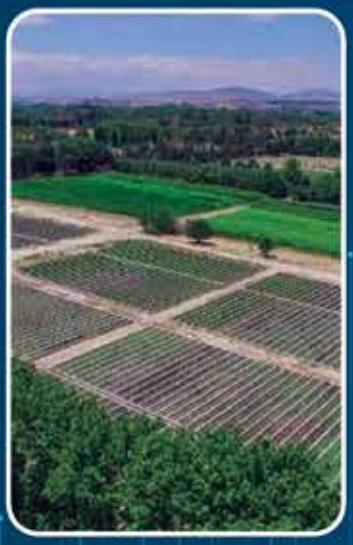
فصلنامه علمی و فنی سازمان نقشه برداری کشور

نقشه برداری

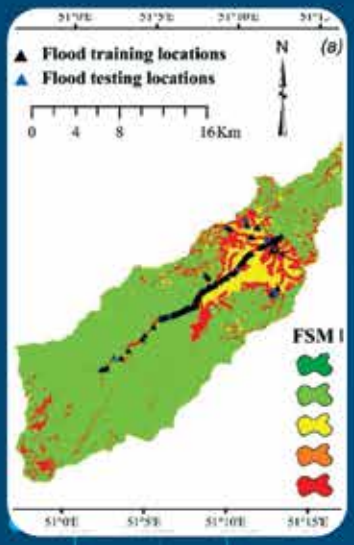
شماره ۱۲۷

سال بیست و هشتم، شماره ۱۲۷، بهار ۱۴۰۵

سازمان نقشه برداری کشور







- طراحی، پیاده‌سازی و اجرای سامانه پایش هوشمند آبیاری کشاورزی مبتنی بر زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) در استان البرز
- بررسی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی مکانی-زمانی بخار آب قابل بارش با داده‌های GNSS
- بررسی نقش فرونشست زمین در تحریک ثانویه زمین‌لرزه اردیبهشت ۱۴۰۴ در مرز استان‌های تهران و البرز

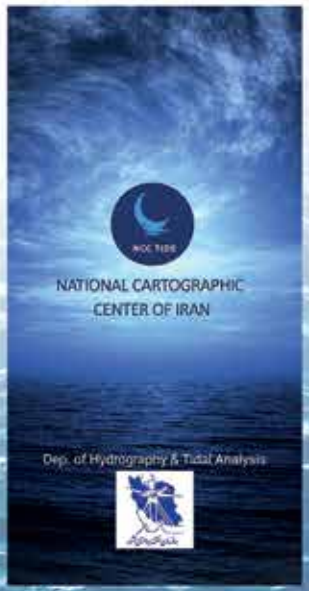
سازمان نقشه برداری کشور

برنامه کاربردی پیش بینی جزرومد و نمایش داده های تراز دریا

NCC Tide







- نمایش برخط تغییرات تراز دریا در ۱۷ ایستگاه ساحلی شمال و جنوب کشور
- نمایش پیش بینی جزرومد در ۵۲ ایستگاه ساحلی جنوب کشور بصورت سالیانه
- نمایش وضعیت ماه و زمان طلوع و غروب خورشید
- ارائه بیشینه و کمینه تراز دریا و زمان وقوع آن بصورت روزانه
- امکان دانلود، نصب و بروزرسانی برنامه از کافه بازار

بسم الله الرحمن الرحیم

نشریه علمی و فنی سازمان نقشه‌برداری کشور
سال بیست و هشتم، شماره ۱۲۷، بهار ۱۴۰۵



صاحب امتیاز: سازمان نقشه‌برداری کشور
مدیر مسئول: دکتر سید اسکندر صیدایی
سردبیر: دکتر محمد احمدلو
مدیر اجرایی: نعیمه ظفردیزجی

هیئت تحریریه: دکتر سید اسکندر صیدایی، دکتر مرتضی صدیقی، دکتر رامین پاپی، دکتر عبدالرضا سعادت، دکتر علی سلطانپور، دکتر علی مدد، دکتر نیما قاسملو، دکتر محمد احمدلو، دکتر زهرا رضایی، دکتر معصومه آمیغ‌پی، دکتر مهرنوش امتی، دکتر سید رهی فروغی‌آل‌داوود، دکتر لیلا کریمی‌دهکردی، دکتر حمیدرضا نانکلی، مهندس اشرف‌السادات قریشی، مهندس صباح راموز، مهندس سعید محمد نژاد نیازی

مجری: مدیریت برنامه‌ریزی، بودجه و پژوهش
ویراستار فنی: دکتر محمد احمدلو
ویراستار: نعیمه ظفردیزجی
مدیر هنری: مرتضی علیزاده پناه
چاپ و صحافی: سازمان نقشه‌برداری کشور

همکاران این شماره: دکتر محمد احمدلو، مهندس آزاده آقامحمدی، مهندس معصومه اقبالی‌مردخه، مهندس پیمان بکتاش، ابوالفضل بلندیان، مهندس علی بیگی‌فر، مهندس سارا ترک تتاری، مهندس فرامرز حسین‌زهی زمانی، مهندس دانا سعیدی، دکترمحمود رضا صاحبی، راحله علیزاده، دکتر سید رضا غفّاری‌رزین، دکتر مرجان قنبری، دکترمحمد کریمی، مهندس روح‌اللّه گودرزی، مهندس سجاد موسی خانی، دکترحمید رضا نانکلی، دکتر بهزاد وثوقی

صندوق پستی: ۱۶۸۴ – ۱۳۱۸۵
تلفن اشتراک: ۶۶۰۷۱۱۴۵
دفتر نشریه: ۶۳۱۸۲۴۶۲
دورنگار: ۶۶۰۷۱۱۴۶
نشانی: تهران، میدان آزادی، بلوار معراج، سازمان نقشه‌برداری کشور

سازمان برنامه و بودجه کشور
سازمان نقشه‌برداری کشور

فهرست مطالب

	شماره صفحه
سخن سردبیر	۱
دستاوردهای شورای عالی نقشه‌برداری	۲
بررسی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی مکانی‌زمانی بخار آب قابل بارش با داده‌های GNSS	۴
نقشه‌برداری مکانی آلودگی خاک به سرب با استفاده از شبکه عصبی عمیق مبتنی بر یادگیری انتقالی و داده‌های سنجش ازدور	۱۴
گذار از زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) به زیرساخت دانش مکانی (GKI): چارچوب تحول اکوسیستم اطلاعات مکانی در عصر انقلاب صنعتی چهارم	۳۴
استانداردسازی نام‌های جغرافیایی: چالش‌ها و راهکارها در بافت زبان‌ها و مناطق جغرافیایی مختلف (مورد مطالعه ایران)	۴۷
بررسی نقش فرونشست زمین در تحریک ثانویه زمین لرزه اردیبهشت ۱۴۰۴ در مرز استانهای تهران و البرز	۵۲
بهبود پیش‌بینی خطر سیلاب با استفاده از بهینه‌سازی درخت تصمیم CART با الگوریتم ژنتیک و جستجوی شبکه‌ای (مطالعه موردی: حوضه آبریز سردآبرود، ایران)	۵۹
طراحی، پیاده‌سازی و اجرای سامانه پایش هوشمند آبیاری کشاورزی مبتنی بر زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) در استان البرز	۶۴
معرفی کتاب	۷۱
گزارش تصویری	۷۲
سمینارها و گردهمایی ها	۷۴

سخن سردبیر

شماره ۱۲۷ فصلنامه علمی و فنی سازمان نقشه‌برداری کشور، در حالی منتشر می‌شود که جهان به سرعت در حال عبور از عصر داده‌محوری به سوی عصر دانش و هوشمندی است. مقالات این شماره، آینه‌ای تمام‌نما از این تحول عظیم هستند و مسیر پرشتاب حرکت از زیرساخت داده‌های مکانی به سوی اکوسیستم‌های پویا و دانش‌محور را به تصویر می‌کشند. در دنیای امروز، داده‌های مکانی دیگر صرفاً یک ابزار تخصصی نیستند، بلکه به ستون فقرات اقتصاد دیجیتال و حکمرانی هوشمند تبدیل شده‌اند. این شماره از نشریه، با مقالاتی در حوزه‌های نوین مانند پیش‌بینی بخار آب قابل بارش با یادگیری ماشین، پایش مکانی آلودگی خاک با سرب و گذار از زیرساخت داده‌های مکانی به زیرساخت دانش مکانی، عزم راسخ جامعه نقشه‌برداری کشور را در به‌کارگیری فناوری‌های پیشرو نشان می‌دهد.

نخستین مطلب نشریه به بازتاب دستاوردهای شورای عالی نقشه‌برداری کشور می‌پردازد. در این شماره، ضمن مرور مصوبات و اقدامات این شورا، به ویژه در زمینه جلوگیری از دخالت افراد فاقد صلاحیت، به چشم‌اندازهای مهمی چون تدوین برنامه ملی توسعه نقشه و اطلاعات مکانی و بهره‌گیری از ظرفیت بخش خصوصی پرداخته شده است. این رویکرد، نشان‌دهنده حرکت نظام‌مند و قانون‌مدار صنعت نقشه‌برداری به سوی آینده‌ای روشن‌تر است.

مقالات این شماره، از بهبود پیش‌بینی خطر سیلاب با الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرفته تا طراحی سامانه‌های پایش هوشمند آبیاری کشاورزی مبتنی بر اینترنت اشیا و استانداردهای وب معنایی، همگی حاکی از یک باور عمیق است: کاربرد مؤثر دانش مکانی، کلید حل چالش‌های بزرگ کشور در حوزه‌های آب، محیط‌زیست، کشاورزی و مدیریت بحران است.

امید است که مطالب این شماره، علاوه بر ارتقای دانش فنی همکاران و پژوهشگران، زمینه‌ساز گفت‌وگوهای سازنده‌تر و همکاری‌های مؤثرتر میان دستگاه‌های اجرایی، دانشگاهیان و بخش خصوصی باشد. بی‌تردید، مسیر تحول اکوسیستم اطلاعات مکانی کشور، با تکیه بر دانش، نوآوری و هم‌افزایی جمعی هموار خواهد شد. از همه نویسندگان، داوران و همکارانی که در تهیه و تدوین این شماره زحمت کشیده‌اند، صمیمانه سپاسگزارم.

محمد احمدلو
سردبیر فصلنامه علمی و فنی سازمان نقشه‌برداری کشور



دستاوردهای شورای عالی نقشه‌برداری کشور

پیمان بکتاش
دبیر کمیسیون معین شورای عالی نقشه‌برداری کشور
و معاون فنی و تولید اطلاعات مکانی سازمان نقشه‌برداری کشور

از شماره ۱۱۸ نشریه (زمستان ۱۴۰۲) تاکنون به‌صورت پیاپی، مطالب مربوط به شورای عالی نقشه‌برداری کشور برای مخاطبین عزیز ارائه‌شده است. ابتدا ضمن بیان تاریخچه شورا، روند تصویب و متن جدیدترین «آیین‌نامه تعیین وظایف، مقررات و اعضای شورای عالی نقشه‌برداری کشور» بیان گردید. در ادامه، به برخی نتایج و دستاوردهای مهم شورای عالی نقشه‌برداری کشور اشاره شد. در این شماره نیز ضمن بیان دستاوردی دیگر، در خصوص چندین مورد مهم که چشم‌انداز آتی کمیسیون معین و به‌تبع آن شورای عالی نقشه‌برداری کشور است، سخن گفته می‌شود.

تشکیل «گروه کاری تدوین مقررات ممانعت از ورود افراد فاقد صلاحیت در امور مهندسی نقشه‌برداری» ذیل کمیسیون معین شورای عالی نقشه‌برداری کشور

وفق مصوبه سوم جلسه ۹۷ کمیسیون معین، گروه کاری به‌منظور بررسی دخالت افراد فاقد تخصص در امور مهندسی نقشه‌برداری، در تاریخ ۱۹ مهرماه ۱۴۰۴ با حضور اعضای منتخب کمیسیون تشکیل شد. در جلسه اول گروه کاری، ارائه‌هایی از مصادیق دخالت افراد فاقد صلاحیت در امور مهندسی نقشه‌برداری ارائه گردید. پیش‌نویس اولیه مصوبه شورای عالی نقشه‌برداری که در دبیرخانه شورا تهیه شده بود، جهت اعلام نظر برای اعضای کمیسیون معین ارسال گردید. همچنین بحث تعیین صلاحیت‌ها در مراجع مختلف نظام‌مهندسی بررسی گردید و جلسات بیشتری با نظام‌های مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، معدن و ساختمان برگزار می‌شود. بررسی قانون نظام فنی اجرایی یکپارچه کشور در این کارگروه انجام می‌شود و مقرر است از ظرفیت کانون کارشناسان رسمی دادگستری، مرکز کارشناسان رسمی قوه قضائیه و کمیسیون اصل ۹۰ قانون اساسی مجلس شورای اسلامی در جهت رفع مشکلات به وجود آمده استفاده شود. این کارگروه هم‌اکنون در حال فعالیت تا حصول نتیجه می‌باشد.

اهم موارد آتی (چشم‌انداز) مدنظر برای طرح در کمیسیون معین و نهایتاً شورای عالی نقشه‌برداری کشور

با توجه به شناسایی چالش‌های حوزه مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی در کشور و شناخت اولویت‌ها، دبیرخانه شورای عالی نقشه‌برداری کشور، اهم موضوعات دیگری را مدنظر دارد که با تصویب اعضای کمیسیون معین می‌تواند در دستور کار جلسات آینده این کمیسیون قرارگیرد تا پس از تصویب اولیه اسناد مربوطه، برای تصویب نهایی و ابلاغ در شورای عالی نقشه‌برداری مطرح گردند. اهم این موارد عبارتند از:

- بررسی «طرح جامع تأمین و تولید نقشه‌های چند مقیاسه مورد نیاز کشور» که طرح به‌روزرسانی نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ بخشی از آن است و هم‌اکنون توسط دبیرخانه شورای عالی نقشه‌برداری کشور در حال بازنگری است، جهت ارائه و تصویب نهایی توسط شورای عالی نقشه‌برداری کشور.
- نظارت و پیگیری اجرای مفاد «دستورالعمل اجرایی ماده (۱۱) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور» که در تاریخ ۱۴۰۴/۰۹/۱۹ به شماره ۴۹۴۹۶۲ توسط معاون محترم رئیس‌جمهور و رئیس سازمان برنامه و بودجه کشور، به‌عنوان رئیس شورای عالی نقشه‌برداری کشور، به کلیه دستگاه‌های اجرایی موضوع ماده (۵) قانون مدیریت خدمات کشوری ابلاغ‌شده بود.



- راهبری و ساماندهی ایجاد سامانه‌ها و پایگاه‌های اطلاعات مکانی، در راستای اجرای تبصره بند (ت) ماده (۱۰۷) «قانون برنامه پنج‌ساله هفتم پیشرفت جمهوری اسلامی ایران» و اجرای بند (۶) ماده (۲) «آئین‌نامه تعیین وظایف، مقررات و اعضای شورای عالی نقشه‌برداری کشور» مصوب هیئت محترم وزیران.
- راهبری و سیاست‌گذاری انجام مطالعات تطبیقی و بومی‌سازی اسناد «چارچوب یکپارچه اطلاعات مکانی، مدیریت جهانی اطلاعات مکانی سازمان ملل متحد برای آسیا و اقیانوسیه» UN-GGIM Integrated Geospatial Information (IGIF) Framework، برگرفته از جلسات کمیته جهانی UNGGIM که سازمان نقشه‌برداری کشور به‌عنوان نماینده رسمی جمهوری اسلامی ایران، یکی از اعضای اصلی هیئت‌رئیسه آن می‌باشد و ریاست و نایب‌رئیسی چند گروه کاری آن را نیز بر عهده دارد.
- تصویب تدوین «برنامه ملی توسعه نقشه و اطلاعات مکانی کشور» که لازم است پیش‌نویس آن در دبیرخانه شورای عالی نقشه‌برداری تهیه و نهایی شود. ضروریست این برنامه در راستای «سند چشم‌انداز، اهداف و راهبردهای نظام نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی کشور در افق ۱۴۲۰» مصوب کمیسیون معین و همراستا با خط‌مشی‌های «دستورالعمل اجرایی ماده (۱۱) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور» تدوین گردد و سپس با تصویب نهایی شورای عالی نقشه‌برداری کشور ابلاغ گردد.
- بهره‌گیری از ظرفیت‌های ایجادشده برای توسعه بخش نقشه‌برداری از طریق تشکل‌های صنفی و حرفه‌ای در صنعت و ارزیابی عملکرد آن‌ها (سند تحول صنعت نقشه‌برداری با محوریت نهادهای صنفی و حرفه‌ای).
- تدوین سند تعارض منافع و تداخل وظایف در حوزه مهندسی نقشه‌برداری.
- مطالعه در زمینه ژئومارکتینگ (بازاریابی مکان‌محور) و امکان‌سنجی پیاده‌سازی موضوع در قالب «زیرساخت ملی داده مکانی».
- مطالعه و امکان‌سنجی تدوین قوانین و مقررات لازم برای حفظ حقوق معنوی تولیدکنندگان داده‌های مکانی.
- ساماندهی و بهبود فضای کسب‌وکار حوزه نقشه و اطلاعات مکانی (اجرای مصوبه قانون بهبود مستمر محیط کسب‌وکار).
- بازنگری در روال تدوین و تصویب تعرفه‌های خدمات مهندسی نقشه‌برداری.
- تنقیح قوانین و مقررات صنعت نقشه و اطلاعات مکانی و پیگیری تصویب آن و تدوین قوانین پیشنهادی.
- تدوین گزارش در خصوص نظام‌مند نمودن توسعه شرکت‌های دانش‌بنیان حوزه نقشه و اطلاعات مکانی و برنامه‌ریزی برای بهره‌گیری از ظرفیت آن‌ها در دستگاه‌های اجرایی.
- تدوین سند و برنامه در خصوص بسترسازی قانونی استفاده از ظرفیت بخش خصوصی و ارزیابی عملکرد آن‌ها.
- مطالعه و امکان‌سنجی بهره‌گیری از ظرفیت‌های «بخشنامه مشارکت عمومی-خصوصی» در طرح‌های ملی نقشه‌برداری.
- تدوین سند اصول اخلاق حرفه‌ای بخش نقشه و اطلاعات مکانی.

بررسی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی مکانی زمانی بخار آب قابل بارش با داده‌های GNSS

علی بیگی‌فر[۱]، بهزاد وثوقی[۱]، سید رضا غفّاری رزین[۲]
۱.دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
۲.دانشکده مهندسی علوم زمین دانشگاه صنعتی اراک

چکیده

بخار آب قابل بارش یکی از پارامترهای کلیدی هواشناسی است که مطالعه آن به دلیل ارتباط با کمیت‌های فیزیکی جوی که دارای ماهیتی غیرخطی و پویا هستند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این تحقیق باهدف پیش‌بینی مکانی‌زمانی بخار آب قابل بارش (PWV) با استفاده از داده‌های پنج ایستگاه شبکه GPS دائمی البرز در روزهای ۳۱۲ تا ۳۴۷ سال ۲۰۲۱ و به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین انجام شد. در این راستا مقادیر PWV حاصل از پردازش GNSS به روش PPP به‌عنوان مرجع، برای آموزش و ارزیابی سه مدل یادگیری ماشین شامل رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)، درخت تصمیم تقویت‌شده با گرادیان (GBDT) و مدل هیبریدی Conv LSTM در نظر گرفته شد. نتایج مرحله آموزش نشان می‌دهد مدل GPR با RMSE برابر ۰/۳ میلی‌متر دقیق‌ترین عملکرد را نسبت به دو مدل دیگر از خود به ثبت رسانده است. در مرحله آزمون، مدل GBDT با RMSE برابر ۰/۶۳ میلی‌متر و ضریب همبستگی ۰/۹۹ پایدارترین و بهترین پیش‌بینی را از مقادیر PWV و نوسانات آن ارائه کرد. مدل تحلیلی IDW با ثبت RMSE ۱/۱۵ میلی‌متر عملکردی نزدیک به مدل‌های یادگیری ماشین نسبت به مقادیر مرجع GNSS از خود نشان داد و مدل‌های تجربی ساستامونین و هاپفیلد عملکرد ضعیف‌تری داشتند. همچنین در مقایسه مدل‌ها با داده‌های رادیوسوند به‌عنوان مرجع، مدل GPR با ثبت مقدار RMSE ۲/۹۷ میلی‌متر بیشترین سازگاری را نسبت به این مقادیر از خود نشان داد. به‌طورکلی این نتایج نشان می‌دهد، مدل GBDT به دلیل پایداری و همبستگی بالا، گزینه‌ای مناسب برای پیش‌بینی PWV در منطقه مورد مطالعه است.

کلمات کلیدی: بخار آب قابل بارش، یادگیری ماشین، رگرسیون فرآیند گاوسی، درخت تصمیم تقویت شده با گرادیان، Conv-LSTM

۱- مقدمه

بخار آب یکی از پدیده‌های مهم جوی است که مدل‌سازی آن به دلیل ماهیت پر نوسان و غیرخطی به امری چالش‌برانگیز در مطالعات هواشناسی تبدیل شده است. به‌طورکلی مدل‌سازی بخار آب به دو دسته کلی مستقیم و غیرمستقیم امکان‌پذیر است [۱]. روش‌های مستقیم که بر پایه اندازه‌گیری‌های هواشناسی مانند رادیوسوندها[۱] و رادیومترهای[۲] بخار آب هستند، علیرغم ارائه دقت مستقیم به‌عنوان مرجع هواشناسی، به دلیل مشکلاتی نظیر پوشش مکانی محدود و ناپیوستگی زمانی در برداشت مشاهدات و یا هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری تجهیزات، استفاده از این ابزار را به گزینه‌ای کارآمد اما پرهزینه تبدیل کرده است. در مقابل روش‌های غیرمستقیم، عمدتاً روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور ماهواره‌ای را شامل می‌شوند که از انواع آن‌ها می‌توان به تداخل‌سنجی راداری، ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و یا GNSS در کاربردهای هواشناسی اشاره کرد [۲, ۳]. یکی از روش‌های خاص استفاده از سامانه‌های ناوبری جهانی به‌منظور محاسبه بخار آب، توموگرافی تروپسفر است که امکان بازتولید میدان سه‌بعدی از چگالی بخار آب را به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری تأخیر مایل تروپوسفری (STD[۳]) در امتداد خطوط دید مختلف بین ماهواره‌ها و گیرنده‌های زمینی، و سپس وارون‌سازی توموگرافیک این داده‌ها در یک شبکه‌بندی سه‌بعدی از وکسل‌ها[۴] فراهم می‌آورد. با این‌حال این روش نیز با چالش‌هایی نظیر بد شرطی ماتریس ضرایب، حساسیت نتایج به ابعاد وکسل‌ها و به‌طورکلی دشواری محاسباتی روبرو است [۴].

1. Radiosond
2. Radiometer
3. Tropospheric Slant Total Delay
4. voxel

طی سال‌های اخیر، با گسترش فناوری‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی و همچنین پیشرفت سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی در ارائه داده‌های دقیق، استفاده از ترکیب تکنیک‌های مرتبط با پردازش‌های دقیق GNSS و مدل‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی بخار آب در چارچوبی داده محور، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف نموده است. در این راستا، مؤلفه‌ی تر تأخیر ایجادشده به‌عنوان تابعی از پارامترهای فیزیکی جو که درنتیجه انکسار تروپسفری به دلیل عبور سیگنال GNSS از لایه‌های با ضریب شکست مختلف جو حاصل می‌شود، مبنای بازیابی بخار آب قابل بارش (PWV[5]) قرارگرفته است [۵]. بدین ترتیب تعمیم مکانی و زمانی PWV با تکیه بر مدل‌های یادگیری ماشین در دستور کار این رویکرد قرار می‌گیرد.

PWV از مشتقات تأخیر تر تروپسفری و همچنین یکی از کمیت‌های کلیدی در مطالعات هواشناسی است که بیانگر ارتفاع آب مایعی است که هنگام چگالش بخار آب موجود در یک پروفیل قائم به سطح مقطع یک مترمربع درنتیجه فعل و انفعالات جوی نازل‌شده و برحسب میلی‌متر بیان می‌شود [۵].

در سال‌های اخیر به‌منظور ارتقاء کارائی سنجش‌ازدور در کاربردهای هواشناسی، مسئله مدل‌سازی PWV حاصل از اندازه‌گیری‌های سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی با اتکا به روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، به‌عنوان یکی از راهبردهای نوظهور، مبنای مطالعات متعددی قرارگرفته است. چگینی و همکاران (۲۰۲۴) از مدل کمترین مربعات رگرسیون بردار پشتیبان (LS-SVR[6]) برای پیش‌بینی مکانی-زمانی PWV با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های GPS استفاده کردند. این مدل با بهره‌گیری از معادلات خطی ساده، دقت بالا و پیچیدگی محاسباتی پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر دارد. عملکرد مدل LS-SVR با چندین مدل دیگر مانند GPT3[7] و شبکه عصبی مقایسه شده و دقت بالاتری را نشان داده است [۶]. غفاری رزین و همکاران (۲۰۲۲)، مقادیر PWV را با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه‌های GPS واقع در شمال غرب ایران و منطقه البرز مرکزی با استفاده از دو مدل یادگیری عمیق شامل شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (GRNN[8]) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در یک چارچوب مکانی-زمانی پیش‌بینی کردند. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ایستگاه‌های کنترل و رادیوسوند در شهرهای تبریز و تهران انجام شد و عملکرد مدل‌ها با چند مدل مرجع هواشناسی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل GRNN در شبکه‌های مورد مطالعه عملکرد بهتری داشته است. میانگین RMSE برای ایستگاه‌های کنترل داخلی در منطقه شمال‌غرب حدود ۲/۱۴ میلی‌متر و در البرز مرکزی حدود ۲/۰۱ میلی‌متر حاصل شد [۷].

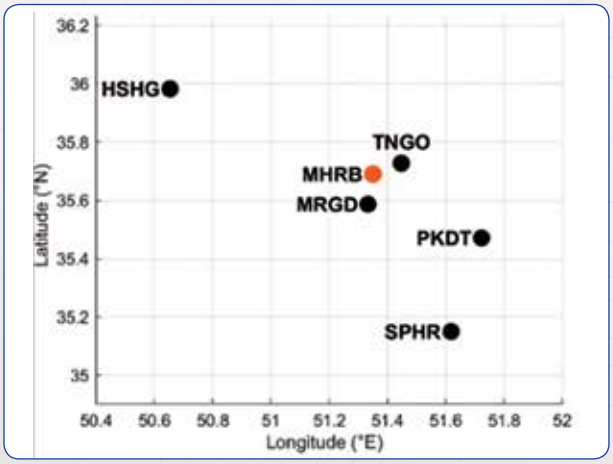
این پژوهش نیز باهدف مدل‌سازی مکانی-زمانی PWV با استفاده از مشاهدات ۵ ایستگاه GNSS شبکه ایستگاه‌های دائمی البرز با تکیه بر دو مدل یادگیری ماشین رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR[9])، درخت تصمیم تقویت‌شده با گرادیان (GBDT[10]) و یک مدل ترکیبی شامل شبکه عصبی پیچشی (CNN[11]) و شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت طولانی انجام‌گرفته است. در این رویکرد عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین با مدل درون‌یابی وزن دهی معکوس فاصله (IDW[12]) و دو مدل تجربی شامل ساستامونین[13] و هاپفیلد[14] مقایسه شده و درنهایت سازگاری نتایج مدل‌های پیشنهادی نسبت به مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های رادیوسوند به‌عنوان مرجع مستقل ارزیابی مورد بررسی قرارگرفته است.

۲-منطقه مطالعاتی

در این تحقیق، مشاهدات ۵ ایستگاه GPS البرز متعلق به شبکه ایستگاه‌های دائمی ایران (IPGN) در فاصله روزهای ۳۱۲ تا ۳۴۷ سال ۲۰۲۱ از سازمان جغرافیای نیروهای مسلح ایران تهیه شد و به‌عنوان مبنای آموزش و ارزیابی مدل‌های GBDT، GPR و Conv-LSTM مورد استفاده قرار گرفت. این بازه زمانی به دلیل دسترسی پیوسته به مشاهدات ثبت شده و همچنین نوسانات قابل‌توجه پارامترهای فیزیکی جو در این بازه زمانی که فصل پاییز (نوامبر و دسامبر) را در برمی‌گیرد انتخاب‌شده است. همچنین به‌منظور بررسی انطباق نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل‌ها با یک منبع مستقل محلی، مقادیر PWV حاصل از اندازه‌گیری‌های ایستگاه رادیوسوند در ساعات ۰ و ۱۲ UTC ایستگاه رادیوسوند مهرآباد تهران طی بازه زمانی متناظر به‌عنوان مرجع این ارزیابی مدنظر قرار گرفت. بهره‌گیری از داده‌های رادیوسوند،

5. Precipitable Water Vapor
6. Least Square- Support Vector Regression
7. Generative Pre-Trained Trabsformer
8. Generalized Regression Neural Network
9. Gaussian Process Regression
10. Gradient Boosting Decision Tree
11. Convolution Neural Network
12. Inverse Distance Weighting
13. Saastamoinen
14. Hopfield

که به‌طور مستقیم پروفیل عمودی دما، فشار و رطوبت را اندازه‌گیری می‌کند، امکان مقایسه‌ای معتبر میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و یک روش مستقیم هواشناسی را محقق می‌نماید. لازم به ذکر است که در این مورد فرایند ارزیابی صرفاً در صورت ثبت و در دسترس بودن اندازه‌گیری‌های پروفیل‌های سونداژ در زمان‌های مقرر امکان‌پذیر بوده است. شکل ۱ چگونگی توزیع مکانی ایستگاه‌های GPS و ایستگاه رادیوسوند را نشان می‌دهد.



شکل ۱: چگونگی توزیع مکانی ایستگاه‌های GPS (دایره‌های سیاه)، ایستگاه رادیوسوند مهرآباد تهران (دایره نارنجی)

به‌منظور مقایسه توان مدل‌های پیشنهادی با مدل‌های تجربی در بازسازی مقادیر PWV، از دو مدل تجربی ساستامونین و هاپفیلد استفاده‌شده است. برآورد مقادیر PWV حاصل از این دو مدل با بهره‌گیری از نسل پنجم داده‌های باز تحلیل جوی (ERA5[15]) متعلق به مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت آب‌وهوا (ECMWF[16]) انجام‌گرفته است. این مقایسه امکان ارزیابی توان مدل‌های یادگیری ماشین در تخمین مقادیر PWV را نسبت به برآوردهای حاصل از مدل‌های تجربی جهانی را به‌صورت عینی فراهم می‌سازد.

مدل‌سازی انجام‌شده در این تحقیق بر مبنای یک رویکرد مکانی-زمانی می‌باشد. در این رویکرد مدل‌های به کار گرفته‌شده مقادیر PWV ایستگاه هدف را با استفاده از مقادیر چهار ایستگاه آموزشی پیش‌بینی و با مقادیر برآورد شده توسط اندازه‌گیری‌های خود ایستگاه هدف ارزیابی می‌کنند. جدول زیر ایستگاه‌های آموزش و ایستگاه کنترل را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مجموعه ایستگاه‌های آموزشی و کنترل تعیین‌شده جهت مدل‌سازی در رویکرد موردنظر

ایستگاه‌های آموزش	ایستگاه کنترل
SPHR ،TNGO ،MRGD ،PKDT	HSHG

هدف از تعریف این رویکرد، ایجاد یک چارچوب داده محور به‌منظور تحلیل مکانی-زمانی مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی مقادیر PWV است.

۳-مشاهدات PWV

جهت محاسبه PWV با استفاده از اندازه‌گیری‌های شبکه ایستگاه‌های دائمی GPS البرز، مقادیر مشاهدات کد و فاز حامل به روش تعیین موقعیت دقیق نقطه‌ای (PPP) توسط نرم‌افزار GAMIT مورد پردازش قرار گرفت و مقادیر کل تأخیر تروپسفری (ZTD[17]) با تفکیک زمانی ۳۰۰ ثانیه برآورد شدند. روش PPP برای حذف خطای یونوسفری در تقریب مرتبه اول، از ترکیب عاری از یونوسفر استفاده می‌شود. این ترکیب با بهره‌گیری از مشاهدات دو فرکانسه، مؤلفه اصلی یونوسفر را حذف کرده و امکان برآورد دقیق‌تر خطای تروپسفری را فراهم می‌سازد. پس از برآورد مقادیر ZTD از هر ۱۲ مقدارمتوالی میانگین به عمل آمد تا سری زمانی ZTD با تفکیک یک‌ساعته تولید گردد. در گام بعدی، برای محاسبه تأخیر خشک زنیتی (ZHD[18])، از مدل تجربی ساستامونین که توسط دیویس و همکاران (۱۹۸۵) بهبود یافته استفاده شد. این مدل تابعی از فشار هوای خشک (P) برحسب میلی بار، عرض جغرافیایی (φ) و ارتفاع اورتومتریک (h_{ell}) ایستگاه است و به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$ZHD = \frac{0.0022768 \cdot P}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \times h_{ell}} \quad (۱)$$

با کسر مقدار ZHD از کل تأخیر تروپسفری، تأخیر تر تروپسفری در راستاری زنیتی (ZWD) برحسب متر حاصل می‌شود.

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (۲)$$

15. ECMWF Reanalysis V5
16. European Center for Medium-Range Weather Forecasts
17. Zenith Total Delay
18. Zenith Hydrostatic Delay

جهت دستیابی به مقدار PWV ثابت بدون بعد $\prod$ در تأخیر تر تروپسفری ضرب می‌شود.

$$PWV = \prod \times ZWD \quad (۳)$$

برآورد مقدار $\prod$ نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\prod = (10^{-6}(\frac{k_2}{T_m} + k'_2) \times R_v \times \rho_w)^{-1} \quad (۴)$$

در رابطه (۱۲)، ثابت $R_v = 461.45\ J.K^{-1}.kg^{-1}$ به‌عنوان ثابت گاز ویژه بخار آب تعریف می‌شود. چگالی آب مایع (ρ_w) با مقدار $1000\ \frac{kg}{m^3}$ است. ضرایب انکسار جو، k'_2 برابر با $\left(\frac{k}{mbar}\right)$ ۱۷ و k_3 برابر با $3.7\times10^5 (k^2/mbar)$ هستند. به‌منظور برآورد دمای میانگین وزنی جو (T_m)، در این مطالعه از رابطه تجربی ارائه شده توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده‌شده است[۸]:

$$T_m = 75.39 + 0.7103\ T_s \quad (۵)$$

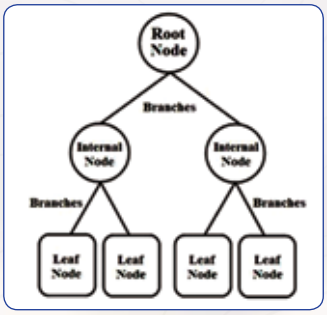
در رابطه فوق، T_s دمای سطحی ایستگاه برحسب کلوین است. مقادیر بخار آب قابل بارش محاسبه‌شده از رابطه (۳) به‌عنوان مقادیر مرجع به کار گرفته شده و برای آموزش و ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی با روش تحلیلی IDW مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقادیر نقش معیار پایه را داشته و امکان سنجش دقت، پایداری و قابلیت تعمیم مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی PWV را فراهم می‌سازند.

۴- روش‌شناسی

در این تحقیق دو مدل یادگیری ماشین شامل GBDT و GPR و همچنین یک مدل هیبریدی در چارچوب شبکه عصبی کانولوشنی (CNN), شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت طولانی (LSTM) به‌منظور مدل‌سازی با رویکرد مکانی-زمانی مورد استفاده قرارگرفته است. در این بخش تئوری مربوط به این مدل‌ها ارائه شده است.

۴-۱- درخت تصمیم تقویت شده با گرادیان

ایده اصلی مدل درخت تصمیم بر آن استوار است که داده‌ها به‌صورت بازگشتی و بر اساس مقادیر ویژگی‌ها به زیرمجموعه‌های همگن تفکیک شوند. فرایند آموزش از گره ریشه آغاز می‌شود که معرف کل مجموعه داده است. در مسائل رگرسیون الگوریتم در هر گره، بهترین حد آستانه را بر اساس یک تابع هزینه برای ایجاد یک تقسیم انتخاب می‌کند. درواقع، هر گره درخت نمایانگر یک قاعده تصمیم‌گیری مبتنی بر یک ویژگی خاص است [۹]. نتیجه این فرآیند ایجاد گره‌های فرزند است. این روند به‌صورت بازگشتی در کل ساختار تا رسیدن به یک خروجی (برگ) درخت تکرار می‌شود.



شکل۲: نمایش ساختار یک درخت تصمیم و اجزای آن

باوجود سادگی، درخت تصمیم ممکن است در مواجهه با روابط غیرخطی پیچیده دچار افت دقت و یا بیش‌برازش شود. برای رفع این محدودیت‌ها، از چارچوب‌های تقویتی بهره گرفته می‌شود که هدف آن‌ها بهبود تدریجی عملکرد با ترکیب چند یادگیرنده پایه است. در میان این روش‌ها، تقویت گرادیانی جایگاهی ویژه‌ای دارد. در این رویکرد، هدف به‌صورت برآورد تابع پیش‌بینی $F^*(X)$ تعریف می‌شود که نگاشتی از ورودی‌های $X=\{x_1,x_2,\ldots x_n\}$ به خروجی y است، به‌گونه‌ای که امید ریاضی تابع زیان $L\ (y = F(X))$ روی توزیع مشترک (X,y) کمینه گردد. تابع پیش‌بینی در این روش به‌صورت ترکیب افزایشی چند تابع پایه نوشته می‌شود[۱۰]:

$$F(x;\{\beta_m, a_m\}_{m=1}^{M}) = \sum_{m=1}^{M} \beta_m h(X; a_m) \quad (۶)$$

در رابطه‌ی بالا، $h(X;a_m)$ یادگیرنده‌ی پایه است و ضرایب $\{\beta_m\}_{m=0}^{M}$ وزن هر مؤلفه را در مدل تجمعی تعیین می‌کنند. روش تقویت درخت این ایده را در قالبی منسجم‌تر پیاده‌سازی می‌کند. هر درخت پایه فضای ویژگی‌ها را به L ناحیه‌ی جداگانه $\{R_{lm}\}_{l=1}^{L}$ تقسیم می‌کند و برای هر ناحیه یک مقدار ثابت $\bar{y}_{lm}$ به‌عنوان خروجی پیش‌بینی در مطابق رابطه زیر نظر می‌گیرد [۱۰]:

$$h(x;\{R_{lm}\}_{l=1}^{L}) = \sum_{l=1}^{L} \bar{y}_{lm} \quad (۷)$$

در ادامه این فرآیند مقدار ثابت هر برگ با کمینه‌سازی مجموع تابع زیان روی نمونه‌های واقع در همان ناحیه تعیین می‌شود:

$$\gamma_{lm} = \arg\min_{\gamma} \sum_{x_i \in R_{lm}} \Psi(y_i, F_{m-1}(x_i) + \gamma) \quad (۸)$$

درنهایت، مدل به‌روزرسانی شده با اعمال نرخ یادگیری ν به‌صورت زیر بیان می‌شود[۱۰]:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \nu \cdot \gamma_{lm} \quad (۹)$$

۴-۲- رگرسیون فرآیند گاوسی

رگرسیون فرآیند گاوسی یک مدل یادگیری نظارت شده است که تابع پیش‌بینی در آن به‌صورت یک فرآیند گاوسی مدل‌سازی می‌شود؛ بدین‌صورت که یک توزیع اولیه بر روی تابع ناشناخته f(x) مطابق رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود[۱۱]:

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (۱۰)$$

در این چارچوب تابع میانگین m(x) و تابع کرنل یا کوواریانس k(x, x′) بین مقدارهای تابع در دو نقطه‌ی ورودی x′ و x است به‌صورت روابط زیر تعریف می‌شود:

$$m(x) = \mathbb{E}[f(x)] \quad (۱۱)$$

$$k(x, x') = \mathbb{E}[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x'))^T] \quad (۱۲)$$

طی این فرآیند، مثبت معین بودن بردار مقادیر تابع توزیع نرمال چند متغیره، نقشی است که تابع کرنل برای هر مجموعه متناهی از ورودی‌ها بر عهده می‌گیرد. در این صورت توزیع احتمال مقادیر تابع f روی مجموعه ورودی‌ها به‌صورت زیر خواهد بود [۱۱]:

$$p(f|X) = \mathcal{N}(f|\mu, K) \quad (۱۳)$$

برای مشاهدات فاقد نویز مجموعه داده‌های آموزشی، به‌صورت $D = \{(x_i, f_i)\}_{i=1}^{N}$ در نظر گرفته می‌شود و هدف، برآورد مقادیر تابع در نقاط آزمون X_* است. بر اساس تعریف فرایند گاوسی، توزیع مشترک مقادیر تابع در نقاط آموزشی و آزمون به‌صورت زیر خواهد بود [۱۱]:

$$\begin{pmatrix} f \\ f_* \end{pmatrix} = \mathcal{N}\left(\begin{pmatrix} \mu \\ \mu_* \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} K & K_* \\ K_*^T & K_{**} \end{pmatrix}\right) \quad (۱۴)$$

که در این رابطه K=k(X,X)، کرنل بین نقاط آموزشی $K_* = k(X, X_*)$ کرنل بین آموزش و آزمون و $K_{**} = k(X_*, X_*)$ کرنل بین نقاط پیش‌بینی هستند. با استفاده از قواعد استاندارد شرطی‌سازی توزیع‌های گاوسی، توزیع پسین تابع f_* به‌صورت زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$p(f_*|X_*, X, f) = \mathcal{N}(f_*|\mu_*, \Sigma_*) \quad (۱۵)$$

میانگین و کوواریانس توزیع پسین نیز به‌صورت روابط (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شوند که در حقیقت میانگین توزیع پسین همان پیش‌بینی‌های انجام‌شده و کوواریانس آن عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها هستند [۱۱]:

$$\mu_* = \mu(X_*) + K_*^T K^{-1}(f - \mu(X)) \quad (۱۶)$$

$$\Sigma_* = K_{**} - K_*^T K^{-1} K_* \quad (۱۷)$$

۴-۳- شبکه عصبی کانوولوشنی

شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) دسته‌ای از مدل‌های یادگیری عمیق هستند که با تکیه بر ساختارهای پیچشی قادر به استخراج خودکار الگوهای محلی و سلسله‌مراتبی از داده‌های ورودی می‌باشند. هسته اصلی یک CNN، لایه کانولوشن است. در این لایه، یک کرنل بهبودپذیر با ابعاد k×k در داده‌های دوبعدی یا طول k برای داده‌های تک‌بعدی بر روی‌داده‌های ورودی حرکت داده می‌شود و در هر موقعیت حاصل‌ضرب داخلی گرفته می‌شود. خروجی این عملیات که نقشه ویژگی[19] نامیده می‌شود، از رابطه زیر (همبستگی متقاطع) محاسبه می‌گردد:

$$F_{i,j} = \sigma\left(\sum_{m=0}^{k-1}\sum_{n=0}^{k-1} W_{m,n} \cdot X_{i+m,j+n} + b\right) \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق، X ماتریس ورودی W وزن‌های فیلتر یا همان هسته کانولوشن است که مقادیر آن در طول فرآیند یادگیری بهینه می‌شوند. b نیز مقدار بایاس بوده و σ بیانگر

19. Feature map

تابع فعال‌سازی است. درنهایت F نقشه ویژگی حاصل از این لایه است که نمایانگر الگوهای استخراج‌شده از داده ورودی توسط آن کرنل می‌باشد. دو پارامتر مؤثر بر ابعاد نقشه ویژگی خروجی گام[20] و لایه‌گذاری[21] هستند. که گام نماینده تعداد پیکسل‌هایی است که هسته کانولوشن در هر حرکت جابه‌جا می‌شود و مقدار آن معمولاً ۱ یا ۲ در نظر گرفته می‌شود و لایه‌گذاری نیز به معنای افزودن ستون‌ها یا سطرهایی با مقدار صفر به دور داده ورودی است که هدف آن حفظ ابعاد مکانی پس از اعمال عملیات پیچش می‌باشد. ابعاد خروجی O بر اساس ابعاد ورودی I، ابعاد کرنل k، گام S و مقدار لایه‌گذاری P به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۲]:

$$O = \left[\frac{I - k + 2P}{S}\right] + 1 \qquad (۱۹)$$

پس از لایه‌های کانولوشن، می‌توان از لایه تجمیع[22] برای کاهش ابعاد و افزایش مقاومت در برابر جابه‌جایی کوچک استفاده کرد. رایج‌ترین نوع، حداکثر تجمیع است که بیشینه مقادیر موجود در پنجره را انتخاب می‌کند. در انتهای معماری CNN، نقشه‌های ویژگی پس از تخت‌سازی[23] به یک‌لایه کاملاً متصل[24] وارد می‌شوند تا تخمین نهایی مقادیر هدف تولید گردد [۱۲]:

$$\hat{y} = \phi(\boldsymbol{W}_{fc} \cdot \boldsymbol{f}_{flat} + \boldsymbol{b}_{fc}) \qquad (۲۰)$$

در رابطه بالا، $\boldsymbol{f}_{flat}$ بردار ویژگی‌های استخراج شده توسط لایه‌های کانولوشن و تجمیع، بردار وزن‌های لایه کاملاً متصل و $\boldsymbol{b}_{fc}$ بردار بایاس لایه‌های کاملاً متصل است [۱۲].

۴-۴- شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت طولانی

شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت طولانی (LSTM) یک مدل یادگیری عمیق است که به‌منظور غلبه بر مشکل محوشدگی گرادیان در فرآیند مدل‌سازی با شبکه عصبی بازگشتی (RNN) با داده‌های ترتیبی توسعه داده شده است. معماری LSTM از بلوک‌های حافظه‌ای تشکیل شده که در طول دنباله زمانی به‌صورت پیاپی تکرار می‌شوند. هر بلوک حافظه، مقدار ذخیره شده در سلول را در زمان نگه داشته و با استفاده از دروازه‌ها، میزان ورود و خروج اطلاعات را کنترل می‌کند. در مرحله ورودی، مؤلفه ورودی مرحله جاری $x^{(t)}$ با خروجی گام قبل $y^{(t-1)}$ ترکیب می‌شود [۱۳]:

$$z^{(t)} = g(W_z x^t + R_z y^{t-1} + b_z) \qquad (۲۱)$$

در رابطه اخیر W_Z و R_Z به ترتیب ماتریس وزن‌های ورودی $x^{(t)}$ و خروجی مرحله قبلی $y^{(t-1)}$ و b_Z بردار بایاس است. دروازه ورودی بر اساس ورودی $x^{(t)}$ خروجی مرحله قبل $y^{(t-1)}$ و مقدار حالت سلول در گام قبل یعنی $c^{(t-1)}$ محاسبه می‌شود [۱۴].

$$i^t = \sigma(W_i x^{(t)} + R_i y^{(t-1)} + p_i \odot c^{(t-1)} + b_i) \qquad (۲۲)$$

در این رابطه، $\odot$ ضرب مؤلفه به مؤلفه، p_i وزن اتصال مستقیم از حالت سلول به دروازه، و b_i بایاس دروازه ورودی است. سپس بردار کاندید $z^{(t)}$ و دروازه ورودی i^t تعیین می‌کنند چه اطلاعاتی به حالت سلول اضافه شود. دروازه فراموشی مشخص می‌کند چه بخشی از اطلاعات سلول در مرحله قبلی باید حذف شود.

$$f^{(t)} = \sigma(W_f x^{(t)} + R_f y^{(t-1)} + p_f \odot c^{(t-1)} + b_f) \qquad (۲۳)$$

که در آن R_f ، W_f و p_f به ترتیب وزن‌های مرتبط با $y^{(t-1)}$ ، $x^{(t)}$ و $c^{(t-1)}$ هستند و b_f بردار بایاس این دروازه را نشان می‌دهد. در گام بعدی مقدار حالت سلول به‌روز می‌شود و رابطه آن مطابق زیر می‌باشد:

$$c^{(t)} = z^{(t)} \odot i^t + c^{(t-1)} \odot f^{(t)}) \qquad (۲۴)$$

در ادامه، مقدار دروازه خروجی $o^{(t)}$ محاسبه می‌شود. این مقدار بر اساس ورودی مرحله جاری $x^{(t)}$ ، خروجی گام قبل $y^{(t-1)}$ و حالت سلول $c^{(t)}$ تعیین می‌شود و اتصال‌های مستقیم از حالت سلول به دروازه‌ها نیز در آن لحاظ می‌شود [۱۵]:

$$o^{(t)} = \sigma(W_o x^{(t)} + R_o y^{(t-1)} + p_o \odot c^{(t)} + b_o) \qquad (۲۵)$$

20. Strip
21. Padding
22. Pooling
23. Flatten
24. Fully Connected

که در آن R_o ، W_o و p_o وزن‌های متناظر با $y^{(t-1)}$ ، $x^{(t)}$ و p_o هستند و b_o بردار بایاس مربوط به این دروازه است. در پایان، خروجی بلوک $y^{(t-1)}$ از ترکیب حالت سلول به‌روز شده $c^{(t)}$ و مقدار دروازه خروجی $o^{(t)}$ از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$y^{(t)} = g(c^{(t)}) \odot o^{(t)} \quad (۲۶)$$

۵-نتایج

در این بخش عملکرد سه مدل رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)، درخت تصمیم تقویت شده با گرادیان (GBDT) و مدل ترکیبی Conv-LSTM در مرحله آموزش و آزمون جهت تخمین مقادیر PWV مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا از دو معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (r) به‌عنوان شاخص‌های آماری مدنظر قرارگرفته است.

۵-۱- مرحله آموزش

در مرحله آموزش سه مدل یادگیری ماشین مذکور مطابق جدول ۱ جهت پیش‌بینی مقادیر PWV در موقعیت ایستگاه HSHG در زمان‌های متناظر با استفاده از داده‌های ۴ ایستگاه SPHR، PKDT، MRGD و TNGO مورد آموزش قرار گرفتند. بردار آموزشی شامل متغیرهای روز سال (۳۶ روز)، ساعت UTC (۸۶۴ ساعت)، عرض جغرافیایی (مؤلفه ثابت ایستگاهی)، طول جغرافیایی (مؤلفه ثابت ایستگاهی)، ارتفاع ایستگاه‌های آموزشی (مؤلفه ثابت ایستگاهی) و همچنین مقادیر PWV برآورد شده با ایستگاه‌های آموزشی می‌باشد. لذا ابعاد بردار آموزشی ۴×۳۶×۸۶۴ است. دقت سه مدل یادگیری ماشین در مرحله آموزش مطابق جدول زیر است:

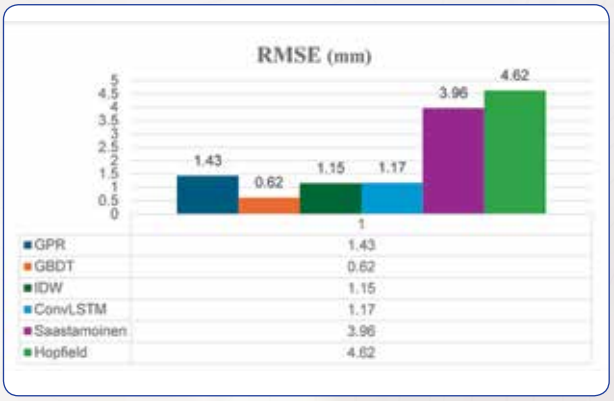
جدول۲: مقادیر RMSE سه مدل LSTM، GBDT و GPR برحسب میلی‌متر در مرحله آموزش

مدل	CONV-LSTM	GBDT	GPR
RMSE	۰/۵	۰/۶۲	۰/۳

مطابق جدول ۳، مرحله آموزش مدل GPR با ثبت RMSE ۰/۳ میلی‌متر دقیق‌ترین عملکرد را نسبت به دو مدل دیگر از خود ارائه کرده است.

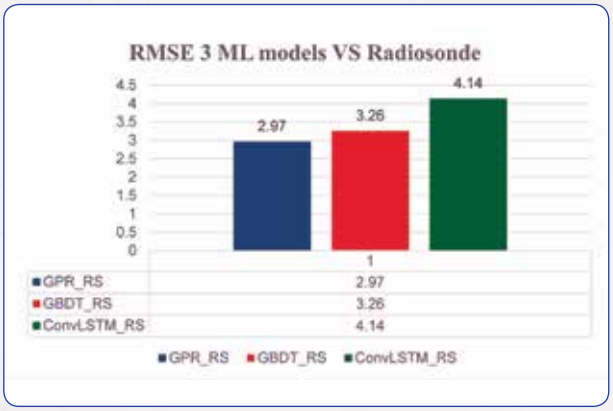
۵-۲- مرحله آزمون

در مرحله آزمون نتایج حاصل از پیش‌بینی سه مدل پیشنهادی ارائه خواهد شد و توان این مدل‌ها نسبت به مدل‌های تجربی ساستامونین، هاپفیلد و همچنین مدل درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله در برآورد مقادیر PWV مورد بررسی قرار می‌گیرد. بردار آزمون شامل روز، سال، ساعت UTC، عرض جغرافیایی ایستگاه هدف (مؤلفه ثابت ایستگاهی)، طول جغرافیایی ایستگاه هدف (مؤلفه ثابت ایستگاهی) و ارتفاع ایستگاه هدف (مؤلفه ثابت ایستگاهی) می‌باشد. بنابراین ابعاد بردار آزمون ۱×۳۶×۸۶۴ است. شکل۳ نمایش میله‌ای مقادیر RMSE مدل‌های پیشنهادی را به همراه مدل‌های تجربی و تحلیلی را نشان می‌دهد.



شکل۳: نمودار میله‌ای مقادیر RMSE سه مدل یادگیری ماشین به همراه مدل‌های تجربی ساستامونین و هاپفیلد و مدل تحلیلی IDW برحسب میلی‌متر

مطابق شکل ۳، مدل GBDT با ارائه RMSE ۰/۶۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان دادند. دو مدل Conv-LSTM و GPR نیز مقدار خطای RMSE ۱/۱۷ و ۱/۴۳ میلی‌متر را به خود اختصاص دادند. مدل IDW با ثبت RMSE ۱/۱۵ میلی‌متر عملکردی متوسط از خود نشان داد. با توجه به اختلاف اندک میان RMSE های حاصل از پیش‌بینی مدل‌های در مرحله آموزش و آزمون تقریباً چند صدم تا چند دهم، احتمال وقوع بیش برازش منتفی است. مطابق نتایج قابل‌مشاهده در شکل ۳، مدل‌های ذکرشده دقت بالاتری را نسبت به دو مدل تجربی ساستامونین و هاپفیلد از خود ارائه نمودند. شکل ۳ میانگین مقادیر RMSE حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین در مقایسه با مرجع رادیوسوند به‌عنوان یک منبع هواشناسی در ساعت‌های ۰ و ۱۲ UTC را نشان می‌دهد.

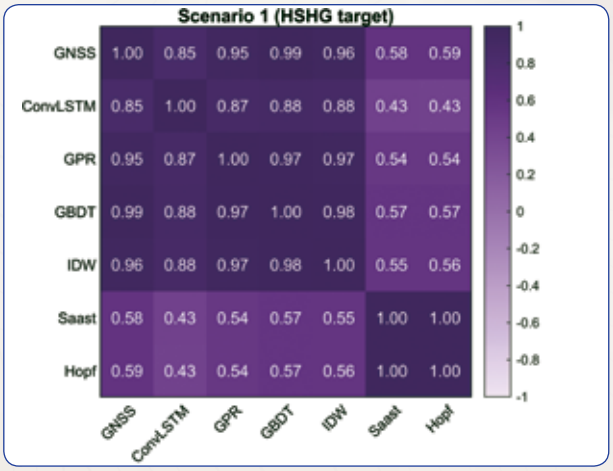


شکل ۴: نمودار میله‌ای میانگین مقادیر RMSE سه مدل یادگیری ماشین در مقایسه با مرجع رادیوسوند برحسب میلی‌متر در ساعت‌های ۰ و ۱۲ UTC

طبق نتایج ارائه شده در شکل ۴ مدل GPR با ثبت RMSE معادل ۲/۹۷ میلی‌متر بیشترین سازگاری با مقادیر مرجع رادیوسوند را در زمان‌های مقرر از خود نشان داد. برای مدل‌های Conv-LSTM و GBDT نیز مقادیر RMSE در مقایسه با مرجع رادیوسوند به ترتیب ۴/۱۴ و ۲/۹۷ میلی‌متر گزارش شد.

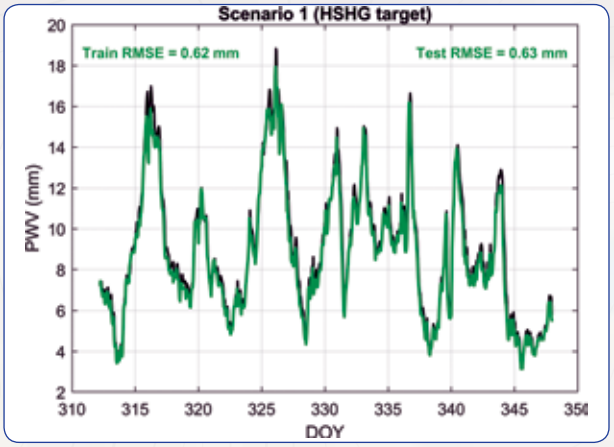
۵-۳- تحلیل همبستگی

در این بخش نتایج همبستگی میان برآوردهای حاصل از مدل‌های مختلف در مرحله آزمون بررسی‌شده است. مبنای این ارزیابی، شاخص آماری ضریب همبستگی پیرسون است. شکل ۵ نقشه حرارتی همبستگی میان مقادیر PWV حاصل از سه مدل یادگیری ماشین GPR، GBDT و Conv–LSTM، مدل‌های تجربی ساستامونین و هاپفیلد، مدل تحلیلی IDW و مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های GNSS را برای ایستگاه هدف (HSHG) نشان می‌دهد.



شکل ۵: نقشه حرارتی همبستگی میان برآوردهای حاصل از ۶ مدل مورد بررسی و مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های GNSS در ایستگاه HSHG

مطابق شکل همبستگی میان مدل‌های GBDT و GPR با مقادیر مرجع GNSS بیش از ۰/۹ گزارش‌شده که نشان‌دهنده وابستگی شدید خطی این دو مدل با مقادیر مرجع است. مدل Conv-LSTM با ارائه مقدار همبستگی ۰/۸۵ با مقادیر GNSS در تخمین نوسانات مقادیر واقعی نسبت به دو مدل یادشده ضعیف‌تر عملکرد است. همچنین دو مدل تجربی ساستامونین و هاپفیلد به ترتیب با ثبت همبستگی‌های ۰/۵۸ و ۰/۵۹ نسبت به سایر مدل‌های عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده‌اند. شکل نمودار سری زمانی مدل GBDT (رنگ سبز) و مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های GNSS (رنگ سیاه) در فاصله زمانی روزهای ۳۱۲ تا ۳۴۷ در ایستگاه HSHG نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمودار سری زمانی مدل GBDT (منحنی سبز رنگ) و مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های GNSS (منحنی سیاه) در فاصله زمانی روزهای ۳۱۲ تا ۳۴۷ در ایستگاه HSHG نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پیش‌بینی‌های مقادیر PWV حاصل از مدل GBDT برازش مناسبی به مقادیر مرجع GNSS دارد که با توجه به مقدار همبستگی بالا که در بخش قبل به آن اشاره شد (۰/۹۹) چنین رفتاری مطابق انتظار بود. همچنین نزدیکی RMSE در مرحله آموزش و آزمون نشان می‌دهد. مدل توانایی خود در دنبال کردن نوسانات آموزشی را در مرحله آزمون نیز حفظ کرده و اختلاف ۰/۰۱ میلی‌متر بین مقادیر خطا در مرحله آموزش و آزمون احتمال وقوع بیش برازش را به‌طورکلی نفی می‌کند. لازم به ذکر است در این بخش به دلیل وضوح بیشتر و عدم تداخل منحنی مدل‌ها از نمایش منحنی سایر مدل‌ها صرفه نظر شده و تنها نمایش منحنی GBDT به‌عنوان دقیق‌ترین مدل مدنظر قرارگرفته است.

۶-نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف مدل‌سازی سری زمانی PWV در یک چارچوب مکانی-زمانی با استفاده از مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های GNSS و همچنین به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین انجام گرفت. در این راستا مشاهدات ثبت‌شده توسط اندازه‌گیری‌های پنج ایستگاه شبکه ایستگاه‌های GPS دائمی البرز در فاصله روزهای ۳۱۲ تا ۳۴۷ سال ۲۰۲۱ با روش تعیین موقعیت دقیق نقطه‌ای (PPP) در نرم‌افزار گامیت پردازش شد و مقادیر ZTD با تفکیک‌پذیری زمانی ۱ ساعت حاصل گردید. با کسر ZHD از ZTD های حاصل از پردازش‌های صورت گرفته مقادیر ZWD به دست آمد. از حاصل‌ضرب این مقادیر در ثابت Π مقادیر PWV حاصل شد و این مقادیر به‌عنوان مرجع آموزش و ارزیابی برای سه مدل یادگیری ماشین GBDT، GPR و یک مدل ترکیبی در چارچوب CNN LSTM مدنظر قرار گرفت. فرآیند مدل‌سازی بدین‌گونه انجام گرفت که داده‌های ایستگاه‌های،PKDT، MRGD SPHR و TNGO با متغیرهای ورودی DOY، ساعت UTC، عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی ارتفاع و PWV به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزشی در نظر گرفته‌شده و مقادیر PWV در ایستگاه TNGO در زمان‌های متناظر هدف پیش‌بینی توسط سه مدل یادگیری بود. نتایج حاصل از مرحله آموزش سه مدل یادگیری ماشین نشان داد، مدل GPR با ثبت RMSE ۰/۳ میلی‌متر دقیق‌ترین عملکرد را نسبت به دو مدل GBDT و Conv-LSTM با RMSE های به ترتیب،۰/۶۲ و ۰/۵ میلی‌متر از خود نشان داد. در مرحله آزمون مدل GBDT با ارائه RMSE ۰/۶۳ میلی‌متر پایدارترین عملکرد را نسبت به GPR و Conv-LSTM با RMSE های به ترتیب ۱/۴۳ و ۱/۱۷ میلی‌متر از خود نشان داد. با توجه به اختلاف اندک میان خطای مدل‌های یادگیری ماشین در مرحله آموزش و آزمون که حدوداً چند صدم تا چند دهم میلی‌متر مشاهده شده احتمال وقوع بیش برازش را باید منتفی در نظر گرفت. مدل تحلیلی IDW نیز با ارائه RMSE ۱/۱۵ میلی‌متر عملکردی متوسط از خود نشان داد. در این مرحله دو تجربی ساستامونین و هاپفیلد با ثبت RMSEهای به ترتیب ۳/۹۶ و ۴/۶۲ میلی‌متر عملکردی ضعیف‌تر از سایر مدل‌های از خود ارائه نمودند. برای مقایسه دقت مدل‌های یادگیری ماشین با یک منبع هواشناسی محلی مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های ایستگاه رادیوسوند مهرآباد تهران به‌عنوان مرجع ارزیابی مدنظر قرار گرفت. در این ارزیابی مدل GPR با ۲/۹۶ میلی‌متر بیشتری تطابق را نسبت به مدل‌های GBDT و CONV-LSTM با RMSE به ترتیب ۳/۲۶ و ۴/۱۴ میلی‌متر از خود نشان داد. بررسی همبستگی مدل‌های به کار گرفته‌شده با مقادیر مرجع GNSS در مرحله آزمون نشان داد مدل GBDT با ثبت مقدار همبستگی ۰/۹۹ نسبت به مدل‌های GPR و Conv-LSTM که مقدار همبستگی به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۸۵ را از خود ارائه کردند، بهترین پیش‌بینی را از نوسانات مقادیر مرجع GNSS از خود نشان داده است.

برآیند یافته‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین مورداستفاده خصوصاً GBDT به دلیل عملکرد دقیق در پیش‌بینی مقادیر PWV می‌تواند مبنایی برای پیش‌بینی این مقادیر و استفاده از آن در سامانه‌های هشدار بارشی در مقیاس محلی باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از داوران محترم بابت ارائه نکات ارزنده مراتب قدردانی خود را اعلام می‌دارند.



مراجع

[1] Ghaffari-Razin, S.R. and N. Hooshangi, Estimation of Precipitable Water Vapor (PWV) using learning-based methods in north-west of Iran. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 2022. 30(120): p. 139–155.

[2] Mateus, P., J. Catalão, and G. Nico, Sentinel-1 interferometric SAR mapping of precipitable water vapor over a country-spanning area. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017. 55(5): p. 2993–2999.

[3] Heydarivaraste, S., S. Emadi, and Y. Jamour, Estimation and Analysis of Precipitable Water Vapor Using GPS Data and Satellite Altimeter. Journal of Geomatics Science and Technology, 2020. 10(2): p. 131–139.

[4] Adavi, Z., Assessment of various processing schemes and solution strategies to improve the performance of GNSS tropospheric tomography. 2022, Technische Universität Wien.

[5] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992. 97(D14): p. 15787–15801.

[6] Cheginin, M., B. Voosoghi, and S.R. Ghaffari-Razin, Estimation of precipitable water vapor using least squares support vector regression and comparison with other models. Journal of Geomatics Science and Technology, 2024. 13(3): p. 13–28.

[7] Ghaffari-Razin, S., R. Davari Majd, and N. Hooshangi, Estimation of precipitable water vapor (PWV) using generalized regression neural network (GRNN) and comparison against tomography, ECMWF, Saastamoinen, GPT3 and ANN models. J. Water Health, 2023. 49: p. 243–264.

[8] Sadeghi, E., M. Mashhadi-Hossainali, and H. Etemadfard, Determining precipitable water in the atmosphere of Iran based on GPS zenith tropospheric delays. Annals of geophysics, 2014. 57(4): p. A0430–A0430.

[9] Rivera-Lopez, R., et al., Induction of decision trees as classification models through metaheuristics. Swarm and Evolutionary Computation, 2022. 69: p. 101006.

[10] Friedman, J.H., Greedy function approximation: a gradient boosting machine. Annals of statistics, 2001: p. 1189–1232.

[11] Murphy, K.P., Machine learning: a probabilistic perspective. 2012: MIT press.

[12] Goodfellow, I., et al., Deep learning. Vol. 1. 2016: MIT press Cambridge.

[13] Gers, F.A. and J. Schmidhuber. Recurrent nets that time and count. in Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium. 2000. IEEE.

[14] Srivastava, R.K., K. Greff, and J. Schmidhuber, Training very deep networks. Advances in neural information processing systems, 2015. 28.

[15] Hochreiter, S. and J. Schmidhuber, Long short-term memory. Neural computation, 1997. 9(8): p. 1735–1780.



مقاله

نقشه‌برداری مکانی آلودگی خاک به سرب با استفاده از شبکه عصبی عمیق مبتنی بر یادگیری انتقالی و داده‌های سنجش‌ازدور

روح‌الله گودرزی، کارشناس عکس‌برداری هوایی سازمان نقشه‌برداری کشور
محمود رضا صاحبی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سراسر جهان است. اگرچه روش‌های آزمایشگاهی و شیمیایی متداول از دقت بالایی برخوردارند، هزینه زیاد، زمان‌بر بودن و محدودیت در پوشش مکانی، کاربرد آن‌ها را در پایش گسترده آلودگی خاک محدود می‌نماید. در مقابل، سنجش‌ازدور به‌عنوان رویکردی کارآمد و مقرون به صرفه، امکان برآورد و نقشه‌برداری غلظت فلزات سنگین، به‌ویژه سرب، را در مقیاس‌های منطقه‌ای فراهم می‌سازد. با این حال، وابستگی این روش به داده‌های آموزشی گسترده، توسعه مدل‌های تعمیم‌پذیر را با چالش مواجه نموده است. از این رو، توسعه مدل‌های یادگیری انتقالی مبتنی بر یادگیری عمیق به‌منظور کاهش نیاز به نمونه‌برداری زمینی و افزایش قابلیت انتقال مدل بین مناطق مختلف، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. در این پژوهش، چارچوبی مبتنی بر یادگیری انتقالی و شبکه‌های عصبی عمیق برای برآورد و نقشه‌برداری غلظت سرب در خاک توسعه داده شد. این چارچوب با تلفیق داده‌های طیفی زمینی و تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸، استخراج ویژگی‌های طیفی مؤثر و بهبود دقت پیش‌بینی را امکان‌پذیر ساخت. ابتدا شاخص‌های طیفی بهینه از ترکیب باندهای مختلف استخراج شدند و سپس مدلی مبتنی بر یادگیری عمیق برای مدل‌سازی رابطه میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب توسعه یافت. در ادامه، با به‌کارگیری راهبرد یادگیری انتقالی، ویژگی‌های آموخته‌شده از مناطق مرجع به منطقه هدف منتقل شدند تا قابلیت تعمیم مدل افزایش یافته و خطر بیش‌برازش کاهش یابد. نتایج نشان داد شاخص‌های طیفی مبتنی بر اختلاف نرمال‌شده چند باندی (NDPI) نسبت به شاخص‌های کلاسیک اختلاف نرمال‌شده (NDSI) حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات غلظت سرب دارند. در میان شاخص‌های بررسی‌شده، NDPI-2 با طول‌موج‌های ۸۸۵، ۱۸۷۵ و ۲۰۹۵ نانومتر بیشترین قدرت پیش‌بینی را نشان داد و مقادیر ضریب همبستگی و اهمیت متغیر (Variable Importance in Projection; VIP) آن به ترتیب برابر با ۰/۶۶ و ۱/۲۷ بود؛ درحالی‌که NDSI-1 با طول‌موج‌های ۱۰۰۵ و ۱۴۵۵ نانومتر کمترین اهمیت را داشت. همچنین، شبکه عصبی عمیق توسعه‌یافته نسبت به مدل جنگل تصادفی عملکرد بهتری ارائه داد و مقادیر R^2 در مناطق مرجع (۱۳۷ نمونه) و منطقه هدف (۸۰ نمونه) به ترتیب برابر با ۰/۵۲ و ۰/۴۲ به‌دست‌آمده آمد. درنهایت، نقشه غلظت سرب حاصل از تصاویر لندست-۸ با استفاده از مدل‌سازی خطای باقیمانده و روش درون‌یابی فاصله معکوس (IDW) اصلاح گشت و مقدار R^2 به ۰/۷۳ افزایش یافت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی از دقت و قابلیت تعمیم مناسبی برای پایش محیطی و نقشه‌برداری آلودگی خاک به فلزات سنگین برخوردار است.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، شبکه‌عمیق، یادگیری انتقالی، آلودگی خاک، شاخص طیفی



۱- مقدمه

فلزات سنگین[1] موجود در خاک از مهم‌ترین آلاینده‌های محیطی به شمار می‌روند و به دلیل پایداری، سمیت و قابلیت ماندگاری بالا، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌ها و سلامت انسان محسوب می‌شوند [۱, ۲]. این عناصر به دلیل چگالی بالا و تجزیه‌ناپذیری، پس از ورود به خاک به‌آسانی حذف نشده و در محیط انباشت می‌یابند [۳]. درنتیجه، تجمع تدریجی آن‌ها می‌تواند غلظت فلزات سنگین را به سطوحی فراتر از حدود مجاز زیست‌محیطی رسانده و خطرات قابل‌توجهی برای انسان، گیاهان، جانوران و سایر اجزای اکوسیستم ایجاد نمایند [۴].

قرارگیری انسان در معرض فلزات سنگین با طیف گسترده‌ای از پیامدهای بهداشتی همراه است که از اختلالات گوارشی و پوستی تا آسیب‌های کبدی، کلیوی و ریوی را در برمی‌گیرد و در موارد شدیدتر، می‌تواند موجب اثرات ژنوتوکسیک[2]، ازجمله جهش‌های DNA، و افزایش خطر ابتلا به سرطان شود [۵,۶]. فلزات سنگین از مسیرهای مختلف وارد بدن انسان می‌شوند که در میان آن‌ها، انتقال از طریق زنجیره غذایی مهم‌ترین و رایج‌ترین مسیر مواجهه به شمار می‌رود [۷]. از این‌رو، حفاظت از کیفیت خاک و منابع آب، به‌ویژه در مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، از ارکان اساسی مدیریت محیط‌زیست و حفظ سلامت عمومی محسوب می‌شود [۸].

شناخت عوامل مؤثر بر انتقال و انباشت فلزات سنگین در محیط، نقش مهمی در مدیریت آلودگی و حفاظت از منابع خاک امری بدیهی محسوب می‌شود. لیکن تجمع فلزات سنگین در محیط‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل متعددی، ازجمله ویژگی‌های هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی، قرار دارد. در مناطق معدنی و صنعتی، رودخانه‌ها و سایر منابع آب سطحی به‌عنوان مسیرهای اصلی انتقال آلاینده‌ها، زمینه جابه‌جایی و تجمع فلزات سنگین را در بخش‌های مختلف حوضه آبریز فراهم می‌نمایند [۹]. در این میان، رواناب سطحی[3] با شست‌وشوی خاک‌های آلوده، نقش مهمی در انتقال فلزات سنگین به آب‌های سطحی ایفا نموده و یکی از مهم‌ترین سازوکارهای گسترش آلودگی در حوضه‌های آبریز محسوب می‌شوند. علاوه بر این، فرسایش و انتقال رسوبات[4] معلق موجب جابه‌جایی فلزات جذب‌شده بر ذرات خاک شده و درنهایت، به انباشت آن‌ها در مناطق پایین‌دست و محیط‌های رسوبی منجر می‌گردد.

بر این اساس، فلزات سنگین می‌توانند از منابع طبیعی، نظیر کانسارهای حاوی سرب، کادمیوم و آرسنیک، یا از فعالیت‌های انسان‌زاد، ازجمله فعالیت‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی، وارد محیط شوند. این آلاینده‌ها پس از ورود به خاک، تحت تأثیر فرآیندهای هیدرولوژیکی و ژئوشیمیایی، قابلیت انتقال به آب‌های سطحی و زیرزمینی را دارند. از مهم‌ترین منابع انسان‌زاد انتشار فلزات سنگین، می‌توان به تخلیه پساب‌های صنعتی و تشکیل شیرابه ناشی از دفن پسماندهای شهری و صنعتی اشاره نمود که به‌ویژه در محل‌های دفن زباله، موجب افزایش غلظت این عناصر در خاک و منابع آب می‌شوند [۱۰]. از سوی دیگر، افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه فعالیت‌های صنعتی و معدنی، ضرورت توسعه روش‌های کارآمد برای پایش و کنترل آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است [۱۱]. ازاین‌رو، دسترسی به اطلاعات دقیق از منشأ، توزیع مکانی و میزان آلودگی، پیش‌نیاز مدیریت مؤثر این آلاینده‌ها و طراحی برنامه‌های پایش مستمر و نظام‌مند محسوب می‌شود [۱۲].

روش‌های برآورد غلظت فلزات سنگین را می‌توان به دو گروه اصلی، شامل روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری زمینی و آنالیزهای آزمایشگاهی و روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور تقسیم نمود [۱۳]. در روش‌های سنتی، غلظت فلزات سنگین ابتدا از طریق نمونه‌برداری زمینی و آنالیزهای آزمایشگاهی تعیین‌شده و سپس به‌منظور تولید نقشه‌های پیوسته، از روش‌های درون‌یابی[5] مکانی مبتنی بر وابستگی فضایی استفاده می‌شود [۱۴]. اگرچه این روش‌ها از دقت بالایی در نقاط نمونه‌برداری برخوردارند، اما هزینه‌بر، زمان‌بر و وابسته به اجرای عملیات میدانی گسترده هستند [۱۵].

---

1. Heavy Metals
2. Genotoxic: دارای توانایی ایجاد آسیب در ماده ژنتیکی که می‌تواند منجر به جهش‌های ژنتیکی و افزایش خطر سرطان شود
3. Runoff
4. Sediment Transport
5. Interpolation

جدول ۱: مروری بر مطالعات پیشین

مرجع	سال	منطقه	مدل مورد استفاده	نوآوری
[۲۰]	۲۰۱۵	ایران	یادگیری ماشین[۶](شبکه عصبی فازی[۷])	بهبود مدل تخمین با ارائه روش پایداری مبتنی بر شبکه عصبی و منطق فازی
[۲۳]	۲۰۱۶	چین	یادگیری ماشین (رگرسیون پله‌ای[۸])	استفاده از داده چند مکانی البته به‌صورت مجزا
[۲۴]	۲۰۱۷	ایران	زمین‌آماری (مدل کریجینگ)	استفاده از روش فرا ابتکاری برای انتخاب ویژگی مناسب
[۱۵]	۲۰۱۸	چین	مدل زمین‌آماری (کریجینگ وزن‌دار)	استفاده از داده‌های طیف‌سنجی جهت تولید شاخص طیفی
[۲۵]	۲۰۱۸	قطر	یادگیری ماشین	استفاده از داده‌های جانبی همچون مدل رقومی زمین و نقشه موضوعی نقاط داغ
[۲۶]	۲۰۱۹	چین	یادگیری ماشین	استفاده از تبدیلات طیفی همچون تبدیل موجک جهت بارزسازی مشخصه طیفی
[۸]	۲۰۱۹	چین	مدل تجمعی[۹]	بهبود مدل برآورد با ترکیب چندین مدل با یکدیگر و همچنین استفاده از فیلتر گاوسی به‌منظور کاهش ابعاد فضای ویژگی[۱۰]
[۵]	۲۰۲۰	کنیا	یادگیری ماشین (جنگل تصادفی[۱۱])	استفاده از داده‌های چند منبعی همچون سنتینل و ALOS به همراه مدل رقومی زمین
[۱۷]	۲۰۲۰	چین	رگرسیون ساده (کمترین مربعات جزیی[۱۲])	استفاده از تبدیل طیفی FOD[۱۳] به‌منظور بارزسازی مشخصه‌های طیفی بهینه به‌منظور تخمین فلز سنگین از داده طیف‌سنجی
[۲۷]	۲۰۲۰	بلژیک	تلفیق زمین‌آماری و یادگیری ماشین	استفاده از مدل تلفیقی برای تخمین فلز سنگین و همچنین استفاده از داده‌های چند زمانه از نمونه‌های خاک
[۳]	۲۰۲۰	ایران	زمین‌آماری	استفاده از ۴۱ شاخص مختلف طیفی، زیست‌محیطی و مورفولوژی
[۷]	۲۰۲۲	چین	زمین‌آماری (کریجینگ)	استفاده از آنالیز مکانی واریوگرام برای شناسایی ناپایداری مکانی
[۲۸]	۲۰۲۲	ایران	یادگیری ماشین	استفاده از روش‌های انتخاب ویژگی همچون الگوریتم ژنتیک
[۱۶]	۲۰۲۳	چین	تلفیق زمین‌آماری و تجمعی	استفاده از مدل جدید تخمین فلزات سنگین همچون GW-XGBoost
[۲۹]	۲۰۲۳	ایران	یادگیری ماشین	به‌کارگیری روش‌های تصحیحات توپوگرافی به‌منظور بهبود دقت نتایج
[۳۰]	۲۰۲۳	ایران	یادگیری ماشین	استفاده از روش شبکه عصبی و ارتباط نتایج با داده‌های Cohort استان گلستان

اگرچه دقت اندازه‌گیری در نقاط نمونه‌برداری بالا است، اما دقت برآورد در سایر نقاط به عملکرد روش درون‌یابی و نیز تعداد، کیفیت و نحوه توزیع مکانی نمونه‌ها بستگی دارد. بنابراین، نتایج حاصل به‌شدت تحت تأثیر کیفیت طراحی شبکه نمونه‌برداری بوده و هرگونه کاستی در تعداد یا پراکنش نمونه‌ها می‌تواند دقت برآورد را کاهش دهد [۱۵]. از منظر نقشه‌برداری، روش‌های مبتنی بر درون‌یابی معمولاً سطوحی هموار و پیوسته تولید می‌نمایند؛ بنابراین، توانایی آن‌ها در بازنمایی تغییرات موضعی و ناهمگنی‌های مکانی غلظت آلاینده‌ها محدود است [۱۶]. به بیان دیگر، این روش‌ها بر این اصل استوارند که غلظت آلاینده‌ها در نقاط مجاور از الگوی وابستگی مکانی پیروی می‌نماید و شباهت مقادیر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد [۱۶،۱۷]. نهایتاً، یکی دیگر از محدودیت‌های مهم روش‌های سنتی، مقیاس‌پذیری پایین آن‌ها است. به‌ویژه در مناطق وسیع یا نواحی صعب‌العبور، اجرای عملیات نمونه‌برداری با دشواری همراه است و همین امر موجب کاهش کارایی، افت دقت و در نهایت کاهش قابلیت اعتماد نتایج می‌شود [۱۸].

6. Machine Learning
7. Fuzzy Neural Network
8. Stepwise Regression
9. Ensemble Model
10. Feature Reduction
11. Random Forest
12. Partial Least Square
13. Fractional Order Differential

در مقابل، روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور، به دلیل سرعت بالای جمع‌آوری داده‌ها، پوشش مکانی گسترده و هزینه نسبتاً پایین، از ظرفیت قابل‌توجهی برای برآورد غلظت فلزات سنگین برخوردار هستند [۱۹]. در واقع، داده‌های سنجش‌ازدور با بهره‌گیری از ویژگی‌های طیفی، قادرند تغییرات طیفی ناشی از حضور فلزات سنگین و اثرات آن‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را آشکار سازند و از این طریق، امکان برآورد غیرمستقیم غلظت این عناصر را فراهم آورند [۲۰]. افزون بر این، تصویربرداری هم‌زمان از مناطق وسیع، امکان تولید سریع نقشه‌های پیوسته را فراهم می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که نقشه‌های حاصل، با توجه به توان تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای، قادر به نمایش جزئیات مکانی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی هستند [۲۱]. همچنین، این روش به دلیل ماهیت غیرمستقیم و عدم نیاز به نمونه‌برداری فیزیکی، به‌عنوان یک رویکرد غیر تخریبی شناخته می‌شود. از سوی دیگر، داده‌های سنجش‌ازدور با برخورداری از توان تفکیک زمانی مناسب، امکان پایش تغییرات زمانی غلظت فلزات سنگین را در بازه‌های زمانی کوتاه فراهم کرده و بدین ترتیب، محدودیت‌های روش‌های سنتی در پایش مستمر این آلاینده‌ها را تا حد زیادی برطرف می‌کنند [۲۲]. جدول ۱ مروری مختصر بر پژوهش‌های مرتبط با این حوزه ارائه می‌دهد.

به‌کارگیری فناوری سنجش‌ازدور در برآورد غلظت فلزات سنگین، باهدف کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری و تسریع فرآیند تولید نقشه‌های مکانی، به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در پایش آلودگی خاک شناخته می‌شود. بااین‌حال، روش‌های متداول برآورد غلظت عناصر در خاک عمدتاً بر مدل‌های رگرسیونی مبتنی هستند و در زمره روش‌های یادگیری نظارت‌شده قرار می‌گیرند. ازاین‌رو، وجود داده‌های آموزشی حاصل از نمونه‌برداری میدانی برای آموزش، کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل‌ها ضروری است. باوجوداین، تهیه نقشه‌های مکانی در مناطق جدید یا اجرای پایش‌های دوره‌ای در یک منطقه، مستلزم جمع‌آوری مداوم داده‌های زمینی است؛ موضوعی که علاوه بر افزایش هزینه و زمان اجرای پروژه، وابستگی مدل‌ها به نمونه‌برداری میدانی را افزایش داده و بخشی از مزیت‌های سنجش‌ازدور را در پایش سریع و کم‌هزینه کاهش می‌دهد.

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری انتقالی، به‌عنوان رویکردی مؤثر برای کاهش وابستگی به داده‌های میدانی و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌ها، مورد توجه پژوهشگران قرارگرفته است. بااین‌حال، بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هنوز چارچوبی جامع و نظام‌مند برای به‌کارگیری یادگیری انتقالی در برآورد غلظت فلزات سنگین با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور ارائه نشده است (جدول ۱). بر همین اساس، در پژوهش حاضر، به‌عنوان یکی از جنبه‌های نوآورانه، پایگاه داده‌ای ترکیبی شامل نمونه‌های گردآوری‌شده از مناطق مختلف ایران ایجادشده و بر پایه آن، یک مدل یادگیری عمیق توسعه‌یافته است که قابلیت تعمیم به مناطق جدید را با حداقل نیاز به بازآموزی فراهم می‌سازد. از دیگر ویژگی‌های این رویکرد، امکان به‌روزرسانی مستمر پایگاه داده و درنتیجه، بهبود تدریجی عملکرد مدل با افزوده شدن داده‌های جدید است. افزون بر این، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های طیف‌سنجی زمینی با تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند دقت مدل‌های برآورد غلظت فلزات سنگین را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد؛ بااین‌وجود، در اغلب پژوهش‌ها از این دو منبع داده به‌صورت یکپارچه و مستقیم در فرآیند مدل‌سازی استفاده‌نشده است.

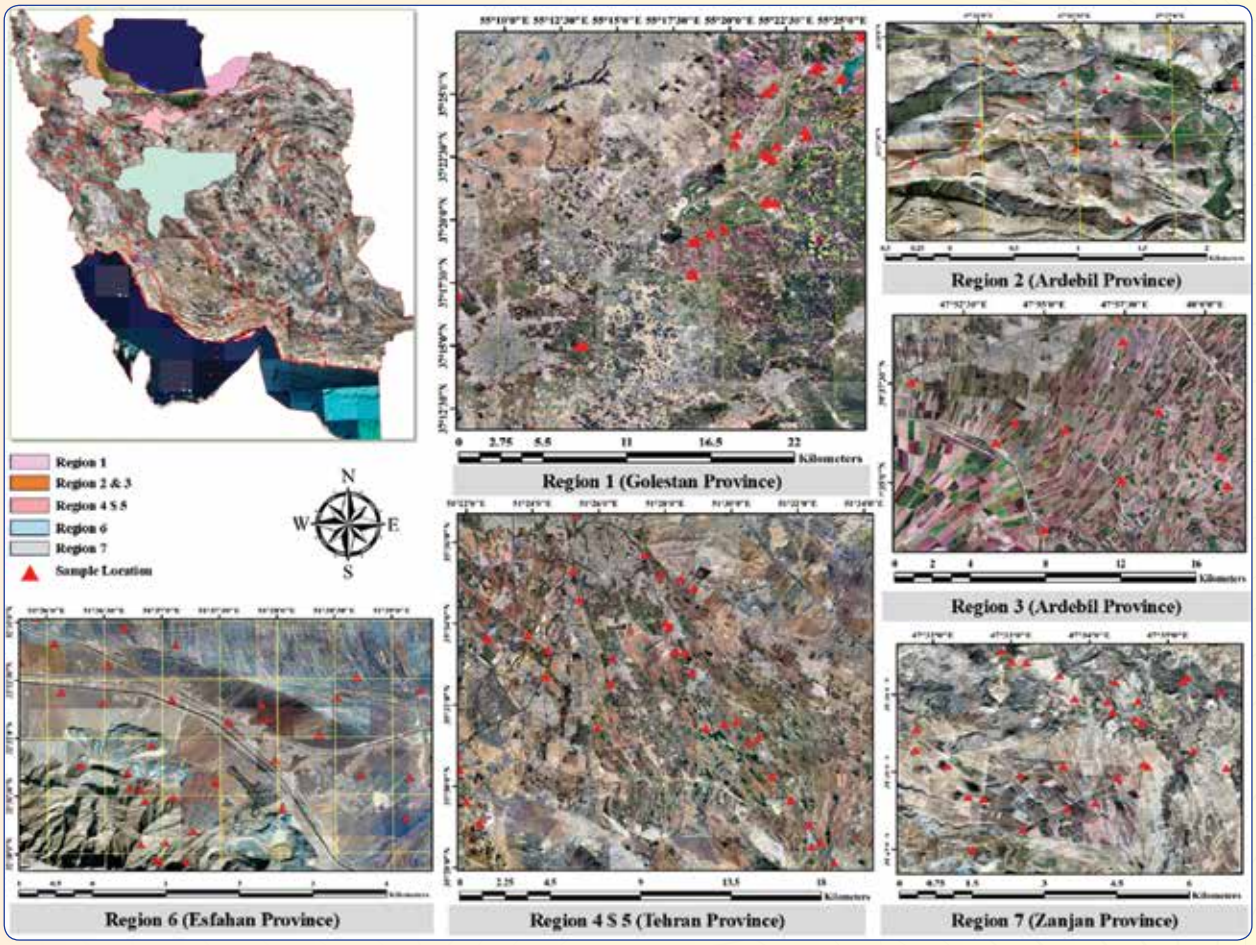
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

با توجه به هدف این پژوهش، که توسعه یک چارچوب مبتنی بر یادگیری انتقالی است، هفت منطقه مطالعاتی از پنج استان مختلف ایران با تنوعی از شرایط محیطی، منشأ و منابع احتمالی آلودگی انتخاب شدند. جدول ۲، اطلاعات کلی و ویژگی‌های اصلی هر یک از مناطق موردمطالعه را ارائه می‌دهد. همچنین، شکل ۱ موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری و نمای کلی مناطق مطالعاتی را نمایش می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات مختصر مناطق هفت‌گانه موردمطالعه

منطقه	استان	شهرستان	نمونه	وسعت (هکتار)	منشأ	تاریخ
Region1	گلستان	گنبدکاووس	۳۵	۲۰۰۰۰	کود شیمیایی و فعالیت انسانی	شهریور ۱۴۰۰
Region 2	اردبیل	مشکین شهر	۳۰	۶۰۰۰	فعالیت انسانی و کود شیمیایی	شهریور ۱۳۹۹
Region 3	اردبیل	پارس آباد	۱۰	۶۰۰۰	کشاورزی صنعتی	شهریور ۱۳۹۹
Region 4	تهران	ورامین	۴۴	۱۵۰۰۰	فاضلاب شهری و فعالیت صنعتی	بهمن ۱۳۹۸
Region 5	تهران	شهرری	۳۶	۱۵۰۰۰	فعالیت صنعتی و نظامی	شهریور ۱۳۹۴
Region 6	اصفهان	سپاهانشهر	۳۸	۲۵۰۰	معدن سرب و روی	دی ۱۳۹۲
Region7	زنجان	دندی	۲۳	۱۰۰۰۰	معدن سرب و روی	شهریور ۱۳۹۷



شکل۱: پراکنش نقاط نمونه‌ای در مناطق مورد مطالعه

منطقه گنبدکاووس ازنظر ویژگی‌های خاک‌شناسی عمدتاً شامل خاک‌های جلگه‌ای با حاصلخیزی بالا است؛ از این رو، استفاده از کودهای شیمیایی به‌منظور افزایش بهره‌وری کشاورزی در سال‌های اخیر روند افزایشی داشته است. این منطقه دارای توپوگرافی نسبتاً هموار بوده و در بخش جنوبی آن، شبکه‌ای از آبراهه‌ها شکل‌گرفته است. رودخانه گرگان‌رود نیز از شمال منطقه عبور می‌کند و تحت تأثیر ورود فاضلاب‌های شهری و رواناب‌های ناشی از اراضی کشاورزی قرار دارد.

منطقه مشکین‌شهر دارای ریخت‌شناسی تپه‌ماهوری در بخش‌های شمالی بوده و شبکه آبراهه‌ای آن با رودخانه قره‌سو ارتباط دارد. با توجه به غالب بودن فعالیت‌های کشاورزی و نبود صنایع آلاینده عمده، این منطقه معمولاً ازنظر آلودگی فلزات سنگین در سطح پایین‌تری قرار دارد. بااین‌حال، ارتباط هیدرولوژیکی رودخانه قره‌سو با رودخانه ارس می‌تواند زمینه انتقال آلاینده‌ها از مناطق بالادست را فراهم نماید.

شهرستان پارس‌آباد، به دلیل استقرار شهرک صنعتی در حاشیه رودخانه ارس، دارای مجموعه‌ای از فعالیت‌های صنعتی، ازجمله صنایع شیمیایی و تولید کود است که می‌توانند از منابع بالقوه ورود آلاینده‌ها به محیط خاک و آب محسوب شوند. علاوه بر این، استفاده گسترده از کودهای شیمیایی در فعالیت‌های کشاورزی نیز می‌تواند در تغییر ترکیب شیمیایی خاک و افزایش غلظت برخی عناصر مؤثر باشد. همچنین، رودخانه ارس و سد مرتبط با آن به‌عنوان یکی از مسیرهای بالقوه انتقال آلاینده‌ها، ازجمله فلزات سنگین و ترکیبات رادیواکتیو، مطرح بوده و انتقال آلاینده‌ها از مناطق صنعتی و معدنی بالادست در مطالعات مختلف گزارش‌شده است.

منطقه ورامین و ری در جنوب شرق تهران تحت تأثیر هم‌زمان فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری قرار دارد. استقرار صنایع مختلف، ازجمله صنایع سیمان و پتروشیمی، در کنار مصرف گسترده نهاده‌های کشاورزی، از عوامل مؤثر در تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش احتمال حضور فلزات سنگین در این منطقه محسوب می‌شوند.

سپاهان‌شهر (ایرانکوه) در جنوب‌شرق اصفهان، منطقه‌ای است که دارای رخدادهای زمین‌شناسی ژوراسیک و معادن فعال متعددی است. فعالیت‌های معدنی در این منطقه نقش مهمی در تغییر ویژگی‌های ژئوشیمیایی محیط و افزایش پتانسیل آلودگی ناشی از فلزات سنگین ایفا می‌کند.

درنهایت، معدن سرب و روی انگوران در غرب استان زنجان، یکی از بزرگ‌ترین ذخایر فلزی کشور محسوب می‌شود که به دلیل عیار بالای عناصر فلزی و فعالیت گسترده استخراج و فرآوری، به‌عنوان یکی از کانون‌های مهم آلودگی فلزات سنگین در منطقه شناخته می‌شود [۳۱].

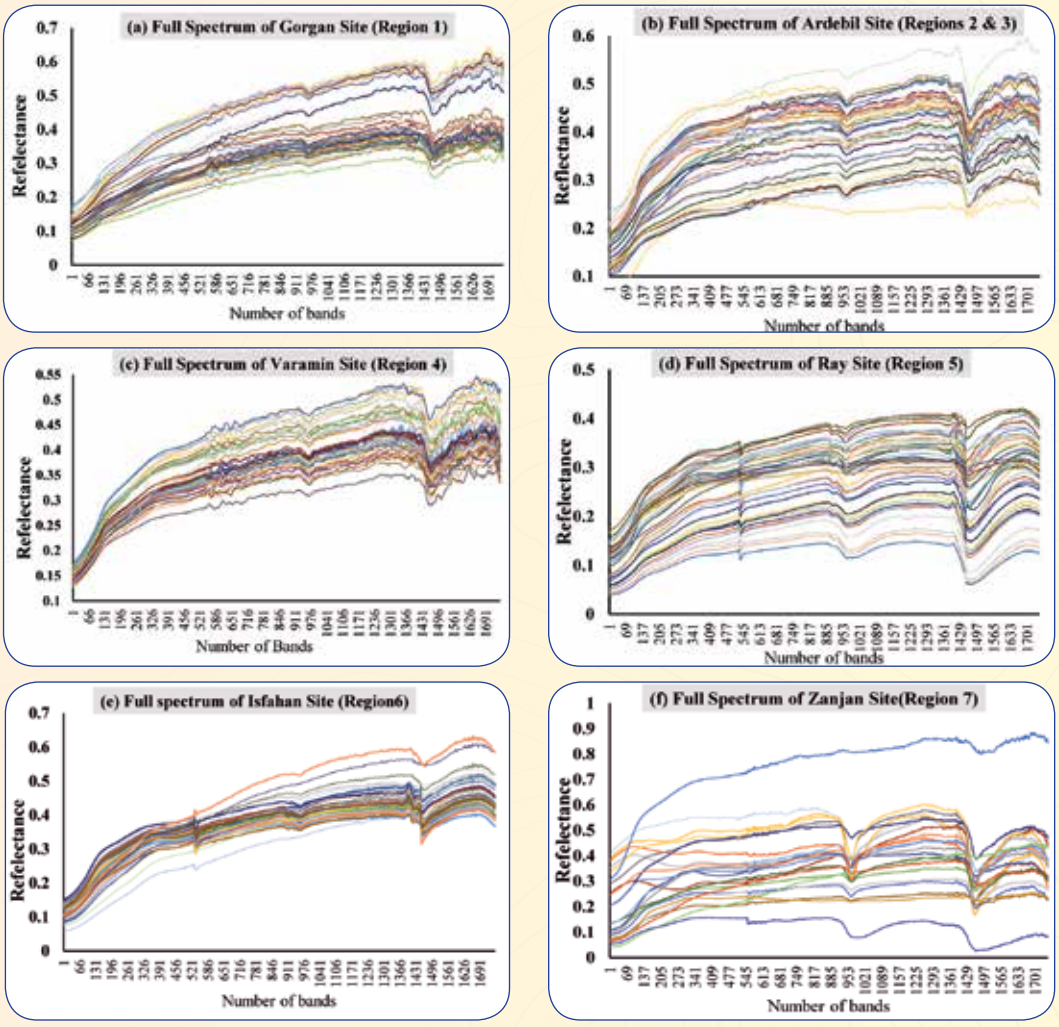
۲-۲- نمونه‌برداری خاک و آنالیز آزمایشگاهی

مطابق اطلاعات مندرج در جدول ۲، نمونه‌برداری خاک از هفت منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ انجام گردید. ازآنجاکه تصاویر اپتیکی ماهواره‌ای عمدتاً اطلاعات مربوط به ویژگی‌های سطحی زمین را ثبت می‌نمایند، نمونه‌های خاک از عمق تقریبی ۲ سانتی‌متری سطح زمین برداشت گشتند تا بیشترین تطابق ممکن میان داده‌های زمینی و پاسخ طیفی تصاویر ماهواره‌ای برقرار گردد. شایان‌ذکر است که در سنجش‌ازدور اپتیکی، پاسخ ثبت‌شده توسط حسگر، عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های لایه سطحی خاک قرار دارد. برای هر نمونه، حدود ۲ کیلوگرم خاک برداشت شد. همچنین، با توجه به توان تفکیک مکانی تصاویر لندست ۸ و به‌منظور افزایش قابلیت نمایندگی نمونه‌ها از شرایط داخل هر پیکسل و کاهش اثر ناهمگنی‌های موضعی، چهار نقطه نمونه‌برداری در قالب آرایش مثلث متساوی‌الاضلاع و بافاصله کمتر از ۱۵ متر از یکدیگر انتخاب شدند. سپس، نمونه‌های برداشت‌شده پس از اختلاط کامل، به‌عنوان نمونه همگن نماینده هر پیکسل در نظر گرفته شدند [۳۱].

در این ساختار، مرکز پیکسل به‌عنوان مرکز هندسی و رئوس مثلث به‌عنوان سایر نقاط برداشت تعیین شدند. به‌منظور تعیین دقیق موقعیت پیکسل‌های منتخب، ابتدا تصاویر لندست ۸ مربوط به هر منطقه تهیه و سپس با بهره‌گیری از نقشه‌های پایه ۱:۲۵۰۰۰، نقاط کنترل زمینی استخراج گردید. پس از ارزیابی کیفیت هندسی تصاویر، فرآیند تصحیح هندسی با استفاده از مدل چندجمله‌ای انجام شد و درنهایت، موقعیت پیکسل‌های کاندید در سطح‌مبنای مسطحاتی WGS84 بر روی گیرنده GPS ثبت شدند. در مرحله آماده‌سازی آزمایشگاهی، نمونه‌های برداشت‌شده مربوط به هر پیکسل پس از همگن‌سازی کامل، ترکیب گردیدند و بخشی از نمونه حاصل جهت انجام تحلیل‌های شیمیایی به آزمایشگاه انتقال یافت. اندازه‌گیری غلظت عنصر سرب با استفاده از دستگاه ICP و با دقتی کمتر از ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم انجام شد. شاخص‌های آماری مربوط به ۲۱۶ نمونه مورد بررسی در جدول ۵ ارائه‌شده است.

۲-۳- داده طیف‌سنجی

طیف بازتابندگی نمونه‌های خاک برداشت‌شده از مناطق مورد مطالعه با استفاده از طیف‌سنج‌های ASD و SVC ثبت و اندازه‌گیری شد. با توجه به مشخصات فنی این تجهیزات، منحنی بازتابندگی نمونه‌ها در محدوده طیفی ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و بافاصله نمونه‌برداری طیفی ۱ نانومتر ثبت گردید. به‌منظور کاهش اثر عوامل محیطی و افزایش دقت و تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها، نمونه‌های خاک پس از برداشت به محیط آزمایشگاه و اتاق تاریک منتقل شدند. در فرآیند طیف‌برداری، دو منبع نور هالوژن با فاصله ۸۰ سانتی‌متر از یکدیگر و در ارتفاع یک متری نسبت به سطح نمونه، با زاویه تابش ۳۰ درجه نسبت به خط قائم مستقر شدند. حسگر نیز در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از سطح نمونه و در موقعیتی میان دو منبع نور قرار گرفت تا شرایط روشنایی یکنواخت و پایدار برای ثبت پاسخ طیفی فراهم شود. نمونه‌ها مطابق دستورالعمل استاندارد دستگاه، در ظروف شیشه‌ای قرار داده شدند، به‌گونه‌ای که سطحی دایره‌ای شکل با قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر را پوشش دهند. برای کاهش اثر خطاهای تصادفی و افزایش پایایی اندازه‌گیری‌ها، از هر نمونه ۶۴ بار طیف‌برداری انجام شد. سپس، با استفاده از معیار سه انحراف (3σ)، مشاهدات پرت در هر باند طیفی شناسایی و حذف شدند و میانگین مقادیر باقی‌مانده به‌عنوان مقدار نهایی بازتابندگی هر باند در نظر گرفته شد. علاوه بر این، نواحی طیفی دارای نویز حاشیه‌ای و باندهای تحت تأثیر جذب بخار آب از منحنی‌های طیفی حذف شدند. درنتیجه، تعداد باندهای مؤثر از ۲۱۵۰ به ۱۷۵۰ باند کاهش یافت. شکل ۲ منحنی‌های طیفی نمونه‌های مربوط به هر منطقه را پس از اعمال مراحل پیش‌پردازش نمایش می‌دهد.



شکل۲: منحنی بازتابندگی نقاط نمونه‌ای پس از انجام پیش‌پردازش‌ها

۲-۴- تصویر لندست-۸

سامانه ماهواره‌ای لندست به‌عنوان یکی از باسابقه‌ترین مأموریت‌های سنجش‌ازدور، طی بیش از چهار دهه نقش بنیادینی در پایش تغییرات سطح زمین ایفا نموده است. این سامانه با برخورداری از توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روزه، امکان پایش مستمر پدیده‌های محیطی را در مقیاس‌های منطقه‌ای و فرا منطقه‌ای فراهم می‌سازد.

جدول۳: زمان‌بندی تصاویر لندست ۸ برای هر منطقه به‌صورت جداگانه

ردیف	منطقه	منطقه موردمطالعه	تاریخ اخذ تصاویر لندست
۱	مرجع	اصفهان (سپاهان‌شهر)	دی‌ماه ۱۳۹۲ (Dec ۲۰۱۳)
۲	هدف	ورامین تهران	بهمن‌ماه ۱۳۹۸ (Jan ۲۰۲۰)
۳	هدف	شهرری تهران	مهر ۱۳۹۳ (Sep ۲۰۱۴)
۴	مرجع	زنجان	شهریور ۱۳۹۷ (Aug ۲۰۱۸)
۵	مرجع	اردبیل	مهر ۱۳۹۹ (Sep ۲۰۲۰)
۶	مرجع	گلستان	مهر ۱۴۰۰ (Sep ۲۰۲۱)

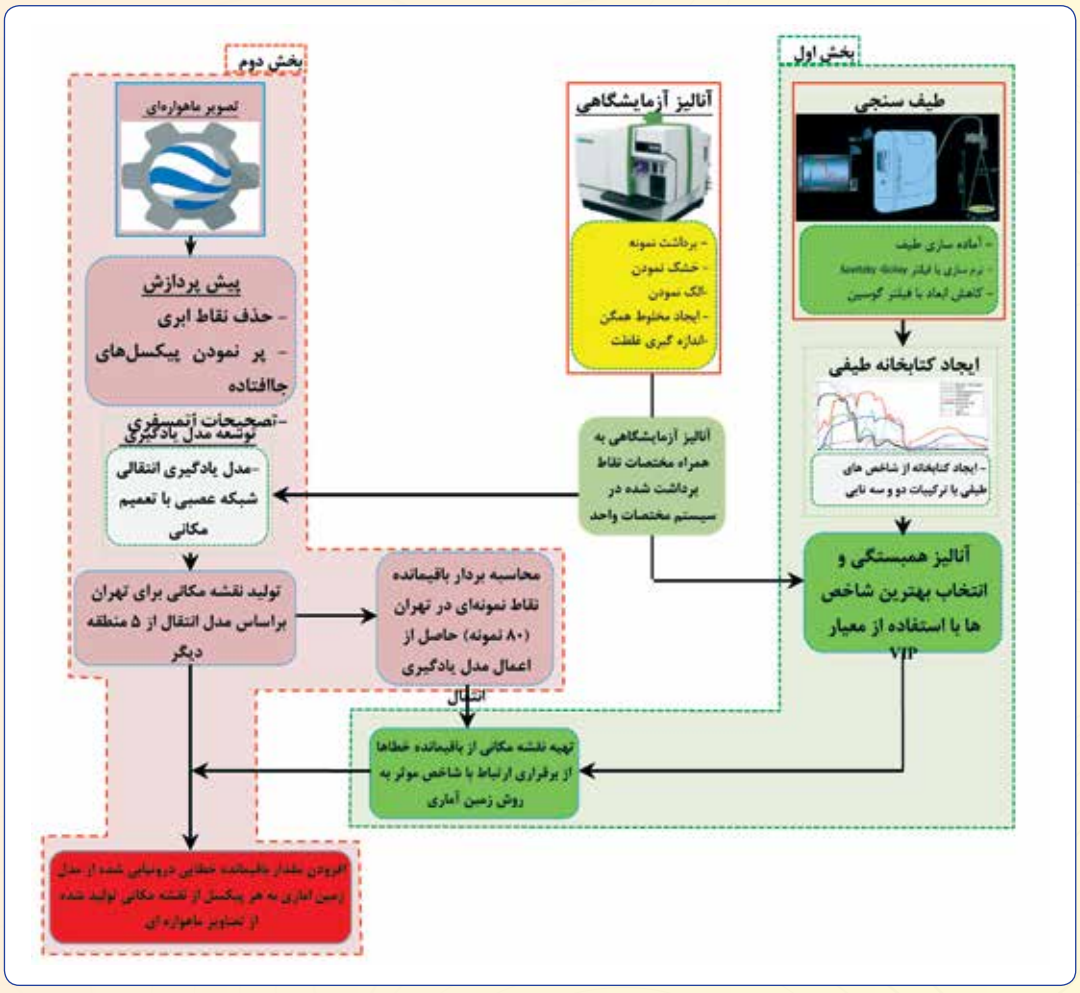
یکی از برجسته‌ترین مزایای این مأموریت، دسترسی آزاد و رایگان به آرشیو بلندمدت تصاویر ماهواره‌ای است که زمینه بهره‌برداری گسترده پژوهشگران را در مطالعات محیطزیستی و زمین‌مبنا فراهم نموده است [۳۱]. در پژوهش حاضر، با توجه به بازه زمانی نمونه‌برداری‌های میدانی، تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ از طریق بستر Google Earth Engine دریافت گردید. به‌منظور کاهش اثرات مخرب اتمسفری و حذف پدیده‌هایی نظیر پوشش ابر، برای هر منطقه آرشیوی یک ماهه از تصاویر گردآوری و با اعمال فیلتر میانه، تصویر نهایی تولید شد (جدول ۳).

۲-۵- متد و روش اجرا

با توجه به مباحث مطرح‌شده در پیشینه پژوهش، چارچوب کلی این مطالعه در دو بخش اصلی طراحی شد. بخش نخست به تحلیل داده‌های طیف‌سنجی زمینی و استخراج ویژگی‌های طیفی مؤثر باهدف بررسی قابلیت برآورد غلظت سرب اختصاص دارد. این مرحله از آن جهت اهمیت دارد که داده‌های طیفی، به دلیل برخورداری از توان تفکیک طیفی بالا و ثبت پیوسته پاسخ بازتابی مواد در طول‌موج‌های مختلف، ظرفیت بالایی برای آشکارسازی تغییرات ژئوشیمیایی خاک دارند. ازاین‌رو، در گام نخست، رابطه میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب بررسی شد تا میزان حساسیت باندها و شاخص‌های طیفی نسبت به تغییرات غلظت این عنصر ارزیابی شود. همچنین، استخراج ویژگی‌های مؤثر از منحنی‌های طیفی، ضمن کاهش ابعاد داده‌ها، می‌تواند به افزایش پایداری، تعمیم‌پذیری و دقت مدل‌های برآورد منجر شود؛ از این رو، این مرحله مبنای توسعه مدل یادگیری در پژوهش حاضر محسوب می‌شود. بخش دوم پژوهش به استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای تولید نقشه توزیع مکانی غلظت سرب در منطقه جنوب تهران اختصاص دارد. در این مرحله، پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر ماهواره‌ای، مدل یادگیری عمیق توسعه‌یافته بر پایه داده‌های طیف‌سنجی زمینی، با بهره‌گیری از راهبرد یادگیری انتقالی، به داده‌های ماهواره‌ای تعمیم داده شد تا امکان برآورد غلظت سرب در مقیاس منطقه‌ای فراهم شود. هدف اصلی این بخش، توسعه چارچوبی است که بتواند با اتکا به حداقل داده‌های زمینی، نقشه‌ای پیوسته و با دقت مکانی مناسب از توزیع غلظت سرب ارائه دهد. شکل ۳ روند کلی توسعه مدل و مراحل اجرای پژوهش را نشان می‌دهد.

طیف‌های خام معمولاً حاوی نویزهای فرکانس پایین و ناپیوستگی‌های تصادفی هستند که می‌توانند بر دقت تحلیل‌های بعدی تأثیر بگذارند. ازاین‌رو، در نخستین گام، باندهای لبه‌ای، نواحی جذبی و داده‌های

پـرت از منحنی‌هـای طیفـی حـذف شـدند. سـپس، به‌منظـور هموارسـازی سـیگنال و کاهـش نویزهـای باقیمانـده، فیلتـر Savitzky–Golay بـر روی‌داده‌هـا اعمـال شـد. ایـن مرحلـه ضمـن حفـظ شـکل کلـی منحنی‌هـای طیفـی، موجـب کاهـش نوسـانات تصادفـی و افزایـش پایـداری داده‌هـا شـد. بـا توجـه بـه تـوان تفکیـک طیفـی بـالای داده‌هـا و فاصلـه نمونه‌بـرداری ۱ نانومتـری، طول‌موج‌هـای مجـاور از همبسـتگی بالایـی برخـوردار بـوده و درنتیجـه، فضـای ویژگـی بـا میـزان قابل‌توجهـی افزونگـی مواجـه اسـت. به‌منظـور کاهـش ایـن افزونگـی، فرآینـد کاهـش بعـد و اسـتخراج ویژگی به‌صـورت هم‌زمـان انجـام شـد. بدیـن منظـور، طیف‌هـا بـا اسـتفاده از فیلتـر گاوسـی در بازه‌هـای ۱۰ نانومتـری بـاز نمونه‌بـرداری شـدند؛ به‌گونـه‌ای کـه تعـداد باندهـای طیفـی از ۱۷۵۰ طول‌مـوج بـه ۱۷۵ طول‌مـوج مرکـزی بـا فاصلـه ۱۰ نانومتـر کاهـش یافـت، بـدون آنکـه بخـش عمـده اطلاعـات طیفـی از دسـت بـرود. در ادامـه، به‌منظـور اسـتخراج روابـط غیرخطـی میـان طول‌موج‌هـای منتخـب، شـاخص‌های طیفـی بـر پایـه ترکیب‌هـای دوتایـی و سـه‌تایی باندهـا (مطابـق معـادلات ارائه‌شـده در جـدول ۴) تولیـد شـدند. اگرچـه ایـن فرآینـد فضـای ویژگـی بسـیار گسـترده‌ای ایجـاد کـرد، امـا بـه دلیـل افزایـش چشـمگیر تعـداد متغیرهـا، اسـتفاده مسـتقیم از ایـن ویژگی‌هـا در مدل‌سـازی امکان‌پذیـر نبـود.



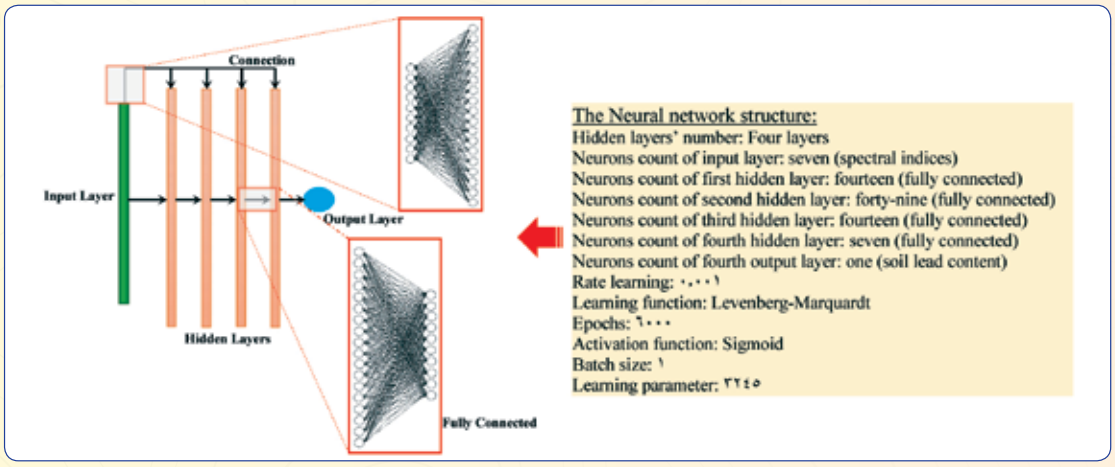
شکل ۳: فلوچارت و گردش کار تحقیق

جدول ۴: شاخص‌های مختلف طیفی با ارائه روابط

Normalized Pigment Difference Indices	$(NDSI) = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j}$
Normalized Difference Spectral Indices	$(NDPI) = \frac{(R_i - R_j) + (R_i - R_k)}{R_i + R_j + R_k}$

از این رو، با اتکا بر تحلیل همبستگی با غلظت سرب، آزمون‌های آماری معناداری و درنهایت معیار VIP، مجموعه‌ای از شاخص‌های طیفی پایدار و اثرگذار استخراج و برای ورود به مرحله مدل‌سازی انتخاب شد. بر پایه این ویژگی‌ها، فرآیند برآورد با استفاده از یک چارچوب یادگیری عمیق مبتنی بر یادگیری انتقالی میان مناطق مختلف توسعه یافت. به‌منظور افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل، از اتصال میان‌بُر[14] بین لایه ورودی و لایه‌های میانی شبکه برای حفظ اطلاعات‌پایه طیفی استفاده شد. همچنین، در مرحله انتقال دانش، وزن‌های برخی از لایه‌های شبکه ثابت نگه داشته شدند تا ضمن جلوگیری از بیش‌برازش، سازگاری مدل در مناطق جدید حفظ شود (شکل۴). درنهایت، عملکرد مدل پیشنهادی با یک مدل تجمیعی مبتنی بر یادگیری ماشین مقایسه و ارزیابی شد. در بخش دوم، تصاویر ماهواره‌ای هفت منطقه مورد مطالعه از بستر Google Earth Engine دریافت و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، برای تولید نقشه توزیع مکانی غلظت سرب مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که مقادیر بازتابندگی ثبت شده توسط حسگرهای ماهواره‌ای تحت تأثیر عوامل مختلفی، ازجمله خطاهای اتمسفری، هندسی و شرایط تصویربرداری قرار می‌گیرند، در گام نخست تصحیحات هندسی با استفاده از مدل چندجمله‌ای درجه دوم و تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل رگرسیون خط تجربی انجام شد. همچنین، به‌منظور کاهش اثر پوشش ابر، پیکسل‌های ابری شناسایی و با استفاده از درون‌یابی سری زمانی بازسازی شدند. در ادامه، اثر ناهمواری‌های توپوگرافی نیز با استفاده از روش Minaret تا حد امکان اصلاح شد تا یکنواختی و قابلیت مقایسه داده‌ها افزایش یابد.

پس از تکمیل مراحل پیش‌پردازش، مقادیر بازتابندگی متناظر با نقاط نمونه‌برداری و زمان برداشت زمینی استخراج شد؛ به‌گونه‌ای که برای هر نقطه، برداری شامل هفت باند طیفی به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل تشکیل گردید. سپس، این داده‌ها مبنای توسعه مدل یادگیری قرار گرفتند و با استفاده از همان ساختار شبکه عصبی طراحی‌شده در بخش نخست، فرآیند برآورد مکانی غلظت سرب در محدوده جنوب تهران انجام شد. در این مرحله، مدل آموزش‌دیده بر پایه داده‌های نمونه‌ای بر کل تصویر اعمال شد و درنتیجه، نقشه پیوسته توزیع مکانی غلظت سرب با بهره‌گیری از قابلیت تعمیم مکانی مدل و راهبرد یادگیری انتقالی تولید گردید. در گام نهایی، به‌منظور افزایش دقت برآورد، خروجی مدل یادگیری عمیق با یک رویکرد زمین‌آماری تلفیق شد. بدین منظور، ابتدا خطای برآورد در نقاط نمونه‌برداری به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های طیفی متناظر به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند و بر این اساس، مدلی برای برآورد توزیع مکانی خطا در سطح منطقه توسعه یافت. سپس، نقشه خطای حاصل با نقشه خروجی مدل اصلی تلفیق شد تا نقشه نهایی غلظت سرب با دقت بیشتری تولید شود. از آنجا که شاخص‌های طیفی استخراج شده در بخش نخست ماهیتی نقطه‌ای داشتند، برای تعمیم آن‌ها به‌کل تصویر، رابطه‌ای رگرسیونی میان باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های منتخب برقرار شد و بر پایه آن، نقشه پیوسته شاخص‌های طیفی بازسازی گردید.



شکل۴: معماری شبکه اصلاح‌شده با یادگیری عمیق

14. Skip Connection

۳- نتایج و پیاده‌سازی

۳-۱- آنالیز آماری مقادیر سرب خاک منطقه

جدول ۵ آمار توصیفی غلظت سرب در خاک مناطق مورد مطالعه را پیش و پس از اعمال تبدیل لگاریتمی ارائه می‌دهد و امکان بررسی هم‌زمان ویژگی‌های آماری، میزان پراکندگی و الگوی توزیع داده‌ها را فراهم می‌سازد. نتایج مربوط به داده‌های خام نشان می‌دهد که غلظت سرب در مناطق مختلف از ناهمگنی قابل‌توجهی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که دامنه تغییرات این عنصر در برخی مناطق، به‌ویژه اصفهان و زنجان، به‌مراتب بیشتر از سایر نواحی است. برای نمونه، در منطقه اصفهان، بیشینه غلظت سرب به حدود ۹۷۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد که اختلاف قابل‌توجهی با مقادیر ثبت‌شده در سایر مناطق دارد. این موضوع بیانگر وجود مقادیر حدی و ناهمگنی شدید توزیع غلظت سرب در مقیاس مکانی است.

از منظر شاخص‌های پراکندگی، مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات (CV) در مناطق صنعتی و معدنی نسبتاً بالا بوده و بیانگر تغییرپذیری زیاد غلظت سرب در این نواحی است. در مقابل، مناطقی مانند مشکین‌شهر و پارس‌آباد از دامنه تغییرات محدودتر و انحراف معیار پایین‌تری برخوردارند که نشان‌دهنده یکنواختی نسبی توزیع غلظت سرب در این مناطق است. تفاوت مشاهده شده میان مناطق مختلف با تفاوت در شرایط محیطی، نوع کاربری اراضی و شدت فعالیت‌های صنعتی و معدنی سازگار است. ازنظر شکل توزیع داده‌ها، مقادیر چولگی[15] و کشیدگی[16] در اغلب مناطق، به‌ویژه اصفهان و زنجان، بیانگر توزیع‌های نامتقارن با دنباله‌های سنگین است. مقادیر بالای کشیدگی نشان می‌دهد که وجود مقادیر حدی[17]، توزیع داده‌ها را به‌طور محسوسی از حالت نرمال دور کرده است. در مقابل، مناطقی مانند ورامین و ری، اگرچه همچنان دارای مقداری عدم تقارن هستند، اما شدت این انحراف در مقایسه با مناطق معدنی کمتر بوده و توزیع داده‌ها به نرمالیته نزدیک‌تر است. پس از اعمال تبدیل لگاریتمی، تغییرات محسوسی در ساختار آماری داده‌ها مشاهده شد. مهم‌ترین اثر این تبدیل، کاهش دامنه تغییرات و افزایش همگنی نسبی داده‌ها بود؛ به‌گونه‌ای که فاصله میان حداقل و حداکثر مقادیر کاهش یافت و توزیع داده‌ها به نرمالیته نزدیک‌تر شد. همچنین، کاهش مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات در تمامی مناطق نشان می‌دهد که اثر مقادیر پرت[18] تا حد زیادی کنترل‌شده و شرایط مناسب‌تری برای تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی فراهم‌شده است.

جدول ۵: آنالیز آماری دقیق نقاط نمونه‌ای به تفکیک نواحی

قبل از نرمال‌سازی لگاریتمی															
ردیف	منطقه	Min	Max	Ave	STD	Quintile	Skewness	Kurtosis	CV	PH*	Sand*	Silt*	Clay*	OC*	SV**
۱	گرگان	۸/۸۳	۲۴/۹	۱۴/۶۷۱	۴/۵۳۶	۳/۹۸۲	۰/۸۴۶	۲/۶۰۸	۳/۲۳۴	۶/۹	۳۶/۴	۳۷/۲	۲۶/۴	۱/۰۷	۵۰
۲	مشکین‌شهر	۲/۱۳	۲/۲۹	۲/۲۱۳	۰/۰۴۱	۰/۰۷۰	۰/۴۲۳	۲/۳۰۱	۵۴/۲۳	۷/۱	۵۸/۹	۱۶/۲	۲۴/۹	۰/۹۷	۷۵
۳	پارس‌آباد	۲/۲۳	۲/۳۴	۲/۲۹۴	۰/۰۳۸	۰/۰۶۸	۰/۲۷۴	۱/۸۲۳	۶۰/۳۵	۷/۶	۶۳/۵	۱۹/۲	۱۷/۳	۰/۷۶	۷۵
۴	ورامین	۱۱	۷۹/۲۶	۴۰/۰۶۷	۱۸/۳۹	۲۶/۶۱	۰/۳۶۰	۲/۲۳۹	۲/۱۷۸	۸/۰	۶۳/۵	۱۷/۹	۱۸/۷	۰/۲۶	۷۵
۵	ری	۸/۰۱	۳۴/۰۸	۲۱/۰۵۲	۶/۶۵	۱۰/۶۳	۰/۱۵۶	۲/۲۲۸	۳/۱۶۶	۸/۰	۶۳/۵	۱۷/۹	۱۸/۷	۰/۲۶	۷۵
۶	اصفهان	۶۰/۴	۹۷۹۷	۱۲۴۲/۱	۲۱۱۸/۰۸	۱۱۷۶	۲/۵۲۶	۹/۱۹۹	۰/۵۸۶	۷/۱	۵۸/۹	۱۶/۲	۲۴/۹	۰/۹۷	۲۹۰
۷	زنجان	۱۰	۳۳۵۹	۴۹۹/۸۶	۹۲۴/۰۱	۳۸۷/۷۵	۲/۱۵۹	۶/۴۳۴	۰/۵۴۱	۷/۱	۵۸/۹	۱۶/۲	۲۴/۹	۰/۹۷	۷۵
مجموع	کل مناطق	۲/۱۳	۹۷۹۷	۲۸۶/۲۱	۱۰۳۷/۸۲	۵۴/۱۱	۵/۹۷۱	۴۴/۷۰۹	۰/۲۷۵	---	----	----	----	----	----

15. Skewness
16. Kurtosis
17. Extreme Value
18. Outliers

بعد از نرمال‌سازی لگاریتمی															
ردیف	منطقه	Min	Max	Ave	STD	Quintile	Skewness	Kurtosis	CV	PH*	Sand*	Silt*	Clay*	OC*	SV**
۱	گرگان	۲/۱۷۸	۳/۲۱۴	۲/۶۴۳	۰/۲۹۲	۰/۲۹۸	۰/۴۱۲	۲/۲۷۱	۹/۰۴۴	۶/۹	۳۶/۴	۳۷/۲	۲۶/۴	۱/۰۷	۳/۱۹۲
۲	مشکین‌شهر	۰/۷۵۶	۰/۸۲۷	۰/۷۹۴	۰/۰۱۸	۰/۰۳۱	۰/۴۵۴	۲/۳۲۶	۴۲/۸۹	۷/۱	۵۸/۹	۱۶/۲	۲۴/۹	۰/۹۷	۴/۱۳۷
۳	پارس‌آباد	۰/۸۰۲	۰/۸۵۰	۰/۸۳۰	۰/۰۱۷	۰/۰۳۰	۰/۲۹۲	۱/۸۳۸	۴۹/۹۸	۷/۶	۶۳/۵	۱۹/۲	۱۷/۳	۰/۷۶	۴/۱۳۷
۴	ورامین	۲/۳۹۷	۴/۳۷۳	۳/۵۷۴	۰/۵۱۱	۰/۷۲۴	۰/۴۴۶	۲/۳۲۵	۶/۹۹۶	۸/۰	۶۳/۵	۱۷/۹	۱۸/۷	۰/۲۶	۴/۱۳۷
۵	ری	۲/۰۸۱	۳/۵۲۹	۲/۹۸۹	۰/۳۶۱	۰/۵۱۴	۰/۸۰۹	۲/۹۶۹	۸/۳۰۱	۸/۰	۶۳/۵	۱۷/۹	۱۸/۷	۰/۲۶	۴/۱۳۷
۶	اصفهان	۴/۱	۹/۱۸۹	۶/۰۶۱	۱/۴۲۸	۲/۰۴۹	۰/۵۹۳	۲/۲۸۳	۴/۲۴۲	۷/۱	۵۸/۹	۱۶/۲	۲۴/۹	۰/۹۷	۵/۶۹۹
۷	زنجان	۲/۳۰۲	۸/۱۱۹	۴/۷۷۲	۱/۷۳۷	۲/۶۳۷	۰/۴۹۵	۲/۲۵۵	۲/۷۴۷	۷/۱	۵۸/۹	۱۶/۲	۲۴/۹	۰/۹۷	۴/۱۷۳
مجموع	کل مناطق	۰/۷۵۶	۹/۱۸۹	۳/۳۷۸	۱/۸۹۳	۱/۷۶۴	۰/۷۵۳	۳/۵۱۶	۱/۷۸۵	---	----	----	----	----	----

این موضوع به‌ویژه در مناطقی با آلودگی شدید، نقش مهمی در بهبود قابلیت مدل‌سازی دارد، زیرا مدل‌های آماری و یادگیری ماشین نسبت به توزیع‌های نرمال‌تر عملکرد پایدارتر و قابل‌اعتمادتری دارند. درمجموع، این جدول به‌روشنی بیانگر آن است که توزیع غلظت سرب در مناطق مورد مطالعه نه‌تنها ازنظر مکانی بلکه از منظر آماری نیز بسیار ناهمگن و وابسته به نوع کاربری زمین و فعالیت‌های انسانی است. مناطق صنعتی و معدنی با مقادیر بالاتر میانگین، کشیدگی شدید و پراکندگی زیاد شناخته می‌شوند، درحالی‌که مناطق کم فعالیت‌تر دارای ساختار آماری فشرده‌تر و پایدارتر هستند. اعمال تبدیل لگاریتمی نیز به‌عنوان یک گام ضروری پیش‌پردازشی، موجب بهبود رفتار آماری داده‌ها و فراهم‌سازی شرایط مناسب‌تر برای مدل‌سازی‌های بعدی شده است.

۳-۲-استخراج شاخص‌های طیفی بهینه برای تخمین سرب خاک

در این بخش، فرآیند استخراج و گزینش ویژگی‌های طیفی مورداستفاده در مدل برآورد غلظت سرب تشریح می‌شود. از آنجا که پاسخ طیفی خاک علاوه بر غلظت فلزات سنگین، تحت تأثیر عواملی نظیر رطوبت، بافت، ماده آلی، زبری سطح و ترکیب کانی‌شناسی قرار دارد، استفاده مستقیم از داده‌های طیفی خام برای مدل‌سازی غلظت سرب کارایی محدودی دارد. ازاین‌رو، هدف این مرحله، استخراج شاخص‌های طیفی حساس به تغییرات غلظت سرب و کاهش اثر عوامل مداخله‌گر بر پاسخ طیفی خاک است.

در گام نخست، منحنی‌های طیفی با استفاده از تابع گاوسی و با واریانس ۱ و پهنای باند ۱۰ نانومتر باز نمونه‌برداری شدند. این فرآیند با هدف کاهش نوسانات تصادفی، هموارسازی پاسخ طیفی و کاهش افزونگی موجود میان طول‌موج‌های مجاور انجام شد تا داده‌ها از پایداری بیشتری برای مراحل بعدی برخوردار شوند. سپس، با استفاده از ۱۷۵ طول‌موج منتخب، مجموعه گسترده‌ای از شاخص‌های طیفی دوتایی و سه‌تایی تولید شد (شکل ۵). استفاده از این شاخص‌ها بر این مبنا استوار است که تغییرات غلظت سرب لزوماً در یک باند منفرد آشکار نمی‌شود، بلکه می‌تواند در قالب برهم‌کنش چندین طول‌موج و روابط غیرخطی میان آن‌ها نمایان گردد. از این رو، شاخص‌های سه باندی، به‌ویژه NDPI، به‌منظور افزایش توان مدل در استخراج روابط غیرخطی مورد استفاده قرار گرفتند.

با وجود مزایای این رویکرد، تولید شاخص‌های متعدد موجب انفجار ابعاد ویژگی[19] و ایجاد حجم زیادی از اطلاعات افزونه و کم‌اهمیت می‌شود. به همین دلیل، فرآیند انتخاب ویژگی به‌صورت چند مرحله‌ای انجام گرفت. در مرحله نخست، ضریب همبستگی پیرسون برای ارزیابی رابطه اولیه میان شاخص‌های طیفی و

19. Feature Explosion

غلظت سرب محاسبه شد تا شاخص‌های فاقد ارتباط مؤثر حذف شوند. سپس، معناداری ضرایب همبستگی با استفاده از آزمون T بررسی شد تا از اعتبار آماری روابط به‌دست‌آمده اطمینان حاصل شود و احتمال ورود روابط تصادفی به فرآیند مدل‌سازی کاهش یابد.

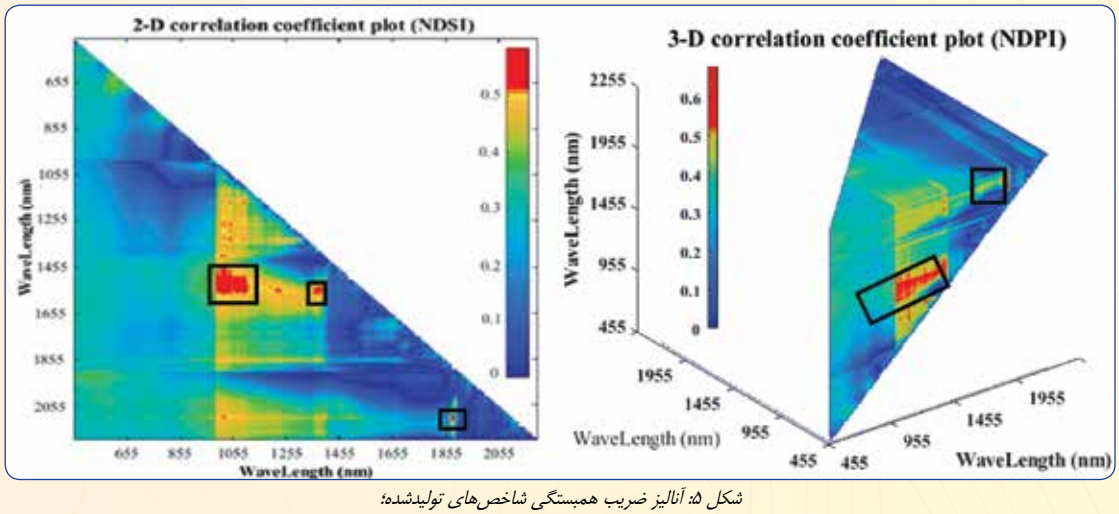
شکل ۵ توزیع ضرایب همبستگی پیرسون برای ترکیب‌های مختلف طول‌موج‌ها را نشان می‌دهد. نواحی مشخص‌شده با کادرهای مشکی، بیشترین ضرایب همبستگی را دارا بوده و بیانگر حساس‌ترین بازه‌های طیفی نسبت به تغییرات غلظت سرب هستند. نتایج این تحلیل نشان داد که بیشترین حساسیت طیفی در محدوده SWIR مشاهده می‌شود. این موضوع با ویژگی‌های فیزیکی این ناحیه از طیف سازگار است؛ زیرا باندهای SWIR به تغییرات کانی‌شناسی خاک، پیوندهای مولکولی OH و ویژگی‌های ساختاری کانی‌ها حساس بوده و این ویژگی‌ها می‌توانند به‌طور غیرمستقیم با حضور و غلظت فلزات سنگین مرتبط باشند. بر این اساس، بازه‌های طیفی ۱۰۰۰–۱۱۵۰، ۱۳۰۰–۱۴۰۰، ۱۴۵۵–۱۵۲۰، ۱۴۷۰–۱۵۰۰ و ۱۸۵۵–۲۰۶۰ نانومتر بیشترین سهم را در تشکیل شاخص‌های مؤثر داشته و در این محدوده‌ها ضرایب همبستگی بیش از ۰/۵ مشاهده شد.

در ادامه، عملکرد دو خانواده شاخص‌های NDSI و NDPI با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۵). تفاوت اصلی این دو گروه در تعداد باندهای به‌کاررفته است؛ به‌گونه‌ای که NDSI بر پایه ترکیب دو باند طیفی تعریف می‌شود، درحالی‌که NDPI با استفاده از سه باند، امکان نمایش روابط پیچیده‌تر میان پاسخ‌های طیفی را فراهم می‌کند.

نتایج نشان داد که شاخص‌های NDPI درمجموع عملکرد بهتری نسبت به NDSI داشته و ضرایب همبستگی بالاتری با غلظت سرب ارائه می‌کنند. این برتری احتمالاً ناشی از توانایی بیشتر شاخص‌های سه باندی در نمایش برهم‌کنش میان طول‌موج‌های مختلف و استخراج روابط غیرخطی موجود در داده‌های طیفی است.

در میان شاخص‌های بررسی‌شده، NDPI-1 با استفاده از طول‌موج‌های ۱۰۱۵، ۱۸۷۵ و ۲۰۹۵ نانومتر، بیشترین ضریب همبستگی (حدود ۰/۶۸) را به خود اختصاص داد. حضور دو باند در محدوده SWIR نشان می‌دهد که این ناحیه طیفی نقش مهمی در بازتاب ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی خاک ایفا می‌کند. در مقابل، شاخص NDSI-2 باوجود ساختار ساده‌تر، ضریب همبستگی پایین‌تری (حدود ۰/۵۴) نشان داد که بیانگر محدودیت شاخص‌های دو باندی در نمایش کامل تغییرات طیفی مرتبط با غلظت سرب است.

بر اساس شکل ۶ و جدول ۶، تحلیل اهمیت طول‌موج‌ها بر مبنای ضرایب همبستگی (روش انتخاب ویژگی مبتنی بر فیلتر) نشان داد که تنها ۱۳ باند از مجموع ۱۷۵ باند اولیه، بیشترین سهم را در تشکیل شاخص‌های مؤثر داشته‌اند. تکرار طول‌موج‌های ۱۳۶۵، ۱۸۷۵ و ۲۰۴۵ نانومتر در شاخص‌های منتخب بیانگر آن است که این نواحی طیفی بیشترین اطلاعات مرتبط با تغییرات غلظت سرب را در خود جای‌داده‌اند و احتمالاً با ویژگی‌های کانی‌شناسی و ساختار شیمیایی خاک ارتباط دارند. این نتایج نشان می‌دهد که با انتخاب هدفمند باندهای مؤثر، می‌توان ابعاد فضای ویژگی را به میزان قابل‌توجهی کاهش داد، درحالی‌که بخش عمده اطلاعات مؤثر حفظ می‌شود.



شکل ۵: آنالیز ضریب همبستگی شاخص‌های تولیدشده؛
الف) پلات دوبعدی همبستگی شاخص دوتایی NDSI ب) پلات سه‌بعدی مقادیر همبستگی شاخص سه‌تایی NDPI

باوجود کارایی مناسب ضریب همبستگی در غربال اولیه ویژگی‌ها، این معیار تنها روابط خطی را ارزیابی کرده و قادر به شناسایی تعاملات پیچیده میان متغیرها نیست. از این رو، در مرحله بعد، اهمیت شاخص‌ها با استفاده از معیار VIP نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برخی شاخص‌ها، ازجمله NDPI-2 و NDSI-3، باوجود ضرایب همبستگی مشابه با سایر شاخص‌ها، سهم بیشتری در بهبود عملکرد مدل‌دارند؛ موضوعی که عمدتاً به حضور طول‌موج‌های ۱۸۷۵ و ۲۱۰۵ نانومتر در ساختار این شاخص‌ها مربوط می‌شود. در مقابل، شاخص‌هایی مانند NDPI-1 و NDSI-1، اگرچه در تحلیل همبستگی اولیه عملکرد مطلوبی داشتند، اما در ارزیابی اهمیت ویژگی نقش کمتری در مدل ایفا کردند. این اختلاف را احتمالاً می‌توان به همبستگی بالای این شاخص‌ها با سایر ویژگی‌ها و افزونگی اطلاعاتی میان آن‌ها نسبت داد. بر این اساس، این شاخص‌ها از مجموعه نهایی حذف شدند.

درنهایت، ۹ شاخص طیفی به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند. این انتخاب حاصل یک فرآیند چند مرحله‌ای شامل کاهش ابعاد، تحلیل همبستگی، آزمون معناداری آماری، بررسی ویژگی‌های فیزیکی باندهای طیفی و ارزیابی اهمیت متغیرها در مدل بود که درمجموع، مجموعه‌ای از شاخص‌های مؤثر و پایدار را برای مدل‌سازی غلظت سرب فراهم ساخت.

جدول ۶: شاخص‌های طیفی منتخب به همراه طول‌موج‌های مؤثر بر تخمین سرب

عنوان شاخص	طول‌موج (نانومتر)
NDSI1	۱۰۰۵, ۱۴۵۵
NDSI2	۱۳۶۵, ۱۵۴۵
NDSI3	۱۸۷۵, ۲۰۹۵
NDPI1	۱۰۱۵, ۱۸۷۵, ۲۰۹۵
NDPI2	۸۸۵, ۱۸۷۵, ۲۱۰۵
NDPI3	۵۲۵, ۱۸۷۵, ۲۰۴۵
NDPI4	۷۵۵, ۱۸۷۵, ۲۰۴۵
NDPI5	۴۵۵, ۱۳۶۵, ۱۵۲۵
NDPI6	۱۰۰۵, ۱۳۶۵, ۱۵۲۵



شکل ۶: آنالیز همبستگی و مقدار اهمیت هر شاخص

۳-۳- ارزیابی مدل شبکه عصبی تعمیم‌یافته برای مناطق آموزشی و تست با استفاده از داده طیف‌سنجی

در این بخش، عملکرد مدل‌های یادگیری و به‌ویژه میزان تعمیم‌پذیری آن‌ها در چارچوب یادگیری انتقالی برای برآورد غلظت سرب از داده‌های طیفی مورد ارزیابی قرار گرفت. مبنای این رویکرد بر این فرض استوار است که مدلی که با استفاده از داده‌های چند منطقه با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت آموزش‌دیده باشد، بتواند با حداقل میزان بازآموزی در مناطق جدید نیز عملکرد مناسبی ارائه دهد. چنین قابلیتی ضمن کاهش نیاز به نمونه‌برداری گسترده، امکان بهره‌گیری مؤثر از دانش آموخته شده در سایر مناطق را نیز فراهم می‌نماید؛ موضوعی که در مناطق دارای محدودیت داده‌های زمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به‌منظور دستیابی به ارزیابی پایدار و کاهش سوگیری ناشی از نحوه تقسیم داده‌ها، از اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی (5-fold Cross Validation) استفاده شد. مجموعه داده شامل ۲۱۶ نمونه بود که در هر تکرار، ۸۰ درصد آن‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد به‌عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته شدند. همچنین، ۲۰ درصد از داده‌های آموزش به مجموعه ارزیابی (Validation) اختصاص یافت تا روند آموزش شبکه و جلوگیری از بیش‌برازش کنترل شود.

در گام نخست، مدل متداول یادگیری ماشین به‌عنوان مبنای مقایسه پیاده‌سازی شد و سپس یک شبکه عصبی عمیق به‌عنوان مدل پیشنهادی توسعه یافت. این شبکه شامل یک لایه ورودی، چهار لایه پنهان و یک لایه

خروجی با اتصالات کاملاً متصل[20] بود. تعداد نورون‌های لایه‌های متوالی به ترتیب ۹، ۱۸، ۳۶، ۱۸ و ۹ در نظر گرفته شد و فرآیند آموزش با نرخ یادگیری ۰۰۱/۰و حداکثر ۶۰۰۰ تکرار، با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی انجام گرفت. درمجموع، این شبکه دارای ۳۲۴۵ پارامتر قابل‌آموزش بود که ظرفیت مناسبی برای مدل‌سازی روابط غیرخطی میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب فراهم می‌کرد.

در مرحله آموزش اولیه، داده‌های مناطق شامل اردبیل (مشکین‌شهر و پارس‌آباد)، گلستان، زنجان و اصفهان به‌عنوان مجموعه مبدأ مورداستفاده قرار گرفتند. سپس، داده‌های منطقه جنوب تهران (ورامین و ری، شامل ۸۰ نمونه) به‌صورت تصادفی به مجموعه‌های آموزش و ارزیابی تقسیم شدند. درمجموع، ۱۳۶ نمونه برای آموزش اولیه شبکه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد مدل در مناطق مختلف یکسان نیست؛ به‌طوری‌که در منطقه اردبیل، که غلظت سرب عمدتاً کمتر از ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است، دقت پیش‌بینی کاهش یافت. این موضوع بیانگر تأثیر توزیع نامتوازن داده‌ها و تفاوت ویژگی‌های آماری مناطق بر عملکرد مدل است.

در مرحله یادگیری انتقالی، وزن‌ها و بایاس‌های حاصل از آموزش اولیه به‌عنوان مقادیر اولیه شبکه در منطقه جنوب تهران مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، شبکه با استفاده از داده‌های منطقه هدف بازآموزی شد تا دانش آموخته شده از مناطق مبدأ با ویژگی‌های منطقه جدید سازگار شود. این راهبرد موجب شد فرآیند آموزش به‌جای مقداردهی اولیه تصادفی، از پارامترهای از پیش آموخته‌شده آغاز شود و درنتیجه، سرعت همگرایی و پایداری مدل افزایش یابد. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل انتقال‌یافته در منطقه جنوب تهران به ضریب تعیین R^2 معادل ۰/۵۰ دست‌یافت که بیانگر قابلیت مناسب این چارچوب در انتقال دانش میان مناطق مختلف است. مقادیر سایر معیارهای ارزیابی در جدول ۷ ارائه‌شده است.

جدول ۷ : ارزیابی مدل‌های آموزش‌یافته برای مناطق مرجع و هدف

اختصار	مدل	R2	R2_adj	RPD	NRMSE	RMSE
SDNN[21]	شبکه عمیق تعلیم‌یافته برای مناطق مرجع	۰/۵۲	۰/۵۱	۱/۹۸	۰/۱۳	۱/۱۶
TSDNN[22]	شبکه عمیق انتقال‌یافته برای منطقه جنوب تهران	۰/۴۲	۰/۴۱	۱/۹۵	۰/۱۱	۰/۲۷
RF[23]	مدل تجمعی جنگل تصادفی تعلیم‌یافته برای مناطق مرجع	۰/۵۵	۰/۵۳	۲/۰۱	۰/۱۳	۱/۱۵
TRF[24]	مدل تجمعی انتقال‌یافته برای منطقه جنوب تهران	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۵۳	۰/۴۳	۰/۵۳

مطابق نتایج ارائه‌شده در جدول ۷، مدل SDNN (شبکه عصبی عمیق آموزش‌دیده بر پایه داده‌های پنج منطقه) به ضریب تعیین R^2 برابر با ۰/۵۲ و مقدار RPD معادل ۱/۹۲ دست‌یافت که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در مرحله آموزش چند منطقه‌ای است. نسخه انتقال‌یافته این مدل (TSDNN) در منطقه جنوب تهران، باوجود کاهش ضریب تعیین به ۰/۴۲ همچنان عملکرد مناسبی در برآورد غلظت سرب حفظ کرد. هرچند افزایش مقدارRMSE به ۰/۲۷ نشان می‌دهد که تعمیم مدل به داده‌های منطقه‌ای با ویژگی‌های متفاوت همچنان با چالش‌هایی همراه است.

در مقابل، مدل جنگل تصادفی (RF) در مرحله آموزش اولیه عملکرد نسبتاً بهتری ازنظر R^2 برابر ۰/۵۵و RPD معادل ۲/۰۱ نشان داد، اما هنگام به‌کارگیری همان مدل آموزش‌دیده در منطقه جنوب تهران (TRF)، عملکرد آن به‌طور محسوسی کاهش یافت؛ به‌طوری‌که مقادیر R^2 و RPD به ترتیب به ۰/۱۶ و ۰/۵۳ رسید. لازم به ذکر است که در این حالت، هیچ‌گونه بازآموزی یا انتقال پارامتر برای مدل RF انجام نشد و همان مدل آموزش‌دیده مستقیماً برای پیش‌بینی داده‌های منطقه هدف مورد استفاده قرار گرفت. این نتایج بیانگر کاهش قابل‌توجه قابلیت تعمیم مدلRF در مواجهه با داده‌های مربوط به منطقه‌ای جدید است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی عمیق پیشنهادی نسبت به مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم، از پایداری و قابلیت تعمیم بالاتری برخوردار است. این برتری احتمالاً ناشی از توانایی شبکه عصبی در بهره‌گیری از پارامترهای آموخته شده و مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب است؛ درحالی‌که مدل جنگل تصادفی فاقد سازوکار یادگیری انتقالی بوده و

20. Fully Connected
21. Semi Deep Neural Network
22. Transferred Semi Deep Neural Network
23. Random Forest
24. Transferred Random Forest

درنتیجه، عملکرد آن در انتقال به داده‌های خارج از دامنه آموزش به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. درمجموع، نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل TSDNN، باوجود افت نسبی عملکرد نسبت به مرحله آموزش، همچنان نسبت به مدل RF دقت و پایداری بیشتری در پیش‌بینی غلظت سرب در منطقه جنوب تهران ارائه می‌دهد.

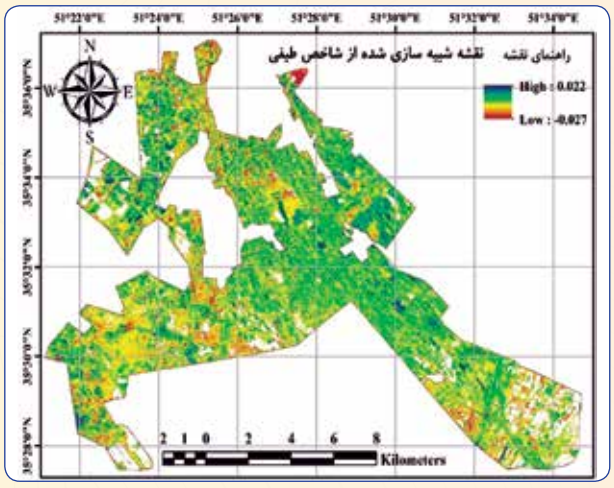
جمع‌بندی نتایج این بخش چند نکته مهم را آشکار می‌سازد. نخست، طول‌موج‌های ۴۵۵، ۵۲۵، ۷۵۵، ۸۸۵، ۱۰۱۵، ۱۸۷۵ و ۲۰۹۵ نانومتر بیشترین نقش را در برآورد غلظت سرب ایفا کرده‌اند که بخش عمده آن‌ها با باندهای اصلی سنجنده Landsat-8 هم‌پوشانی دارند. دوم، شاخص‌های طیفی سه باندی در مقایسه با شاخص‌های دو باندی، توانایی بیشتری در استخراج اطلاعات مرتبط با غلظت سرب نشان داده و عملکرد بهتری در مدل‌سازی ارائه کرده‌اند. سوم، شبکه عصبی عمیق با چهار لایه پنهان، نسبت به مدل‌های کلاسیک یادگیری ماشین، روابط غیرخطی موجود در داده‌های طیفی را با دقت بیشتری مدل‌سازی کرده و درنتیجه، از پایداری و قابلیت تعمیم بالاتری در پیش‌بینی غلظت سرب برخوردار بوده است.

۳-۴- ارزیابی مدل شبکه عصبی عمیق تعمیم‌یافته بر روی تصویر جهت تولید نقشه

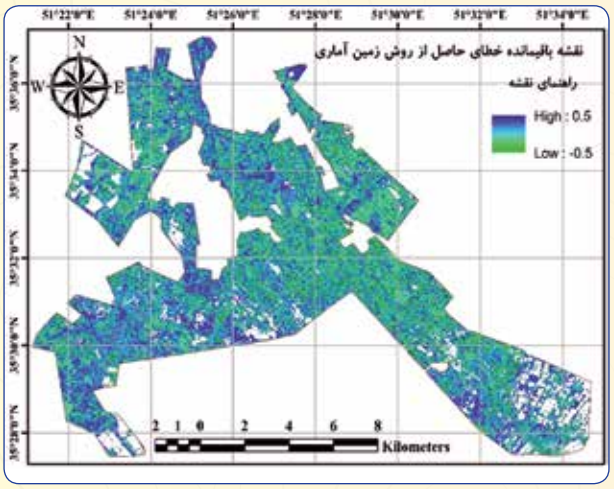
در این بخش، عملکرد مدل شبکه عصبی عمیق تعمیم‌یافته در محیط تصاویر ماهواره‌ای ارزیابی شد و درنهایت نقشه توزیع مکانی غلظت سرب با دقت بهبود یافته تولید گردید. چالش اصلی این مرحله، اختلاف ساختاری میان داده‌های طیف‌سنجی زمینی و تصاویر ماهواره‌ای ازنظر تعداد باندها و توان تفکیک طیفی بود؛ به‌گونه‌ای که داده‌های طیف‌سنجی از بازه طیفی پیوسته و تفکیک طیفی بسیار بالا برخوردارند، درحالی‌که تصاویر Landsat-8 تنها شامل تعداد محدودی باند طیفی گسسته هستند. از این رو، امکان استخراج مستقیم شاخص‌های طیفی یکسان در هر دو مجموعه داده وجود نداشت و لازم بود فضایی واسط برای انتقال ویژگی‌های استخراج‌شده از داده‌های طیف‌سنجی به تصاویر ماهواره‌ای ایجاد شود.

در این راستا، ابتدا یک شبکه عصبی با ساختار ساده به‌منظور مدل‌سازی ارتباط میان باندهای طیفی Landsat-8 و شاخص‌های طیفی منتخب توسعه داده شد. خروجی این مدل، بازسازی تقریبی شاخص‌های طیفی بهینه در سطح تصویر بود؛ به عبارت دیگر، این مرحله نگاشتی از فضای محدود باندهای ماهواره‌ای به فضای غنی‌تر ویژگی‌های طیفی استخراج‌شده از داده‌های زمینی ایجاد نمود. بدین ترتیب، بستری فراهم شد تا مدل اصلی، که بر پایه داده‌های طیف‌سنجی آموزش‌دیده بود، بر روی تصاویر ماهواره‌ای نیز قابل استفاده باشد. در ادامه، مدل شبکه عصبی عمیق آموزش‌دیده با استفاده از رویکرد یادگیری انتقالی بر روی ویژگی‌های بازسازی‌شده اعمال گردید. از آنجا که این مدل پیش‌تر روابط غیرخطی میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب را بر اساس داده‌های با تفکیک طیفی بالا فراگرفته بود، به‌کارگیری آن در فضای بازسازی‌شده امکان انتقال این دانش به داده‌های ماهواره‌ای را فراهم ساخت. حاصل این فرآیند، تولید نقشه اولیه غلظت سرب بود که الگوی کلی تغییرات مکانی را با دقت مناسبی بازنمایی می‌نمود.

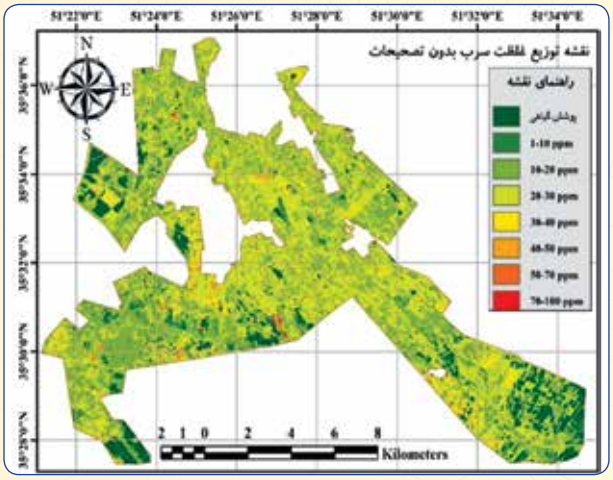
با وجود عملکرد مناسب مدل، بررسی نتایج نشان داد



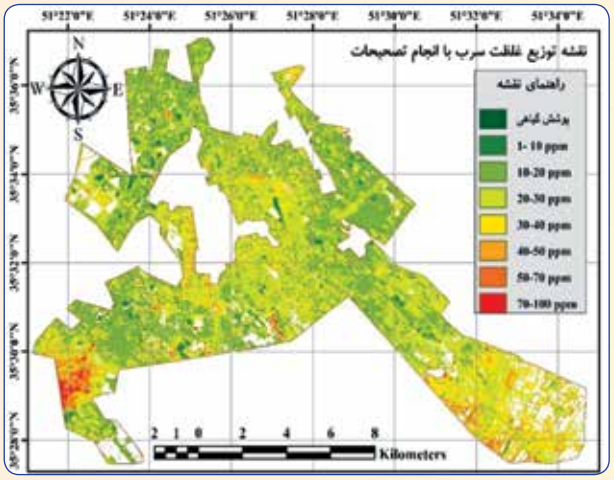
شکل ۷ الف: نقشه شبیه‌سازی‌شده از بهینه‌ترین شاخص



شکل ۷ب: نقشه خطای ناشی از روش زمین‌آماری



شکل ۷ ج: نقشه اولیه سرب بدون تصحیح



شکل۷ د: نقشه توزیع سرب پس از انجام تصحیح

که بخشی از خطاهای موضعی همچنان در نقشه اولیه باقی‌مانده است. این خطاها عمدتاً ناشی از ناهمگنی مکانی خاک، تفاوت ویژگی‌های ژئوشیمیایی مناطق و محدودیت توان تفکیک مکانی تصاویر Landsat-8 هستند. به‌منظور اصلاح این خطاها، ابتدا اختلاف میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در نقاط نمونه‌برداری محاسبه شد و سپس سطح پیوسته خطا با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) تولید گردید. انتخاب این روش به دلیل سادگی، سرعت محاسباتی بالا، عدم نیاز به مدل‌سازی واریوگرام و عملکرد مناسب آن در شرایط محدود بودن تعداد نمونه‌های زمینی صورت گرفت. بدین ترتیب، الگوی مکانی خطا در سطح منطقه برآورد و امکان اصلاح سیستماتیک نتایج اولیه فراهم شد.

در گام نهایی، نقشه خطای حاصل از درون‌یابی IDW با نقشه اولیه تولید شده توسط شبکه عصبی تلفیق گردید تا اثر خطاهای موضعی کاهش‌یافته و دقت نهایی برآورد افزایش یابد. این رویکرد، چارچوبی ترکیبی از یادگیری عمیق و زمین‌آمار را شکل می‌دهد که در آن، شبکه عصبی مسئول مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان داده‌های طیفی و غلظت سرب بوده و روش زمین‌آماری وظیفه اصلاح الگوی مکانی خطا را بر عهده دارد. نتایج نهایی نشان داد که این چارچوب ترکیبی، نسبت به استفاده مستقل از شبکه عصبی، نقشه‌ای با پیوستگی مکانی بیشتر، نویز کمتر و انطباق بالاتر با داده‌های اندازه‌گیری‌شده تولید می‌کند.

۴- بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تعمیم مدل یادگیری عمیق آموزش‌دیده بر داده‌های طیف‌سنجی زمینی به تصاویر ماهواره‌ای، اگرچه امکان‌پذیر است، اما با چالش‌هایی ناشی از تفاوت ویژگی‌های طیفی و ساختار داده‌های دو منبع همراه است. داده‌های طیف‌سنجی زمینی دارای قدرت تفکیک طیفی بسیار بالا و ثبت پیوسته بازتاب در طول‌موج‌های متوالی هستند، درحالی‌که تصاویر لندست ۸ تنها شامل چند باند گسسته با پهنای طیفی نسبتاً زیاد هستند. این تفاوت در قدرت تفکیک طیفی و نحوه ثبت اطلاعات موجب می‌شود الگوهای طیفی استخراج‌شده از داده‌های زمینی به‌صورت مستقیم در تصاویر ماهواره‌ای قابل بازتولید نباشند و درنتیجه، بخشی از اطلاعات مؤثر در فرآیند انتقال دانش از دست برود. بنابراین، کاهش نسبی دقت مدل در مرحله تعمیم، تا حد زیادی ناشی از همین اختلاف در فضای ویژگی‌های طیفی است، نه ضعف ذاتی مدل یادگیری.

با وجود این محدودیت، نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی توانسته است الگوی کلی توزیع مکانی غلظت سرب را با دقت قابل‌قبول بازسازی نماید. این موضوع بیانگر آن است که روابط غیرخطی میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب که در مرحله آموزش فراگرفته شده‌اند، از قابلیت تعمیم مناسبی برخوردار بوده و بخش قابل‌توجهی از اطلاعات مؤثر حتی پس از انتقال به داده‌های ماهواره‌ای نیز حفظ‌شده است. البته میزان موفقیت این انتقال به میزان شباهت آماری میان

داده‌های آموزشی و داده‌های هدف وابسته است و هرچه اختلاف ویژگی‌های طیفی و شرایط محیطی بیشتر باشد، انتظار کاهش دقت مدل نیز منطقی خواهد بود.

بررسی الگوی خطاهای مکانی نیز نشان داد که خطاها کاملاً تصادفی نبوده و در برخی نواحی از الگوهای فضایی مشخصی پیروی می‌نمایند. این موضوع نشان می‌دهد بخشی از خطای مدل ناشی از عواملی نظیر تغییرات کاربری اراضی، ناهمگنی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، تفاوت شرایط ژئوشیمیایی منطقه و همچنین محدودیت تفکیک مکانی و طیفی تصاویر لندست است. بنابراین، بخشی از خطا دارای منشأ مکانی بوده و قابلیت اصلاح دارد. به همین دلیل، تلفیق نتایج مدل یادگیری عمیق با روش‌های زمین‌آماری توانست این مؤلفه‌های سیستماتیک را تا حد زیادی کاهش داده و موجب بهبود پیوستگی فضایی و افزایش دقت نقشه نهایی شود.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب یادگیری انتقالی با داده‌های سنجش‌ازدور، ظرفیت مناسبی برای کاهش وابستگی به نمونه‌برداری‌های گسترده زمینی و توسعه مدل‌های قابل تعمیم در مناطق جدید دارد. هرچند اختلاف میان ویژگی‌های طیفی داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای همچنان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده دقت پیش‌بینی محسوب می‌شود، اما استفاده از راهکارهای تکمیلی، ازجمله اصلاح مکانی خطا، می‌تواند این محدودیت را تا حد زیادی جبران کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی، علاوه بر برخورداری از توان مناسب در پیش‌بینی غلظت سرب، از قابلیت توسعه برای کاربرد در سایر مناطق و سایر فلزات سنگین نیز برخوردار است، مشروط بر آنکه اختلاف ویژگی‌های طیفی میان داده‌های آموزشی و داده‌های هدف تا حد امکان کاهش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

افزایش آلودگی خاک در کشورهای درحال‌توسعه ازجمله ایران، به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی تبدیل‌شده است که پیامدهای آن فراتر از محیط‌زیست بوده و می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم بر سلامت اکوسیستم‌ها نیز اثرگذار باشد. در این میان، اگرچه بروز بیماری‌ها پدیده‌ای چندعاملی است و تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل ژنتیکی، تغذیه‌ای، رفتاری و محیطی قرار دارد، اما آلودگی خاک به‌ویژه ناشی از تجمع فلزات سنگین، به‌عنوان یکی از پایدارترین و مهم‌ترین عوامل تنش‌زای محیطی شناخته می‌شود. این آلاینده‌ها از طریق زنجیره غذایی قابلیت انتقال به گیاهان و درنهایت ورود به بدن انسان رادارند و از این منظر خاک به‌عنوان نخستین حلقه زنجیره غذایی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت محیط‌زیست ایفا می‌کند.

در این راستا، پژوهش حاضر با تمرکز بر فلزات سنگین به‌ویژه سرب، باهدف برآورد مکانی غلظت این عنصر و ارائه نقشه‌های پیوسته از پراکنش آن انجام‌شده است. چارچوب پیشنهادی مبتنی بر استفاده از داده‌های چند منطقه‌ای و رویکرد یادگیری انتقالی توسعه‌یافته است تا بتوان با حداقل وابستگی به داده‌های محلی، مدلی قابل‌تعمیم برای مناطق مختلف ارائه نمود. استفاده از داده‌های چند منطقه‌ای شامل گلستان، زنجان، اصفهان، مشکین‌شهر و پارس‌آباد موجب شد مدل در معرض تنوع گسترده‌ای از شرایط ژئوشیمیایی قرار گیرد و درنتیجه توان تعمیم‌پذیری آن به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد. نتایج مقایسه‌ای نشان داد که رویکرد مبتنی بر شبکه عصبی عمیق همراه با انتقال یادگیری، نسبت به مدل‌های کلاسیک یادگیری ماشین از عملکرد پایدارتر و قابلیت انتقال بهتری برخوردار است. این برتری عمدتاً ناشی از توانایی شبکه در حفظ ساختار پارامترهای آموخته‌شده و استخراج روابط غیرخطی پیچیده میان ویژگی‌های طیفی و غلظت سرب است؛ درحالی‌که مدل‌های تجمیعی نظیر RF فاقد سازوکار مؤثر برای انتقال دانش بین دامنه‌های مکانی مختلف بوده و در مواجهه با داده‌های جدید با افت عملکرد مواجه می‌شوند.

از سوی دیگر، نتایج حاصل نشان داد که تلفیق مدل‌های یادگیری عمیق با روش‌های زمین‌آماری می‌تواند به‌طور معناداری موجب بهبود کیفیت نقشه‌های نهایی گردد. در این چارچوب، بخش یادگیری عمیق مسئول استخراج الگوهای غیرخطی و ساختارهای پیچیده مکانی بوده و مدل زمین‌آماری نقش بازنمایی و اصلاح خطاهای مکانی را بر عهده داشته است. این ترکیب موجب افزایش پیوستگی فضایی نقشه‌ها و کاهش اثر نویزهای محلی در خروجی نهایی شده است. درمجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های طیفی، مدل‌های یادگیری عمیق و روش‌های زمین‌آماری می‌تواند چارچوبی کارآمد برای پایش مکانی فلزات سنگین در مقیاس منطقه‌ای فراهم سازد و به‌عنوان ابزاری قابل اتکا در تحلیل‌های زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] R. Taghizadeh-Mehrjardi et al., “Spatio-temporal analysis of heavy metals in arid soils at the catchment scale using digital soil assessment and a random forest model,” Remote Sens., vol. 13, no. 9, p. 1698, 2021.

[2] V. Kumar, A. Sharma, and A. Cerda, Heavy metals in the environment: Impact, assessment, and remediation. Elsevier, 2020.

[3] K. Azizi, S. Ayoubi, K. Nabiollahi, Y. Garosi, and R. Gislum, “Predicting heavy metal contents by applying machine learning approaches and environmental covariates in west of Iran,” J. Geochemical Explor., vol. 233, p. 106921, 2022.

[4] P. Fu, W. Zhang, K. Yang, and F. Meng, “A novel spectral analysis method for distinguishing heavy metal stress of maize due to copper and lead: RDA and EMD-PSD,” Ecotoxicol. Environ. Saf., vol. 206, p. 111211, 2020.

[5] E. Omondi and M. Boitt, “Modeling the Spatial Distribution of Soil Heavy Metals Using Random Forest Model—A Case Study of Nairobi and Thirirka Rivers’ Confluence,” J. Geogr. Inf. Syst., vol. 12, no. 06, p. 597, 2020.

[6] S. Mitra et al., “Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity,” J. King Saud Univ., p. 101865, 2022.

[7] J. Wang, X. Hu, T. Shi, L. He, W. Hu, and G. Wu, “Assessing toxic metal chromium in the soil in coal mining areas via proximal sensing: Prerequisites for land rehabilitation and sustainable development,” Geoderma, vol. 405, p. 115399, 2022.

[8] L. Wei, Z. Yuan, Y. Zhong, L. Yang, X. Hu, and Y. Zhang, “An improved gradient boosting regression tree estimation model for soil heavy metal (Arsenic) pollution monitoring using hyperspectral remote sensing,” Appl. Sci., vol. 9, no. 9, p. 1943, 2019.

[9] M. Mokarram, A. Saber, and V. Sheykhi, “Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents,” J. Clean. Prod., vol. 277, p. 123380, 2020.

[10] W. Zhou et al., “Hyperspectral inversion of soil heavy metals in Three-River Source Region based on random forest model,” Catena, vol. 202, p. 105222, 2021.

[11] Z. Xu, S. Zhao, and X. Qian, “Extracting heavy metal stress indicators from remote sensing imagery using WOFOST model and wavelet packet decomposition algorithm,” in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, p. 12056.

[12] L. Chen and K. Tan, “ESTIMATION OF SOIL HEAVY METAL COMBINING FRACTIONAL ORDER DERIVATIVE.,” Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., vol. 43, 2020.

[13] B. Zijin et al., “Estimation of Heavy Metals in Tailings and Soils Using Hyperspectral Technology: A Case Study in a Tin-Polymetallic Mining Area,” Bull. Environ. Contam. Toxicol., vol. 107, no. 6, pp. 1022–1031, 2021.

[14] X. Xu et al., “Estimation of heavy metals in agricultural soils using vis-NIR spectroscopy with fractional-order derivative and generalized regression neural network,” Remote Sens., vol. 13, no. 14, p. 2718, 2021.

[15] R. Sawut et al., “Possibility of optimized indices for the assessment of heavy metal contents in soil around an open pit coal mine area,” Int. J. Appl. earth Obs. Geoinf., vol. 73, pp. 14–25, 2018.

[16] M. Ye et al., “Estimation of the soil arsenic concentration using a geographically weighted XGBoost model based on hyperspectral data,” Sci. Total Environ., vol. 858, p. 159798, 2023.

[17] G. Chen, Y. Yang, X. Liu, and M. Wang, “Spatial distribution characteristics of heavy metals in surface soil of Xilinguole coal mining area based on semivariogram,” ISPRS Int. J. Geo-Information, vol. 10, no. 5, p. 290, 2021.

[18] Y. Fang, L. Xu, A. Wong, and D. A. Clausi, “Multi-Temporal Landsat-8 Images for Retrieval and Broad Scale Mapping of Soil Copper Concentration Using Empirical Models,” Remote Sens., vol. 14, no. 10, p. 2311, 2022.

[19] F. Mirzaei, Y. Abbasi, and T. Sohrabi, “Modeling the distribution of heavy metals in lands irrigated by wastewater using satellite images of Sentinel-2,” Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci., vol. 24, no. 3, pp. 537–546, 2021.

[20] R. Goodarzi, M. Mokhtarzade, and M. Zoej, “A robust fuzzy neural network model for soil lead estimation from spectral features,” Remote Sens., vol. 7, no. 7, pp. 8416–8435, 2015.

[21] K. Tan et al., “Estimating the distribution trend of soil heavy metals in mining area from HyMap airborne hyperspectral imagery based on ensemble learning,” J. Hazard. Mater., vol. 401, p. 123288, 2021.

[22] K. Liu, D. Zhao, J. Fang, X. Zhang, Q. Zhang, and X. Li, “Estimation of heavy-metal contamination in soil using remote sensing spectroscopy and a statistical approach,” J. Indian Soc. Remote Sens., vol. 45, pp. 805–813, 2017.

[23] L. Lu, J. Zhang, G. Huang, and X. Su, “Land cover classification and height extraction experiments using Chinese airborne X-band PolInSAR system in China,” Int. J. Image Data Fusion, vol. 7, no. 3, pp. 282–294, 2016.

[24] V. Khosravi, F. Doulati Ardejani, and S. Yousefi, “Spectroscopic based quantitative mapping of contaminant elements in dumped soils of a copper Mine,” Geopersia, vol. 7, no. 1, pp. 71–84, 2017.

[25] L. Zhao et al., “Estimation methods for soil mercury content using hyperspectral remote sensing,” Sustainability, vol. 10, no. 7, p. 2474, 2018.

[26] S. Zhang et al., “Hyperspectral inversion of heavy metal content in reclaimed soil from a mining wasteland based on different spectral transformation and modeling methods,” Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc., vol. 211, pp. 393–400, 2019.

[27] A. M. Mouazen, F. Nyarko, M. Qaswar, G. Tóth, A. Gobin, and D. Moshou, “Spatiotemporal Prediction and Mapping of Heavy Metals at Regional Scale Using Regression Methods and Landsat 7,” Remote Sens., vol. 13, no. 22, p. 4615, 2021.

[28] S. A. Fakhri, M. J. Valadan Zoej, A. Safdarinezhad, and P. Yavari, “Estimation of heavy metal concentrations (Cd and Pb) in plant leaves using optimal spectral indicators and artificial neural networks,” Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 29, no. 50, pp. 76119–76134, 2022.

[29] R. Goodarzi, B. A. Beirami, M. R. Sahebi, and M. Mokhtarzade, “Evaluation of regression models’ accuracy for estimating soil heavy metals content from topographic rectified satellite imagery (Case study: Irankouh from Iran),” Adv. Sp. Res., 2023.

[30] K. Mohammadnezhad, M. R. Sahebi, S. Alatab, and A. Sajadi, “Investigating heavy-metal soil contamination state on the rate of stomach cancer using remote sensing spectral features,” Environ. Monit. Assess., vol. 195, no. 5, pp. 1–15, 2023.

[31] R. Goodarzi and M. R. Sahebi, “Integrating Landsat-8 imagery and spectroscopic data for accurate soil lead content estimation using the LeadNet model based on transfer learning,” Remote Sens. Appl. Soc. Environ., vol. 38, p. 101546, 2025.

مقاله

گذار از زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) به زیرساخت دانش مکانی (GKI): چارچوب تحول اکوسیستم اطلاعات مکانی در عصر انقلاب صنعتی چهارم

مرجان قنبری[۱و۲]، محمد کریمی[۲]، دانا سعیدی[۲]، سارا ترک تتاری[۲]
۱.اداره سامانه‌های مکانی، اداره کل سامانه‌های ملی و زیرساخت اطلاعات مکانی، سازمان نقشه‌برداری، کشور
۲.دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، کشور

چکیده

در عصر انقلاب صنعتی چهارم (IR4)، اطلاعات مکانی از یک ابزار تخصصی به یکی از ارکان زیرساخت عمومی رقمی تبدیل شده است. با این حال، زیرساخت‌های سنتی داده‌های مکانی (SDI) که به‌طور عمده بر دسترس‌پذیری برای کاربران انسانی متمرکز بوده‌اند، پاسخگوی نیازهای نوین اکوسیستم اطلاعات مکانی، از جمله ماشین‌فهمی، تعامل‌پذیری هوشمند و تولید دانش از داده‌ها نیستند. از این‌رو، گذار از زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) به زیرساخت دانش مکانی (GKI) و در ادامه به اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. این گذار بر سه رکن بنیادین استوار است: ارائه راه حل یکپارچه برای چالش‌های جهانی، تأمین دسترسی عادلانه به دانش حاصل از اطلاعات مکانی برای همگان، و پر کردن شکاف رقمی میان کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه. اکوسیستم مطلوب نه جایگزین SDIهای موجود، بلکه گسترش‌دهنده آن‌هاست و از سه لایه به‌هم‌پیوسته تشکیل می‌شود SDI: به عنوان منبع داده‌های بنیادین معتبر، سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) برای همکاری پویای سامانه‌های مستقل، و ژئوورس (Geoverse) به عنوان لایه هوشمند بالایی که با فناوری‌های IR4 (هوش مصنوعی، بلاکچین، اینترنت اشیا و پردازش زبان طبیعی) داده‌های لحظه‌ای را به دانش عملی تبدیل می‌نماید. این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل اسنادی، ضمن تبیین مفاهیم و مؤلفه‌های اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، نمونه کاربردی کره‌جنوبی را به‌منظور نمایش نحوه عملیاتی‌سازی این رویکرد بررسی کرده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده نه جایگزین SDI، بلکه تکامل آن است و تحقق آن مستلزم هم‌افزایی میان زیرساخت‌های داده، حکمرانی، فناوری‌های نوین و همکاری میان ذی‌نفعان است. تحقق چنین گذاری مستلزم آینده‌نگری مستمر در شناسایی فناوری‌ها و روندهای نوظهور، همسوسازی سیاست‌ها و حکمرانی اطلاعات مکانی با تحولات جهانی و چارچوب‌های بین‌المللی، و اجرای تدریجی نوآوری‌های فناورانه و نهادی متناسب با ظرفیت‌ها و اولویت‌های هر کشور است.

کلمات کلیدی: اکوسیستم اطلاعات مکانی، زیرساخت دانش مکانی (GKI)، زیرساخت داده‌های مکانی، سامانه‌ای از سامانه‌ها، ژئوورس، چارچوب یکپارچه اطلاعات مکانی، گذار دانش‌محور

۱- مقدمه

در عصر انقلاب صنعتی چهارم[۱]، جهان شاهد دگرگونی بی‌سابقه‌ای است که توسط همگرایی چندین عامل کلیدی هدایت می‌شود: گسترش محیط رقمی[۲] فراگیر، افزایش بی‌سابقه به‌هم‌پیوستگی مردم، دستگاه‌ها و اطلاعات، و رشد نمایی در حجم و تنوع داده [۱]. فناوری‌های محوری این انقلاب، از جمله هوش مصنوعی[۳]، یادگیری ماشین[۴]، مدل‌های زبانی بزرگ[۵]، رایانش ابری[۶] و اینترنت اشیا[۷]، تأثیری عمیق و ماندگار بر اکوسیستم رقمی گسترده‌تر گذاشته‌اند؛ اکوسیستمی که خود زیربنای چشم‌انداز در حال تحول اطلاعات مکانی را تشکیل می‌دهد [۲]. در چنین بستری، اطلاعات مکانی نقشی حیاتی و راهبردی یافته است .هر رویداد، پدیده یا تصمیمی به نوعی با مکان گره خورده است. از تعیین مکان بهینه برای ساخت یک بیمارستان گرفته تا پیش‌بینی مناطق پرخطر آتش‌سوزی یا ارزیابی احتمال وقوع سیلاب، همگی

۱. انقلاب صنعتی چهارم که با نام‌های *IR4*، صنعت ۴.۰ و یا عصر هوش نیز شناخته می‌شود، به تغییرات سریع فناوری، صنایع و الگوهای اجتماعی و عملیاتی که در طی قرن ۲۱ به منظور افزایش اتصال‌های متقابل و اتوماسیون هوشمند فراگیر شده‌است، اشاره دارد.

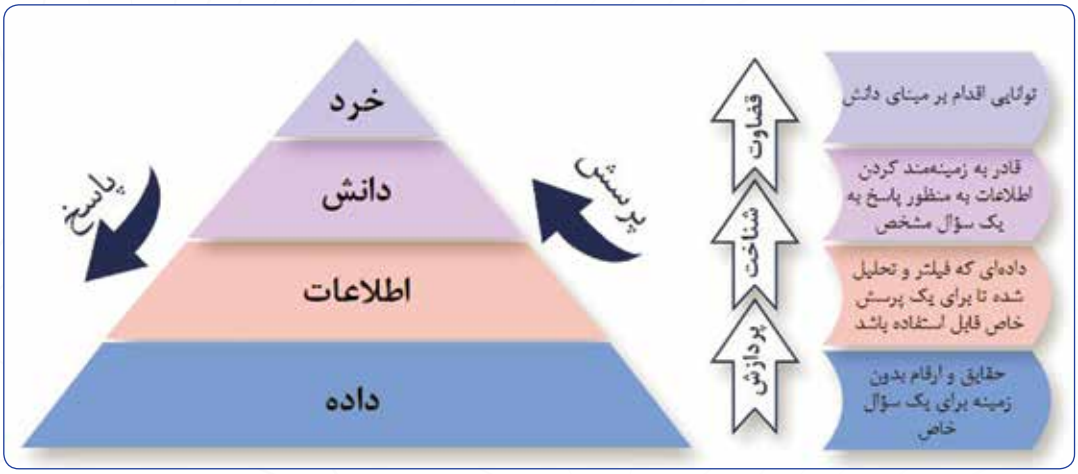
2. Digital
3. Artificial Intelligence
4. Machine Learning
5. Large Language Model
6. Cloud Computing
7. Internet of Things

نیازمند دسترسی لحظه‌ای به داده‌های مکانی، پردازش هوشمند و تبدیل آن‌ها به دانشی زمینه‌دار و قابل اعتماد هستند [۳].

با این حال، زیرساخت‌های سنتی داده‌های مکانی (SDI[8]) که به‌طور عمده در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ مفهوم‌سازی شدند، بر پایه معماری انسان‌محور طراحی شده‌اند [۴, ۵]. این ساختارها به‌طور معمول به‌صورت مخازن و فهرست‌های داده عمل می‌کنند و اگرچه دسترسی کاربران انسانی به داده‌های مکانی را تسهیل می‌نمایند، اما برای خوانش، تفسیر و پردازش خودکار توسط ماشین‌ها طراحی نشده‌اند. از این‌رو، موتورهای جستجو و سامانه‌های هوشمند در کشف و بهره‌برداری مؤثر از داده‌های موجود با محدودیت‌هایی مواجه‌اند و ظرفیت فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، تحلیل‌های کلان‌داده[9] جغرافیایی[10] و استنتاج دانش به‌طور کامل قابل بهره‌برداری نیستند [۴].

مطابق شکل ۱، در هرم DIKW[11] ، داده در قاعده، سپس اطلاعات، دانش و در نهایت خرد در رأس قرار دارد. زیرساخت‌های SDI به طور عمده بر مدیریت، استانداردسازی، کشف و اشتراک‌گذاری داده‌ها و خدمات مکانی متمرکز هستند و اگرچه بسیاری از SDIهای نوین قابلیت ارائه برخی خدمات پردازشی و تحلیلی را نیز دارند، اما تمرکز اصلی آن‌ها بر تولید و ارائه دانش زمینه‌مند و متناسب با نیاز کاربران نیست. در مقابل، کاربران امروز بیش از دسترسی به داده، به پاسخ‌های قابل تفسیر، زمینه‌مند و قابل اتکا برای تصمیم‌گیری نیاز دارند؛ قابلیتی که در رویکردهای نوین مبتنی بر زیرساخت دانش و اکوسیستم اطلاعات مکانی مورد توجه قرار گرفته است.

بر همین اساس، مقاله حاضر با تبیین سیر تحول از زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) به زیرساخت دانش مکانی (GKI) و سپس اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، چارچوب مفهومی این گذار را تشریح می‌کند. در ادامه، مؤلفه‌های اصلی این اکوسیستم، شامل SDI، سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) و ژئوورس (Geoverse)، در چارچوب UN-IGIF بررسی شده و در نهایت، با ارائه یک نمونه کاربردی از کره جنوبی، نحوه عملیاتی‌سازی این رویکرد در عمل تبیین می‌شود.



شکل ۱: از داده تا دانش و خرد، مدل DIKW [۴]

در پاسخ به این محدودیت‌ها، مفهوم زیرساخت دانش مکانی[12](GKI) به‌عنوان نسل تکامل‌یافته SDI مطرح شد. زیرساخت دانش مکانی با حفظ نقش SDI در تأمین داده‌های مرجع، بر تبدیل داده و اطلاعات به دانش قابل استفاده برای تصمیم‌گیری از طریق یکپارچه‌سازی، تحلیل، استنتاج و ارائه دانش متناسب با نیاز کاربران تأکید دارد. به بیان دیگر، GKI حلقه واسط میان زیرساخت‌های داده‌محور سنتی و اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده محسوب می‌شود و زمینه را برای گذار از مدیریت داده به مدیریت و بهره‌برداری از دانش مکانی فراهم می‌نماید.

بنابراین، انگیزه پشت جنبش «فراتر از SDI» صرفاً عبور از زیرساخت‌های داده‌محور نیست، بلکه حرکت به‌سوی زیرساخت‌های دانش‌محور (GKI) و در ادامه اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده است [۶]. این تحول، گذار از SDIهای

8. Spatial Data Infrastructurte
9. Big Data
10. Geoanalytics
11. Data, Information, Knowledge, Wisdom
12. Geospatial Knowledge Infrastructure

انسان‌محور به اکوسیستمی را دنبال می‌کند که در آن انسان و ماشین به‌صورت توأمان قادر به درک، یکپارچه‌سازی، تحلیل و بهره‌برداری از داده‌های مکانی برای تولید دانش هستند.

۲- مفاهیم بنیادین

برای درک اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، لازم است چهار مفهوم کلیدی شامل زیرساخت داده‌های مکانی (SDI)، زیرساخت دانش مکانی (GKI)، سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) و ژئوورس (Geoverse) از یکدیگر تفکیک شوند. این مفاهیم جایگزین یکدیگر نیستند، بلکه بیانگر مراحل تکاملی و لایه‌های مکمل اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده هستند.

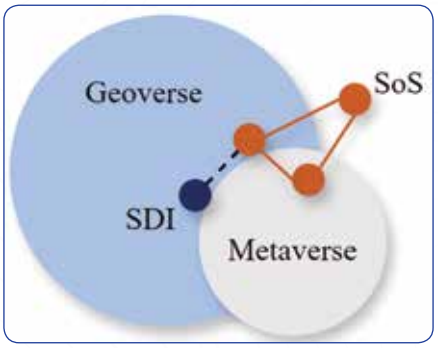
- **زیرساخت داده‌های مکانی (SDI)** به عنوان سنگ بنای قابلیت‌های ملی مکانی محسوب می شود. SDI مجموعه‌ای از سیاست‌ها، ترتیبات نهادی، فناوری‌ها، داده‌ها و افراد را گرد هم می‌آورد تا اشتراک‌گذاری و استفاده مؤثر از اطلاعات مکانی را ممکن سازد. در اکوسیستم آینده، SDIها نقش خود را به عنوان منبع معتبر و قابل اعتماد داده‌های بنیادین حفظ می‌کنند، اما دیگر نقطه پایان نیستند. آن‌ها تبدیل به لایه زیرین و ضروری برای سامانه‌های پیشرفته‌تر می‌شوند. این تحول به معنای کنار گذاشتن SDI نیست، بلکه بیانگر تکامل نقش آن از یک زیرساخت داده‌محور به لایه بنیادین اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده است که بستر تعامل با سامانه‌های هوشمند، SoS و ژئوورس را فراهم می‌کند.
- **زیرساخت دانش مکانی (GKI)** با هدف عبور از رویکرد داده‌محور SDI و حرکت به سوی تولید، یکپارچه‌سازی، استنتاج و اشتراک دانش مکانی شکل گرفت. در حالی که SDI به طور عمده بر مدیریت، استانداردسازی و اشتراک‌گذاری داده‌ها تمرکز دارد، GKI بر استخراج دانش از داده‌ها و ارائه پاسخ‌های زمینه‌مند و متناسب با نیاز کاربران تأکید می‌کند. از این منظر، GKI را می‌توان حلقه مفهومی واسط میان SDI و اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده دانست؛ زیرا زمینه را برای گذار از مدیریت داده به مدیریت دانش و تصمیم‌سازی هوشمند فراهم می‌کند. تحقق عملی اهداف GKI مستلزم همکاری سامانه‌های متعدد و مستقل است که این همکاری در قالب رویکرد سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) امکان‌پذیر می‌شود. تحقق GKI تنها به توسعه فناوری‌های نوینی مانند هوش‌مصنوعی یا اینترنت اشیا وابسته نیست، بلکه مستلزم گذار از تعامل‌پذیری فنی به تعامل‌پذیری معنایی است. در این رویکرد، فناوری‌هایی نظیر هستی‌شناسی‌ها[13]، گراف‌های دانش[14]، داده‌های پیوندی[15] و تعامل‌پذیری معنایی[16]، امکان می‌دهند داده‌های ناهمگون از منابع مختلف با حفظ معنای مشترک به یکدیگر مرتبط شوند و زمینه برای استنتاج، کشف دانش و تصمیم‌سازی هوشمند فراهم شود. بر این بستر، فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی می‌توانند دانش تولیدشده را تحلیل، تفسیر و در قالب خدمات هوشمند در اختیار کاربران قرار دهند.
- **سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS[17])** به مجموعه‌ای از سامانه‌های مستقل اما قابل همکاری گفته می‌شود که هر یک کارکرد خاص خود را دارند، اما در کنار هم به قابلیت‌های بیشتری دست می‌یابند. شهرهای هوشمند، سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، وسایل نقلیه خودران و داشبوردهایی که داده را از چندین پایگاه داده رسمی دریافت می‌کنند، نمونه‌هایی از رویکرد SoS هستند. این سامانه‌ها توسط انسان ساخته و اداره می‌شوند، اما شامل اتصالاتی به داده‌های تولیدشده توسط ماشین (مانند حسگرهای اینترنت اشیا) نیز هستند که در لبه[18] و در زمان واقعی پردازش می‌شوند. در بالاترین سطح، تعامل میان GKI، SDI و SoS در قالب ژئوورس تجلی می‌یابد؛ محیطی هوشمند که در آن داده، اطلاعات و دانش به‌صورت یکپارچه و با اتکا به فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم برای تصمیم‌گیری و ارائه خدمات به کار گرفته می‌شوند.
- **ژئوورس** (Geoverse) آرمان‌شهر اطلاعات مکانی است. به یک اکوسیستم اطلاعات مکانی به‌هم‌پیوسته سراسری اشاره دارد که امکان تعامل و تبادل خودکار داده، اطلاعات و دانش میان درگاه‌های SDI، سامانه‌ها، حسگرها، برنامه‌های

13. Ontologies
14. Knowledge Graphs
15. Linked Data
16. Semantic Interoperability
17. System-of-systems
18. Edge Computing

کاربردی، دستگاه‌ها و عامل‌های هوشمند را فراهم می‌آورد. این تعامل بر پایه تعامل‌پذیری معنایی، گراف‌های دانش، داده‌های پیوندی و سایر فناوری‌های نمایش و استنتاج دانش شکل می‌گیرد و با بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، پردازش زبان طبیعی، اینترنت اشیاء، هویت رقمی و بلاکچین[19]، به ارائه خدمات هوشمند و تصمیم‌یار منجر می‌شود [۷–۹].

لازم به توضیح است، GKI یک رویکرد مفهومی است که گذار از مدیریت و اشتراک‌گذاری داده به تولید و بهره‌برداری از دانش مکانی را تبیین می‌کند. در مقابل، SoS و Geoverse اجزای معماری و عملیاتی اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده هستند که نحوه تحقق این گذار را در عمل نشان می‌دهند. از این منظر، GKI را می‌توان پل مفهومی میان SDI و اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده دانست، در حالی که SoS و Geoverse اجزای اصلی این اکوسیستم را تشکیل می‌دهند.

مطابق شکل ۲، بزرگترین دایره، ژئوورس (فضای تعاملات هوشمند و خودکار مکانی)، در درون آن دایره SoS (سامانه‌های عملیاتی یکپارچه)، و در مرکز دایره SDI (منبع داده‌های بنیادین و معتبر) قرار دارد. این سه لایه مکمل یکدیگرند و گذار به ژئوورس تدریجی است. برخلاف متاورس[20] که بر جهان‌های مجازی سه‌بعدی برای تعاملات اجتماعی و بازی متمرکز است، ژئوورس فراتر رفته و شامل تجسم‌های چهاربعدی، تحلیل‌های پیش‌بینانه و دانش بی‌درنگ از بخش‌های گوناگون است. ژئوورس به متاورس خدمت می‌کند (با تأمین مدل‌های سه‌بعدی دقیق)، اما دامنه آن وسیع‌تر است و بر حل چالش‌های واقعی جهان (از تغییر اقلیم تا مدیریت بلایا) تمرکز دارد [۴].



شکل ۲: اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، همزیستی SDI، SoS و ژئوورس [۴]

۳- جایگاه اکوسیستم اطلاعات مکانی در اکوسیستم رقمی گسترده‌تر

اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده یک ساختار منزوی نیست. این اکوسیستم بخشی درون‌ساخته و وابسته به اکوسیستم رقمی گسترده‌تر است، و داده‌های مکانی را با حوزه‌هایی مانند حاکمیت داده، هوش مصنوعی، زیرساخت رقمی، اقتصاد رقمی و چارچوب‌های جهانی نوظهور ادغام می‌کند.

درک جایگاه اکوسیستم اطلاعات مکانی درون جهان رقمی، نیازمند نگاهی لایه‌ای به اجزای تشکیل‌دهنده این جهان است. کل فضای رقمی را می‌توان به چند لایه‌ی به‌هم‌پیوسته تقسیم کرد. در پایه‌ترین سطح، لایه‌ی زیرساخت فیزیکی قرار دارد که شامل کابل‌ها، دکل‌های مخابراتی، ماهواره‌ها و مراکز داده است. روی آن، لایه‌ی زیرساخت منطقی خودنمایی می‌کند که شامل پروتکل‌های اینترنت، استانداردهای تبادل داده و معماری شبکه می‌شود. بالاتر از آن، لایه‌ی داده جای گرفته که مخازن بزرگ داده، پایگاه‌های اطلاعاتی و دریاچه‌های داده را در بر می‌گیرد. سپس لایه‌ی خدمات قرار دارد که برنامه‌های کاربردی، پلتفرم‌ها و رابط‌های کاربری را شامل می‌شود. در نهایت و در بالاترین سطح، لایه‌ی انسانی قرار دارد که کاربران نهایی، سیاست‌گذاران، جوامع و شهروندان را در بر می‌گیرد. اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده درست در تقاطع لایه‌ی داده و لایه‌ی خدمات جای می‌گیرد، در حالی که با همه لایه‌های دیگر نیز در تعامل است (شکل۳). داده‌های مکانی، به عنوان داده‌های مرجع و بنیادین، به لایه‌ی داده تزریق می‌شوند و بستر مکان‌مندسازی و یکپارچه‌سازی سایر داده‌ها، از جمله داده‌های جمعیتی، اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، در لایه‌ی خدمات است که ارزش واقعی این داده‌ها آشکار می‌شود: نقشه‌های هوشمند، هشدارهای لحظه‌ای بلایا، سامانه‌های مسیریابی تطبیقی، و خدمات مبتنی بر مکان، همگی در این لایه ارائه می‌گردند. در همین لایه، فناوری‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و مدل‌های زبانی بزرگ با تحلیل، یکپارچه‌سازی و استنتاج از داده‌های مکانی، خدمات هوشمند و دانش‌محور را تولید می‌کنند. به این ترتیب، هوش مصنوعی نه به‌عنوان یک لایه مستقل، بلکه به‌عنوان یکی از فناوری‌های توانمندساز

19. Blockchain
20. Metaverse

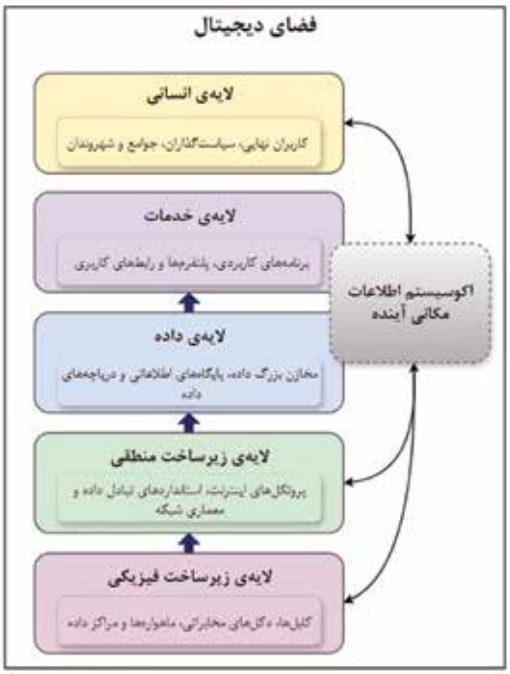
لایـه خدمـات، گـذار از داده بـه اطلاعـات و دانـش را تسـهیل می‌کنـد. ایـن جایگاه‌دهـی، اطلاعـات مکانـی را بـه سـتونی بنیادیـن از تحـول رقمـی تبدیـل می‌کنـد. وقتـی اطلاعـات مکانـی بـه درسـتی در لایه‌هـای زیرسـاخت رقمـی تعبیـه شـود، می‌توانـد ارزش عمومـی قابـل اندازه‌گیـری ارائـه دهـد، نـوآوری را در بخش‌هـای گوناگـون تقویـت کنـد، تـاب‌آوری جوامـع را در برابـر بحران‌هـا افزایـش دهـد، و دسـتیابی بـه اهـداف توسـعه پایـدار را تسـریع نمایـد [۱۰]. بـه عبـارت دیگـر، ادغـام تفکـر مکانـی در حاکمیـت رقمـی، بـه کشـورها امـکان می‌دهـد تـا سیسـتم‌های تصمیم‌گیـری فراگیرتـر، پاسـخگوتر و آماده‌تـر بـرای آینـده ایجـاد کننـد [۱۱].

۴- ارکان سه‌گانه تغییر

گـذار بـه اکوسیسـتم اطلاعـات مکانـی آینده یـک تغییـر فناورانه صـرف نیسـت. ایـن گـذار توسـط سـه رکـن بنیادیـن هدایـت می‌شـود کـه انگیزه‌هـای اصلـی تکامـل را تشـکیل می‌دهنـد.

۴-۱- هدف محوری

جهـان بـا بحران‌هایـی چـون تغییـرات اقلیمـی، بی‌ثباتـی سیاسـی و پیامدهـای همه‌گیـری مواجـه اسـت و تنهـا ۱۷ درصـد از اهـداف توسـعه پایـدار در مسـیر دسـتیابی قـرار دارنـد. حـل ایـن چالش‌هـای جهانـی، کـه هیـچ کشـور یـا بخشـی



شکل۳: جایگاه اکوسیستم اطلاعات مکانی در لایه‌های اکوسیستم رقمی

بـه تنهایـی قـادر بـه حـل آنهـا نیسـت، نیازمنـد یکپارچه‌سـازی اطلاعـات مکانـی از بسـیاری از کشـورها بـرای آشکارسـازی الگوهـا و بینش‌هـای نـو اسـت. اکوسیسـتم اطلاعـات مکانـی آینـده بایـد تصمیم‌گیرنـدگان را بـا بینش‌هـای یکپارچـه و مکان‌مبنـا بـرای تـاب‌آوری و توسـعه پایـدار توانمنـد سـازد [۸].

۴-۲- مردم محوری

انتظـارات جامعـه از دسترسـی سـاده بـه داده فراتـر رفتـه و امـروزه مـردم پاسـخ‌های شخصی‌سازی‌شـده، قابـل اعتمـاد و لحظـه‌ای می‌خواهنـد. زیرسـاخت‌های سـنتی SDI اگرچـه نقـش مهمـی در اشـتراک‌گذاری و دسترسـی بـه داده‌هـای مکانـی ایفـا کرده‌انـد، امـا تمرکـز آن‌هـا بـه طـور عمـده بـر مدیریـت و انتشـار داده بـوده اسـت و در پشـتیبانی از تولیـد، کشـف و بهره‌بـرداری گسـترده از دانـش بـا محدودیت‌هایـی مواجـه بوده‌انـد؛ محدودیتـی کـه در ادبیـات اخیـر، از جملـه انگیزه‌هـای اصلـی گـذار بـه زیرسـاخت دانـش مکانـی (GKI) و سـپس اکوسیسـتم اطلاعـات مکانـی بـه شـمار مـی‌رود [۴, ۸]. اکوسیسـتم اطلاعـات مکانـی آینـده بایـد بـا رویکـردی نویـن در حاکمیـت داده و مدیریـت دانـش، ایـن نابرابـری را اصـلاح کـرده و دسترسـی عادلانـه بـه دانـش را میسـر سـازد؛ امـری کـه مسـتلزم تغییـر بنیادیـن در تفکـر و توانمندسـازی افـراد و نهادهـا اسـت [۱۲].

در عمـل، ایـن رویکـرد می‌توانـد در قالـب خدماتـی ماننـد دسـتیارهای هوشـمند مکانـی، سـامانه‌های تصمیم‌یـار عمومـی، هشـدارهای مکان‌مبنـای بلادرنـگ، خدمـات شخصی‌سازی‌شـده شـهری، و سـامانه‌های راهبـری و مدیریـت بحـران مبتنـی بـر مـکان بـرای شـهروندان تجلـی یابـد. هـدف، تنهـا افزایـش دسترسـی بـه داده نیسـت، بلکـه ارائـه دانـش و بینـش مکانـی متناسـب بـا نیـاز هـر کاربـر، در زمـان و مـکان مناسـب اسـت.

۴-۳- مشارکت محوری

مشـارکت‌ها نقشـی حیاتـی در اکوسیسـتم اطلاعـات مکانـی آینـده دارنـد و تعامـل میان‌بخشـی و همـکاری فرامـرزی بـرای اقـدام مشـترک ضـروری اسـت. کاهـش شـکاف رقمـی مکانـی (میـان کشـورهای توسـعه‌یافته و در حـال توسـعه) یـک پیشـران کلیـدی تغییـر اسـت، چـرا کـه بـدون اقـدام هدفمنـد، پیشـرفت‌های فناورانـه شـکاف بیـن «داراهـا و نـداره» را عمیق‌تـر می‌نمایـد. اکوسیسـتم آینـده بایـد بـا اولویـت دادن

به کشورهای در حال توسعه، از فناوری‌های نوین برای اشتراک‌گذاری قابلیت‌ها، افزایش سواد رقمی و تقویت نوآوری بهره گیرد تا همه از مزایای آن بهره‌مند شوند.

مطابق شکل ۴، سه رکن هدف (حل چالش‌های جهانی)، مردم (دسترسی عادلانه به دانش) و مشارکت‌ها (همکاری رقمی و جبران شکاف) در مرکز اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده جای گرفته‌اند. این سه رکن، مسیر را به سوی اکوسیستمی فراگیر، تاب‌آور و دانش‌محور تعریف می‌کنند که در آن فناوری توانمندساز پیشرفت جمعی است، نه هدفی صرف [۴، ۸، ۱۳، ۱۴].



شکل ۴: ارکان سه‌گانه تغییر در اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده

۵- اهداف راهبردی و اصول راهنما

برای هدایت گذار از زیرساخت‌های سنتی داده به سوی اکوسیستمی پویا، دانش‌محور و فراگیر، پنج هدف راهبردی تعیین شده‌اند که مسیر تحول را روشن می‌سازند. این اهداف نه تنها چرایی تغییر را تبیین می‌کنند، بلکه جهت‌گیری اقدامات ملی و بین‌المللی را نیز مشخص می‌نمایند.

نخستین هدف، ترویج اطلاعات و دانش مکانی[۲۱] به عنوان کالای عمومی است [۸]. این بدان معناست که داده‌های مکانی و بینش‌های حاصل از آن، دیگر یک دارایی انحصاری یا تجاری صرف محسوب نمی‌شوند، بلکه زیرساختی ضروری برای جامعه هستند. همانند جاده‌ها و پل‌ها که حرکت کالاها را ممکن می‌سازند، داده‌های مکانی بنیادین، فرصت‌های اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست و ارائه خدمات عمومی را تسهیل می‌نمایند.

به رسمیت شناختن این ویژگی کالای عمومی، تعهد به دسترسی عادلانه و پایدار را برای همه کشورها و شهروندان به همراه دارد.

دومین هدف، تقویت همکاری و نوآوری رقمی است. هیچ نهاد یا کشوری به تنهایی نمی‌تواند از تمام پتانسیل اطلاعات مکانی بهره برد. بنابراین، ایجاد بسترهای اشتراکی برای هم‌آفرینی برنامه‌های کاربردی هوشمند میان دولت، بخش خصوصی، دانشگاه و جامعه مدنی ضروری می‌گردد. این بسترها باید به گونه‌ای طراحی شوند که ضمن حفظ امنیت و حریم خصوصی، امکان آزمایش ایده‌های نوآورانه و مقیاس‌پذیری راه‌حل‌های موفق را فراهم آورند. نوآوری در اینجا محدود به فناوری نیست، بلکه شامل مدل‌های جدید حاکمیت، تأمین مالی و مشارکت اجتماعی نیز می‌شود.

سومین هدف، پر کردن شکاف رقمی مکانی است. پیشرفت‌های شتابان فناوری، نابرابری میان کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه را عمیق‌تر کرده است. بسیاری از کشورهای کم‌درآمد، کشورهای جزیره‌ای کوچک و جوامع به حاشیه رانده شده، هنوز به داده‌های مکانی معتبر، ابزارهای تحلیلی پیشرفته و مهارت‌های لازم دسترسی ندارند. هدف راهبردی سوم تضمین می‌کند که گذار به اکوسیستم آینده، این شکاف را گسترش ندهد، بلکه با سرمایه‌گذاری هدفمند در زیرساخت، آموزش و انتقال دانش، شرایط مشارکت عادلانه را برای همه فراهم آورد. هیچ کشوری نباید از قافله دانش مکانی عقب بماند.

چهارمین هدف، تعبیه حاکمیت تطبیقی و پیش‌بینانه است. سرعت تغییرات فناوری و اجتماعی به حدی است که مدل‌های حاکمیتی سنتی و سلسله‌مراتبی، توانایی پاسخگویی را از دست داده‌اند. حاکمیت در اکوسیستم آینده باید تطبیقی باشد؛ یعنی بتواند خود را با فناوری‌های نوظهور، جریان‌های داده‌ای جدید و نیازهای متغیر جامعه هماهنگ سازد. همچنین باید پیش‌بینانه عمل کند؛ به جای واکنش به بحران‌ها، با استفاده از آینده‌نگری، برنامه‌ریزی سناریو و ارزیابی ریسک، خود را برای چالش‌های پیش‌رو آماده نماید. این هدف، نهادها را ملزم می‌کند که از حالت انفعالی خارج شده و به صورت فعالانه، مسیر تحول را هدایت کنند.

21. Geospatial Knowledge

پنجمین هدف، حفظ اعتماد، حقوق بشر و مسئولیت‌پذیری اخلاقی است. با گسترش استفاده از هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری خودکار مبتنی بر داده‌های مکانی، نگرانی‌های جدی درباره حریم خصوصی، سوگیری الگوریتمی، شفافیت و پاسخگویی پدید آمده است. هدف پنجم تأکید می‌کند که هر گونه تولید، اشتراک‌گذاری و استفاده از اطلاعات مکانی باید بر پایه احترام به حقوق بشر، شفافیت کامل و مسئولیت‌پذیری در قبال پیامدها باشد. حفاظت از داده‌های شخصی، جلوگیری از تبعیض الگوریتمی و تضمین حق اعتراض نسبت به تصمیمات خودکار، از الزامات اجتناب‌ناپذیر این هدف هستند. اعتماد عمومی، سرمایه‌ای گران‌بها است که بدون رعایت استانداردهای اخلاقی، به سرعت از دست خواهد رفت.

بدیهی است تحقق این اهداف مستلزم توسعه شاخص‌ها و ساز و کارهای پایش و ارزیابی متناسب در سطح ملی است. با این حال، اسناد سازمان ملل این اهداف را به‌عنوان جهت‌گیری‌های راهبردی برای هدایت تحول اکوسیستم اطلاعات مکانی ارائه می‌کنند و تدوین شاخص‌های عملیاتی را بر عهده کشورها و چارچوب‌های اجرایی ملی قرار می‌دهند.

در کنار اهداف راهبردی، ده اصل راهنما نیز به‌عنوان مبنای طراحی، توسعه و ارزیابی اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده مطرح شده‌اند. این اصول، چارچوب مشترکی را فراهم می‌کنند که تمامی سیاست‌ها، ابتکارات و اقدامات باید با آن همسو باشند تا اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، فراگیر، پایدار، دگرگون‌آفرین و متناسب با اهداف خود باقی بماند. در واقع، اگر اهداف راهبردی بیانگر آنچه باید محقق شود باشند، اصول راهنما چگونگی تحقق این اهداف را تبیین می‌کنند و مبنایی برای سنجش میزان همسویی اقدامات با چشم‌انداز اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده به شمار می‌روند.

این اصول عبارت‌اند از: دگرگون‌آفرینی (بهره‌گیری از نوآوری، فناوری‌های نوظهور و ظرفیت داده‌ها برای ایجاد تحول بنیادین و کاهش شکاف رقمی)، چابکی (توانایی انطباق مستمر با تحولات فناوری، نیازهای اجتماعی و نقش در حال تکامل اطلاعات مکانی)، قابلیت همکاری (تبادل و سازگاری یکپارچه داده‌ها، سامانه‌ها و خدمات میان سازمان‌ها و حوزه‌های مختلف)، پایداری (توسعه ظرفیت‌ها و زیرساخت‌هایی که استفاده کارآمد و بلندمدت از منابع را تضمین کنند)، خودکاری (استفاده از خودکارسازی برای افزایش کارایی، دقت و مقیاس‌پذیری مدیریت اطلاعات مکانی)، فراگیری (تضمین دسترسی عادلانه به داده‌ها، خدمات و دانش مکانی و مشارکت همه گروه‌های ذی‌نفع)، قابلیت اعتماد (تأمین داده‌ها، خدمات، فراداده، دانش و بینش‌های معتبر در بستری ایمن و قابل اتکا)، پایبندی اخلاقی و مبتنی بر حقوق (رعایت شفافیت، پاسخگویی، حقوق بشر و مسئولیت‌پذیری در تولید، اشتراک‌گذاری و استفاده از اطلاعات مکانی)، همکاری (تقویت مشارکت میان دولت، بخش خصوصی، دانشگاه‌ها، جامعه مدنی و سایر ذی‌نفعان)، و یکپارچگی (ایجاد پیوستگی میان سامانه‌ها، خدمات و اکوسیستم‌های مختلف برای خلق ارزش مشترک) [۸].

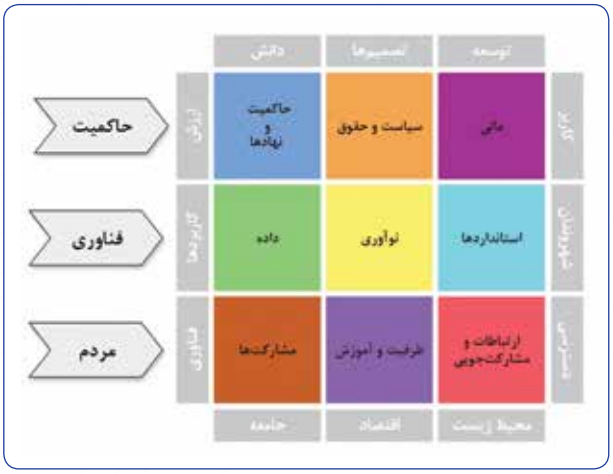
در مجموع، این اصول زیربنای ارزشی و اجرایی اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده را تشکیل می‌دهند و به کشورهای عضو امکان می‌دهند متناسب با شرایط و اولویت‌های ملی خود، مسیر گذار را طراحی کنند؛ در عین حال، پایبندی به این اصول، انسجام جهانی، اعتماد متقابل و تاب‌آوری اکوسیستم را در برابر تحولات آینده تضمین می‌کند.

۶- تحول در نُه مسیر راهبردی چارچوب یکپارچه اطلاعات مکانی سازمان ملل متحد (UN-IGIF)

چارچوب یکپارچه اطلاعات مکانی سازمان ملل متحد (UN-IGIF) همچنان راهنمای اصلی و اجرایی کشورها برای تقویت و مدرن‌سازی ترتیبات مدیریت اطلاعات مکانی باقی می‌ماند (شکل ۵). با این‌حال، تحول شتابان رقمی و ظهور اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، ضرورت گسترش این چارچوب را ایجاب می‌کند. در ادامه، برای هر یک از نه مسیر راهبردی، تغییرات جهش‌آفرین (تغییرات بنیادین در رویکردهای حکمرانی، فناوری، مدیریت داده و مشارکت ذی‌نفعان برای گذار از SDI سنتی به اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده) پیشنهادی ارائه می‌شود؛ تغییراتی که نه تنها مسیرهای فعلی را مقاوم‌سازی می‌کنند، بلکه زمینه‌ساز گذار به سوی اکوسیستمی پویا، دانش‌محور و فراگیر می‌گردند [۱۵].

نه مسیر راهبردی UN-IGIF نباید به‌عنوان مجموعه‌ای از اقدامات مستقل یا ترتیبی تلقی شوند، بلکه اجزای به‌هم‌پیوسته یک چارچوب یکپارچه هستند که میان

آن‌ها وابستگی و هم‌افزایی متقابل وجود دارد. پیشرفت در هر مسیر می‌تواند زمینه تحقق سایر مسیرها را نیز فراهم کند و برعکس، ضعف در هر یک از آن‌ها بر عملکرد کل اکوسیستم اثرگذار خواهد بود. از این‌رو، این مسیرها باید به‌صورت یک نظام منسجم و متناسب با شرایط، ظرفیت‌ها و اولویت‌های هر کشور به کار گرفته شوند، نه به‌عنوان یک نسخه واحد با ترتیب ثابت برای همه کشورها.



شکل ۵: چارچوب یکپارچه اطلاعات مکانی سازمان ملل متحد (UN-IGIF)

– مسیر راهبردی اول: حاکمیت و نهادها [۲۲]

مدل‌های حاکمیتی سنتی (متمرکز، سلسله‌مراتبی) پاسخگوی اکوسیستم هوشمند جهانی نیستند. حاکمیت آینده باید تطبیقی، پیش‌بینانه و فراگیر باشد. محورهای گذار شامل حرکت از ساختارهای ایستا به اکوسیستم‌های تطبیقی، از مأموریت‌های سیلویی به حاکمیت یکپارچه، و از دسترسی به داده به دسترسی عادلانه به دانش است. اقدام کلیدی در این راستا، استقرار سازوکارهای حکمرانی فرابخشی و چندذی‌نفعی برای سیاست‌گذاری، هماهنگی و راهبری اکوسیستم اطلاعات مکانی است. این سازوکارها باید زمینه مشارکت دولت، بخش خصوصی، دانشگاه‌ها و جامعه مدنی را فراهم نموده و با یکپارچه‌سازی تصمیم‌گیری‌ها، تحقق اهداف اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده را تسهیل نمایند.

– مسیر راهبردی دوم: سیاست و حقوق [۲۳]

ساختارهای سنتی حقوقی و سیاستی از فناوری‌های رقمی عقب‌مانده‌اند. در اکوسیستم آینده، سیاست‌ها باید فراتر از دسترسی به داده، به حاکمیت هوش مصنوعی و تولید دانش بپردازند. چارچوب‌های حقوقی باید مبتنی بر اصول، قابل اقدام توسط ماشین و پاسخگو باشند و از حقوق بشر محافظت کنند. استفاده از «جعبه‌های شنی نظارتی»، محیطی امن، موقت و کنترل شده که در آن کسب‌وکارها با تخفیف برخی الزامات قانونی، نوآوری خود را زیر نظر ناظر آزمایش می‌کنند؛ نتایج این آزمایش برای تدوین قوانین دائمی و متناسب استفاده می‌شود، گامی عملی در این مسیر است.

– مسیر راهبردی سوم: مالی [۲۴]

رویکردهای سنتی تأمین مالی برای اکوسیستم آینده کافی نیستند. معماری مالی جدید باید افزون بر داده و زیرساخت، از برنامه‌ها و حاکمیت نیز پشتیبانی کند. مدل‌های نوظهور شامل تأمین مالی ترکیبی، سیستم‌های تشویقی مبتنی بر توکن و قیمت‌گذاری شفاف هستند. تدوین «راهبرد ملی سرمایه‌گذاری مکانی» با هدف شناسایی منابع مالی موجود، تعیین اولویت‌های سرمایه‌گذاری در سه حوزه (داده، نوآوری، حاکمیت) و ایجاد سازوکارهای شفاف برای تخصیص و ارزیابی، نقطه شروعی مؤثر در این مسیر است.

– مسیر راهبردی چهارم: داده [۲۵]

در اکوسیستم آینده، داده باید زنده، ماشین‌خوان، دارای حاکمیت اخلاقی و غنی از فراداده و هستی‌شناسی باشد. اصول FAIR (قابل یافت، قابل دسترسی، قابل همکاری، قابل استفاده مجدد[۲۶]) و CARE (منفعت جمعی، اختیار کنترل، مسئولیت و اخلاق[۲۷]) در مدیریت داده رعایت شوند. هوش مصنوعی کیفیت داده را بهبود می‌بخشد. گذار از سیلوهای داده به گراف‌های دانش پیوندی، از تضمین کیفیت دستی به بهبود با هوش مصنوعی، و از توصیف فراداده به یکپارچه‌سازی معنایی، الزامات اصلی این مسیر هستند. راه‌اندازی «برنامه ملی غنی‌سازی و اعتماد داده» با هدف غنی‌سازی داده با فراداده و هستی‌شناسی، اعتبارسنجی خودکار با هوش مصنوعی، و نشر داده از طریق APIهای استاندارد، این تحول را عملیاتی می‌کند.

– مسیر راهبردی پنجم: نوآوری [۲۸]

نوآوری در اکوسیستم آینده باید ارزش اجتماعی ایجاد کرده و دانش را همگانی سازد. دولت‌ها باید مراکز نوآوری هوش

22. Governance and Institutions
23. Policy and Legal
24. Financial
25. Data
26. Findable, Accessible, Interoperable, Reusable
27. Collective Benefit, Authority to Control, Responsibility, Ethics
28. Innovation

مصنوعی مکانی ایجاد کنند، از جعبه‌های شنی نظارتی استفاده نمایند و چارچوب‌های تدارکاتی پاداش‌دهنده به طراحی مشترک را توسعه دهند. گذار از نوآوری صرفاً فنی به ارزش اجتماعی، از پروژه‌های آزمایشی به برنامه‌های پایدار، و از ابزارهای تخصصی به برنامه‌های کاربرمحور، جهت‌گیری اصلی است. ایجاد «صندوق نوآوری مکانی» که بودجه‌ای اختصاصی و رقابتی برای حمایت مالی از طرح‌های نوآورانه است که داده‌های خام مکانی را به خدمات دانش‌محور و کاربرپسند تبدیل می‌کن، اقدامی عملی در این مسیر است.

– مسیر راهبردی ششم: استانداردها [۲۹]

استانداردهای آینده باید فراتر از قالب‌های داده رفته و شامل مدل‌های معنایی، هستی‌شناسی، اعتبارسنجی الگوریتمی و ابرداده ماشین‌خوان باشند. این استانداردها باید قابلیت همکاری دانش، شفافیت الگوریتمی و طراحی مشارکتی را تضمین کنند. گذار از استانداردهای ایستا به پویا و کاربرمحور، از یکنواختی ساختاری به توانمندسازی معنایی، و از همکاری پایه به یکپارچگی دانش تأییدشده ضروری است. همکاری با نهادهایی مانند OGC و ISO/TC ۲۱۱ گام کلیدی است.

– مسیر راهبردی هفتم: مشارکت‌ها [۳۰]

مشارکت‌ها در اکوسیستم آینده، روابط بلندمدت و غیرمبادله‌ای هستند که مسئولیت‌ها را توزیع، ریسک و منافع را اشتراک و ارزش‌های مشترک را همسو می‌کنند. همکاری عمومی–خصوصی برای توسعه خدمات دانش بصری و کم‌هزینه حیاتی است. گذار از توافق‌های بخشی خاص به شبکه‌های نوآوری یکپارچه، از اشتراک داده به مشارکت‌های دانش، و از تعامل یک‌طرفه به طراحی مشارکتی، محورهای اصلی هستند. راه‌اندازی «پلتفرم مشارکت نوآوری مکانی ملی» که یک بستر آنلاین یا نهادی است که دولت، استارتاپ‌ها، دانشگاه‌ها و جامعه مدنی را دور هم جمع می‌کند تا برای توسعه راه‌حل‌های نوآورانه مکانی با یکدیگر همکاری کنند، این تحول را تسهیل می‌کند.

– مسیر راهبردی هشتم: ظرفیت و آموزش [۳۱]

گذار به اکوسیستم آینده مستلزم گسترش مهارت‌ها فراتر از دانش سنتی مکانی (کارتوگرافی، GIS، سنجش از دور) به حوزه‌های علم داده، هوش مصنوعی، بلاکچین و مهندسی دانش است. متخصصان باید توانایی کار با الگوریتم‌ها، ارزیابی خروجی‌های هوش مصنوعی و همکاری میان‌رشته‌ای را کسب کنند. همچنین توانمندسازی شهروندان در ارزیابی انتقادی دانش مکانی ضروری است. محورهای کلیدی گذار شامل حرکت از آموزش فنی به روانی دانش[۳۲]، از مهارت‌های جزیره‌ای به شایستگی‌های میان‌حوزه‌ای، و از دسترسی به ابزار به سواد بینش انتقادی است. توسعه برنامه‌های ملی آموزش مکانی با محوریت فناوری‌های نوظهور، گامی عملی در این مسیر است.

– مسیر راهبردی نهم: ارتباطات و مشارکت‌جویی [۳۳]

ارتباطات در اکوسیستم آینده، نقشی فراتر از آگاهی‌رسانی دارد و نحوه تعامل مردم با دانش مکانی را شکل می‌دهد. راهبردهای ارتباطی باید تعاملی، فراگیر و متناسب با همه کاربران باشند. گذار از ارتباط یک‌طرفه به گفتگو، از زبان فنی به روایت‌های ساده، و از گزارش‌های ایستا به بینش لحظه‌ای، محورهای اصلی هستند. تدوین «راهبرد ملی ارتباطات» با طراحی هویت بصری و داستان‌سرایی تعاملی، این تحول را عملیاتی می‌کند.

۷– نمونه کاربردی: اکوسیستم اطلاعات مکانی کشور کره‌جنوبی

کره‌جنوبی یکی از پیشرفته‌ترین زیست‌بوم‌های مکانی جهان است که معماری سکو–محور آن، مفاهیم کلیدی (SDI، SoS و ژئوورس) را به شکل عملیاتی پیاده کرده است. این مطالعه موردی نشان می‌دهد چگونه بازیگران دولتی و خصوصی پیرامون زیرساخت ملی داده‌های مکانی (NSDI) سازماندهی شده و از طریق لایه‌های خدمات و همکاری نهادی، به اقتصاد دانش مکانی دست یافته‌اند. شکل ۶ معماری زیست بوم مکانی کشور کره‌جنوبی را نمایش میدهد. در ادامه به ذکر جزئیات پرداخته می‌شود.

29. Standards
30. Partnerships
31. Capacity and Education
32. Knowledge Fluency
33. Communication and Engagement

در رأس حکمرانی، وزارت زمین، زیرساخت و حمل‌ونقل (MOLIT) به عنوان نهاد سیاست‌گذار عمل می‌کند. در سطح اجرایی، سازمان ملی اطلاعات جغرافیایی (NGII) مسئول تولید نقشه‌های پایه، تدوین استانداردها و مدیریت NSDI است و شرکت دولتی کاداستر و زمین (LX) اجرای پروژه‌های دوقلوی رقمی را بر عهده دارد. بخش خصوصی با غول‌های فناوری ناور[۳۴] و کاکائو[۳۵] داده‌های دولتی را به اپلیکیشن‌های نقشه و خدمات مکان‌محور تبدیل می‌کند و دانشگاه‌ها حلقه دانش و تربیت نیروی انسانی را تکمیل می‌کنند.

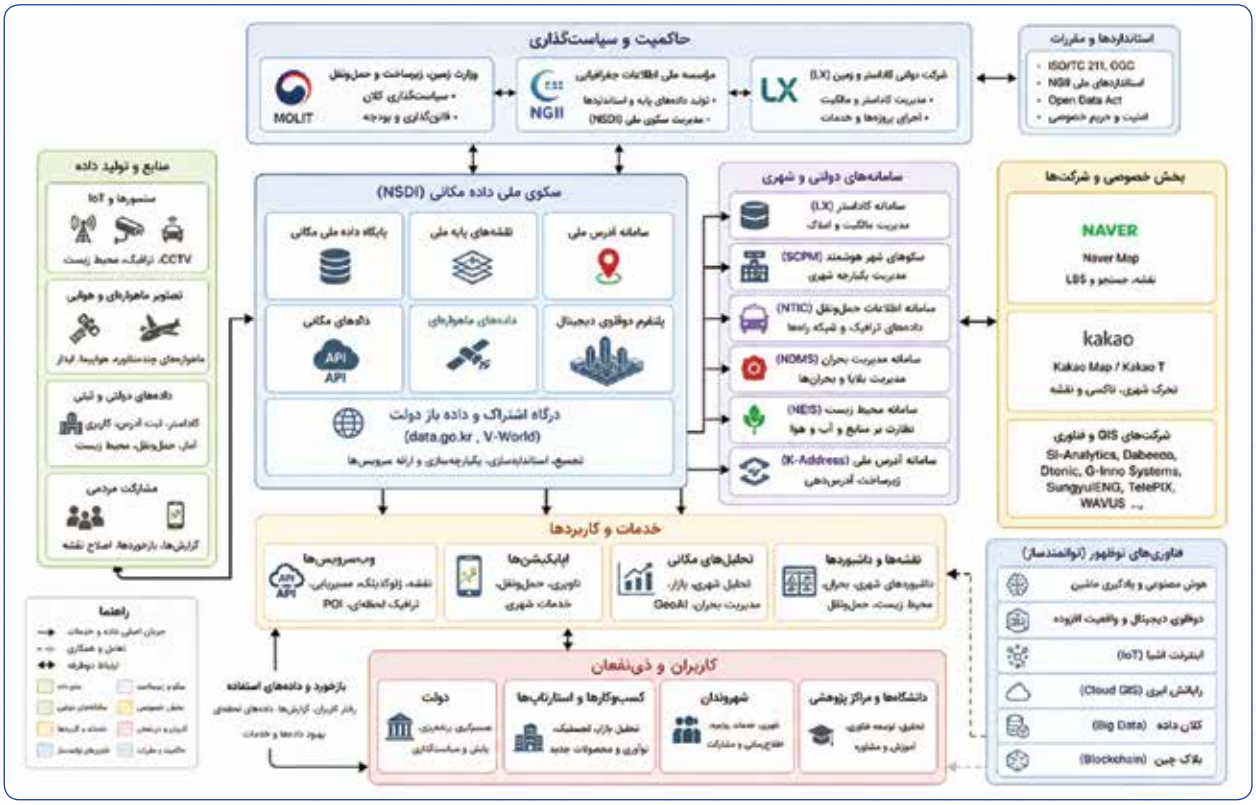
زیرساخت NSDI در کره فراتر از یک مخزن داده است و مؤلفه‌هایی چون پایگاه داده ملی مکانی، سامانه آدرس ملی، APIهای مکانی و پلتفرم دوقلوی رقمی را در بر می‌گیرد. درگاه ملی داده باز (data.go.kr[۳۶]) با ارائه انبوه دیتاست‌های مکانی، دسترسی همگانی و تجاری را تسهیل کرده است. در لایه SoS، پروژه دوقلوی رقمی سئول (S-Map) با یکپارچه‌سازی داده‌های سه‌بعدی چند ده هزار ساختمان، تأسیسات زیرزمینی و حسگرهای شهری، شبیه‌سازی توسعه شهری، مدیریت سیلاب و برنامه‌ریزی زیرساخت را ممکن ساخته است. شبکه اینترنت اشیا S-DoT داده‌های لحظه‌ای کیفیت هوا و تراکم جمعیت را جمع‌آوری می‌کند و هوش مصنوعی مکانی (GeoAI) در تشخیص تغییرات کاربری زمین و پیش‌بینی سیل به کار گرفته شده است. این فناوری‌ها نشانه‌های اولیه از شکل‌گیری لایه ژئوورس را نشان می‌دهند.

کره‌جنوبی رویکردی متوازن و در عین حال منحصربه‌فرد در مواجهه با قوانین داده‌های مکانی دارد. از یک سو، سیاست داده باز و دسترسی آزاد به APIهای دولتی، نوآوری بخش خصوصی را تشویق می‌کند. از سوی دیگر، به دلیل موقعیت ژئوپلیتیک خاص شبه‌جزیره و همسایگی با کره‌شمالی، محدودیت‌های امنیتی شدیدی بر صادرات داده‌های دقیق (نقشه‌های مقیاس ۱:۵۰۰۰) اعمال می‌شود و تنها در سال ۲۰۲۶ و به صورت مشروط کاهش یافته است. قوانین حریم خصوصی نیز از سخت‌گیرانه‌ترین قوانین در آسیا محسوب می‌شود و هر اپراتور سرویس‌های مبتنی بر مکان موظف به جلب رضایت صریح کاربر و رعایت الزامات ناشناس‌سازی است. چالش‌های کلیدی اکوسیستم کره‌جنوبی عبارتند از: سیلوهای داده سازمانی علی‌رغم یکپارچگی نسبی، کمبود شدید نیروی متخصص در حوزه‌های هوش مصنوعی مکانی و دوقلوی رقمی، نیاز روزافزون به داده‌های بلادرنگ[۳۷] با وجود محدودیت‌های هزینه‌ای و قانونی، و تنش میان حفاظت از امنیت ملی و رقابت‌پذیری جهانی که در موضوع صادرات داده‌های دقیق به خوبی نمایان است.

چشم‌انداز پنج‌ساله کره‌جنوبی در قالب سیاست ملی اطلاعات مکانی (۲۰۲۳–۲۰۲۷) تدوین شده و مسیر تحول را از GIS سنتی به هوش مصنوعی مکانی، سپس سامانه‌های مکانی خودمختار و در نهایت سکوی ملی رقمی ترسیم می‌کند. محورهای اصلی این نقشه راه عبارتند از: تکمیل و تجاری‌سازی سیستم هوش مکانی، توسعه دوقلوی رقمی ملی با هدف ایجاد یک مدل سه‌بعدی کامل از کشور (پلتفرم یکپارچه K-GeoP)، توسعه اقتصاد داده مکانی با تمرکز بر تجاری‌سازی APIها و افزایش نقش بخش خصوصی، یکپارچه‌سازی داده‌های سه‌بعدی و چهاربعدی، گسترش داده باز و اشتراک داده از طریق درگاه ملی، توسعه شهر هوشمند و ملت هوشمند (از جمله تجاری‌سازی خودروهای خودران سطح ۴ تا ۲۰۲۷)، توسعه زیرساخت ابری GIS به صورت Cloud-native، و هماهنگی با استانداردهای بین‌المللی.

در مجموع، تجربه کره‌جنوبی نشان می‌دهد که تحقق اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، صرفاً حاصل توسعه فناوری نیست، بلکه نتیجه هم‌افزایی میان حکمرانی، استانداردسازی، داده‌های مرجع، مشارکت بخش خصوصی، نوآوری و سرمایه‌گذاری مستمر در زیرساخت‌های رقمی است. این تجربه، چارچوب نظری مطرح‌شده در این مقاله را نیز تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که SDI به‌عنوان لایه بنیادین داده‌های معتبر، SoS به‌عنوان بستر یکپارچه‌سازی سامانه‌های مستقل و Geoverse به‌عنوان لایه هوشمند تولید دانش، در قالب یک اکوسیستم واحد و مکمل قابل مشاهده هستند. در عین حال، مطالعه موردی کره‌جنوبی نشان می‌دهد که حتی در یکی از پیشرفته‌ترین کشورهای جهان نیز چالش‌هایی مانند سیلوهای سازمانی، کمبود نیروی متخصص، الزامات حریم خصوصی، محدودیت‌های امنیت ملی و هزینه‌های توسعه زیرساخت‌های بلادرنگ همچنان پابرجا است. بنابراین، این تجربه نه به‌عنوان یک الگوی قابل نسخه‌برداری، بلکه به‌عنوان نمونه‌ای از نحوه تحقق تدریجی اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده و درس‌آموخته‌ای برای سایر کشورها قابل استفاده است.

34. Naver
35. Kakao
36. http://data.go.kr/
37. Real-Time



شکل ۶: جریان کاری زیست‌بوم مکانی، کشور کره جنوبی؛ ترسیم نویسندگان بر اساس [۵، ۹، ۱۶-۲۲].

۸-ایران در مسیر اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده

اکوسیستم اطلاعات مکانی ایران در گذار از زیرساخت سنتی داده (NSDI) به سوی لایه‌های پیشرفته‌تری چون سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS)، دوقلوی رقمی و ژئوورس قرار دارد. هرچند پایه‌های اولیه NSDI با موفقیت استقرار یافته، اما بسیاری از مؤلفه‌های یک اکوسیستم پیشرفته (دانش بر اساس تقاضا، اتصال خودکار ماشین‌ها، پلتفرم‌های هوشمند یکپارچه) هنوز در مراحل ابتدایی یا برنامه‌ریزی قرار دارند. بازیگران اصلی این عرصه در بخش دولتی شامل سازمان نقشه‌برداری به عنوان متولی حاکمیتی NSDI، بازیگران اصلی این عرصه در بخش دولتی شامل سازمان نقشه‌برداری کشور به‌عنوان متولی حاکمیتی زیرساخت ملی داده‌های مکانی (NSDI)، وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات به‌عنوان مسئول توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و دولت هوشمند، سازمان برنامه و بودجه به‌عنوان نهاد سیاست‌گذار و تأمین‌کننده منابع و هماهنگ‌کننده برنامه‌های توسعه، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح به‌عنوان متولی تولید و مدیریت داده‌های مکانی راهبردی و دفاعی، سازمان فضایی ایران به‌عنوان مسئول توسعه و بهره‌برداری از داده‌ها و خدمات سنجش از دور و فضایی، و دستگاه‌های اجرایی از جمله وزارت کشور، وزارت راه و شهرسازی، وزارت جهاد کشاورزی و سازمان ثبت اسناد و املاک کشور به‌عنوان تولیدکنندگان و بهره‌برداران اصلی داده‌های مکانی تخصصی هستند.

از سویی دیگر دانشگاه‌های تهران و صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و پژوهشگاه فضایی از طریق پژوهش، توسعه فناوری و تربیت نیروی انسانی متخصص، انجمن‌های تخصصی از طریق توسعه استانداردها، شبکه‌سازی و انتقال دانش، و شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه‌های GNSS، سنجش از دور و GIS از طریق توسعه محصولات، خدمات و نوآوری‌های فناورانه، نقش مؤثری در توسعه اکوسیستم اطلاعات مکانی ایفا می‌کنند.

وضعیت SDI به عنوان رکن بنیادین تأمین داده‌های مرجع معتبر و استاندارد در اکوسیستم اطلاعات مکانی ایران، حاکی از بلوغ نسبی این لایه است. مطابق آخرین گزارش سازمان نقشه‌برداری در نشست UN-GGIM،

این زیرساخت موفق شده است اتصال گسترده‌ای میان سازمان‌های ملی و استانی برقرار کند و بستری قابل اتکا برای اشتراک‌گذاری داده‌های مکانی فراهم آورد. به عبارت دیگر، ایران در لایه «داده» اکوسیستم اطلاعات مکانی به سطح قابل قبولی از بلوغ عملیاتی دست یافته و گام‌های اولیه برای حرکت به سمت لایه‌های بالاتر را آغاز کرده است. شواهد این گذار را می‌توان در برخی سامانه‌های میان‌سازمانی مشاهده کرد که با یکپارچه‌سازی داده‌ها و خدمات دستگاه‌های مختلف، ویژگی‌های اولیه سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) را به نمایش می‌گذارند. یکی از نمونه‌های شاخص در این زمینه، سامانه «پنجره واحد زمین» است که با تلفیق پردازش هوشمند تصاویر ماهواره‌ای با اطلاعات حقوقی، ثبتی و مکانی، پایش تغییرات کاربری اراضی را امکان‌پذیر ساخته است. با این حال، توسعه SoS در ایران همچنان در سطح پروژه‌های محدود و پایلوت قرار دارد و یکپارچگی ملی، خودکار و فراگیر آن هنوز محقق نشده است. ژئوورس نیز عمدتاً در مرحله پژوهش و نقشه راه قرار دارد. در این میان، برنامه رسمی سازمان نقشه‌برداری (۱۴۰۱– ۱۴۰۵)[۳۸]، که مسیر تحول از SDI تا دوقلوی رقمی کامل کشور را ترسیم کرده، مهم‌ترین سند راهبردی عملیاتی محسوب می‌شود. با این حال گذار اکوسیستم اطلاعات مکانی ایران به‌طور عمده با موانع غیرفنی مواجه است که عبارتند از فقدان مأموریت‌های ملی مصوب و همسو با چارچوب IGIF ، گسست دانش در سطوح تصمیم‌سازی کلیدی به‌ویژه در نهادهای بودجه‌ریز، و برتری کسری‌های نهادی، مالی و سرمایه انسانی بر قابلیت‌های فناورانه. برای تحقق اکوسیستم اطلاعات مکانی، ایران باید ضمن تصویب و ابلاغ سند ملی مأموریت‌های اطلاعات مکانی همسو با چارچوب IGIF، ارزش‌گذاری اقتصادی داده‌های مکانی را در فرآیند بودجه‌ریزی نهادینه کرده و سازوکارهای فرابخشی حکمرانی اطلاعات مکانی را با اتکا بر ظرفیت‌های قانونی موجود، از جمله شورای‌عالی‌نقشه‌برداری کشور، تقویت کند. همچنین استقرار سامانه پایش تطبیق‌پذیری اکوسیستم مبتنی بر شاخص‌های IGIF از دیگر الزامات کلیدی است.

۹- جمع‌بندی

اکوسیستم اطلاعات مکانی آینده، با تکیه بر مفهوم زیرساخت دانش مکانی (GKI)، بیانگر گذار از رویکرد داده‌محور به رویکردی دانش‌محور، هوشمند و مشارکتی در مدیریت اطلاعات مکانی است. نتایج این پژوهش نشان داد که تحقق این اکوسیستم نه از طریق جایگزینی زیرساخت‌های ملی داده‌های مکانی (SDI)، بلکه از طریق توسعه تدریجی آن‌ها در قالب یک معماری لایه‌ای شامل SDI به‌عنوان لایه داده‌های بنیادین، سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) به‌عنوان لایه تعامل و یکپارچه‌سازی، و ژئوورس (Geoverse) به‌عنوان لایه تولید و بهره‌برداری از دانش مکانی امکان‌پذیر است. در این چارچوب، GKI نقش زیرساخت دانشی و معماری یکپارچه را برای اتصال این لایه‌ها و تبدیل داده‌های مکانی به دانش قابل استفاده ایفا می‌کند و فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، از جمله هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، بلاکچین و پردازش زبان طبیعی، به‌عنوان فناوری‌های توانمندساز این گذار عمل می‌کنند.

بررسی نمونه کاربردی کره‌جنوبی نشان داد که تحقق این گذار نیازمند هم‌افزایی میان حکمرانی، زیرساخت، فناوری، داده و مشارکت فعال بخش خصوصی و دانشگاهی است. تجربه این کشور نشان می‌دهد که توسعه اکوسیستم اطلاعات مکانی صرفا به پیشرفت فناوری وابسته نیست، بلکه نتیجه تعامل مؤثر میان بازیگران مختلف، وجود سیاست‌های منسجم، داده‌های باز، نوآوری مستمر و سرمایه‌گذاری بلندمدت در زیرساخت‌های اطلاعات مکانی است.

تحلیل وضعیت ایران نیز بیانگر آن است که زیرساخت ملی داده‌های مکانی در لایه تأمین و اشتراک‌گذاری داده‌های مرجع به سطح قابل قبولی از بلوغ دست یافته است، اما گذار به لایه‌های بالاتر اکوسیستم، به‌ویژه سامانه‌ای از سامانه‌ها (SoS) و ژئوورس، همچنان با چالش‌های نهادی، حکمرانی، هماهنگی میان‌بخشی، تأمین مالی و سرمایه انسانی مواجه است. ازاین‌رو، تمرکز بر تقویت سازوکارهای حکمرانی، هم‌راستاسازی مأموریت‌های ملی با چارچوب یکپارچه اطلاعات مکانی سازمان ملل (UN-IGIF)، توسعه همکاری میان دستگاه‌ها و ایجاد بسترهای مناسب برای نوآوری، از الزامات این گذار به شمار می‌رود.

38. https://www.un.org/globalgeospatial/sites/default/files/2026-06/i-1.5_iran.pdf

در ایـــن راســـتا، تحقـــق اکوسیســـتم اطلاعـــات مکانـــی آینـــده مســـتلزم آینده‌نگـــری مســـتمر، تعمیـــق همـــکاری میـــان کشـــورهای عضـــو ســـازمان ملـــل، همسوســـازی بـــا دســـتورکارهای رقمـــی جهانـــی و دســـتورکار ۲۰۳۰، تقویـــت همکاری‌هـــای میان‌بخشـــی، توســـعه SDIهـــای ماشـــین‌خوان، بهره‌گیـــری از فناوری‌هایـــی نظیـــر توکن‌ســـازی و حاکمیـــت مشـــارکتی، ایجـــاد ســـکوهای اشـــتراک دانـــش بـــا حمایـــت ویـــژه از کشـــورهای در حـــال توســـعه و تعریـــف مـــوارد اســـتفاده اولویـــت‌دار اســـت.

در نهایـــت، اکوسیســـتم اطلاعـــات مکانـــی آینـــده را نبایـــد یـــک وضعیـــت نهایـــی یـــا یـــک ســـامانه ثابـــت تلقـــی کـــرد، بلکـــه بایـــد آن را چارچوبـــی پویـــا بـــرای تحـــول مســـتمر اطلاعـــات مکانـــی در بســـتر اکوسیســـتم رقمـــی جهانـــی دانســـت؛ چارچوبـــی کـــه می‌توانـــد بـــا ارتقـــای کیفیـــت تصمیم‌گیـــری، افزایـــش تـــاب‌آوری، حمایـــت از توســـعه پایـــدار و تقویـــت نـــوآوری، نقـــش مؤثـــری در مواجهـــه بـــا چالش‌هـــای پیچیـــده آینـــده ایفـــا کنـــد.

منابع

1. Chourasia, S.T., Ankit Pandey, SM Walia, RS Murtaza, Qasim, Sustainability of Industry 6.0 in Global Perspective: Benefits and Challenges: S. Chourasia et al. Mapan, 2022. 37(2): p. 443-452.
2. Future trends in geospatial information management: the five-to-ten-year vision. Third Edition (UN-GGIM / Ordnance Survey, 2020).
3. Global Geospatial Industry Outlook (Geospatial World), 2022.
4. Future Geospatial Information Ecosystem: From SDI to SoS and on to the Geoverse Making the Step Change Using the Integrated Geospatial Information Framework July 2022 Discussion Paper.
5. Ju, B. and K. Kelm, The Power of Effective Geospatial Information Management in South Korea: Development and Application. 2020: World Bank Group.
6. Strobl, J., Towards a sustainable geospatial ecosystem beyond SDIs. 2021.
7. Ball, M., The metaverse: and how it will revolutionize everything, 2022. Liveright Publishing.
8. Positioning the Future Geospatial Information Ecosystem, 2025
9. Yoo, Y. and S.-s. Kim, Strategic analysis for governance development of national spatial data infrastructure portal in Korea. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021. 10(10): p. 654.
10. Committee of Experts on Background document Global Geospatial Information Management, Contribution of the Committee to Rio+20 –United Nations Conference on Sustainable Development – and implications of the outcomes of Rio+20 , 2012.
11. The impact of Rapid Technology Change on Sustainable Development, 2019.
12. A Geospatial Knowledge Infrastructure to Enhance the World Economy, Society, and Environment, 2018.
13. Development of Contextual Understanding, Information, and Analytics Towards Determining the National Geospatial Information Ecosystem, 2022.
14. Nonaka, I.T., Hirotaka, The Knowledge Creating Company: Oxford University Press. New York, 1995. 995.
15. Integrated Geospatial Information Framework , A strategic guide to develop and strengthen national geospatial information management, 2020.
16. Korea National Spatial Data Infrastructure Portal.
17. National Geographic Information Institute (NGII), South Korea
18. South Korea's Export Restrictions on High-Precision Geospatial Data.
19. Digital Twin Traffic Control Platform; Seoul C-ITS (Cooperative-Intelligent Transport Systems).
20. Kim, K., S.W. Chang, and K.-m. Park, Integrating Geospatial Information: How the Republic of Korea Overcame Institutional Obstacles to Improve Data Management, 1998–2016. Global Delivery Initiative Case Study, World Bank, Washington, DC, January. globaldeliveryinitiative, 2020.
21. Lee, S., et al., Mapping nationwide 1 Km hourly human mobility (2022–2024) across South Korea using multi-source data. GIScience & Remote Sensing, 2026. 63(1): p. 2633052.
22. Lee, Y.-J., Unified Systems on Surveying and Geoinformation Management in Korea-New Conceptual Design of Korean NSDI Model. Journal of Cadastre & Land InformatiX, 2014. 44(1): p. 179-194.

استانداردسازی نام‌های جغرافیایی: چالش‌ها و راهکارها در بافت زبان‌ها و مناطق جغرافیایی مختلف (مورد مطالعه ایران)

راحله علیزاده، معاون مدیریت نقشه‌نگاری و اطلس‌های ملی، سازمان نقشه‌برداری کشور
ابوالفضل بلندیان، دبیر کمیته تخصصی نام‌نگاری و یکسان‌سازی نام‌های جغرافیایی ایران، سازمان نقشه‌برداری کشور

چکیده

استانداردسازی نام‌های جغرافیایی فرآیندی است که با هدف یکسان‌سازی و ثبت نظام‌مند نام مکان‌ها در سطح ملی و بین‌المللی انجام می‌شود. این فرآیند نقش اساسی در حوزه‌هایی مانند نقشه‌نگاری، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدیریت بحران، برنامه‌ریزی شهری و حتی روابط بین‌الملل ایفا می‌نماید. با این حال، استانداردسازی نام‌های جغرافیایی همواره با چالش‌های متعددی روبرو بوده است. تنوع زبانی، هویت‌های فرهنگی گوناگون، تحولات تاریخی و مسائل سیاسی، این فرآیند را به موضوعی پیچیده تبدیل کرده‌اند. این مقاله با بهره‌گیری از روش تحقیق توصیفی-تحلیلی و همچنین مطالعه تطبیقی تجربه ایران به عنوان کشوری با تنوع قومی، زبانی و تاریخی غنی، به بررسی جامع اهداف کلان، مزایای عملیاتی و موانع اصلی در مسیر استانداردسازی نام‌های جغرافیایی پرداخته است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که استانداردسازی اگرچه برای تسهیل ارتباطات جهانی و مدیریت یکپارچه داده‌ها ضروری است، ولی باید با ملاحظه حساسیت‌های فرهنگی و تاریخی جوامع مختلف انجام گردد. در نهایت، این مقاله اهمیت، چالش‌ها و مکانیسم‌های استانداردسازی نام‌های جغرافیایی را در بسترهای چندفرهنگی و چندزبانه مورد تحلیل قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: نام‌های جغرافیایی، استانداردسازی، بافت زبان، مکان

مقدمه

در عصر اطلاعات، داده‌های مکانی به یکی از ارزشمندترین دارایی‌های ملی تبدیل شده‌اند. نزدیک به ۸۰ درصد از تصمیم‌گیری‌های دولتی و خصوصی، به نوعی به موقعیت مکانی وابسته هستند. در چنین فضایی، ابهام در نام یک مکان نه تنها می‌تواند به خطاهای جبران‌ناپذیر (به عنوان مثال در امدادرسانی و اشتباه گرفتن دو روستا با نام‌های یکسان) منجر شود، بلکه می‌تواند هزینه‌های سنگینی بر بخش حمل‌ونقل، پست، گردشگری و حتی امنیت ملی تحمیل کند. از سوی دیگر نام‌های جغرافیایی تنها برچسبی برای مکان‌ها نیستند، بلکه بازتابی از تاریخ، فرهنگ، زبان و هویت یک ملت یا قوم به شمار می‌روند. ثبت صحیح این نام‌ها در نقشه‌ها، اطلس‌ها و اسناد جغرافیایی، علاوه بر ضرورت ملی، حافظ هویت تاریخی و فرهنگی است. هر نام، خواه نام یک کوه، رود یا شهر می‌تواند روایتی از اسطوره‌ها، باورها و تحولات تاریخی یک منطقه را در خود جای دهد.

سابقه‌ی فعالیت‌های بین‌المللی در زمینه استانداردسازی و یکسان‌سازی نام‌های جغرافیایی

سابقه‌ی فعالیت‌ها در زمینه نام‌نگاری و یکسان‌سازی نام‌های جغرافیایی در بعضی کشورها به بیش از صد سال می‌رسد. درجریان مذاکرات شورای اقتصادی اجتماعی سازمان ملل متحد در سال ۱۹۴۸، مسئله استانداردسازی نام‌های جغرافیایی مطرح شد. خواسته‌های مطرح‌شده در نخستین کنفرانس کارتوگرافی برای منطقه آسیا و اقیانوسیه در سال ۱۹۵۵، موجب تصویب قطعنامه ۷۱۵A(XXVII) شورای اقتصادی اجتماعی سازمان ملل متحد در بیست‌وسوم آوریل ۱۹۵۹ شد. در اجرای این قطعنامه، دبیرکل سازمان ملل از کشورها خواست تا نسبت به ایجاد سازمان یا مرکز ملی در زمینه استانداردسازی و هماهنگ‌سازی نام‌های جغرافیایی و نیز تهیه فرهنگ‌های جغرافیایی ملی، در اسرع وقت اقدام کنند.

بعد از کنفرانس دوم در سال ۱۹۷۲، ساختاری موسوم به گروه متخصصان نام‌های جغرافیایی ملل متحد (UNGEGN) United Nations Group of Experts on Geographical Names شکل‌گرفت تا برنامه‌های بین کنفرانس‌ها را اجرایی نماید. اکنون گروه متخصصان نام‌های جغرافیایی به‌عنوان یکی از هفت بازوی تخصصی شورای اقتصادی اجتماعی سازمان ملل محسوب می‌شود. کنفرانس نام‌های جغرافیایی هر پنج سال یک‌بار در یکی از کشورهای عضو سازمان ملل تشکیل‌می‌گردد و اجلاس گروه متخصصان نیز هر دو سال یک‌بار برگزارمی‌شود. گروه متخصصان به‌عنوان نهادی مشاوره‌ای عمل می‌کند. تصمیمات این گروه در قالب پیشنهاد به کنفرانس استانداردسازی نام‌های جغرافیایی ملل متحد ارائه می‌شود و درصورت تصویب، به‌شکل قطعنامه به شورای اقتصادی اجتماعی سازمان ملل ارسال می‌گردد.

با گسترش فناوری و افزایش نیاز به تبادل اطلاعات در سطح جهانی، ضرورت ایجاد یک سیستم استاندارد و یکپارچه برای نام‌های جغرافیایی بیش از پیش احساس شد. استانداردسازی به معنای حذف تنوع فرهنگی یا زبانی نیست، بلکه هدف آن ایجاد یک مرجع معتبر برای استفاده در اسناد رسمی، نقشه‌های بین‌المللی و سیستم‌های ناوبری است. با این حال، استانداردسازی نام‌های جغرافیایی در مناطق چندزبانه با چالش‌هایی روبرو است؛ از جمله تنوع زبانی و تفاوت‌های تلفظی، مسائل سیاسی و تاریخی، تغییرات نام‌ها در طول زمان و بازنام‌گذاری‌های متعدد و همچنین فقدان سیستم نوشتاری یکسان.

■ اهمیت و مزایای استانداردسازی نام‌های جغرافیایی

استانداردسازی نام‌های جغرافیایی[1]، فرآیندی ضروری و بنیادین در دنیای امروز است که به یکسان‌سازی و تعریف دقیق نام مکان‌ها در سطح محلی، ملی و بین‌المللی می‌پردازد. این کار تنها به معنای یکسان‌نویسی اسم‌ها نیست، بلکه پایه‌ای برای مدیریت دقیق اطلاعات، برنامه‌ریزی توسعه، و تعامل کارآمد بین دولت‌ها، سازمان‌ها و مردم است.

چرا باید نام‌های جغرافیایی استاندارد شوند

- ✓ بسیاری از مکان‌ها بیش از یک نام دارند؛
- ✓ بسیاری از نام‌ها، حتی در نواحی محلی، تکرار می‌شوند؛
- ✓ نام‌ها ممکن است به اشکال مختلفی تلفظ یا نوشته شوند؛
- ✓ نام‌های محلی ممکن است با نام‌های رایج و شناخته‌شده بین‌المللی متفاوت باشند؛
- ✓ نام‌های جغرافیایی در برخی از زبان‌ها مانند عربی، فارسی، چینی، یونانی و روسی با حروف غیرلاتین نوشته می‌شوند، لذا به نظام‌های واحد لاتین‌نویسی نیاز دارند.

اهمیت این استانداردسازی را می‌توان در جلوگیری از سردرگمی، افزایش دقت در سیستم‌های ناوبری و نقشه‌برداری، تسهیل ارتباطات بین‌المللی، و حفظ میراث فرهنگی و تاریخی جستجو کرد. به این صورت که استانداردسازی نام‌های جغرافیایی با ایجاد یک نظام یکپارچه برای نام مکان‌ها، دقت نقشه‌برداری و ناوبری را از طریق رفع ابهام و هم‌نامی، یکسان‌سازی قالب داده‌ها، بهبود تشخیص و تصحیح خطاهای ورودی و نیز تسهیل به‌روزرسانی و ردیابی تغییرات افزایش می‌دهد؛ در نتیجه، سیستم‌ها می‌توانند مکان‌ها را با خطای بسیار کمتر و اطمینان بیشتر شناسایی نمایند. بدون استانداردهای واحد، نام یک مکان ممکن است به چندین شکل تلفظ یا نوشته شود که این امر به اشتباهات گسترده در زمینه‌هایی مانند حمل‌ونقل، مدیریت بحران، تحقیقات علمی و حتی امور روزمره منجر خواهد شد.استانداردسازی نام‌های جغرافیایی مزایای متعددی دارد که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- **تسهیل ارتباطات بین‌المللی:** با یکسان‌سازی نام‌ها، امکان سردرگمی در مکاتبات، سفرها و تبادلات علمی کاهش می‌یابد.
- **پشتیبانی از سیستم‌های فناوری اطلاعات:** GIS، ناوبری ماهواره‌ای و پایگاه‌های داده به نام‌های استانداردشده وابسته هستند.
- **حفظ میراث فرهنگی:** بسیاری از نام‌های جغرافیایی ریشه در تاریخ و زبان بومی دارند و استانداردسازی به ثبت و ماندگاری آن‌ها کمک می‌کند.

1. Standardization of Geographical Names

- **کاربردهای امنیتی و اضطراری:** در عملیات امداد و نجات، سیستم‌های نظامی و مدیریت بحران، استفاده از نام‌های یکسان و دقیق ضروری است.
- **یکپارچگی داده‌ها:** استانداردسازی امکان تبادل دقیق و بدون خطای اطلاعات جغرافیایی میان کشورها، سازمان‌ها و سامانه‌های مختلف را فراهم می‌کند.
- **بهبود کارایی عملیاتی:** این امر در حوزه‌هایی مانند حمل‌ونقل، خدمات پستی، مدیریت منابع طبیعی و پاسخ به حوادث غیرمترقبه، به افزایش دقت و سرعت می‌انجامد.
- **حفظ هویت تاریخی:** ثبت رسمی نام‌های بومی و تاریخی مانع از فراموشی آن‌ها در طول زمان می‌شود.

نتایج

استانداردسازی نام‌های جغرافیایی در ایران، با توجه به تنوع زبانی، قومی و فرهنگی بینظیر این سرزمین که ریشه در هزاران سال تمدن دارد، نه تنها یک ضرورت فنی و کارشناسی، بلکه یک فرصت تاریخی بی‌بدیل برای تقویت هویت ملی، استحکام‌بخشی به یکپارچگی سرزمینی، صیانت از میراث فرهنگی ناملموس و ارتقای جایگاه ایران در نظام بین‌المللی اطلاعات جغرافیایی محسوب می‌شود.

اهمیت این موضوع زمانی آشکارتر می‌شود که بدانیم نام‌های جغرافیایی، صرفاً برچسب‌هایی بر روی نقشه نیستند؛ بلکه روایتگر تاریخ، گویای هویت اقوام ساکن و نشانگر تعامل انسان با جغرافیای طبیعی هستند. هر نام، داستانی از کوچ، اسکان، باورها، زبان‌ها و حتی رخدادهای تاریخی را در دل خود جای داده است. بنابراین، هرگونه بی‌توجهی به استانداردسازی، می‌تواند به تحریف این روایت‌ها و فرسایش سرمایه‌های فرهنگی بینجامد.

بهترین و کارآمدترین راه‌حل برای استانداردسازی پایدار و همه‌گیر، ایجاد پایگاه داده ملی و یکپارچه نام‌های جغرافیایی (National Geographic Names Database) با مشخصات زیر است:

الف) قابلیت‌های فنی پایگاه داده:

- جستجوی چندزبانه: امکان جستجوی هر نام جغرافیایی به حداقل سه زبان فارسی، زبان‌های بومی/محلی و زبان بین‌المللی (انگلیسی) به‌عنوان زبان واسط.
- ارائه تلفظ صوتی (Audio Pronunciation): ثبت و پخش تلفظ صحیح هر نام توسط گویشوران بومی، به‌منظور جلوگیری از تلفظ‌های سلیقه‌ای و نادرست.
- آوانگاری استاندارد (Standard Transliteration): ارائه آوانگاری بر اساس استانداردهای بین‌المللی و منطبق با الگوی توصیه‌شده توسط گروه متخصصان نام‌های جغرافیایی سازمان ملل متحد (UNGEGN).
- ثبت دوگانه نام‌ها: ذخیره‌سازی همزمان هر نام به صورت فارسی رسمی (مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی) و زبان بومی/محلی.

ب) مستندات و معیارهای پشتیبان:

این پایگاه داده باید بر اساس اسناد بالادستی و با نگاهی بومی و ایران‌شناسانه، معیارهای دقیقی را برای موارد زیر ارائه دهد:

۱. آوانگاری: معیارهای علمی برای نمایش دقیق آواهای زبان‌های ایرانی (مانند کردی، ترکی، عربی، گیلکی، مازندرانی).

۲. لاتین‌نویسی (Romanization): شیوه‌ای یکسان، علمی و مورد تأیید مراجع بین‌المللی برای نگارش نام‌های ایرانی به خط لاتین.

۳. رسم‌الخط فارسی: قواعد صرفی و نحوی و املایی برای نگارش یکدست نام‌ها به خط فارسی (جدا یا چسبیده نوشتن، استفاده از «ی» و «ه» و ...).

۴. معرفی زبان‌های رایج کشور: شناسنامه زبانی هر منطقه.

آوانگاری دقیق و علمی نام‌های جغرافیایی، به‌عنوان یکی از مهمترین ابزارهای استانداردسازی، سبب دستیابی به تلفظ یکسان و دقیق برای کلیه کاربران می‌شود. بکارگیری شیوه‌ی واحد آوانگاری نام‌های جغرافیایی در مراکز آموزشی و پژوهشی، دستگاه‌ها و نهادهای اجرایی مرتبط، مراکز تولید نقشه و نیز مؤسسات جغرافیایی ضرورتی است که می‌تواند از بروز تغییر و تحریف در نگارش و تلفظ نام‌ها جلوگیری کرده و موجبات حفظ نام‌های جغرافیایی به عنوان میراث فرهنگی و هویت جغرافیایی را فراهم سازد.

از سوی دیگر به دلیل نقش و کارکردهای متنوع اسامی اماکن و عوارض جغرافیایی به‌ویژه در جغرافیای سیاسی، اجرای موفق شیوه‌ی آوانگاری نام‌های جغرافیایی در کشور علاوه بر پیامدهای مثبت داخلی می‌تواند منافع کشورمان در عرصه بین‌الملل را نیز تضمین نماید. برای تحقق این هدف ملی، لازم است استفاده از یک شیوه واحد و ابلاغی آوانگاری و لاتین‌نویسی برای کلیه دستگاه‌های زیر الزامی شود:

- دستگاه‌های اجرایی و حاکمیتی: وزارت کشور، سازمان ثبت اسناد و املاک، سازمان نقشه‌برداری، وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی
- مراکز آموزشی و پژوهشی: دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌های علوم انسانی و جغرافیا، فرهنگستان زبان و ادب فارسی
- مؤسسات تولید نقشه و اطلاعات مکانی: سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، شهرداری‌ها، شرکت‌های خصوصی GIS

این الزام، از تحریف و تغییر تلفظ و نوشتار نام‌ها در گذر زمان و در فرآیندهای اداری و علمی جلوگیری کرده و به حفظ دائمی نام‌های جغرافیایی به‌عنوان بخشی از حافظه تاریخی و هویت فرهنگی و جغرافیایی کشور کمک شایانی می‌نماید.

مزایا و پیامدهای مثبت برای ذینفعان مختلف

اجرای این طرح، دستاوردهای گسترده‌ای برای گروه‌های مختلف زیر به همراه خواهد داشت:

- **گردشگران داخلی و خارجی:** دسترسی آسان به تلفظ صحیح نام‌ها، کاهش سردرگمی در سفر، افزایش حس اعتماد و آشنایی با فرهنگ بومی
- **پژوهشگران، جغرافیدانان و تاریخ‌نگاران:** دسترسی به داده‌های معتبر و مستند، امکان مطالعات تطبیقی، کاهش خطاهای پژوهشی
- **نهادهای دولتی و نظامی:** ایجاد یک مرجع واحد و معتبر برای صدور مجوزها، نقشه‌های رسمی و مکاتبات اداری، تسهیل در مدیریت بحران و امدادرسانی
- **رسانه‌ها و صداوسیما:** یکپارچگی در تلفظ نام‌ها در اخبار، برنامه‌ها و مستندها، افزایش اعتماد مخاطب
- **جامعه بین‌المللی و سازمان ملل:** ارتقای جایگاه علمی و فنی ایران، هماهنگی با استانداردهای جهانی UNGEGN، تسهیل در تبادل داده‌های جغرافیایی

در مجموع، استانداردسازی نام‌های جغرافیایی در ایران، فراتر از یک پروژه فنی، یک پروژه هویتی، فرهنگی و توسعه‌پایدار است. سرمایه‌گذاری بر روی ایجاد پایگاه داده یکپارچه، تدوین دستورالعمل‌های بومی و الزام دستگاه‌ها به تبعیت از آن، ایران را در زمره کشورهای پیشرو در حوزه ژئو انفورماتیک و مستندسازی میراث جغرافیایی قرار خواهد داد.
این اقدام، ضمن ارتقای حاکمیت ملی و تمامیت ارضی از طریق ثبت دقیق نام‌ها، زمینه‌های همکاری علمی با مراجع بین‌المللی را نیز هموار می‌سازد و نام ایران را در نقشه علمی جهان، ماندگارتر از پیش رقم میزند.

فرآیند استانداردسازی باید بر پایه چند اصل کلیدی پیش برود:

حفظ تنوع زبانی و فرهنگی

استانداردسازی نباید موجب حذف یا نادیده گرفتن نام‌های محلی شود. بلکه باید با ثبت و به رسمیت شناختن نام‌ها به زبان‌های مختلف از جمله فارسی، کردی، ترکی آذری، بلوچی، عربی و دیگر زبان‌های بومی، غنای فرهنگی ایران را حفظ کند.

ایجاد تعادل بین هویت محلی و ملی

یک سیستم استاندارد موفق باید همخوانی بین نام‌های محلی و تلفظ و نگارش رسمی آن‌ها در اسناد ملی ایجاد کند. آوانگاری با الفبای فونتیک یعنی الفبای آوایی بین‌المللی (IPA) هم تلفظ دقیق و صحیح را می‌رساند هم برای غیرفارسی زبان‌ها که به خط فارسی آشنا نیستند قابل درک است.

همکاری نهادهای دولتی و جوامع محلی

موفقیت این فرآیند مستلزم مشارکت سازمان‌های مربوطه مانند سازمان نقشه‌برداری کشور، سازمان میراث فرهنگی و همچنین نمایندگان جوامع محلی است. تشکیل کمیته‌های تخصصی متشکل از زبان‌شناسان، مورخان و ساکنان هر منطقه می‌تواند به دقت و مقبولیت عمومی استانداردسازی بیفزاید.

نتیجه‌گیری و بحث

استانداردسازی نام‌های جغرافیایی در ایران در حقیقت یک پروژه‌ی زیربنایی و استراتژیک است که فراتر از یک اقدام اداری، فنی یا نقشه‌برداری، نقش بی‌بدیلی در حفاظت از میراث فرهنگی، تقویت هویت ملی و یکپارچگی سرزمینی ایفا می‌کند. با توجه به تنوع زبانی و فرهنگی بی‌نظیر ایران، این فرآیند نه تنها به معنای یکسان‌سازی، بلکه به منزله‌ی ایجاد پلی میان گذشته و آینده، محلی و ملی، و سنت و مدرنیته است.

در این راستا، ایجاد یک پایگاه داده‌ی جامع، چندزبانه و پویا که دارای قابلیت‌های پیشرفته‌ای نظیر ارائه تلفظ صحیح، آوانگاری دقیق و ثبت همزمان نام‌ها به هر دو شکل رسمی(فارسی) و محلی (اورامی، کردی، ترکی، عربی، لری، گیلکی، مازندرانی، بلوچی، بهبهانی، تاتی، ترکمنی، بشکردی، لارستانی و...)، تنها راهکار ممکن برای نیل به این هدف متعالی است. چنین سیستمی، که می‌توان از آن تحت عنوان «سامانه‌ی ملی نام‌های جغرافیایی ایران یاد کرد، ضمن جلوگیری از تحریف و تغییر تلفظ و نوشتار نام‌ها، به عنوان یک مرجع معتبر برای گردشگران، پژوهشگران، نهادهای دولتی و بین‌المللی عمل کرده و از سردرگمی‌های ناشی از نام‌های چندگانه و نادرست جلوگیری می‌کند.

موفقیت و مقبولیت عمومی این طرح زیربنایی، منوط به رعایت و التزام عملی به سه اصل بنیادین است که تضمین‌کننده‌ی تعادل میان الزامات فنی و حساسیت‌های انسانی هستند:

اصل نخست، پاسداشت تنوع زبانی و فرهنگی از طریق به رسمیت شناختن و ثبت نام‌ها به همه‌ی زبان‌های رایج کشور. اصل دوم، ایجاد تعادل هوشمندانه بین هویت محلی و ملی با استفاده از خط فارسی به عنوان خط مشترک و اصل سوم، جلب مشارکت و همکاری همه‌جانبه‌ی نهادهای دولتی ذی‌ربط و جوامع محلی از طریق تشکیل کمیته‌های تخصصی متشکل از زبان‌شناسان، تاریخ‌دانان و نمایندگان مناطق.

برای ایران، این پروژه یک فرصت تاریخی است تا ضمن افزایش دقت و کارایی در مدیریت سرزمینی، غنای فرهنگی خود را به نمایش گذاشته و وحدت ملی را در پرتو احترام به کثرت قومی و زبانی تقویت کند. در نهایت، استانداردسازی موفق نام‌ها، میراثی ماندگار برای نسل‌های آینده خواهد بود که در آن دقت علمی، انسجام ملی و ثروت فرهنگی در هماهنگی کامل به چشم می‌خورد.



بررسی نقش فرونشست زمین در تحریک ثانویه زمین لرزه اردیبهشت ۱۴۰۴ در مرز استانهای تهران و البرز

حمیدرضا نانکلی، کارشناس اداره کل نقشه‌برداری زمینی و بنیادی سازمان نقشه‌برداری کشور

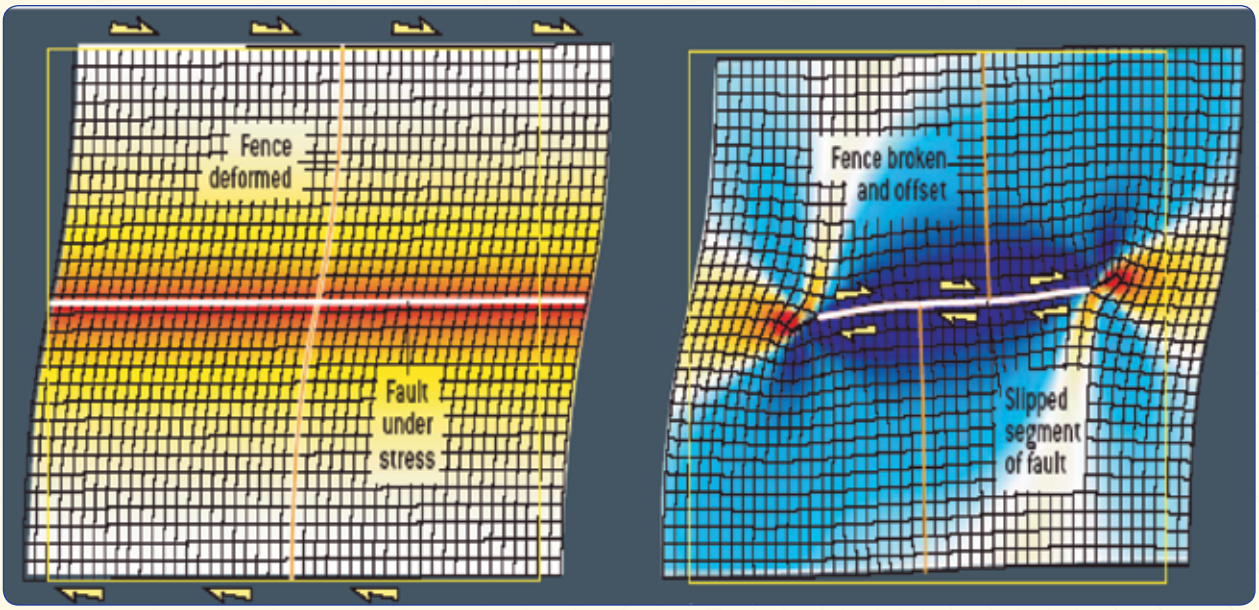
چکیده

زمین‌لرزه ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴ با بزرگی ۴ریشتر در محدوده ماهدشت و مرز استان‌های تهران و البرز رخ داد و به دلیل هم‌زمانی با پدیده فرونشست زمین در دشت‌های جنوب البرز، احتمال نقش فرونشست در تحریک این رخداد مطرح شد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، تحلیل تنش کولمب، اطلاعات ژئودتیکی شبکه‌های GNSS و داده‌های مربوط به نرخ فرونشست، ارتباط میان فرونشست و رخداد لرزه‌ای بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه برداشت آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین می‌تواند تغییرات تنش موضعی ایجاد کند، اما میزان تنش القا شده ناشی از فرونشست در محدوده‌ی مورد مطالعه بسیار کمتر از آستانه لازم برای تحریک مستقیم گسل بوده است. در مقابل، رژیم زمین‌ساختی فعال البرز مرکزی و انتقال تنش ناشی از رخدادهای پیشین مهمترین عوامل وقوع زمین‌لرزه محسوب می‌شوند.

کلمات کلیدی: فرونشست زمین، زمین‌لرزه، البرز مرکزی، انتقال تنش کولمب، گسل ماهدشت، GNSS

۱- مقدمه

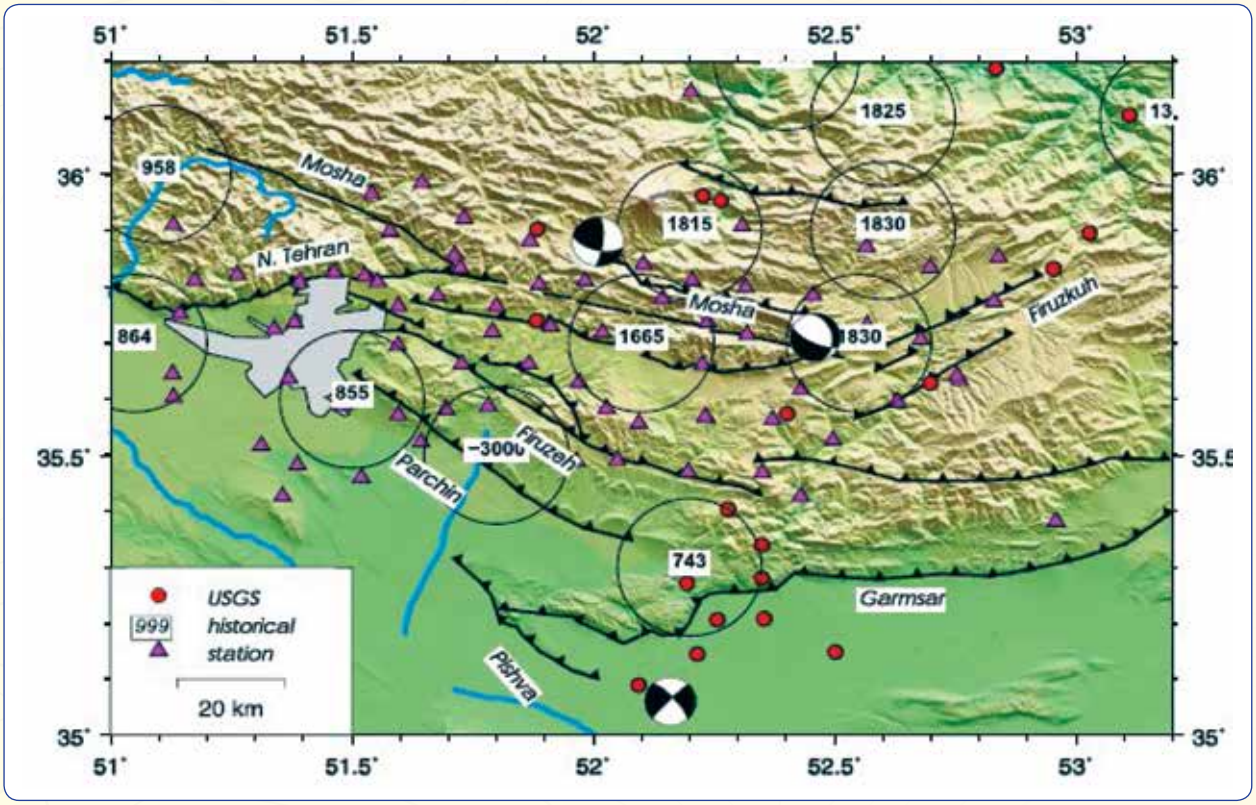
پدیده زمین‌لرزه یکی از مخاطرات طبیعی است که در اثر تنش انباشته شده بر روی گسل‌ها در مدت زمان طولانی و آزاد شدن این تنش در چند ثانیه روی می‌دهد. تنش برشی، افت تنش و نرخ لغزش از پارامترهای مهم در تحلیل خطرپذیری گسل‌ها و مدل‌سازی چرخه زلزله بر روی آن‌ها می‌باشد. همچنین تنش القا شده ناشی از زلزله بر روی گسل‌های دیگر با توجه به فیزیک زلزله و مکانیک گسل‌ها و براساس تنش کولمب صورت می‌گیرد (شکل۱).



شکل۱: وضعیت تنش بر روی گسل راستا لغز قبل زلزله (سمت چپ) و در حین زلزله (سمت راست)

۲-تکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه

از نقطه نظر لرزه‌زمین‌ساختی، کشور ایران بخشی از کمربند زلزله‌خیز آلپ-هیمالیا را تشکیل می‌دهد. وجود گسل‌های فراوان فعال در منطقه ایران و همچنین زلزله‌های تاریخی و معاصر گویای پتانسیل بالای تغییر شکل در این منطقه می‌باشد. از بین ساختارهای تکتونیکی فعال در ایران رشته‌کوه‌های البرز که دربرگیرنده تعداد زیادی گسل فعال می‌باشد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. منطقه البرز مرکزی لرزه‌خیز بوده و در طی دو هزار سال گذشته بیش از ۲۰ زمین‌لرزه با بزرگی ۶/۵ (درمقیاس امواج) سطحی در این منطقه به وقوع پیوسته است. از دیدگاه زمین‌ساخت، البرز مرکزی توان ایجاد زمین‌لرزه‌های بزرگ را دارد و گسل‌های توانمندی در البرز مرکزی قرار دارند (شکل۲) که بارزترین چشمه‌ی خطر برای شهر تهران گسل مشاء-فشم و گسل شمال تهران می‌باشد. آخرین زلزله بزرگ تهران در ۲۷ مارس ۱۸۳۰ میلادی (حدود ۱۹۰ سال پیش) با بزرگی بیش از هفت ریشتر به وقوع پیوست. در مورد ابعاد تخریب این زلزله منابع چنین گزارش کرده‌اند: مناطق شمیرانات و دماوند تقریباً به‌طور کامل ویران شد و حدود ۷۰ روستا در شرق جاجرود از بین رفتند.



شکل ۲: پهنه البرز مرکزی (تاتار و همکاران، ۱۳۸۵)

۳-رخداد اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۴

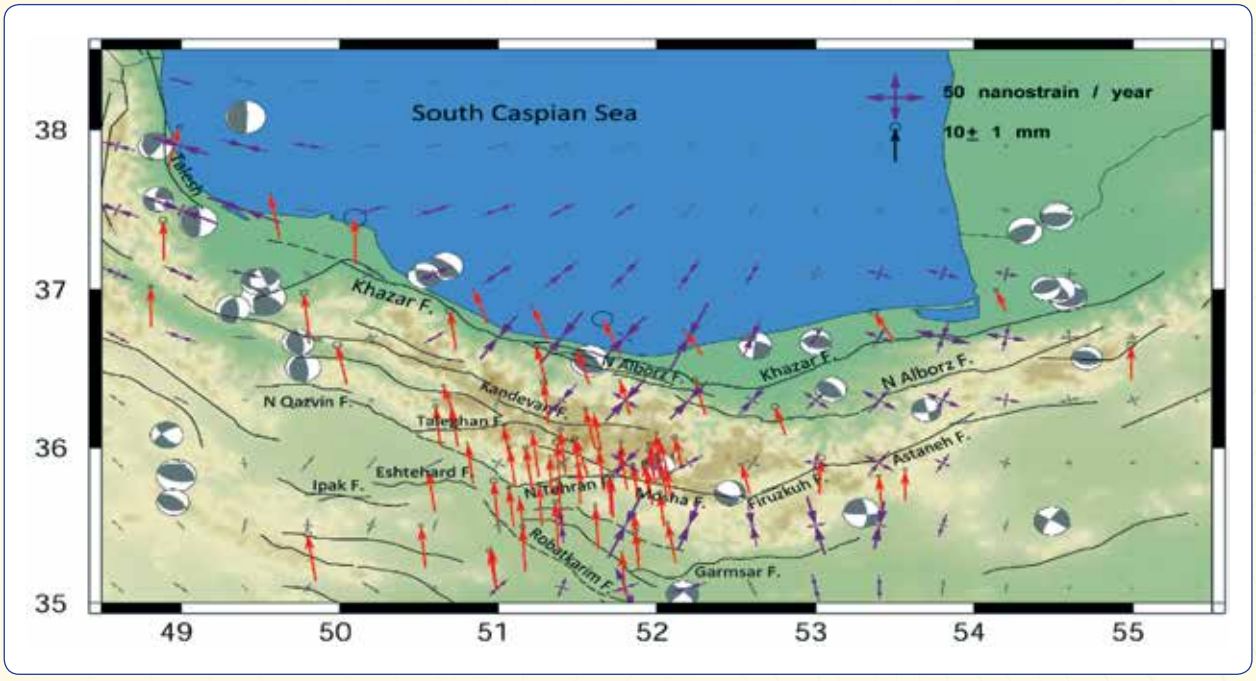
به گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشور در ساعت ۲۱ روز شنبه ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴، زمین‌لرزه‌ای با بزرگی چهار ریشتر منطقه ماهدشت در نزدیکی کرج را لرزاند. این رویداد در نزدیکی کانون زلزله ۲۹ آذر ۱۳۹۶ با بزرگی ۵/۲ ریشتر ملارد رخداده است. این زمین‌لرزه در پهنه‌ی گسلی اشتهارد – ماهدشت جنوب کرج و با فاصله از راندگی شمال تهران رخ داده است. راندگی یا گسل اشتهارد، گسلی است با راستای خم‌دار خاوری-باختری و طولی نزدیک به ۶۰ کیلومتر که در فاصله چهار کیلومتری شمال اشتهارد در جنوب استان البرز قرار دارد. گسل ماهدشت یکی از گسل‌های جنوب البرز مرکزی می‌باشد. طول این گسل به ۳۰ کیلومتر با راستای شرقی-غربی است. این گسل از عوامل خطرناک تهدیدکننده استان البرز و

جنوب‌غربی استان تهران است. همچنین مجاورت این گسل با گسل‌های ایپک و گسل اشتهارد و خطر تحریک آن گسل‌ها توسط گسل ماهدشت بر مخاطرات این گسل می‌افزاید (سلیمانی و حسینی، ۱۳۷۷). بنا بر گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشور طی ۱۹سال اخیر ۴۲۰ زمین‌لرزه با بزرگی ۲/۵ به بالا تا مرز ۵ ریشتر در این پهنه (تا شعاع ۱ درجه از کانون این زمین‌لرزه) رخ داده است. تاکنون ۳ پس‌لرزه در این منطقه به ثبت رسیده است.

۴- مدل حرکت منطقه البرز با استفاده از نتایج شبکه‌های GNSS موردی و دائمی سازمان نقشه‌برداری کشور

میدان سرعت و نرخ کرنش در شکل ۳ به ترتیب نحوه تغییر شکل در سراسر محدوده البرز را نشان می‌دهد. نمودار نرخ استرین نشان می‌دهد که تغییر شکل درون محدوده البرز به‌شدت در امتداد و در سراسر کمربند در حال تغییر کردن است. در بخش شرقی، تغییر شکل به‌صورت حرکت چپ‌گرد و کوتاه شدگی روی لبه جنوبی کمربند دیده می‌شود. در البرز مرکزی (از ۵۱ درجه شرقی تا ۵۲/۵ درجه شرقی) تغییر شکل به‌صورت مایل و فشارشی مشاهده می‌شود.

جهت فشارش اغلب عمود بر راستای کمربند در آن بخش است. نرخ استرین محاسبه‌شده نشان می‌دهد که در البرز مرکزی بخشی از همگرایی بین دو صفحه عربستان و اوراسیا از طریق کوتاه‌شدگی صورت گرفته توسط گسل‌های تراستی شمال البرز، خزر (۱/۸ میلی‌متر در سال)، پارچین و گرمسار جذب می‌گردد. درحالی‌که تغییر شکل به‌صورت امتداد-لغز چپ‌گرد درون محدوده کوهستانی در امتداد گسل‌های طالقان و مشا (با نرخ لغزش ۱/۵ و۱میلی‌متر) دیده می‌شود و این نشان می‌دهد که نوع تغییر شکل در البرز مرکزی تنها به‌صورت چین‌خورده و بالا آمده نیست. تعدادی از بخش‌های البرز (البرز غربی) میزان فشار خیلی کوچکی را نشان می‌دهد که بیانگر تغییر شکل در شمال البرز است. تعیین و بررسی تنسور نرخ استرین پوسته زمین، امکان توصیف فرآیندهای ژئودینامیکی مانند تجمع استرین گسل‌ها را که یک پارامتر مهم در ارزیابی خطر زمین‌لرزه محسوب می‌شود، فراهم می‌آورد. یکی از کاربردهای مهم شبکه ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک و GNSS، محاسبه نرخ استرین ژئودتیکی و برشی با استفاده از بردارهای سرعت می‌باشد.



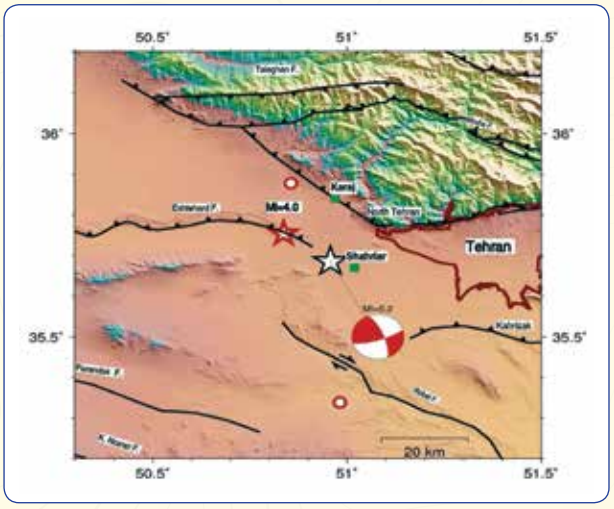
شکل۳: میدان سرعت و نرخ کرنش (استرین) در پهنه البرز (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹)

نتایج به‌دست‌آمده ازسری‌های زمانی و میدان سرعت و استرین شبکه ایستگاه‌های دائمی سازمان نقشه‌برداری کشور در منطقه حاکی از رژیم فشارشی غالب است به نحوی‌که در سمت غرب نرخ استرین کمتری را شاهد هستیم و با حرکت به سمت مرکز افزایش و در ادامه به سمت شرق کاهش پیدا می‌کند. نرخ کاهش این استرین با توجه به عمق زلزله‌ها و فاصله از زون گسلی ۱تا۲ نانو استرین در سال می‌باشد. تجزیه و تحلیل کرنش و تغییرات آن در طول زمان در یک منطقه فعال زمین‌ساختی می‌تواند ابزار قدرتمندی در پیش‌بینی مکان و بزرگی مورد انتظار زلزله‌های آینده باشد. مناطق با نرخ بالای استرین را می‌توان به‌عنوان مناطقی تفسیر کرد که در آن پوسته بالایی و پایینی در حال خزش هستند و به‌طور متناوب بارگذاری زمین‌ساختی در آن اثر دارد. مناطق با نرخ کرنش بالا به‌طور متوسط تحت فعالیت لرزه‌ای بالا هستند، اما برای ارزیابی خطر چنین مناطقی باید توجه کرد که چرخه لرزه‌ای در چه مرحله‌ای است. نرخ استرین بالا در مناطق خاص ممکن است ناشی از زلزله باشد، لزوماً نه قبل از وقوع آن، بنابراین همبستگی بین لرزه‌خیزی و تغییر شکل محلی و نرخ استرین از میدان سرعت بین لرزه‌ای ایستگاه‌های GNSS، ممکن است شاخصی از وقوع رویداد لرزه‌ای آینده باشد. بالعکس نرخ استرین کمتر، نشان‌دهنده وجود گسل‌های قفل‌شده و رخدادهای اصلی در آینده است.

۵- انتقال و برهم‌کنش تنش استاتیک

زمین‌لرزه‌ها می‌توانند با یکدیگر برهم‌کنش داشته باشند و این موضوع می‌تواند منجر به‌توالی زمین‌لرزه‌ها و رخداد پس‌لرزه‌ها گردد. برانگیختگی تنش بدین‌صورت است که گسل‌ها به تنشی که از گسل‌ها یا زمین‌لرزه‌های مجاور دریافت می‌کنند پاسخ می‌دهند.

این تغییر تنش روی سطوح گیرنده اطراف گسیختگی دارای دو مؤلفه نرمال و برشی می‌شود. تنش انباشته شده بر روی یک گسل به‌عنوان کلید اصلی برای آغاز گسیختگی در نظر گرفته می‌شود و در هنگام وقوع زلزله به‌سادگی از بین نمی‌رود. تنش آزاد شده از یک گسل می‌تواند هرچند کم، اما تنش را روی گسل‌های مجاور و نزدیک افزایش یا کاهش دهد و بالقوه باعث ایجاد گسیختگی و زلزله یا تأخیر در زمان رخداد آن شود. برای این منظور، نرخ بلندمدت تنش تکتونیکی بر روی یک گسل فعال باید مشخص باشد. انتقال تنش مثبت (یعنی افزایش تنش) می‌تواند چرخه‌ی لرزه‌ای گسل را به‌طور موقت اصلاح کند و زلزله‌ی بعدی را با یک دوره‌ی زمانی T پیش ببرد و برعکس کاهش تنش باعث تأخیر در گسیختگی و زمان وقوع زلزله می‌شود (دوران آرامش). در سال ۱۳۹۶ زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۵٫۲ در فاصله ۱۵ کیلومتری از زمین‌لرزه اخیر در منطقه ماهدشت البرز روی‌داده است (شکل ۴)، که احتمالاً باعث چکانش زمین‌لرزه اردیبهشت‌ماه با تأخیر شده است.



شکل۴: نمایش دو زمین‌لرزه سال۱۳۹۶ با بزرگی۵٫۲ و سال ۱۴۰۴ با بزرگی ۴ در زون گسلی ماهدشت–اشتهارد–کرج (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، گزارش زمین‌لرزه ماهدشت)

۶- آیا وابستگی بین زمین‌لرزه‌ی اخیر و فرونشست منطقه وجود دارد؟

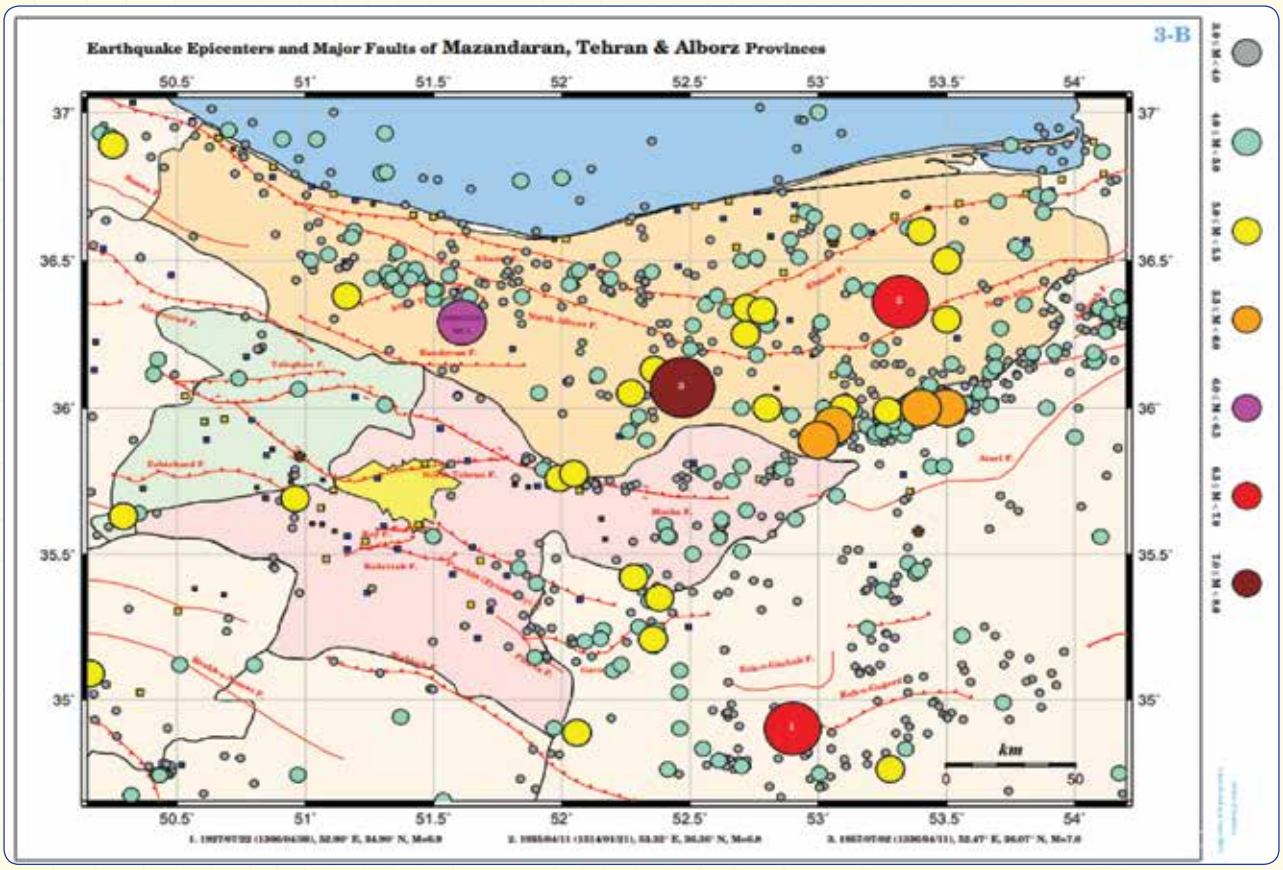
زمین‌لرزه‌های غیرطبیعی می‌توانند در اثر هرگونه اختلال قابل‌توجه با مداخله انسانی در رژیم هیدرولوژیکی ایجاد شوند. در مناطقی که گسل‌های بالقوه فعال در حال حاضر نزدیک به شکست هستند، افزایش فشار منافذ ناشی از تزریق سیال، یا به‌طور متناوب، استخراج انبوه سیال یا گاز، می‌تواند تنش و یا کرنش کافی را ایجاد کند که باگذشت زمان احتمال دارد منجر به یک زلزله شود. زمین‌لرزه‌های ناشی از تزریق معمولاً سبب کاهش مقاومت اصطکاکی در صفحات گسلی می‌شود. به‌نظر می‌رسد زمین‌لرزه‌هایی مرتبط با فرونشست،

تخلیه پوسته و تغییرات متخلخل الاستیک در پاسخ به کرنش‌های اعمال‌شده ناشی از برداشت انبوه مواد زیرسطحی رخ می‌دهند.

فرونشست زمین در ایران از بحران‌های زیست‌محیطی مهم چند سال اخیر است که مهم‌ترین علت آن در حال حاضر بحران آب می‌باشد. ایران جزو کشورهایی با بیشترین فرونشست زمین است. درحال حاضر ۳۰۰ دشت ایران دچار این بحران هستند؛ در برخی از دشت‌های ایران شرایط از فرونشست عبور کرده و زمین در معرض مرحله بحرانی ایجاد فرو چاله‌ها قرارگرفته است. از مناطق در شرایط بحرانی می‌توان به دشت کاشمر، دشت کبودرآهنگ همدان، دشت ورامین، دشت نظرآباد، دشت تهران، دشت مشهد و نیشابور، دشت‌های استان کرمان، اصفهان و قزوین اشاره کرد. بنابر گزارش سازمان نقشه‌برداری کشور محدوده تحت تأثیر پدیده فرونشست در البرز حدود ۷۰۰ کیلومترمربع است و بیشترین نرخ فرونشست سالانه قابل‌توجه به میزان ۲۹ سانتی‌متر در سال، مربوط به زمین‌های زراعی جنوب اتوبان کرج- قزوین در محدوده روستای حاجی‌آباد است. در محدوده نظرآباد، ماهدشت و اشتهارد نیز این نرخ به ترتیب به ۴ سانتی‌متر در سال نزدیک شده است. آمار چاه‌های آب موجود و مشخصات سفره آبخوان و ژرفای سطح آب زیرزمینی، نشانگر میزان برداشت سالانه و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بین ۸۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر است.

استخراج سیالات در عمق زیاد، فشار منفذی را تغییر می‌دهد و میدان تنش محلی را در امتداد گسل‌های لرزه‌ای تغییر داده و باعث افزایش فعالیت لرزه‌ای شده که به‌صورت ازدحام لرزه‌ای ثبت می‌شود. ازدحام زلزله دنباله‌ای از رویدادهای لرزه‌ای است که در یک منطقه محلی در مدت‌زمان نسبتاً کوتاهی رخ می‌دهد که می‌تواند از روزها تا ماه‌ها طول بکشد. برخلاف زمین‌لرزه‌های معمولی، ازدحام‌ها بیشتر از زمین‌لرزه‌های کوچک تشکیل‌شده‌اند و یک لرزه اصلی قابل‌شناسایی ندارند. آن‌ها اغلب در مکان‌های یکسانی تکرار می‌شوند و می‌توانند توسط عوامل مختلفی ازجمله حرکت ماگما، آب یا خزش ثابت در امتداد گسل‌ها ایجاد شوند. بسیاری از زمین‌لرزه‌ها از الگوی غیر ازدحامی پیروی می‌کنند که به‌عنوان توالی لرزه اصلی، پس‌لرزه شناخته می‌شود. در ساده‌ترین شکل آن، این بدان معنی است که بزرگ‌ترین زمین‌لرزه ابتدا در این توالی رخ می‌دهد و به دنبال آن، یک سری شوک‌های کوچک‌تر اتفاق افتاده که در یک دوره‌ی زمانی از هفته‌ها تا دهه‌ها از بین می‌روند. با این حال، همه توالی‌های زمین‌لرزه از این الگو پیروی نمی‌کنند. گاهی اوقات، بزرگ‌ترین رویداد ممکن است اولین رویداد در یک دنباله نباشد، در عوض ممکن است در وسط رخ دهد. گاهی اوقات دنباله‌ها می‌توانند زمین‌لرزه‌های زیادی با بزرگی مشابه بزرگ‌ترین زمین‌لرزه داشته باشند. گاهی اوقات توالی‌ها در طول زمان از بین نمی‌روند، بلکه ثابت می‌مانند یا حتی در طول روزها، هفته‌ها یا حتی ماه‌ها افزایش می‌یابند. سکانس‌هایی که با الگوی پس‌لرزه اصلی مطابقت ندارند معمولاً ازدحام در نظر گرفته می‌شوند. مطابق با کاتالوگ لرزه‌ای مرکز لرزه‌نگاری کشور و جستجوی زمین‌لرزه‌ها، در ۲۰ سال اخیر ازدحام لرزه‌ای در محل رخداده اخیر ثبت‌نشده است (شکل ۵). نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که، زلزله اخیر ماهیت تکتونیکی داشته و شامل زمین‌لرزه اصلی و سه پس‌لرزه بوده و سیگنالی از تغییرات تنش ناشی از فرونشست زمین که بتواند محرک یا افزاینده تنش تکتونیکی (شامل ۴ مگاپاسکال تنش قبل از رخداد و افت تنش ۰,۷ مگاپاسکال) برای چکانش یا تحریک گسل باشد مشاهده نشده است. تغییرات تنش مدلسازی‌شده ناشی از فرونشست با توجه به نرخ منطقه (۴سانتیمتر در سال) و افت سطح آب و هندسه گسل‌ها نسبت به عمق از سطح زمین تا ۱۰ کیلومتر ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۰۵ مگاپاسکال است که برای تحریک گسل و لغزش آن کافی نیست.





شکل۵: پراکندگی زمین‌لرزه‌های رخ‌داده در بازه ۲۰ ساله (مرکز لرزه‌نگاری کشور)

۷- بحث و نتیجه‌گیری

چشمه‌های لرزه‌زا[1] عارضه‌هایی هستند که زمین‌لرزه از آن‌ها نشات می‌گیرد و موج‌های صادرشده از آن‌ها در تمام جهات در درون زمین پخش می‌شود. گسل‌ها مهم‌ترین چشمه‌های لرزه‌زا هستند، اما زمین‌لرزه‌ها ممکن است در موارد نادر از فعالیت‌های آتش‌فشانی، ریزش سقف غارها و انفجارهای هسته‌ای نیز ایجاد شوند. حرکت‌هایی که به‌صورت دائم، کند و نامحسوس در بخش‌های بیرونی زمین روی می‌دهند، سبب ایجاد تنش در پوسته‌ی زمین می‌گردند. این تنش‌ها به‌تدریج انباشته شده و هنگامی‌که مقدار آن‌ها از حد مقاومت سنگ‌ها بیشتر شود، گسیختگی روی می‌دهد. به این ترتیب بخش بزرگی از تنش‌هایی که در طی زمان انباشته شده‌اند در زمانی بسیار کوتاه به‌طور ناگهانی رها می‌شود. این فرایند باز جهش‌کشسانی[2] خوانده می‌شود. آزاد شدن تنش مزبور با انتشار موج‌های لرزه‌ای (زمین‌لرزه) همراه است. بیشتر زمین‌لرزه‌های دنیا در ژرفای نسبتاً کمی از خارجی‌ترین بخش زمین سرچشمه می‌گیرند.

زمین‌لرزه پدیده زمین‌ساختی است که در قسمت شکننده پوسته رخ می‌دهد (۳۰ کیلومتر). بیشتر زمین‌لرزه‌های فلات ایران در قسمت پوسته بالایی رخ می‌دهند که دارای عمقی بین ۸ تا ۲۵ کیلومتر با فراوانی ۱۵ کیلومتر هستند. این قسمت بخشی از لایه شکننده پوسته است که دارای رفتار الاستیک با گرمای کم و فشار زیاد می‌باشد. فرونشست پدیده‌ای محلی است که در اثر استخراج مایعات تا عمق ۳۰۰ متری زمین رخ می‌دهد (چاه‌های استخراج نفت و گاز با توجه به شرایط زمین‌شناسی عمق بیشتری دارند). لازم به ذکر است که در مناطق فرورانشی، فرونشست با منشأ تکتونیک نیز وجود دارد. تغییرات تنش ناشی از فرونشست زمین می‌تواند به عمق‌های مختلفی بستگی داشته باشد، اما به طورکلی این تغییرات بیشتر در لایه‌های سطحی یا لایه‌های نزدیک به آن رخ می‌دهند. عواملی مانند نوع خاک و سنگ (خاک‌های نرم‌تر و متراکم‌تر معمولاً

1. Seismic Sources
2. Elastic Rebound

تغییرات بیشتری را در تنش تجربه می‌کنند و فرونشست در این لایه‌ها بیشتر محسوس است)، شدت فرونشست (در مناطق با فرونشست شدید، تغییرات تنش می‌توانند به عمق‌های بیشتری نفوذ کنند. در این حالت، لایه‌های زیرین ممکن است تحت تأثیر قرار گیرند و تغییراتی در ساختار تنش در مناطق با عمق زیاد نیز مشاهده شود) و ویژگی‌های جغرافیایی و هندسی (عواملی مانند شیب زمین، ساختار لایه‌های زیرین و نوع کاربرد زمین مانند استفاده‌های صنعتی یا شهری) می‌توانند بر عمق تأثیرگذار باشند. درنتیجه، عمده تغییرات تنشِ ناشی از فرونشست بیشتر در لایه‌های سطحی (معمولاً تا عمق ۱۰ تا ۱۰۰ متر) مشاهده می‌شود، اما در مواردی که فرونشست شدید باشد، ممکن است تغییرات تا اعماق بیشتری (بیش از ۱۰۰ متر) نیز دیده شود. در سال ۲۰۱۱ زمین‌لرزه‌ای بابزرگی ۵/۱ ریشتر در شهرLorca در جنوب شرقی اسپانیا رخ داد. زمین‌لرزه‌ای کم‌عمق و مخرب که خسارات زیادی به بار آورد. گونزالز و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که برداشت گسترده آب زیرزمینی در این منطقه، باعث کاهش وزن پوسته[3] و درنتیجه تغییرات تنش شده و گسل را به لغزش نزدیک‌تر کرده است. در طول سال‌ها، آب‌های زیرزمینی منطقه Lorca به شدت استخراج شده‌اند. این برداشت باعث کاهش فشار عمودی (تنش نرمال) در پوسته شده که در اصطلاح زمین‌شناسی به آن unloading می‌گویند. در این منطقه۲۵۰ متر در طی۵۰ سال سطح آب افت کرده است. زمین‌لرزه Lorca نه فقط نتیجه فرآیندهای طبیعی تکتونیکی، بلکه به‌شدت تحت تأثیر تغییرات تنش القا شده توسط انسان بوده است. این مقاله از اولین مستندات علمی است که نقش مستقیم فعالیت انسانی (برداشت آب) را در تغییر الگوی لغزش گسل و وقوع زلزله نشان می‌دهد. برای تشخیص این‌که یک زلزله خاص ناشی از تحریک فرونشست بوده است یا نه، باید چندین عامل و رویداد به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. ازجمله این عوامل می‌توان به موقعیت مکانی، عمق و شدت زلزله، تغییرات تنش ایجادشده در اثر فرونشست، تحلیل گسل‌ها، و مشاهدات میدانی اشاره کرد. به طورکلی، اگر شواهد کافی در دسترس باشد که نشان دهد تغییرات تنش ناشی از فرونشست موجب تحریک گسل‌ها شده است، می‌توان گفت که فرونشست در وقوع زلزله نقش داشته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که زلزله سال ۱۴۰۴ ماهدشت البرز ماهیت تکتونیکی داشته و تغییرات تنش مدلسازی شده ناشی از فرونشست با توجه به نرخ منطقه (۴سانتیمتر در سال)، افت سطح آب و هندسه گسل‌ها، نسبت به عمق۱۰کیلومتری از سطح زمین بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۰۵ مگاپاسکال است که برای تحریک گسل و لغزش آن کافی نیست.

منابع

۱. خرمی و همکاران، ۲۰۱۹، تحلیل میدان سرعت و نرخ کرنش در البرز مرکزی با استفاده از دادههای GNSS.

۲. سلیمانی و حسینی، ۱۳۷۷، بررسی گسل ماهدشت و مخاطرات لرزهای جنوب البرز. نشریه علوم زمین

۳. مرکز لرزهنگاری کشوری، ۱۴۰۴، گزارش زمینلرزه ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴ ماهدشت.

۴. سازمان نقشهبرداری کشور، ۱۴۰۳، گزارش پایش فرونشست زمین در استان البرز.

5. González et al., 2012, Nature Geoscience, The Lorca earthquake and groundwater unloading.

۶. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، گزارش زمین لرزه ماهدشت ۱۴۰۴

3. Crustal Unloading

بهبود پیش‌بینی خطر سیلاب با استفاده از بهینه‌سازی درخت تصمیم CART با الگوریتم ژنتیک و جستجوی شبکه‌ای
(مطالعه موردی: حوضه آبریز سردآبرود، ایران)

سجاد موسی‌خانی، گروه سنجش از دور دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران
محمد احمدلو، رئیس اداره راهبری پژوهش سازمان نقشه‌برداری کشور

چکیده

سیلاب به عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، سالانه خسارات جانی و مالی زیادی به جوامع انسانی وارد می‌سازد. تهیه نقشه‌های حساسیت به سیلاب، گامی کلیدی در مدیریت و کاهش اثرات این پدیده محسوب میشود. در میان مدل‌های مختلف داده‌کاوی، درخت تصمیم Classification and Regression Tree (CART) به دلیل تفسیرپذیری بالا مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان است. با این‌حال، عملکرد این مدل به دلیل وابستگی شدید به هایپرپارامترها، اغلب از دقت کافی برخوردار نیست. در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد مدل CART، از دو روش بهینه‌سازی فرابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک (GA) و جستجوی شبکه‌ای (GS) برای تنظیم دقیق هایپرپارامترهای آن استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز سردآبرود در استان مازندران است که با استفاده از ۱۱ عامل محیطی مؤثر در وقوع سیل و ۲۲۲ نقطه سیل‌خیز تاریخی، مدلسازی انجام شد. نتایج نشان داد که مدلهای ترکیبی CART-GS و CART-GA با مقادیر سطح زیر منحنی ROC (AUROC) معادل ۰/۹۲۷ و ۰/۹۰۸ در مرحله اعتبارسنجی، عملکرد بهتری نسبت به مدل CART با مقادیر پیشفرض (مساحت زیر منحنی ROC ۰/۸۸۴) دارند. مدل بهبود یافته علاوه بر حفظ تفسیرپذیری بالا، از دقت پیش‌بینی قابل قبولی برخوردار است و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: سیلاب، درخت تصمیم‌گیری، پهنه‌بندی، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

سیلاب یکی از پرتکرارترین و پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی در جهان است که اثرات مخربی بر زیرساخت‌ها، کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی دارد [۱]. در ایران نیز به دلیل اقلیم خشک تا نیمه‌خشک و توزیع زمانی-مکانی نامناسب بارش‌ها، وقوع سیلاب‌های مخرب در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است. پهنه‌بندی خطر سیلاب، به عنوان فرآیند شناسایی مناطق با پتانسیل سیل‌خیزی بالا، نقشی اساسی در برنامه‌ریزی‌های آمایش سرزمین، کاهش خسارات و مدیریت بحران ایفا می‌کند [۱].

روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر سیلاب وجود دارد که به سه دسته کلی روش‌های هیدرولوژیکی، کارشناس-مبنا و داده-مبنا تقسیم می‌شوند [۳]. در سال‌های اخیر، روش‌های داده-مبنا به ویژه مدل‌های یادگیری ماشین به دلیل دقت بالا و قابلیت کشف الگوهای پیچیده، به طور گسترده در این زمینه استفاده شده‌اند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی این مدل‌ها، عدم تفسیرپذیری آنها برای مدیران با دانش فنی کم است. در مقابل، مدل درخت تصمیم CART[1] به دلیل ساختار ساده و قوانین شفاف، از تفسیرپذیری بالایی برخوردار است [۴]. نقطه ضعف اصلی مدل CART، دقت پایین‌تر آن نسبت به مدل‌های پیچیده‌تر مانند شبکه‌های عصبی یا جنگل تصادفی است که تا حد زیادی به دلیل انتخاب نامناسب هایپرپارامترهای آن می‌باشد [۴].

در پژوهش حاضر، تلاش شده است تا با بهینه‌سازی هایپرپارامترهای مدل CART با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش جستجوی شبکه‌ای، ضمن حفظ مزیت تفسیرپذیری، دقت این مدل برای پیش‌بینی خطر سیلاب افزایش یابد.

1. Classification and Regression Tree (CART)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

حوضه آبریز سردآبرود با مساحتی حدود ۴۶۲ کیلومتر مربع در شمال غربی استان مازندران و جنوب غربی شهرستان چالوس واقع شده است. این حوضه بین طول‌های جغرافیایی '۵۱°۱۲ تا '۵۱°۱۵ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۳۶°۳۷ تا '۳۶°۴۰ شمالی قرار دارد. رودخانه سردآبرود از ارتفاعات البرز مرکزی سرچشمه گرفته و به دریای خزر می‌ریزد. این منطقه به دلیل تنوع توپوگرافی، کاربری اراضی و شرایط اقلیمی، پتانسیل بالایی برای وقوع سیلاب دارد.

۲-۲- داده‌ها و متغیرها

در این مطالعه، از دو دسته داده اصلی استفاده شد:

۱) نقشه نقاط سیل‌خیز: شامل ۲۲۲ نقطه که سیلاب در گذشته (بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰) در آن‌ها رخ داده است. این نقاط از طریق تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سازمان آب منطقه‌ای مازندران تهیه شدند.

۲) عوامل مؤثر در وقوع سیلاب: ۱۱ لایه اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح و پروفیل زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI[2])، نوع خاک، لایه زمین‌شناسی، فاصله از رودخانه، بارندگی و کاربری اراضی. برای استخراج فاکتورهای توپوگرافیک از مدل رقومی ارتفاعی ALOS-PALSAR با دقت ۱۲/۵ متر استفاده شد. نقشه‌های زمین‌شناسی و خاک از اداره منابع طبیعی و نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره لندست ۸ (OLI) تهیه گردید.

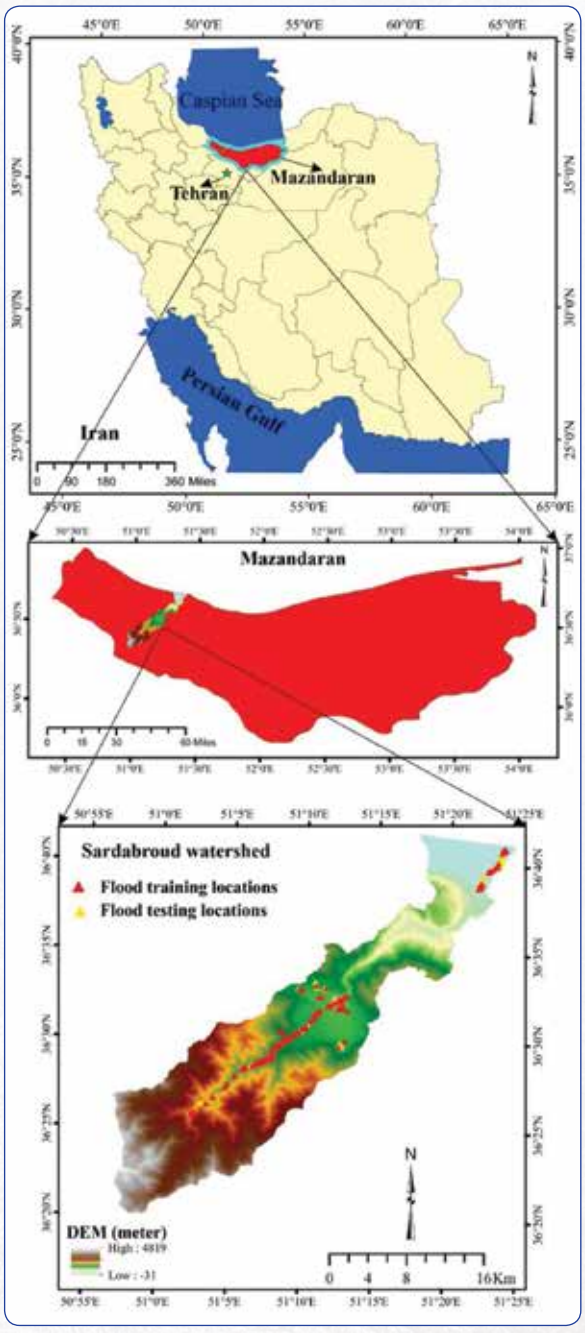
۲-۳- مدل درخت تصمیم CART

مدل CART یک الگوریتم درخت دودویی است که داده‌ها را بر اساس معیارهایی مانند شاخص جینی به طور بازگشتی تقسیم می‌کند [۲]. هایپرپارامترهای اصلی این مدل شامل max_depth (حداکثر عمق درخت)، min_samples_split (حداقل تعداد نمونه برای تقسیم یک گره)، min_samples_leaf (حداقل تعداد نمونه در یک گره برگ) و cp (پارامتر پیچیدگی برای هرس درخت) هستند [۲].

۲-۴- بهینه‌سازی هایپرپارامترهای درخت CART

برای تنظیم هایپرپارامترها، دو روش زیر به کار گرفته شد [۵]:

- **جستجوی شبکه‌ای (GS[3]):** در این روش، مجموعه‌ای از مقادیر مشخص برای هر هایپرپارامتر تعریف شده و تمامی ترکیب‌های ممکن به صورت جامع بررسی می‌شوند تا بهترین ترکیب بر اساس معیار خطا انتخاب شود.



شکل ۱: موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

2. Topographic Wetness Index (TWI)

3. Grid Search (GS)

• **الگوریتم ژنتیک** (GA[4]): یک الگوریتم تکاملی است که با ایجاد جمعیتی از کروموزوم‌ها (هر کروموزوم نشان‌دهنده یک مجموعه از هایپرپارامترها) و اعمال عملگرهای انتخاب، ترکیب و جهش در طول نسل‌ها، به سمت مقادیر بهینه همگرا می‌شود. در این مطالعه، تابع برازش (Fitness) بر اساس کمترین مقدار میانگین مربعات خطا (MSE) بر روی داده‌های آموزشی تعریف گردید.

۲-۵- ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از معیار مساحت زیر منحنی (AUROC[5]) استفاده شد. داده‌ها به دو بخش آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند.

۳- نتایج

مقادیر پیش‌فرض هایپرپارامترهای مدل CART در جدول ۱ ارائه شده است. این هایپرپارامترها با استفاده از روش‌های GA و GS تنظیم شدند. جدول ۲ مقادیر اولیه تخصیص داده شده به هایپرپارامترها را در روش GS نشان می‌دهد و جدول ۳ مقادیر بهینه حاصل شده برای آن‌ها توسط روش GS را ارائه می‌دهد. همگرایی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی هایپرپارامترها در شکل ۲ آورده شده است. بهترین مقادیر به دست آمده برای max_depth برابر با ۳ و برای min_samples_split برابر با ۵ در روش GS و مقدار ۴ در روش GA بود (جدول ۳ و جدول ۴). نتایج نشان داد که هر دو روش منجر به کاهش پیچیدگی درخت و جلوگیری از بیش‌برازش شدند. اشکال ۳ و ۴ درخت‌های تصمیم تنظیم شده با استفاده از دو روش CART-GA و CART-GS را به تصویر می‌کشد.

مقادیر MSE برای مدل پیشفرض CART در داده‌های آموزشی صفر و در داده‌های اعتبارسنجی ۰/۱۱ بود که نشان‌دهنده پدیده بیش‌برازش است. این در حالی است که مدل‌های CART-GS و CART-GA به ترتیب دارای مقادیر MSE معادل ۰/۰۸۴ و ۰/۰۹۲ در داده‌های اعتبارسنجی بودند که حاکی از تعمیم‌پذیری بهتر این مدل‌هاست. مدل CART-GS با مقدار AUROC برابر با ۰/۹۲۷ بهترین عملکرد را در مرحله اعتبارسنجی از خود نشان داد که نسبت به مدل پایه با مساحت زیر منحنی ۰/۸۸۴ بهبود قابل توجهی داشته است (شکل ۵). مدل CART-GA نیز با AUROC معادل ۰/۹۰۸ در رتبه بعدی قرار گرفت. عوامل شیب، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی به عنوان مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در وقوع سیلاب در منطقه شناسایی شدند. شکل ۶ نقشه‌های حساسیت به سیلاب بدست آمده حاصل از مدل‌های CART-GS و CART-GA را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر هایپرپارامترهای پیش فرض مدل CART

هایپرپارامترها	مقادیر پیش فرض
cp	0.0
max_depth	None
max_features	None
min_samples_leaf	1
min_samples_split	2
min_impurity_decrease	0.0
random_state	1

جدول ۲: مقادیر اولیه تخصیص داده شده به هایپرپارامترها در روش GS

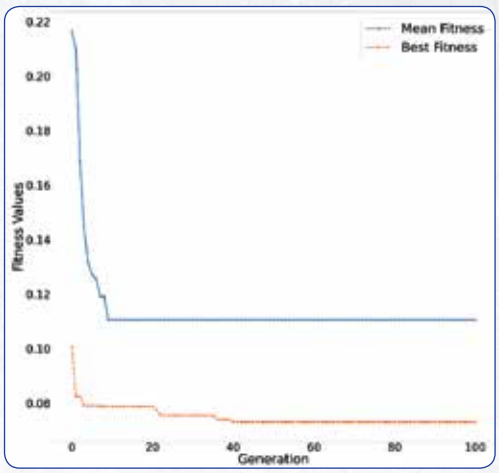
هایپرپارامترها	مقادیر
max_depth	[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
min_samples_split	[2,3,4,5,10,15,20,30]
min_samples_leaf	[1,5,10,15,20,30]
max_features	[‹auto›, ‹sqrt›, ‹log2›]
min_impurity_decrease	[0.0,0.1,0.2,0.3]
cp	[0.0,0.0001,0.001,0.01,0.1,0.2]
random_state	[1 ,0]

جدول ۳: مقادیر بهینه بدست آمده برای هایپرپارامترها با استفاده از روش GS

هایپرپارامترها	مقادیر بهینه
ccp_alpha	0.01
max_depth	3
max_features	auto
min_samples_leaf	1
min_samples_split	5
min_impurity_decrease	0.0
random_state	1

4. Genetic Algorithm (GA)

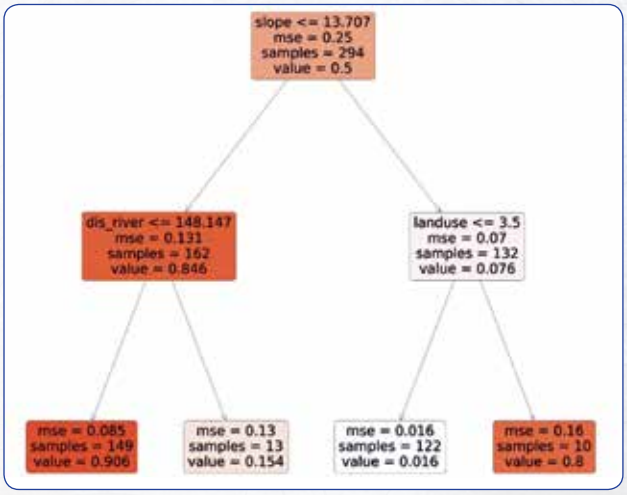
5. Area under the Receiver Operating Characteristic (AUROC)



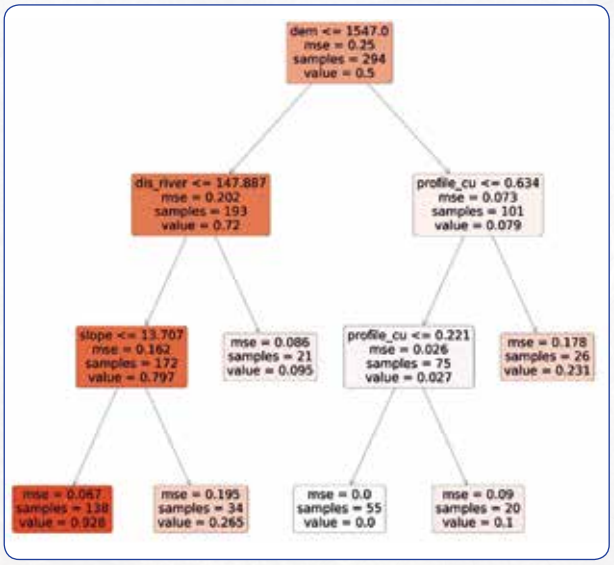
شکل ۲: همگرایی الگوریتم ژنتیک

جدول ۴: مقادیر بهینه هایپرپارامترهای مدل CART با الگوریتم GA

Hyper parameters	Tuned values
cp	0.0
max_depth	3
max_features	sqrt
min_samples_leaf	1
min_samples_split	4
min_impurity_decrease	0.0
random_state	1



شکل ۳: درخت حاصل از تیون کردن هایپرپارامترهای مدل CART با استفاده از روش GS



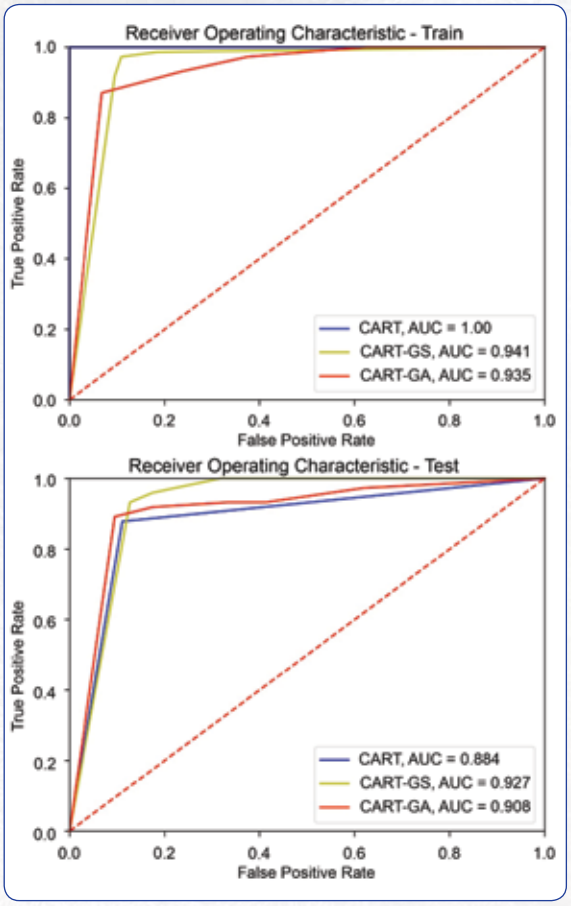
شکل ۴: درخت حاصل از تیون کردن هایپرپارامترهای مدل CART با استفاده از الگوریتم GA

۴- بحث و نتیجه‌گیری

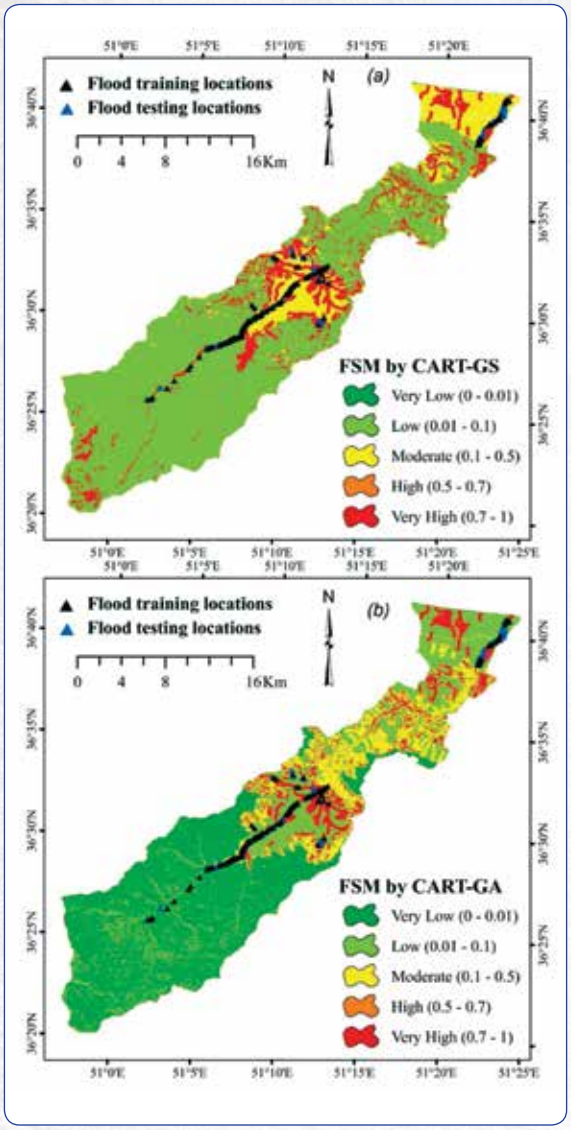
نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تنظیم هایپرپارامترهای مدل CART نه تنها دقت پیش‌بینی خطر وقوع سیلاب را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، بلکه با هرس کردن درخت و کاهش عمق آن، از پیچیدگی مدل کاسته و باعث می‌شود که قوانین استخراجی ساده‌تر و قابل فهم‌تر باشند. این ویژگی، مدل‌های ترکیبی ارائه شده را به ابزاری ایده‌آل برای مدیران بحران تبدیل می‌کند، زیرا آن‌ها می‌توانند بدون نیاز به دانش عمیق در زمینه یادگیری ماشین، عوامل کلیدی مؤثر بر سیلاب را شناسایی کرده و اقدامات مدیریتی مناسب را به کار گیرند.

اگرچه مدل CART-GS عملکردی نسبتا بهتر از مدل CART-GA داشت، اما زمان اجرای مدل GA به مراتب کمتر بود و برای مناطق وسیع‌تر که نیاز به پردازش سریع دارند، گزینه مناسبی محسوب می‌شود. نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب تولید شده نشان داد که مناطق شمالی حوضه که عمدتاً شامل اراضی مسطح، نزدیک به رودخانه و با کاربری‌های کشاورزی و مسکونی هستند، بالاترین سطح خطر را دارند.

در نهایت، پژوهش حاضر نشان داد که با استفاده از ترکیب مدل CART و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، میتوان به مدلی دست یافت که هم از دقت بالایی برخوردار است و هم قابلیت تفسیر بالایی دارد. این رویکرد می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در سایر مناطق ایران که با کمبود داده‌های هیدرومتری مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: منحنی‌های ROC برای سه مدل CART، CART-GS و CART-GA



شکل ۶: نقشه‌های حساسیت به سیل در منطقه مورد مطالعه توسط دو مدل CART-GS و CART-GA

۵- پیشنهادات

توسعه مدل‌های ترکیبی مشابه با سایر الگوریتم‌های درخت تصمیم مانند جنگل تصادفی و مقایسه کارایی آن‌ها با روش‌های ارائه شده در این مطالعه پیشنهاد می‌شود. همچنین، استفاده از این روش‌ها برای پهنه‌بندی سایر مخاطرات طبیعی مانند زمین‌لغزش و خشکسالی میتواند گامی موثر در راستای مدیریت یکپارچه بلایای طبیعی باشد.

۶- مراجع

[1] Ahmadlou, M., et al. (2021). Flood susceptibility mapping using a novel deep learning model. Journal of Flood Risk Management, 14, e12683.

[2] Breiman, L., et al. (1984). Classification and Regression Trees. CRC press.

[3] Lee, S., et al. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8, 1185-1203.

[4] Khosravi, K., et al. (2019). Assessment of flood susceptibility using MCDM and Machine Learning. Journal of Hydrology, 573, 311-323.

[5] Yang, L., & Shami, A. (2020). On hyperparameter optimization of ML algorithms. Neurocomputing, 415, 295-316.

طراحی، پیاده‌سازی و اجرای سامانه پایش هوشمند آبیاری کشاورزی مبتنی بر زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) در استان البرز

مرجان قنبری، کارشناس سامانه‌های ملی و زیرساخت‌های اطلاعات مکانی، سازمان نقشه‌برداری کشور

خلاصه اجرایی

این پروژه به سفارش سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز و با نظارت سازمان نقشه‌برداری کشور، توسط شرکت دانش‌بنیان فن‌آوران هوش مکانی اجرا شده است. هدف از اجرای این پروژه، طراحی، پیاده‌سازی و راه‌اندازی سامانه پایش هوشمند آبیاری کشاورزی مبتنی بر زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) در استان البرز، با بهره‌گیری از اینترنت اشیا (IoT) و استانداردهای وب معنایی است تا بستری استاندارد، یکپارچه و قابل توسعه برای مدیریت دقیق و خودکار آبیاری فراهم شود. این پروژه در چارچوب برنامه پنج‌ساله همسان رقومی سازمان نقشه‌برداری و استاندارد ملّی پیاده‌سازی کاربردهای اینترنت اشیاء بر بستر زیرساخت داده مکانی (اجرا شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان گیلان)، باهدف یکپارچه‌سازی داده‌های جمع‌آوری شده با حسگرها با SDI استان البرز تعریف شده است. این سامانه باید قادر باشد داده‌های برداشت شده توسط حسگرهای تعبیه شده در مزارع، اطلاعات اقلیمی و داده‌های مکانی را در قالبی معنادار تجمیع کرده، نیاز آبی گیاهان را بر اساس روش‌های شناخته شده جهانی محاسبه نموده و با استفاده از مدل‌سازی معنایی زمینه را برای تصمیم‌گیری هوشمند، صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بهره‌وری فراهم آورد. در فاز مطالعاتی، استانداردهای باز بین‌المللی برای تبادل داده‌های حسگر انتخاب شد. پایلوت میدانی در نهالستان کرج که از قبل سنسورگذاری شده بود، راه‌اندازی گردید و داده‌های اقلیمی و خاک پس از استانداردسازی در زیرساخت داده‌های مکانی استان بارگذاری شد. معماری سامانه در چهار لایه حسگرها و دستگاه‌ها، ارتباطات کم‌مصرف، مدل‌سازی مفهومی داده‌ها (تبدیل داده‌های خام به دانش قابل‌فهم برای ماشین) و کاربرد (سامانه متن‌باز شبیه‌ساز آبیاری هوشمند) طراحی‌شده است. دستاورد کلیدی پروژه، ایجاد بستری استاندارد و قابل توسعه برای یکپارچگی داده‌های حسگری و مکانی در SDI استان البرز است که سایر مجموعه‌های فعال در کشاورزی هوشمند می‌توانند از آن بهره‌مند شوند.

مقدمه

سازمان نقشه‌برداری کشور به‌عنوان متولی زیرساخت داده‌های مکانی (SDI[1]) کشور، با مشارکت بیش از ۵۰۰ دستگاه اجرایی، بستر توزیع یافته‌ای از سرویس‌های داده‌های مکانی را در سطوح ملی، استانی و سازمانی فراهم آورده است. این سازمان در راستای تحقق همسان رقومی و حرکت به‌سوی دولت الکترونیک، برنامه پنج‌ساله‌ای برای سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۶ تدوین نموده است. یکی از گام‌های کلیدی این برنامه، بند ۱-۳ با عنوان «شناسایی تکنیک‌های اینترنت اشیا (IoT[2]) و حسگرها جهت پایش واقعیت فیزیکی و تغییرات آن‌ها» می‌باشد که مقرر بود در سال ۱۴۰۳ به مرحله اجرا درآید. هدف از این اقدام، ایجاد بستری استاندارد برای اتصال داده‌های دنیای فیزیکی حاصل از حسگرها و دستگاه‌های IoT به زیرساخت داده‌های مکانی کشور و امکان پایش لحظه‌ای و تحلیل مکانی-زمانی پدیده‌ها می‌باشد.

سازمان نقشه‌برداری تاکنون دو پروژه مطالعاتی و کاربردی را در زمینه IoT در سازمان‌های مدیریت و برنامه‌ریزی استان‌های گیلان و فارس به اجرا درآورده است. پروژه استان گیلان با تمرکز بر مطالعه استانداردهای بین‌المللی کنسرسیوم فضایی باز (OGC[3]) و تدوین مستندات جامع برای استفاده از سرویس‌های استاندارد اینترنت اشیا تعریف گردید. همچنین پروژه استان فارس باهدف به‌کارگیری اینترنت اشیا در حوزه مدیریت

1. Spatial Data Infrastructure (SDI)
2. Internet of Things (IoT)
3. Open Geospatial Consortium (OGC)

ترافیک شهری و پایش لحظه‌ای جریان ترافیک مبتنی بر حسگرهای هوشمند و زیرساخت داده‌های مکانی اجرا شد. علیرغم این تلاش‌ها، هنوز یک شکاف اساسی در تبدیل داده‌های حسگری به دانش قابل‌اتکا برای تصمیم‌گیری هوشمند وجود دارد. نبود مدل‌های معنایی استاندارد برای داده‌های زمانی-مکانی و فقدان زیرساخت تحلیلی مبتنی بر وب معنایی، موجب شده است که پرس‌وجوی پیشرفته و ترکیب داده‌ها در کاربردهای IoT محدود بماند. این خلأ ضرورت اجرای پروژه‌ای را ایجاد کرد که بتواند این شکاف را با رویکردی یکپارچه و مبتنی بر یکی از چارچوب‌های معنایی استاندارد پر کند.

در پاسخ به این نیاز، سازمان نقشه‌برداری کشور پروژه حاضر را در استان البرز تعریف کرده است. این پروژه با بهره‌گیری از اینترنت اشیا و استانداردهای وب معنایی، در پی رفع خلأ موجود و ارتقای هوشمندی در اکوسیستم کشاورزی استان است. اهداف پروژه شامل طراحی سامانه هوشمند آبیاری مبتنی بر استانداردهای OGC، پیاده‌سازی لایه حسگر و ارتباطی با NodeMCU و پروتکل[4] HTTP، مدل‌سازی معنایی داده‌ها با RDF[5]، SOSA[6] و OM[7] و توسعه سامانه شبیه‌ساز تحت وب برای محاسبه نیاز آبی و نمایش لحظه‌ای پارامترها می‌باشد. تجارب این پروژه می‌تواند الگویی قابل تکرار برای سایر حوزه‌های محیطی ارائه دهد.

در گام بعدی تحقق برنامه همسان رقومی سازمان نقشه‌برداری کشور، سامانه متن‌باز شبیه‌ساز پروژه حاضر با سخت‌افزار واقعی جایگزین خواهد شد. برای این منظور، سازمان نقشه‌برداری کشور پروژه پایش محصولات زراعی استان با استفاده از IoT را در استان گیلان تعریف کرده است که در حال اجرا است. تجارب این پروژه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای یکپارچه‌سازی سخت‌افزار واقعی با سامانه حاضر در البرز مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب، سازمان نقشه‌برداری کشور ضمن ایجاد زیرساخت داده‌های مکانی، گامی اساسی در جهت بهره‌برداری از این زیرساخت در هوشمندسازی مدیریت منابع و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌های برخط مکانی-زمانی برداشته و الگوی عملیاتی خود را برای سایر استان‌ها قابل تکرار ساخته است.

منطقه موردمطالعه

پروژه حاضر در استان البرز و در محدوده نهالستان بزرگ کرج به اجرا درآمده است (شکل ۱). این نهالستان یکی از مجموعه‌های شاخص و باسابقه در حوزه تولید، عرضه و تکثیر انواع نهال، گیاهان زینتی و محصولات باغبانی می‌باشد که با قدمت چند ده‌ساله در محدوده شهر کرج فعالیت می‌کند. این مجموعه به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مراکز تولید و توزیع نهال در غرب کشور شناخته می‌شود. تنوع بالای گیاهی، فضای گسترده، ساختار مدیریتی منظم و حجم قابل‌توجه بازدید و مراجعه‌کنندگان، این نهالستان را به گزینه‌ای مناسب برای اجرای پایلوت زیرساخت‌های نوین داده محور تبدیل کرده است. همچنین وجود زیرساخت فیزیکی گسترده، فعالیت‌های مستمر باغبانی و نیازهای واقعی اقلیمی، دلایل اصلی انتخاب این مکان برای سنجش، جمع‌آوری و تحلیل داده‌های محیطی مبتنی بر اینترنت اشیا بوده است. در این مجموعه، شرکت دانش‌بنیان کاوشگران پیش‌تر زیرساخت ایستگاه‌های هواشناسی مبتنی بر اینترنت اشیا را نصب‌کرده بود و داده‌های این ایستگاه‌ها مبنای استانداردسازی و بارگذاری در SDI استان قرار گرفت.



شکل ۱: نمایی از نهالستان کرج، استان البرز

4. Hypertext Transfer Protocol (HTTP)
5. Resource Description Framework (RDF)
6. Sensor, Observation, Sample, and Actuator (SOSA)
7. Observations and Measurements (OM)

معماری سامانه

برای تحقق آبیاری هوشمند مبتنی بر داده‌های مکانی و اینترنت اشیا، یک معماری چهار لایه مطابق توضیحات زیر طراحی و پیاده‌سازی شده است.

- در گام نخست، لایه فیزیکی شامل مجموعه‌ای از حسگرهای استاندارد تعریف گردید تا پارامترهای اقلیمی و خاکی موردنیاز برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه قابل‌اندازه‌گیری باشد. با نصب این حسگرها در پایلوت میدانی نهالستان کرج، امکان جمع‌آوری خودکار داده‌های رطوبت خاک، دما، رطوبت هوا، سرعت باد، شدت نور، بارش و موقعیت جغرافیایی فراهم شد. میکروکنترلر NodeMCU باقابلیت Wi-Fi داخلی و پشتیبانی از پروتکل HTTP، به‌عنوان هسته پردازش و ارسال داده انتخاب گردید تا هزینه و مصرف انرژی کاهش یابد.
- در گام دوم، لایه ارتباطی باهدف انتقال مطمئن و کم تأخیر داده‌ها از نهالستان به سرور مرکزی طراحی شد. بهره‌گیری از پروتکل HTTP روی بستر شبکه‌های 4G و Wi-Fi، حجم تبادل داده را کاهش داده و برای محیط‌هایی با پهنای باند محدود مناسب است. همچنین مکانیسم بافر محلی در میکروکنترلر، امکان ذخیره موقت داده‌ها در زمان قطع ارتباط و ارسال مجدد پس از برقراری را فراهم می‌کند. این لایه با استفاده از دروازه اینترنت اشیا، تجمیع داده‌ها و ترجمه پروتکل را انجام می‌دهد و دستاورد آن ایجاد کانالی پایدار و مقاوم در برابر نوسان شبکه است.
- در گام سوم، لایه داده و لایه معنایی به‌منظور تبدیل داده‌های خام حسگری به دانش قابل‌فهم برای ماشین و انسان پیاده‌سازی شد. در این لایه، داده‌های JSON دریافتی با کمک کتابخانه rdflib در سمت سرور (Django) به فرمت استاندارد RDF تبدیل می‌شوند. استفاده از هستی‌شناسی SOSA برای توصیف مشاهدات حسگری و هستی‌شناسی OM برای یکاهای اندازه‌گیری (مانند درصد، درجه سلسیوس، میلی‌متر بر روز)، معنای دقیق هر داده را حفظ می‌کند. همچنین مدل‌سازی مختصات جغرافیایی بر اساس WGS84، امکان تحلیل‌های مکانی را فراهم می‌آورد. دستاورد این لایه، تولید خروجی RDF/Turtle باقابلیت یکپارچگی با سایر سامانه‌های مبتنی بر وب معنایی است.
- درنهایت، لایه چهارم (کاربرد) به‌عنوان رابط کاربری سامانه، باهدف ارائه نمایش بصری داده‌ها و تصمیم‌گیری هوشمند طراحی‌شده است. فرانت‌اند با استفاده از HTML، CSS ،Java Script و کتابخانه نقشه سه‌بعدی Mapbox GL، امکان مشاهده زمین‌های کشاورزی، اندازه‌گیری فاصله، و نمایش لحظه‌ای پارامترها را فراهم می‌کند. بک‌اند سامانه با چارچوب Django، تابع محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ETo) را با روش استاندارد پنمن-مانتیث فائو-۵۶ پیاده‌سازی (رابطه ۱) کرده و با اعمال ضریب گیاهی (Kc) مقدار تبخیر و تعرق واقعی (ETc) را محاسبه می‌کند. همچنین قابلیت شبیه‌سازی بارندگی و فعال‌سازی خودکار انیمیشن آبیاری در شرایط کاهش رطوبت خاک، بستری برای آزمون الگوریتم‌ها قبل از استقرار میدانی فراهم می‌آورد. دستاورد این لایه، ایجاد یک نمونه اولیه کامل و قابل توسعه برای مدیریت هوشمند آبیاری است.

$$ET_{\circ} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

در این رابطه، $ET_{\circ}$ تبخیر-تعرق مرجع برحسب میلی‌متر بر روز، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، G شار گرمای خاک برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری برحسب درجه سلسیوس، u_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب متر بر ثانیه، e_s فشار بخار اشباع، e_a فشار بخار واقعی، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع برحسب کیلو پاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس و γ ضریب ثابت سایکرومتری برحسب کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس می‌باشند. لازم به توضیح است ارتفاع دو متر مطابق با استاندارد جهانی فائو-۵۶ برای اندازه‌گیری دما، هوا و سرعت باد در ایستگاه‌های هواشناسی تعیین شده است.

استانداردهای مورداستفاده

برای تضمین قابلیت همکاری، تبادل‌پذیری داده‌ها و یکپارچگی با SDI استان، این پروژه از مجموعه استانداردهای باز OGC بهره گرفته است. خلاصه این استانداردها و نقش هر یک در پروژه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: استانداردهای مورد استفاده و نقش و حوزه کاربرد آن‌ها در پروژه

نام استاندارد (مفهومی)	نقش در پروژه	حوزه کاربرد
رابط برنامه‌نویسی حسگرها (Things API)	اتصال یکپارچه حسگرها به وب، ارسال داده و فرمان به محرک‌ها با پروتکل سبک	تبادل داده حسگر و اینترنت اشیا
هستی‌شناسی حسگر، مشاهده، نمونه و محرک (SOSA)	توصیف استاندارد «چه چیزی»، «توسط کدام حسگر»، «در چه شرایطی» اندازه‌گیری شده است	مدل‌سازی مفهومی مشاهدات حسگری
هستی‌شناسی یکاهای اندازه‌گیری (OM)	اتصال معنایی واحدها (درصد، درجه سلسیوس، میلی‌متر بر روز) به داده‌ها؛ جلوگیری از خطای تفسیر	تعریف یکاهای اندازه‌گیری
مدل اطلاعات کشاورزی (AIM)	تعریف مفاهیم مزرعه، قطعه زمین، محصول، عملیات زراعی و روابط میان آن‌ها	توصیف موجودیت‌های کشاورزی
چارچوب توصیف منبع (RDF) و زبان پرس‌وجو (SPARQL)	نمایش داده به‌صورت سه‌تایی (منبع– ویژگی– مقدار) و امکان جستجوی پیشرفته	ذخیره و پرس‌وجوی داده معنایی
GeoSPARQL	پرسش‌های مکانی (مانند محدوده جغرافیایی، فاصله، هم‌پوشانی) روی‌داده‌های معنایی	داده‌های مکانی

سخت‌افزار و تجهیزات

لایه فیزیکی سامانه شامل مجموعه‌ای از حسگرهای استاندارد برای اندازه‌گیری پارامترهای اقلیمی و خاک و نیز میکروکنترلر برای جمع‌آوری و ارسال داده‌ها می‌باشد. حسگرهای به‌کاررفته هفت پارامتر اصلی مورد نیاز برای محاسبه تبخیر و تعرق و تصمیم‌گیری آبیاری را پوشش می‌دهند. خلاصه تجهیزات در جدول ۲ آورده شده است. در شکل ۲ نمای تعدادی از حسگرهای استفاده شده در این پروژه نشان داده شده است.

جدول ۲. حسگرها و میکروکنترلر به کار رفته در سامانه

تجهیز	پارامتر اندازه‌گیری	مشخصات کلیدی
حسگر رطوبت خاک YL-69	رطوبت حجمی خاک	خروجی آنالوگ و دیجیتال، ولتاژ کاری ۳.۳–۵ ولت
حسگر دما و رطوبت هوا DHT22	دمای هوا، رطوبت نسبی	دقت دمایی ±۰.۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۲–۵٪
حسگر سرعت باد MPXV7002	سرعت باد	محدوده فشار ۲– کیلو پاسکال، خروجی آنالوگ
حسگر شدت نور BH1750	شدت نور محیط (لوکس)	خروجی دیجیتال ۱۶ بیتی، محدوده ۱ تا ۶۵۵۳۵ لوکس
حسگر باران YL-83	تشخیص و شدت بارش	خروجی آنالوگ و دیجیتال، حساسیت قابل تنظیم
ماژول موقعیت‌یاب GPS Neo-6M	مختصات جغرافیایی	خروجی سریال با فرمت NMEA، نرخ ۹۶۰۰ باد
میکروکنترلر NodeMCU ESP8266	جمع‌آوری و ارسال داده	Wi-Fi داخلی، پشتیبانی از MQTT/HTTP، مصرف کم انرژی



شکل ۲: نمایی از حسگرهای استفاده‌شده برای تعیین نیاز آبیاری کشاورزی در پروژه

این تجهیزات با اتصال به یکدیگر و نصب در محل مزرعه (پایلوت نهالستان کرج) قابلیت جمع‌آوری و ارسال لحظه‌ای داده‌ها را فراهم می‌کنند. منبع تغذیه برای استقرار میدانی، پاور بانک یا باتری لیتیومی با قابلیت شارژ خورشیدی در نظر گرفته شده است.

سامانه کاربردی شبیه‌ساز آبیاری

به‌منظور نمایش و آزمون قابلیت‌های سامانه بدون نیاز به سخت‌افزار فیزیکی، یک سامانه تحت وب شبیه‌ساز آبیاری هوشمند توسعه‌یافته است. این سامانه از دو بخش اصلی فرانت‌اند تعاملی و بک‌اند محاسباتی تشکیل می‌شود.

فرانت‌اند سامانه با استفاده از HTML، CSS، JavaScript و کتابخانه نقشه سه‌بعدی Mapbox GL پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این بخش امکان نمایش زمین‌های کشاورزی با پوشش برجستگی و مارکرهای هر قطعه زمین را به‌صورت تعاملی فراهم می‌کند. کاربر می‌تواند با کلیک بر روی نقشه، اطلاعات مختصات و وضعیت زمین را مشاهده کند. پنل‌های کناری شامل داده‌های محیطی (رطوبت خاک، دما، رطوبت هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و شدت باران) به‌صورت پویا به‌روزرسانی می‌شوند. کاربر با انتخاب نوع گیاه و مرحله رشد از لیست کشویی، ضریب گیاهی (Kc) را مشخص می‌کند. انیمیشن آبیاری به‌صورت یک دایره آبی متحرک روی نقشه اجراشده و تنها زمانی فعال می‌گردد که رطوبت خاک به کمتر از ده درصد کاهش یابد.



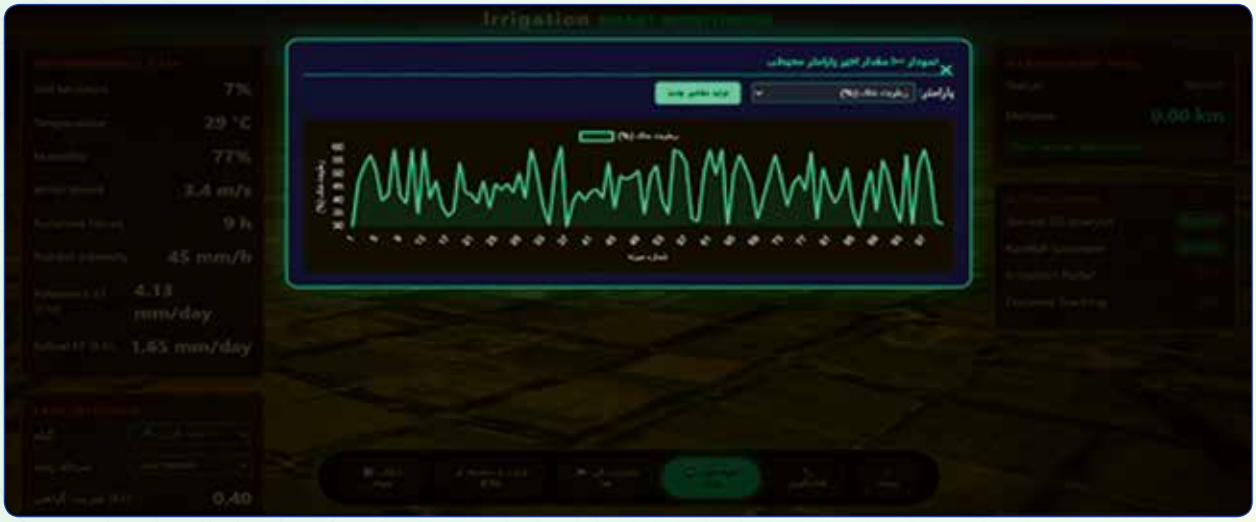
شکل ۳: نمای نقشه سامانه شبیه‌ساز آبیاری هوشمند با نمایش زمین‌های کشاورزی، مارکرهای قطعات و پنل داده‌های محیطی

شکل ۴ نمای پنل شبیه‌سازی بارندگی را نشان می‌دهد. کاربر می‌تواند با فعال کردن این گزینه، بارش مصنوعی را به مزرعه اعمال کرده و تأثیر آن بر رطوبت خاک را مشاهده کند. همچنین امکان شبیه‌سازی تغییرات تصادفی حسگرها برای آزمون الگوریتم‌ها پیش‌بینی‌شده است.



شکل ۴: پنل شبیه‌سازی بارندگی و شبیه‌سازی تغییرات تصادفی حسگرها در سامانه آبیاری هوشمند

بک‌اند سامانه با چارچوب Django (زبان Python) توسعه‌یافته و شامل APIهای RESTful است. مهم‌ترین تابع محاسباتی، محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ETo) با روش استاندارد پنمن–مانتیث فائو–۵۶ می‌باشد. این تابع با دریافت پارامترهای هواشناسی (دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، عرض جغرافیایی و ارتفاع) مقدار ETo را به میلی‌متر بر روز بازمی‌گرداند. سپس با اعمال ضریب گیاهی (Kc) متناسب با نوع گیاه و مرحله رشد، تبخیر و تعرق واقعی (ETc) محاسبه می‌شود. شکل ۵ نمودارهای زمانی مقادیر محیطی را نمایش می‌دهد که امکان روند یابی تغییرات پارامترها را فراهم می‌کند.



شکل ۵: نمودارهای زمانی نمایش تغییرات پارامترهای محیطی (مثال موردی رطوبت خاک) در بازه‌های زمانی مختلف

نحوه ارتباط با SDI استان البرز

یکی از دستاوردهای کلیدی پروژه، ایجاد پیوند میان داده‌های حسگری IoT و SDI استان البرز است. بر اساس مستندات پروژه، داده‌های خام اقلیمی و خاک جمع‌آوری‌شده از ایستگاه‌های هواشناسی نهالستان کرج، پس از طی فرآیند پاک‌سازی، ساختار یافتن و استانداردسازی بر اساس استانداردهای OGC، در هسته مرکزی SDI استان البرز بارگذاری گردیدند. این داده‌ها شامل پارامترهای دما، رطوبت هوا، سرعت باد، بارش و رطوبت خاک می‌باشند.

سامانه شبیه‌ساز توسعه‌یافته نیز به‌گونه‌ای طراحی‌شده است که از طریق APIهای RESTful مبتنی بر استانداردهای OGC (نظیر SensorThings API) قادر به تبادل داده با SDI استان می‌باشد. به عبارت‌دیگر، هر مجموعه اجرایی یا شرکت فعال در حوزه کشاورزی هوشمند که داده‌های خود را مطابق با استانداردهای مصوب OGC فرمت کرده باشد، می‌تواند آن‌ها را به SDI استان متصل کرده و از خدمات تحلیل، تصمیم‌یاری و پیش‌بینی سامانه بهره‌مند شود. این رویکرد، زمینه‌ساز یکپارچگی داده‌های پراکنده و جلوگیری از فعالیت‌های جزیره‌ای در سطح استان است.

در حال حاضر، سامانه شبیه‌ساز قابلیت اتصال به SDI استان را داشته و در صورت استقرار حسگرهای واقعی، داده‌های دریافتی مستقیماً از طریق لایه ارتباطی سامانه به SDI استان منتقل خواهند شد.

چالش‌های اجرایی

به‌کارگیری IoT در کشاورزی هوشمند با چالش‌های متعددی روبرو است: سرمایه‌گذاری سنگین برای خرید تجهیزات که برای کشاورزان خرد توجیه اقتصادی کوتاه‌مدت ندارد؛ نبود پوشش پایدار اینترنت (4G/5G) یا شبکه‌های تخصصی مانند LoRaWAN در بسیاری از مزارع که انتقال لحظه‌ای داده را مختل می‌کند؛ خطر حملات سایبری به سیستم‌های آبیاری خودکار و سرقت داده‌های مزارع؛ استهلاک سریع حسگرها و گره‌های ارتباطی در معرض رطوبت، تابش، گردوغبار و مواد شیمیایی که نیاز به نگهداری مداوم دارد؛ حجم عظیم داده‌های حسگری که نیازمند دانش فنی بالای تحلیلگران و فراتر از توان کشاورزان سنتی است؛ نبود قابلیت همکاری بین تجهیزات تولیدکنندگان مختلف که ادغام آن‌ها را دشوار می‌سازد؛ و مدیریت مصرف باتری در هزاران حسگر دورافتاده و دشواری تعویض مداوم آن‌ها که یک چالش عملیاتی بزرگ محسوب می‌شود.

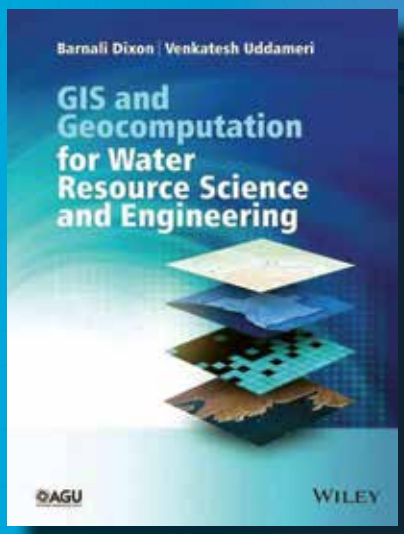
اقدامات و پیشنهادات برای فازهای بعدی

بر اساس تجارب حاصل از این پروژه، اقدامات و پیشنهادات برای توسعه‌های آتی در سه محور اصلی تدوین‌شده است که در ادامه تشریح می‌گردد.

نخست آنکه به‌عنوان گام بعدی، سامانه شبیه‌ساز پروژه حاضر با سخت‌افزار واقعی جایگزین شد. برای این منظور، سازمان نقشه‌برداری کشور پروژه پایش محصولات زراعی استان با استفاده از IoT را در استان گیلان تعریف کرده است. تجارب این پروژه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای یکپارچه‌سازی سخت‌افزار واقعی با سامانه حاضر در البرز مورد استفاده قرار گیرد. در راستای اقدامات آتی، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی نیاز آبی گیاهان پیشنهاد می‌گردد. مدل‌های سری زمانی مانند ARIMA، شبکه‌های حافظه بلندمدت کوتاه (LSTM) و جنگل تصادفی می‌توانند بر اساس داده‌های تاریخی اقلیمی و حسگری، مقدار بهینه آب موردنیاز را پیش‌بینی کرده و به کشاورز در تصمیم‌گیری آگاهانه یاری رسانند. همچنین، توسعه سامانه به یک پلتفرم جامع مدیریت مزرعه توصیه می‌گردد. این پلتفرم باید ماژول‌های کود دهی هوشمند، سم‌پاشی نقطه‌ای، پیش‌بینی عملکرد محصول، گزارش‌گیری خودکار برای نهادهای نظارتی و قابلیت اشتراک‌گذاری داده بین کشاورزان یک منطقه را شامل شود. همچنین استقرار ابری سامانه بر روی سرویس‌هایی نظیر AWS و Azure به‌منظور دسترسی آسان و تأمین امنیت داده‌ها پیشنهاد می‌گردد.

معرفی کتاب

تهیه کننده : معصومه اقبالی مردخه
کارشناس کنترل کیفیت سازمان نقشه‌برداری کشور



نام کتاب: GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering

استفاده از سامانه اطلاعات مکانی و محاسبات مبتنی بر مکان در علوم مهندسی منابع آب

ناشر : John Wiley & Sons

نویسندگان : Barnali Dixon & Venkatesh Uddameri

سال نشر : ۲۰۱۶

مروری بر کتاب

مدیریت یکپارچه منابع آب، به‌عنوان پارادایمی ضروری برای مقابله با چالش‌های پیچیده خشکسالی و کم‌آبی در ایران محسوب می‌شود که نیازمند ترکیبی از راهکارهای فنی، حکمرانی مناسب و اصلاح الگوی مصرف است. مشکلات ایران، به‌عنوان کشوری که در حال حاضر درگیر خشکسالی بوده و با کاهش بارندگی و افزایش دمای میانگین روبرو است به تدریج در حال تشدید است. داده‌های اقلیمی نشان می‌دهند که شاخص‌های حدی دما، ازجمله میانگین دمای حداکثر روزانه و همچنین روزهای متوالی گرم، در بیش از ۷۰ درصد شهرهای ایران به‌طور معناداری افزایش یافته و شاخص بارش شدید نیز روندی کاهشی داشته است. این تغییرات اقلیمی، همراه با مدیریت ناکارآمد منابع آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی که حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد مصرف آب کشور را به خود اختصاص می‌دهد؛ منجر به افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی شده، که پیامدهایی چون فرونشست زمین با نرخ تا ۳۰ سانتیمتر در سال در مناطقی مانند ورامین و تهران را به همراه داشته است. برای مقابله با این بحران، راهکارهایی مانند توسعه فناوری‌های نوین (آبیاری قطره‌ای، شیرین‌سازی آب دریا)، اصلاح الگوی کشت، آموزش کشاورزان و تقویت حکمرانی یکپارچه آب پیشنهاد می‌شوند. بدون این اقدامات، ایران با تهدیدهای جدی در امنیت آب، غذا و محیطزیست روبرو خواهد بود.

این کتاب مرجعی جامع و کاربردی برای متخصصان باهدف بهره بردن از تحلیل‌های مکانی برای حل چالش‌های پیچیده در حوزه مدیریت منابع آب می‌باشد و محتوای آن شامل ارائه مبانی علمی، روش‌های عملی نرم‌افزاری و ترکیب سامانه اطلاعات مکانی (GIS) با مدل‌های کمی باهدف پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب می‌باشد. در آن به‌طور ویژه به مسائل حیاتی مانند مدیریت سدها و پایش خشکسالی پرداخته می‌شود و GIS به‌عنوان پلتفرمی یکپارچه، داده‌های متنوعی مانند نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و داده‌های هیدرولوژیکی را گردآوری می‌کند تا ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و خشکسالی بر حوضه‌های آبریز و ذخایر سدها ممکن شود. نتایج این تحلیل‌های مکانی به مدیران کمک می‌کند تا مناطق آسیب‌پذیر را شناسایی کرده و سناریوهای مختلف مدیریتی را برای تخصیص بهینه آب و مدیریت بحران خشکسالی شبیه‌سازی کنند. سرفصل‌های این کتاب با مبانی GIS آغازشده و به سمت کاربردهای تخصصی پیش می‌رود. از مهم‌ترین این سرفصل‌ها می‌توان به مدل‌سازی رقومی ارتفاع برای تعیین حوضه‌های آبریز، تلفیق GIS با مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه و تحلیل مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلف اشاره کرد و هسته اصلی آن متمرکز برساخت سیستم‌های پشتیبانی از تصمیم‌گیری مکانی (SDSS) می‌باشد که به تصمیم‌گیرندگان در مسائلی مانند تخصیص آب و مکان‌یابی سازه‌ها کمک می‌کند.

از مهم‌ترین جنبه‌های این کتاب، پرداختن به تلفیق GIS با روش‌های پیشرفته محاسباتی (Geocomputation) و هوش مصنوعی است که شامل آموزش استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی بارش، منطق فازی برای مدل‌سازی عدم قطعیت در تخصیص آب طی خشکسالی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای مدیریت مخزن سدها می‌باشد. درنهایت، این کتاب با بهره‌گیری از مطالعات موردی واقعی، تمرین‌های عملی و فراهم آوردن ابزار و توانایی‌های لازم؛ سبب استفاده از داده‌های خام جهت تبدیل به اطلاعات قابل‌اجرا و ارائه راهکارهای پایدار برای مقابله با چالش‌های مدیریت منابع آب می‌شود.

گزارش تصویری











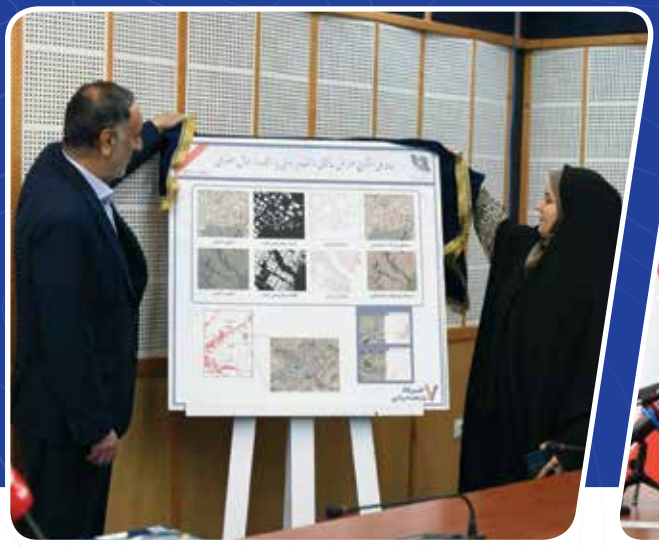





News Conference
28th May 2026
سازمان برنامه و بودجه کشور
سازمان نقشه برداری کشور
28th MAY




سازمان برنامه و بودجه کشور




News Conference
28th May 2026
سازمان برنامه و بودجه کشور
سازمان نقشه برداری کشور

سمینارها و گردهمایی‌ها

تهیه کننده: آزاده آقا محمدی
رئیس اداره همکاری‌های بین‌الملل و صدور خدمات مهندسی سازمان نقشه‌برداری کشور

Title	Date	Venue	Topic	Deadline	Website
ICGMRS 2026 (7th International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing)	April 17-19, 2026	Zhejiang, China	Geology, Mapping, Remote Sensing	See website for details	www.icgmrs.com
ICGE 2026 (International Conference on Geomatics Engineering)	April 20-21, 2026	Paris, France	Geomatics Engineering, GIS, Geodesy, Photogrammetry	March 18, 2026	waset.org
GISRUK 2026	April 14-17, 2026	Birmingham, UK	Geographic Information Science Research	See website for details	gisruk.org
RSGIME 2026 (International Conference on Remote Sensing, Geographic Information and Surveying and Mapping of the Environment)	March 2, 2026	TBA	Remote Sensing, Geographic Information, Surveying and Mapping	February 15, 2026	www.global-meetings.com/rsgime
GeoIgnite 2026	May 11-13, 2026	Ottawa, Canada	Canadian Geospatial Leadership	See website for details	gogeomatics.ca
Colloque de printemps sur la géomatique (FHNW Geomatics Spring Colloquium Series)	March 3, March 24, April 14, May 5, 2026	Muttenz, Switzerland (Hybrid)	Satellite data, Environmental observation, Geomatics	No registration required	geomatik.ch
GeoForum und MasterForum Frühlingssemester 2026	June 16, 2026	Muttenz, Switzerland	Bachelor and Master Theses in Geomatics	See website for details	https://www.fhnw.ch/weiterbildungen-igeo

کتاب راهنمای جامع توپونیمی ایران منتشر شد.



National Cartographic Center of Iran

www.ncc.gov.ir



سازمان برنامه و بودجه کشور

سازمان نقشه‌برداری کشور

میدان آزادی، خیابان معراج

صندوق پستی: ۱۳۱۸۵-۱۶۸۴

تلفن: ۷-۶۶۰۷۱۰۰۱ دورنگار: ۶۶۰۷۱۰۰۰