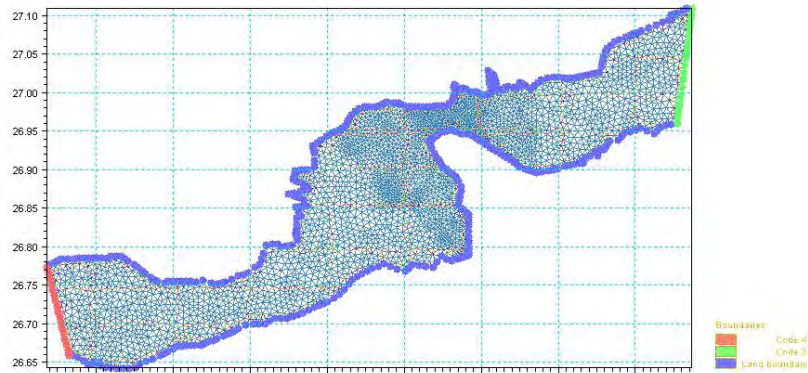
جهت غالب باد در این تنگه شمالی - جنوبی بوده و جریان غالب در جهت شرقی - غربی برقرار است و به دلیل اثر مرز (جزیره قشم) طول موجگاه در این تنگه درخور توجه نیست؛ بنابراین از اثرات باد و موج در این مطالعات صرف نظر شده است. علاوه بر این، منابع ثانویه مانند رود یا چشمه‌ای که بر روی جریان در این تنگه تأثیرگذار باشد، وجود ندارد. بنابراین از اثرات جریان‌های تأثیرگذار وارد شونده به محیط از منابع ثانویه، همچنین یخبندان و دیگر نیروها نیز صرف نظر شده است. همچنین به دلیل محدود بودن منطقه مورد مطالعه تأثیر نیروی کوریولیس ناچیز است و در محاسبات مدل وارد نمی‌شود. در مدل‌سازی، مرزهای شمالی و جنوبی به‌عنوان مرزهای خشک در نظر گرفته شده و اثرات خشکی و تری ساحل بر دلیل جزرومد، در مدل دیده شده است؛ بنابراین از بین پارامترهایی که مدل به آنها حساسیت دارد، پارامترهای تعریف شرایط مرزهای باز، لزجت گردابی و زبری بستر باقی ماند، که مدل، نسبت به هر سه پارامتر واسنجی شده است.

### ۳-۴- واسنجی مدل

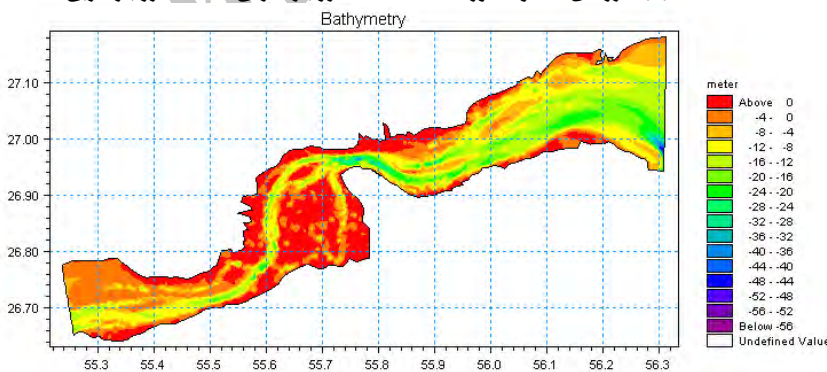
در بحث واسنجی مدل، ابتدا به منظور به دست آوردن طرح مناسب از منطقه، به تعریف مشخصات مرزهای باز و اجرای مدل پرداخته شد. برای این منظور در هر دو مرز باز شرقی و غربی از داده‌های اندازه‌گیری شده نوسانات سطح آب استفاده شد. در اولین اجرای مدل شکل (۷)، برای هر دو مرز باز شرقی و غربی، نوسانات سطح آب در نظر گرفته شده است. مرز شرقی حدفاصل بندرعباس (اسکله شهید حقانی در شمال مرز شرقی) و اسکله بهمن (در جنوب مرز شرقی) است. برای تعیین شرایط این مرز، در هر دو نقطه شمالی و جنوبی، بر اساس مؤلفه‌های ارائه شده از سوی سازمان نقشه برداری کل کشور، یعنی چهار مؤلفه اصلی ( $M_2, S_2, K_1, O_1$ ) به تولید جزرومد اقدام شد.

پس از اجرای مدل و مقایسه خروجی‌های آن با داده‌های اندازه‌گیری شده، شکل (۸)، عدم تطابق کافی به‌ویژه در مدهای پایین دیده شد، که ناشی از ناکافی بودن مؤلفه‌های جزرومدی مورد استفاده بود. زیرا همان‌طور که در بخش پیش نیز به آن اشاره شد حداقل یک مؤلفه دیگر ( $N_2$ ) در مؤلفه‌ها وجود دارد که نقش بسزایی در تولید جزرومد ایفا می‌نماید و مجموع

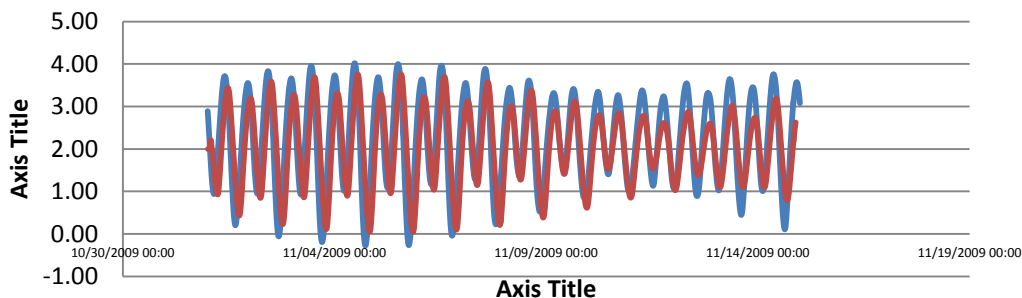
مؤلفه‌های دیگر هم مؤثر هستند. بنابراین در مدل‌های نهایی مرز شرقی کمی به سمت غرب انتقال داده شد تا در محل ایستگاه‌هایی که داده‌های اندازه‌گیری آنها موجود است، یعنی فاصله بین بندر شهید رجایی (در شمال مرز شرقی) و درگهان (در جنوب مرز شرقی) این مرز آماده شود شکل (۹). مطلب دیگر اینکه، بر اساس تجربه، از اجراهای متعدد مشخص شد در صورتی که مرز شرقی بین بندر شهید رجایی و درگهان با جزرومد متغیر در نظر گرفته شود (یعنی در فایل ورودی مشخصات مرز شرقی به صورت متغیر در زمان و در طول مرز تعریف شود)، عدم تطابق مدل بیشتر خواهد شد. بنابراین با توجه به مطالب پیش‌گفته، مرز شرقی حدفاصل بندر شهید رجایی در شمال و درگهان در جنوب به صورت متغیر در زمان و ثابت در طول مرز تعریف شد. که باعث بیشترین تطابق در خروجی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری شد؛ و در مرز غربی نیز ایستگاه باسعیدو انتخاب گردید که در آن ایستگاه هم داده‌های اندازه‌گیری موجود است. در این نقاط باوجود داده‌های اندازه‌گیری شده و توانایی تولید ۳۰ مؤلفه جزرومدی، شبیه‌سازی جزرومد در هر زمان دلخواه امکان‌پذیر است. با توجه به نتایج به دست آمده، جهت سنجش عملکرد شبیه‌سازی



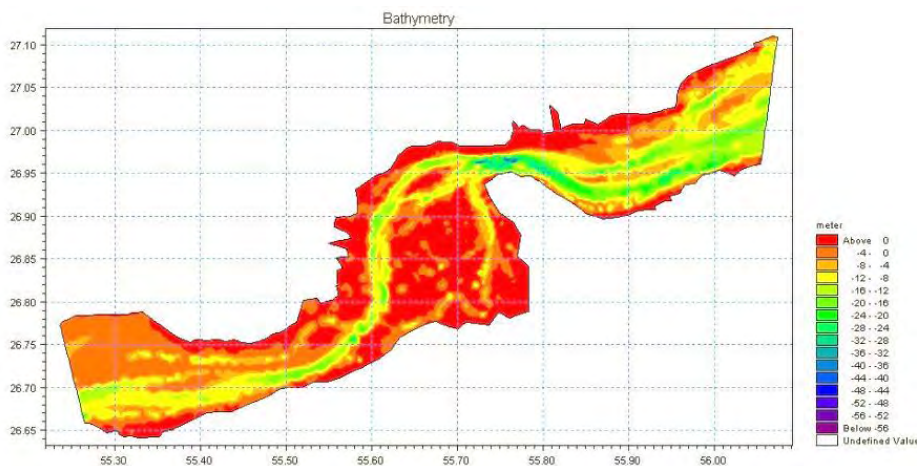
شکل (۶): مرزهای محدوده مورد مطالعه - کد ۳ مرز باز شرقی - کد ۴ مرز باز غربی



شکل (۷): محدوده مورد مطالعه در مدل‌های اولیه



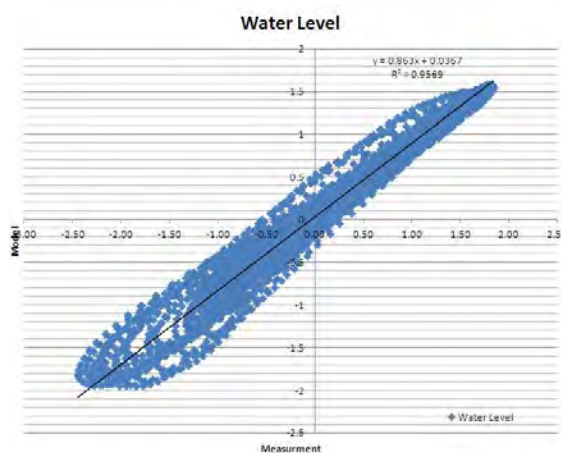
شکل (۸): عدم تطابق داده‌های اندازه‌گیری شده نوسانات سطح آب و خروجی مدل در مدهای پایین (شرایط مرزی با ۴ مؤلفه جزرومدی سازمان نقشه برداری تعریف شده است).



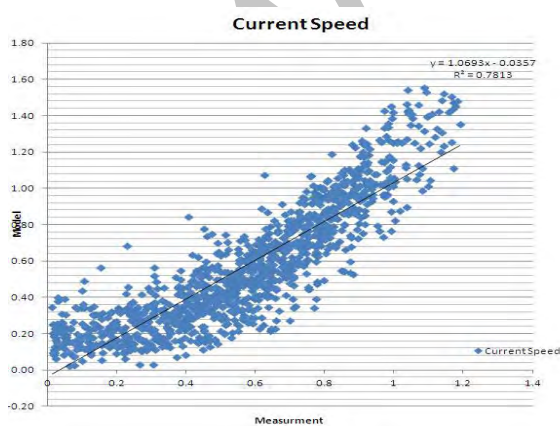
شکل (۹): محدوده مورد مطالعه در مدل نهایی

جدول (۶): شاخص‌های آماری بکار رفته در درستی‌سنجی مدل

	RMSE	SI	Bias	R <sup>2</sup>
ارزیابی سطح آب (ایستگاه پهل)	0.25 (m)	0.12	0.04 (m)	0.975
ارزیابی سرعت جریان (ایستگاه لافت)	0.15 (m/s)	0.278	0 (m/s)	0.781



شکل (۱۰): شاخص  $R^2$  برای ارتفاع سطح آب در ایستگاه پهل



شکل (۱۱): شاخص  $R^2$  برای سرعت جریان در ایستگاه لافت

انجام‌شده، در ۲ نقطه مقادیر خروجی‌های مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. نقطه اول در ایستگاه پهل و در بازه زمانی ۱۳۸۸/۸/۱۰ تا ۱۳۸۸/۹/۷ و نقطه دوم در بازه زمانی ۱۳۸۹/۱/۲۹ تا ۱۳۸۹/۲/۲۳ در ایستگاه لافت واقع است. در نقطه اول اندازه‌گیری تغییرات سطح آب و در نقطه دوم سرعت جریان و همین‌طور جهت جریان با خروجی‌های مدل مقایسه شد. پارامترهای دیگری که به‌منظور تطبیق هرچه بیشتر نتایج شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده، بررسی شد، پارامترهای قابل‌تغییر لزجت گردابی و زبری بستر بود، که مشخص شد مدل نسبت به تغییر لزجت گردابی حساسیت ندارد.

### ۳-۵- درستی‌سنجی مدل

در ادامه جهت سنجش عملکرد صحیح مدل با استفاده از شاخص‌های آماری، خروجی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه شده است. در این مطالعات از ۴ شاخص آماری، جذر متوسط مربع خطاها  $RMSE$ ، شاخص پراکندگی  $SI$ ، پارامتر انحراف (شاخص اریبی)  $Bias$  و همین‌طور  $R^2$  استفاده شده است. همان‌طور که در جدول (۶) ملاحظه می‌گردد این مطالعات از نظر شاخص‌های فوق نیز در حد بسیار مطلوب است به‌طوری‌که شاخص  $R^2$  در ایستگاه پهل برای مقایسه ارتفاع سطح آب در جزرومد معادل ۰/۹۵۷ و شاخص  $Bias$  در ایستگاه لافت برای مقایسه سرعت جریان صفر گردیده است. (نمودار شاخص‌های پیش‌گفته در اشکال (۱۰) تا (۱۳) آورده شده است).

در ادامه شبیه‌سازی عددی جریان‌های جزرومدی در تنگه خوران شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین داده‌های اندازه‌گیری شده سطح آب در ایستگاه پهل و داده‌های خروجی مدل تطابق بسیار خوبی برقرار



شده است. مراحل اجرای این بخش از مطالعات به شکل زیر تقسیم‌بندی می‌شود.

(۱) با توجه به نتایج به دست آمده در فصل شبیه‌سازی بهترین محدوده‌های مستعد استحصال انرژی انتخاب می‌گردد.

(۲) چند محدوده نمونه بر اساس ویژگی‌های هندسی و هیدرودینامیکی انتخاب شده و در هر محدوده توزیع فراوانی سرعت  $(f(u)_i)$  محاسبه می‌شود. سپس بهترین محدوده از میان محدوده‌های انتخاب شده، برگزیده می‌گردد.

(۳) برای هر محدوده میانگین چگالی نیرو<sup>۷</sup> محاسبه می‌شود.

(۴) کل انرژی موجود در مقطع محاسبه شده و سپس انرژی قابل استحصال توسط یک توربین به دست می‌آید.

(۵) انرژی قابل تولید سالیانه<sup>۸</sup> برای یک دستگاه توربین محاسبه می‌شود.

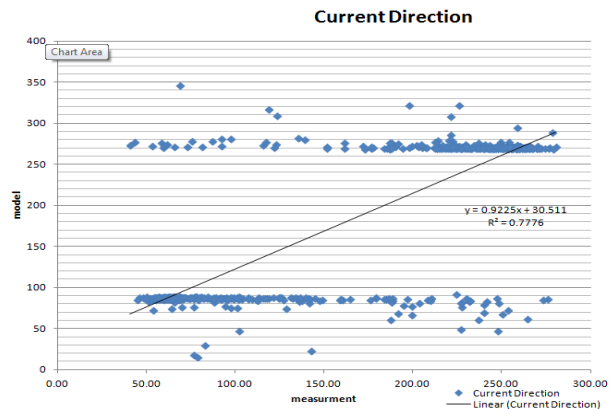
از آنجاکه رعایت موازین آئین‌نامه‌ای الزامی است. اشاره به برخی از این موازین، طراحی نیروگاه به شرح زیر مناسب است (EMEC, 2009). برای نصب این توربین‌ها، که با نام اختصاری TECS شناخته می‌شوند، لازم است از تاج توربین تا سطح آزاد آب حداقل ۵ متر فاصله آزاد وجود داشته باشد و همین‌طور فاصله بستر دریا با زیر این توربین‌ها باید حداقل ۵ متر یا ۲۵٪ عمق آب (بر اساس LAT) - هرکدام بیشتر است - باشد. فاصله جانبی مرکز تا مرکز توربین‌ها نیز حداقل ۲/۵ برابر قطر «روتور» و فاصله طولی آنها نیز حداقل ۱۰ برابر قطر «روتور» در نظر گرفته می‌شود.

## ۴-۲- انتخاب مقاطع نمونه

با حصول اطمینان از عملکرد مناسب مدل ساخته شده، پیش‌بینی ارتفاع سطح آب و سرعت جریان در هر نقطه‌ای از محدوده مورد مطالعه، امکان‌پذیر است. بر اساس داده‌های دریافت شده از خروجی‌های مدل، سرعت جریان در شرق باریک‌ترین پهنه مورد مطالعه (کانال حداقل بندر پهل در سرزمین اصلی و بندر لافت در جزیره قشم) از مقدار بیشتری برخوردار است. دونقطه که دارای بیشترین پتانسیل استحصال انرژی می‌باشند به ترتیب زیر برگزیده شد و در بخش استحصال انرژی به قابلیت تولید انرژی در آن نقاط پرداخته شد. مشخصات این دونقطه به شرح زیر است.

(۱) همان‌طور که در شکل (۱۳) مشخص است ناحیه‌ای که در طول جغرافیایی ۵۵/۷۷۳۳۷۷ و عرض جغرافیایی ۲۶/۹۵۹۲۸۳ با عمق ۱۶/۳- واقع شده دارای بیشترین سرعت جریان، در حدود ۱/۶ متر بر ثانیه و میانگین سرعت جریان در حدود ۰/۸۵ متر بر ثانیه است. این ناحیه به عنوان ناحیه برگزیده با بیشترین احتمال وقوع سرعت معرفی می‌گردد.

(۲) ناحیه دوم در غرب نقطه اول و در باریک‌ترین پهنه تنگه در طول جغرافیایی ۵۵/۷۴۶۸۰۱ و عرض جغرافیایی ۲۶/۹۶۰۵۱۴ و در عمق ۳۱/۵- متری واقع شده است. با بیشترین سرعت جریانی در حدود ۱/۴۱ متر بر ثانیه به عنوان ناحیه برگزیده با عمق مناسب جهت نصب توربین معرفی شده است.



شکل (۱۲): شاخص  $R^2$  برای جهت جریان در ایستگاه لافت

است. در ایستگاه لافت که محل اندازه‌گیری سرعت جریان است، نیز اگرچه این تطابق به اندازه مقایسه انجام شده در تراز سطح آب ایدئال نیست ولی کاملاً مطلوب و قابل اعتماد است زیرا همان‌طور که تجربه نشان داده، به دلیل دقت کمتر دستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت و همین‌طور تأثیرپذیری شدید سرعت جریان از عوامل محیطی معمولاً شبیه‌سازی‌های سرعت جریان به دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده در تراز سطح آب نیست. چنانچه در نمودار پراکنندگی سرعت جریان در شکل (۶) مربوط به ایستگاه لافت دیده می‌شود در سرعت‌های پایین (کمتر از حدود ۰/۳ متر بر ثانیه) ناهمخوانی بیشتری بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری دیده می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری در ثبت مقادیر کوچک باشد.

## ۴-۳- بحث و نتیجه‌گیری

### ۴-۱- تولید انرژی

استحصال انرژی جریان‌های جزرومدی کاربرد نسبتاً نوینی از علم هیدرودینامیک را معرفی می‌نماید. دورنمای قابلیت جزرومد در تولید انرژی، از یک سو و عطش بشر برای یافتن منابع نوین انرژی که از دغدغه عدم کفایت روند تولید انرژی برای تقاضای آینده، سرچشمه گرفته، از سوی دیگر، دلیل خوبی برای انجام این مطالعات بوده است. استحصال انرژی آن‌گونه که تاکنون بیشترین رواج را داشته مبتنی بر روشی بوده که با محبوس کردن آب درخور به هنگام مد و سپس تخلیه آن از کانالی که توربین در آن جاسازی شده انجام گرفته است (استفاده از پتانسیل ارتفاع آب). آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از این روش، باعث نشده استفاده‌کنندگان از این منبع مهم انرژی چشم‌پوشی کنند، بنابراین دانشمندان علم هیدرودینامیک بر آن شدند تا قابلیت مهم سرعت جریان‌های جزرومدی در تولید انرژی را پیشنهاد دهند. در این بخش از مطالعات با توجه به همین رویکرد و با اهتمام به دستورالعمل (ارزیابی منابع انرژی جزرومدی)<sup>۹</sup> مرکز انرژی‌های دریایی اروپا (EMEC) در قالب «راهنمای استحصال انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی» در سال ۲۰۰۹ انتشار یافته، به شرح عناوین زیر، محاسبه انرژی در تنگه خوران بررسی

7 . APD (Average Power Density)

8 . AEP (Annual Energy Production)

6 . Assessment Of Tidal Energy Resource

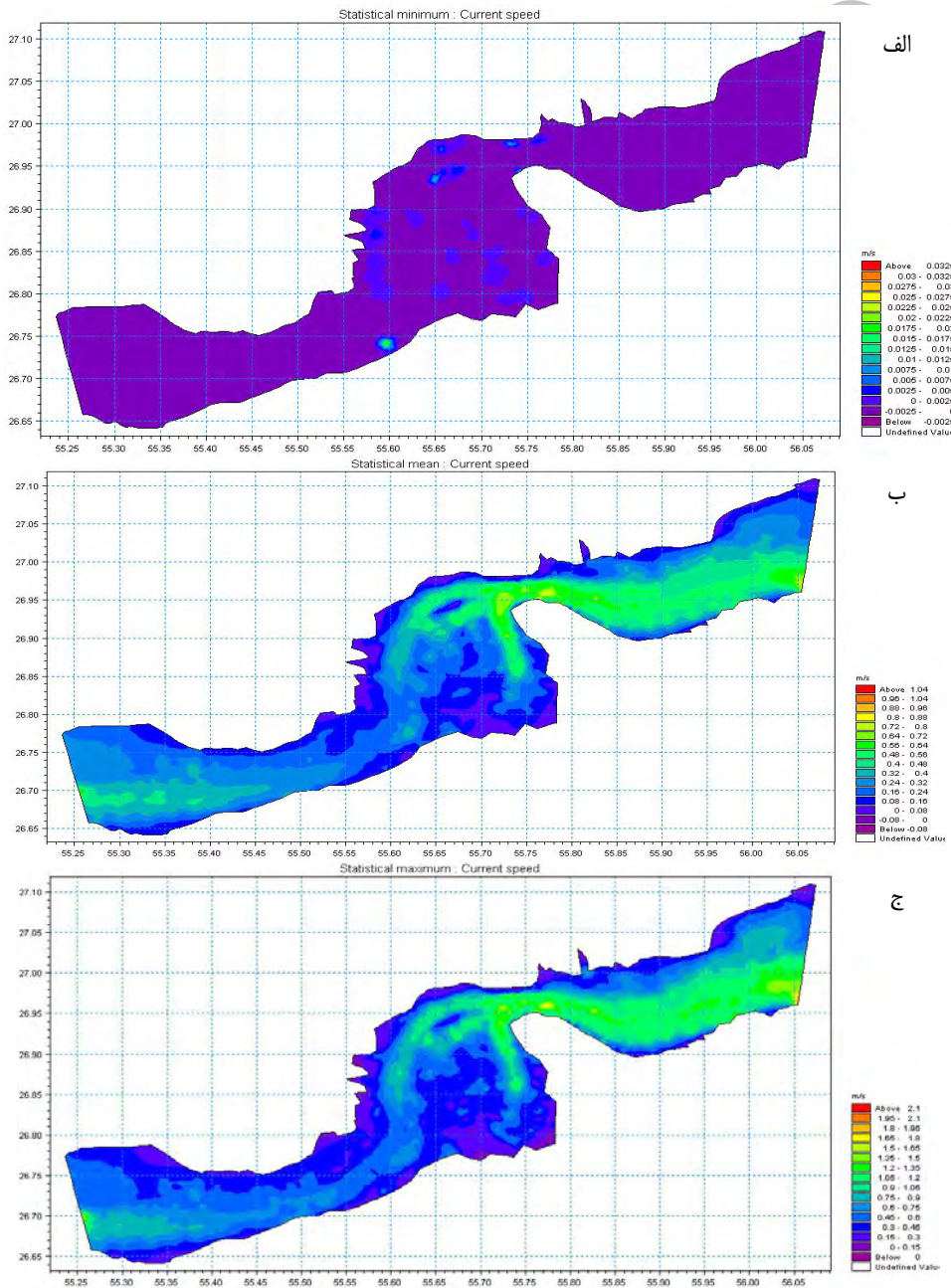
در محدوده مورد مطالعه بودند انتخاب شدند. ناحیه اول، دارای عمق کم (در حدود ۱۶ متر) ولی از بیشترین سرعت جریان در محدوده مورد مطالعه برخوردار بود. ناحیه دوم از عمق مناسب (حدود ۳۱ متر) برخوردار بود و سرعت جریان در آن مقدار قابل قبولی داشت. دلیل انتخاب ناحیه دوم آن است که در بین نواحی دارای عمق مناسب بیشترین سرعت جریان را دارد. در ادامه، این دو ناحیه به صورت جزئی تر بررسی می شود، در نهایت بهترین ناحیه بین این دو برگزیده خواهد شد. شکل (۱۴) ناحیه اول با عنوان «ناحیه با بیشترین سرعت جریان» و شکل (۱۵) ناحیه دوم را با عنوان «ناحیه کارا» نشان می دهد.

برای شروع این مقایسه، هیستوگرام سرعت در هر دو ناحیه رسم می گردد. این هیستوگرام که در واقع، درصد زمان های وقوع سرعت های

جهت جریان از آن رو دارای اهمیت ویژه ای است که جهت نصب دستگاه های تولید انرژی را تعیین می کند. زیرا دستگاه هایی که تولید انرژی در آنها بر مبنای گردش روتور است، بهترین بازدهی را در شرایطی خواهند داشت که جریان در راستای محور توربین برقرار باشد. اطلاعات سطح آب در محدوده جغرافیایی و در بازه زمانی مدل سازی به جهت در نظر گرفتن رواداری کافی بین تاج توربین و سطح آزاد آب در تصمیم گیری برای محل نصب توربین ها مهم است.

### ۳-۴- مشخصات سرعت جریان در مقاطع نمونه

از آنجاکه عامل تولید انرژی سرعت جریان است، بنابراین از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در بخش گذشته دو ناحیه که دارای پتانسیل ویژه



شکل (۱۳): به ترتیب از بالا به پایین بیانگر: الف- کمترین سرعت جریان، ب- میانگین سرعت جریان و ج- بیشترین سرعت جریان در هر نقطه از محدوده جغرافیایی و در بازه زمانی مدل سازی است.

### ۴-۴- میانگین چگالی نیرو

میانگین چگالی نیرو که با APD معرفی می‌گردد، در واحد سطح مقطع در نظر گرفته شده و بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود (EMEC, 2009).

$$APD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{N_B} (U_i^3 \cdot f(u)_i) \quad (\text{kw/m}^2) \quad (1)$$

میانگین چگالی نیرو به طور مستقیم و دقیق‌تر به وسیله سری زمانی به دست آمده از خروجی مدل در محل مورد مطالعه از معادله زیر به دست می‌آید. (EMEC, 2009).

$$APD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^N (V_j^3) \quad (\text{kw/m}^2) \quad (2)$$

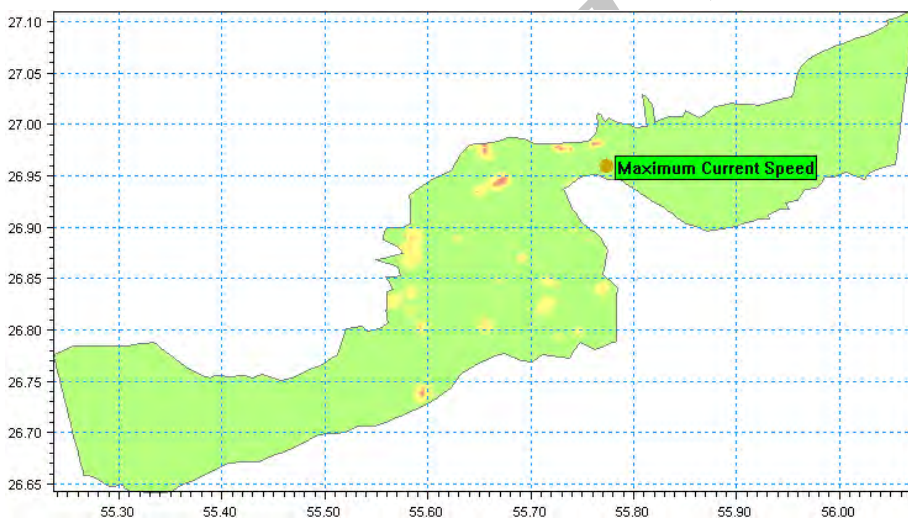
بر اساس معادله فوق و با استفاده از خروجی‌های مدل در نقاط برگزیده با در نظر گرفتن  $\rho = 1$  مقدار APD برابر است با:

$$APD(\text{maximum speed}) = 0.5 * 1 * 3003.418 / 4000$$

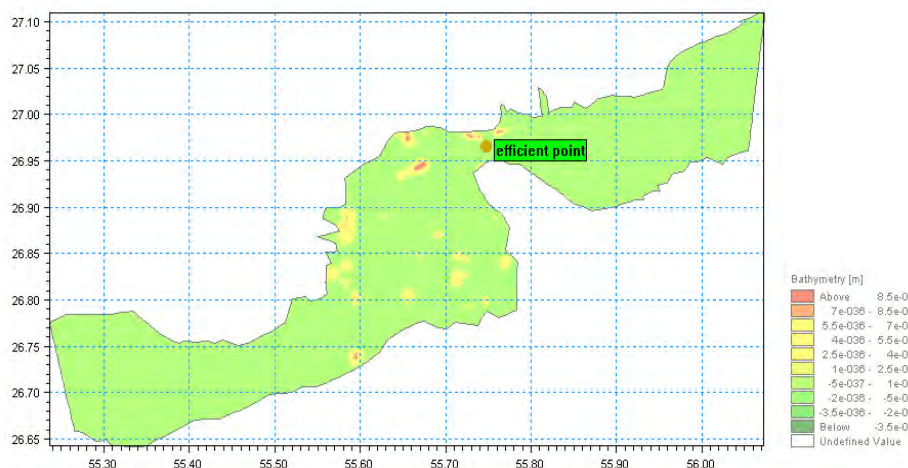
$$APD(\text{maximum speed}) = 0.375 \quad (\text{kw/m}^2)$$

عدد ۳۰۰۳/۴۱۸ مجموع مکعب سرعت‌ها در ناحیه اول، عدد ۴۰۰۰ تعداد گام‌های استخراج شده از خروجی مدل که در هر ۱۰ دقیقه و در حدود

مختلف است، با  $f(u)_i$  نمایش داده شده است. برای تهیه نمودار  $f(u)_i$  به طور استاندارد، در عرض هر کدام از نواحی، یک مقطع انتخاب می‌گردد و در طول هر مقطع سه نقطه مشخص می‌شود. سپس خروجی سرعت جریان، در هر ۱۰ دقیقه و در مدت تقریبی یک ماه برای سه نقطه انتخاب شده در مقطع، استخراج شده و در هر ۱۰ دقیقه میانگین سرعت این سه نقطه محاسبه می‌گردد. این سرعت میانگین که برای هر ۱۰ دقیقه محاسبه شده به عنوان توزیع سرعت ناحیه انتخاب شده در نظر گرفته می‌شود. در ادامه درصد وقوع سرعت‌های مختلف به ازای گام‌های ۱/۰ متر بر ثانیه تعیین و سپس نمودار پراکندگی آن رسم می‌گردد. جدول (۷) و شکل (۱۶) توزیع سرعت را بر اساس توضیحات فوق نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مساحت زیر نمودار شکل (۱۶) نسبت مستقیمی با APD مقطع مورد مطالعه دارد. هردو نمودار قرمز و آبی تا حدود سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه تقریباً بر هم منطبق هستند. و در سرعت‌های بالاتر مشاهده می‌گردد علی‌رغم آنکه دامنه نمودار قرمز به سمت سرعت‌های بالای نمودار کشیده شده ولی قله نمودار آبی به سمت  $f(u)_i$  های بیشتر افزایش یافته و هردو نمودار قرمز و آبی مساحت‌های تقریباً یکسانی را در زیر خود محاط کرده‌اند. بنابراین تأکید می‌گردد که بیشترین رکورد سرعت جریان به تنهایی، APD بیشتری تولید نمی‌کند و فراوانی سرعت جریان بالا عامل مهم در تولید انرژی است.



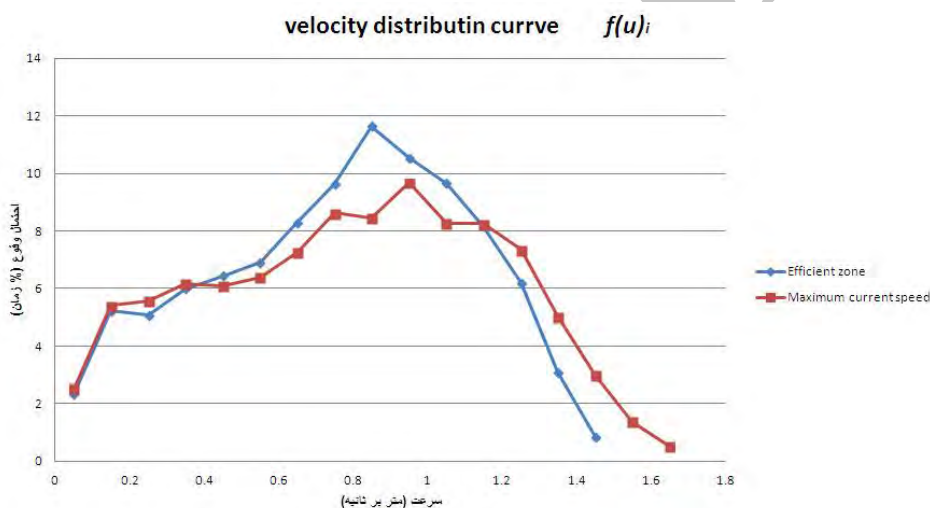
شکل (۱۴) محل وقوع بیش‌ترین سرعت جریان بر اساس خروجی مدل



شکل (۱۵) محل دارای عمق و سرعت مناسب در غرب محل اول

جدول (۷): توزیع سرعت

velocity	Occurrence likelihood	
	Efficient zone	Max. current Speed zone
m/s	% time	% time
0.05	2.346	2.55
0.15	5.216	5.4
0.25	5.066	5.575
0.35	5.989	6.175
0.45	6.439	6.1
0.55	6.913	6.4
0.65	8.285	7.25
0.75	9.633	8.625
0.85	11.63	8.45
0.95	10.531	9.675
1.05	9.658	8.275
1.15	8.16	8.25
1.25	6.19	7.35
1.35	3.094	5.025
1.45	0.848	3
1.55		1.375
1.65		0.525



شکل (۱۶): نمودار توزیع سرعت برای دو نقطه برگزیده

$w_{cell}$  = width of the cell (m)

۲۸ روز انجام شده است.

با توجه به انتخاب دو ناحیه، فلاکس انرژی برای هر دو ناحیه محاسبه می‌گردد. از آنجاکه مقایسه این دو مقطع نیز مدنظر است به جهت برآورد مناسب، کمترین عرض مقطع بین دو ناحیه، که مربوط به ناحیه اول (ناحیه دارای بیشترین سرعت جریان) است در محاسبات منظور گردیده است. به عبارت دیگر برای هر دو ناحیه یک عرض در نظر گرفته شده است.

برای ناحیه اول با عمق حدود ۱۶ متری محل مورد مطالعه و عرض حدود ۳۷۵ متری محل،  $P_{flux}$  از رابطه زیر به دست می‌آید. شکل (۱۷) عرض ناحیه اول را نشان می‌دهد.

$$P_{flux1} = 0.375 * 16 * 375$$

$$P_{flux1} = 2250 \text{ kw}$$

و برای ناحیه دوم با توجه به عمق ۳۰/۵ متری و با عرض مشابه (به جهت مقایسه، عرض‌ها مشابه در نظر گرفته شده، درحالی که پهنای این

$$APD_{(efficient\ zone)} = 0.5 * 1 * 2413.612 / 4000$$

$$APD_{(efficient\ zone)} = 0.301 \text{ (kw/m}^2\text{)}$$

عدد ۲۴۱۳/۶۱۲ مجموع مکعب سرعت‌ها در ناحیه دوم است.

#### ۴-۵- انرژی موجود در مقطع

انرژی موجود در هر مقطع از روش فلاکس به دست می‌آید. این روش مبتنی است بر محاسبه انرژی جنبشی در سطح مقطع و مقدار آن برابر است با حاصل ضرب APD به دست آمده در کل سطح مقطع مورد نظر:

$$P_{flux} = APD \cdot d_{cell} \cdot w_{cell} \text{ (kw)}$$

$$APD = \text{average power density (kw/m}^2\text{)}$$

$$d_{cell} = \text{depth of the cell (m)}$$

به توضیحات بند ۲ ملاحظه می‌شود که فقط در ناحیه دوم Efficient zone قابلیت نصب نیروگاه وجود دارد.

(۴) بالاترین سرعتی که در طراحی در نظر گرفته می‌شود ۷۱٪ بیشترین سرعت خروجی مدل در محل مورد نظر است. از آنجا که میانگین بالاترین سرعت در ناحیه Efficient zone برابر ۱/۴۱۴ است، بالاترین سرعت در نظر گرفته شده در طراحی از حاصل ضرب ۰/۷۱ در عدد ۱/۴۱۴ برابر ۱/۰۰۵ حاصل می‌گردد.

(۵) بر اساس دستورالعمل ذکر شده  $\eta_R$  (راندمان دستگاه‌های TECS) در سرعت‌های زیر ۰/۵ متر بر ثانیه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و برای سرعت‌های برابر ۰/۵ متر بر ثانیه و بیش از آن، راندمان مورد نظر از ۳۸٪ شروع و به‌طور پله‌ای با نرخ ۱٪ افزایش پیدا نموده و حداکثر این راندمان برابر ۴۵٪ در بالاترین سرعت طراحی در نظر گرفته می‌شود. (بالاترین سرعت طراحی در بند ۴ تعریف شده است.) در طراحی ناحیه مورد نظر در این مطالعات از آنجا که بالاترین سرعت طراحی ۱/۰۰۵ است، با رجوع به جدول ۸ ملاحظه می‌گردد که بیشترین  $\eta_R$  به ۴۳٪ محدود می‌گردد.

(۶) برای هر گام یک ضریب کاهشده دیگر با نام "راندمان میانگین قطار نیرو" که با  $\eta_{PT}$  نمایش داده می‌شود، لحاظ می‌گردد که مقدار آن ۹۰٪ است. ضریب کاهشده ۹٪ در ستون آخر جدول ۸ اعمال گردیده است.

(۷) نیروی استحصالی در نظر گرفته شده برای هر توربین، در هر گام سرعت (گام‌های سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه تعریف شده است) از رابطه  $P_{av}(i) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_i^3$  تعیین می‌گردد. اندیس  $i$  نشان‌دهنده گام سرعت مشخصه است (ستون دوم جدول ۸).

شکل (۱۸) مقایسه مشهودی از پتانسیل توان مقطع و توان قابل استحصال ارائه می‌کند.

(۸) برای به دست آوردن توان الکتریکی متوسط سالانه از رابطه  $P_{mean} = \sum_{i=1}^{N_B} P(U)_i * f(u)_i$  استفاده می‌گردد.

(۹) در نهایت برای محاسبه انرژی تولید شده سالیانه از رابطه  $AEP = 8760 \cdot A_V \cdot P_{mean}$  استفاده می‌گردد. در این معادله  $P_{mean}$  از جمع ستون آخر جدول (۹) و عدد ۸۷۶۰ مجموع ساعات یک سال و  $A_V$  که بر اساس درصد است، ضریب در اختیار بودن توربین را بیان می‌کند که به ساعات خارج از سرویس بودن یک دستگاه به دلایل تعمیر نگهداری و مواردی از این دست مربوط است.

ناحیه چندین برابر بیشتر است). انرژی موجود در مقطع به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{flux2} = 0.301 * 30.5 * 375$$

$$P_{flux2} = 3442 \text{ kw}$$

ملاحظه می‌گردد که بالا بودن APD ملاک مناسبی برای قضاوت در رابطه با تولید انرژی نیست و عوامل عرض و عمق نیز باید در کنار ملاک APD مبنای قضاوت قرار گیرند.

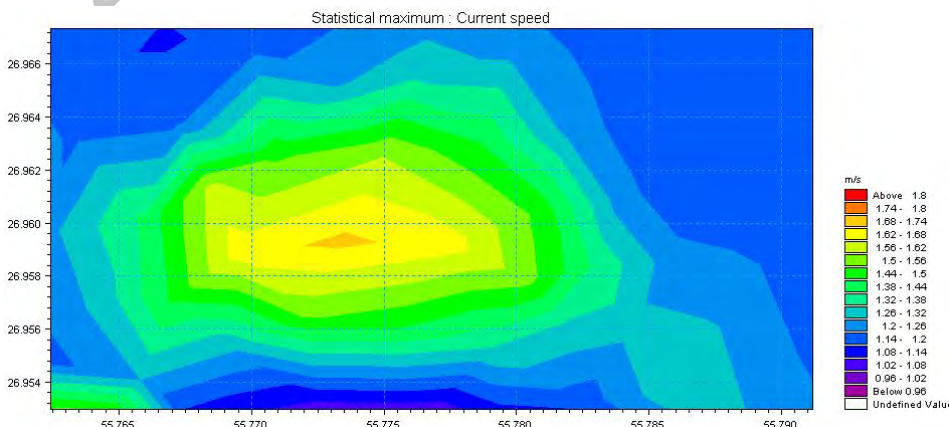
#### ۴-۶- انرژی قابل استحصال

با توجه به اطلاعات جامع به‌دست‌آمده اکنون با توجه به دستورالعمل کاربردی «انرژی‌های تجدید پذیر دریایی Marine Renewable Energy Guide» (EMEC, 2009) اقدام به احداث یک نیروگاه استحصال انرژی نمونه می‌گردد. همان‌طور که مشخص است پارامترهای زیادی در عدم حصول کامل تمام فلاکس انرژی به انرژی قابل بهره‌برداری وجود دارد، از آن جمله به راندمان TECS ها می‌توان اشاره کرد. هم‌محور بودن دقیق جهت جریان با روتورها، تأثیرات خارجی مؤثر بر جریان، عدم توانایی استفاده از تمامی سطح مقطع عمود بر جهت جریان و عدم قطعیت‌های دیگر نام برد. از آنجا که در این مطالعات از ابتدا سعی بر کاربردی بودن خروجی‌ها بوده، لازم است برای اثبات این ادعا، نمونه کاملی با در نظر گرفتن تمام عدم قطعیت‌های متصور طراحی کرد. توضیحات زیر و جداول (۸) و (۹) روند طراحی را روشن کرده است.

(۱) در محل مورد نظر جهت نصب نیروگاه استحصال انرژی، سه نقطه در نظر گرفته شد و میانگین سرعت این نقاط، سرعت مبنای محاسبات قرار گرفت.

(۲) از آنجا که قطر توربین‌های رایج در حدود ۲۰ متر است، با توجه به موارد ذکر شده در بخش تولید انرژی (فاصله ۵ متری آزاد از روی تاج توربین تا سطح آب و فاصله‌های آزاد ذکر شده از کف توربین تا بستر دریا و...)، برای جانمایی مکان مورد نظر به‌ناچار از نقطه دوم در نظر گرفته شده استفاده می‌شود. این نقطه اگرچه دارای بهترین سرعت جریان نیست ولی با توجه به وسعت مکانی جریان با سرعت مناسب، موقعیت مناسبی برای احداث یک نیروگاه استحصال انرژی است.

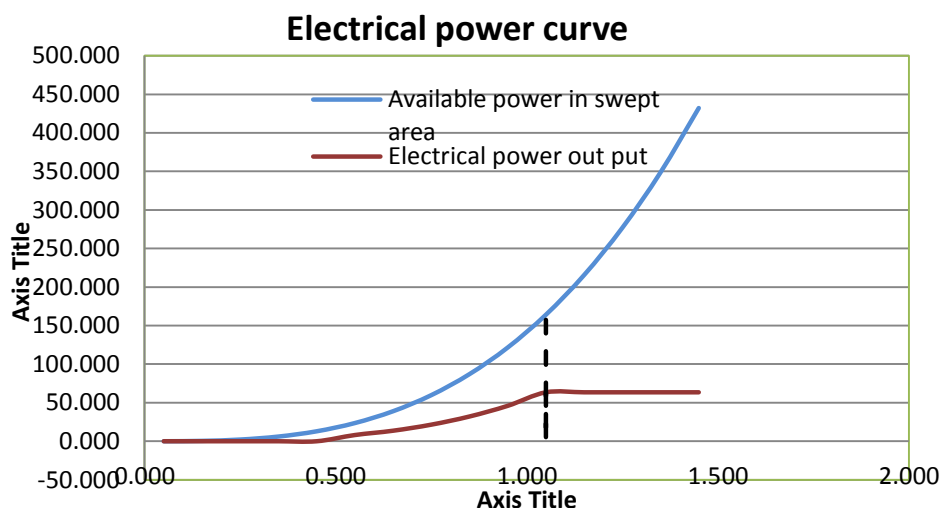
(۳) TECS انتخاب شده در این نمونه یک توربین با قطر ۱۹ متر فرض می‌شود؛ بنابراین مساحت مقطع دستگاه برابر ۲۸۳/۵ مترمربع است. با توجه



شکل (۱۷): پهنای ناحیه اول (منطقه با سرعت جریان بالاتر)

جدول (۸): محاسبه توان الکتریکی در هر گام سرعت

Average bin velocity	Available power	Rotor efficiency	Electral power per bin
$U_i$	$P_{av(i)}=0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot U_i^3$	$\eta R$	$P(U_i)=P_{av(i)} \cdot \eta R$
m/s	kw	%	kw
0.050	0.018	0	0
0.150	0.478	0	0
0.250	2.215	0	0
0.350	6.078	0	0
0.450	12.917	0	0
0.550	23.584	38	8.066
0.650	38.928	39	13.664
0.750	59.801	40	21.528
0.850	87.052	41	32.122
0.950	121.533	42	45.939
1.050	164.093	43	63.504
1.150	215.584	-	63.504
1.250	276.855	-	63.504
1.350	348.758	-	63.504
1.450	432.143	-	63.504



شکل (۱۸): مقایسه پتانسیل توان در تمام مقطع (ستون ۲ جدول ۸) و توان قابل استحصال (ستون ۴ جدول ۸)

جدول (۹): محاسبه توان الکتریکی متوسط

Average bin velocity	Velocity occurrence likelihood	Electical power per bin	Mean annual electrical power per bin
$U_i$	$f(u_i)$	$P(U_i)$	$P(U_i) \cdot f(U_i)$
m/s	%	kw	kw
0.050	2.346	0	0
0.150	5.216	0	0
0.250	5.066	0	0
0.350	5.989	0	0
0.450	6.439	0	0
0.550	6.913	8.066	0.558
0.650	8.285	13.664	1.132
0.750	9.633	21.528	2.074
0.850	11.630	32.122	3.736
0.950	10.531	45.939	4.838
1.050	9.658	63.504	6.133
1.150	8.160	63.504	5.182
1.250	6.190	63.504	3.931
1.350	3.094	63.504	1.965
1.450	0.848	63.504	0.539
Mean annual electrical power, $P_{mean}$			30.086

که حتی با احتساب  $A_v = 50\%$  مقدار توان تولیدی برابر یک هزار و هشتصد و پنجاه مگاوات ارزیابی می‌گردد. تولید این مقدار انرژی فوق‌العاده ایدئال است و مقادیر بسیار کمتر از این، دولت‌های پیشرو را به احداث چنین نیروگاه‌هایی ترغیب کرده است.

این مقدار انرژی تولیدی مرهون فناوری جدید استحصال انرژی در کانال‌های باز است. این توان در مقایسه با بیش‌ترین نیروگاه‌های که تاکنون با روش حوضچه‌های بسته ساخته شده هم بالاتر است و هم با محیط‌زیست سازگارتر است.

### مراجع:

- ۱- شفیعی فر مهدی، حسینی شهاب الدین، ررسی هیدرولیک جریان و موج در تنگه خوران، ۱۳۷۹
- ۲- شیرین منش سعیده، چگینی وحید، مطالعه و بررسی برآورد انرژی قابل استحصال از موج و جریان جزرومدی در خلیج چابهار، ۱۳۸۹
- ۳- صادقی امین، تجزیه‌چی مجتبی، چگینی وحید، قاسمی‌زاده حمید، مدل‌سازی هیدرولیک تنگه خوران تحت اثر جریان‌های جزرومدی، ۱۳۸۸
- ۴- نشریه سازمان انرژی‌های نو ایران، آبان ۱۳۹۰
- ۵- آل داود م، ۱۳۸۷ "بررسی انرژی امواج جزرومد در منطقه خور موسی و امکان‌سنجی روش‌های بهره‌گیری از آن" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران
- ۶- پسندیده ن، ۱۳۷۶ "انرژی حاصل از جزرومد در ابتدای خور موسی بندر امام خمینی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۷- رحمانی ح، ۱۳۸۶ "مطالعه ساخت دستگاه استحصال انرژی از جزرومد در منطقه چابهار" پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
- 8- The European Marine Energy Centre Ltd, 2009, Assessment of Tidal Energy Resource, First published in the UK in 2009 by BSI, 389 Chiswick High Road, London W4 4AL
- 9- Couch Scott J., Bryden Ian G., 2006, The impact of energy extraction on tidal flow development.
- 10- Sen Z., 2012, Energy generation possibility from ocean currents: Bosphorus, Istanbul, Ocean Engineering, 50, pp. 31-37
- 11- Stevens C.L., Smith M.J., Grant B., Stewart C.L., Divett T., 2012, Tidal energy resource complexity in a large strait: The Karori Rip, Cook Strait, Continental Shelf Research, 33, pp. 100-109
- 12- Zhong L., Li M., 2006, 'Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay', Continental Shelf Research, 26, 752-770
- 13- Sutherland G., Foreman M., Garrett C., 2006 'Tidal current energy assessment for Johnstone Strait, Vancouver Island' DOI:10.1243/09576509JPE338
- 14- Hasegawa D., Sheng J., Greenberg D. A., Thompson K. R., 2011, Far-field effects of tidal energy extraction in the Minas Passage on tidal circulation in the Bay of Fundy and Gulf of Maine using a nested-grid coastal circulation model, Ocean Dynamics, 61:1845-1868 DOI 10.1007/s10236-011-0481-9
- 15- Mahmoudov M., Chegini V., Montazeri Namin M., 2011, Three-Dimensional Simulation of Qeshm Channel Currents, Journal of the Persian Gulf (Marine Science), 2(3), 9-16
- 16- EPRI TP-008-NA, 2006, North America Tidal In-Stream Energy Conversion Technology Feasibility Study

انرژی تولیدشده سالیانه توسط یک دستگاه TECS:

$$AEP = 8760 * 30.086 A_v$$

$$AEP = 263553 A_v \text{ (Kw)}$$

این مطالعات جنبه‌های بارزی نسبت به دیگر مطالعات انجام‌شده در این رابطه دارد که به شرح زیر دسته‌بندی می‌شود:

(۱) در بعد استحصال انرژی در ایران اولین مطالعاتی از این دست است که به تولید انرژی مبتنی بر آخرین دستورالعمل‌های صادرشده در اروپا با دقت و اعمال کلیه ضرایب کاهنده پرداخته است.

(۲) در بعد برپاسازی مدل، تلاش شد که بیشترین دقت ممکن در آن بکار گرفته شود. به طوری که در محدوده مطالعاتی موردنظر بیش از ۹۸۰ هزار نقطه هیدروگرافی شده به عنوان ورودی به مدل داده شده است. نگارنده مدل دیگری را با این چگالی نقاط هیدروگرافی شده تا این تاریخ سراغ ندارد.

(۳) این مطالعات تنها مطالعاتی در ایران بوده که مناسب‌ترین نقطه را در یک محدوده مطالعاتی جهت استحصال انرژی برمی‌گزیند. دیگر مطالعات انجام‌شده معمولاً بر مبنای سرعت جریان در محدوده مورد مطالعه تصمیم‌گیری نموده است و پارامترهای عمیق و سرعت نقطه‌به‌نقطه بررسی نشده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

(۱) در روند مطالعات مشخص شد که مؤلفه‌های جزرومدی ارائه‌شده از سوی سازمان نقشه‌برداری برای مدل‌سازی، تصمیم‌گیری و مواردی از این دست کافی نیست و لااقل مؤلفه N2 که توسط سازمان ارائه نمی‌شود به اندازه مؤلفه O1 ایفای نقش می‌کند.

(۲) همان‌طور که گفته شد بیشتر بودن سرعت جریان‌های رکورد شده به تنهایی، به مفهوم داشتن APD بیشتر نیست و فراوانی سرعت جریان‌های بالا، عامل مهم در تولید انرژی است.

(۳) این مطالعات نشان می‌دهد که صرف استفاده از فرمول APD که در واحد سطح اعمال می‌گردد:

$$APD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^N (V_j^3) \quad (\text{kw/m}^2)$$

و مبنای قضاوت استحصال انرژی در پایان‌نامه‌ها قرار گرفته مبنای ناقصی است. زیرا بر اساس این فرمول بدون در نظر گرفتن شرایط عرض و عمق محل، ممکن است نتایج غیرعملی حاصل گردد. بنابراین باید از فرمول کامل شده  $P_{flux}$  استفاده نمود:

$$P_{flux} = APD \cdot d_{cell} \cdot w_{cell} \quad (\text{kw})$$

(۴) انرژی تولیدشده از یک دستگاه معادل:

$$AEP = 263553 A_v$$

به دست آمد، با توجه به عرض محدوده و قطر دستگاه، با احتساب فاصله ۲/۵ برابر قطر توربین مابین هر دستگاه، قابلیت طراحی یک نیروگاه با حداقل ۷ توربین در عرض و در ۲ ردیف، توان تولیدی سالانه برابر است با:

$$AEP_{total} = 263553 A_v * 14$$

$$AEP_{total} = 3689742 A_v \text{ (Kw)}$$