بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی عمران

گرایش مهندسی مدیریت منابع آب

پایان نامه کارشناسی ارشد

برآورد تغییرات مکانی و زمانی شوری سطح دریاچه‌ی ارومیه با استفاده از سنجش از دور و یادگیری ماشین

نگارش

مجید بیاتی

استاد راهنما

محمد دانش یزدی

اسفند ۱۳۹۹

تشکر و قدردانی:

بسیار سپاس‌گزارم از مادر و پدرم، دو فرشته ای که سختی ها را به جان خریدند و از خواسته هایشان گذشتند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم. آن‌ها همواره تکیه‌گاه من در مواجهه با مشکلات و ناملایمات بودند و تمام موفقیت‌های زندگی را مدیون ایشان هستم.

از جناب دکتر محمد دانش‌یزدی، استاد دلسوز و گرانقدرم صمیمانه سپاس‌گزارم که راهنمای راه من بوند. بسیار مفتخر هستم که با ایشان همراه بودم و نه‌تنها علم و دانش بلکه اخلاق و معرفت را نیز از ایشان آموختم.

از ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه که با حمایت مالی و نیز همکاری و هماهنگی برای تهیه‌ی داده‌های میدانی در این پژوهش سهیم بوده است، نهایت تشکر و قدردانی را دارم و از جناب شهریار فضلی که در فرآیند جمع‌آوری داده‌های میدانی همکاری نموده‌اند صمیمانه سپاس گزارم. بدین وسیله مراتب سپاس خود را به جناب دکتر محمد دانش‌یزدی، جواد رحمانی، پارسا نمکی و یاسمین قدیانی که داده‌های میدانی حاشیه‌ی دریاچه‌ی ارومیه را جمع‌آوری نموده‌اند تقدیم می‌دارم. نهایت سپاس و قدردانی خود را بابت جمع آوری بخش عمده‌ی داده‌های میدانی این پژوهش نسبت به پژوهشکده‌ی علوم زمین سازمان زمین شناسی کشور اعلام می‌دارم و نسبت به آزمایشگاه آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف که در تحلیل نتایج داده‌های میدانی دوره‌ی دوم ما را همراهی نمودند نیز نهایت قدردانی خود را اعلام می‌کنم.

چکیده

تغییرات مکانی و زمانی غلظت نمک در دریاچه‌های شور به شکل قابل ملاحظه‌ای به میزان آب شیرین ورودی به دریاچه، جریان‌های آب در داخل دریاچه، سرعت باد، نرخ تبخیر و پدیده‌ی ترسیب و انحلال وابسته است. با وجود آنکه داده‌های میدانی به بهترین و قابل اعتمادترین شکل، غلظت متغیرهای کیفی را نمایش می‌دهند، این داده‌ها صرفاً در نقاط نمونه‌برداری شده نمایانگر متغیر کیفی مد نظر هستند و اطلاعاتی درخصوص مقدار متغیر کیفی در سایر مکان‌ها و یا در زمان‌هایی که در آن‌ها داده‌برداری میدانی انجام نشده‌است در اختیار قرار نمی‌دهند. سنجش از دور[۱] ماهواره‌ای قابلیت تخمین متغیرهای کیفی آب در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف را به عنوان ابزاری قدرتمند، کم هزینه و سریع فراهم نموده است. این پژوهش اقدام به معرفی یک مدل مبتنی بر هوش مصنوعی تطبیقی[۲] می‌کند که با استفاده از داده‌های میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، قادر به تخمین غلظت نمک در دریاچه‌های شور است. کاربرد این مدل در تخمین غلظت نمک در دریاچه‌ی ارومیه بررسی شد که بدین منظور از تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ استفاده گردید. به منظور آموزش و اعتبار سنجی مدل یادگیری ماشین از ۱۳۰ داده میدانی غلظت نمک که در فروردین و تیرماه ۱۳۹۸ از دریاچه‌ی ارومیه تهیه شده‌بودند استفاده شد. در این پژوهش از سه مدل شبکه عصبی مصنوعی[۳]، آنفیس[۴] و برازش خطی چند متغیره[۵] استفاده شد که در میان این مدل‌ها شبکه عصبی مصنوعی با R^2=0.94 و NRMSE=6.9% بهترین دقت را در میان این مدل‌ها به ثبت رساند. نتایج این پژوهش نشان دهنده‌ی وجود تفاوت قابل توجه غلظت نمک در سمت شمال و جنوب پل میانگذر شهید کلانتری در شروع فصل بهار است. این تفاوت حاکی از ایجاد محدودیت در گردش آب میان بخش‌های شمالی و جنوبی دریاچه توسط پل میانگذر در مواقع افزایش آب ورودی به دریاچه است. با این وجود این اثر گذاری تنها در اوایل فصل بهار مشاهده می‌شود و در سایر ماه‌های سال میانگذر تأثیر چندانی در گردش آب از خود نشان نمی‌دهد و غلظت نمک در طرفین پل تغییرات ناگهانی ندارد. بررسی تغییرات ماهانه میانگین غلظت نمک در

[۱] Remote sensing

[۲] Adaptive learning

[۳] Artificial Neural Network (ANN)

[۴] ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

[۵] Multiple Linear Regression (MLR)

مقابل تغییرات حجم آب موجود در دریاچه نشان دهنده‌ی وجود یک چرخه هیسترسیس میان میانگین غلظت نمک و حجم آب است که عمدتاً ناشی از تأثیر ترسیب و انحلال و تبخیر از دریاچه در فصول مختلف است. نتایج این پژوهش حاکی از وجود یک رابطه تنگاتنگ میان تغییرات میانگین غلظت نمک در بخش جنوبی دریاچه‌ی ارومیه و میانگین غلظت نمک در کل دریاچه است که نشان دهنده‌ی آن است که تغییرات غلظت نمک در کل دریاچه عمدتاً توسط بخش جنوبی دریاچه کنترل می‌شود.

کلمات کلیدی: دریاچه‌ی ارومیه، غلظت نمک، یادگیری ماشین، سنجش از دور، سنتینل-۲، لندست-۸

فهرست مطالب

چکیده ..... أ

۱ فصل اول: کلیات ۱

۱-۱ مقدمه و اهمیت تحقیق ۱

۱-۲ اهداف پژوهش ۳

۱-۳ روش تحقیق و نوآوری پژوهش ۳

۱-٤ فرضیات پژوهش ٤

۲ فصل دوم: مرور ادبیات فنی... ..... ۵

۲-۱ مقدمه ۵

۲-۲ تقسیم‌بندی مطالعات کیفی از منظر نوع سنجنده... ..... ۵

۲-۳ تقسیم‌بندی متغیرهای کیفی آب از منظر خصوصیات نوری..... ..... ٦

۲-٤ رویکردهای تعیین متغیرهای کیفی آب توسط سنجش از دور..... ..... ۹

۲-۵ روش مدل‌سازی تجربی غلظت نمک با استفاده از تصاویر ماهواره ای ۱۰

۲-٦ محدودیت‌های مطالعات سنجش از دور کیفیت آب..... ..... ۱۵

۳ فصل سوم: محدوده‌ی مطالعاتی و روش‌شناسی..... ۱۸

۳-۱ مقدمه ۱۸

۳-۲ محدوده‌ی مطالعاتی ۱۸

۳-3 روش‌شناسی..... ۲۰

۳-۳-۱ داده‌های میدانی ۲۰

۳-۳-۲ داده‌های ماهواره ای ۲٤

۳-۳-۳ استخراج محدوده ی آبی دریاچه..... ۳۰

۳-۳-٤ معرفی ساختار مدل‌سازی غلظت نمک با استفاده از یادگیری ماشین تطبیقی..... ..... ۳۲

۴ فصل چهارم: بحث و تحلیل نتایج..... ..... ٤۲

٤-۱ مقدمه ٤۲

٤-۲ صحت سنجی استخراج محدوده‌ی پهنه‌ی آبی دریاچه‌ی ارومیه..... ..... ٤۲

٤-۳ انتخاب بهترین ترکیب باندهای ورودی..... ۵۳

٤-٤ دقت مدل در تخمین غلظت نمک..... ۵٦

4-۵ تحلیل ارتباط دقت پیش‌بینی و معماری شبکه‌ی عصبی..... ٦٢
٤-٦ تغییرات زمانی غلظت نمک در دریاچه‌ی ارومیه.... ٦٥
٤-٧ رابطه‌ی هیسترسیس بین غلظت نمک و حجم آب در دریاچه‌ی ارومیه..... ٧٢
٤-٨ مقایسه‌ی قدرت تفکیک طیفی دو ماهواره‌ی سنتینل-٢ و لندست-٨ ..... ٧٤
٤-٩ تغییرات غلظت نمک و تغییرات عمق بستر دریاچه‌ی ارومیه ٧٦
٤-١٠ کاربردهای تغییرات مکانی و زمانی غلظت نمک در بیلان آب، اکولوژی و مدلسازی هیدرودینامیکی در دریاچه‌ی ارومیه..... ٨٠
4-١١ کاربرد ساختار ارائه شده در این پژوهش برای تخمین غلظت سایر متغیرهای کیفی..... ٨٤
٥ فصل پنجم: ملاحضات نهایی در خصوص مدل‌سازی کیفیت آب با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سنجش از دور و نتیجه‌گیری ٨٦
٥-١ مقدمه ٨٦
٥-٢ مدل‌های مبتی بر هوش مصنوعی در مقابل مدل‌های رگرسیون..... ٨٦
٥-٣ انتخاب بهینه‌ی متغیرهای ورودی به مدل‌های یادگیری ماشین..... ٨٨
٥-٤ واسنجی مدل‌های مبتنی بر سنجش از دور..... ٨٩
5-٥ نتیجه‌گیری ٩٠
٦ مراجع..... ٩٢

فهرست شکل‌ها

شکل ۱. محدوده‌ی جغرافیایی دریاچه‌ی ارومیه و رودخانه‌های ورودی به دریاچه. ۱۹

شکل ۲. توزیع مکانی غلظت نمک اندازه‌گیری شده در آوریل (فروردین) و جولای (تیر) ۲۰۱۹ (۱۳۹۸). ۲۲

شکل ۳. تفکیک زمانی برداشت تصویر توسط ماهواره‌های سنتینل-۲ در سطح کره‌ی زمین. ۲۷

شکل ٤. مقایسه‌ی تفکیک مکانی دو ماهواره‌ی لندست-۸ و سنتینل-۲. ..... ۲۹

شکل ۵. مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی شامل سه لایه‌ی ورودی، پنهان و لایه‌ی خروجی ۳۵

شکل ٦. روندنمای الگوریتم بهینه سازی ژنتیکِ مرتب سازی غیرمغلوبِ-II (NSGA-II) ٤١

شکل ۷. مقایسه‌ی وظوح مرز آبی دریاچه‌ی ارومیه و دریاچه‌ی وان ترکیه ٤٤

شکل ۸. خط اول داده‌های میدانی مشخص کننده‌ی مرز دریاچه‌ی ارومیه بر روی تصویر ماهواره‌ی لندست-۸ در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۱۹ (۲۷ تیر ۱۳۹۸) [100]. ٤٦

شکل ۹. خط دوم داده‌های میدانی مشخص کننده‌ی مرز دریاچه‌ی ارومیه بر روی تصویر ماهواره‌ی لندست-۸ در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۱۹ (۲۷ تیر ۱۳۹۸) [100]. ٤٧

شکل ۱۰. خط سوم داده‌های میدانی مشخص کننده‌ی مرز دریاچه‌ی ارومیه بر روی تصویر ماهواره‌ی لندست-۸ در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۱۹ (۲۷ تیر ۱۳۹۸) [100]. ٤٨

شکل ۱۱. خط اول داده‌های میدانی مشخص کننده‌ی مرز دریاچه‌ی ارومیه بر روی پهنه‌ی آبی استخراج شده توسط الگوریتم K-MEANS با در نظر گرفتن دو خوشه [100]. ۵۰

شکل ۱۲. خط دوم داده‌های میدانی مشخص کننده‌ی مرز دریاچه‌ی ارومیه بر روی پهنه‌ی آبی استخراج شده توسط الگوریتم K-MEANS با در نظر گرفتن دو خوشه [100]. ۵۱

شکل ۱۳. خط سوم داده‌های میدانی مشخص کننده‌ی مرز دریاچه‌ی ارومیه بر روی پهنه‌ی آبی استخراج شده توسط الگوریتم K-MEANS با در نظر گرفتن دو خوشه [100]. ۵۲

شکل ١٤. تغییرات سطح و تراز دریاچه‌ی ارومیه در بازه‌ی مورد مطالعه. ۵۳

شکل ۱۵. نمودار نیکویی برازش غلظت نمک پیش‌بینی شده در مقابل غلظت نمک مشاهده شده ۵۸

شکل ١٦. ارتباط تغییرات تراز تراز بسیمتری کف با خطای تخمین غلظت نمک توسط سه مدل بکارگرفته شده. ٦٠

شکل ۱۷. خطای پیش‌بینی غلظت نمک (متناظر با نقاط داده برداری شده در ماه‌های آوریل و جولای ۲۰۱۹) با استفاده از سه مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی، اَنفیس و برازش خطی چند متغیره با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲. ..... ٦٢

شکل ۱۸. رابطه‌ی بین تعداد نورون‌ها و لایه‌های استفاده شده در شبکه‌ی عصبی و میانگین خطای مطلق پیش‌بینی غلظت نمک (MAE) با استفاده از سه باند آبی، قرمز و سبز. ٦٤

شکل ۱۹. تغییرات مکانی و زمانی غلظت نمک (برحسب پی‌پی‌تی) در دریاچه‌ی ارومیه از اُکتبر ۲۰۱۸ (مهر ۱۳۹۷) تا سپتامبر ۲۰۱۹ (شهریور ۱۳۹۸). ٦٧

شکل ۲۰. نقشه‌های کلاس بندی شده‌ی غلظت نمک (برحسب پی‌پی‌تی) در دریاچه‌ی ارومیه از اُکتبر ۲۰۱۸ (مهر ۱۳۹۷) تا سپتامبر ۲۰۱۹ (شهریور ۱۳۹۸) ٦٨

شکل ۲۱. میانه و ضریب تغییرات غلظت نمک از اُکتبر ۲۰۱۸ (مهر ۱۳۹۷) تا سپتامبر ۲۰۱۹ (شهریور ۱۳۹۸) در بخش‌های شمالی، جنوبی و کل دریاچه‌ی ارومیه. ۷۰

شکل ۲۲. هیستوگرام تغییرات فصلی غلظت نمک در دریاچه‌ی ارومیه ۷۲

شکل ۲۳. رابطه‌ی هیسترسیس میان حجم آب و غلظت نمک دریاچه‌ی ارومیه از اُکتبر ۲۰۱۸ (مهر ۱۳۹۷) تا سپتامبر ۲۰۱۹ (شهریور ۱۳۹۸). ۷٤

شکل ۲٤. مقایسه میزان بازتاب دریافتی از سطح زمین در محل داده‌های میدانی استفاده شده در این پژوهش در باندهای مشابه سنتینل-۲ و لندست-۸. ..... ۷۵

شکل ۲۵. نقشه‌های بستر دریاچه‌ی ارومیه در سال‌های (A) ۲۰۱۵ و (B) ۲۰۲۰. ..... ۷۷

شکل ۲٦. توزیع مکانی نقاط انتخاب شده به منظور استخراج ارتباط غلظت نمک و عمق بسیمتریک دریاچه‌ی ارومیه. ۷۸

شکل ۲۷. ارتباط میان تغییرات غلظت نمک و تغییرات عمق آب در دریاچه‌ی ارومیه در محل نقاط شکل ۲٦ ..... ۷۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۱. مهم‌ترین مطالعات انجام شده در خصوص استخراج غلظت متغیرهای کیفی با خواص نوریِ فعال وغیر فعال، با استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای ۸

جدول ۲. غلظت نمک (SC) اندازه‌گیری شده در ۱۳۰ نقطه‌ی دریاچه‌ی ارومیه در بازه‌ی ۱۰ تا ۱٤ آوریل ۲۰۱۹ (۲۱ تا ۲۵ فروردین ۱۳۹۸) و ۱٦ جولای ۲۰۱۹ (۲۵ فروردین ۱۳۹۸). ۲۳

جدول ۳. تاریخ شروع و پایان فعالیت هر یک از ماهواره‌های لندست ۲۵

جدول ٤. مشخصات باندهای تصاویر ماهواره‌ی لندست-۸ ..... ۲٦

جدول ۵. مشخصات باندهای تصاویر ماهواره‌ی سنتینل-۲ ..... ۲۷

جدول ٦. بهترین ترکیب باند انتخاب شده برای تخمین غلظت نمک در دریاچه‌ی ارومیه توسط الگوریتم ژنتیک دوهدفه ۵۵

جدول ۷. مقایسه دقت سه مدل بکارگرفته شده در تخمین غلظت نمک ۵۷

جدول ۸. میانگین غلظت نمک تخمین زده شده در دریاچه‌ی ارومیه از اُکتبر ۲۰۱۸ (مهر ۱۳۹۷) تا سپتامبر ۲۰۱۹ (شهریور ۱۳۹۸) با استفاده از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی و با استفاده از داده‌های دو ماهواره‌ی سنتینل-۲ و لندست-۸ به عنوان داده‌ی ورودی. ٦۹

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه و اهمیت تحقیق

تغییرات زمانی و مکانی غلظت نمک در آب‌های شور نقش مهمی را در مطالعات هیدرودینامیکی و کیفیت آب ایفا می‌کند. مطالعات زیادی به تأثیر اساسی غلظت نمک و تغییرات آن بر تنوع زیستی و حیات آبزیان [1]، تغییرات بستر آب [2] و نرخ تبخیر [3] در آب‌های شور اشاره کرده اند. حیات آبزیان و تنوع زیستی در آب‌های شور وابسته به غلظت نمک آب است. تمامی موجودات آبزی آب شور تنها در محدوده شوری خاصی قادر به ادامه حیات هستند به نحوی که نزدیک شدن غلظت نمک به محدوده مجاز یا فرا رفتن از آن سبب آسیب جدی به فرآیند تولید مثل یا حتی مرگ و انقراض گونه‌های آبزی می‌شود. علاوه بر مخاطرات افزایش غلظت نمک، حیات در آب‌های شور به کاهش غلظت نمک نیز حساس است و کم‌تر شدن غلظت نمک از محدوده مجاز نیز زمینه ساز کاهش جمعیت آبزیان می‌شود [4, 5]. علاوه بر تأثیر مستقیم خارج شدن غلظت نمک از محدوده‌ی مجاز آبزیان، این فرآیند سبب آسیب پذیرتر شدن آبزیان در مقابل آلاینده‌ها و سموم موجود در آب نیز می‌شود؛ به عنوان مثال، میزان سمّی بودن[۱] و کشندگی آفت کش‌ها و حشره‌کش‌های وارد شده به آب با افزایش غلظت نمک بیش‌تر می‌شود [1]. به علاوه، تغییرات غلظت نمک می‌تواند زمینه‌ساز حضور آبزیان غیر بومی در یک محیط آبی شود که سبب تغییر در زنجیره‌ی غذایی طبیعی جانوران آبزی می‌شود. تغییر زنجیره غذایی طبیعی در بسیاری از موارد مخرب بوده و زمینه را برای نابودی برخی گونه‌های موجود در زنجیره غذایی فراهم می‌کند [6]. علاوه بر موارد ذکر شده، تغییرات غلظت نمک در دریاچه‌های فوق شور علت و معلول تغییرات تراز ارتفاعی بستر آب نیز هست. انحلال بستر نمکی در دریاچه‌های فوق شور که عمدتاً به تغییرات حجم آب و شدت جریان‌های آبی وابسته است باعث افزایش غظت نمک در آب می‌شود. در مقابل، در فرآیند ترسیب که غلظت نمک در آب به حالت اشباع می‌رسد، غلظت نمک در آب کاهش می‌یابد. فرآیند ترسیب و انحلال شکل بستر را در دریاچه‌های فوق شور دائماً تغییر می‌دهد که سبب

[۱] Toxicity

تغییرات دائم منحنی‌های سطح–حجم–ارتفاع در این پهنه‌های آبی می‌شود. با در نظر گرفتن موارد مذکور، کنترل تغییرات غلظت نمک در آب‌های فوق شور اطلاعات ارزشمندی درخصوص پدیده‌ی ترسیب و انحلال و تغییرات بستر آب فراهم می‌کند [2, 7]. غلظت نمک از عوامل تعیین کننده بر میزان تبخیر از آب‌های شور نیز هست که یکی از مهم‌ترین راه‌های اتلاف آب از محیط‌های آبی بخصوص محیط‌های آبی محصور است. در حقیقت علاوه بر سطح آب، دمای هوا، دمای سطح آب و سرعت باد، غلظت نمک نیز تأثیر بسزایی بر میزان تبخیر از آب دارد. افزایش غلظت نمک عامل افزایش فعالیت یونی[1] است که باعث کاهش شدت تبدیل از فاز مایع به فاز گازی می‌شود. به علاوه، افزایش غلظت نمک سبب افزایش چگالی آب می‌شود که به نوبه خود عاملی بر کاهش تبخیر است [3].

داده‌برداری میدانی دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین رویکرد به منظور ارزیابی غلظت یک متغیر کیفی است. روش‌های مختلفی به منظور ارزیابی غلظت نمک تاکنون معرفی و به‌کارگرفته شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از دستگاه‌های سی‌تی‌دی[2] اشاره نمود که با استفاده از خواص رسانایی و دمای آب غلظت نمک را با استفاده از روابط تجربی کالیبره شده محاسبه می‌کنند. در کنار این ابزار سنجنده‌های نوری هستند که با استفاده از خواص نوری آب، غلظت نمک موجود در آب را محاسبه می‌کنند [8]. با این وجود، استفاده از روش‌های داده‌برداری میدانی دارای محدودیت‌های اساسی‌ای است که سبب عدم کارایی این روش در ارزیابی‌های در مقیاس وسیع و در بازهای زمانی منظم می‌شود. مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های میدانی عبارتند از: (۱) هزینه‌ی بالا، (۲) عدم امکان داده‌بردای در مقیاس‌های بزرگ و بازه‌های زمانی کوتاه و منظم، (۳) عدم امکان داده‌بردای در مناطق دور افتاده (نظیر بخش‌های مرکزی اقیانوس‌ها و دریاها)، (٤) عدم امکان ارزیابی متغیرهای کیفی مد نظر در مکان‌ها و زمان‌هایی که در آن‌ها داده‌برداری انجام نشده است. با وجود محدودیت‌های موجود در داده برداری میدانی نیاز به روش‌هایی که با داده‌برداری کافی بتوان تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای کیفی را ارزیابی نمود وجود دارد. در این راستا، روش‌های مبتنی بر سنجش از دور به شکل گسترده‌ای در دو دهه‌ی گذشته به‌کارگرفته شده‌اند. فناوری سنجش از دور ماهواره‌ای به دلیل پوشش در

[1] Ion activity

[2] CTD (conductivity-temperature-depth)

مقیاس جهانی با تفکیک‌های مکانی[1] مختلف (۱۰ متر تا بیش از ۱۵۰۰۰ متر)، تصویر برداری منظم با تفکیک-های زمانی[2] مختلف (۵ روز تا بیش از ۳۰ روز)، دسترسی رایگان و فراهم سازی داده در فرکانس‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی، امکان ارزشمندی را به منظور مطالعات کیفی آب فراهم نموده است. اطلاعات تهیه شده از سطح آب در باندهای مختلف امواج الکترومغناطیسی ارتباط مستقیم با ترکیبات شیمیایی موجود در آب دارند که این ترکیبات مشخص کننده‌ی متغیرهای کیفی مختلف هستند [9].

۱-۲ اهداف پژوهش

در این پژوهش کاربرد ساختار مبتنی بر هوش مصنوعی و سنجش از دور در تخمین غلظت نمک در دریاچه ارومیه ارزیابی می‌شود. به طور کلی اهداف زیر در این پژوهش پیگیری می‌شوند:

- بررسی تغییرات مکانی و زمانی غلظت نمک در دریاچه ارومیه از مهرماه ۱۳۹۷ تا مهر ماه ۱۳۹۸.
- بررسی تأثیر پل میانگذر شهید کلانتری بر اختلاط آب میان بخش‌های جنوبی و شمالی دریاچه و توزیع غلظت نمک در شمال و جنوب میانگذر.
- بررسی الگوی تغییرات غلظت نمک با تغییرات حجم آب در دریاچه‌ی ارومیه.
- بررسی حساسیت خطای الگوریتم پیش‌بینی غلظت نمک نسبت به تغییرات عمق آب در دریاچه‌ی ارومیه.

۱-۳ روش تحقیق و نوآوری پژوهش

در این پژوهش یک ساختار مبتنی بر هوش مصنوعی تطبیقی[3] ارائه شده است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های میدانی محدود، قادر به تخمین غلظت نمک در آب‌های شور است. این ساختار دارای دو بخش اصلی است که بخش اول یک الگویتم بهینه سازی دوهدفه‌ی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است. وظیفه‌ی بخش اول انتخاب ترکیب باندهای بهینه برای تخمین غلظت نمک است به نحوی که خطای پیش‌بینی غلظت نمک و تعداد باندهای استفاده شده برای پیش‌بینی کمینه شود. در بخش دوم، الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی، اَنفیس و برازش خطی چند متغیره برای تخمین غلظت نمک با استفاده از داده‌های میدانی

[1] Spatial resolution

[2] Temporal resolution

[3] Adaptive Artificial Intelligence

(به عنوان داده‌های آموزشی) و ترکیب باندهای انتخاب شده در بخش اول به‌کارگرفته می‌شوند و پس از مقایسه‌ی دقت این مدل‌های مختلف غلظت نمک با دو ماهواره‌ی سنتینل-۲ و لندست-۸ و با استفاده از دقیق‌ترین مدل محاسبه می‌شود.

نوآوری این پژوهش شامل دو مورد است: (۱) افزایش تعداد ورودی‌ها به یک مدل یادگیری ماشین لزوماً سبب افزایش دقت مدل نمی‌شود بلکه سبب پیچیده‌تر شدن مدل و افزایش احتمال یادگیری افراطی (بیش یادگیری)[۱] مدل یادگیری ماشین می‌شود. در این پژوهش به منظور رفع این مشکل و انتخاب تعداد ورودی‌های بهینه، مدل یادگیری‌ماشین با یک مدل فرا ابتکاری[۲] جست‌وجوی تصادفی[۳] که از تئوری بهینه‌سازی ژنتیک به منظور جست و جوی هوشمند برای یافتن ترکیب ورودی‌های (باندهای ماهواره‌ای) بهینه استفاده می‌کند ترکیب شده است. (۲) بکارگیری ساختار پیشنهاد شده در این پژوهش برای اولین بار اطلاعاتی در خصوص الگوهای تغییرات غلظت نمک در دریاچه‌ی ارومیه از جمله وجود یک رابطه‌ی هیسترسیس میان تغییرات غلظت نمک و حجم آب را نمایان ساخت.

۱-٤ فرضیات پژوهش

در این پژوهش به منظور استخراج تغییرات مکانی و زمانی غلظت نمک در دریاچه‌ی ارومیه فرضیات زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

- تغییرات طیفی درونسالی در دریاچه‌ی ارومیه محدود است و الگوی موجود میان غلظت نمک و میزان بازتاب امواج الکترومغناطیسی در زمان‌های متناظر با داده برداری میدانی، قابل استفاده برای کل سال است.
- ارتباط میان بازتاب امواج الکترومغناطیسی و غلظت نمک در سراسر با یک مدل قابل توصیف است.
- فاصله‌ی زمانی موجود میان زمان ثبت تصویرهای ماهواره‌ای و داده برداری میدانی قابل اغماض است و در این فاصله غلظت نمک دریاچه نسبت به مقادیر ثبت شده توسط داده‌های میدانی تغییری نداشته‌است.

---

[۱] Overtraining

[۲] Meta heuristic

[۳] Stochastic searching

فصل دوم: مرور ادبیات فنی

۲-۱ مقدمه

ارزیابی متغیرهای کیفی آب همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است و استانداردهای مختلفی در خصوص مقدار مجاز و نحوه‌ی اندازه‌گیری متغیرهای کیفی مختلف در آب‌های مختلف و توسط سازمان‌های مختلفی تدوین شده است. تأثیر مستقیم متغیرهای کیفی آب بر سلامت انسان و حیوانات و نیز آسیب‌های زیست محیطی آب‌های آلوده بر اهمیت مطالعات کیفی آب افزوده است. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت آب استفاده شده است که به مرور زمان و با پیشرفت فناوری، این روش‌ها دقیق‌تر و جامع‌تر شده‌اند. در میان روش‌های استفاده شده برای بررسی کیفیت آب‌های سطحی، امروزه سنجش از دور کاربرد ویژه‌ای در مطالعات کیفی آب پیدا کرده است. این فناوری تاکنون در مطالعات زیادی به شکل موفقیت آمیزی بکار گرفته شده است که تحول بزرگی در مطالعات کیفی آب‌های سطحی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بوجود آورده است. در این فصل ابتدا تقسیم‌بندی مطالعات سنجش از دور آب بر اساس نوع سنجنده‌ی بکارگرفته‌شده تشریح می‌شود. در ادامه تقسیم‌بندی متغیرهای کیفی از منظر خواص نوری و ذرات فعال و غیر فعال نوری در آب ارائه می‌شود. در نهایت به رویکرد های مختلف موجود در مدل‌سازی کیفیت آب با استفاده از فناوری سنجش از دور ماهواره‌ای پرداخته می‌شود.

۲-۲ تقسیم‌بندی مطالعات کیفی از منظر نوع سنجنده

از منظر نوع سنجنده‌ی استفاده شده، روش‌های سنجش از دور به دو دسته‌ی کلی سنجنده‌های هوایی[۱] (هواپیمایی) و سنجنده‌های فضایی[۲] (ماهواره‌ای) تقسیم‌بندی می‌شوند. در سنجش از دور به کمک سنجنده‌های هوایی، از سنجنده‌های متناسب با کاربرد مورد نیاز که به هواپیما متصل می‌گردند استفاده شده و عملیات تصویربرداری انجام می‌پذیرد. بنابراین، این امکان وجود دارد که در هر مطالعه از سنجنده‌ی متناسب با آن نیاز مطالعه استفاده شود که سبب افزایش دقت نتایج حاصل از کاربرد تصاویر دریافتی می‌شود. علاوه بر آن، امکان

---

۱ Airborne

۲ Spaceborne

پرواز هواپیما در زیر ابرها و در ارتفاعات کم باعث می‌شود تا تصاویر دچار اختلال[۱] کم‌تری شوند. به علاوه هر زمان که نیاز به مطالعه باشد این هواپیماها می‌توانند به پرواز درآیند و تصویربرداری کنند. در کنار مزایای ذکر شده برای روش‌های هوایی، این روش‌ها روش‌های بسیار پر هزینه‌ای هستند؛ بنابراین فقط در موارد نیاز به انجام مطالعات خاص، استفاده از این روش‌ها توجیه‌پذیر است. هزینه‌ی بسیار بالای استفاده از این نوع سنجنده ها سبب شده مطالعات محدودی با استفاده از این ابزار تاکنون انجام شود [10, 11].

در عمده‌ی مطالعات سنجش از دور در حوزه‌ی تخمین متغیر های کیفی آب از سنجنده‌های فضایی استفاده شده است. هزینه‌ی بسیار اندک و امکان دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای در هر مکان، قابلیت دستیابی به دقت مکانی و زمانی مناسب و سهولت استفاده، این نوع سنجش را بسیار کارآمد کرده است. با این وجود، سنجنده-های فضایی تنها در زمان‌های خاصی از یک نقطه تصویربرداری می‌کنند و در مواقع ابری و شرایط جوی نامساعد، اطلاعات کارآمدی جهت مطالعات کیفی فراهم نمی‌کنند. در مطالعاتی که مطرح خواهد شد سنجنده‌هایی همچون MODIS، SeaWIFS، MERIS، Landsat MSS، Landsat TM، Landsat OLI، Sentinel-2، GOCI، Aquarius، SMOS و SMAP تاکنون درتخمین متغیرهای کیفی آب استفاده شده‌اند و نتایج بدست آمده توسط آن‌ها گواه بر قدرت و کاربردی بودن این ابزار است.

۲-۳ تقسیم‌بندی متغیرهای کیفی آب از منظر خصوصیات نوری

به طور کلی متغیرهای کیفی آب از منظر خصوصیات نوری به دو دسته ذرات فعال نوری[۲] و ذرات غیرفعال نوری[۳] تقسیم بندی می‌شوند. ذرات فعال نوری شامل کلروفیل[۴]، مواد معلق[۵] و مواد محلول آلی رنگی[۶] می‌شود. سایر متغیرهای کیفی نیز به عنوان ذرات غیر فعال نوری به شمار می‌روند. متعاقباً از منظر سنجش از دور، آب های سطحی به دو دسته آب‌های نوع اول[۷] و آب‌های نوع دوم[۸] تقسیم‌بندی می‌شوند. آب‌های نوع اول آب‌هایی هستند که غلظت ذرات فعال نوری در آن‌ها کم است و آب‌های نوع دوم آب‌هایی هستند که غلظت

---

۱ Noise

۲ Optically active substances

۳ Optically non-active substances

۴ Chlorophyll

۵ Suspended Solids

۶ Colored Dissolved Organic Matters (CDOM)

۷ Case I waters

۸ Case II waters

ذرات فعال نوری در آن‌ها در حد بالایی قرار داد. آب‌های نوع دوم تحت عنوان آب‌های کدر[1] نیز در ادبیات فنی نام برده می‌شوند [14–12].

اساس سنجش از دورِ کیفیت آب بررسی میزان بازتاب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های مختلف (اثر انگشت طیفی[2]) است. به عبارت دیگر، املاح موجود در آب که به عنوان متغیرهای کیفی اندازه‌گیری می‌شوند در مقادیر مختلف، تغییرات مشخصی را در خواص طیفی آب بوجود می‌آورند. به دلیل جذب بالای نور توسط ذرات فعال نوری غلظت بالای این ذرات سبب جذب بالای امواج الکترومغناطیسی می‌شود و بازتاب بسیار ضعیفی توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای از این آب‌ها دریافت می‌شود که سنجش از دور کیفیت آب را با عدم قطعیت بیش‌تری همراه می‌کند. به عنوان مثال، غلظت بالای مواد معلق خواص طیفی کلروفیل را کمرنگ می‌کند به نحوی که تشخیص کلروفیل با دقت کم‌تری امکان‌پذیر می‌شود. بنابراین در آب های نوع دوم به دلیل اندرکنش پیچیده میان ذرات فعال نوری تعیین متغیرهای کیفی آب تاکنون با موفقیت کم‌تری نسبت به آب‌های نوع اول همراه بوده است [12].در عمده‌ی مطالعات انجام شده در سنجش از دور کیفیت آب به تعیین غلظت مواد فعال اپتیکی پرداخته شده است [15]. لازم به ذکر است که در ادبیات فنی به حد مشخصی از ذرات فعال نوری برای مرزی‌بندی میان آب‌های نوع اول و دوم اشاره نشده است؛ با این حال، عمدتاً آب‌های ساحلی، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها، آب‌های نوع دوم (کدر) به شمار می‌روند[16].

به منظور افزایش دقت تخمین غلظت متغیرهای کیفی درآب‌های نوع دوم، ماتسوشیتا و همکاران[3] [13] الگوریتم تجزیه‌ی طیفی[4] را به منظور تخمین غلظت کلروفیل ارائه کردند. این الگوریتم قادر بود با دقت مناسبی غلظت کلروفیل را در دریاچه‌ای با کدورت بالا در ژاپن محاسبه کند. کدورت بالا، سبب می‌شود آب به عنوان آب نوع دوم تلقی شود که سنجش از دور کیفیت آب در این پهنه‌های آبی با چالش بیش‌تری همراه است. در روش تجزیه طیفی فرض بر آن است که طیف دریافتی توسط ماهواره یک ترکیب خطی از ترکیبات اصلی آب است که در دریاچه‌ی مطالعه شده این ترکیبات شامل آب خالص، مواد معلق و کلروفیل است. برای تعیین این رابطه خطی از آزمایش تانک[5] آبی مطابق با جزئیات ارائه شده در مرجع [12] استفاده می‌شود. در نهایت حاصل الگوریتم تجزیه‌ی طیفی، ضریب تجزیه‌ی کلروفیل برای هر پیکسل است. در حقیت از

[1] Turbid waters

[2] Spectral signature

[3] Matsushita et al.

[4] Spectral Decomposition

[5] Tank experiment

آنجاکه در آب‌های نوع دوم وجود ذرات فعال نوری سبب تضعیف بروز خواص طیفی کلروفیل در میزان بازتاب سطحی از آب می‌شود در این روش به جای استفاده از بازتاب سطحی در مدل‌سازی از ضریب تجزیه هر پیکسل برای محاسبه‌ی غلظت کلروفیل استفاده می‌شود. با وجود آن که استفاده از این الگوریتم توسط ماتسوشیتا و همکاران [13] سبب افزایش دقت تخمین کلروفیل در آب‌های نوع دوم شد، ضعف اساسی این روش فرض وجود رابطه‌ی خطی میان بازتاب کلی و ترکیبات آب است که در واقعیت این موضوع برقرار نیست. از طرف دیگر کارایی این روش برای محاسبه‌ی غلظت متغیرهای دیگری به غیر از کلروفیل در هاله‌ای از ابهام است و تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. جدول زیر نشان دهنده‌ی مطالعات کلیدی گذشته در خصوص تعیین متغیرهای کیفی مختلف با استفاده از سنجش از دور است.

جدول ۱. مهم‌ترین مطالعات انجام شده در خصوص استخراج غلظت متغیرهای کیفیِ با خواص نوریِ فعال وغیر فعال، با استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای.

نام متغیر کیفی	نام متغیر کیفی به اختصار	واحد	مرجع
کلروفیل-آ	CHL-a	mg/l	[17–19]
عمق سکچی	SDD	m	[20–22]
دمای آب	T	˚C	[23–25]
مواد محلول آلیِ رنگی	CDOM	mg/l	[26–28]
کربنِ آلیِ کل	TOC	mg/l	[29, 30]
کربنِ آلیِ محلول	DOC	mg/l	[31, 32]
کل مواد معلق	TSM	mg/l	[33–35]
کدورت	TUR	NTU	[18, 36]
نمک	SAL	mg/l/PSU/ppt	[20–24]
فسفر	TP	mg/l	[42, 43]
فسفات	PO_4	mg/l	[44]
اکسیژن محلول	DO	mg/l	[45]
اکسیژن مورد نیاز شیمیایی	COD	mg/l	[18, 46, 47]

نام متغیر کیفی	نام متغیر کیفی به اختصار	واحد	مرجع
اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی	BOD	mg/l	[18, 36]
هدایت الکتریکی	EC	s/cmμ	[48, 49]
آمونیاک نیتروژن	NH_3-N	mg/l	[48– 50]

۲-٤ رویکردهای تعیین متغیرهای کیفی آب توسط سنجش از دور

ذرات مختلف موجود در آب می‌توانند نور رسیده از سوی خورشید به آب را جذب، پخش یا بازتاب کنند؛ به همین دلیل کیفیت آب ارتباط تنگاتنگی با خواص نوری آب دارد که توسط تصاویر بدست آمده از سنجش از دور قابل استخراج هستند [21–17].

به طور کلی دو رویکرد برای تخمین متغیرهای کیفی آب به کمک سنجش از دور وجود دارد که شامل روش‌های تحلیلی و روش‌های تجربی است. هدف از روش‌های تحلیلی، به‌کاربردن مستقیم خواص نوری ذرات تشکیل دهنده‌ی آب در محاسبه‌ی غلظت متغیر مدنظر است. تئوری اساسی استفاده از خواص نوری برای تعیین ترکیبات یک ماده آن است که یک ماده با ترکیبات شیمیایی مشخص و بسته به میزان وجود هر یک از ترکیبات، خواص نوری منحصر به فردی دارد که با مطالعه این خواص می‌توان به ترکیبات و میزان هرکدام پی‌برد. هرچند، استفاده از این رویکرد به دلیل پیچیدگی‌های خواص نوری مواد و همچنین تأثیر متقابل و پیچیده‌ی مواد مختلف روی خواص نوری یکدیگر عملاً با فناوری ماهواره‌ای حاضر به سختی امکان‌پذیر است. سنجنده‌های ماهواره‌ای از فاصله‌ی حدود ۷۰۰ کیلومتری از سطح زمین تصویر برداری می‌کنند و فناوری سنجنده‌های نوری استفاده شده تا امروز دقتی را که یک طیف سنج از تفکیک خواص طیفی یک ماده در آزمایشگاه ارائه می‌کند را ندارند [22, 23]. این پیچیدگی‌ها سبب شده تاکنون مطالعه‌ای از این رویکرد برای تعیین متغیرهای کیفی آب با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای استفاده نکند.

در روش‌های تجربی، هدف نهایی بدست آوردن یک ارتباط میان داده‌های سنجش از دور و غلظت متغیر بدست آمده از مطالعات میدانی است. این ارتباط از طریق روش‌های آماری‌ای همچون برازش رابطه یا روش‌های نوین‌تری همچون یادگیری ماشین انجام می‌گیرد. در روش تجربی ابتدا در نقاطی محدود، متغیر کیفی مدنظر به صورت میدانی اندازه‌گیری می‌شود؛ سپس تصاویر ماهواره‌ای متناظر با نزدیک ترین زمان ممکن به زمان نمونه‌گیری پردازش می‌شوند. حاصل این پردازش ساخت مدلی است که بین داده‌های سنجش

از دور برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای و غلظت متغیر کیفی ارتباط برقرار می‌کند [14]. عمده‌ی مطالعات تاکنون از این رویکرد برای تعیین متغیرهای کیفی به کمک سنجش از دور استفاده کرده‌اند.

۲-۵ روش مدل‌سازی تجربی غلظت نمک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

به منظور مدل‌سازی تجربی غلظت نمک با استفاده از سنجش از دور سه رویکرد کلی تاکنون در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. رویکرد نخست به عنوان رویکردی مؤثر در مناطق ساحلی و مصب‌ها بکار گرفته شده است. مطالعات پیشین ثابت کرده‌اند که در این نواحی خواص نوری آب به شدت تحت تأثیر مواد آلی موجود در آب است [60]. از این رو در مطالعات پیشین رابطه‌ی قدرتمندی میان میزان جذب مواد محلول آلی رنگی با غلظت نمک در مناطق ساحلی و مصب‌ها مشاهده شده است [27–25]. در این روش محاسبه‌ی غلظت نمک شامل دو مرحله است: (۱) در ابتدا داده‌های میدانیِ شامل غلظت نمک و میزان جذب مواد محلول آلی رنگی از پهنه‌ی آبی تهیه می‌شوند. میزان جذب توسط مواد محلول آلی رنگی متغیری از جنس عکس واحد طول است که نشان‌دهنده‌ی میزان نفوذ نور در آب تا جذب شدن کامل در آب است. مشخص است هرچه غلظت مواد محلول ارگانیک رنگی در آب بیش‌تر شود میزان جذب نور توسط آن‌ها بیشر می‌شود و نور قادر به طی کردن مسافت کم‌تری در آب است. در عمل محاسبه‌ی غلظت مواد آلی رنگی در آب امر پیچیده‌ای است از این‌رو از میزان جذب مواد محلول آلی رنگی به عنوان نمایان‌گری از غلظت آن‌ها استفاده می‌شود. پس از اندازه‌گیری میدانی دو متغیر مذکور، رابطه‌ای میان میزان بازتاب امواج الکترومغناطیسی دریافت شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای و میزان جذب محلول آلی رنگی استخراج می‌شود که به وسیله‌ی آن برای تمامی منطقه‌ی مورد مطالعه میزان جذب مواد محلول آلی رنگی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تولید می‌شود. (۲) رابطه‌ی میان میزان جذب مواد محلول آلی رنگی و غلظت نمک در داده‌های میدانی بررسی می‌شود. از این رابطه برای محاسبه‌ی غلظت نمک با استفاده از تصاویر میزان جذب مواد محلول آلی رنگی (تولید شده در مرحله اول) استفاده می‌شود.

ثابت شده است که ارتباط میان میزان جذب توسط مواد محلول آلی رنگی و غلظت نمک تنها در مناطق ساحلی و مصب‌ها برقرار است. در حقیقت این رابطه در محدوده‌ی شوری ۵ تا ۳۵ پی‌پی‌تی[۱] برقرار است که این مقدار غلظت نمک عمدتاً در مناطق ساحلی و مصب‌ها دیده می‌شود. لازم به ذکر است که در این رویکرد

[۱] Part Per Thousand (ppt)