

تخمین حجم تخلیه آب زیرزمینی به دریا با استفاده از تلفیق داده‌های مکانی و سری زمانی رادیوایزوتوپ رادون ۲۲۲، مطالعه موردی در جنوب ژاپن

یاسر نیک‌پیمان*^۱، هیجون یانگ^۲، تاکاهيرو هوسونو^۳، ماساهیکو اونو^۴، جون شیمادا^۵، کیوشی تاکیکاوا^۵

۱-استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲-گروه زمین‌شناسی، دانشگاه کوماموتو، ژاپن

۳-سازمان اولویت‌دهی به نوآوری و مطالعات فاخر، دانشگاه کوماموتو، ژاپن

۴-موسسه ملی علوم و فنون صنعتی پیشرفته، تسوکوبا، ژاپن

۵-مرکز مطالعات زیست‌محیطی دریایی، دانشگاه کوماموتو، ژاپن

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۵/۱۱

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۴/۱۸

چکیده

تخلیه آب‌های زیرزمینی به دریا (SGD)^۲ به‌عنوان بخشی از چرخه هیدرولوژی که در اثر آن مواد محلول و سایر آلاینده‌ها از محیط‌های خشکی وارد اقیانوس می‌شوند، مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های متنوعی به منظور ارزیابی SGD ارائه شده است. روش رادیوایزوتوپ رادون ۲۲۲ (²²²Rn) به‌عنوان یک ردیاب ژئوشیمیایی طبیعی با هدف انجام مطالعات غیرمستقیم ناحیه‌ای SGD توسعه یافته است. در این تحقیق تلاش شده است تا حجم تخلیه آب زیرزمینی به دریا در نوار شمالی دریای یاتسوشیرو^۳ واقع در جنوب کشور ژاپن با روش ²²²Rn ارزیابی گردد. بدین منظور، با بهره‌گیری از نتایج تحقیقات منتشر شده گذشته توسط نویسندگان بالا، محدوده با پتانسیل بالای SGD معین گردید. سپس، سری زمانی غلظت گاز ²²²Rn در آب دریا به منظور تحلیل اثر جذر و مد بر تغییرات زمانی تخلیه آب زیرزمینی به دریا ثبت گردید. هم‌چنین، تصحیحات لازم بر روی داده‌های سری زمانی اعمال شد تا اثر رودخانه‌های موجود در منطقه حذف گردد و امکان تخمین جریان SGD فراهم شود. در نهایت، نتایج حاصل از بررسی تغییرات مکانی غلظت گاز ²²²Rn در نوار ساحلی مورد مطالعه با داده‌های سری‌های زمانی ²²²Rn در منطقه مذکور تلفیق گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که حجم SGD در محدوده مورد مطالعه حدود ۱۰/۶۵ متر مکعب در ثانیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تخلیه آب زیرزمینی به دریا، SGD، ²²²Rn، ژاپن.

Email: y_nikpeyman@sbu.ac.ir

*-نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۰۱۵۰۷۶۴

2-Submarine Groundwater Discharge

3-Yatsushiro Sea

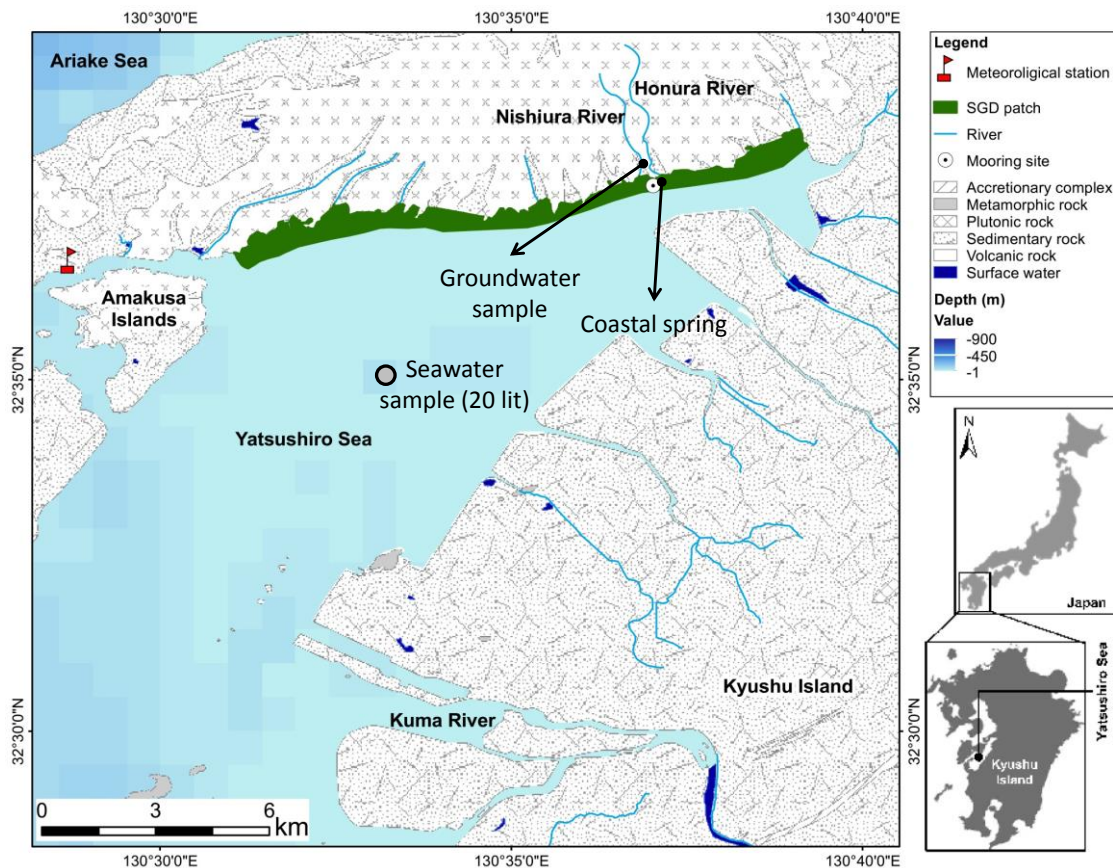
مقدمه

لایه‌های با چگالی متفاوت آب دریا و ... می‌توانند در شدت جریان آب زیرزمینی به دریا موثر باشند (برنت و همکاران، ۲۰۰۳b). مطالعات مختلف نشان داده است که نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا با تغییرات جذر و مدی رابطه معکوس دارد (لی، ۱۹۷۷؛ نیلسون، ۱۹۹۰؛ برنت و همکاران، ۲۰۰۳a). مور و همکاران (۲۰۰۲) بیان نمودند که نرخ SGD روزانه ۲ مرتبه به بالاترین مقدار خود می‌رسد که منطبق با چرخه‌های جذر و مدی است. همچنین، چرخه‌های بلند مدت‌تر جریان SGD (هفته تا ماه) به علت حرکت انتقالی ماه به دور زمین تحلیل شده است (کیم و هاوانگ، ۲۰۰۲؛ تانیگوچی، ۲۰۰۲). شام و ساندبای (۱۹۹۶) نشان دادند که جریان فرارفتی آب منفذی که در رسوبات نفوذپذیر ساحلی جریان دارد را نیز می‌توان به‌عنوان نیروی ایجاد کننده SGD در نظر گرفت. در تحقیقی دیگر، هاتل و همکاران (۱۹۹۶) بیان نمودند که اثر جریان فرارفتی آب منفذی در رسوبات بستر دریا که تراوایی آن‌ها بیشتر از $10^{-12} m^2$ می‌باشد، قابل توجه است. ریدل و همکاران (۱۹۷۲) نشان دادند که خطوط هم‌تراوایی با مقدار $10^{-12} m^2$ در فلات قاره معمولاً موازی خطوط هم‌عمق $500-2000 m$ هستند. بنابراین، تراوایی رسوبات فلات قاره در اعماق کمتر از $500-2000$ متر احتمالاً بیشتر از $10^{-12} m^2$ می‌باشد. در تحقیقات متعدد، SGD را به دو تشکیل‌دهنده اصلی آن تقسیم نموده‌اند که شامل: (۱) تخلیه آب شیرین زیرزمینی به دریا (FSGD)^۴، و (۲) تخلیه آب زیرزمینی بازچرخش یافته (RSGD)^۵ که همان آب دریا است که در اثر عمل انرژی‌های محیط دوباره به داخل آبخوان ساحلی پمپاژ شده است. با توجه به نیروی پمپاژ

به طور کلی، ارتباط میان آب سطحی و آب زیرزمینی شامل دو بخش اصلی است: (۱) نفوذ آب شور دریا در آبخوان ساحلی (SWI)، و (۲) تخلیه آب زیرزمینی به دریا (SGD). نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی به دلیل اثر مستقیم آن بر کیفیت منابع آب زیرزمینی ساحلی در مطالعات متعدد مورد بررسی قرار گرفته است. تخلیه آب زیرزمینی به دریا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرآیندهایی معرفی شده است که در اثر آن مواد محلول در آب زیرزمینی و آلاینده‌ها می‌توانند از خشکی به آب‌های ساحلی منتقل شوند (کوهوت، ۱۹۶۶؛ مور، ۱۹۹۶؛ برنت، ۱۹۹۹؛ برنت و همکاران، ۲۰۰۱a). پدیده SGD خود به تنهایی اثر قابل توجهی در چرخه هیدرولوژی جهانی ندارد، ولی به‌عنوان یک منشاء آلودگی با پراکندگی بالا در سواحل مرتبط به آبخوان‌های آلوده محسوب می‌شود (برنت و همکاران، ۲۰۰۳a). علاوه بر این، پیدایش چشمه‌ها و سطوح تراوش آب زیرزمینی در فلات قاره از آثار پدیده SGD بیان شده است که می‌تواند تبعات زیست‌محیطی نظیر نشت فلزات سنگین، مواد رادیو اکتیو و ترکیبات آلی محلول در آب زیرزمینی به دریا را در پی داشته باشد (برنت و همکاران، ۲۰۰۱b؛ تانیگوچی و همکاران، ۲۰۰۲). شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی در خشکی، اصلی‌ترین نیروی ایجاد کننده SGD است. اگرچه، هر یک از نیروی‌های موجود در محیط دریا نیز می‌تواند بر شدت جریان آب زیرزمینی به دریا موثر باشند. به‌عنوان مثال، می‌توان به پمپاژ آب دریا به سفره ساحلی در اثر عمل امواج و جذر و مد اشاره نمود. همچنین، برخی دیگر از انواع انرژی موجود در محیط نظیر شیب‌های دمایی، فشار اسمزی،

به دریا را به طور دقیق و در مناطق وسیع با استفاده از رادیوایزوتوپ‌های زنجیره واپاشی اورانیوم-توریوم اندازه‌گیری نمود (به‌عنوان مثال: برنت و همکاران، ۱۹۹۰؛ برنت و همکاران، ۱۹۹۶؛ کیبل و همکاران، ۱۹۹۶a؛ کیبل و همکاران، ۱۹۹۶b؛ کوربت، ۱۹۹۹؛ مور، ۱۹۹۶؛ راما و مور، ۱۹۹۶؛ مور و شاو، ۱۹۹۸؛ حسین و همکاران، ۱۹۹۹؛ چارت و همکاران، ۲۰۰۸). از میان عناصر زنجیره واپاشی اورانیوم-توریوم، غلظت گاز نجیب ^{222}Rn (نیمه عمر ۳/۸۳ روز) در آب زیرزمینی می‌تواند تا ۱۰۰۰ برابر بیشتر از آب‌های سطحی باشد (برنت و دولایووا، ۲۰۰۳)، که علت آن موارد زیر است: (۱) بالا بودن غلظت رادیوم ۲۲۶ در محیط زمین‌شناسی در مقایسه با آب‌های سطحی، (۲) نیمه عمر کوتاه گاز رادون ۲۲۲ و واپاشی سریع آن، (۳) عدم تولید آن در آب سطحی و (۴) خروج گاز از توده آب سطحی تحت-تاثیر تلاطم سطح آب و تغییرات دما. لذا، ^{222}Rn قابلیت استفاده در ارزیابی نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا را دارد (چارت و همکاران، ۲۰۰۸). علی‌رغم آنکه در سال‌های اخیر برای تخمین نرخ جریان آب زیرزمینی به دریا تلاش‌های بسیاری شده است، برآورد حجم آب زیرزمینی تخلیه شده به دریا (FSGD و RSGD) همچنان فرآیندی چالش‌برانگیز می‌باشد. در تحقیق پیش رو، تلاش شده است تا با تلفیق تغییرات گاز ^{222}Rn در خط ساحلی محدوده مورد مطالعه با سری‌های زمانی ثبت شده، حجم SGD تخمین زده شود. علاوه بر این، تلاش شده است اثر رودخانه‌هایی که به دریای یاتسوشیرو تخلیه می‌شوند را بر روی مطالعات مرتبط با تخلیه آب زیرزمینی به دریا ارزیابی نمود.

کننده آب دریا به درون آبخوان ساحلی، RSGD را نیز می‌توان به موارد زیر تقسیم‌بندی نمود: (۱) پمپاژ ناشی از اثر انرژی امواج (RSGD_w)، (۲) پمپاژ به دلیل نوسانات جذر و مد (RSGD_t) و (۳) پمپاژ در اثر جریان‌های همرفتی ناشی از اختلاف چگالی آب دریا (RSGD_c) (لی و همکاران، ۱۹۹۹؛ تانیگوچی و همکاران، ۲۰۰۲؛ برنت و همکاران، ۲۰۰۳a). تخمین اینکه هر یک از بخش‌های SGD چند درصد از کل جریان آب زیرزمینی به دریا را شامل می‌شود یک فرآیند چالش برانگیز بوده و نیازمند مطالعات دقیق و گسترده است (برنت و همکاران، ۲۰۰۳a). به منظور تخمین SGD روش‌های متعددی نظیر استفاده از رادیوایزوتوپ‌ها، تراوش‌سنج، داده‌های پیژومتری و معادلات بیلان آبی پیشنهاد شده است (کیبل و همکاران، ۱۹۹۷؛ کیم و هاوانگ، ۲۰۰۲؛ تانیگوچی و همکاران، ۲۰۰۲؛ برنت و همکاران، ۲۰۰۳b؛ مارتین و همکاران، ۲۰۰۵؛ تانیگوچی و همکاران، ۲۰۰۵). به علاوه، می‌توان از ردیاب‌های ژئوشیمیایی که به طور طبیعی در آب زیرزمینی وجود دارند (مانند رادیوم و رادون) استفاده نمود (کیبل و همکاران، ۱۹۹۶a؛ کوربت، ۱۹۹۹؛ برنت و دولایووا، ۲۰۰۳). روش ردیاب‌های ژئوشیمیایی طبیعی، تنها روشی است که به کمک آن می‌توان جریان تخلیه آب زیرزمینی به دریا را به طور یکپارچه (همه اجزا با یکدیگر) اندازه‌گیری نمود (مور، ۱۹۹۹). این در حالی است که سایر روش‌ها تنها نرخ تخلیه آب شیرین زیرزمینی به دریا را محاسبه می‌نمایند (برنت و همکاران، ۲۰۰۳b). لذا، طی دو دهه اخیر تلاش بسیاری شده است تا بتوان نرخ تخلیه آب زیرزمینی



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه که در آن محدوده با پتانسیل بالای تخلیه آب زیرزمینی به دریا مشخص شده است (اقتباس از نیک‌پیمان و همکاران، ۲۰۱۵)

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه نزدیک بندر شیرانویی، در نوار ساحلی شمالی دریای یاتسوشیرو، جنوب غرب ژاپن، واقع شده است (شکل ۱). دریای یاتسوشیرو یک دریای محصور در خشکی است که تنها از طریق دو کانال بسیار باریک به دریای آزاد در شمال و جنوب مرتبط می‌باشد. فلات جذر و مدی محدوده مطالعاتی کم‌عمق و گلی می‌باشد که نوسانات جذر و مدی در آن بین ۳ تا ۵ متر است (شکل ۲). متوسط بارش و دمای سالانه در محدوده مطالعاتی به ترتیب ۲۰۰۸ میلیمتر و ۱۶/۸ درجه سانتیگراد می‌باشد.

از دیدگاه زمین‌شناسی، رخنمون‌های محدوده مطالعاتی شامل موارد زیر است (یوشیموتو و

همکاران، ۲۰۱۳):

- ۱- سنگ‌های آذرین مافیک نئوژن-کواترنری.
 - ۲- سنگ‌های رسوبی دریایی و غیر دریایی سیلورین-پرمین، ژوراسیک-ائوسن، میوسن، پلیستوسن-هولوسن.
 - ۳- رخنمون‌های پلوتونیک پالئوزوئیک، کرتاسه زیرین، میوسن میانی-بالایی.
 - ۴- دگرگونی‌های شیستی و گنیسی پرمین-تریاس که به صورت جزئی در محدوده رخنمون دارند.
 - ۵- نهشته‌های آذرآواری عهد حاضر که تشکیل دهنده اصلی آبخوان‌های محدوده مورد مطالعه هستند.
- سنگ کف آبخوان‌های محدوده مطالعاتی عمدتاً

اثر که کشند بر نرخ SGD در محدوده مورد مطالعه، سری زمانی ^{222}Rn آب دریا در بازه زمانی ۱۲-۱۰ آگوست ۲۰۱۲ ثبت گردید. هم‌چنین، در بازه زمانی ۴-۳ دسامبر ۲۰۱۲ سری زمانی ^{222}Rn آب دریا با هدف ارزیابی تاثیر پدیده مه‌کشند بر SGD ثبت گردید (mooring point، شکل ۱). بدین منظور، با استفاده از روش برنت و دولایووا (۲۰۰۳)، غلظت گاز ^{222}Rn محلول در آب دریا به کمک دستگاه RAD7^۶ با فاصله‌های زمانی ۲۰ دقیقه اندازه‌گیری گردید (شکل ۳ الف). روش مذکور مبتنی بر اندازه‌گیری پیوسته تغییرات گاز ^{222}Rn در آب‌های ساحلی است و در آن عوامل افزایش و کاهش غلظت ^{222}Rn در محدوده مطالعاتی بررسی می‌گردد (شکل ۴). به همین منظور، اقدامات زیر در بازه زمانی ثبت سری زمانی گاز ^{222}Rn آب دریا انجام شد (mooring point، شکل ۱):

۱- ثبت تغییرات شوری، دما و عمق آب دریا با استفاده از سنسور CTD^۷ و با فواصل زمانی ۵ دقیقه به منظور ارزیابی اختلاط آب زیرزمینی تخلیه شده به دریا و غنی از ^{222}Rn با آب دریای فقیر از ^{222}Rn .

متشکل از سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک است که معمولاً در عمق ۲۰۰ متری از سطح زمین قرار دارند.

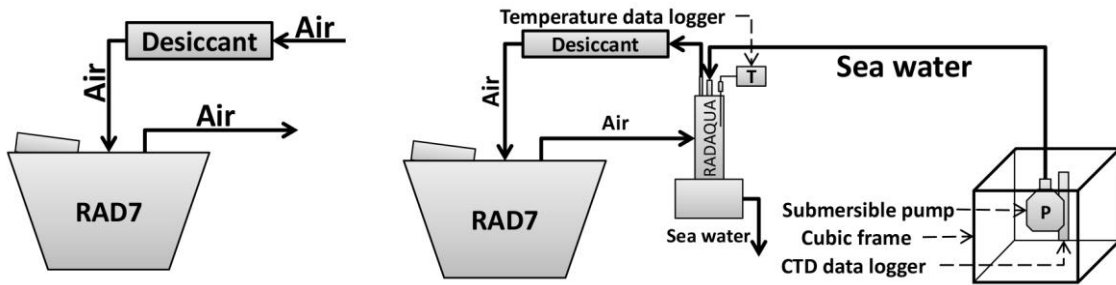
ارزیابی تخلیه آب زیرزمینی به دریا در محدوده مورد مطالعه از سال ۲۰۰۴ با بهره‌گیری از روش تراوش‌سنج آغاز شده است (گزارش شرکت آیدیا، ۲۰۰۴). در مطالعه مذکور که از تراوش‌سنج‌های با قطر ۳۲ سانتیمتر استفاده شد، مشخص گردید که در محدوده مورد مطالعه حجم قابل توجهی از آب زیرزمینی به دریا تخلیه می‌گردد. با توجه به این حقیقت که نتایج روش تراوش‌سنج تنها در مقیاس محلی کاربرد دارد، لذا به منظور ارزیابی پدیده SGD در مقیاس منطقه‌ای می‌بایستی از روش ^{222}Rn استفاده شود. نیک‌پیمان و همکاران (۲۰۱۴) و (۲۰۱۶) طی مطالعاتی که از سال ۲۰۱۰ با هدف ارزیابی تغییرات مکانی گاز ^{222}Rn در محدوده مطالعاتی آغاز نمودند نتیجه گرفته‌اند که پتانسیل وجود SGD در محدوده‌ای به وسعت ۶/۵ کیلومتر مربع از فلات جذر و مدی نوار ساحلی شمالی دریای یاتسوشیرو قابل توجه می‌باشد. به منظور بررسی تغییرات زمانی نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا و



شکل ۲: عکس محل ثبت سری زمانی ^{222}Rn آب دریا و موقعیت چشمه ساحلی نسبت به آن

7-Conductivity-Temperature-Depth, CTD-Diver, DI219; Schlumberger Water Services, USA

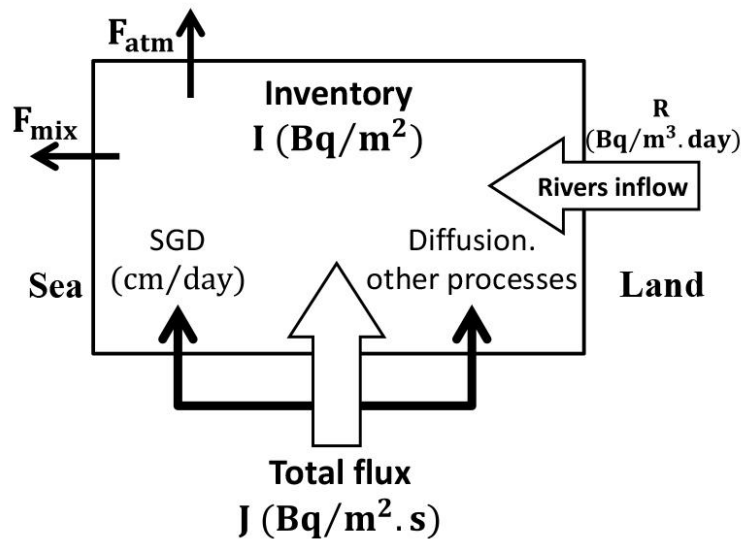
6-Durridge Co. Inc., USA



الف) سیستم اندازه‌گیری گاز ^{222}Rn در آب دریا (ب) سیستم اندازه‌گیری گاز ^{222}Rn در هوا
 شکل ۳: نقشه شماتیک تجهیزات مورد استفاده در اندازه‌گیری گاز ^{222}Rn در آب دریا و هوای محدوده مورد مطالعه

جذر و مدی و نزدیک محل اندازه‌گیری ^{222}Rn آب دریا قرار دارد (coastal spring، شکل ۱). نمونه‌برداری از رودخانه‌های محدوده مورد مطالعه نیز انجام شد. نمونه‌ها در بطری‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری شدند. سپس؛ غلظت ^{222}Rn آن‌ها بلافاصله پس از نمونه‌برداری با استفاده از تجهیزات جانبی RADH₂O اندازه‌گیری شد (نیک‌پیمان و همکاران، ۲۰۱۶).

۲- ثبت سری زمانی گاز ^{222}Rn در هوای محدوده مطالعاتی با بهره‌گیری از یک دستگاه RAD7 و فواصل زمانی ۲۰ دقیقه به منظور محاسبه میزان فرار گاز ^{222}Rn از آب دریا به اتمسفر (شکل ۳ ب). به همین منظور، سرعت جریان باد در نزدیک‌ترین ایستگاه به محدوده مورد مطالعه (meteorological station، شکل ۱) نیز از پایگاه اینترنتی آژانس هواشناسی ژاپن دریافت گردید.
 ۳- نمونه‌گیری از چشمه آب شیرین که در فلات



شکل ۴: منابع ورودی و خروجی و مصرف کننده ^{222}Rn آب دریا در محل اندازه‌گیری آن در آب دریا (اقتباس از برنت و دولایووا، ۲۰۰۳)

دارا است: (الف) تلاطم و جریان‌های سطحی آب دریا در اثر انرژی باد، (ب) جریان‌های همرفتی قائم آب دریا در اثر اختلاف دمای سطح و عمق آب، (ج) جریان‌های قائم ناشی از اختلاف چگالی آب دریا با استفاده از روابط بوسینسک و (د) جریان‌های افقی آب دریا در اثر نیروی کوریولیس.

۳- با توجه به بند (۲) مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی تغییرات دما و شوری آب، نوسانات سطح آب و فرکانس و دامنه امواج سطح آب دریا را دارد.

نمونه‌برداری رادون ۲۲۲ تنها در سطح دریا انجام شده است. بنابراین لازم است تا مدل برای موارد زیر بهینه‌سازی شود:

- ۱- تخمین نرخ فرار ^{222}Rn از آب دریا به اتمسفر
 - ۲- کاهش ^{222}Rn آب دریا در اثر واپاشی
 - ۳- شبیه‌سازی نوسانات رادون ۲۲۲ موجود در آب رودخانه‌ها با استفاده از نتایج شبیه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی و محاسبه نرخ تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه‌های اصلی محدوده مورد مطالعه.
- با توجه به اینکه مقادیر نزولات جوی و دبی رودخانه‌ها در محدوده مطالعاتی در سال ۲۰۰۲ بسیار نزدیک به مقادیر میانگین ۱۰ ساله می‌باشد، مدل براساس داده‌های سال ۲۰۰۲ طراحی و اجراء گردید. در نهایت، مدل بهینه‌سازی شده می‌تواند نوسانات غلظت ^{222}Rn آب دریا با منشاء رودخانه‌ای و تغییرات فصلی آن را شبیه‌سازی نماید.

نتایج

شکل ۵ نشان دهنده سری‌های زمانی دما، شوری، غلظت گاز ^{222}Rn و نوسانات سطح آب دریا در محدوده مطالعاتی است که در دو بازه زمانی که کشند و مه‌کشند ثبت شده‌اند. داده‌های سرعت باد ثبت شده در ایستگاه هواشناسی غرب محدوده

۴- برداشت نمونه ۲۰ لیتری از آب دریا در فاصله ۵ کیلومتری از خط ساحلی به منظور اندازه‌گیری غلظت ^{222}Rn آب دریا که از واپاشی رادیوم ۲۲۶ محلول در آب دریا تولید شده است. رادیوم ۲۲۶ (^{226}Ra) محلول در نمونه با استفاده از فیبرهای آکرلیک اشباع از منگنز استخراج گردید و با استفاده از دستگاه RAD7 اندازه‌گیری شد (seawater sample, شکل ۱). از تمام رودخانه‌هایی که به دریای یاتسوشیرو تخلیه می‌شوند در نوامبر ۲۰۱۲ (جریان پایه) نمونه‌برداری شد و غلظت گاز ^{222}Rn در آن‌ها بلافاصله پس از نمونه‌برداری آنالیز گردید (۶۱ رودخانه). هم‌چنین به طور همزمان دبی رودخانه‌ها اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، سری زمانی دبی کلیه رودخانه‌هایی که مجهز به ایستگاه‌های هیدرومتری بودند جمع‌آوری گردید (انجمن هیدروگرافی ژاپن).^۸ هدف از مطالعه رودخانه‌ها، ارزیابی و تخمین مقدار گاز ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای در دریا می‌باشد. برای این منظور، ضروری بود تا جریان‌های موجود در آب دریای یاتسوشیرو نیز شبیه‌سازی شود. با توجه به اینکه داده‌های عمقی رادون ۲۲۲ آب دریا موجود نبود، ابتدا مدل آب دریا براساس موارد زیر به کمک شرکت مهندسی آیدیا تهیه گردید:

- ۱- مدل در سه بعد و شرایط ناپایدار طراحی گردید که در آن ابعاد سلول‌های شبکه در جهت‌های X و Y برابر با ۴۵۰ متر می‌باشد. شبکه‌بندی مدل در جهت قائم به گونه‌ای است که از سطح آب تا کف دریا در هر نقطه به ۱۰ لایه تقسیم شده است. هم‌چنین، در بخش‌هایی از محدوده مدل که نوسانات سطح آب دریا بالا بوده و بایستی اثر امواج دریا در نظر گرفته شود، لایه سطحی خود نیز دستکم به ۵ لایه تقسیم شده است.
- ۲- مدل قابلیت تخمین و شبیه‌سازی موارد زیر را

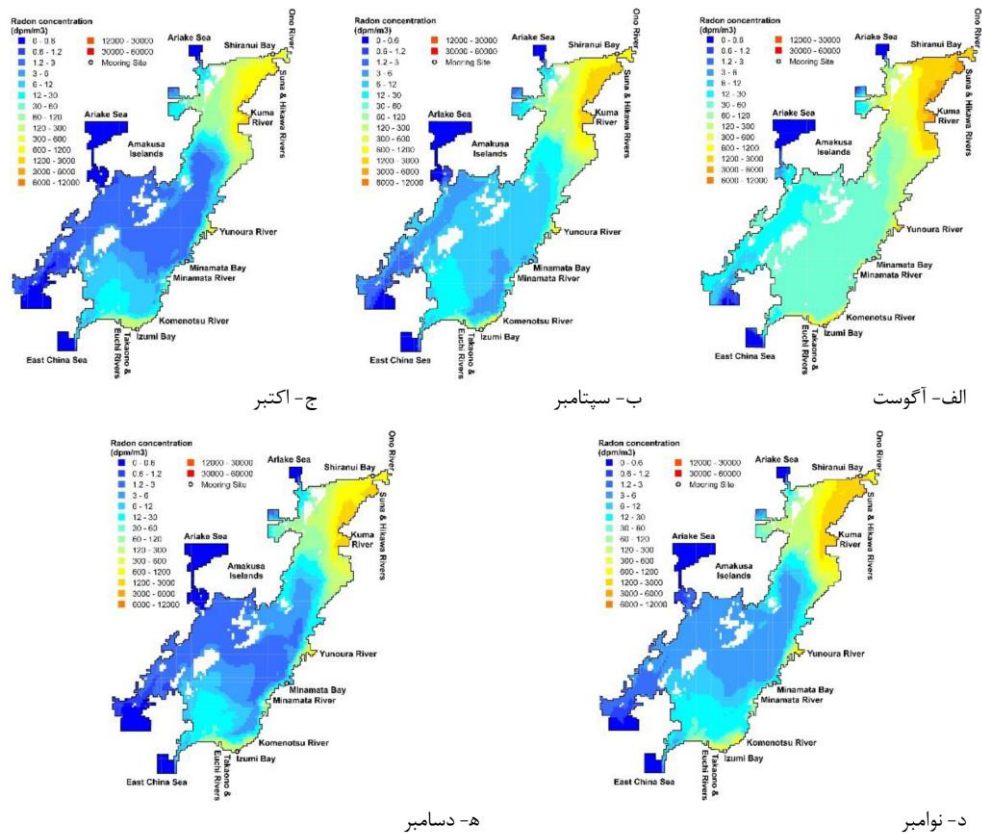
تراوش سنج نوع گرمایی ارزیابی نموده‌اند که نتایج به دست آمده ($12/5-79/2 \text{ cm day}^{-1} \text{ m}^{-2}$) به میزان قابل ملاحظه‌ای نزدیک به نتایج روش ^{222}Rn در این تحقیق می‌باشد. در شکل ۶ نتایج مدل‌سازی آب دریای یاتسوشیرو به منظور ارزیابی غلظت ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای برای ماه‌های آگوست تا دسامبر (از که‌کشند تا مه‌کشند) سال ۲۰۰۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که غلظت ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای در آب دریا در محدوده مورد مطالعه (بندر شیرانوئی) از حدود ۶۴۰ تا $2,640 \text{ dpm m}^{-3}$ در نوسان است. رودخانه کوما واقع در بخش شرقی دریای یاتسوشیرو بزرگترین رودخانه در محدوده مورد مطالعه است که حدود ۹۰٪ جریان آب سطحی ورودی به دریای یاتسوشیرو توسط آن تامین می‌گردد. غلظت ^{222}Rn در رودخانه کوما حدود $40,800 \text{ dpm m}^{-3}$ می‌باشد. بنابراین، مقدار زیادی از ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای توسط رودخانه کوما تامین می‌گردد که این نکته به خوبی در نتایج مدل‌سازی مشهود است.

بحث

با توجه به شکل ۶، لازم است تا نتایج مدل‌سازی آب دریای یاتسوشیرو در محاسبه نرخ جریان آب زیرزمینی به دریا در نظر گرفته شود (تصحیح مدل یک بعدی). مدل‌سازی دریای یاتسوشیرو (شکل ۶) براساس داده‌های سال ۲۰۰۲ انجام پذیرفته است؛ لذا، ابتدا بایستی نتایج مدل تهیه شده را با اطلاعات سال ۲۰۱۲ انطباق داد، زیرا:

۱- رودخانه کوما بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب دریا در بندر شیرانوئی اثر گسترده‌ای دارد (شکل ۶).

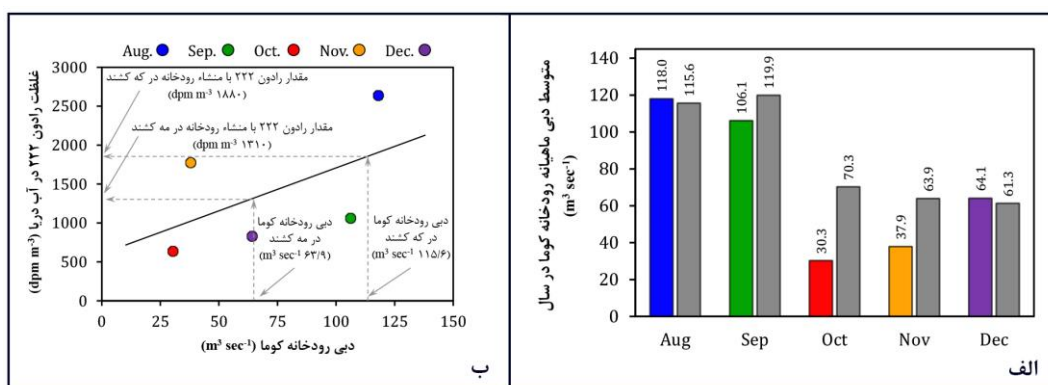
مطالعاتی نیز نمایش داده شده است. از شکل ۵ می‌توان دریافت که نوسانات غلظت ^{222}Rn آب دریا با تاخیر حدود یک ساعت دارای ارتباط معکوس با تغییرات سطح آب دریا است (ضریب همبستگی حدود $-0/88$). به این ترتیب، نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا تابعی از تغییرات جذر و مد (مقیاس روزانه) می‌باشد. علاوه بر این، با افزایش شدت دامنه امواج جذر و مد (مه‌کشند)، بر مقدار شوری آب دریا افزوده شده و میزان ^{222}Rn آب دریا کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش FSGD و افزایش RSGD در مه‌کشند است (مقیاس ماهیانه). به منظور محاسبه نرخ فرار ^{222}Rn از آب دریا به اتمسفر، از روابط برنت و دولایووا (۲۰۰۳) استفاده شده است (با توجه به اینکه روش مذکور روش پایه و رایج در مدل‌سازی یک بعدی تخلیه آب زیرزمینی به دریا به روش رادون ۲۲۲ است، از شرح آن خودداری می‌شود). برای این منظور، سری‌های زمانی سرعت باد، دمای آب دریا، غلظت ^{222}Rn در آب دریا و هوا به کار گرفته شدند. همچنین، مدل یک بعدی نرخ تراوش آب زیرزمینی به دریا نیز به کمک روابط مذکور محاسبه گردید (شکل ۵) که برای این منظور از سری‌های زمانی سطح آب دریا، دمای آب دریا و نرخ فرار ^{222}Rn از آب دریا به اتمسفر (شکل ۵) استفاده شد. علاوه بر این، غلظت ^{222}Rn آب زیرزمینی و آب دریا به ترتیب $141,780$ و 700 dpm m^{-3} بود که به‌عنوان کران‌های مدل یک بعدی در نظر گرفته شده‌اند. از محاسبه سطح زیر نمودار مدل یک بعدی، نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا در محدوده مورد مطالعه به دست می‌آید که به ترتیب برای که‌کشند و مه‌کشند برابر با $16/2$ و $13/7 \text{ cm day}^{-1} \text{ m}^{-2}$ می‌باشد. تانیگوچی و همکاران (۲۰۰۶ a) نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا محدوده مورد مطالعه را با استفاده از



شکل ۶: نتایج مدل سازی توزیع غلظت ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای در آب دریای یاتسوشیرو (مجاور بستر دریا) برای ماه‌های آگوست تا دسامبر ۲۰۰۲.

در سال ۲۰۱۲ (سال اندازه‌گیری SGD) متفاوت است (شکل ۷ الف).

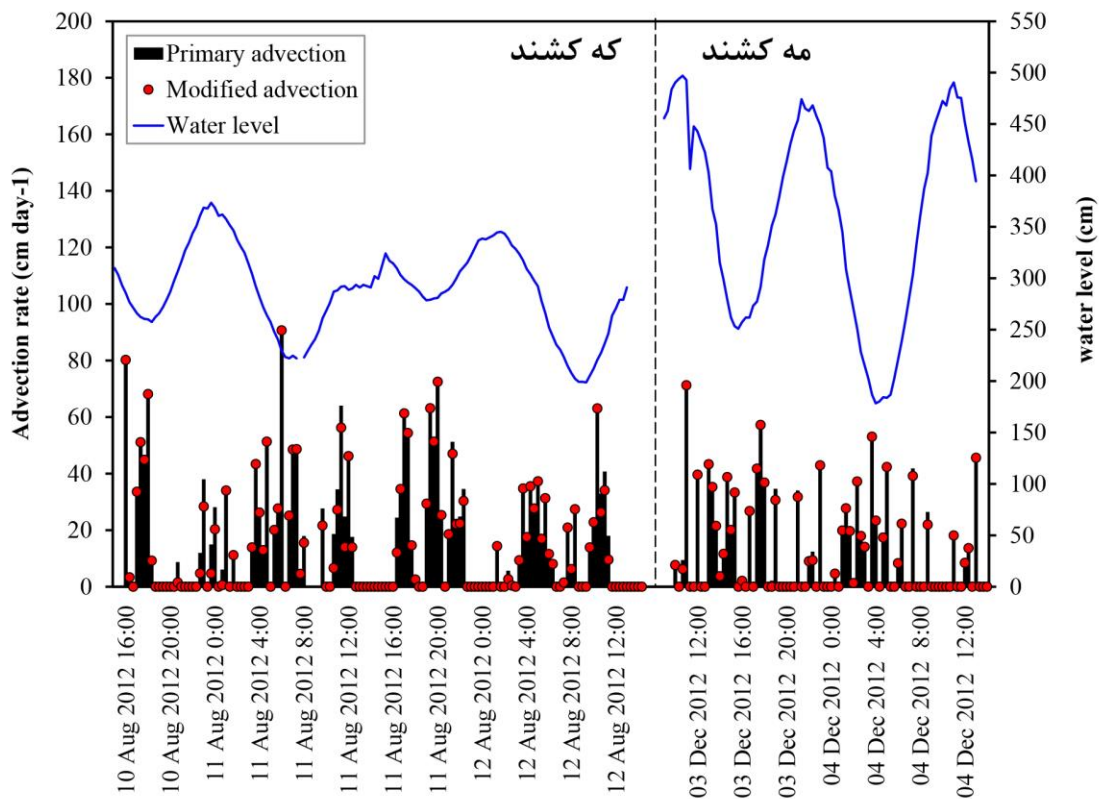
۲-دبی رودخانه کوما در ماه‌های آگوست تا دسامبر ۲۰۰۲ (سال مدل سازی) با دبی آن در ماه‌های نظیر



شکل ۷: فرآیند ارزیابی غلظت ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای در آب دریا و در بازه زمانی ثبت سری‌های زمانی. الف) متوسط ماهیانه دبی رودخانه کوما در سال‌های ۲۰۰۲ (آگوست تا دسامبر) و ۲۰۱۲ (پایگاه اطلاعاتی اینترنتی سیستم اطلاعات آب ژاپن، JWIS)، ب) نمودار غلظت ^{222}Rn آب دریا با منشاء رودخانه‌ای - دبی رودخانه کوما در سال ۲۰۰۲. مقادیر ^{222}Rn از نتایج مدل سازی استخراج شده است. ارقام مربوط به دبی رودخانه کوما معادل میله‌های رنگی در شکل ۷ الف هستند.

رودخانه‌های آب دریا در زمان ثبت سری‌های زمانی (شکل ۵) برآورد شد (به ترتیب حدود ۱,۸۸۰ و $۱,۳۱۰ \text{ dpm m}^{-3}$ برای که‌کشند و مه‌کشند). سپس، مدل یک بعدی برنت و دولایووا (۲۰۰۳) دوباره و با در نظر گرفتن ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای اجرا گردید (شکل ۸).

شکل ۷ ب تغییرات غلظت ^{222}Rn با منشاء رودخانه‌ای در آب دریا را بر حسب تغییرات متوسط دبی ماهیانه رودخانه کوما در سال ۲۰۰۲ نشان می‌دهد. نمودار خطی برازش شده در شکل مذکور معرف نرخ تغییرات غلظت ^{222}Rn با منشاء رودخانه در آب دریا به ازای تغییر در دبی رودخانه کوما می‌باشد. به کمک نمودار مذکور مقدار ^{222}Rn



شکل ۸: نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا پیش از تصحیح مدل یک بعدی (primary advection) و پس از تصحیح مدل یک بعدی (modified advection).

دریا در محدوده مورد مطالعه خواهد بود که برای که‌کشند و مه‌کشند به ترتیب برابر با ۰/۹۸ و ۰/۸۶ میلیون متر مکعب در روز می‌باشد. بنابراین، حجم آب ورودی به دریای یاتسوشیرو از نوار ساحلی شمالی آن در اثر پدیده SGD تقریباً معادل ۰/۶ حجم کل جریان‌های سطحی ورودی به آن است.

نتایج مدل یک بعدی تصحیح شده نشان می‌دهد که نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا در بازه‌های زمانی که‌کشند و مه‌کشند به ترتیب حدود ۱۵/۱ و $۱۳/۳ \text{ cm day}^{-1} \text{ m}^{-2}$ است. به این ترتیب، حاصل-ضرب مقادیر نرخ تخلیه آب زیرزمینی به دریا در مساحت محدوده با پتانسیل بالای SGD (۶/۵ کیلومتر مربع) برابر با حجم تخلیه آب زیرزمینی به

نتیجه‌گیری

آسیب‌پذیر بوده و متاثر از فعالیت‌های انسانی در نوار ساحلی مذکور است. همچنین، نوسانات جذر و مدی از عوامل اصلی در بروز پدیده SGD در محدوده مطالعاتی می‌باشد. اگرچه، بخش دیگر مطالعات انجام شده در آن دلالت بر تاثیرگذاری سایر نیروها نظیر جریان باد و امواج ناشی از آن دارد. علاوه بر این، مشخص گردید که وجود رودخانه‌های با دبی و غلظت ^{222}Rn بالا در مجاورت نقطه اندازه‌گیری سری زمانی اثر قابل توجهی بر نتایج مدل یک بعدی برنت و دولایووا (۲۰۰۳) نخواهد داشت.

با توجه به نتایج این تحقیق، علی‌رغم آنکه میزان عدم قطعیت در محاسبات انجام شده قابل توجه می‌باشد، این امکان فراهم شده است تا بتوان در مطالعات مشابه به جای نرخ جریان آب زیرزمینی به دریا، حجم تخلیه آب زیرزمینی به دریا را محاسبه نمود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دریای یاتسوشیرو در محدوده بندر شیرانوئی به میزان قابل توجهی با آبخوان‌های ساحلی در ارتباط است. بنابراین، علاوه بر خروج حجم قابل توجهی از منابع آب شیرین، اکوسیستم‌های ساحلی بسیار

منابع

-Burnett, W.C., 1999. Offshore springs and seeps are focus of working group, *Eos Trans, AGU* 80, p. 13-15.
-Burnett, W.C., Bokuniewicz, H., Huettle, M., Moore, W.S. and Taniguchi, M., 2003a. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone, *Biogeochemistry*, v. 66, p. 3-33.
-Burnett, W.C., Cable, J.E. and Corbett, D.R., 2003b. Radon Tracing of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Environments, *Land and Marine Hydrogeology*, ISBN: 978-0-444-51479-0, p. 25-43.
-Burnett, W.C., Cable, J.E., Corbett, D.R. and Chanton, J.P., 1996. Tracing groundwater flow into surface waters using natural ^{222}Rn , *Proceedings of the International Symposium on Groundwater Discharge in the Coastal Zone, Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)*, Moscow, July, v. 6-10, p. 22-28.
-Burnett, W.C., Cowart, J.B. and Deetae, S., 1990. Radium in the Suwannee River and Estuary: Spring and river input to the Gulf of Mexico. *Biogeochemistry*, v. 10, p. 237-255.
-Burnett, W.C. and Dulaiova, H., 2003. Estimating the dynamics of groundwater

input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 69, p. 21-35.
-Burnett, W.C., Kim, G. and Lane-Smith, D., 2001b. A continuous monitor for assessment of ^{222}Rn in the coastal ocean, *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 249(1), p. 167-172.
-Burnett, W.C., Taniguchi, M. and Oberdorfer, J.A., 2001a. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone *Journal of Sea Research*, v. 46(2), p. 109-116.
-Cable, J.E., Bugna, G.C., Burnett, W.C. and Chanton, J.P., 1996 a. Application of Rn-222 and CH_4 for assessment of groundwater discharge to the coastal ocean, *Limnology and Oceanography*, v. 41, p. 1347-1353.
-Cable, J.E., Burnett, W.C., Chanton, J.P. and Weatherly, G.L., 1996 b. Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon – 222, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 144, p. 591-604.
-Cable, J.E., Burnett, W.C. and Chanton, J.P., 1997. Magnitude and variations of groundwater seepage along a Florida

- marine shoreline, *Biogeochemistry*, v. 38, p. 189-205.
- Charette, M.A., Moore, W.S. and Burnett, W.C., 2008. Uranium and thorium series nuclides as Tracers of submarine groundwater discharge, *Radioactivity in the Environment*, v.13, p. 155-186.
- Corbett, D.R., 1999. Tracing Groundwater Flow into Surface Waters by Application of Natural and Artificial Tracers, Ph.D. Dissertation, Florida State University, 292 p.
- Huettel, M., Ziebis, W. and Forster, S., 1996. Flow-induced uptake of particulate matter in permeable sediments, *Limnology and Oceanography*, v. 41, p. 309-322.
- Hussain, N., Church, T.M. and Kim, G., 1999. Use of ^{222}Rn and ^{226}Ra to trace groundwater discharge into Chesapeake Bay, *Marine Chemistry*, v. 65, p. 127-134.
- Japan hydrographic Association: <http://www.jha.or.jp/en/jha/>
- Japan Meteorological Agency online database: http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=86&block_no=0846&year=2012&month=8&day=&view=
- Japan Water Information System (JWIS) online database: <http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=309111289909070>
- Kim, G. and Hwang, D.W., 2002. Tidal pumping of groundwater into the coastal ocean revealed from submarine Rn-222 and CH_4 monitoring, *Geophysical Research Letters*, v. 29(14), 1678 p., doi:10.1029/2002GL015093.
- Idea Co. 八代海流動モデルの構築業務，報告書，平成23年12月，いであ株式会社
- Kohout, F.A., 1966. Submarine springs: a neglected phenomenon of coastal hydrology, *Hydrology*, v. 26, p. 391-413.
- Lee, D.R., 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries, *Limnology and Oceanography*, v. 22, p. 140-147.
- Li, L., Barry, D.A., Stagnitti, F. and Parlange, J.Y., 1999. Submarine groundwater discharge and associated chemical input to a coastal sea, *Water Resources Research*, v. 35-11, p. 3253-3259.
- Martin, J.B., Cable, J.E., Swarzenski, P.W. and Lindenberg, M.K., 2005. Enhanced submarine ground water discharge from mixing of pore water and estuarine water, *Ground Water*, v. 42, p. 1000-1010.
- Moore, W.S., 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Rn enrichments, *Nature*, v. 380, p. 612-614.
- Moore, W.S., 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and seawater, *Marine Chemistry*, v. 20, p. 111-125.
- Moore, W.S., Krest, J., Taylor, G., Roggenstein, E., Joye, S. and Lee, R., 2002. Thermal evidence of water exchange through a coastal aquifer: implications for nutrient fluxes, *Geophysical Research Letters*, v. 29, 1029/2002GLO14923.
- Moore, W.S. and Shaw, T.J., 1998. Chemical signals from submarine fluid advection onto the continental shelf, *Journal of Geophysical Research—Oceans*, v. 103, p. 21543-21552.
- Nielsen, P., 1990. Tidal dynamics in the water table in a beach, *Water Resources Research*, v. 26, p. 2127-2134.
- Nikpeyman, Y., Hosono, T., Ono, M., Yang, H., Shimada, J. and Takikawa, K., 2016. Assessment of the spatial distribution of submarine groundwater discharge (SGD) along the Yatsushiro Inland Sea coastline, SW Japan, using ^{222}Rn method, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 307(93), p. 2123-2132.
- Nikpeyman, Y., Ono, M., Hosono, T.,

- Yang, H., Ichiyanagi, K., Shimada, J. and Takikawa, K., 2014. Distribution patterns of salinity and ^{222}Rn in Yatsushiro Inland Sea, Kyushu, Japan, IAHS Publications, v. 365, p. 49-54.
- Rama, W. and Moore, S., 1996. Using the radium quartet for evaluating groundwater input and water exchange in salt marshes, GCA, v. 60-23, p. 4245-4252.
- Riedl, R., Huang, N. and Machan, R., 1972. The subtidal pump: a mechanism of interstitial water exchange by wave action, Marine Biology, v. 13, p. 210-221.
- Shum, K.T. and Sundby, B., 1996. Organic matter processing in continental shelf sediments—the subtidal pump revisited, Marine Chemistry, v. 53, p. 81-87.
- Taniguchi, M., 2002. Tidal effects on submarine groundwater discharge into the ocean, Geophys Geophysical Research Letters, v. 29, 10.1029/2002GL014987.
- Taniguchi, M., Burnett, W.C., Cable, J.E. and Turner, J.V., 2002. Investigation of submarine groundwater discharge, Hydrological Processes, v. 16, p. 2115-2129.
- Taniguchi, M., Ishitobi, T. and Saeki, K., 2005. Evaluation of time-space distributions of submarine groundwater discharge, Ground Water, v. 43, p. 336-342.
- Taniguchi, M., Ishitobi, T., Shimada, J. and Takamoto, N., 2006a. Evaluation of spatial distribution of submarine groundwater discharge, Geophysical Research Letters, v. 33, L06605, doi:10.1029/2005GL025288.
- Yoshimoto, A., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Yonemura, K. and Ishizuka, H., 2013. U-Pb detrital zircon dating of pelitic schists and quartzite from the Kurosegawa Tectonic Zone, Southwest Japan, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, v. 108-3, p. 184-188.