

مدل سازی عددی آنومالی مغناطیسی ناشی از پارامترهای هیدروفیزیکی در خلیج فارس

محمد رضا خلیل آبادی*

دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز

(دریافت: ۹۴/۰۷/۰۱، پذیرش: ۹۵/۰۲/۰۴)

چکیده: در این پژوهش، تغییرپذیری زمانی و مکانی آنومالی مغناطیسی ناشی از پارامترهای هیدروفیزیکی در منطقه خلیج فارس با استفاده از مدل عددی MITgcm شبیه سازی شده است. در این مدل سازی، گسسته سازی معادلات به روش حجم محدود انجام شده است. نتایج شبیه سازی، تغییرپذیری فصلی و مکانی آنومالی مغناطیسی را در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد. به طوری که در فصول زمستان و بهار، آنومالی میدان مغناطیسی در جنوب خلیج فارس مشاهده می شود که بیشینه شدت آن در نواحی جنوبی به طور پراکنده از ۳۰ nT در زمستان به کمتر از ۲۰ nT در فصل بهار می رسد. در فصل تابستان، دو نوار آنومالی مغناطیسی در آبهای نواحی شمالی و جنوبی خلیج فارس شکل می گیرد که در فصل پاییز این دو نوار به ناحیه ی مرکزی خلیج فارس جابجا شده و ترکیب می شوند و با هم یک نوار آنومالی مغناطیسی پهن را در مرکز خلیج فارس تشکیل می دهند.

کلید واژه ها: آنومالی مغناطیسی، معادلات الکترو-مگنتواستاتیک، جریان دریایی، خلیج فارس.

$$\nabla \cdot (K_{eff} \nabla \psi) = G(x)$$

(۱)

۱- مقدمه

که در این رابطه، ψ جهش قائم^۲ در پتانسیل میدان مغناطیسی^۳ و $K_{eff}(x)$ ضریب پخش مغناطیسی موثر^۴ است. همان طور که گفته شد؛ ψ جهش قائم در پتانسیل میدان مغناطیسی در عرض پوسته کروی^۵ است و دو لایه رسانای اقیانوس و رسوبات بستر را در برمی گیرد. این تابع به طور خطی متناسب با تابع جریان برای (مولفه افقی) جریان الکتریکی است که در راستای قائم انتگرال گیری شده باشد [۹-۱۰].

$K_{eff}(x)$ پخش مغناطیسی موثر^۶ است که معرف ترکیب لایه های اقیانوسی و رسوبات بستر است: $K_{eff} = [\mu(\sum_{OC} + \sum_{S})^{-1} F_z S]$ و $G = -\nabla \cdot [(\sum_{OC} + \sum_{S})^{-1} F_z S]$ تابع نیروی اعمالی توسط اقیانوس^۷ است. در اینجا μ تراوایی (نفوذپذیری) مغناطیسی^۸ است و سایر پارامترها در معادله (۱) معرفی شده است.

از کارهایی که تاکنون انجام شده است [۱۰-۱۱]، استنتاج می شود که در مورد میدان ناشی از اقیانوس، همگرایی حل عددی

هدایت الکترومغناطیسی ناشی از شارش آب دریا درون میدان مغناطیسی زمین، سالهاست که از موضوعات مورد توجه محققین ژئوفیزیک دریا بوده است [۵-۱۱]. اخیراً با پیشرفت تکنولوژی و به کارگیری مغناطیس سنج های هوایی که قابلیت پیمایش و اندازه گیری حوزه وسیعی از دریاها و اقیانوس ها را دارند امکان اندازه گیری سریع میدان ژئومغناطیسی دریا فراهم شده است [۷-۸]. اما انجام چنین تحقیقاتی نیازمند صرف هزینه نسبتاً زیادی است که تامین آن برای کل حوزه آبی کشور نیز به سختی میسر است. لذا در خلا این اندازه گیری ها محققین حوزه ژئوفیزیک دریا می توانند از مدل سازی عددی بهره ببرند، هرچند در صورت فراهم شدن اندازه گیری های میدانی نیز خروجی مدل های عددی به عنوان یک ابزار کمکی و کم هزینه در کنار داده های میدانی به ارتقای دانش کاربران در این زمینه کمک خواهد نمود. در جدیدترین فرمول بندی که برای محاسبه سیگنال مغناطیسی ناشی از اقیانوس^۱ استفاده شده است [۹-۱۰]؛ تقریب پوسته نازک معادلات الکترو-مگنتواستاتیک به کار برده شده و مسأله به یک معادله سیگنال برای تغییرات میدان در صفحه X تقلیل داده شده است.

2. vertical jump
3. magnetic field potential
4. effective magnetic diffusivity
5. spherical shell
6. effective magnetic diffusivity
7. ocean-induced "forcing function"
8. magnetic permeability

*نویسنده پاسخگو: rezakhalilabadi@gmail.com

1. ocean induced signal

کنترل می‌شود، که مقادیر محلی و متغیر با زمان بر مبنای دما و شوری آب محاسبه شده‌اند. این کمیت‌ها مانند میدان متغیر با زمان سرعت افقی توسط مدل عددی MIT محاسبه شده‌اند.

۲-۲- شرایط مرزی

فرض کنید در غیاب جریان الکتریکی jz در عرض مرزهای بالایی و پایینی پوسته کروی مبتنی بر قانون آمپر $\mu \cdot \nabla \times B = jz$ ، شرط (کرل صفر) در $z = 0$ و $z = (H + h)$ اعمال می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (b_{\varphi} \sin \theta) - \frac{\partial b_{\theta}}{\partial \varphi} = 0 \quad (۶)$$

این شرط برای تقلیل معادله‌های (۵-۲) به یک معادله سیگنال برای پتانسیل میدان الکتریکی استفاده می‌شود. شرط مرزی دیگر، الزام پیوستگی E_{\perp} و B_{\perp} در عرض بستر اقیانوس $(z=H)$ و اعمال جهش قائم $\delta_z b_{\perp} = b_{\perp}(z=0) - b_{\perp}(z=H)$ مولفه افقی در عرض پوسته کروی با استفاده از رابطه معروف بین مولفه‌های قائم میدان در مرزهای بالا و پایین دو لایه است: $b_{\perp}(z=0) = b_{\perp}(z=H-h)$. پتانسیل میدان مغناطیسی χ (در $z \geq 0$ و $z \leq -H-h$) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\left. \frac{\partial \chi}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial \chi}{\partial z} \right|_{z=-H-h} \quad (۷)$$

اگر تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از محیط اقیانوسی فقط در مقیاسهای مکانی کوچک (در مقایسه با شعاع زمین) رخ دهد، شرط (۸) منجر به یک تقریب خیلی مناسب مرتبط با مولفه‌های افقی میدان در هر دو طرف پوسته خواهد شد:

$$b_{\perp}(z=0) \approx -b_{\perp}(z=-H-h) \quad (۸)$$

این تقریب برای تخمین خامی مبتنی بر اندازه‌گیری پارامترهای اقیانوسی استفاده خواهد شد.

برای هدف ما، مقادیر B_{\perp} فقط در سطح دریا مورد نیاز هستند. معادلات (۶-۴) منجر به معادله زیر خواهد شد:

$$\delta_z b_{\perp} = \mu \sum_{OC} (1 + \lambda) E_{\perp} \times n - \mu F_z S \quad (۹)$$

که n یک بردار واحد شعاعی است. در یک شکل مولفه‌ای، رابطه به شکل $\delta_z b_{\varphi, \theta} = (\pm) \mu \sum_{OC} (1 + \lambda) E_{\varphi, \theta} - \mu F_z S_{\varphi, \theta}$ است. بنابراین میدان سطحی برابر مجموع ترم میدان الکتریکی و یک ترم القای^۸ محلی است. علایم دیگر عبارتند از:

$$\begin{aligned} \sum_S &= \int_{-H-h}^{-H} \sigma_s dz \\ \sum_{OC} &= \int_{-H}^0 \sigma_s dz \end{aligned} \quad (۱۰)$$

$$S = \int_{-H}^0 u \sigma_{OC} dz$$

معادله (۱) برای مقادیر بزرگ K_{eff} و سلول‌های شبکه کوچک به سختی به دست می‌آید. یک همگرایی ناقص ممکن است منجر به خطای زیادی در تخمین اندازه میدان مغناطیسی شود [۱۲].

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- فرمول بندی مساله

در این بخش مراحل فرمول بندی متوالی با هدف جایگزین کردن معادله (۱) با یک معادله مفید و محاسباتی بیان می‌شود. هر دو فرمول بندی مبتنی بر تقریب لایه نازک^۱ معادلات ماکسول^۲ هستند.

از آنجایی که ما علاقمند به بررسی تأثیرات حرکت‌های شبه-ژئوستروفیک^۳ (آرام) و بزرگ مقیاس هستیم، معادلات الکتروستاتیک^۴ و مگنتواستاتیک^۵ برای یک محیط در حال حرکت درون یک پوسته دولایه کروی نازک به معادلات شناخته شده زیر برای مولفه‌های افقی E_{\perp} و B_{\perp} میدان‌های الکتریکی E و مغناطیسی B تقلیل می‌یابند.

$$\frac{\partial E_{\varphi}}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial E_{\theta}}{\partial z} = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (E_{\varphi} \sin \theta) - \frac{\partial E_{\theta}}{\partial \varphi} = 0 \quad (۳)$$

$$K_{OC} \frac{\partial b_{\theta}}{\partial z} + v F_z = -E_{\varphi} \quad (۴)$$

$$K_{OC} \frac{\partial b_{\varphi}}{\partial z} + v F_z = E_{\theta} \quad (۵)$$

که در آن، اندیس‌های φ و θ به ترتیب برچسب‌های مولفه‌های مداری و نصف‌النه‌اری هستند. مختصات نصف‌النه‌اری θ معرف نقاط هم‌عرض^۶ است (از صفر تا π تغییر می‌کند و از قطب شمال شروع می‌شود). میدان مغناطیسی کل $B = F + b$ شامل یک مولفه خیلی بزرگ و سه‌بعدی ناشی از میدان اصلی زمین F می‌شود که فقط مولفه شعاعی F_z در عرض‌های میانی و عرض‌های بالا دارای اهمیت است. b نیز معرف آنومالی مغناطیسی است. توزیع مکانی این مولفه بر مبنای مدل CHAMP CO2 [۱۳] و به شکل میانگین ۳ ساله برای دوره زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۱ استخراج شده است. ضریب پخش مغناطیسی^۷ $k_{OC} = (\mu \sigma_{OC})^{-1}$ تابعی از هر سه مختصات است، اگرچه مقیاس افقی تغییرات آن در مقایسه با مقیاس قائم خیلی بزرگ است. این ضریب به‌وسیله هدایت الکتریکی آب دریا σ_{OC}

1. thin-shell approximation
2. Maxwell
3. Quasi geostrophic
4. Electro-static
5. Magneto-static
6. co-latitude
7. magnetic diffusivity coefficient

شرایط غیرلغزشی^۴ اعمال شده است. طرحواره فرارفتی انتخاب شده، یک طرحواره محدود شار مرتبه سوم زمانی- مکانی است که بدون قید و شرط پایدار است [۱۹].

شرایط اولیه دما و شوری از مجموعه داده‌های WOA^۵ استخراج شده است. این داده‌ها پس از درون‌یابی و انطباق با سلول‌های شبکه محاسباتی انتخاب‌شده برای مدل، به فرمت باینری درآمده و وارد مدل شده است. مقادیر اولیه مولفه‌های جریان برابر صفر در نظر گرفته شد.

حوزه دارای یک مرز باز سطحی و دو مرز باز جانبی است. در مرز باز سطحی داده‌های میانگین ماهانه دمای سطح دریا (SST)^۶ و شوری سطح دریا (SSS)^۷ از مجموعه داده‌های WOA^۸ استخراج شده است [۲۰]. این داده‌ها پس از درون‌یابی و انطباق با سلول‌های شبکه محاسباتی انتخاب شده برای مدل، به فرمت باینری درآمده و وارد مدل شده است. داده‌های باد و مولفه‌های بودجه گرمایی نیز از سایت نوآ [۲۱]، استخراج شده و پس از درون‌یابی و انطباق با سلول‌های شبکه محاسباتی سطحی انتخاب شده برای مدل، به فرمت باینری درآمده و وارد مدل شده است.

تبادل متوسط در مرز شرقی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دما، شوری و جریان در تنگه هرمز به صورت از پیش تعیین شده در شرط مرزی شرقی مدل وارد شده است تا مدل اطلاعات مرز باز شرقی را از این داده‌ها بخواند. این داده‌ها که شامل داده‌های دما، شوری و جریان است برای یک دوره یک ساله، با گام زمانی نیم ساعت و با تفکیک مکانی قائم ۱۰ متر در نقطه‌ای به مختصات حدود ۵۶ درجه شرقی و ۲۶ درجه شمالی برداشت شده است [۲۲].

۳- بررسی نتایج

در این بخش، خروجی آنومالی مغناطیسی خلیج فارس (پارامتر b_1 از رابطه (۱۱) برای چهار فصل سال رسم شده است. شکل (۱)، آنومالی میدان مغناطیسی را در فصل بهار نشان می‌دهد. در این فصل، میزان آنومالی مغناطیسی به جز در بخش‌هایی از جنوب خلیج فارس ناچیز است.

شکل (۲)، آنومالی مغناطیسی را در فصل تابستان نشان می‌دهد. در جنوب خلیج فارس نسبت به فصل بهار از شدت آنومالی مغناطیسی کاهش یافته است اما در حاشیه مرز شمالی یک نوار آنومالی مغناطیسی شکل گرفته است که در فصل بهار

که در آن، S شار هدایت الکتریکی^۱، و $\lambda = \Sigma_s / \Sigma_{oc}$ مشخصه تراوش^۲ انرژی الکتریکی از اقیانوس به لایه رسوب است. مقدار شاخصه آن کوچک است: $\lambda = 0.1$ و مقدار واقعی آن تاثیر اندکی بر نتایج نهایی دارد [۱۴].

۲-۳- تخمین میدان مغناطیسی مبتنی بر اندازه‌گیری محلی^۳ پروفایل‌های پارامترهای هیدروفیزیکی

همان‌طور که از مطالعات قبلی استنتاج شد دو جمله معادله (۹) دارای اندازه‌های قابل مقایسه هستند، اگرچه جمله دوم نوعاً^۹ حدود دو برابر جمله اول است. این حقیقت به همراه معادله (۸) امکان تخمین مقدار مشخصه میدان افقی را در سطح دریا به شکل زیر فراهم می‌سازد:

$$b_{\perp}(z=0) \approx \mu F_z S \quad (11)$$

که S شار هدایت الکتریکی و F_z مولفه شعاعی میدان مغناطیسی است. برای محاسبه $\sigma_{oc}(z)$ و S پروفایل‌های قائم سرعت‌های جریان اقیانوسی مشاهده شده و داده‌های محیطی دما و شوری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۴- مدل عددی

در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی عددی آنومالی مغناطیسی از مدل عددی MITgcm استفاده شده است. این مدل، یک مدل عددی مختصات Z است که قابلیت مدل‌سازی مشخصه‌های فیزیکی آب دریا را در هر دو حالت آب عمیق و کم عمق دارد. این مدل، معادلات ناویر- استوکس را تحت تقریب بوسینسک برای یک سیال تراکم‌ناپذیر با یک گسسته‌سازی حجم محدود مکانی روی یک گرید محاسباتی مکعبی حل می‌کند [۱۷-۱۵]. این مدل قبلاً در مدل‌سازی آب‌های خلیج عمان و تنگه هرمز به‌کار رفته و اعتبارسنجی شده است [۱۸]. حوزه مورد نظر به وسیله یک گرید چهارگوشه مشتمل بر 20^*450^*450 سلول گسسته‌سازی شده است. تفکیک مکانی در امتداد محورهای x و y ، دو کیلومتر است. تفکیک مکانی در امتداد محور قائم نیز متغیر است.

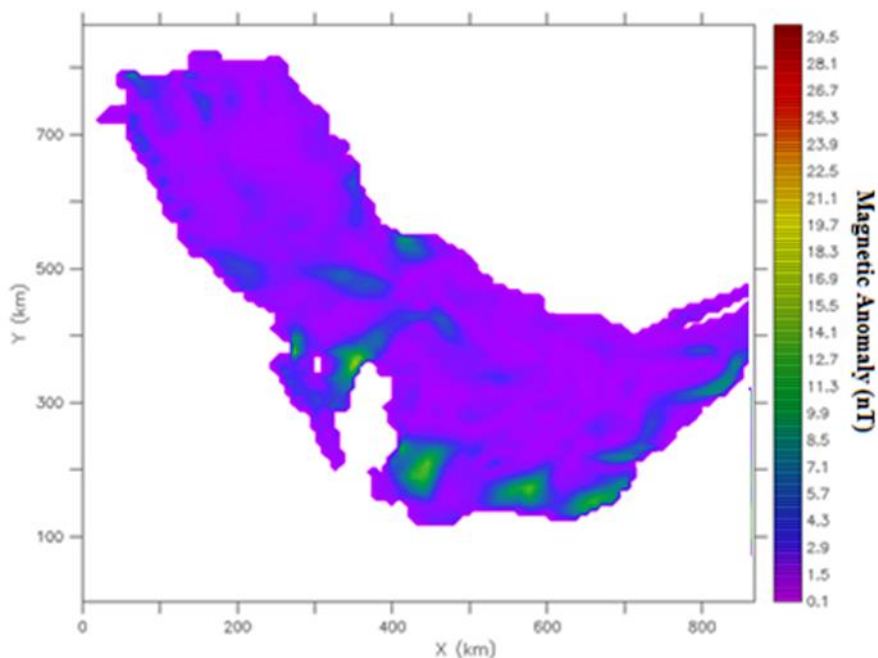
برای این‌که معادلات در ناحیه پیکنوکلاين با دقت کافی حل شوند، مدل در راستای محور Z به ۲۰ لایه تقسیم می‌شود که ضخامت این لایه‌ها در نزدیک سطح کم است و در اعماق افزایش می‌یابد. توپوگرافی مدل از داده‌های توپوگرافی سازمان نقشه برداری ایران به‌دست آمده است. در بستر و مرزهای جانبی نیز

4. No-slip
5. World Ocean Atlas
6. Sea Surface Temperature
7. World Ocean Atlas
8. World Ocean Atlas

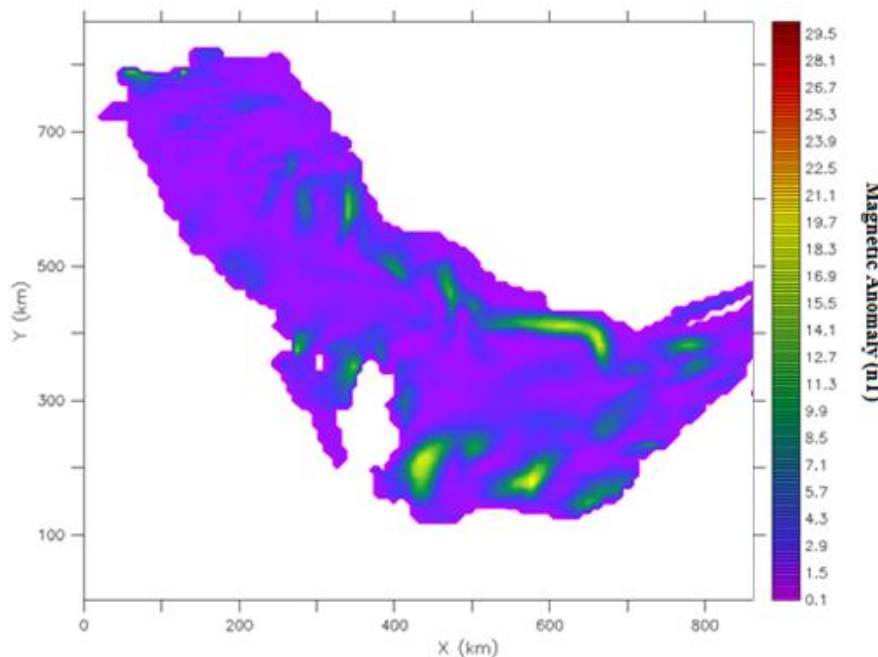
1. electric conductivity flux
2. leakage
3. in Situ Measurements

ورودی ابروندرد است و چون شدت آن نسبت به فصل بهار افزایش یافته است در این شکل وضوح یافته است.

وجود نداشت. یک ناحیه آنومالی مغناطیسی خیلی کوچک در گوشه شمال غرب خلیج فارس مشاهده می شود که مربوط به



شکل (۱): آنومالی مغناطیسی خلیج فارس در فصل بهار



شکل (۲): آنومالی مغناطیسی خلیج فارس در فصل تابستان

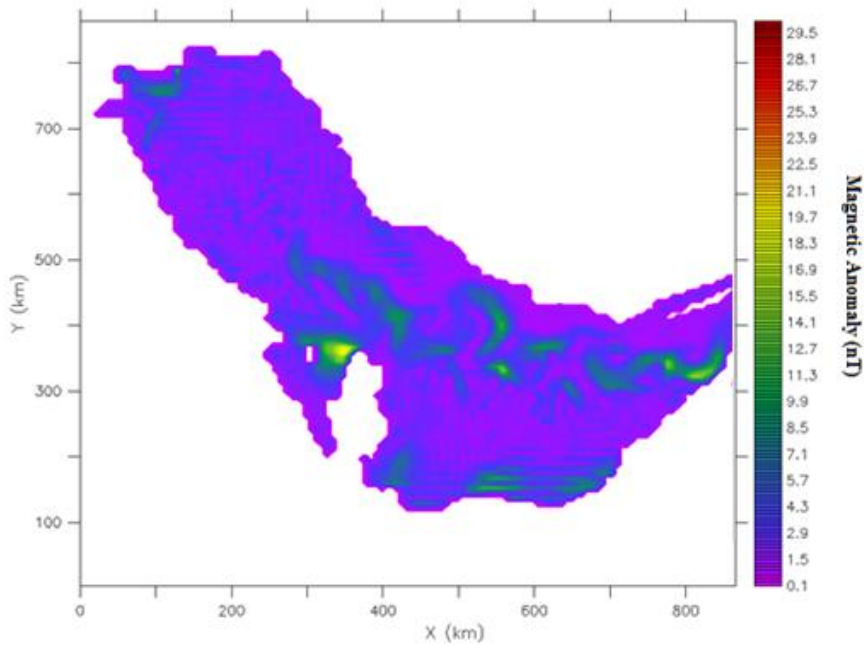
مشاهده می شود که مربوط به ورودی ابروندرد است اما شدت آن نسبت به فصل تابستان کاهش یافته است.

شکل (۴)، آنومالی مغناطیسی را در فصل زمستان نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود در خلیج فارس، بیشترین آنومالی میدان مغناطیسی در جنوب قابل مشاهده است.

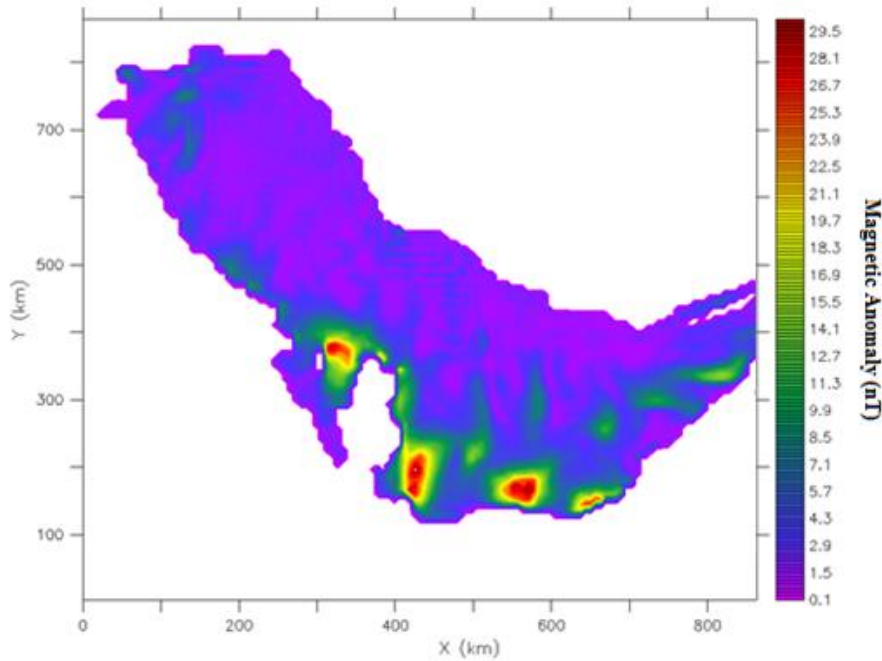
شکل (۳)، آنومالی مغناطیسی را در فصل پاییز نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود در خلیج فارس نواحی آنومالی مغناطیسی از حاشیه های شمالی و جنوبی (که در فصل های بهار و تابستان مشاهده شد)، با شدتی ضعیف تر به ناحیه مرکزی انتقال یافته است. همچنین در این شکل نیز، یک ناحیه آنومالی مغناطیسی در گوشه شمال غرب خلیج فارس

آنومالی مغناطیسی در گوشه شمال غرب خلیج فارس مشاهده می‌شود که مربوط به ورودی اروندرود است. هرچند شدت آنومالی این ناحیه در فصل زمستان نسبت به فصل تابستان کمتر است اما گستردگی آن نسبت به سایر فصول سال بیشتر است.

حتی مقدار این آنومالی در چند ناحیه مجزا در حاشیه سواحل جنوبی خلیج فارس به حدود ۳۰ nT نیز می‌رسد. اما برخلاف فصل‌های تابستان و پاییز، در نواحی شمالی و مرکزی تقریباً آنومالی مغناطیسی قابل توجهی قابل مشاهده نمی‌باشد. در این شکل نیز مانند فصل‌های تابستان و پاییز، یک ناحیه



شکل (۳): آنومالی مغناطیسی خلیج فارس در فصل پاییز



شکل (۴): آنومالی مغناطیسی خلیج فارس در فصل زمستان

۴- نتیجه گیری

در خلیج فارس، آنومالی میدان مغناطیسی هم دارای تغییرپذیری زمانی و هم دارای تغییرپذیری مکانی است. به طوری که در فصول زمستان و بهار، آنومالی میدان مغناطیسی در جنوب خلیج فارس مشاهده می شود که بیشینه شدت آن در نواحی جنوبی به طور پراکنده از ۳۰ nT در زمستان به کمتر از ۲۰ nT در فصل بهار می رسد. در فصل تابستان، دو نوار آنومالی مغناطیسی در آب های نواحی شمالی و جنوبی خلیج فارس شکل می گیرد که در فصل پاییز این دو نوار به ناحیه مرکزی خلیج فارس جابجا شده و ترکیب می شوند و با هم یک نوار آنومالی مغناطیسی پهن را در مرکز خلیج فارس تشکیل می دهند.

نکته جالب توجه دیگر این است که در شمال غرب جزیره بحرین در همه فصول یک ناحیه آنومالی مغناطیسی شکل می گیرد که شدت و گستردگی آن در فصول سرد سال بیشتر از فصول گرم سال است به طوری که در فصل زمستان بیشترین گستردگی را با بیشینه شدت نزدیک به ۳۰ nT دارد و در فصل تابستان نیز کمترین گستردگی را با شدت نزدیک به ۱۰ nT داراست. در جنوب شرق این جزیره نیز یک ناحیه آنومالی مغناطیسی در فصول مختلف سال شکل می گیرد با این تفاوت که تغییرپذیری زمانی آن با ناحیه آنومالی مغناطیسی شمال غرب جزیره کمی متفاوت است. در این ناحیه، گستردگی و بیشینه شدت آنومالی مغناطیسی ابتدا در زمستان (با بیشینه شدت حدود ۳۰ nT) و سپس در تابستان (با بیشینه شدت کمتر از ۲۰ nT) رخ داده است. در این ناحیه، گستردگی و شدت آنومالی مغناطیسی در بهار کمتر از تابستان است و در پاییز (با بیشینه شدت حدود ۵ nT) به حداقل می رسد.

دلیل ایجاد آنومالی مغناطیسی در حاشیه جنوبی خلیج فارس، شوری بالای آب در این قسمت است زیرا در این ناحیه نسبت به ناحیه شمالی آب شورتر است (زیرا جابجایی آب ناحیه جنوبی با آب ورودی تنگه هرمز به کندی انجام می شود و تبخیر نیز بیشتر است) و شوری بالا نیز خود عامل ایجاد آنومالی مغناطیسی است.

در ناحیه شمال غرب خلیج فارس و در دهانه خروجی اروندرود نیز یک ناحیه آنومالی مغناطیسی باریک تقریباً در تمام فصول دیده می شود که تأثیر رودخانه اروندرود را بر میدان مغناطیسی خلیج فارس نشان می دهد. شدت آنومالی مغناطیسی این ناحیه در فصل بهار به حداقل می رسد. علت آنومالی اروندرود، ورود آب اروندرود به داخل خلیج فارس است و این آنومالی به دلیل جریان ورودی اروندرود است زیرا جریانات نیز باعث القای میدان مغناطیسی می شوند.

۵- مراجع

- [1] A. D. Chave and D. S. Luther, "Low-frequency, motionally induced electromagnetic fields in the ocean," *J. Geophys. Res.*, vol. 95, pp. 7185-7200, 1990.
- [2] R. H. Tyler, L. A. Mysak and J. M. Oberhuber, "Electromagnetic fields generated by a three-dimensional global ocean circulation," *Geophysic Research*, vol. 102, pp. 5531-5551, 1997.
- [3] A. H. Flosadottir, J. C. Larsen and J. T. Smith, "Motional induction in North Atlantic circulation models," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, no. 10, pp. 353-372, 1997a.
- [4] A. H. Flosadottir, J. C. Larsen and J. T. Smith, "The relation of seafloor voltages to ocean transports in North Atlantic circulation models: Model results and practical considerations for transport monitoring," *Phys. Oceanogr.*, vol. 27, pp. 1547-1565, 1997b.
- [5] T. B. Sanford, "Motionally-induced electric and magnetic fields in the sea," *J. Geophys. Res.*, vol. 76, pp. 3476-3492, 1971.
- [6] F. Vivier, E. Maier-Reimer and R. H. Tyler, "Simulations of magnetic fields generated by the Antarctic Circumpolar Current at satellite altitude: Can geomagnetic measurements be used to monitor the flow?," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, 2004.
- [7] S. Maus and A. Kuvshinov, "Ocean tidal signals in observatory and satellite magnetic measurements," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, 2004.
- [8] R. H. Tyler, S. Maus and H. Lu^{hr}, "Satellite observations of magnetic fields due to ocean tidal flow," *Science*, vol. 299, pp. 239-240, 2003.
- [9] J. Larsen, "Transport and heat flux of the Florida Current at 27N derived from cross-stream voltages and profiling data: Theory and observation," *Philos. Trans. R. Soc.*, London, 1992.
- [10] D. Stephenson and K. Bryan, "Large-scale electric and magnetic fields generated by the oceans," *J. Geophys. Res.*, vol. 97, no. 15, pp. 467-480, 1992.
- [11] R. D. Richtmyer and k. w. Morton, *A Difference Methods for Initial Value Problems*, Hoboken: Wiley-Intersci., 1967, p. 405.
- [12] R. E. Glazman, "Variability of the ocean-induced magnetic field predicted at sea surface and a t satellite altitudes," *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, vol. 110, pp. 1-13, 2005.
- [13] R. N. Holme, O. M. Rother and H. Lu^{hr}, "CO2: A CHAMP magnetic field model," in *First CHAMP Science Meeting*, New York, 2003.
- [14] F. E. Lillley, J. H. Filloux, P. J. Mulhearn and J. Ferguson, "Magnetic signals from an ocean eddy," *J. Geomagn. Geoelectr.*, vol. 45, pp. 403-422, 1993.
- [15] S. Jan, R. Lien and C. Ting, "Numerical study of baroclinic tides in Luzon Strait," *J. Oceanogr.*, vol. 64, pp. 789-802, 2008.
- [16] J. Marshall, A. Adcroft, C. Hill and L. Perelman, "A finite-volume, incompressible Navier-Stokes model for studies of the ocean on parallel computers," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 5733-5766, 1997.
- [17] j. Marshall, C. Hill and A. Adcroft, "Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 5733-5752, 1997.
- [18] M. R. Khalilabadi, M. Sadrinasab, V. Chegini and M. Akbarinasab, "3D modeling of nonlinear internal waves in the continental shelf zone of the Gulf of Oman", *Persian Gulf Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 19-28, 2015. [in Persian].

- [19] W. Hundsdorfer and R. A. Trompert, "Method of lines and direct discretization: a comparison for linear advection," *Applied Numerical Mathematics*, vol. 13, no. 6, p. 469–490, 1994.
- [20] WOA, "World Ocean Database individual observed level quality codes," 2013. [Online]. Available: ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD13/DOC/wod013_tutorial.pdf. [Accessed 2014].
- [21] "<http://www.oscar.noaa.gov>," 2013. [Online]. [Accessed 1 Jan 2014].
- [22] W. Johns and R. Zantopp, "Data report for the Strait of Hormuz Experiment, December 1996–March 1998. RSMAS," University of Miami, Miami, 1999.

Numerical Modeling of Hydro-Physical Parameters Induced Magnetic Anomaly in the Persian Gulf

M. R. Khalil Abadi*

Malek Ashtar University of Technology Shiraz

(Received: 23/09/2015, Accepted: 23/04/2016)

Abstract

In this research, temporal and spatial variability of the magnetic anomaly induced by hydro-physical parameters have been simulated using MIT-gcm numerical model. In this modeling, the discretization of equations has been done using finite volume method. The results specify the space and seasonal variability of magnetic anomaly in the study region. In winter and spring, a magnetic anomaly can be observed in the south of Persian Gulf, which its maximum intensity reaches from 30nT in winter to 20nT in spring. In summer, two magnetic anomaly bands form in the north and south of the Persian Gulf. In autumn, these two narrow bands shift to the Centre of the Persian Gulf and combine together then produce an extended band of anomaly of magnetic field in the center of the Persian Gulf.

Keywords: Magnetic anomaly, marine currents, Persian Gulf, electro-magneto static equations

* Corresponding author E-mail: rezakhalilabadi@gmail.com