

## مدل سازی عددی و برآورد انرژی تجدیدپذیر جریان های جزر و مدی در خورموسی

مسعود محموداف\*، وحید چگینی

مؤسسه ملی اقیانوس شناسی، استان تهران، تهران

### چکیده

در این مقاله با استفاده از دو مدل عددی سه بعدی هیدرودینامیک دریا *BOM* و *COHERENS* به مطالعه و برآورد انرژی های جریان های جزر و مدی در خور موسی پرداخته شده است. ابتدا هیدرودینامیک منطقه تحت اثر ۶ مؤلفه ی اصلی جزر و مدی، با قابلیت تفکیک ۲۵۰ متر و در ۱۰ تراز قایم، شبیه سازی شده و نتایج هر دو مدل با جریان سنجی های به عمل آمده توسط مؤسسه ملی اقیانوس شناسی مقایسه شده است. نتایج مدل *COHERENS* به واقعیت نزدیک تر بوده و لذا این مدل به منظور تدقیق بیشتر واسنجی می شود. پس از اطمینان از صحت نتایج مدل واسنجی شده ی *COHERENS*، مدل انرژی جریان های جزر و مدی منطقه شبیه سازی شده است. در این مطالعه ماژول انرژی جریان های دریایی به صورت ماژول تکمیلی طراحی، تنظیم و به مدل اصلی اضافه شده است. متوسط گیری های ساعتی در طول یک ماه از انرژی جریان در مدل نشان می دهد که بیشترین مقادیر انرژی جریان در منطقه ی بار میانی با متوسط ساعتی بیش از  $5 MWh$  به ثبت رسیده است. بیشترین مقدار انرژی تجمعی-عمقی جریان در منطقه به حدود  $5 MWh$  می رسد. همچنین با اجرای مدل، تنگه ای واقع در بار میانی بعنوان بهترین منطقه بمنظور استحصال انرژی جریان، با چگالی جریان بیش از  $85 W/m^2$  مشخص شده است.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، جریان، خورموسی، مدل سازی، جزر و مد

\* نویسنده مسؤل، پست الکترونیک: [m\\_mahmoudov@inio.ac.ir](mailto:m_mahmoudov@inio.ac.ir)

## ۱. مقدمه

انرژی در حیات اقتصاد صنعتی جوامع، نقش زیربنایی را ایفا می‌کند. خوشبختانه جمهوری اسلامی ایران از نظر دارا بودن منابع و ذخایر متنوع انرژی‌های فسیلی از ثروتمندترین کشورهای جهان به حساب می‌آید. ولی بدون شک این منابع انرژی روزی پایان خواهند پذیرفت. لذا استحصال انرژی از منابع جدید امروزه جزو مهمترین موضوعات مطرح در جهان است. انرژی‌های نو و تجدیدپذیر در کشور ما و در جهان موضوع نسبتاً جدیدی است. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی از پاکترین و پر ظرفیت‌ترین انرژی‌ها به شمار رفته و جایگاه ویژه‌ای در میان سایر منابع انرژی تجدیدپذیر به خود اختصاص داده‌اند. همچنین در این میان استحصال انرژی از جریان‌های دریایی نسبت به بقیه‌ی منابع دریایی جدیدتر است. اندازه‌گیری‌های به عمل آمده توسط مؤسسه ملی اقیانوس شناسی نشان دهنده‌ی شدت نسبی زیاد جریان‌ها در خورموسی نسبت به سایر نواحی جنوب کشور است. همچنین استقرار مجتمع بندری امام خمینی (ره) در این منطقه نیاز به استفاده از انرژی را بیش از سایر مناطق مشخص می‌نماید. به همین دلیل در این مطالعه با استفاده از دو مدل عددی *COHERENS* و *BOM* به برآورد انرژی اسمی جریان‌های دریایی این منطقه پرداخته شده است. مدل هیدرودینامیکی *COHERENS* یک مدل عددی، سه بعدی و منبع باز است که به زبان برنامه‌نویسی *Fortran* نوشته شده است. از این مدل در بسیاری از مطالعات مدل‌سازی استفاده شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به مدل‌سازی اثر پلوم رودخانه‌های رایین و اسپلند بر روی نحوه‌ی انتشار شوری آب‌های ساحلی بلژیک (Lacroix, et

al., 2004)، مدل‌سازی گردش آب خلیج فارس (Kämpf and Sadrinasab, 2005) بررسی هیدرودینامیک تالاب ساحلی ساکادی گورو (Marinov, et al., 2006) اشاره کرد. همچنین در بسیاری از مطالعات شبیه‌سازی، به ویژه محیط‌های آبدره از مدل *BOM* استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به یک مطالعه‌ی کاملاً مشابه در خصوص مدل‌سازی انرژی جریان‌های جزر و مدی در نروژ اشاره کرد (Grabbe, et al., 2009)، همچنین مدل‌سازی پخش آلودگی‌های آلی در مزارع پرورش ماهی (Ali, et al., 2011) با استفاده از مدل *BOM* انجام شده است. در خصوص مطالعات مشابه در زمینه‌ی مدل‌سازی و برآورد انرژی جریان‌های جزر و مدی می‌توان به برآورد انرژی جریان‌های جزر و مدی در ایرلند (Rourke, et al., 2010)، برآورد اولیه انرژی جریان‌های جزر و مدی در پرتلند انگلستان (Blunden, et al., 2005)، مطالعه در خصوص برآورد انرژی جریان‌های جزر و مدی در خلیج کوک نیوزلند (Stevens, et al., 2011) و بررسی انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی ایران (Zabihian, et al., 2011) اشاره نمود.

## ۲. مواد و روش‌ها

خورموسی در طول جغرافیایی،  $48^{\circ}51'$  تا  $49^{\circ}16'$  و عرض جغرافیایی  $30^{\circ}12'$  تا  $30^{\circ}35'$  واقع شده است. این منطقه از مرز جنوبی به شمال غربی خلیج فارس متصل است. بنادر امام خمینی (ره) و ماهشهر در شمال خورموسی قرار گرفته‌اند. خورموسی از شمال به تعداد زیادی از خوریهات فرعی متصل است که خورهای مریموس، دورق و ماهشهر از جمله خورهای اصلی این منطقه به شمار می‌روند. محدوده‌ی جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. محدوده‌ی جغرافیایی خورموسی و موقعیت جریان‌سنجی‌های میدانی

به ۶ مؤلفه‌ی اصلی، مشخصات جزر و مدی منطقه تعیین و از این مشخصات برای مرز باز جنوبی منطقه در مدل‌سازی استفاده شده است. مشخصات ۶ مؤلفه‌ی اصلی جزر و مدی این منطقه در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

به منظور تعیین مشخصات جزر و مد منطقه از اندازه‌گیری‌های میدانی تراز سطح آب که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور در بار میانی خورموسی در طول ۲ ماه به عمل آمده، استفاده شده است. با تحلیل هارمونیک این داده‌ها نسبت

جدول ۱- مشخصات جزر و مدی مرزهای شرقی و غربی خورموسی

نام مؤلفه	دوره‌ی تناوب (ساعت)	دامنه‌ی نوسان (متر)	فاز اولیه نوسان (درجه)
M2	۱۲,۴۲	۱,۱۷	۳۲۷
S2	۱۲,۰۰	۰,۴۵	۳۵,۲
N2	۱۲,۶۶	۰,۱۸	۵۷,۲
K1	۲۳,۹۳	۰,۲۴	۲۵۴,۱
O1	۲۵,۸۲	۰,۳۴	۲۵۸,۹
P1	۲۴,۰۶	۰,۵۰	۳۱۰
Z0		۲,۳۴	

شامل معادلات مومنوم (معادلات ۱ و ۲)، فشار هیدرواستاتیک (معادله‌ی ۳)، پیوستگی (معادله‌ی ۴) و انتقال و انتشار متغیرهای فیزیکی (معادلات ۵ و ۶) هستند (Patrick J. Luyten et.al, 1999).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} + w \frac{\partial v}{\partial x_3} - fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \nu_T \frac{\partial v}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{12} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{22}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g$$

### ۳- مشخصات مدل

#### ۳-۱- معادلات حاکم

مدل عددی و سه بعدی *COHERENS* بر مبنای مختصات سیگما در راستای قائم طراحی شده و به زبان *Fortran* نوشته شده است. معادلات اصلی مدل شامل معادلات هیدرودینامیک ناویه-استوکس، معادلات پیوستگی و معادلات استاندارد متغیرهای عددی است. معادلات حاکم

ارائه شده است. معادلات حاکم هیدرودینامیک این مدل، شامل معادلات پیوستگی (معادله ۱۰)، مومنتوم (معادلات ۱۱ و ۱۲)، فشار هیدرواستاتیک (معادله ۱۳) و معادلات متغیرهای فیزیکی شوری و دما (معادلات ۱۴ و ۱۵) بوده که در ادامه ارائه شده است.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla T + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla S + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S$$

در معادلات فوق،  $\vec{U}$  شامل بردار دو بعدی جریان در صفحه افق،  $w$  مؤلفه قائم جریان در راستای قائم در مختصات کارتزین،  $P$  فشار آب،  $S$  شوری آب،  $T$  دمای آب،  $\rho$  چگالی آب،  $K_M$  ضریب قائم ویسکوزیته،  $K_H$  ضریب پخش در راستای قائم و  $F$  با زیرنویس‌های مختلف شامل جملات چشمه و چاه هستند.

در این مطالعه ماژول انرژی جریان‌های دریایی به زبان برنامه نویسی Fortran و سازگار با مدل اصلی اضافه و تنظیم شده است. در این ماژول در هر لحظه با توجه به تغییرات تراز سطح آب و مؤلفه‌های جریان، مقدار انرژی برای هر سلول بر مبنای معادله ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$E_{ch} = \frac{1}{2} \rho \int U^3 dA$$

که در آن  $E_{ch}$  انرژی نظری در یک کانال فرضی به سطح مقطع  $A$ ،  $U$  سرعت متوسط جریان و  $\rho$  چگالی آب است.

۳-۲- شبکه بندی و عمق سنجی

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x_1} + v \frac{\partial T}{\partial x_2} + w \frac{\partial T}{\partial x_3} = \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial T}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_2} \right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x_1} + v \frac{\partial S}{\partial x_2} + w \frac{\partial S}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_T \frac{\partial S}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_2} \right)$$

که در این معادلات  $(u, v, w)$  مؤلفه‌های جریان،  $T$  دما،  $S$  شوری،  $f = 2\Omega \sin \phi$  فرکانس کوریولس،  $\Omega = 2\pi/86164$  rad/s فرکانس چرخشی کره زمین،  $g$  شتاب گرانش،  $p$  فشار،  $\lambda_H$  و  $\lambda_T$  ضرایب لزجت قائم و انتشار،  $\rho$  ضریب انتشار افقی برای شوری و دما، چگالی،  $\rho_0$  چگالی مینا،  $c_p$  گرمای ویژه سطح آب در فشار ثابت و  $I(x_1, x_2, x_3)$  روشنایی تابشی هستند. مؤلفه‌های تانسور تنش هم به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} + w \frac{\partial u}{\partial x_3} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \nu_T \frac{\partial u}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{11} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{21}$$

$$\tau_{11} = 2\nu_H \frac{\partial u}{\partial x_1}$$

$$\tau_{21} = \tau_{12} = \nu_H \left( \frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right)$$

$$\tau_{22} = 2\nu_H \frac{\partial v}{\partial x_2}$$

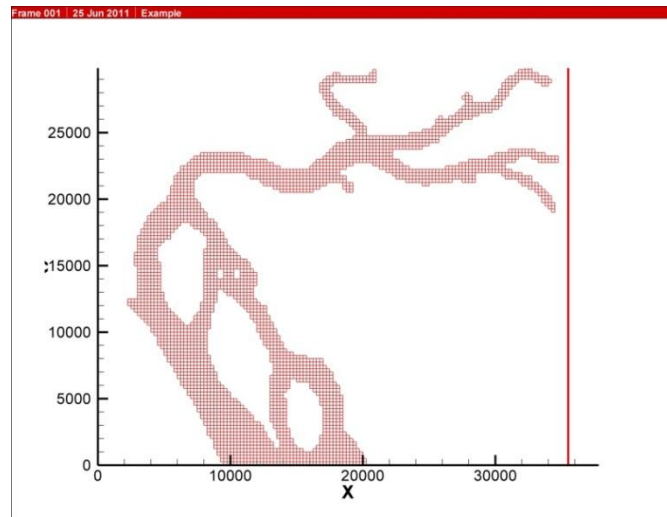
در معادلات فوق  $(u, v)$  مؤلفه‌های افقی جریان و  $\nu_H$  ضریب لزجت افقی است.

روش‌های عددی به کار رفته در مدل COHERENS بر مبنای Blumberg & Mellor (1987)، (1992) Deleersnijder، Beckers (1992) و Ruddick (1995) در نظر گرفته شده است. روش عددی تفاضل محدود به منظور تفکیک معادلات در سه بعد استفاده می‌شود. به منظور افزایش دقت، مختصات سیگما در راستای قائم استفاده شده است. بنابراین صرف نظر از مقدار عمق سلول‌ها، تراز بستر و سطح آب تبدیل به ترازهای ثابت می‌شوند.

مدل عددی و سه بعدی BOM هم به زبان برنامه‌نویسی Fortran نوشته شده است. نسخه‌ی سال ۲۰۰۶ آن با مختصات  $\sigma$  در راستای قائم

در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به عمق سنجی با تبدیل ۲۵ برگه نقشه‌های عمق-سنجی سازمان نقشه‌برداری با استفاده از نرم‌افزار *Surfer* به فرمت رقومی به مدل معرفی شده است.

با توجه به ابعاد منطقه‌ی مورد مطالعه، شبکه‌بندی منطقه به صورت شبکه‌ی مربعی با قابلیت تفکیک ۲۵۰ متر و به تعداد  $138 \times 142$  در راستای  $x$  و  $y$  انتخاب می‌شود. شبکه‌بندی منطقه در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین تعداد ۱۰ تراز سیگما در راستای قائم



شکل ۲. شبکه‌بندی منطقه‌ی مورد مطالعه با قابلیت تفکیک ۲۵۰ متر

۱۳۸۸). به همین علت در این مطالعه از مؤلفه‌ی  $(u)$  به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل با اندازه-گیری‌های میدانی استفاده شده است. به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل، باید سلول متناظر با محل نصب دستگاه‌های جریان سنج را تعیین نمود. مختصات جغرافیایی نصب دستگاه‌های جریان-سنج، نوع، مدت اندازه‌گیری و مختصات عددی سلول‌های عددی متناظر با نصب دستگاه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### ۴- مشاهدات و بحث

##### ۴-۱- مقایسه‌ی نتایج جریان

به منظور تعیین انرژی جریان، مهمترین متغیرهای مورد مطالعه، مؤلفه‌های جریان هستند. بر اساس مطالعات میدانی و جریان-سنجی در ۲ ایستگاه که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است، بزرگی مؤلفه‌های شرقی-غربی  $(u)$  بسیار بیشتر از مؤلفه‌های شمالی-جنوبی  $(v)$  است (غفاری،

جدول ۲. مختصات جغرافیایی و عددی، نوع دستگاه‌ها و مدت زمان اندازه‌گیری ایستگاه‌های جریان‌سنجی

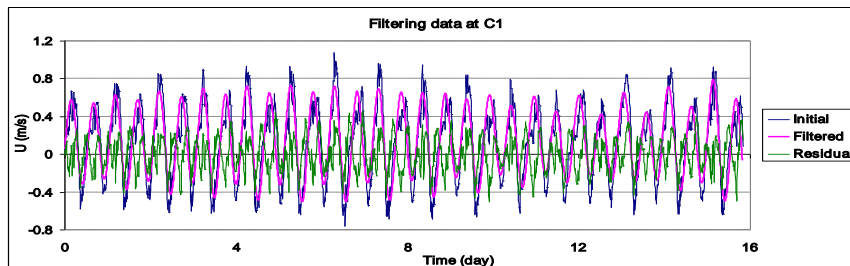
نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	عمق (متر)	دستگاه اندازه‌گیری	مدت زمان (روز)	مختصات $x$ راستای	مختصات $y$ راستای	مختصات $z$ راستای
C1	49° 4.396'	30° 25.290'	3	ADCP	15	86	98	2
C2	49° 5.107'	30° 25.349'	4	ADCP	15	90	99	3

همچنین داده‌های اولیه، پالایش (نویززدایی) شده و اختلاف بین آن‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در ادامه از داده‌های پالایش شده به عنوان داده‌های میدانی استفاده شده است. مقایسه‌ی کیفی بین جریان‌سنجی و نتایج مدل‌ها در نقاط متناظر با نصب جریان‌سنج‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

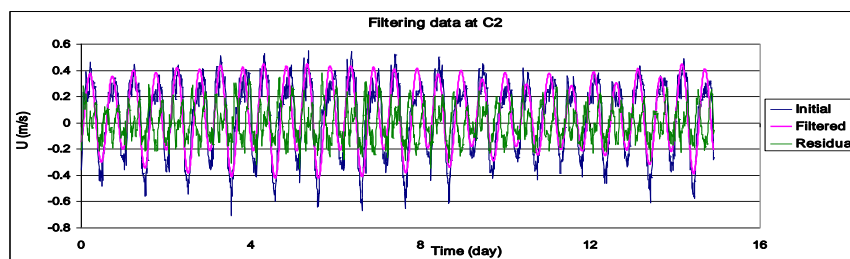
از آنجایی که داده‌های دستگاه ADCP با خطای پس‌زمینه‌ی قابل توجهی همراه بوده، لذا ابتدا داده‌های جریان‌سنجی این دستگاه با استفاده از روش تحلیل هارمونیک نسبت به مؤلفه‌ی اصلی جزر و مد پالایش شده است (Foreman, 2004). نتیجه‌ی تحلیل هارمونیک داده‌های جریان‌سنجی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. نتیجه‌ی تحلیل هارمونیک جریان در ایستگاه‌های اندازه‌گیری نسبت به مؤلفه‌ی اصلی

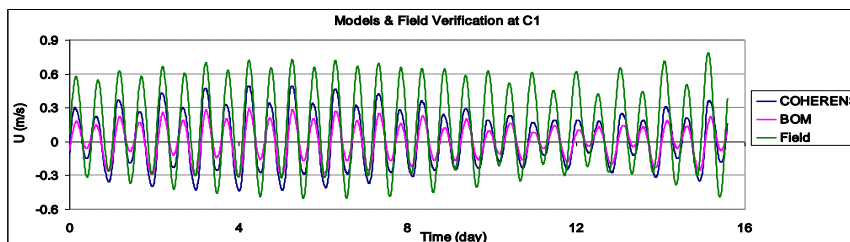
ایستگاه	مشخصات	M2	S2	N2	K1	O1	P1	U0 (m/s)
C1	دامنه‌ی نوسان (m/s)	۰,۴۸۵	۰,۱۴۲	۰,۰۸۵	۰,۱۹۹	۰,۰۲۰	۰,۱۸۷	۰,۱۳۸
	فاز نوسان (deg)	۷۹,۶	۱۹۷,۳	۲۱۴,۸	۱۰۳,۸	۲۷۶,۲	۲۹۶,۳	
C2	دامنه‌ی نوسان (m/s)	۰,۳۳۱	۰,۰۹۲	۰,۰۵۶	۰,۱۱۴	۰,۰۳۴	۰,۰۵۸	۰,۰۵۸
	فاز نوسان (deg)	۱۲۶,۱	۲۲۳,۶	۲۷۹,۱	۶۳,۱	۲۶۵,۹	۲۶۵,۷	



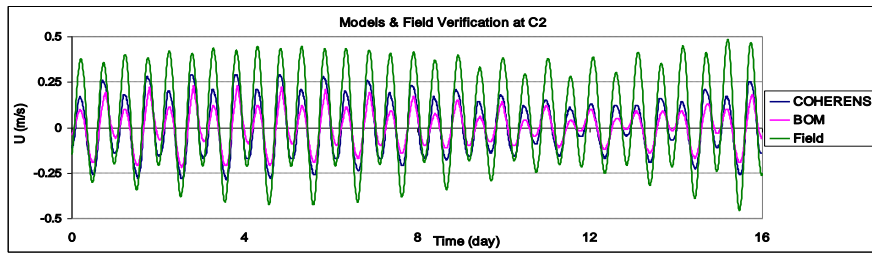
شکل ۳. داده‌های اولیه، پالایش شده و اختلاف بین آن‌ها در ایستگاه C1



شکل ۴. داده‌های اولیه، پالایش شده و اختلاف بین آن‌ها در ایستگاه C2



شکل ۵. مقایسه‌ی کیفی نتایج پالایش شده‌ی میدانی و مدل‌های عددی در ایستگاه C1 خورموسی (مؤلفه‌ی U)



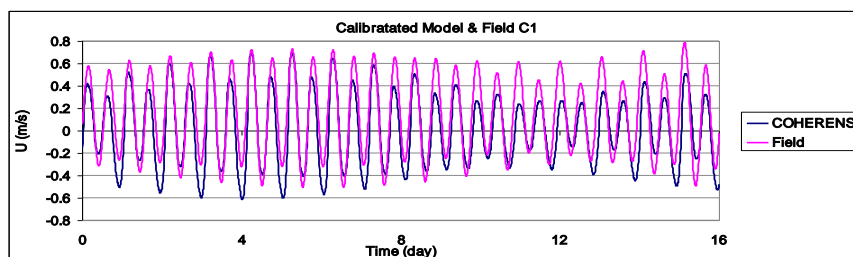
شکل ۶. مقایسه‌ی کیفی نتایج پالایش شده‌ی میدانی و مدل‌های عددی در ایستگاه C2 خورموسی (مؤلفه‌ی U)

جدول ۴. مقایسه‌ی کمی نتایج پالایش شده‌ی میدانی و مدل‌های عددی در خورموسی

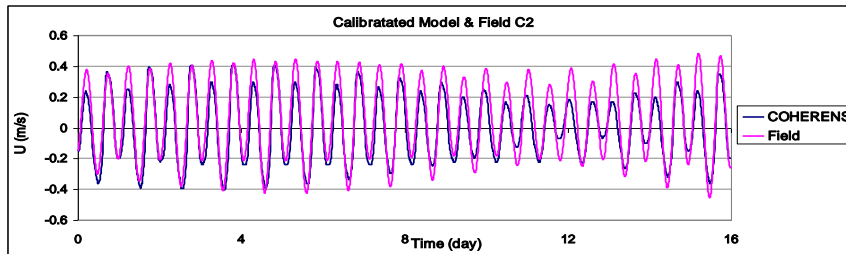
ایستگاه	مدل	ضریب همبستگی (r)	شاخص تطابق (d)	RMSE
C1	COHERENS	٪۸۸,۴	٪۸۵,۷	۰,۲۲۲
	BOM	٪۸۲,۹	٪۶۹,۵	۰,۲۸۳
C2	COHERENS	٪۹۴,۲	٪۸۹,۰	۰,۱۳۲
	BOM	٪۹۰,۴	٪۷۳,۷	۰,۱۷۸

مقایسه‌ی کمی بین نتایج مدل‌ها و داده‌های میدانی در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است کیفیت نتایج مدل *COHERENS* بهتر از مدل *BOM* بوده و به داده‌های میدانی نزدیک‌تر است. ولی به منظور تدقیق بیشتر نتایج، مدل *COHERENS* واسنجی شده است. به همین منظور زبری کف و

ضریب تنش کف را به عنوان ضرایب واسنجی انتخاب شده و زبری کف و درگ را به ترتیب ۲۵ درصد و ۵۰ درصد کاهش داده و مدل دوباره اجرا می‌شود. مقایسه‌ی نتایج واسنجی شده‌ی *COHERENS* در شکل‌های ۷ و ۸ و جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۷. مقایسه‌ی کیفی نتایج پالایش شده‌ی میدانی و مدل *COHERENS* در ایستگاه C1 خورموسی پس از واسنجی



شکل ۸. مقایسه‌ی کیفی نتایج پالایش شده‌ی میدانی و مدل COHERENS در ایستگاه C2 خورموسی پس از واسنجی

جدول ۵. مقایسه‌ی کمی نتایج پالایش شده‌ی میدانی و مدل COHERENS پس از واسنجی

ایستگاه	ضریب همبستگی ( $r$ )	شاخص تطابق (d)	RMSE
C1	٪۸۹،۱	٪۹۰،۶	۰،۲۰۶
C2	٪۹۴،۳	٪۹۴،۷	۰،۱۰۵

حاکم شدن شرایط ثابت، با فاصله‌ی زمانی ۱ ساعت و به مدت یک ماه انجام شد. نتیجه‌ی متوسط گیری انرژی جریان در ستون‌های آب در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که به‌صورت تقریبی از شکل فوق مشخص است، بیشترین مقدار انرژی مربوط به ستون آب با مختصات ( $i=35, j=21$ ) در مدل عددی و متناظر با مختصات جغرافیایی ( $49.939^\circ E, 30.247^\circ N$ ) در جنوب جزیره‌ی قبر ناخدا با بیش از ۰،۶۵ مگاوات انرژی است. از آنجایی که هر ۲ مهکشند و یا کهکشند متوالی با یکدیگر تقریباً ۲ هفته اختلاف دارند، نمودار تغییرات انرژی در این ستون آب در طول مدت ۱۵ روز در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

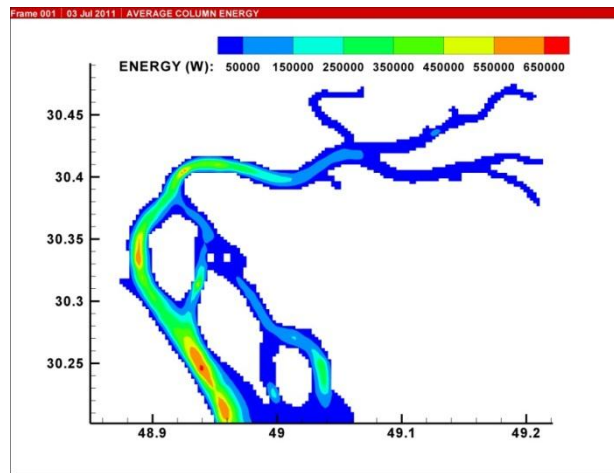
بر اساس نتایج مدل بیشترین انرژی جریان در سلول فوقانی در ستون آب مذکور به مختصات عددی ( $i=35, j=21, k=10$ ) ثبت شده است. نمودار تغییرات انرژی جریان این سلول در همان زمان در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارها و جداول فوق مشخص است، دقت و مطلوبیت نتایج در ۲ ایستگاه یکسان نیست و نتایج متناظر با ایستگاه C2 مطلوب‌تر ارزیابی شده است. پس از واسنجی، نتایج مدل حدود ۵٪ در ضریب انطباق و RMSE تدقیق پیدا می‌کند. در این شرایط متوسط ضریب همبستگی حدود ۹۲٪ و شاخص تطابق حدود ۹۳٪ می‌شود و دقت مدل واسنجی شده را می‌توان با اطمینان خوبی پذیرفت و در مرحله‌ی بعدی ماژول انرژی منطقه را اجرا نمود.

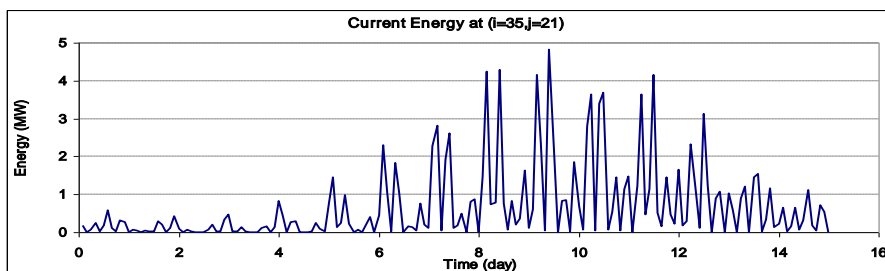
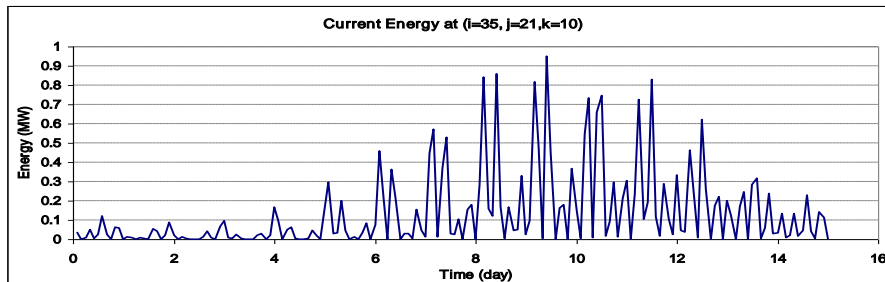
#### ۴-۲- اجرای ماژول انرژی

به منظور بررسی انرژی جریان در منطقه‌ی مورد مطالعه و تعیین مناطق با انرژی نسبی بالاتر، انرژی جریان ناشی از مؤلفه‌های سرعت در هر سلول محاسبه و به صورت ستونی با هم جمع شده است. به این صورت در هر لحظه یک مقدار به عنوان انرژی جریان به هر ستون از آب تعلق می‌گیرد. متوسط گیری از مقادیر انرژی ستون-های آب پس از گذشت یک هفته به منظور





شکل ۹- متوسط یک‌ماهه‌ی انرژی جریان در ستون‌های آب

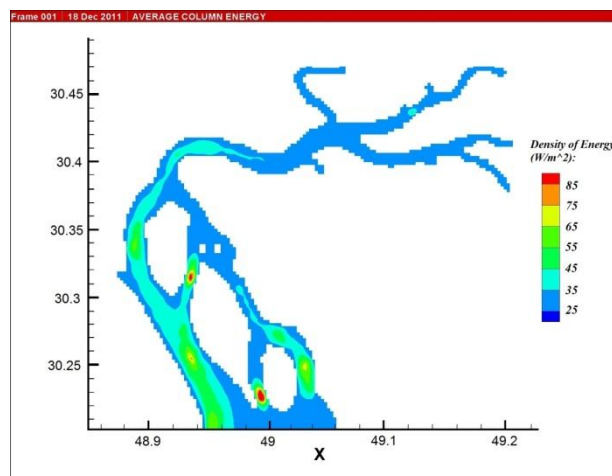
شکل ۱۰. نمودار ۱۵ روزه‌ی تغییرات انرژی در ستون آب به مختصات  $(i=35, j=21)$ شکل ۱۱. نمودار ۱۵ روزه‌ی تغییرات انرژی در سلول آب به مختصات  $(i=107, j=33, k=10)$ 

دلیل متوسط یک‌ماهه‌ی انرژی جریان هر ستون آب بر سطح مقطع همان ستون آب تقسیم شده است. نتیجه‌ی این بررسی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این بررسی مناسب‌ترین و با صرفه‌ترین مناطق به منظور استحصال انرژی جریان‌های دریایی در خورموسی نقطه با مختصات عددی  $(i=56, j=12)$  و  $(i=34, j=50)$  در مدل عددی، و به ترتیب منطبق بر مختصات  $(48.994^{\circ}E, 30.226^{\circ}N)$  و  $(48.939^{\circ}E, 30.314^{\circ}N)$  هستند که چگالی انرژی بیش از

نمودارهای فوق نشان می‌دهند در حالی که حداکثر انرژی تجمعی در سلول فوقانی ستون آب با مختصات  $(i=107, j=33)$  نزدیک به ۵ مگاوات می‌رسد، حداکثر انرژی سلولی مربوط به سلول فوقانی همین ستون، در حدود ۱ مگاوات ثبت شده است. به‌منظور تعیین نقاط مناسب برای استحصال انرژی، باید نقاط با چگالی انرژی بالا را تعیین نمود. در این نقاط عملیات استحصال انرژی به لحاظ صرفه‌ی اقتصادی، بیشتر از نقاط دیگر توجیه پذیر هستند. به همین

متغیرها در هیچ سامانه‌ای کمتر از  $1.5 \text{ m/s}$  و  $1.75 \text{ KW/m}^2$  بیان نشده است (Breeze, 2005). البته باید توجه داشت در بهترین و با صرفه‌ترین سامانه‌ها حداکثر حدود ۳۰٪ از انرژی اسمی قابل برداشت است. بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به فن‌آوری‌های موجود، عملیات استحصال انرژی در منطقه‌ی خورموسی، که به طور نسبی دارای جریان‌های شدیدی است، به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست.

در این نقاط به ثبت رسیده است. سامانه و فن‌آوری استحصال انرژی در مناطق مختلف متفاوت است. نوع سامانه در هر منطقه بر اساس شرایط طبیعی منطقه‌ی مورد نظر، شرایط زیست محیطی و بسیاری از عوامل دیگر تعیین می‌شود. برای هر نوع سامانه، مقادیر حداقل متوسط سرعت جریان و چگالی انرژی به منظور اقتصادی بودن طرح، متفاوت است (MacLennan, 2007). البته مقدار اسمی این



شکل ۱۲. متوسط یک‌ماهه‌ی چگالی انرژی جریان در منطقه‌ی مورد مطالعه

حداکثر انرژی تجمعی-عمقی جریان در نقطه‌ی مورد نظر در طول یک دوره‌ی کامل مهکشند-کپکشند نزدیک به  $5 \text{ MWh}$  ثبت شده است. درحالی که بیشترین مقدار انرژی نقطه‌ای، مربوط به سلول فوقانی همین ستون آب با انرژی حدود  $1 \text{ MWh}$  است. با تقسیم مقادیر متوسط انرژی جریان بر سطح مقطع ستون‌های آب سلول‌های عددی و متوسط‌گیری ماهیانه چگالی متوسط سطحی انرژی تعیین شده است. منطقه‌ای به شکل تنگه به مختصات جغرافیایی  $(48.994^\circ E, 30.226^\circ N)$  با چگالی حجمی انرژی بیش از  $85 \text{ W/m}^2$  بهترین و با صرفه‌ترین منطقه به منظور استحصال انرژی در منطقه‌ی مورد مطالعه است. با توجه به فن‌آوری‌های شناخته شده‌ی استحصال انرژی جریان در جهان این مقدار کمتر از

## ۵. نتیجه‌گیری

پس از اجرای مدل هیدرودینامیک خورموسی با استفاده از مدل‌های عددی *COHERENS* و *BOM* با شفافیت  $250$  متر و در  $10$  تراز سیگما، تحت اثر  $6$  مؤلفه‌ی اصلی جزر و مدی، با مقایسه‌ی نتایج مدل‌ها با جریان‌سنجی‌های به عمل آمده در دو ایستگاه، کیفیت بهتر نتایج مدل *COHERENS* اثبات شده است. پس از واسنجی ماژول هیدرودینامیک مدل *COHERENS* همبستگی حدود  $92\%$  و تطابق حدود  $93\%$  بین نتایج مدل و داده‌های میدانی به دست آمد. در ادامه با افزودن و اجرای ماژول انرژی جریان در طول یکماه و متوسط‌گیری ساعتی، انرژی نسبی بالاتر در منطقه‌ای در جنوب جزیره‌ی قبر ناخدا نتیجه شده است. در نقاط با انرژی نسبی بالاتر، متوسط ساعتی انرژی یکماهه به بیش از  $0.65 \text{ MWh}$  می‌رسد. مقدار

- Lacroix, G., Ruddick, K., Ozer, J., Lancelot, C., 2004. Modeling the impact of the Scheldt and Rhine/Meuse plumes on the salinity distribution in Belgium waters. *Journal of Sea Research*, (52): 149-163.
- Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P., 1999. COHERENS User Documentation. MUMM Report Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea. pp:III-4
- MacLennan, K., 2007. Investigating the Potential for Tidal Energy Development in Dumfries and Galloway. First Edition, University of Strathclyde, Department of Mechanical Engineering. pp. 11-21.
- Marinov, D., Zaldívar, J.M., Norro, A., Giordani, G., Viaroli, P., 2006. Application of COHERENS model for hydrodynamic investigation of Sacca di Goro coastal lagoon, *Journal of Ecological Modelling*, 193(1-2): 52-68.
- Rourke, F., Boyle, F., Reynolds, A., 2010. Tidal current energy resource assessment in Ireland: Current status and future update, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9): 3206-3212.
- Ruddick K.G., 1995. Modeling of coastal processes influenced by the freshwater discharge of the Rhine. Ph.D. Thesis, University of de Liège, Belgium, pp.247 .
- Sadrinasab, M. and Kämpf, J. 2004. Three-dimensional flushing times in the Persian Gulf, *Journal of Geophysical Research Letters*. 30: 12-20.
- Stevens, C.L., Smith, M.J., Grant, B., Stewart, C.L., Divett, T., 2011. Tidal energy resource complexity in a large strait: The Karori Rip, Cook Strait, *Journal of Continental Shelf Research*, 24(8):1754-1768.
- Zabihian, F., Fung, A.S., 2011. Review of marine renewable energies: Case study of Iran, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5): 2461-2474.
- مقادیر حداقل لازم بوده و فاقد توجیه اقتصادی به منظور برداشت انرژی جریان است.
- منابع**
- غفاری، پ. ۱۳۸۸. مطالعه‌ی هیدرودینامیک و رسوب بندر امام خمینی (ره)، مؤسسه ملی اقیانوس شناسی، تهران.
- Ali A., Thiem O., Berntsen J., 2011. Numerical Modelling of Organic Waste Dispersion from Fjord Located Fish Farms. *Journal of Ocean Dynamic*, 61: 977-989
- Beckers J.M., 1991. Application of the GHER 3D general circulation model to the western Mediterranean. *Journal of Marine Systems*, 1: 315-332.
- Breeze, P., 2005. Power Generation Technologies. ELSEVIER. pp. 215.
- Blumberg A.F. and Mellor G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Journal of Coastal and Estuarine Sciences*, Vol. 4, American Geophysical Union, Washington D.C., pp. 1-16.
- Blunden, L.S., Bahaj, A.S., 2006. Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK, *Journal of Renewable Energy*, 31 (2): 121-132.
- Deleersnijder E. and Ruddick K.G., 1992. A generalized vertical coordinate for 3D marine models.
- Deleersnijder E.L., 1989. Upwelling and upsloping in three-dimensional marine models. *Journal of Applied Mathematical Modelling*, (13): 462-467.
- Foreman, M.G.G, 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction, Institute of Ocean Sciences Patricia Bay Victoria, B.C.
- Grabbe M., Lalander E., Lundin S., Leijon M., 2009. A Review of the Tidal Current Energy Resource in Norway. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 1898-1909.