



## کاربرد آمار مکانی در پهنه‌بندی و تحلیل فضایی سرعت صوت در خلیج فارس

مهیار مجیدی نیک<sup>۱\*</sup>، حامد دلدار<sup>۲</sup>

۱. کارشناس ارشد فیزیک دریا، مرکز مطالعات محیطی ندسا

۲. دانشجوی دکتری فیزیک دریا، مرکز مطالعات محیطی ندسا

### مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۳ شهریور ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۱ اسفند ۱۳۹۳

دسترسی اینترنتی: ۲۳ شهریور ۱۳۹۴

واژه‌های کلیدی:

سرعت صوت

پیش‌بینی فضایی

تحلیل فضایی

کریجینگ

کوکریجینگ

عکس فاصله موزون

خلیج فارس

### چکیده

هدف از این تحقیق، یافتن توزیع سرعت صوت تحت تاثیر پارامترهای فیزیکی آب، کاربرد روش‌های نوین زمین‌آمار برای پیش‌بینی فضایی در اقیانوس‌شناسی، پیش‌بینی میزان پارامترهای فوق برای کل منطقه خلیج فارس و پهنه‌بندی سرعت صوت، بوده است. در این تحقیق، سرعت صوت با استفاده از فرمول چن-میلرو و داده‌های فشار، شوری و دما محاسبه گردید. داده‌های مورد استفاده با مش‌بندی منظم و فواصل ۰/۲۵ درجه از اطلس اقیانوسی جهانی ۲۰۱۳ استخراج شد. جهت پهنه‌بندی سرعت صوت در لایه‌های مختلف خلیج فارس سه روش کریجینگ، کوکریجینگ و عکس فاصله موزون با یکدیگر مقایسه و در نهایت با بهترین روش به پیش‌بینی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سرعت صوت پرداخته شد. نتایج حاکی از کمتر بودن خطاهای برآورد ریشه دوم میانگین مربع خطا و میانگین خطای مطلق در روش کوکریجینگ نسبت به دیگر روش‌ها است. آزمون همبستگی پیرسون بین سرعت صوت و متغیرهای مستقل اجرا و بیشترین همبستگی مشاهده شده بین دما و سرعت صوت است. به همین جهت پارامتر دما به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ برای پهنه‌بندی سرعت صوت در نظر گرفته شد. نتایج اعتبارسنجی متقابل نشان‌دهنده پیش‌بینی بهتر مدل در فصل سرد در مقایسه با فصل گرم منطقه می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی نشان داده است که با حرکت از سمت تنگه هرمز به سمت شمال غرب خلیج، سرعت صوت در تمامی لایه‌ها در حدود ۲۰ m/s کاهش یافته است. همچنین همواره بیشترین مقادیر سرعت صوت در مناطق کم عمق جنوبی و بعلا افزایش شوری اتفاق افتاده است. در تمامی ایستگاه‌های بررسی شده سرعت صوت با افزایش عمق به علت کاهش دما، کاهش می‌یابد و کانال صوتی مشاهده نمی‌شود.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: [m.majidynik@yahoo.com](mailto:m.majidynik@yahoo.com)

## مقدمه

از جمله عوامل مؤثر در فعالیت‌های دریایی از قبیل فعالیت‌های نظامی، تجاری، طراحی و احداث بنادر و انجام دیگر فعالیت‌های مهندسی منوط بر شناخت هرچه بهتر خصوصیات فیزیکوشیمیایی توده‌های آبی است. مشخصات فیزیکوشیمیایی دریاها و اقیانوس‌ها به علت پویایی این مناطق به شدت با زمان و مکان در تغییر بوده و شناخت مناسب از مشخصات یک منطقه مستلزم اندازه‌گیری‌های متعددی از منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از طرفی با توجه به وسعت آب‌های آزاد و برخی از محدودیت‌های مالی، زمانی و مکانی نمی‌توان در تمامی زمان‌ها و مکان‌ها با اندازه‌گیری‌های میدانی به شناخت پارامترهای توده‌های آبی پرداخت. از این رو نیاز به استفاده از تکنیک‌ها در جهت پیشبرد این مهم نمایان می‌شود. یکی از راه‌های مؤثر و قابل اطمینان در این زمینه استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده محدود در روش‌های آماری و مدل‌های عددی می‌باشد. بدین منظور بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل‌های فضایی داده‌های دریایی امری غیر قابل کتمان است. در واقع تجزیه و تحلیل فضایی داده‌ها، مطالعه کمی پدیده‌ها و فرآیندهایی است که در فضای چندبعدی به وقوع می‌پیوندد. روش‌های تجزیه و تحلیل مکانی در قلمروی آمار مکانی واقع می‌گردند. دو برداشت کلی از مفهوم مکان وجود دارد: اول آن که فضا یا مکان را می‌توان عرصه‌ای پنداشت که در برگیرنده مجموعه‌ای از موجودیت‌ها و اجزای جدا از هم است. دوم آن که فضا را می‌توان عرصه‌ای پیوسته و متشکل از موجودیت‌های مختلف در نظر گرفت. دیدگاه دوم را نگاهی میدانی می‌نامند. در دیدگاه میدانی، تأکید بر پیوستگی پدیده و فرآیندهای در دست مطالعه است، گرچه در عمل با مجموعه‌ای از نقاط نمونه‌برداری گسسته و جدا از هم روبرو هستیم. لیکن از طریق مدل‌سازی الگوی تغییرپذیری پیوسته پدیده مورد نظر، اقدام به تخمین مکانی در محل‌ها و نقاطی که مشاهده‌ای صورت نگرفته است، می‌گردد (۳). هر متغیری که در فضای سه بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شود و می‌تواند در مطالعات

زمین‌آماری مورد بحث و بررسی قرار گیرد. بنابراین در زمین‌آمار ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد.

روش‌های زمین‌آمار به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند (۴ و ۶). روش‌های مورد استفاده در آمار مکانی به دلیل استفاده از همبستگی فضایی و مکانی موجود در بین داده‌ها که معمولاً توسط تغییرنگار مدل‌بندی می‌شوند از دقت بالایی نسبت به سایر روش‌ها به ویژه روش چندضلعی‌های نایسن برخوردارند (۸ و ۱۹). نخستین تجربه‌ها جهت بکارگیری روش‌های زمین‌آمار به مفهوم امروزی آن در محاسبات تخمین ذخیره معدن در سال ۱۹۱۹ صورت گرفت، سپس در چند دهه بعد، کریج و ماترون با انتشار مقالاتی پایه‌های زمین‌آمار نوین را بنا نهادند (۱۰ و ۱۲). به منظور مطالعه داده‌هایی که دارای روند هستند، معمولاً از روش کریجینگ استفاده می‌شود که به دلیل محاسبه واریانس پیش‌بینی در هر نقطه، یکی از روش‌های منحصر به فرد است. وقتی متغیرهای کمکی دیگری غیر از متغیر اصلی و موقعیت مشاهدات در اختیار باشد، به نظر می‌رسد استفاده از آن‌ها در فرآیند پیشگویی، افزایش دقت پیشگوها را به دنبال داشته باشد (۲).

کاربرد روش‌های زمین‌آمار در مطالعات معادن شروع گردید و سپس در علوم دیگر توسعه یافت. اولیور، مک برانتی و دوستر از پیشگامان استفاده از روش‌های زمین‌آمار محسوب می‌شوند (۱). زمین‌آمار روشی برای مشخص کردن تغییرات منظم در اجزای مواد طبیعی نظیر توده‌های آبی است (۲۱). در سال‌های اخیر زمین‌آمار با طرح وابستگی مکانی ویژگی‌های توده‌های آبی مطالعه شده است (۵ و ۹). کمیجانی و چگینی (۲) با استفاده از اندازه‌گیری‌های CTD و روش‌های زمین‌آمار به پیش‌بینی میزان پارامترهای دما، شوری و چگالی در خلیج چابهار پرداخته است. ایشان با توجه به نتایج پهنه‌بندی فضایی ارائه کردند که با دقت بالایی می‌توان گفت که در فصل‌های مونسون زمستانه سال ۱۳۸۵-۱۳۸۶ به طور میانگین چگالی آب

نقشه‌های پهنه‌بندی سرعت صوت در خلیج فارس است. برای حصول به نقشه‌هایی با کمترین خطای برآورد و بهترین پیش‌بینی‌ها در نقاط فاقد اندازه‌گیری، در این تحقیق از سه روش کریجینگ، کوکریجینگ و عکس فاصله موزون استفاده شده است.

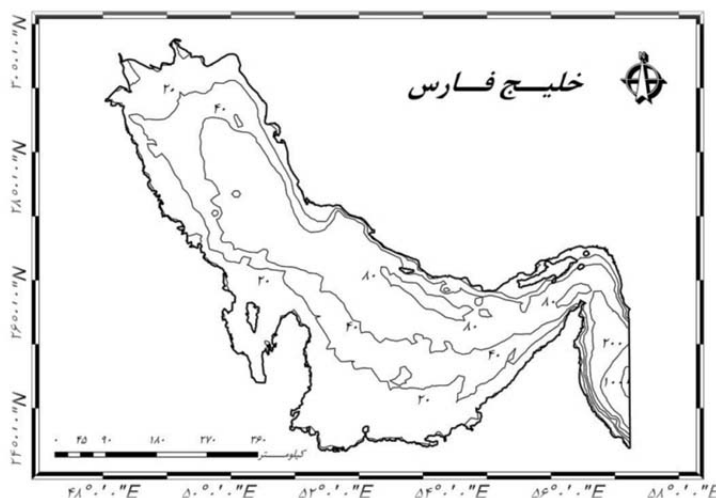
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس پس از خلیج مکزیک و خلیج هادسون سومین خلیج بزرگ جهان به شمار می‌رود. خلیج فارس از شرق به تنگه هرمز و دریای عمان، و از سمت غرب به دلتای رودخانه اروندرود که حاصل از پیوند رودخانه‌های دجله، فرات و کارون است، ختم می‌شود. خلیج فارس توسط تنگه هرمز که دارای عرضی بالغ بر ۵۶ km است، از دریای عمان جدا می‌شود. بیشینه عرض خلیج فارس ۳۳۸ km بوده و طول سواحل شمالی آن بالغ بر ۱۰۰۰ km است. مساحت خلیج فارس تقریباً  $۲/۳۹ \times ۱۰^۵ \text{ km}^۲$ ، عمق میانگین آن ۳۶ m و حجم آن حدود  $۸/۶۳ \times ۱۰^۳ \text{ km}^۳$  است (۱۷). در شکل (۱) موقعیت قرارگیری خلیج فارس به همراه خطوط هم‌عمق نشان داده شده است.

خلیج چابهار با پیشروی به سمت ساحل کاهش می‌یابد. تغییرپذیری مکانی پارامترها در مقیاس‌های بزرگ‌تر به کمک اطلاعاتی از قبیل نقشه‌ها، عوامل متغیر و داده‌های برداشتی اطلاعات مناسبی را فراهم می‌کند (۵). زمین‌آمار قادر به ارائه مجموعه وسیعی از تخمین‌گرها به منظور برآورد ویژگی مورد نظر در مکان‌های نمونه‌برداری نشده با استفاده از اطلاعات حاصل از نقاط نمونه‌برداری شده است (۱۱ و ۱۴). رضوانی (۱۸) برای تخمین انتقال فسفر در سیلاب خروجی از حوزه‌های آبخیز، با استفاده از مقادیر فسفر اندازه‌گیری شده در حوزه، از تخمین‌های زمین‌آماری استفاده کرد. تابیوس و سالا (۲۰) با استفاده از روش کریجینگ توانست توزیع بارش سالانه در شمال ایالت کونینتال آمریکا را برای ۲۹ ایستگاه باران‌سنجی مناسب تشخیص دهد. پریس و همکاران (۱۶) برای میانبایی مکانی دما و بارندگی ماهانه و سالانه در غرب و شرق کانادا دو روش TPSS و GIDS را بررسی کردند. ایشان متوجه شدند که روش TPSS در هر دو ناحیه کمتر از روش GIDS بود. البته هر دو روش در نواحی شرقی که تغییرات توپوگرافی و اقلیمی ملایم‌تری دارند، نتایج بهتری نسبت به نواحی غربی ارائه کرده‌اند.

هدف اصلی تحقیق صورت گرفته، ادغام روش‌های آمار مکانی در علوم اقیانوسی جهت دستیابی هرچه بهتر به

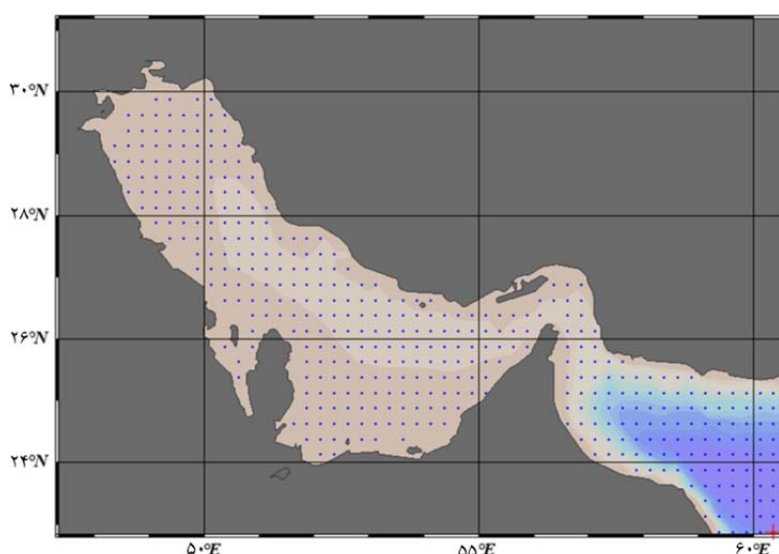


شکل ۱. موقعیت قرارگیری و خطوط هم‌عمق خلیج فارس

## روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، داده‌های اطلس جهانی اقیانوسی سال ۲۰۱۳ مربوط به دو فصل سرد و گرم است. داده‌های مذکور بر روی مش‌بندی منظم با فواصل ۰/۲۵ درجه قرار گرفته‌اند و شامل پارامترهای دما، شوری و فشار می‌باشند. همان طور که پیشتر ذکر شد، این تعداد ایستگاه در مقابل وسعت منطقه برای پیش‌بینی و توصیف پارامترهای فیزیکی

ناچیز است و نیاز به استفاده از آمار مکانی الزامی می‌باشد. سرعت صوت از داده‌های دما، شوری و فشار و کدنویسی روابط چن-میلرو که برای محاسبه سرعت صوت استفاده می‌شوند، محاسبه گردید. در رابطه‌های ۱ تا ۵ استفاده شده به همراه ضرایب هر یک از پارامترها ارائه شده است (۱۳ و ۱۵). شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده را با نقاط توپر درون خلیج فارس مشخص کرده است.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های بررسی شده

$$c(S,T,P) = C_w(T,P) + A(T,P) + B(T,P)S^{3.2} + D(T,P)S^2 \quad [1]$$

$$C_w(T, P) = (C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5) + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P + (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3 \quad [2]$$

$$A(T, P) = (A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4) + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3 \quad [3]$$

بیانگر دما بر حسب  $C$ ،  $S$  بیانگر شوری psu، دیگر پارامترهای

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P \quad [4]$$

$C_w$ ،  $A$ ،  $B$  و  $D$  پارامترهای ثابتی هستند که با استفاده از

$$D(T, P) = D_{00} + D_{10}P \quad [5]$$

مؤلفه‌های جدول قابل دستیابی هستند.

که در این رابطه‌ها؛  $C$  بیانگر سرعت صوت بر حسب  $T$ ،  $m/s$

جدول ۱. ضرایب مورد استفاده برای محاسبه سرعت صوت

ضرایب	مقدار عددی	ضرایب	مقدار عددی
C <sub>۰</sub>	۱۴۰۲/۳۸۸	A <sub>۰۲</sub>	$۷/۱۶۶ \times ۱۰^{-۵}$
C <sub>۱</sub>	۵/۰۳۸۳۰	A <sub>۱۲</sub>	$۲/۰۰۸ \times ۱۰^{-۶}$
C <sub>۲</sub>	$-۵/۸۱۰۹۰ \times ۱۰^{-۲}$	A <sub>۱۴</sub>	$-۳/۲۱ \times ۱۰^{-۸}$
C <sub>۳</sub>	$۳/۳۴۳۲ \times ۱۰^{-۴}$	A <sub>۱۰</sub>	$۹/۴۷۴۲ \times ۱۰^{-۵}$
C <sub>۴</sub>	$-۱/۴۷۷۹۷ \times ۱۰^{-۶}$	A <sub>۱۱</sub>	$-۱/۲۵۸۳ \times ۱۰^{-۵}$
C <sub>۵</sub>	$۳/۱۴۱۹ \times ۱۰^{-۹}$	A <sub>۱۲</sub>	$-۶/۴۹۲۸ \times ۱۰^{-۸}$
C <sub>۱۰</sub>	۰/۱۵۳۵۶۳	A <sub>۱۳</sub>	$۱/۰۵۱۵ \times ۱۰^{-۸}$
C <sub>۱۱</sub>	$۶/۸۹۹۹ \times ۱۰^{-۴}$	A <sub>۱۴</sub>	$-۲/۰۱۴۲ \times ۱۰^{-۱۰}$
C <sub>۱۲</sub>	$-۸/۱۸۲۹ \times ۱۰^{-۶}$	A <sub>۲۰</sub>	$-۳/۹۰۶ \times ۱۰^{-۷}$
C <sub>۱۳</sub>	$۱/۳۶۳۲ \times ۱۰^{-۷}$	A <sub>۲۱</sub>	$۹/۱۰۶۱ \times ۱۰^{-۹}$
C <sub>۱۴</sub>	$-۶/۱۲۶۰ \times ۱۰^{-۱۰}$	A <sub>۲۲</sub>	$-۱/۶۰۰۹ \times ۱۰^{-۱۰}$
C <sub>۲۰</sub>	$۳/۱۲۶۰ \times ۱۰^{-۵}$	A <sub>۲۳</sub>	$۷/۹۹۴ \times ۱۰^{-۱۲}$
C <sub>۲۱</sub>	$-۱/۷۱۱۱ \times ۱۰^{-۶}$	A <sub>۳۰</sub>	$۱/۱۰۰ \times ۱۰^{-۱۰}$
C <sub>۲۲</sub>	$۲/۵۹۸۶ \times ۱۰^{-۸}$	A <sub>۳۱</sub>	$۶/۶۵۱ \times ۱۰^{-۱۲}$
C <sub>۲۳</sub>	$-۲/۵۳۵۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	A <sub>۳۲</sub>	$-۳/۳۹۱ \times ۱۰^{-۱۳}$
C <sub>۲۴</sub>	$۱/۰۴۱۵ \times ۱۰^{-۱۲}$	B <sub>۰۰</sub>	$-۱/۹۲۲ \times ۱۰^{-۲}$
C <sub>۳۰</sub>	$-۹/۷۷۲۹ \times ۱۰^{-۹}$	B <sub>۰۱</sub>	$-۴/۴۲ \times ۱۰^{-۵}$
C <sub>۳۱</sub>	$۳/۸۵۱۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	B <sub>۱۰</sub>	$۷/۳۶۳۷ \times ۱۰^{-۵}$
C <sub>۳۲</sub>	$-۲/۳۶۵۴ \times ۱۰^{-۱۲}$	B <sub>۱۱</sub>	$۱/۷۹۵۰ \times ۱۰^{-۷}$
A <sub>۰۰</sub>	۱/۳۸۹	D <sub>۰۰</sub>	$۱/۷۲۷ \times ۱۰^{-۳}$
A <sub>۰۱</sub>	$-۱/۲۶۲ \times ۱۰^{-۲}$	D <sub>۰۱</sub>	$-۷/۹۸۳ \times ۱۰^{-۶}$

گرم بر اساس سه روش کریجینگ، کوکریجینگ و عکس فاصله موزون استفاده شد. در نهایت نتایج حاصل شده را در نرم‌افزار ArcGIS<sup>®</sup>9.3 جهت پهنه‌بندی و رسیدن به نقشه‌های تغییرات سرعت صوت در کل خلیج فارس وارد کرده و خروجی‌های مورد نیاز استخراج گردید.

کریجینگ تخمین‌زنی است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری نشده به صورت ترکیب خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد. برآورد مقدار Z در نقطه X<sub>0</sub> به وسیله تخمین‌گر کریجینگ در رابطه زیر بیان می‌شود (۳ و ۱۴).

شرط اولیه به منظور استفاده از روش‌های زمین‌آمار تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال است. به همین علت از آزمون کولموگراف اسمیرنوف جهت صحت‌سنجی این موضوع استفاده و توزیع نرمال داده‌ها بررسی شد. از طرفی جهت مشخص کردن بهترین پارامتر مستقل (دما، شوری و فشار) برای قرار دادن آن به عنوان متغیر کمکی در مدل کوکریجینگ از آزمون همبستگی استفاده شده است. برای اطلاع پیدا کردن از نحوه تغییرات سرعت صوت در نقاطی که نمونه‌برداری صورت نگرفته است، بایستی اقدام به تخمین با استفاده از داده‌های در دسترس و مدل‌های آماری کرد (۳). در این مطالعه از نرم‌افزار GS<sup>+</sup> جهت مقایسه پهنه‌بندی سرعت صوت در دو فصل سرد و

خطای درونیابی در تعیین شاخص‌های مورد نظر، در این تحقیق از تکنیک اعتبارسنجی متقابل استفاده شده است. در نهایت با مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده، خطای برآورد ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) محاسبه شد.

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z^*(x_0) - Z(x_i)]^2 \right\}^{0.5} \quad [10]$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z^*(x_0) - Z(x_i)| \quad [11]$$

که  $Z^*(x_0)$  مقدار برآورد شده متغیر،  $Z(x_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد نظر و  $N$  تعداد کل نمونه‌ها است. هر چه مقدار این پارامترها به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده بالا بودن دقت مدل است. در نهایت روشی که از دقت آماری بالاتری برخوردار بوده به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب و نقشه پهنه‌بندی بر اساس این روش تهیه گردیده است.

### نتایج و بحث

تحلیل نتایج در آمار کلاسیک مبنی بر مستقل بودن نمونه‌ها از یکدیگر است و بنابراین وجود یک نمونه هیچ گونه اطلاعی در مورد نمونه بعدی به دست نمی‌دهد. در صورتی که در زمین‌آمار نمونه‌ها مستقل از یکدیگر در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه نمونه‌های مجاور تا فاصله معینی به طور مکانی بهم وابستگی دارند و می‌توان وابستگی بین نمونه‌ها را به صورت مدل ریاضی که تغییرنا امیدیه می‌شود، ارائه کرد (۷). با توجه به مواردی که پیشتر به آن اشاره شده، آنالیز همسانگردی و ناهمسانگردی جهت رسم تغییرناها در جهات مختلف بر داده‌های سرعت صوت اعمال شده است. شکل‌های ۳ تا ۶ نمایش تغییرنمای سرعت صوت در دو بعد و سه بعد فصول سرد و گرم است. نتایج این آنالیز تغییرات یکسان و یکنواخت پارامتر سرعت صوت در تمام جهات و همسانگردی این پارامتر را نشان می‌دهد.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad [6]$$

در این رابطه؛  $Z^*(x_0)$  مقدار برآورد شده در موقعیت  $x_0$ ،  $Z(x_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت  $x_i$  و  $\lambda_i$  فاکتور وزنی می‌باشد.

کوکرچینگ، پیش‌بینی کننده معمولی ترکیب خطی از وزن‌های  $w_{ij}$  همراه با داده‌هایی از متغیرهای مختلف نقاط نمونه‌برداری است که در همسایگی  $t_0$  قرار دارند. هر متغیر بر اساس مجموعه‌ای از نمونه‌هایی با حجم  $n_i$  پیش‌بینی می‌شود. در این تحقیق با توجه به نتایج همبستگی، پارامتر دما به عنوان متغیر کمکی برای مدلسازی و درونیابی سرعت صوت در خلیج فارس استفاده شده است. دستگاه معادلات کوکرچینگ به صورت زیر می‌باشد (۳ و ۱۴).

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{n_k} w_{lk} \gamma_{ik}(t_j - t_1) + m_i = \gamma_{il}(t_j - t_0); \quad i=1, \dots, N; \quad j=1, \dots, n_i \quad [7]$$

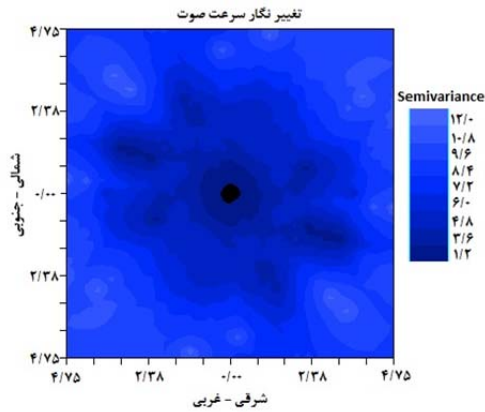
$$\sum_{l=1}^{n_i} w_{li} = \delta_{il}; \quad i=1, \dots, N \quad [8]$$

عکس فاصله موزون ساده‌ترین پیش‌بینی کننده در داده‌های فضایی است و فرمول‌بندی ساده‌ای دارد. این مدل برای پیش‌بینی  $Z(0)$  در نقطه  $x_0$  به داده‌هایی که فاصله کمی با  $x_0$  دارند وزن زیاد و داده‌های که فاصله زیاد دارند وزن کم می‌دهد. روش عکس فاصله موزون به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود (۳ و ۱۴).

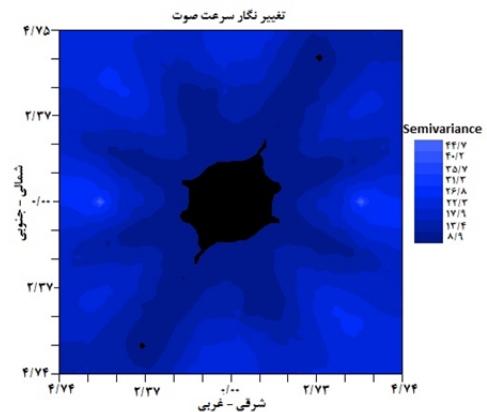
$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_i \frac{z(x_i)}{(h_{i0}-s)^p}}{\sum_i \frac{1}{(h_{i0}-s)^p}}; \quad i = 1, \dots, N \quad [9]$$

در این رابطه؛  $h_{i0}$  فاصله بین دو نقطه  $x_0$  و  $x_i$  و  $S$  ضریب همواری و  $P$  توان وزن است. در این تحقیق با بررسی اعتبارسنجی  $S=0$  و  $P=2$  مدلسازی صورت گرفته است.

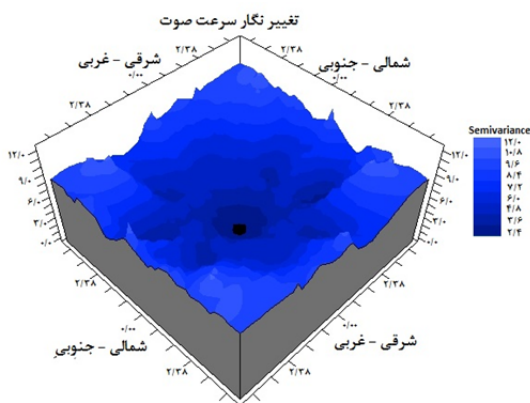
جهت ارزیابی و دقت مدل تخمین‌گر زمین‌آمار و بررسی



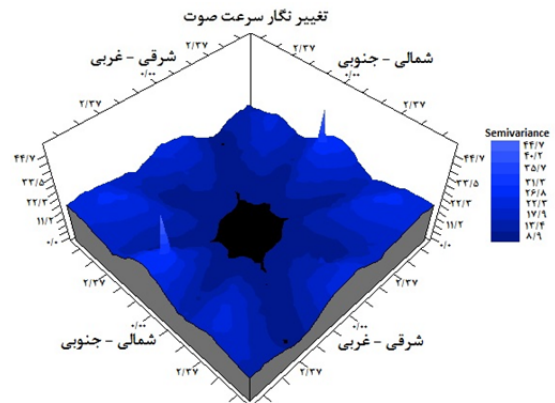
شکل ۴. روش دوبعدی تغییرنگار سرعت صوت، سطح خلیج فارس، فصل گرم



شکل ۳. روش دوبعدی تغییرنگار سرعت صوت، سطح خلیج فارس، فصل سرد



شکل ۶. روش سه‌بعدی تغییرنگار سرعت صوت، سطح خلیج فارس، فصل گرم



شکل ۵. روش سه‌بعدی تغییرنگار سرعت صوت، سطح خلیج فارس، فصل سرد

شد. نتایج ارزیابی دقت مدل‌های اشاره شده با MAE و RMSE در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده بهترین روش جهت پهنه‌بندی سرعت صوت روش کوکریجینگ با متغیر کمکی دما است.

### نتایج آماری

نتایج آزمون همبستگی با سطح اطمینان ۹۹٪ هر یک از فصول در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده همبستگی پارامتر دما با سرعت صوت است. به همین منظور از پارامتر دما به عنوان متغیر کمکی در مدل کوکریجینگ استفاده

جدول ۲. نتایج آزمون همبستگی پیرسون، فصل سرد در خلیج فارس

	فصل سرد	فشار	شوری	دما
سرعت صوت	همبستگی پیرسون	-۰/۳۴۶	-۰/۴۴۵	۰/۸۵۲
	Sig.	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی پیرسون، فصل گرم در خلیج فارس

فصل گرم	فشار	شوری	دما
همبستگی پیرسون	-۰/۸۶۸	-۰/۲۹۶	۰/۹۶۹
سرعت صوت	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	<i>Sig.</i>		

جدول ۴. نتایج آنالیز روش‌های مختلف پهنه‌بندی در فصل سرد

فصل سرد در خلیج فارس	بستر	عمق میانگین	سطح
Kriging	MAE	۰/۸۱	۱/۸۱
	MRSE	۳/۲۹	۲/۹۹
Kokriging	MAE	۰/۶۴	۰/۷۲
	MRSE	۱/۵۴	۱/۰۸
IDW	MAE	۰/۷۹	۰/۸۶
	MRSE	۱/۶۳	۱/۳۶
بهترین روش پهنه‌بندی	Kokriging	Kokriging	Kokriging

جدول ۵. نتایج آنالیز روش‌های مختلف پهنه‌بندی در فصل گرم

فصل گرم در خلیج فارس	بستر	عمق میانگین	سطح
Kriging	MAE	۲/۰۷	۱/۸۰
	MRSE	۲/۶۶	۲/۲۷
Kokriging	MAE	۱/۶۵	۰/۹۴
	MRSE	۲/۱۸	۱/۲۰
IDW	MAE	۲/۲۰	۱/۱۵
	MRSE	۲/۷۷	۱/۴۰
بهترین روش پهنه‌بندی	Kokriging	Kokriging	Kokriging

### مدل‌سازی و پهنه‌بندی

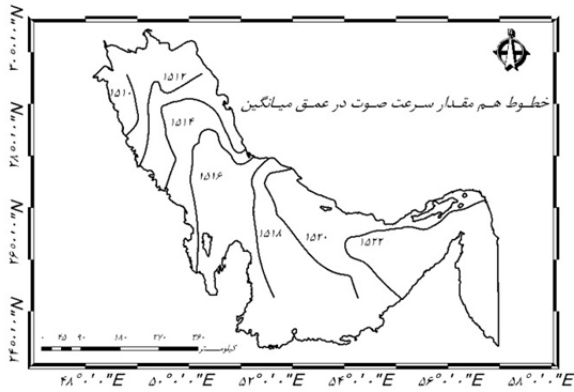
با توجه به نتایج بدست آمده، پهنه‌بندی فضایی سرعت صوت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS<sup>®</sup>9.3 انجام شده است. نتایج پهنه‌بندی برای لایه‌های سطحی، عمق متوسط و بستر در خلیج فارس در اشکال ۷ تا ۱۲ نشان داده شده است. نتایج حاکی از کاهش سرعت صوت با حرکت از سمت تنگه هرمز به سمت شمال غرب خلیج فارس، در تمامی لایه‌ها و هر یک از فصول است. این کاهش در سرعت صوت ناشی از ورود آب‌های آزاد با شوری و دمای متفاوت از دریای عمان به خلیج فارس می‌باشد. ورود آب‌های آزاد با شوری ۳۷ psu و دمایی

به نسبت بالاتر از خلیج فارس، از طریق تنگه هرمز و همچنین ورود آب‌های رودخانه‌ای با شوری و دمای پائین‌تر نسبت به توده آبی خلیج فارس در قسمت شمال غرب باعث اختلاف در مقادیر سرعت صوت می‌شود. در قسمت‌های جنوبی و کم‌عمق خلیج فارس، حد فاصل کشورهای قطر و امارات متحده عربی، مقدار سرعت صوت نسبت به دیگر مناطق افزایش یافته است که این امر به علت افزایش تبخیر و در نتیجه آن افزایش شوری ستون آب می‌باشد و سبب افزایش سرعت صوت در این منطقه می‌شود. کمترین مقادیر سرعت صوت را در مناطق عمیق شمالی و مرکزی خلیج فارس مشاهده می‌کنیم که در این

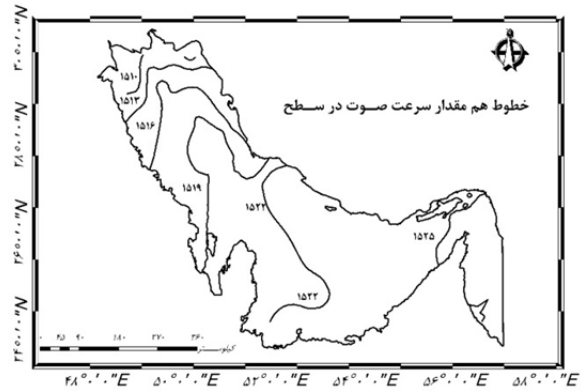


کاهش سرعت صوت از سطح تا بستر را شاهد هستیم.

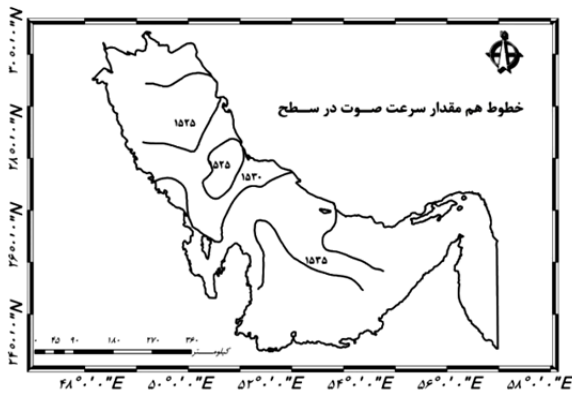
مناطق به علت افزایش عمق، دما کاهش یافته و در نتیجه آن سرعت صوت نیز کاهش یافته است. در این مناطق ما همواره



شکل ۸. خطوط هم مقدار سرعت صوت (m/s)، عمق میانگین خلیج فارس در فصل سرد



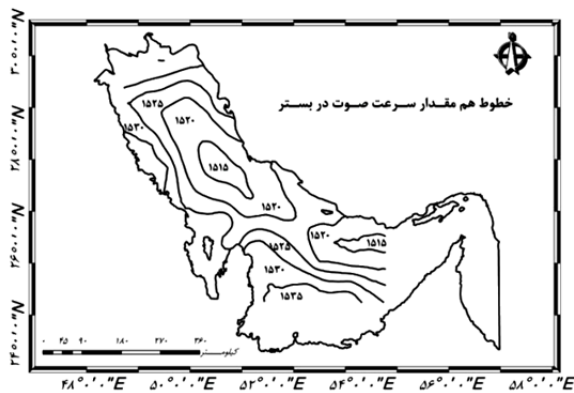
شکل ۷. خطوط هم مقدار سرعت صوت (m/s)، سطح خلیج فارس در فصل سرد



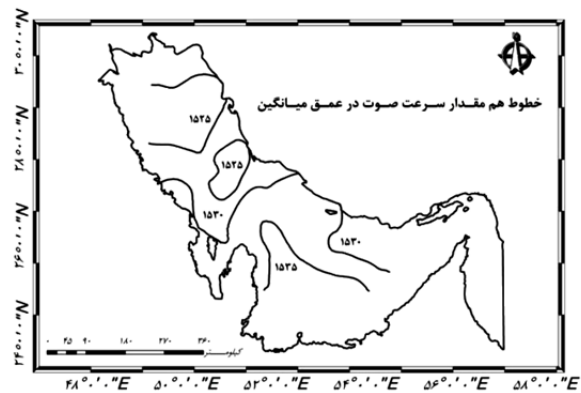
شکل ۱۰. خطوط هم مقدار سرعت صوت (m/s)، سطح خلیج فارس در فصل گرم



شکل ۹. خطوط هم مقدار سرعت صوت (m/s)، بستر خلیج فارس در فصل سرد



شکل ۱۲. خطوط هم مقدار سرعت صوت (m/s)، بستر خلیج فارس در فصل گرم

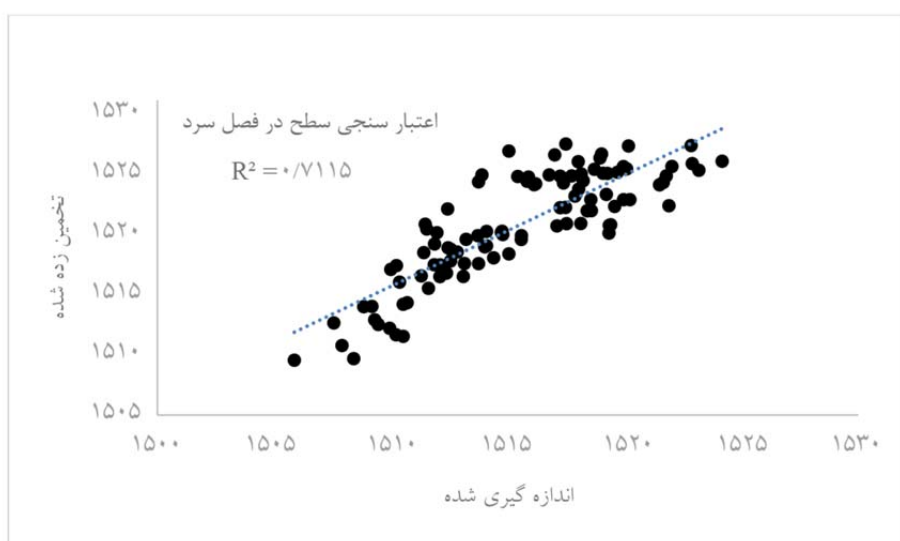


شکل ۱۱. خطوط هم مقدار سرعت صوت (m/s)، عمق میانگین خلیج فارس در فصل گرم

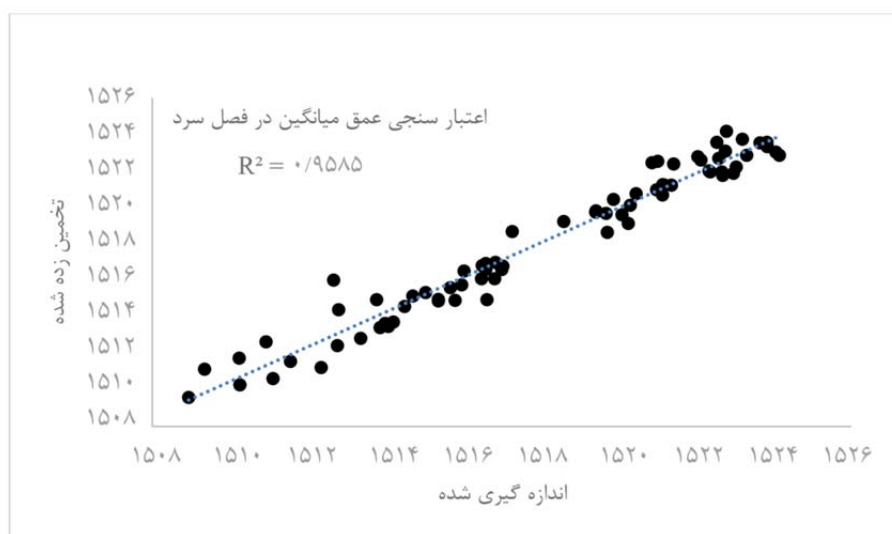
### اعتبارسنجی متقابل روش کوکریجینگ

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدلسازی به وسیله روش کوکریجینگ با مدل کروی، در اشکال ۱۳ تا ۱۸ نمایش داده شده است. در این نمودارها مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت صوت نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده رسم و خطی بر آن برازش داده شده است. در نمودارهای اعتبارسنجی، هرچه ضریب زاویه خط برازش داده شده نزدیک به یک باشد، مدلسازی بهتری صورت گرفته است. مقادیر ضریب زاویه خط

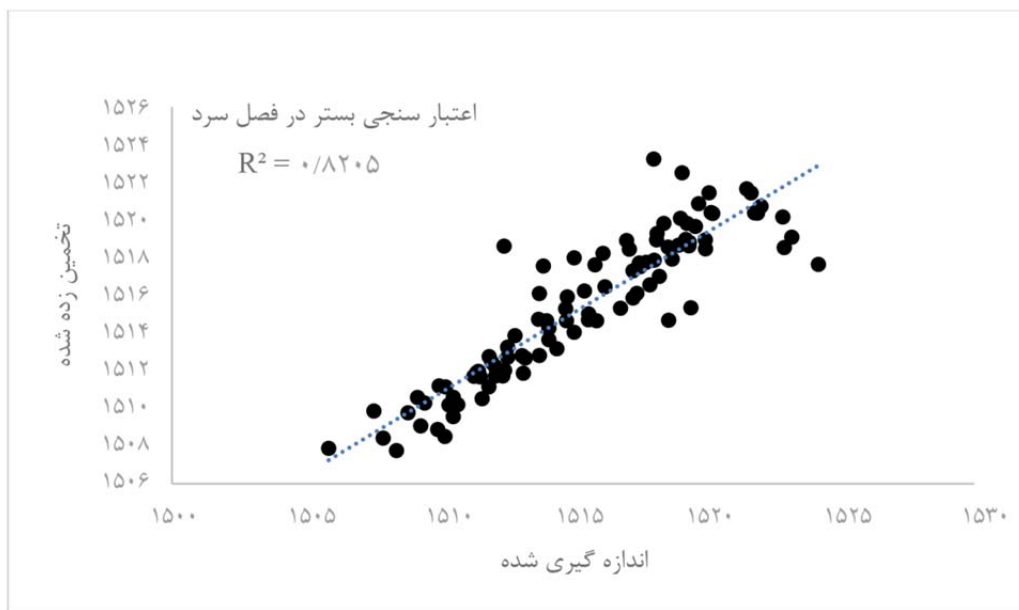
برازش شده در نمودارهای فصل سرد دارای مقادیر بالاتری نسبت به فصل گرم است. این مقادیر به ترتیب برای سطح، عمق میانگین و بستر برابر ۰/۷۱، ۰/۹۵ و ۰/۸۲ می‌باشد. با توجه به ضرایب زاویه به دست آمده، با اطمینان بیشتری می‌توان به پیش‌بینی مقادیر سرعت صوت در مناطق فاقد اندازه‌گیری پرداخت و به آن استناد کرد. این مقادیر در فصل گرم برای سطح، عمق میانگین و بستر به ترتیب برابر ۰/۷۴، ۰/۸۲ و ۰/۴۵ می‌باشد.



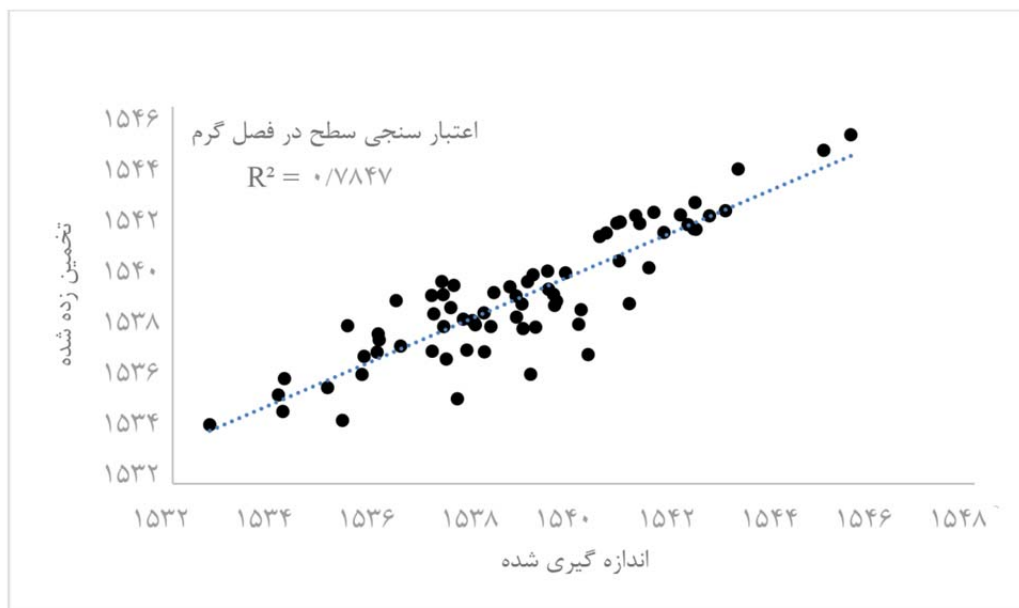
شکل ۱۳. نمودار اعتبارسنجی، سطح آب در فصل سرد



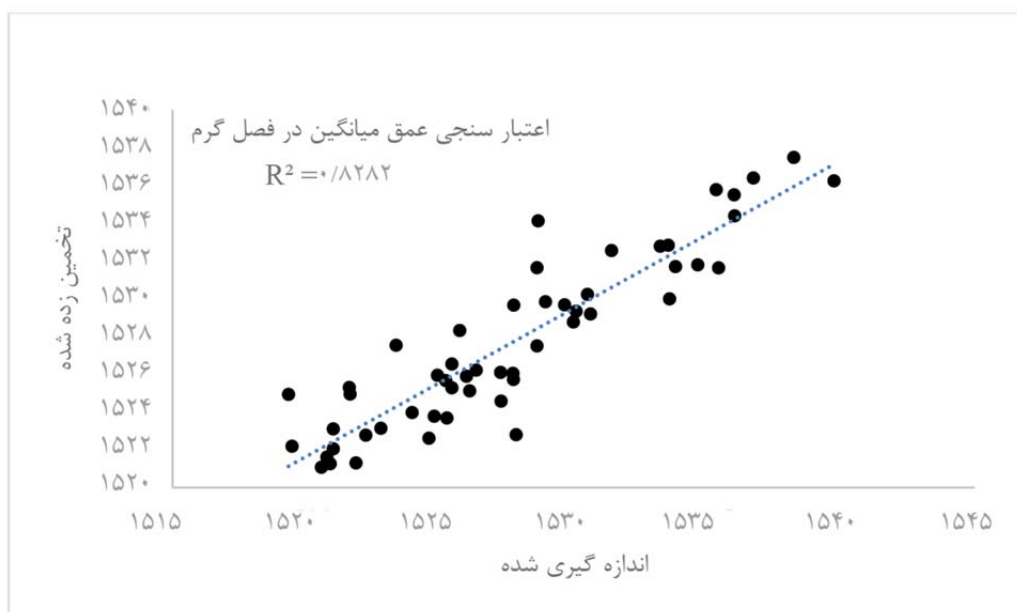
شکل ۱۴. نمودار اعتبارسنجی، عمق میانگین آب در فصل سرد



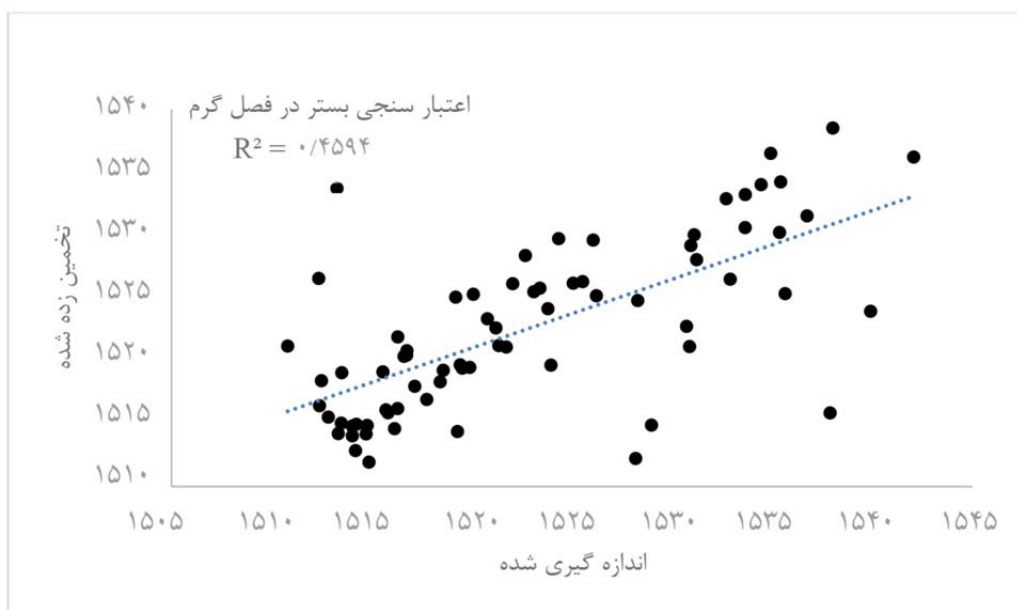
شکل ۱۵. نمودار اعتبارسنجی، بستر خلیج فارس در فصل سرد



شکل ۱۶. نمودار اعتبارسنجی، سطح خلیج فارس در فصل گرم



شکل ۱۷. نمودار اعتبارسنجی، عمق میانگین خلیج فارس در فصل گرم



شکل ۱۸. نمودار اعتبارسنجی، بستر خلیج فارس در فصل گرم

#### منابع مورد استفاده

۱. حسنی‌پاک، ع. ا. ۱۳۹۲. زمین‌آمار (ژئواستاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران. ۳۲۸ صفحه.
۲. کمیجانی، ف. و. و. چگینی. ۱۳۹۰. تحلیل فضایی و میدانی کمیت‌های فیزیکی آب خلیج چابهار در مونسون زمستانه سال ۱۳۸۵-۱۳۸۶. مجله اقیانوس‌شناسی، ۲(۹): ۶۹-۷۷.
۳. محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری. جلد دوم. چاپ اول. انتشارات نشر پلاک. ۴۵۳ صفحه.
۴. معروفی، ص.، ح. محب‌زاده و ک. طاهری. ۱۳۸۹. بررسی و مقایسه روش‌های زمین‌آمار در تخمین سطح ایستایی دشت

- papers in marine science. URL<  
<http://unesdoc.unesco.org/images/0004/000473/047363eb.pdf>,
14. Mohammadi J. 2006. Pedometry (spatial Statistics), Peld Press, 2<sup>nd</sup>, 436p.
  15. Océanographiques G. 1981. Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater 1980. UNESCO Technical Papers in Marine Science, 140p.
  16. Price DT, McKenney DW, Nalder IA, Hutchinson MF, Kesteven JL. 2000. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest meteorology*, 101(2): 81-94.
  17. Reynolds RM. 1993. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*, 27: 35-59.
  18. Rezvani S. 1996. Application of ANSWERS model for estimating of phosphorus transfer in basin exited flood water by measured phosphorus amounts in basin and estimated amounts using geostatistical methods , M.Sc. thesis, Faculty of agriculture, Shiraz University, 286p.
  19. Stone M. 1974. Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)*: 111-147.
  20. Tabios GO, Salas JD. 1985. A comparative analysis of techniques for spatial analysis precipitation. *Journal of the American Water Resources Association*, 21(3): 365-380.
  21. Zheng J, He M, Li X, Chen Y, Liu L. 2008. Effects of *Salsola passerina* shrub patches on the microscale heterogeneity of soil in a montane grassland, China. *Journal of Arid Environments*, 72(3): 150-161.
- نہاوند. نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه. ۱۰ صفحه.
5. Brus DJ, Heuvelink GB. 2007. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1): 86-95.
  6. Buytaert W, Deckers J, Wyseure G. 2007. Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena*, 70(2): 143-154.
  7. Einax J, Soldt U. 1999. Geostatistical and multivariate statistical methods for the assessment of polluted soils merits and limitations. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 46(1): 79-91.
  8. Geisser S. 1975. The predictive sample reuse method with applications. *Journal of the American Statistical Association*, 70(350): 320-328.
  9. Jordan C, Shi Z, Bailey JS, Higgins AJ. 2003. Sampling strategies for mapping 'within-field' variability in the dry matter yield and mineral nutrient status of forage grass crops in cool temperate climates. *Precision Agriculture*, 4(1): 69-86.
  10. Kbiob D. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of Chemical, Metallurgical, and Mining Society of South Africa*, 52: 119-139.
  11. Martin W, Timmer V. 2006. Capturing spatial variability of soil and litter properties in a forest stand by landform segmentation procedures. *Geoderma*, 132(1): 169-181.
  12. Matheron G. 1962. Using of applied geostatistics. Report of geostatistical research units, Volume 1. Number 14. 1(14):38p.
  13. Millero F, Poisson A, Chen C, Bradshaw A, Schleicher K. 1980. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater. UNESCO technical



## Application of spatial statistics in zoning and spatial analysis of the sound speed in the Persian Gulf

M. Majidy Nik <sup>1\*</sup>, H. Deldar <sup>2</sup>

1. MSc. of Physical Oceanography, Environmental Studies Center of NEDSA

2. PhD. Student of Physical Oceanography, Environmental Studies Center of NEDSA

### ARTICLE INFO

#### **Article history:**

Received 25 August 2014

Accepted 2 March 2015

Available online 14 September 2015

#### **Keywords:**

Sound Speed

Spatial Prediction

Spatial Analysis

Kriging

Co-Kriging

Inverse Distance Weighted

Persian Gulf

### ABSTRACT

The aims of this study were to find the distribution of sound speed under the influence of water's physical parameters; to predict spatial analysis in oceanography using geostatistical methods; to forecast value parameters for the Persian Gulf and zoning the sound speed. Sound Speed was calculated using Chen-Millero formula and pressure, salinity, and temperature data. The data extracted from World Ocean Atlas 2013 with regular mesh grid 0.25 degree. Sound speed was calculated using the Chen-Millero formula. Spatial analysis of the sound speed comparison based on three methods Kriging, Co-Kriging and Inverse Distance Weighted. These methods were performed using GS<sup>+</sup> software in both warm and cold season. The best method finally used to forecast and prepare the plans of zoning sound speed. The Pearson's correlation test was performed between independent variables and sound speed showed that the maximum correlation occurs between temperature and sound speed. Therefore, the temperature was considered as the auxiliary variable in Co-Kriging method for spatial analysis of sound speed. Cross-validation results showed that model's forecasting in cold season was better compared to warm season in this region. Results of spatial analysis showed that the sound speed decreased about 20m/s in all layers from the Hormuz Strait toward the northwestern part of the Persian Gulf. Because of the increased salinity the maximum of sound speed was always in the south shallow area. In all investigated stations, sound speed reduced with increasing depth, due to temperature reduction and the sound channel is not also observed.

\* Corresponding author e-mail address: [m.majidynik@yahoo.com](mailto:m.majidynik@yahoo.com)