

بررسی منطقه‌ای پتانسیل تابش خورشیدی با ارزیابی و بهینه‌سازی روش‌های درون‌یابی در سطح کشور ایران

نوید هوشنگی^۱: کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
علی اصغر آل‌شیخ: دانشیار سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
حسین هلالی: استادیار سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

تعیین محل بهینه‌ی نیروگاه‌های خورشیدی عاملی تأثیرگذار در افزایش بهره‌وری آن‌ها بوده و تابعی از دقت محاسبه‌ی پتانسیل تابش خورشیدی می‌باشد. استفاده از روابط مکانی میان داده‌ها در روش‌های درون‌یابی، موجب افزایش دقت تخمین پتانسیل تابشی برای مناطق مختلف کشور می‌گردد. تنوع بالای روش‌های درون‌یابی و تفاوت‌های محسوس در نتایج آن‌ها لزوم بررسی این روش‌ها را می‌رساند. در تحقیق حاضر روش‌های درون‌یابی؛ وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، تابع پایه‌ی شعاعی (RBF)، درون‌یابی پخشی (DI)، کریجینگ و کوکریجینگ پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل با اعتبارسنجی متقابل مقایسه شدند. به منظور افزایش دقت روش کوکریجینگ، نقشه‌ی پتانسیل تابشی برآورد شده با مدل SolarGIS به عنوان داده‌ی کمکی با داده‌های مشاهداتی تلفیق گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی عوامل مؤثر در روش‌های درون‌یابی موجب افزایش همگرایی ۸/۳ درصدی مقادیر نتایج می‌گردد. از بین روش‌های درون‌یابی، روش کوکریجینگ با داده‌های کمکی دما و ارتفاع با خطای جذر میانگین مربعاتی (RMSE) برابر با ۹/۸۲ وات بر مترمربع سطح بهینه را تخمین زد. با وارد کردن نقشه پتانسیل تابشی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای (مدل SolarGIS) به عنوان داده‌ی کمکی در روش کوکریجینگ، دقت سطح برآورد شده نسبت به کوکریجینگ و داده‌های کمکی دما و ارتفاع ۴/۱٪ بهبود یافت. مطالعه‌ی سطح تولیدشده نشان می‌دهد، اغلب مناطق کشور، به ویژه بخش‌های جنوبی از استعداد بالایی برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشیدی برخوردار هستند. لذا بخش‌های میمند، سعادت‌آباد، گوار و سروستان از استان فارس، باوی از خوزستان و نوک‌آباد از استان سیستان و بلوچستان با اختلاف ناچیز به ترتیب به عنوان مناطق با پتانسیل تابشی بالا معرفی شدند.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل تابش خورشیدی، درون‌یابی مکانی، انرژی خورشیدی، کوکریجینگ، ایران.

^۱ نویسنده مسئول: navid.hooshangi@yahoo.com ۰۹۱۴۷۳۷۹۳۹۷

بیان مسأله:

امروزه مضرات و محدودیت‌های سوخت‌های فسیلی و بالا رفتن مصرف انرژی، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و به ویژه انرژی خورشیدی را افزایش داده است؛ به گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ سرانه‌ی تولید انرژی جهانی ۱۰/۳ درصد افزایش یافته (Zohoori, 2012: 850) و پیش‌بینی شده این افزایش در سال ۲۰۳۰ به بیش از ۶۰٪ (Solangi et al, 2011: 2150) مقدار مصرفی در سال ۲۰۰۰ نیز برسد. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر و با توجه به پتانسیل کشور ایران، انرژی‌های خورشیدی به دلیل عدم تولید CO_2 و سایر مواد زائد (Bahrami et al, 2013: 202) موجب حفظ منابع طبیعی و احیای اراضی، کاهش خطوط انتقال نیرو، افزایش استقلال منطقه‌ای در تأمین انرژی و افزایش سرعت برق دهی به مناطق روستایی شده و از هزینه کمتری برخوردار می‌باشد (Solangi et al, 2011: 2150 ; Zohoori, 2012: 851).

محل نیروگاه‌های خورشیدی یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در میزان راندمان کاری آن‌ها می‌باشد، که به علت پرهزینه بودن عملیات نصب، بهره‌برداری و نگهداری (Bahrami et al, 2013:202; Gastli et al, 2010:792) بررسی اولویت مناطق از نظر شرایط محیطی، صنعتی، هواشناسی و اجتماعی مورد توجه قرار می‌گیرد (Yun-na et al, 2013:76). مقادیر پتانسیل تابشی از جمله داده‌های تأثیرگذار در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد و عموماً بیش‌ترین وزن را در مکان‌یابی این نیروگاه‌ها به خود اختصاص می‌دهد (Janke, 2010: 2229; Sánchez-Lozano et al, 2013:551). تابش خورشیدی از جمله پارامترهای مهم اقلیمی نیز می‌باشد که با بسیاری از فرآیندهای اگروکلیماتولوژی، هیدرولوژیکی، هیدروکلیماتولوژی و هواشناسی ارتباط دارد. این پارامتر در فرآیندهای آب و خاک مانند تبخیر، ذوب برف و رشد گیاهان اثر می‌گذارد، از این‌رو سازمان کشاورزی و خواربار ملل متحد (فاوو) نیاز به داشتن مقدار تابش خورشیدی دقیق را در تخمین تبخیر و تعرق بسیار ضروری تشخیص داده است (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۴۷). این کاربردها، لزوم تخمین و برآورد دقیق پتانسیل تابش خورشیدی را در کشور می‌رساند. اهمیت پتانسیل تابشی از یک‌سو و مشکلات فراوان در ثبت مقدار انرژی تابش خورشیدی پژوهشگران زیادی را بر آن داشته است که به دنبال تخمین دقیق تابش خورشیدی باشند. مسئله‌ی اصلی در تخمین تابش خورشیدی، برآورد مقدار تابش به طور پیوسته در مناطقی است که اندازه‌گیری مستقیم صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی تابش خورشیدی و ارزیابی روش‌های رایج درون‌یابی در تشکیل سطح پیوسته‌ی تابش خورشیدی است که در نهایت نقشه‌ی خروجی جهت شناسایی نواحی پرتابش ایران برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی استفاده شد.

پیشینه تحقیق:

مقدار دقیق انرژی خورشیدی در هر نقطه توسط دستگاه‌های آفتاب‌نگار (پیرانومتر) نصب‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود (معینی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲). دغدغه‌ی اصلی در مناطقی است که مجهز به دستگاه‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی نیستند، یا اندازه‌گیری تابش در آن مناطق به صورت پراکنده و نقطه‌ای انجام گرفته است. در پهنه‌بندی پتانسیل تابشی در گستره‌ی کشور ایران نیز این بحث جدیت بیشتری دارد، زیرا گستردگی شمالی- جنوبی ایران و تفاوت زیاد عرض جغرافیایی در این گستره، عامل مهمی در تفاوت میزان تابش خورشیدی در کشور می‌باشد (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۴۷). لذا تخمین و پهنه‌بندی میزان پتانسیل انرژی خورشیدی در گستره‌ی کشوری با استفاده از مدل‌های مختلف ریاضی و تجربی صورت می‌گیرد.

روش‌های آنگستروم، رگرسیون، هیبرید و درون‌یابی برای محاسبه پتانسیل تابشی در مناطق مختلف کشور استفاده شده است. در مدل آنگستروم ضرایب تابعی از عناصر اقلیمی مانند ارتفاع، عرض جغرافیایی و ساعات آفتابی

می‌باشد (معینی و همکاران، ۱۳۸۹ا: ۷۵). در این روش شرایط اقلیمی موجب می‌شود ابتدا مناطق، بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دسته‌بندی شده و سپس از مدل آنگستروم استفاده گردد (معینی و همکاران، ۱۳۸۹ب: ۱). روش دیگر مدل رگرسیون خطی می‌باشد که علاوه بر تعیین مؤثرترین عوامل در تابش خورشیدی (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۴۷) به برقراری ارتباط بین چندین عامل مستقل و محاسبه‌ی عامل وابسته می‌پردازد. مدل‌های تجربی در واقع از طریق عوامل مؤثر در تابش خورشیدی به برآورد مقدار تابش خورشیدی می‌پردازند. در مجموع عوامل متعددی در پهنه‌بندی و برآورد انرژی خورشیدی مؤثر هستند، از جمله این موارد می‌توان به ساعات آفتابی، عرض جغرافیایی، دما، ارتفاع، ضریب گذرده‌ی جو، رطوبت نسبی (معینی و همکاران، ۱۳۸۹ب: ۲)، پارامترهای فشار سطحی هوا میزان ابرناکی و دمای خاک (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۹۰: ۶۶۵) اشاره کرد. در تحقیق حاضر از دما و ارتفاع به عنوان عوامل مؤثر در پهنه‌بندی استفاده گردید. در تحقیقات دیگری از شیب، ارتفاع، جهت، زاویه‌ی شیفی روزانه و فصلی خورشید و برخی داده‌های دیگر در نرم‌افزارهای *ArcGIS* یا *GRASSGS* (*Gastli et al, 2010: 365*) جهت محاسبه‌ی پتانسیل تابشی استفاده شده است. بهره‌گیری از مدل تابشی خورشیدی که از داده‌های ماهواره‌ای مانند اندازه‌گیری تابش، بازتابش ناشی از پوشش ابرها و تضعیف تابش ناشی از هوا استفاده می‌کند، دقت قابل‌توجهی در محاسبه تابش خورشیدی ارائه می‌دهد (*Sørensen, 2001: 503*). استفاده از درون‌یابی مقادیر پتانسیل تابشی حاصل از ایستگاه‌های زمینی نیز در محاسبه‌ی پتانسیل تابش خورشیدی پرکاربرد بوده است (*Alamdari et al, 2013: 784*). در صورت انجام صحیح درون‌یابی، می‌توان دقت سطح پیوسته‌ی ایجادشده از پدیده یا پارامتر مورد بررسی را افزایش داد.

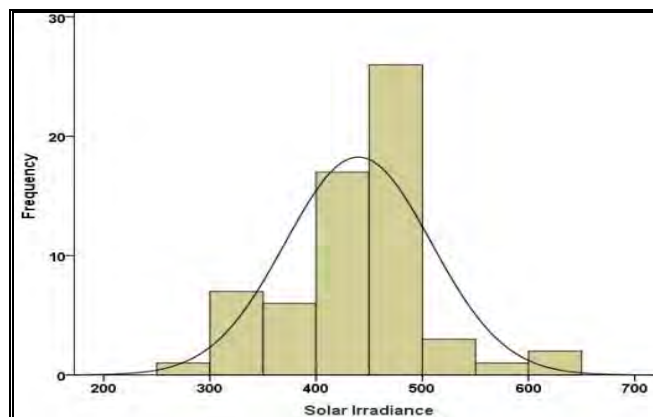
روش‌هایی مانند آنگستروم نیازمند کالیبراسیون (واسنجی) و تخمین دقیق ضرایب مربوطه هستند، لذا در این روش‌ها محاسبه‌ی ضرایب، برای مناطق با شرایط آب و هوایی یکنواخت انجام می‌گیرد (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۵۹) و استفاده از این روش‌ها برای گستره‌ی کشور ناصحیح می‌باشد. روش‌هایی مانند هیبرید نیز به داده‌های دمای روزانه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و غیره نیاز دارند و در صورتی استفاده می‌شوند که دقت بالایی نیاز باشد. روش کوکریجینگ با وجود دخالت دادن پارامترهای مؤثر مانند دیگر مدل‌های تجربی، از مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی نیز استفاده می‌کند و برخلاف بقیه مدل‌های سنجش تابش خورشیدی با داده‌ی کمکی کم‌تر نیز قابل اجراست. در این تحقیق تلاش شد که نواحی پرتابش ایران جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی شناسایی شود. از این‌رو با لحاظ مقدار متوسط سالیانه‌ی تابش خورشیدی ۶۳ ایستگاه کشور، تابش خورشیدی به روش درون‌یابی برای مناطق مختلف کشور پهنه‌بندی و پتانسیل مناطق مختلف از لحاظ استفاده از انرژی خورشیدی بررسی گردید. جهت افزایش دقت روش‌های درون‌یابی نیز، درون‌یابی با کوکریجینگ با داده‌های کمکی ارتفاع، دما (معینی و همکاران، ۱۳۸۹ب: ۵) و نقشه‌ی پتانسیل تابشی موجود مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌ها و روش تحقیق:

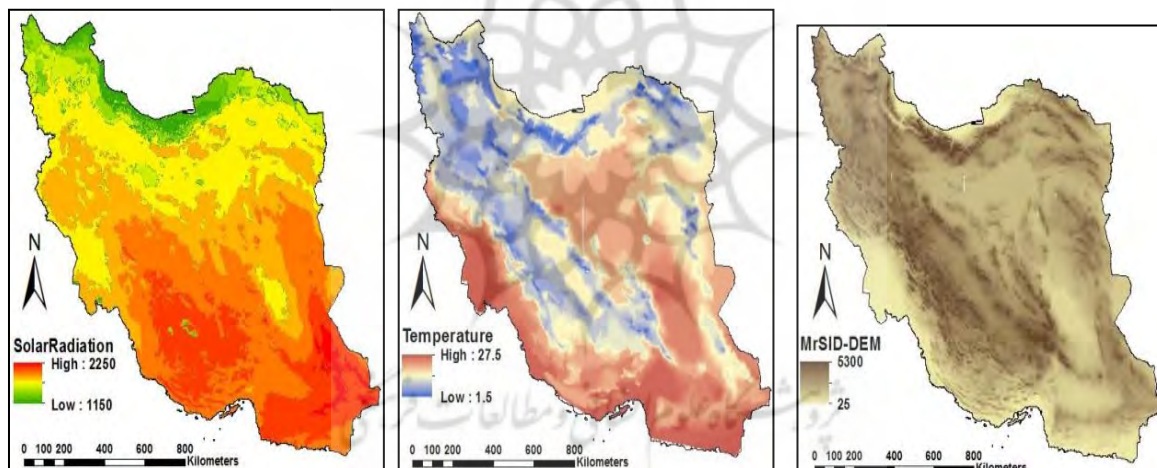
داده‌ها و آماده‌سازی آن‌ها:

داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق مدل ارتفاعی رقومی زمین (*DEM*)، متوسط دمای سالانه‌ی کشور و مقادیر متوسط مربوط به تابش افقی سالیانه در طول سال ۱۳۹۰ و در ۶۳ ایستگاه کشور بود. در راستای آماده‌سازی داده‌های مشاهداتی تابش خورشیدی، با وجود این‌که در ایستگاه‌های هواشناسی جهت کنترل کیفیت و آنالیز داده‌های موجود آزمون‌های همگنی، استقلال و کفایت انجام می‌گیرد، آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام گرفت. شکل شماره ۱ نتایج حاصل را نشان می‌دهد که حاکی از نرمال بودن داده‌هاست. در این مرحله مدل ارتفاعی رقومی زمین (*DEM*)

از تصاویر *MrSID* و با زمین مرجع کردن و اتصال مدل‌های جدا از هم ایجاد شد. داده‌های دمایی که خود به صورت منحنی میزان در دسترس بود بعد از ساختن شبکه نامنظم مثلث‌ها (*Tin*) و رستر کردن آن، قابل استفاده در روش کوکریجینگ گردید. نقشه پتانسیل تابشی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای نیز از سایت *SolarGIS* مربوط به کشور اسلوواکی اخذ و چون در فضای *RGB* و در دامنه‌ی ۰-۲۵۵ بود، مجدداً دسته‌بندی گردید. مجموعه‌ای از داده‌های استفاده شده در اشکال شماره ۲ تا ۴ آورده شده است.



شکل ۱- وضعیت توزیع نرمال داده‌ها



شکل ۲. پتانسیل تابشی حاصل از

مدل *Solar GIS*

شکل ۳. مقدار متوسط سطح

دمایی ۱۰ ساله

شکل ۴. مدل ارتفاع رقومی (*DEM*)

روش‌های درون‌یابی مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف ریاضی و آماری را برای پیش‌بینی مقادیر نامعلوم بکار می‌گیرند (قهرودی تالی و همکاران، ۱۳۸۹:۷۳). در اکثر مشاهدات پدیده‌های جغرافیایی و در علوم مانند معدن کاوی، هیدرولوژی، خاک‌شناسی و هواشناسی که نمونه‌گیری آن‌ها هزینه‌ی بالایی دارد (Xie et al, 2011:468)، نمونه‌گیری‌ها به صورت نقطه‌ای (فرجی‌سبک‌بار و همکاران، ۱۳۸۵:۱) و با تراکم اندک انجام می‌گیرد. از این‌رو انتخاب روش درون‌یابی مناسب جهت تعمیم نقاط به سطح در نحوه‌ی درک پدیده و مدیریت آن تأثیرگذار می‌باشد و نقش بسزایی در افزایش دقت و کاهش هزینه‌ی مربوطه دارد. جدول شماره ۱ بیان خلاصه‌ای از روش‌های استفاده شده در پیش‌بینی و تخمین پدیده‌های محیطی مانند آب، خاک و پارامترهای جوی مانند دما و بارندگی می‌باشد.

جدول ۱- مجموعه‌ای از روش‌های درون‌یابی استفاده‌شده و مقایسه شده

منبع	نتیجه	مقایسه	روش‌ها	هدف از انجام تحقیق	پدیده
<i>Sun et al,)</i> (2009:1169)	SK	RMSE R ²	IDW ,OK, RBF UK, SK	مقایسه روش‌های درون‌یابی در به دست آوردن متغیرهای زمانی و مکانی مؤثر در عمق آب‌های زیرزمینی	آب
<i>Pokhrel et al,)</i> (2013:36)	AnISO-OK	مشاهده و برآورد	ISO-OK AnISO-OK	مقایسه روش‌های درون‌یابی در محاسبه مقادیر آبکشی خاک در شهر سایتاما جهت تعیین مناطق در معرض خطر نشست	
(سلطانی و همکاران، ۱:۱۳۸۹)	WMA	MAE	WMA K.TPSS	مقایسه‌ی روش‌های مختلف درون‌یابی برای تعیین اولویت مناسب اراضی برای پخش سیلاب	
<i>Xie et al,)</i> (2011:468)	RBF, OK	RMSE	, RBF, OK LPI, IDW	مقایسه روش‌های درون‌یابی در محاسبه توزیع مکانی آلودگی ناشی فلزات سنگین خاک	خاک
(حبشی و همکاران، ۴:۱۳۸۵)	IDW	MAE MBE MSDR	, RBF, IDW K.Spline	ارزیابی دقت و صحت روش‌های درون‌یابی در تخمین ازت خاک جهت مدیریت در جنگل منطقه آموزش و پژوهشی	
<i>Price et al,)</i> (2000:93)	ANUSPLINE	RMSE	ANUSPLIN GIDS.E	مقایسه روش‌های درون‌یابی در محاسبه متوسط دمای ماهیانه‌ی کانادا	پارامترهای جوی
(سکوئی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۱)	TPSS با توان ۲ و متغیر کمکی ارتفاع	بصری	.TPSS گردیان	بررسی کارایی روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (مجموع سالانه دما- بارش)	
(فرجی سبک‌بار و همکاران، ۱۳:۱۳۸۵)	K, TIN	MAE MBE, IDW	.TIN .Spline .Kriging	ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی در الگوسازی بارندگی	

منبع: یافته‌های کتابخانه‌ای تحقیق، ۱۳۹۲.

پهنه‌بندی مقادیر جهت محاسبه پتانسیل تابشی خورشیدی در کشور ایران نیز با روش‌های متفاوتی از جمله کریجینگ (*Alamdari et al, 2013:785*) و اسپلاین (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۹۰:۶۶۷) انجام گرفته است. عوامل زیادی بر روی انتخاب مناسب روش‌های درون‌یابی دخالت دارند (طباطبائی و همکاران، ۱۴:۱۳۹۰). در این تحقیق روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله، تابع پایه شعاعی، درون‌یابی پخش، کریجینگ و کوکریجینگ بررسی شدند. درون‌یابی در سه مرحله‌ی اصلی آماده‌سازی و جست‌وجو داده‌ها، استفاده از مدل‌های قطعی و زمین‌آماری، آنالیز و تفسیر نتایج انجام می‌گیرد. بعد از آماده‌سازی و جست‌وجوی داده‌ها، مدل‌های درون‌یابی انتخاب و بر روی مجموعه‌ی از داده‌ها اعمال می‌شود. نتایج حاصل از روش‌های درون‌یابی با روش‌ها و فرمول‌های متفاوتی با هم مقایسه می‌شوند. در ادامه به توضیح روش‌های درون‌یابی استفاده‌شده و نحوه‌ی مقایسه‌ی آن‌ها اشاره می‌شود.

۱. Radial Base Function

۲. Ordinary Kriging

۳. Simple Kriging

۴. Universal Kriging

وزن دهی معکوس^۱: روش وزن دهی معکوس فاصله ترکیب خطی از داده‌های موجود برای پیش‌بینی مقادیر نامعلوم پیشنهاد می‌کند (Xie et al, 2011: 469)، که بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط فقط فاصله‌ها را مد نظر قرار می‌دهد. اعداد بدست آمده محدود به دامنه‌ی اعداد موجود می‌باشند. این روش ایزوتروپیک است، زیرا تأثیر نقطه‌ی ورودی وابسته به فاصله تا نقطه‌ی مجهول است. بهترین جواب زمانی حاصل می‌شود که نمونه‌برداری متراکم و با توجه به تغییرات محلی باشد. روش *IDW* بر اساس قانون اول جغرافیا که مبین شباهت بیشتر در پدیده‌های نزدیک به هم است، می‌باشد. محاسبات در *IDW* به دو عامل وابسته است:

$$w = (1/d)^p$$

- انتخاب توان p در فرمول

- موقعیت نقاط مجاور، به عبارتی وضعیت واحدهای همسایگی

درون‌یابی پخشی^۲: این روش بر اساس این که گرما و پخش ذرات در محیط‌های هموزن چگونه با زمان منتقل می‌شوند طراحی شده است، در واقع کرنل آن بر مبنای فرمول گرماسی و شکل کرنل در نزدیکی موانع با توجه به معادله‌ی پخش تغییر می‌کند. این روش از سطوح هزینه‌ی مختلفی جهت ویرایش پروسه‌ی درون‌یابی استفاده می‌کند. برای کاربرد صحیح مدل شرایط زیر باید برقرار باشد:

- پهنای باند بالا: این پارامتر بیش‌ترین فاصله‌ی همسایگی نقاط در درون‌یابی را مشخص می‌کند، با افزایش مقدار این پارامتر تغییرپذیری مقادیر حاصل از پیش‌بینی کمتر و اریبی^۳ مدل افزایش می‌یابد، به عبارتی سطح نرم‌تر می‌شود.

- قابلیت تکرارپذیری بالا: با توجه به این که در این روش معادلات پخش گرما حل می‌شوند تعداد تکرار، دقت حل عددی معادلات را کنترل می‌کند.

- هندسه‌ی دقیق موانع: پیچیدگی هندسی مانع، مدت زمان پردازش را طولانی‌تر می‌کند، از این‌رو عموماً از ساده‌سازی شکل (جنرالیزاسیون) استفاده می‌گردد.

تابع پایه شعاعی^۴: تابع پایه شعاعی (*RBF*) نوعی از اسپیلاین‌ها و یکی از روش‌های درون‌یابی رسا^۵ می‌باشد که در آن سطح برازش داده‌شده از تمام نقاط می‌گذرد. تابع‌های پایه شعاعی در واقع یک لاستیک هستند که به سطح برازش شده و در آن میزان انحنای سطوح کمینه می‌شود. تابع انتخاب‌شده در واقع نحوه و نوع فیت‌شدگی را بیان می‌کند که با فاصله از مکان تغییر می‌کند. تفاوت *IDW* و *RBF* به عنوان دو برازش رسا این است که *RBF* برخلاف *IDW* اعدادی خارج از محدوده داده‌ها می‌دهد. اعداد حاصل از *RBF* طبق رابطه ۱ از دو مؤلفه تشکیل یافته‌اند، روند کلی و تغییرات محلی.

$$z(x_i) = \sum_{j=1}^m a_j f_j(x) + \sum_{j=1}^n b_j \varphi(d_j) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن نوع تابع *RBF* و d_j فاصله نقاط نمونه‌برداری شده تا نقطه پیش‌بینی، $f_j(x)$ تابع روند که گونه‌ای از چندجمله‌ای‌ها با درجه کمتر از m می‌باشد. ضرایب a و b نیز با حل $n+m$ معادله به دست می‌آید. *RBF*ها سطحی هموار از تعداد عظیمی از نقاط داده‌ای ارائه می‌دهند. در نتیجه زمانی که تغییرات نقاط در همسایگی نزدیک، اندک باشد می‌توان در محاسبه پارامتر مجهول استفاده کرد.

¹ . Inverse Distance Weighting

² . Diffusion Interpolation with Barriers works

³ . Bias

⁴ . Radial Basis Function

⁵ Exact Interpolation

کریجینگ^۱: روش کریجینگ از خودهمبستگی و دیگر روابط آماری بین نقاط اندازه‌گیری شده استفاده می‌کند، به این علت نه تنها برای نقاط مورد نظر مقداری پیش‌بینی می‌کند، اطمینان و صحت مقادیر برآورد شده را نیز ارائه می‌دهد. فرمول کریجینگ شبیه *IDW* است که در آن با توجه به وزنی که به مقادیر اندازه‌گیری شده داده می‌شود، مقدار مجهول به دست می‌آید. تفاوت آن با *IDW* این است که علاوه بر فاصله، چینش مکانی داده‌های همسایه نیز اساس محاسبه مقادیر مجهول قرار می‌گیرد. به منظور دخالت دادن چینش مکانی در وزن مقادیر، همبستگی مکانی باید مشخص شود. این روش بر پایه‌ی توزیع نرمال بوده و بهترین روش خطی غیراریب برای تخمین اندازه‌ی متغیرهای ناحیه‌ای می‌باشد. کریجینگ معمولاً در علوم خاک و زمین‌شناسی استفاده می‌شود، زیرا در فرآیند محاسبه داده‌ها دو بار استفاده می‌شوند؛ ابتدا هنگام تخمین همبستگی مکانی داده‌ها و در ادامه موقع پیش‌بینی مقادیر مجهول.

کریجینگ ساده^۲: این روش از نظر ریاضی از دیگر روش‌های کریجینگ ساده‌تر بوده و جامعیت چندانی ندارد و فرض می‌کند که پارامترهای روند کاملاً شناخته‌شده است. یعنی m (ترند) در رابطه ۲ معلوم باشد. این فرض در اکثر مواقع در رابطه با پدیده‌های طبیعی صادق نمی‌باشد.

$$Z(x_0) = m + \sum_{i=1}^n h_i [z(x_i) - m] \quad (\text{رابطه ۲})$$

از دیگر فرضیات این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- برقراری فرضیه ایستایی در کل سطح
- میانگین در هر منطقه صفر باشد: $\mu(x) = 0$
- برقراری رابطه کوواریانس: $c(x, y) = \text{Cov}(Z(x), Z(y))$

کریجینگ کمکی^۳: کریجینگ کمکی شبیه روش‌های چند متغیر می‌باشد که بر اساس همبستگی بین متغیرهای مختلف مقادیر را برآورد می‌کند. برای محاسبه‌ی اوزان و در نتیجه تخمین مقادیر نیاز به محاسبه‌ی سمی-وریوگرام متقابل می‌باشد. فرمول کلی این روش به صورت رابطه ۳ می‌باشد.

$$Z^*(x_i) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} \times x_j + \sum_{k=1}^m \lambda_k \times y(x_k) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$Z^*(x_i)$ مقدار برآورد شده برای نقطه x_i ، λ_i وزن مربوط به متغیر Z ، λ_k وزن مربوط به متغیر کمکی و λ مقدار مشاهده‌ی متغیر کمکی می‌باشد. در روش کریجینگ کمکی، پس از تشکیل ماتریس همبستگی، برای پیش‌بینی کمیت مدنظر از متغیر کمکی‌ای که بیش‌ترین ضریب همبستگی با متغیر مورد نظر داشته باشد، استفاده می‌شود. پارامترهای جغرافیایی استفاده‌شده در کوکریجینگ علاوه بر این که باید از لحاظ فیزیکی با مقدار تابش رابطه داشته باشد، باید از لحاظ آماری هم از یکدیگر مستقل بوده و با دقت بهتر و هزینه‌ی کمتری نسبت به کمیت اصلی قابل اندازه‌گیری باشد. در برخی تحقیق‌های قبلی وابستگی تابش به ارتفاع، دما بررسی و اثبات شده است، لذا در این تحقیق نیز از این داده‌ها به عنوان داده‌ی کمکی در درون‌یابی استفاده گردید.

ارزیابی روش‌های درون‌یابی:

برای کنترل عملکرد روش‌های درون‌یابی تکنیک‌های متفاوتی وجود دارد. در اکثر موارد از اعتبارسنجی و اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود. در اعتبارسنجی متقابل یک نقطه حذف و درون‌یابی با بقیه‌ی نقاط انجام می‌گیرد و در نهایت مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده با فرمول‌های *MBE*، *MAE*، *RMSE* و غیره با هم

¹. Kriging

². Simple Kriging

³. Cokriging

مقایسه می‌شوند. در اعتبارسنجی یکسری از داده‌ها تحت عنوان مجموعه داده‌های تست^۱ جهت کنترل نتایج حذف شده و درون‌یابی با بقیه‌ی نقاط که مجموعه داده‌های آموزشی^۲ نامیده می‌شوند انجام می‌گیرد. در این تحقیق به علت کمبود داده از اعتبارسنجی متقابل و فرمول $RMSE$ استفاده شد. $RMSE$ مهم‌ترین کمیت آماری است که به اندازه‌ی داده‌های پرت^۳ حساس بوده و برای مشخص کردن اندازه‌ی خطاهای بزرگ استفاده می‌شود. هر چه مقدار این کمیت کمتر باشد گرایش مرکزی^۴ (*Price et al, 2000:84*) و دقت بیشتر می‌شود.

یافته‌های تحقیق:

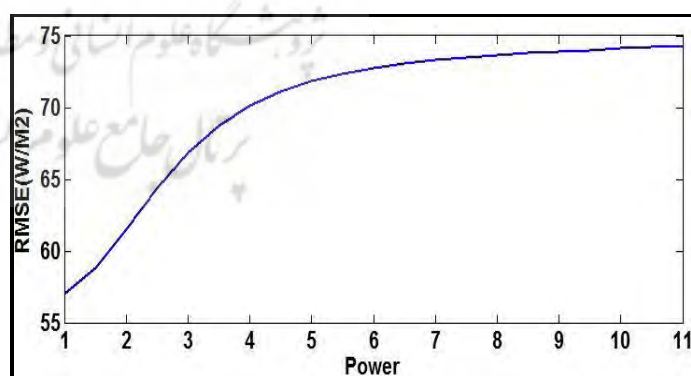
برای بهینه بودن نتایج روش‌های درون‌یابی، باید پارامترهای مؤثر در آن‌ها بهینه شود. در ادامه نتایج حاصل از روش‌های درون‌یابی با توجه به پارامترهای مؤثر در آن‌ها آورده شده است.

وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW): در این روش پارامترهای توان، تعداد همسایگی و نحوه‌ی انتخاب همسایگی بهینه می‌شوند. میزان حساسیت $RMSE$ به تغییر توان در حدود ۳۰٪ $RMSE$ است. (شکل شماره ۵)، این مقدار تغییر $RMSE$ برای تعداد همسایگی ۴٪ و برای شکل همسایگی ۱٪ می‌باشد. (جدول شماره ۲ و ۳)، یعنی با تغییر توان مقدار $RMSE$ بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از این‌رو پارامتر توان در قیاس با پارامترهای دیگر یعنی تعداد همسایگی و نحوه‌ی انتخاب همسایگی مهم‌تر می‌باشد. لذا ابتدا عدد توان بهینه شد و سپس تعداد همسایه‌ها و در نهایت سکتورهای همسایگی بهینه گردیدند. بعد از بهینه کردن همسایه‌ها و شکل همسایگی، عدد توان تغییر می‌کند، لذا مجدداً عدد توان بهینه گردید.

جدول ۲ - تغییر $RMSE$ با تغییر نوع انتخاب همسایگی جدول ۳ - تغییر $RMSE$ با تغییر تعداد همسایگی

Max-Neighbors	1-RMSE (W/m ²)
۶	۱۱,۷۰۱
۷	۱۱,۳۵۰
۸	۱۱,۲۸۶
۹	۱۱,۳۳۶
۱۰	۱۱,۲۷۰
۱۱	۱۱,۳۰۴
۱۲	۱۱,۳۳۴
۱۳	۱۱,۳۴۸
۱۴	۱۱,۳۷۸
۱۵	۱۱,۴۰۴
۱۶	۱۱,۳۴۲
۱۷	۱۱,۳۴۲
۱۸	۱۱,۳۲۴
۱۹	۱۱,۲۸۰
۲۰	۱۱,۳۳۸

Sectors	RMSE (W/m ²)
۱	11.270
۴	11.132
4-45D	11.232
۸	11.150



شکل ۵ - منحنی بهینه نمودن توان P در IDW

^۱. Test Data Set

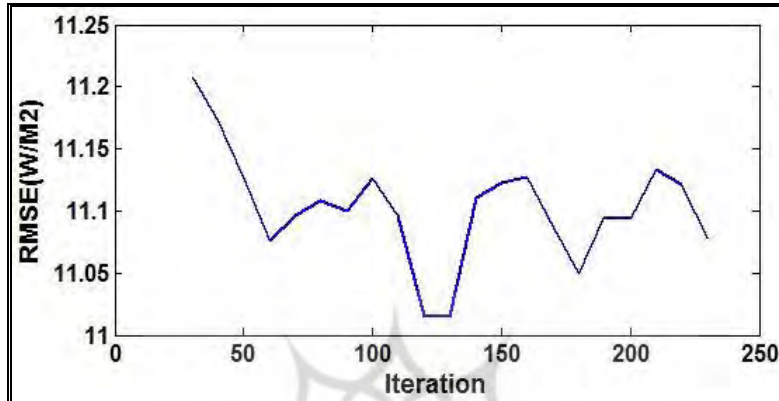
^۲. Training Data Set

^۳. Outliers

^۴. Central Tendency

پیاده‌سازی *IDW* برای محاسبه‌ی پتانسیل تابش خورشیدی در کشور ایران با توان ۱، همسایگی ۱۰ و انتخاب همسایگی چهارگانه دایره‌ای با $RMSE$ ۱۱/۱۳۲ (W/m^2) بهینه شد.

معادله پخشی: پیاده‌سازی این روش در صورتی که مانعی در جریان پخش گرما وجود نداشته باشد، وابسته به دو کمیت پهنای باند (فاصله همسایگی) و تعداد تکرار در حل معادله‌ی گرما می‌باشد. دقت نتایج به فاصله‌ی همسایگی وابستگی بیشتری دارد. اجرای این روش نسبت به روش *IDW* مدت زمان بیشتری طول می‌کشد، زیرا زمان به شدت وابسته به تعداد تکرار می‌باشد، از این رو ابتدا با تعداد تکرار ۱۰۰، پهنای باند بهینه گردید و سپس تعداد تکرار بهینه شد. تغییرات در بهینگی تعداد تکرار مانند توان *IDW* نیست (شکل ۶) بلکه نوسانی بین نتایج خوب و بد وجود دارد.



شکل ۶- منحنی تغییر مقدار *RMSE* با تغییر تعداد تکرار حل معادله گرما

پیاده‌سازی روش معادله پخشی در پهنه‌بندی تابش خورشیدی ایران با تعداد تکرار ۱۳۰ و پهنای باند ۳۰۰۰۰۰ و $RMSE$ ۱۱/۰۱۶ (W/m^2) بهینه شد.

تابع پایه شعاعی: در این روش پارامترهای که بهینه می‌شوند عبارت‌اند از نوع متد استفاده شده، تعداد همسایه‌ها و شکل انتخاب همسایگی. تأثیر متد انتخاب شده بر روی نتایج بیشتر از دو پارامتر دیگر می‌باشد. در این روش ابتدا تعداد همسایگی و سپس شکل انتخاب همسایگی بهینه گردید. روش‌ها و بهینگی هر کدام از حالت‌ها در جدول شماره ۴ ارائه شده است:

جدول ۴- نتایج حاصل از درون‌یابی تابع پایه شعاعی

Method	Neighbor	Sector	$RMSE(W/m^2)$
Completely regularized Spline	۷	۱	۱۱,۲۲۲
Spline with tension	۶	۴	۱۱,۱۰۲
Multiquadric function	۱۰	۸	۱۱,۹۴۴
Inverse Multiquadric function	۷	۱	۱۰,۷۱۰
Thin plate spline	۱۵	4-45D	۱۱,۶۱۰

منبع: یافته‌های تحلیلی تحقیق، ۱۳۹۲.

گریجینگ: از جمله‌ی کمیت‌هایی که در پیاده‌سازی گریجینگ بهینه شدند می‌توان به نوع تابع فیت‌شونده به سمی‌وریوگرام، تبدیل نرمال، کرنل، تعداد همسایگی و نوع انتخاب همسایگی اشاره کرد. در این روش داده‌های کمکی دما و ارتفاع برای کمک به درون‌یابی استفاده شدند. نتایج و ترتیب بهینه شدن پارامترها در جدول شماره ۵ از چپ به راست آورده شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از روش درون یابی کریجینگ

Method	RMSE (W/m^2)
CoKriging with Solar radiation	۹,۶۰۲
CoKriging with DEM & Solar radiation	۹,۴۴۴
CoKriging with DEM & Solar radiation & Temperature	۹,۴۲۲

منبع: یافته های تحلیلی تحقیق، ۱۳۹۲.

تلفیق نقشه پتانسیل تابشی و مشاهدات زمینی با روش کوکریجینگ: نقشه پتانسیل استفاده شده در این تحقیق توسط ارگان GeoModel و با استفاده از مدل SolarGIS تولید شده است (www.solargis.info). این ارگان با تلفیق تصاویر ماهواره ای، مدل های هواشناسی و نجومی به محاسبه ی پتانسیل تابشی خورشیدی در کل جهان می پردازد. جهت افزایش قابلیت برآورد روش های درون یابی از تلفیق نقشه ی مربوطه با داده های مشاهداتی ایستگاه های زمینی استفاده شد، بدین طریق که پتانسیل تابشی حاصل از مدل SolarGIS به عنوان داده ی کمکی وارد پروسه ی درون یابی کوکریجینگ گردید و به صورت همزمان در ضمن محاسبه با داده های دقیق مشاهداتی تلفیق شد. $RMSE$ حاصل از تلفیق کوکریجینگ با داده های کمکی DEM، دما و پتانسیل تابشی حاصل از تصاویر ماهواره ای ۹/۴۲۲ وات بر مترمربع و ۱۳/۴٪ نسبت به کریجینگ ساده بهتر بوده و ۴/۱٪ نسبت به کوکریجینگ با دما و ارتفاع به دقت بالاتری می رسد. جدول شماره ۶ نتایج حاصل از دخالت دادن نقشه ی پتانسیل تابشی در کوکریجینگ با داده های کمکی DEM و دما را نشان می دهد.

جدول ۶ - نتایج حاصل از استفاده ی نقشه ی پتانسیل تابشی ماهواره ای

Method	Transformation	Kernel	Neighbor	Sector	RMSE(W/m^2)
Simple Kriging	Log	none	۶	۱	۱۰,۸۸۶
CoKriging with Temperature	Box-Cox	Epanchew	۸	۴	۱۰,۰۲۴
CoKriging with DEM	none	First	۷	4-45D	۹,۸۶۶
CoKriging with DEM & Temperature	none	First	۶	۸	۹,۸۲۶

منبع: یافته های تحلیلی تحقیق، ۱۳۹۲.

تجزیه و تحلیل یافته ها:

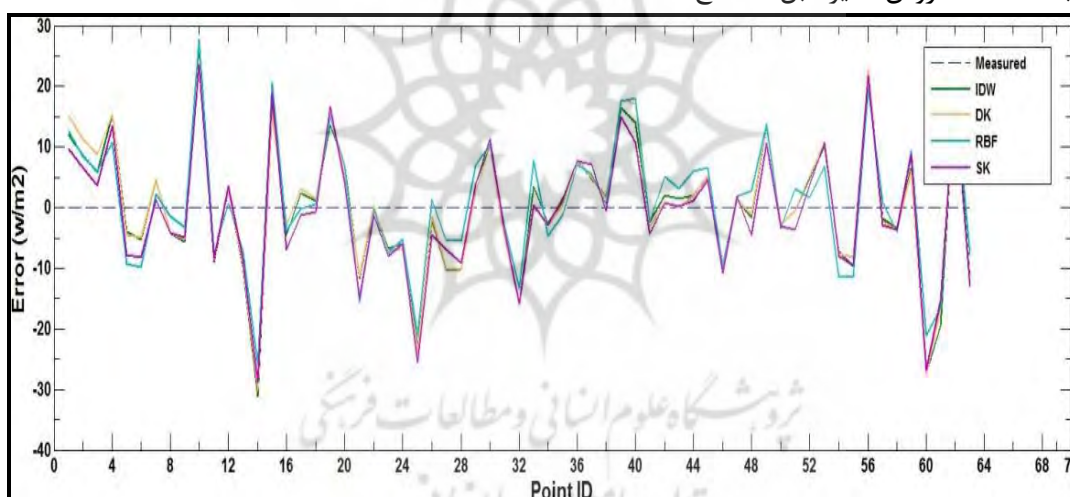
روش های وزن دهی معکوس فاصله (IDW)، تابع پایه ی شعاعی (RBF)، درون یابی پخشی (DI) و کریجینگ ساده و کوکریجینگ همگی با بهینه کردن کمیت های مربوطه به طور صحیح پیاده سازی شده و جمع بندی نتایج حاصل در جدول شماره ۷ ارائه شده اند. قضاوت در مورد عملکرد یک روش، قبل از بهینه کردن آن صحیح نمی باشد زیرا به عنوان مثال $RMSE$ به دست آمده برای حالت بهینه ی IDW برابر با ۱۱/۱۳۲ (W/m^2) است و در صورت بهینه نشدن پارامترهای توان و تعداد نقاط همسایگی مقدار $RMSE$ برابر با ۱۸/۸۵۶ (یعنی ۶۹٪) و حتی بیشتر نیز می شود.

جدول ۷- نتایج حاصل از روش‌های درون‌یابی مقایسه شده

Method	RMSE(W/m^2)
Inverse Distance Weighting	۱۱,۱۳۲
Diffusion Interpolation	۱۱,۰۱۶
Radial Basis Function	۱۰,۷۱۰
Simple Kriging	۱۰,۸۸۶
CoKriging with Temperature	۱۰,۰۲۴
CoKriging with DEM	۹,۸۶۸
CoKriging with DEM & Temperature	۹,۸۲۶

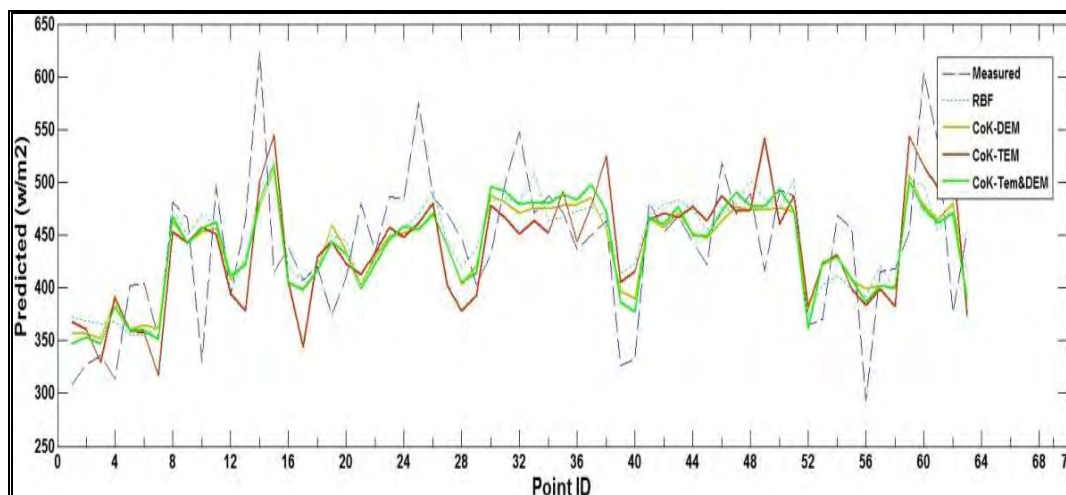
منبع: یافته‌های تحلیلی تحقیق، ۱۳۹۲.

دقت نقطه‌ای به‌دست‌آمده برای روش‌های مختلف، بعد از بهینه‌کردن پارامترهای آن‌ها همگرا می‌شود. در شکل شماره ۷ نمایی از خطای برآورد شده با استفاده از روش‌های مختلف مشاهده می‌شود. تقریباً تمامی روش‌های درون‌یابی جز کوکریجینگ در نقاط مختلف عملکرد یکسانی داشته‌اند و دامنه‌ی تغییر خطای آن‌ها نزدیک به هم می‌باشد. این نتیجه از مقادیر نزدیک $RMSE$ روش‌ها نیز قابل استنتاج است.



شکل ۷- همگرایی روش‌هایی که از داده‌های کمکی استفاده نمی‌کنند.

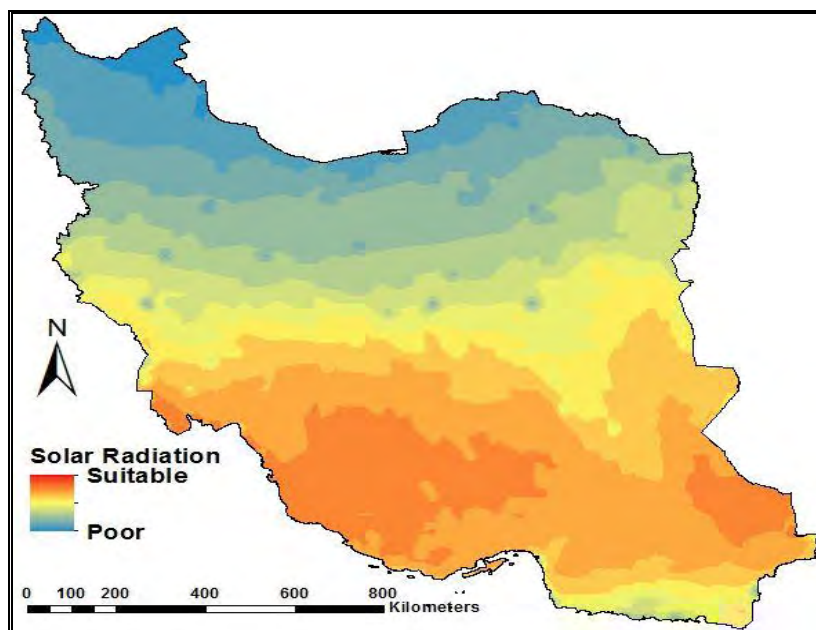
از بین روش‌هایی که از داده‌های کمکی استفاده نکرده‌اند، $RMSE$ با RBF ای برابر با $10/71$ (W/m^2) بهترین نتیجه را داشت و $3/8\%$ نسبت به بدترین نتیجه یعنی IDW دارای $RMSE$ بهتری بود. خطای روش‌های درون‌یابی با وجود این‌که برای هر نقطه متفاوت است، تقریباً یک سمت و سو دارد و خود مقادیر خطاها به هم نزدیک می‌باشد. روش‌های بررسی‌شده، در تخمین مقادیر بیشینه و کمینه با مشکل مواجه می‌شوند، این به علت تراکم پایین شبکه‌ی پایش تابش خورشیدی می‌باشد که در آن اعداد اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف تغییرات زیادی دارند.



شکل ۸- نتایج نقطه‌ای روش‌های کوکریجینگ و مقایسه‌ی آن با *RBF*

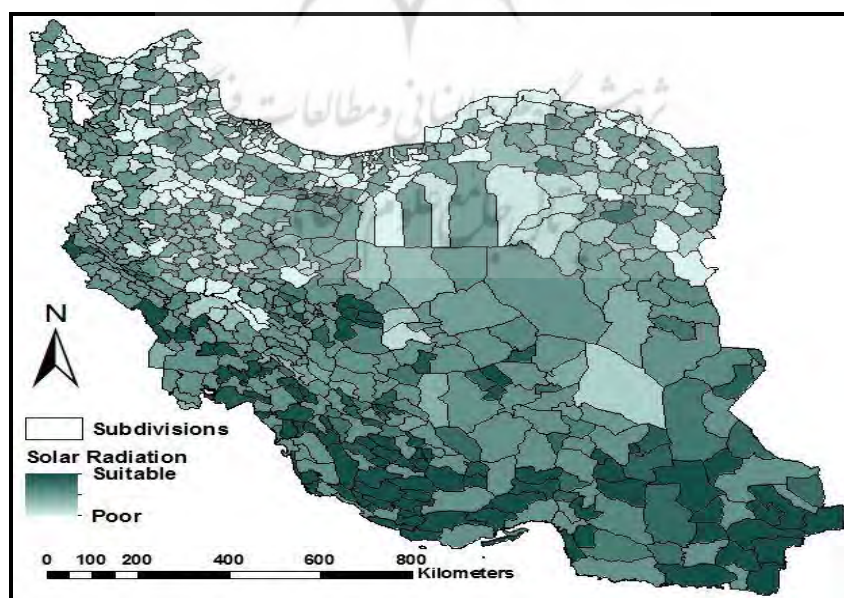
عملکرد روش‌های کریجینگ در تخمین نقاط بیشینه و کمینه بهتر از روش‌های دیگر می‌باشد. روش‌های درون-یابی که صرفاً بر اساس اعداد موجود عمل می‌کنند، توان تخمین صحیح نقاط شکستگی را ندارند، درحالی‌که کوکریجینگ به کمک داده‌های کمکی با درکی بالاتر به برآورد این نقاط می‌پردازد. در صورتی‌که داده‌ها دقیق‌تر باشند کمک بیشتری به کوکریجینگ کرده و نتایج تخمین دقیق‌تر خواهد بود. جواب بهینه‌ی کوکریجینگ با ارتفاع رقومی زمین نسبت به کریجینگ ساده ۹/۴٪ می‌باشد این عدد برای کوکریجینگ با دما ۷/۹٪ می‌باشد که نشان از اهمیت استفاده از *DEM* در درون‌یابی است. بهترین نتیجه *RMSE* با کوکریجینگ و استفاده از دو داده‌ی کمکی *DEM* و دما می‌باشد که دارای *RMSE* ۹/۸۲۶ (W/m^2) و ۹/۷٪ بهتر نسبت به کریجینگ ساده و ۸/۳٪ نسبت به بهترین جواب تک متغیری *RBF* می‌باشد که نشان از مزیت استفاده از کوکریجینگ می‌باشد (شکل شماره ۸). مقایسه نتایج حاصل از استفاده‌ی دما در کوکریجینگ نشان می‌دهد که اگر داده‌های دمایی دقت بالایی نداشته باشد می‌توان این داده‌ی کمکی را حذف کرد، زیرا تنها بین دقت کوکریجینگ با دما و *DEM* و کوکریجینگ با *DEM* اختلاف ۰/۴٪ وجود دارد و با افزوده شدن داده‌ی دما سرعت پردازش درون‌یابی کاهش می‌یابد. در این راستا استفاده از پتانسیل تابشی حاصل از مدل *SolarGIS* و ترکیب آن با داده‌های مشاهداتی موجب بهبود نتیجه درون‌یابی و تخمین سطح می‌شود. *RMSE* حاصل از این تلفیق با کوکریجینگ با داده‌های کمکی دما و *DEM*، ۹/۴۲۲ وات بر مترمربع و ۱۳/۴٪ بهتر نسبت به کریجینگ ساده و ۴/۱٪ نسبت به کوکریجینگ با دما و ارتفاع شد.

شکل شماره ۹ نقشه‌ی پتانسیل تابشی حاصل از روش کوکریجینگ با داده‌های دما، ارتفاع و پتانسیل تابشی حاصل از مدل *SolarGIS* را نشان می‌دهد. مطالعه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی تولیدشده حاکی از آن است که ۷۰/۹٪ از مناطق ایران قابلیت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی را دارا می‌باشند. حدود ۲۳/۳٪ از گستره‌ی کشور که بیشتر شامل بخش‌های جنوبی بوده و در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر قرار دارند از استعداد بالاتری برای استفاده از انرژی تجدید-پذیر خورشیدی، برخوردار هستند. در این بین ۴۷/۶٪ از مساحت کشور که بیشتر در مناطق میانی مشاهده می‌شوند از پتانسیل متوسط و حدود ۲۹/۱٪ استعداد کمتری برای استفاده از انرژی خورشیدی دارند.



شکل ۹- نقشه پتانسیل تابش خورشیدی حاصل از روش کوکریجینگ

در یک دید کلی تقریباً تمام قسمت‌های ایران به جز مناطق شمالی و شمال غربی کشور دارای پتانسیل تابشی مناسبی می‌باشند. قابل ذکر است که در تمامی روش‌های درون‌یابی استفاده‌شده مناطق جنوبی کشور و به ویژه استان‌های فارس و سیستان و بلوچستان بیش‌ترین استعداد را جهت استفاده از انرژی خورشیدی نشان داده‌اند. شکل شماره ۱۰ با استفاده از کمیت آماری میانگین، متوسط پتانسیل تابش خورشیدی در بخش‌های مختلف کشوری را نشان می‌دهد. همچنین داده‌های دقیق‌تر و کوچک مقیاس‌تر مانند زیرساخت خطوط انتقال، میزان ابرناکی، پوشش گیاهی، متوسط تعداد ساعات خورشیدی، ظرفیت و پتانسیل تولید الکتریسیته می‌تواند به انتخاب دقیق‌تر مکان نیروگاه‌های خورشیدی کمک کند.



شکل ۱۰- پتانسیل بخش‌های کشوری از نظر تابشی خورشیدی

نتیجه گیری:

اهمیت مقدار پتانسیل تابشی در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و مشکلات موجود در تخمین این پارامتر لزوم تعیین راهکاری مناسب را می‌رساند. در تحقیق حاضر پهنه‌بندی پتانسیل تابش خورشیدی در سطح کشور با استفاده از مشاهدات آفتاب‌نگاری، با روش‌های DI ، RBF ، IDW و کریجینگ ساده و کوکریجینگ با داده‌های مدل ارتفاعی رقومی زمین (DEM)، دما صورت گرفت. سپس مشاهدات زمینی و تابش خورشیدی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای (مدل $SolarGIS$) در روش کوکریجینگ با هم ادغام شدند. نتایج نشان می‌دهد که اجرا و بهره‌گیری صحیح از هر روش، نیازمند بهینه کردن پارامترهای آن می‌باشد که موجب همگرایی نتایج روش‌های مختلف نیز می‌گردد. در روش‌هایی که مشاهدات کمکی وارد پروسه‌ی تخمین سطح نمی‌شود بهترین جواب مربوط به تابع پایه شعاعی می‌باشد. استفاده از روش کوکریجینگ با داده‌های کمکی مقدار قابل توجهی به دقت سطح تخمین شده کمک می‌کند و مقدار $RMSE$ را $9/7-7/9$ درصد بهبود می‌دهد که در این بین کمترین مقدار $RMSE$ مربوط به استفاده همزمان از دو داده‌ی کمکی دما و مدل ارتفاعی رقومی زمین بوده و برابر با $9/826$ وات بر مترمربع است. با تأثیر دادن پتانسیل تابشی حاصل از مدل $SolarGIS$ در روش کوکریجینگ، $RMSE$ سطح حاصل از کوکریجینگ با داده‌های کمکی دما، DEM و پتانسیل تابشی $SolarGIS$ برابر با $9/422$ وات بر مترمربع یعنی $4/1\%$ بهتر از روش کوکریجینگ با دما و ارتفاع شد.

مطالعه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی تولیدشده نشان می‌دهد $70/9$ درصد از مساحت کشور ایران جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مناسب می‌باشد. بیش‌ترین پتانسیل تابشی نیز مربوط به بخش‌های جنوبی کشور بوده که در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر قرار دارند و شامل $23/3\%$ از کل مساحت کشور است. در نهایت میانگین‌گیری از پتانسیل تابش خورشیدی در بخش‌های مختلف کشوری نشان داد که بخش‌های میمند، سعادت‌آباد، کوار و سروستان از استان فارس، باوی از خوزستان و نوک‌آباد از استان سیستان و بلوچستان با میانگینی بالای 500 وات بر مترمربع و اختلاف ناچیز $1/1\%$ به ترتیب مستعدترین مناطق برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی می‌باشند. ورزقان، خدافین از استان آذربایجان شرقی نیز کم‌ترین میزان دریافتی انرژی خورشیدی را داشته و به همراه دیگر مناطق شمالی و شمال غربی کشور مناسب برای استفاده از انرژی خورشیدی نیستند.

سپاسگزاری:

از سازمان هواشناسی کشور به خاطر ارائه‌ی داده‌های موردنیاز این تحقیق و ارگان $Geo model$ جهت در اختیار قرار دادن نقشه‌ی پتانسیل تابشی ایران و پیشنهادات ارزشمندشان که موجب ارتقاء کیفیت مقاله شده است، قدردانی می‌شود.

منابع و مآخذ:

۱. سبزی‌پرور، علی‌اکبر و مریم بیات‌ورکشی (زمستان ۱۳۸۹): «ارزیابی دقت روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و عصبی- فازی در شبیه‌سازی تابش کل خورشیدی»، مجله پژوهش فیزیک ایران، سال پانزدهم، شماره ۱۰، اصفهان، صص ۳۴۷-۳۵۷.
۲. سکوتی اسکویی، رضا، کلاه چی، عبدالرضا، جباری، علی و محمدحسین مهدیان (پاییز ۱۳۹۱): «کاربرد زمین آمار برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت ارومیه»، همایش ملی تغییر اقلیم و تاثیر آن بر کشاورزی و محیط زیست، تهران، صص ۱۷-۷.

۳. سلطانی، محمد جعفر، شادفر، صمد و پیمان بکتاش (۱۳۸۹): «مقایسه روشهای مختلف درون‌یابی در انتخاب مکانهای مستعد اجرای عملیات پخش سیلاب با استفاده از سامانه های اطلاعات جغرافیایی»، همایش ملی سامانه های اطلاعات مکانی- سازمان نقشه برداری کشور، تهران، صص ۱۰-۱.
۴. طباطبائی، سیدحسین و محبوبه غزالی (پاییز ۱۳۹۰): «ارزیابی دقت روش‌های میان یابی در تخمین سطح ایستابی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوانهای فارس، جوققان و سفید دشت)»، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال پانزدهم، شماره ۵۷، اصفهان، صص ۲۲-۱۱.
۵. عرفانیان، مهدی و سحر بابایی حصار (بهار ۱۳۹۲): «ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران»، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، سال ۲۷، شماره ۱، مشهد، صص ۱۶۸-۱۵۸.
۶. فرجی‌سبک‌بار، حسنعلی و قاسم عزیزی (۱۳۸۶): «ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی (مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد)»، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، سال ۳۸، شماره ۶، تهران، صص ۱۵-۱.
۷. قهرودی‌تالی، منیژه و ام‌السلمه بابایی فینی (۱۳۸۹): «درآمدی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (رشته جغرافیا)، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ اول، تهران.
۸. معینی، سام، جوادی، شهرام، دهقان منشادی، محسن و رضا اسماعیلی (بهار ۱۳۸۹a): «برآورد تابش خورشیدی در شهر یزد»، نشریه انرژی ایران، سال سیزدهم، شماره ۱، تهران، صص ۷۸-۷۱.
۹. معینی، سام، جوادی، شهرام، کوبی، محسن و محسن دهقان منشادی (۱۳۸۹b): «برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه»، نشریه انرژی ایران، سال ۱۳، شماره ۲، تهران، صص ۱۰-۱.
۱۰. موسوی بایگی، محمد و بتول اشرف (تابستان ۱۳۹۰): «شناسایی مناطق با کمترین میزان ابرناکی به منظور پهنه بندی نواحی پرتابش کشور»، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، سال بیست و پنجم، شماره ۳، مشهد، صص ۶۷۵-۶۶۵.
۱۱. حبشی، هاشم، حسینی، سیدمحسن، شتایی، شعبان و جهانگرد محمدی (۱۳۸۵): «ارزیابی دقت و صحت روش‌های درون‌یابی در تخمین ازت کل خاک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی»، سومین همایش سیستم‌های اطلاعات مکانی، قشم، صص ۵-۱.
12. Alamdari P., O. Nematollahi and A.A. Alemrajabi, (2013): *Solar energy potentials in Iran: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, pp: 778-788.*
13. Bahrami M. and P. Abbaszadeh, (2013): *An overview of renewable energies in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, pp: 198-208.*
14. Gastli A. and Y. Charabi, (2010): *Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, pp: 790-797.*
15. Janke J.R., (2010): *Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. Renewable Energy, 35, pp: 2228-2234.*
16. Pokhrel R.M., J. Kuwano and S. Tachibana, (2013): *A kriging method of interpolation used to map liquefaction potential over alluvial ground. Engineering Geology, 152, pp: 26-37.*

17. Price D.T., D.W. McKenney, I.A. Nalder, M.F. Hutchinson and J.L. Kesteven, (2000): *A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. Agricultural and Forest Meteorology, 101, pp: 81-94.*
18. Sánchez-Lozano J.M., J. Teruel-Solano, P.L. Soto-Elvira and M. Socorro García-Cascales, (2013): *Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, pp: 544-556.*
19. Solangi K.H., M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim and H. Fayaz, (2011): *A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp: 2149-2163.*
20. Sørensen B., (2001): *GIS management of solar resource data. Solar Energy Materials and Solar Cells, 67, pp: 5. 509-3.*
21. Sun Y., S. Kang, Li F. and L. Zhang, (2009): *Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. Environmental Modelling & Software, 24, pp: 1163-1170.*
22. Tabik S., A. Villegas, E.L. Zapata and L.F. Romero, (2012): *A Fast GIS-tool to Compute the Maximum Solar Energy on Very Large Terrains. Procedia Computer Science, 9, pp: 364-372.*
23. Xie Y., T.B. Chen, M. Lei, J. Yang, Q.J. Guo, B. Song and X.-y. Zhou, (2011): *Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. Chemosphere, 82, pp: 468-476.*
24. Yun-na W., Y. Yi-sheng, F. Tian-tian, K. Li-na, L. Wei and F. Luo-jie, (2013): *Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on Ideal Matter-Element Model. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 50, pp: 76-84.*
25. Zohoori M., (2012): *Exploiting Renewable Energy Sources in Iran. Interdisciplinary J. of Contemporary Research in Business, 4, pp:849-862.*