محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۲، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحهٔ ۴۸۷-۴۷۵

شبیه‌سازی عددی سالانهٔ پخش جوی رادیونوکلوییدی و طراحی شبکهٔ پایش بهینه در واحد یکم نیروگاه بوشهر

حسین ملکوتی[1]*، امیر محمدیها[2]، مسعود فیضی‌نژاد[3]

۱. استادیار دانشکدهٔ علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان

۲. دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه هرمزگان

۳. دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹٤/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۸/۸

چکیده

با توجه به روند پرشتاب تبدیل زمین‌های کشاورزی به کاربری‌های ساخته‌شده پیرامون اغلب شهرهای ایران، ارزیابی سیاست‌های کشور و ارائهٔ راهکارهایی برای بهبود سیاست‌گزاری در این زمینه ضروری است. در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل چارچوب برخی از مهم‌ترین ابزارهای سیاست‌گزاری عمومی برای مدیریت رشد شهری و حفاظت زمین‌های کشاورزی معرفی می‌شود. سپس، تجارب حفاظتی کشورهای ایالات متحده، کانادا، بریتانیا، هلند و ایران بررسی و با روش تحلیل تطبیقی از نظر متغیرهایی مانند اهداف حفاظت، تفاوت‌های هنجاری مؤثر در سیاست‌گزاری و نحوهٔ استفادهٔ ابزارهای سیاستی مقایسه می‌شود. براساس بینش‌های به‌دست‌آمده از این مقایسه، ضعف‌ها و قوت‌ها و راهکارهای کلی بهبود نظام سیاست‌گزاری ایران برای حفظ زمین‌های کشاورزی اطراف شهرها ارائه می‌شود. براساس نتایج، مهم‌ترین چالش‌های ساختار سیاستی ایران، تخصیص غیرمنصفانهٔ هزینه‌های حفاظت بین ذی‌نفعان، نبود انسجام سیاست‌ها و بی‌توجهی به تأثیر تعاملات ذی‌نفعان در تبدیل زمین‌های کشاورزی است. برای اصلاح این موارد، پیشنهادهای زیر ارائه شده است: ۱) توسعهٔ ظرفیت سیاست‌گزاری و ارائهٔ مشوق به مالکان زمین‌های کشاورزی، ۲) تدوین چارچوب سیاست‌گزاری حفاظت زمین‌های کشاورزی شامل اولویت‌ها، استراتژی‌ها و ابزارهای سیاستی، ۳) حل و فصل مناقشات برای ایجاد تعادل بین منافع ذی‌نفعان. مهم‌ترین نقد ساختار مدیریتی ایران، نبود انسجام عملکرد سازمان‌های مسئول است. پیشنهاد می‌شود از طریق ایجاد سازمانی مستقل، مدیریت مسائل مربوط به حفاظت و کاربری زمین تجمیع شود.

کلیدواژه

الگوریتم جانمایی، پخش جوی رادیونوکلویید، شبکهٔ پایش، طراحی بهینه، مدل ADIM1.0.

۱. سرآغاز

با توجه به صنعتی‌شدن جوامع بشری بدیهی است که شناخت آلاینده‌ها، نحوهٔ گسترش و کنترل و کاستن آن‌ها به‌منظور حفاظت بیشتر از محیط‌زیست عامل بسیار مهمی در ادامهٔ حیات بشری نقش‌آفرینی می‌کند. پایش و مشاهده، ابزاری قدرت‌مند به‌منظور تشخیص و کنترل غلظت محیطی آلاینده‌هاست و کاربردپذیری آن زمانی افزایش می‌یابد که در ترکیب با مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی‌ها، به‌صورت روشی جامع در مدیریت آلاینده‌ها استفاده شود (Rao, 2009). از این‌رو، به‌منظور شناسایی نوع و میزان تغییرات آلاینده‌ها، در سال‌ها و دهه‌های گذشته، شبکه‌های پایش محیطی در بسیاری از کشورها و برای مقاصد متعددی ایجاد و گسترش داده شده است.

شبکه‌های پایش و دیدبانی محیطی معمولاً به‌گونه‌ای

* نویسنده مسئول: Email: malakooti@hormozgan.ac.ir

طراحی می‌شود که متغیرهای محیطی مورد نظر برای سلامت انسان و زیست‌بوم‌ها را نمایان سازد. این شبکه‌ها نه‌تنها باید تغییرات هر کمیت و الگوهای پس‌زمینه را نشان دهد، بلکه باید توانایی نمایش مقادیر فرین پارامتر مورد نظر طراحی شبکه را در مواقع غیرمنتظره نیز داشته باشد. انواع مختلفی از شبکهٔ پایش آلاینده‌های محیطی شامل کیفیت هوا، آب، تابش و دیدبانی‌های اقلیمی طراحی می‌شود. مسئلهٔ طراحی شبکه اهمیت زیادی هم به‌دلیل سلامت عمومی انسان‌ها و هم هزینه‌های ساخت و نگه‌داری ایستگاه‌های مشاهده‌ای دارد (Chang et al., 2007).

پیش از شروع طراحی شبکهٔ دیدبانی مهم است که مشخص شود هدف از طراحی شبکه چه نوع اندازگیری‌ای است. سؤال اساسی در این بین این است که هدف از این شبکه اندازه‌گیری مقادیر کلی و میانگین کمیت است، یا اینکه داده‌های لحظه‌ای برای سامانه‌های هشدار آنی نیاز داریم، یا شناسایی الگوهای تغییرات بلندمدت هر متغیر به‌منظور مدیریت منابع آلاینده در آینده مورد نیاز است (Mazzeo and Venegas, 2010).

شبکه‌های پایش پرتوی به‌منظور اندازه‌گیری نرخ دوز گامای[1] تولیدشده توسط منابع طبیعی (مقدار زمینه) و مصنوعی ناشی از سازه‌های ساخت بشر (تأسیسات هسته‌ای) طراحی می‌شود. به‌ویژه رخداد حوادث انفجاری هسته‌ای مانند تری مایل آیلند آمریکا (۱۹۷۹)، چرنوبیل (۱۹۸۶)، و فوکوشیما (۲۰۱۱) اهمیت استقرار سامانه‌های پایش پرتوی هشدار آنی را دوچندان کرده است. از معیارهای درنظر گرفته‌شده در این طراحی‌های شبکهٔ پایش می‌توان به خصوصیات محیطی اطراف نیروگاه، پارامترهای هواشناختی به‌عنوان مسئول انتقال آلایندهٔ ذره‌ای در منطقه، الگوی مکانی چگالی جمعیت (تعداد و سن)، فاصله از شبکهٔ راه‌ها و برق و جزآن اشاره کرد (Melles et al., 2010). هدف اصلی این مطالعه طراحی شبکهٔ پایش پرتوی ثابت برای اندازه‌گیری دز گامای محیطی در نواحی اطراف نیروگاه اتمی بوشهر است. بدین منظور سعی شده است تعداد بهینهٔ این ایستگاه‌ها و جانمایی آن‌ها در این شبکه مشخص شود.

مطالعات متعددی در زمینهٔ طراحی شبکهٔ دیدبانی آلاینده‌ها و بهینه‌سازی آنها انجام گرفته است. Chen و همکاران (۲۰۱۵) به‌منظور طراحی شبکهٔ ایستگاه‌های مؤثر سنجش آلودگی هوا در ناحیه‌ای صنعتی متشکل از واحدهای شیمیایی و پتروشیمی از روش چندهدفهٔ بهینه‌سازی‌کننده استفاده کردند. آن‌ها در ابتدا با استفاده از داده‌های هواشناسی میدان باد و دما و با به‌کاربستن مدل پخش گائوسی، پخش آلاینده‌های منتشرشده از واحدهای صنعتی موجود در منطقهٔ مورد مطالعه را شبیه‌سازی کردند. سپس، برنامهٔ چندهدفهٔ خطی ترکیبی پارتو[2] به‌منظور طراحی شبکهٔ پایش بهینه توسعه داده شد. بهینه‌سازی بر اساس بیشینه‌کردن قابلیت کشف تکرار تجاوز از آستانهٔ کیفیت هوا در وقایع بالقوهٔ آلودگی در منطقهٔ صنعتی و هم‌زمان کمینه‌کردن هزینهٔ کلی شبکهٔ دیدبانی عمل می‌کند. در این مطالعه چندین سناریو با قید هزینه‌های مختلف بررسی شده است.

Henríquez و همکاران (۲۰۱۵) از روشی پویا به‌منظور طراحی بهینهٔ شبکهٔ سنجش کیفیت هوا در سانتیاگوی شیلی استفاده کردند. در این مطالعه از روشی بهینه برای اضافه یا کم‌کردن ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا بهره‌بردند و توزیع چگالی جمعیت و الگوهای انتشار آلاینده‌ها را فاکتورهای ورودی روش بهینه‌سازی به‌منظور جایابی ایستگاه‌های پایش استفاده کردند.

Zoroufchi Benis و همکاران (۲۰۱۵) از دو الگوریتم بهینه‌سازی ضداستعماری[3] و الگوریتم ژنتیک بهمنظور بهینه‌سازی شبکهٔ پایش آلاینده‌های هوا در ناحیه‌ای صنعتی بهره بردند. رویکرد این شبکهٔ دیدبانی بر سه شاخص استوار بود: ۱. بیشینهٔ منطقهٔ تحت پوشش شبکه، ۲. قابلیت بیشترین کشف تجاوز از آستانهٔ استاندارد آلودگی هوای محیط و ۳. حساسیت ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی به منابع

انتشار. نتایج مطالعه نشان داد کارایی هر دو الگوریتم بهینه‌سازی قابل قبول است و اینکه الگوریتم ضداستعماری کارایی بهتری از الگوریتم ژنتیک ارائه می‌کند.

Koohkan و همکاران (۲۰۱۲) شبکهٔ مشاهداتی بین‌المللی رادیونوکلوییدی به‌منظور پایش انفجارات اتمی در کل جهان طراحی کردند. آن‌ها توانایی سامانهٔ جهانی پایش به‌منظور مدلسازی معکوس منبع نشر (تخمین چشمه) را ارزیابی کردند. در مطالعهٔ مذکور، به‌منظور شبیه‌سازی بلندمدت از مدل لاگرانژی FLEXPART و از روش Mazzeo و Venegas (۲۰۱۰) به‌منظور طراحی و بهینه‌سازی شبکه بهره برده شده است.

Nejadkoorki و همکاران (۲۰۱۱)، به‌منظور طراحی شبکهٔ دیدبانی بهینهٔ کیفی هوا با کمترین تعداد ایستگاه اندازه‌گیری در شهر یزد از روش انتخاب مکان ایستگاه بر اساس بیشترین واریانس خطا استفاده و از روش زمین‌آماری کریجینگ استفاده کردند. این امر موجب می‌شود که کمترین میزان خودهمبستگی مکان-زمانی میان ایستگاه‌ها نیز رخ دهد.

Wu و همکاران (۲۰۱۰) برای شبکهٔ پایش ازن تروپوسفری، ابتدا دو روش درون‌یابی کریجینگ را آزمودند. سپس، شبکه را بهینه‌سازی کردند. در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های مدل آلودگی Polair3D برای دقت کارایی کریجینگ با توجه به مدل کوواریانس و میانگین‌های آماری به‌کار برده شد. کارایی دو روش کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی توسط خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) در بین مشاهدات و مقادیر درون‌یابی غلظت (میکروگرم بر مترمکعب) میانگین ساعتی ازن در ایستگاه‌های اندازه‌گیری‌نشده ارزیابی شد.

Mazzeo و Venegas (۲۰۱۰) به کمک روش بهینه‌سازی چندمنظوره در پایش آلودگی هوا در شهر بوینس‌آیرس آرژانتین شبکه‌ای مشاهداتی طراحی کردند. روش کار آن‌ها به این صورت بود که ابتدا به‌کمک دو مدل پخش آلودگی به نام‌های DAUMOD (برای چشمه‌های منطقه‌ای شهری) و AEROMOD (برای چشمه‌های نقطه‌ای شهری)، الگوی پخش بلندمدت آلاینده‌های مختلف را به‌صورت دوبعدی روی شهر بوینس‌آیرس شبیه‌سازی کردند. سپس، به کمک روش بهینه‌سازی چند منظوره با محاسبهٔ دو کمیت، تخمین امتیاز تخطی[۴] و تخمین فاکتور جمعیت[۵] در هر نقطهٔ شبکه، کمیتی به نام امتیاز کل[۶] را به هر نقطهٔ شبکه نسبت دادند و نقاط مناسب برای ایجاد ایستگاه را نقاطی انتخاب کردند که دارای امتیاز کل بالاتری نسبت به نقاط اطراف بود.

Melles و همکاران (۲۰۱۰) برای اندازه‌گیری نرخ دوز گاما در کشورهای فرانسه و آلمان سعی در بهینه‌کردن شبکهٔ پایش موجود کردند. آن‌ها ابتدا به‌کمک روش کریجینگ از داده‌های ایستگاه‌های موجود به کل منطقه درون‌یابی کردند و با محاسبهٔ واریانس خطای درون‌یابی جانمایی ایستگاه‌های جدید را جایی درنظر گرفتند که بیشترین خطای واریانس را دارد.

Ahmed (۲۰۰۴) به‌کمک روش‌های زمین‌آماری شبکهٔ مشاهداتی دمای هوا را بهینه‌سازی کرد. روش کار بدین شکل بود که ابتدا در شبکهٔ پایش موجود با ۲۱ ایستگاه در منطقهٔ مورد نظر به نقاط شبکه درون‌یابی شد. برای بهینه‌کردن شبکهٔ دیدبانی، پنج ایستگاه در مکان‌هایی اضافه شد که بیشترین مقدار σ_k (انحراف معیار خطای تخمین در سلول kام) محاسبه شده بود.

Holland و همکاران (۱۹۹۸) در مطالعه‌ای با عنوان «پیش‌بینی مکانی دی‌اکسید سولفور در شرق ایالات متحده» به‌منظور بهتر پیش‌بینی‌کردن غلظت آلایندهٔ SO_2 در منطقهٔ مورد مطالعه‌شان از روش‌های مختلف زمین‌آماری و از مشاهدات ایستگاه‌های اندازه‌گیری بهره بردند. بهترین شبکه و بهینه‌ترین تعداد ایستگاه‌ها، با توجه به میزان خطای تخمین نسبی (انحراف معیار) پیشنهاد داده شده بود.

اشرفی و همکاران (۱۳۸۶) برای شهر تهران جانمایی ایستگاه جدید را بررسی کردند. در مطالعهٔ مذکور، با توجه به اینکه استاندارد متوسط به ازای هر میلیون جمعیت هفت

ایستگاه است و با دسته‌بندی تهران به سه بخش چگال، همسایگی و منطقه‌ای، بزرگراه‌ها مناطق چگال و با استفاده از روش آماری همبستگی پیرسون ۴۴ ایستگاه جدید سنجش آلودگی هوا جانمایی شد.

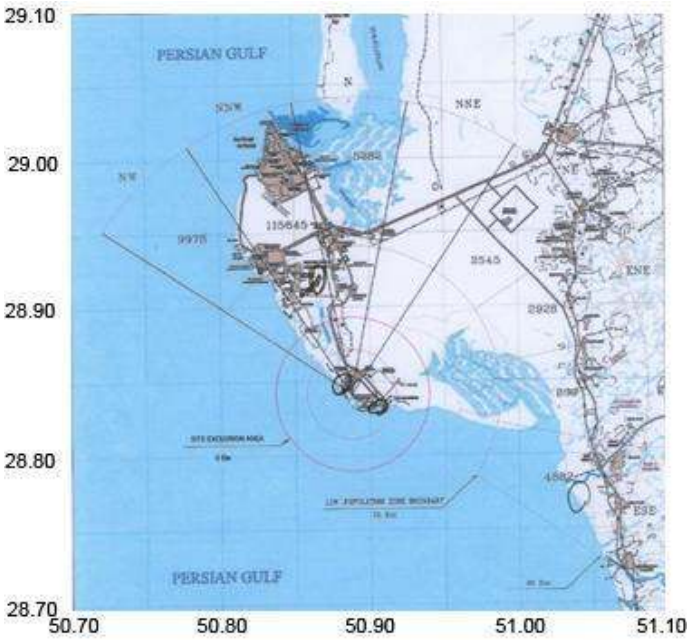
کفاش چرندابی و آل‌خلیفه (۱۳۹۰) از روش PROMETHEE برای جانمایی ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای تهران استفاده کردند. آن‌ها از پنج فاکتور تراکم جمعیت، فاصله از ایستگاه‌های موجود، فاصله از درختان، فاصله از دیوار ساختمان‌ها و فاصله از خیابان‌ها به‌منظور طراحی شبکه بهره بردند. نتایج مطالعه نشان‌دهندهٔ نیاز به احداث ایستگاه‌های جدید در حوالی بزرگراه‌های فتح و بسیج، میدان امام حسین، بزرگراه شهید عراقی و بزرگراه یادگار امام بود.

کسایی رودسری و همکاران (۱۳۸۹) شبکهٔ باران‌سنجی موجود در استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی را اصلاح و با تغییر در مکان ایستگاه‌ها و تعداد آن‌ها، شبکهٔ دیدبانی بارش در این منطقه را بهینه‌سازی کردند. با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ و ارزیابی ضریب تغییرات درون‌یابی در هر نقطهٔ شبکه، محل نصب ایستگاه‌های جدید در نقاطی انتخاب شد که ضریب تغییرات بیشترین مقدار را به‌خود گرفته بود.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقهٔ مورد مطالعه

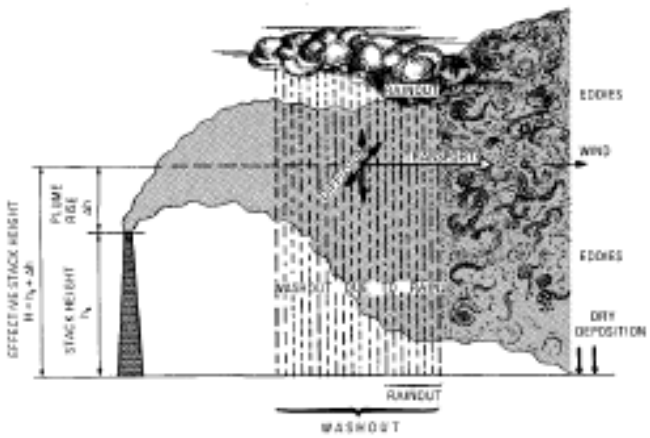
استان بوشهر از استان‌ها جنوبی ایران و بین ۲۷درجه و ۱۹دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۶ دقیقهٔ عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۹ دقیقهٔ طول شرقی قراردارد. نیروگاه اتمی بوشهر در مختصات ۲۸ درجه و ۴۹ دقیقهٔ عرض جغرافیایی شمالی و ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقهٔ طول جغرافیایی شرقی در این استان و در ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهر بوشهر قرار گرفته است (شکل ۱). در این مطالعه الگوی پخش خروجی رادیونکلوییدی تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری اطراف چشمهٔ نشر (نیروگاه اتمی بوشهر) منطقهٔ مورد مطالعه درنظر گرفته شده است.



شکل ۱. منطقهٔ مورد مطالعه و محل سایت اتمی بوشهر در مختصات ۲۸ درجه و ۴۹ دقیقهٔ عرض جغرافیایی شمالی و ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقهٔ طول جغرافیایی شرقی

۲.۲. معرفی مدل پخش جوی

به‌طور کلی، مدل‌های پخش جوی و اعتبارسنجی آن‌ها بر مطالعات میدانی استوار است و انتخاب پارامترهای ورودی و پیکربندی مدل‌ها در موقعیت‌های خاص، بستگی به ویژگی‌های سایت و شرایط رهاسازی دارد. بنابراین، انتخاب مدل یا ترکیبی از مدل‌ها برای سایت مورد نظر با بررسی دقیق سایت و ویژگی‌های چشمه حاصل می‌شود که در بحث پخش جوی نقش مهمی دارد. وقتی پرهٔ آلاینده‌ای (برای مثال، رادیواکتیو) در معرض جریان هوا قرارمی‌گیرد، توسط میدان منتقل و توسط پیچک‌ها (تلاطم) پخش می‌شود. حالت کلی پخش پرهٔ آلودگی از منبع نقطه‌ای به درون جو و فرایندهای درگیر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. فرایندهای مؤثر در پخش جوی از منبع نقطه‌ای

کد پخشی به‌کار گرفته‌شده در این مطالعه ADIM1.0از معادله گائوسی دوگانه[۷] به‌صورت زیر استفاده می‌کند.

(۱)

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}+\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

که در آن،

$C(x,y,z)$= غلظت مادهٔ آلاینده در نقطهٔ (x,y,z) (کیلوگرم یا بکرل بر مترمکعب (Bq/m^3))

Q= مقدار مادهٔ رهاشده (گرم یا بکرل بر ثانیه)

σ_y, σ_z= ضرایب پخش در جهات افقی و قائم (متر) عمود بر راستای باد افقی

u= سرعت باد در ارتفاع رهاسازی (متر بر ثانیه)

پخش در دورهٔ بلندمدت (برای مثال، فصلی و سالیانه) از بررسی توزیع آماری غلظت در مدت زمان مورد نظر حاصل می‌شود. در این حالات رابطهٔ (۱) به‌صورت زیر تنظیم می‌شود.

(۲)

$$\bar{C}_{LT}=\frac{\sqrt{2/\pi}Q}{\sigma_z u}\sum_{n=-1}^{n=+1}\exp\left(-\frac{(H+2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

در عمل برای محاسبات پخش بلندمدت از داده‌های آماری گلباد[۸] شامل فراوانی سمت و سرعت باد در کلاس‌های مختلف پایداری جوی استفاده می‌شود و معمولاً محاسبات در شانزده قطاع جهتی به شکل (N,NNE,NE,...,NNW) انجام می‌شود. در این حالت برای یک قطاع مشخص معادلهٔ پخش به صورت زیر است.

(۳)

$$\bar{C}_{LT} = \frac{\sqrt{2/\pi}Q}{\sigma_z u \theta x} \sum_{n=-1}^{n=+1} \exp\left(-\frac{(H+2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

با درنظر گرفتن میزان فراوانی سمت و سرعت باد برای هر بخش معادلهٔ نهایی پخش بلندمدت به‌صورت زیر خواهد شد. لازم به ذکر است در عمل برای به‌دست آوردن الگوی پخش از فاکتور پخش استفاده می‌شود که به صورت C_{LT}/Q تعریف می‌شود.

(۴)

$$\frac{\bar{C}_{LT}(x)}{Q} = \frac{0.0203}{\sigma_z u x} \sum_{n=-1}^{n=+1} \exp\left(-\frac{(H+2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

در معادله فوق،

$\bar{C}_{LT}(x)$= غلظت بلندمدت آلاینده برای سکتوری دلخواه در فاصلهٔ x از چشمه

H = ارتفاع مؤثر چشمه (متر)

L = ارتفاع لایهٔ آمیخته (متر)

رابطهٔ (۴) اساس کد ADIM1.0 را تشکیل می‌دهد که با آن می‌توان تمامی پارامترهای معادله را ارزیابی کرد. برای آشنایی بیشتر با این مدل و نتایج اجرای آن به مقالهٔ فیضی‌نژاد و خاموشی (۱۳۸۳) مراجعه کنید.

۳.۲. الگوریتم جانمایی

در این مطالعه از روش درون‌یابی و ایجاد تابع تخمین از تابع اصلی بهره‌گرفته شده است. الگوریتم جانمایی استفاده شده در این مطالعهٔ مکان‌یابی نقاط با بیشترین انحراف معیار درونیابی (σ) است. علت این انتخاب این است که در روش‌های درون‌یابی معیار اصلی کار این است که خطای درون‌یابی کمینه شود. از طرفی، متداول‌ترین روش کمینه‌کردن این خطا قراردادن مقادیر معلوم در نقاطی است که بیشترین میزان خطا وجود دارد و درون‌یابی مجدد با مقادیر جدید انجام می‌شود. محل احداث ایستگاه‌های دیدبانی همان نقاطی در نظر گرفته می‌شود که بیشترین مقدار خطا ارائه شده است. از این روش در مطالعات زیادی مانندZoroufchi Benis و همکاران (۲۰۱۵)، Wu و همکاران (۲۰۱۰)، Ahmed (۲۰۰۴)، کسایی رودسری و همکاران (۱۳۸۹)، Holland و همکاران (۱۹۹۸) به‌منظور طراحی شبکهٔ دیدبانی استفاده شده است.

الگوریتم جانمایی در این مطالعه در محیط نرم‌افزار Matlab طراحی و پیاده‌سازی شد. تابع پخش دوبعدی پخش گائوسی به‌صورت ماتریس مربعی در این برنامه ورودی اصلی در نظر گرفته شد. الگوریتم تدوین‌شده به‌منظور جایابی ایستگاه‌های شبکهٔ پایش بدین صورت عمل می‌کند که پس از خواندن ماتریس پخش، به‌صورت گام‌به‌گام، موقعیت اولین تا آخرین ایستگاه را مشخص می‌کند. این مراحل به شرح زیر است:

۱. کد با جستجو در میان تمامی مقادیر ماتریس اصلی الگوی پخش، مقادیر بیشینه و کمینهٔ تابع اصلی را می‌یابد و در ماتریس جدیدی ذخیره می‌کند.

۲. با درنظر گرفتن مقادیر صفر در چهار گوشهٔ ماتریس و با استفاده از مقادیر بیشینه و کمینهٔ ماتریس اصلی، میان این شش مقدار درون‌یابی انجام می‌دهد و تابع حدس اولیه ایجاد می‌کند که اندازهٔ آن دقیقاً برابر با ماتریس اصلی است.

۳. با محاسبهٔ انحراف معیار تفاضل تابع اصلی و تخمین، نقطهٔ بعدی انتخابی برای استقرار اندازه‌گیری را درایه‌ای از ماتریس انتخاب می‌کند که انحراف معیار، بیشترین مقدار را نسبت به الگوی پخش اصلی داشته باشد.

۴. در گام بعدی فرض می‌شود در این نقطه که بیشترین خطا مشاهده شده است، ایستگاه سنجش می‌گیرد و مقدار آن دقیقاً برابر خروجی نتایج مدل پخش در آن نقطه است. به‌عبارتی، مقدار درایه از تابع اصلی در تابع تخمین جایگزین می‌شود.

۵. حال با داشتن هفت نقطه مجدداً درون‌یابی تکرار و تابع تخمینی جدیدی از تابع پخش اصلی حاصل می‌شود. گام دوم، دوباره تکرار و درایهٔ با بیشترین

انحراف معیار میان تابع اصلی و تابع تخمینی جدید یافته و گام سوم تکرار می‌شود.

۶. این روند به‌همین ترتیب ادامه خواهد یافت تا تابع تخمین بتواند بیشترین شباهت را به تابع اصلی پخش پیداکند یا تا اینکه موقعیت آخرین ایستگاه یافت شود.

۴.۲. روش شناسی

همان‌گونه که گفتیم هدف از این مطالعه، بررسی طراحی بهینهٔ شبکهٔ پایش (تعداد و موقعیت بهینهٔ ایستگاه‌ها) در محدودهٔ ۱۰۰ کیلومتری اطراف نیروگاه اتمی بوشهر است. به‌منظور نیل به این هدف اقدام‌های لازم در چهار مرحلهٔ اصلی دسته‌بندی می‌شود:

الف) نخست، با استفاده از شبیه‌سازی‌های پخش بلندمدت جوی به کمک پارامترهای میدان باد غالب، نسیم دریا و خشکی، کلاس پایداری و دیگر پارامترهای ورودی کد، الگوی پخش رادیونکلوییدی حاصل از کارکرد عادی نیروگاه تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری حاصل می‌شود. ابزار به‌کار گرفته‌شده بدین منظور کد ADIM1.0 بود که فیضی‌نژاد و خاموشی (۱۳۸۳) تدوین، تست و معرفی کرده‌اند. اطلاعات مشاهداتی جوی دکل و ایستگاه هواشناسی نیروگاه به‌منظور ورودی کد در خلال ۲۰۱۱ و اطلاعات پایهٔ نشری نیروگاه برای ترکیب و غلظت رادیونکلوییدی نشر در شرایط کارکرد عادی استفاده شد. تفاوت اصلی کد به‌کار گرفته شده در این تحقیق با کد معرفی‌شدهٔ فیضی‌نژاد و خاموشی (۱۳۸۳)، مربوط به ارتقای روش به‌حساب‌آوردن توپوگرافی در مدل پخش گائوسی بر اساس Arya (۱۹۹۹) بود و اینکه در مطالعهٔ حاضر بازهٔ زمانی مورد مطالعه برای ارزیابی الگوی پخش سال ۲۰۱۱ (در مطالعهٔ مذکور ۲۰۰۲) بوده است.

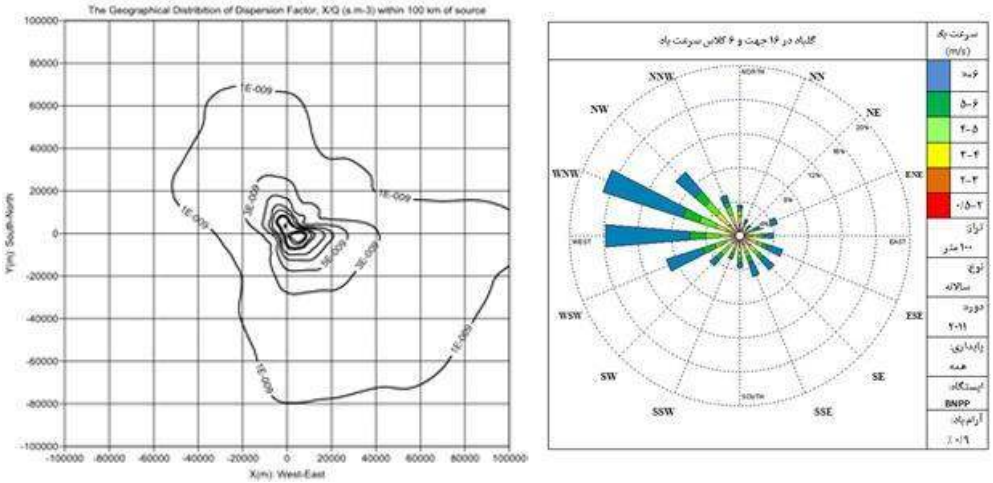
ب) به‌کمک یکی از روش‌های درون‌یابی، الگوی پخش شعاعی در منطقه (خروجی مدل پخش)، به الگوی مربعی به‌طور نمونه با تفکیک ۵ کیلومتر مربعی تبدیل خواهد شد.

ج) الگوی پخش بلندمدت با شبکهٔ مربعی به کد نگارش‌شده بر اساس الگوریتم جانمایی، داده پایهٔ ورودی ارائه خواهد شد.

د) با اعمال الگوریتم جانمایی محل استقرار ایستگاه‌ها مشخص خواهد شد و سری‌های خطای نسبی، مطلق و سایر پارامترهای آماری به‌منظور ارزیابی تعداد ایستگاه بهینه مطالعه می‌شود.

۳. نتایج

نمونه‌ای از شبیه‌سازی یک‌سالهٔ پخش رادیونکلوییدی به‌وسیلهٔ کد ADIM1.0 شامل نمودار گلباد سالانه (۲۰۱۱) و کنتورهای پخش در شعاع ۱۰۰ کیلومتری به ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده است.



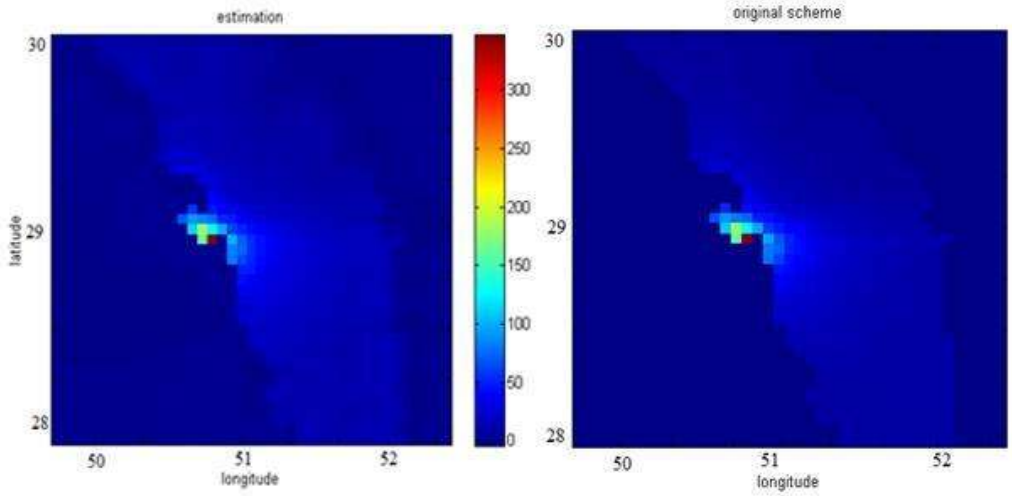
شکل ۳. گلباد سالانهٔ سال ۲۰۱۱ (سمت راست) و الگوی پخش نیروگاه بوشهر تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری نیروگاه Bq/m^3 (سمت چپ)

الگوی پخش رادیونکلوییدی حاصل برای سال ۲۰۱۱ از نظر توزیع مکانی شباهت کاملی با الگوی فیضی‌نژاد و خاموشی (۱۳۸۳) دارد، با این تفاوت که مقادیر آنومالی بیشینه در مقیاس $۱۰^{-۱۲}$ بکرل بر مترمکعب کمتر و آنومالی کمینه در همین مقیاس افزایش نشان می‌دهد. این تفاوت بیشترمربوط به تفاوت در اطلاعات میدان باد و پایداری در دو سال ۲۰۰۲ و ۲۰۱۱ است.

همان‌گونه که گفتیم، در این مطالعه نخست، الگوی پخش شعاعی حاصل از شبیه‌سازی صورت‌گرفته با کد ADIM1.0 استفاده شد که قطاع‌های شانزده‌گانهٔ تصویرشده با استفاده از درون‌یابی کریجینگ ساده به الگوی ماتریسی مربعی تبدیل شد. علت استفاده از این روش درون‌یابی این بود که واریانس خطای کوچک‌تری نسبت به روش‌های دیگر مرسوم درون‌یابی مانند IDW و Spline دارد. به‌کمک این داده‌های نقطه‌ای و با بهره‌بردن از درون‌یابی کریجینگ ساده الگوی پخش با تفکیک ۵ کیلومتری به‌دست آمد که نتایج درون‌یابی در شکل ۴ (سمت راست) نمایش داده شده است. انحراف معیار خطای درون‌یابی کریجینگ ساده برای الگوی پخش Bq/m^3 $۱۰^{-۱۰}\times$ ۲۰/۴ به‌دست آمد. بیشینهٔ مقدار آن Bq/m^3 $۱۰^{-۱۰}\times$ ۳۴۸ و کمینهٔ مقدار آن Bq/m^3 $۱۰^{-۱۰}\times$ ۴/۶ و با میانگین مقدار Bq/m^3 $۱۰^{-۱۰}\times$ ۱۵ است. اگر به شکل الگوی پخش توجه شود ملاحظه می‌شود که الگوی پخش بلندمدت همان‌طور که انتظار داشتیم از الگوی باد غالب منطقه پیروی کرده و در راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است. آثار نسیم دریا نیز در برخی مناطق بر الگوی نشر اثر گذاشته است.

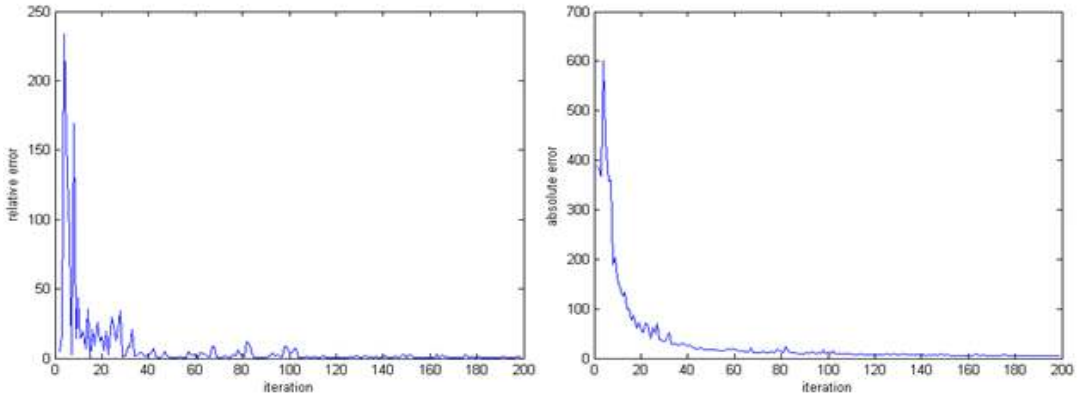
به‌دلیل اینکه مقادیر غلظت رادیواکتیوی بسیار کوچک و از مرتبهٔ Bq/m^3 $۱۰^{-۱۰}$ بکرل بر مترمکعب است، به‌منظور راحتی کار، پیش از انتقال تابع پخش به برنامهٔ جانمایی، مقادیر غلظت به $۱۰^{۱۰}$ ضرب شد.

در مرحلهٔ بعد، این الگوی پخش از نرم‌افزار Arc GIS به محیط Matlab به عنوان تابع ورودی داده شد. سپس، الگوریتم جانمایی اجرا شد. پس از دویست مرحله تکرار روش اشاره‌شده (زیرعنوان ۳.۲) به‌منظور پیداکردن سلولی که در هر مرحله بیشترین انحراف معیار تخمین (قدرمطلق تفاضل میان تابع اصلی و تابع برآورد) را دارد منجر به تولید الگوی تخمین از الگوی پخش اصلی می‌شود (شکل ۴ سمت چپ). همان‌گونه که مشاهده می‌شود صحت روش اشاره شده از نتیجهٔ کار کاملاً مشخص می‌شود، به‌طوری که الگوی تخمینی توانسته با دقت بالایی الگویی اصلی را تولید کند.



شکل ۴. الگوی پخش که به کمک روش کریجینگ ساده از شبکهٔ شعاعی به روی شبکهٔ مربعی با تفکیک ۵×۵ کیلومتر درون‌یابی شده (سمت راست) و الگوی حاصل پس از دویست مرتبه تکرار روش جانمایی ارائه‌شده (سمت چپ) Bq/m^3 $۱۰^{-۱۰}$

شکل ۵ (سمت راست) خطای مطلق در هر مرحله و شکل ۵ (سمت چپ) خطای نسبی در هر مرحله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پس از دویست بار تکرار الگوریتم، شیب تغییرات خطای مطلق بسیار کاهش می‌یابد. همین نکته در رفتار تغییرات خطای نسبی نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۵. تغییرات خطای مطلق (سمت راست) و خطای نسبی (سمت چپ) با هر مرحله تکرار الگوریتم جانمایی تا دویست تکرار

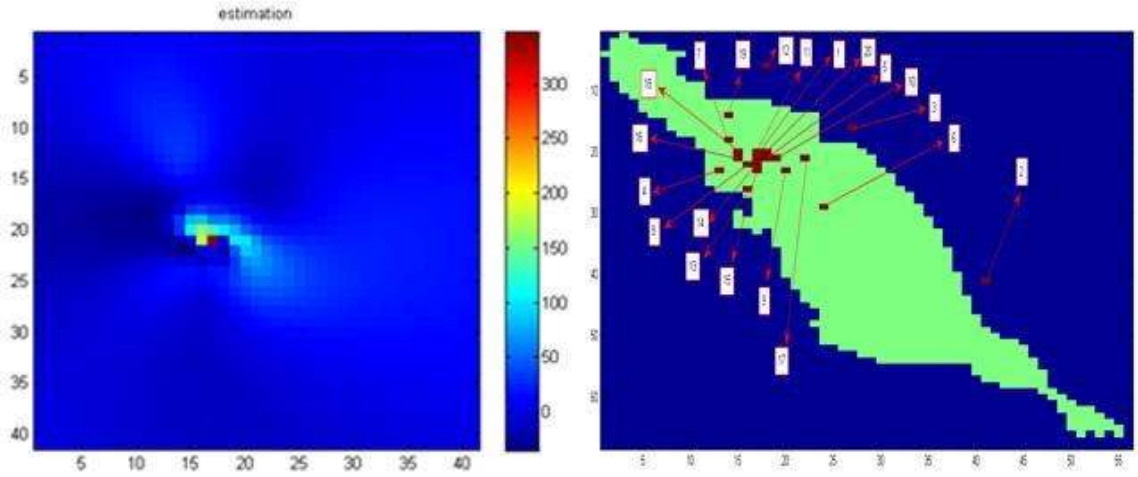
محیط Matlab محل هر سلول انتخابی را از لحاظ موقعیت در شبکه در هر مرحله نیز مشخص می‌کند. به‌این ترتیب، می‌توان محل احداث ایستگاه‌ها را با توجه به نیاز سیستم و محدودیت‌های مالی، نیروی انسانی و جزآن تعیین کرد.

در این مرحله، برای اینکه بتوان تعداد بهینهٔ ایستگاه‌ها را برآورد کرد، آهنگ تغییرات قدرمطلق خطای نسبی میان 5nامین تکرار روش و 5(n-1) (n=1,2,...)امین تکرار محاسبه شد (برای مثال، اختلاف پانزدهمین تکرار و دهمین تکرار). همان‌گونه که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، آهنگ تغییر قدرمطلق خطای نسبی از مقدار تقریبی Bq/m^3 ۲۸۳×۱۰^{-۱۰} میان اولین پنجمین‌بار، پس از بیستمین تکرار روش به زیرمقدار Bq/m^3 ۵×۱۰^{-۱۰} میان بیستمین و پانزدهمین تکرار می‌رسد و در ادامه نیز تقریباً در همین حدود باقی می‌ماند. البته، از تکرار سی‌ام به بعد الگو کاملاً هموار می‌شود و حتی تغییرات خطای مطلق نیز به زیر Bq/m^3 ۱۰×۱۰^{-۱۰} کاهش می‌یابد. اماریال از آنجا که در احداث ایستگاه‌های دیدبانی بحث هزینهٔ احداث و نگهداری بسیار پراهمیت است، نتیجه این خواهد بود که بهترین تعداد ایستگاه‌های دیدبانی به‌منظور بهترین نمونه‌گیری از این الگوی پخش احداث بیست ایستگاه دیدبانی در محدودهٔ ۱۰۰ کیلومتری نیروگاه هسته‌ای بوشهر خواهد بود. این بیست ایستگاه دیدبانی به‌خوبی شمای مناسبی از الگوی پخش ذرات معلق رادیونوکلوییدی حاصل از نیروگاه اتمی بوشهر را در اختیار کارشناسان و مدیران قرارمی‌دهد. در مطالعات Zoroufchi Benis و همکاران (۲۰۱۵)، Wu و همکاران (۲۰۱۰) و Ahmed (۲۰۰۴) نیز رفتار آهنگ تغییرات قدرمطلق خطای نسبی مشابهی در تکرارهای متوالی الگوریتم جایابی گزارش شده است و برای اطمینان بیشتر تعداد ایستگاه‌ها یک تا سه ایستگاه بیشتر از تعداد ایستگاه بعد از افت شدید تراز خطای میانیابی پیشنهاد می‌شود.

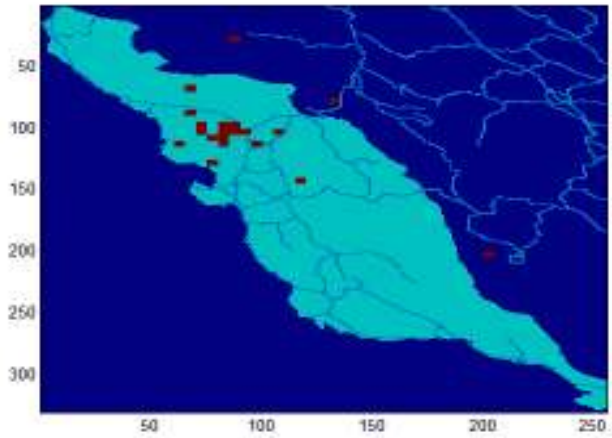
نقشهٔ مکان‌های ایستگاه‌های یافته‌شدن در نقشهٔ بوشهر در شکل ۶ (سمت راست) به تصویر کشیده شده است. این شکل همچنین، ترتیب این ایستگاه‌ها را با اعداد نمایش می‌دهد. پس از جانمایی این بیست ایستگاه در نقشهٔ بوشهر، دادهٔ این بیست ایستگاه را یک‌بار دیگر در محیط متلب وارد می‌کنیم تا به‌وسیلهٔ درون‌یابی کریجینگ ساده

الگوی تخمینی پخش به‌دست آید. نتیجهٔ کار در شکل ۶ (سمت چپ) به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که که مشاهده می‌شود الگوی به‌دست آمده در وهلهٔ اول توانسته بیشینه‌ها را به‌خوبی نمایش دهد. همچنین، روند پخش به سمت جنوب‌شرق را مشخص و در کل منطقه تقریباً الگوی پخش را به‌خوبی بازسازی کرده است. خطای مطلق الگوی تخمینی شکل ۶ (سمت چپ) که حاصل از بیست ایستگاه یا به‌عبارت دیگر بیست بار تکرار روش محاسبه است برابر است با ۵۷/۴ Bq/m^3 و خطای نسبی آن ۱۵/۹.

به‌منظور تعیین تقریبی فاصلهٔ ایستگاه‌های مکان‌یابی‌شده تا جاده‌های اصلی کشوری (بدون درنظر گرفتن مسیرهای شهری و روستایی استانی) نقشهٔ ترکیبی ایستگاه‌ها و جاده‌های اصلی استان بوشهر و فارس ایجاد شد (شکل ۷). با توجه به نتایج، دورترین فاصله، مربوط به ایستگاه شمارهٔ ۴ است که تقریباً در ۲۷ کیلومتری جادهٔ اصلی کشوری قراردارد. پس از این ایستگاه سه ایستگاه ۸ و ۱۳ و ۱۹ به‌ترتیب با فواصل تقریبی ۱۳، ۱۲ و ۱۲ کیلومتر قراردارد. بقیهٔ ایستگاه‌ها در فواصل زیر ۱۰ کیلومتر با جاده‌های مواصلاتی اصلی کشوری واقع شده است.



شکل ۶. طراحی شبکهٔ بیست ایستگاه‌های به‌ترتیب اولویت نصب (سمت راست) و الگوی تخمینی پخش حاصل از شبکهٔ پایش بیست ایستگاهی روی شبکهٔ مربعی پایه با تفکیک ۵ km (سمت راست)



شکل ۷. محل قرارگیری ایستگاه‌ها نسبت به جاده‌های اصلی

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مقادیر حاصل‌شده در الگوی پخش بلندمدت، برای حداکثر، حداقل و مقدار متوسط Bq/m^3 $^{-10}$۱۰×۳۸۴/۲، Bq/m^3 $^{-10}$۱۰×۴/۶ و Bq/m^3 $^{-10}$۱۰×۱۵/۱ از تراز معقول و استانداردی برخوردار است و توزیع مکانی پخش بلندمدت همبستگی معناداری با رژیم‌های باد منطقه دارد. الگوریتم جایابی که بر اساس روش‌های درون‌یابی (کریجینگ) و عملکرد تقریب از تابع اصلی در طراحی شبکهٔ بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب در این مطالعه توسعه داده شد بود در ارزیابی کیفی معتبر شناخته شد. نتایج تکرار الگوریتم جایابی نشان داده بود که میزان کاهش قدرمطلق تراز خطای نسبی بین پانزدهمین تا بیستمین تکرار کمینه می‌شود. سپس، ارتقای تراز خطا تقریباً در همان سطح باقی می‌ماند. بر اساس این نتایج، به‌منظور بهینه‌سازی هزینهٔ راه‌اندازی، تعمیر و نگهداری از شبکه‌ی مشاهداتی، تعداد مطلوب ایستگاه‌های شبکه، بیست ایستگاه در منطقه‌ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتری نیروگاه بوشهر پیشنهاد و مشاهده شد که جانمایی انجام‌گرفته با کد توسعه‌یافته در این مطالعه قادراست الگوی مناسبی از پراکندگی ذرات رادیونوکلوییدی از نیروگاه هسته‌ای بوشهر را ارائه کند. در مقایسه با سایر مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ جانمایی در کشور می‌توان به این نتیجه رسید که در حوزهٔ جانمایی ایستگاه‌ها تاکنون روش مدونی بر اساس کارایی شبکهٔ دیدبانی در پایش بهینهٔ میزان آلایندگی و سنجش فرین‌ها و با درنظر گرفتن فاکتورهایی همچون چگالی جمعیت، دسترسی به جاده‌ها و جزآن در این حوزه صورت نگرفته و اغلب روش‌ها بر اساس روش‌های آماری، یا درنظر گرفتن فاکتورهای دیگر یا حتی به‌صورت تصادفی بوده است. از این‌رو، این مطالعه با وجود نقص‌های موجود در آن، با درنظر گرفتن مدل پخش گائوسی در تخمین غلظت و استفاده از الگوی پخش و الگوریتم جانمایی رایانه‌ای بر اساس کاهش میزان خطای اندازه‌گیری غلظت د ایستگاه‌ها، روش جدیدی در این حوزه در کشور است که هم‌اکنون در مطالعات جانمایی در سایر کشورها و البته با فاکتورهای دخیل بیشتری به‌منظور طراحی شبکه استفاده می‌شود.

در انتها ذکر این نکته ضروری است که امروز در کشور ما بحث افزایش کاربری تأسیسات نیروگاهی هسته‌ای دارای جایگاه ویژه‌ای در مدیریت کلان کشوری است. از این‌رو، اندازه‌گیری دوز ذرات منتشرشده در جو نقش کلیدی در این بین بازی می‌کند. بدین منظور به طراحی شبکه‌های دیدبانی متعدد در مناطقی نیازمندیم که قصد احداث تأسیسات مشابه دارند. این شبکه‌های محلی به‌طور بهینه با طراحی پوششی شبکهٔ کشوری و منطقه‌ای ایجادشدنی است.

پیشنهادها

در این مطالعه تنها قید استفاده‌شده برای انتخاب محل ایستگاه‌ها، الگوی پخش نیروگاه بر اساس نتایج کد ADIM 1.0 بوده است. اما، با توجه به اینکه احداث ایستگاه نیاز به پارامترهای دیگری از جمله نزدیکی به راه‌های اصلی، استفاده از شبکه برق و جزآن نیز دارد، می‌توان در تکمیل این برنامه این قبیل قیدها را نیز به کد اضافه کرد. به‌عبارت دیگر، با امتیازدهی به برخی سلول‌ها الگوی جدیدی به‌دست آورد. سپس، این روش برای الگوی جدید با قیدهای بیشتر اجراپذیر است. البته، این روش یک اشکال اساسی دارد و آن هم این موضوع است که دیگر الگوی جدید الگوی پخش اصلی نیست و تنها برداشتی از دوز ذرات در نواحی مختلفی است که قیدهای درنظر گرفته رعایت شده است و ممکن است در برخی نقاط دادهٔ مورد نیاز و بیشینه‌ها را نتوان به‌خوبی بازسازی کرد. همچنین، از آنجا که غلظت محیطی بر جمعیت و سلامت انسان‌ها اثرگذار است و در نقاطی که تراکم جمعیت بیشتری وجود داشته باشد اثر دوز ذرات رادیونوکلوییدی در بلندمدت معنادار است، پیشنهاد می‌شود الگوی تراکم جمعیت ضریب تأثیری به الگوی پخش اضافه شود و مکان‌یابی بر اساس ترکیبی از دو پارامتر تراکم جمعیت و الگوی پخش

به‌دست آید. در این زمینه می‌توانید به مقالهٔ محمدیها و همکاران (۱۳۹۲) نیز مراجعه کنید.

همچنین، در این مطالعه از الگوی پخش بلندمدت نیروگاه استفاده شده است که در وضعیت جوی غالب منطقه بدین صورت است، اما در شرایط بحرانی مانند پخش ناگهانی یا بیش از حد نرمال از سایت، نیاز به چند ایستگاه سیار نیز وجود دارد تا با استفاده از داده‌های لحظه‌ای باد، با حرکت در مسیرهای خاصی از میزان پخش دوز ذرات معلق رادیواکتیوی داده‌برداری شود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود مانند مطالعهٔ Abida و همکاران (۲۰۰۸) در کنار ایستگاه‌های دیدبانی ثابت، به‌منظور برداشت و پوشش لحظه‌ای دیده‌بانی‌ها در شرایط حساس و در صورت رخداد در سایت، چند ایستگاه دیدبانی سیار در دسترس باشد و کدی طراحی و پیاده‌سازی شود تا بتوان شبکهٔ ثابت را با توجه به میدان باد لحظه‌ای در ایستگاه‌های متحرک بهینه کرد.

یادداشت‌ها

1. Gamma Dose Rate
2. Pareto
3. Ant colony
4. Exceedance score
5. Population factor
6. Total score
7. Double Gaussian equation
8. Wind-Rose

منابع

اشرفی، خ. قادر، س. اصفهانیان، و. متصدی، س. ۱۳۸۶. جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در تهران بزرگ، *مجلهٔ محیط‌شناسی*. ۳۳(۳۳): ۱-۱۰.

کفاش چرندابی، ن. آل‌شیخ، ع.ا. ۱۳۹۰. استفاده از روش PROMETHEE برای جانمایی ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، *همایش ژئوماتیک ۹۰*. تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۱ ص. http://www.civilica.com/Paper-GEO90-GEO90_118.html

فیضی‌نژاد، م. خاموشی، س. ۱۳۸۳. مدل‌سازی پخش جوی در نیروگاه هسته‌ای بوشهر، *مجلهٔ علوم و فنون هسته‌ای*. ۳۱: ۳۵-۴۲.

کسایی رودسری، ب. قهرمان، ب. شریفی، م. ۱۳۸۹. بررسی تراکم شبکهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (مطالعهٔ موردی استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی)، *مجلهٔ علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۰: ۳۵-۴۴.

محمدیها، ا. ملکوتی، ح. دادی‌زاده، م. فیضی‌نژاد، م. محمدپور، م.ر. ۱۳۹۲. طراحی شبکهٔ دیدبانی نشر رادیونوکلوئید از سایت اتمی بوشهر، *پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، بندرعباس*. دانشگاه هرمزگان: ۲۲۱-۲۳۲.

Abida, R., Bocquet, M. Vercauteren, N. Isnard, O. 2008. Design of a monitoring network over France in case of a radiological accidental release. *Atmospheric Environment*. 42: 5205-5219.

Ahmed, S. 2004. Geostatistical estimation variance approach to optimizing an air temprature monitoring network. *Water, Air, and Soil Pollution*. 158: 387-399.

Arya, S.P. 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press, New York.

Chang, H. Fu, A.Q. Le, N.D. Zidek, J.V. 2007. Designing environmental monitoring networks to measure extremes. *Environmental and Ecological Statistics*. 14: 301-321.

Henríquez, A. Osses, A. Gallardo, L. Díaz Resquin, M. 2015. Analysis and optimal design of air quality monitoring networks using a variational approach. Tellus Series B (Chemical and Physical Meteorology) 67: 25385, http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v67.25385.

Holland, D.M. Saltzman, N. Cox, L.H. Nychka, D. 1998. Spatial prediction of sulfur dioxide in the eastern United States. *Quantitative Geology and Geostatistics*. 10: 65-76.

Koohkan, M.R. Bocquet, M. Wu, L. Krysta, M. 2012. Potential of the International Monitoring System radionuclide network for inverse modelling. *Atmospheric Environment*. 54: 557-567.

Mazzeo, N. Venegas, L. 2010. Development and Application of a Methodology for Designing a Multi-Objective and Multi-Pollutant Air Quality Monitoring Network for Urban Areas, Air Quality, Ashok Kumar (Ed.): 23-47.

Melles, S.J. Heuvelink, G.B.M. Twenhofel, C.J.W. Van Dijk, A. Hiemstra, P.H. 2010. Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases. *Computers and Geosciences*. 37: 280-288.

Nejadkoorki, F. Nicholson, K. Hadad, K. 2011. The design of long-term air quality monitoring networks in urban areas using a spatiotemporal approach. *Environ. Monit. Assess*. 172: 215-223.

Rao, S.T. 2009. Environmental Monitoring and Modeling Needs in the 21st Century, EM: Air and Waste Management Associations Magazine for Environmental Managers. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA, October: 3-4.

Wu, L. Bocquet, M. Chevalier, M. 2010. Optimal Reduction of the Ozone Monitoring Network over France. *Atmospheric Environment*. 44: 3071-3083.

Zoroufchi Benis, K. fatehifar, E. Shafiei, S. Keivani Nahr, F. Purfarhadi, Y. 2015. Design of a sensitive air quality monitoring network using an integrated optimization approach. *Stoch. Environ. Res. Risk. Assess*. DOI 10.1007/s00477-015-1189-z.