

مدلسازی و پیش‌بینی سری زمانی شاخص‌های خشکسالی با روش‌های یادگیری ماشین به منظور مدیریت مخاطرات (مطالعه موردی: منطقه شرقی اصفهان)



ایمان خسروی*

دانشجوی دکتری سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

مهدی آخوندزاده (makhonz@ut.ac.ir)

استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران
محمد مهدی خوشگفتار (mm.khoshgftaar@ut.ac.ir)

دانشجوی دکتری سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۸ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۳۰)

چکیده

خشکسالی پدیده‌ای پیچیده و مخاطره‌آمیز در کل جهان به‌ویژه ایران به‌شمار می‌آید. تعیین و پیش‌بینی شدت خشکسالی می‌تواند در مدیریت مخاطرات ناشی از آن مؤثر باشد. برای تعیین شدت خشکسالی از شاخص‌هایی استفاده شده که به دو دسته کلی شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دور تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین شاخص هواشناسی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و در شاخص‌های سنجش از دور نیز، شاخص‌های مستخرج از پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص دمای سطح زمین (LST) بوده است. برای مدلسازی رفتار سری زمانی این شاخص‌ها و همچنین پیش‌بینی مقادیر آینده آنها، روش‌های یادگیری ماشین توانسته‌اند کارایی زیادی از خود نشان دهند. این مقاله نیز قصد دارد کارایی چهار روش مهم یادگیری ماشین یعنی شبکه عصبی (NN)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات (LSSVM) و همچنین یک سیستم فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) را برای مدلسازی شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دور منطقه شرقی اصفهان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ و پیش‌بینی مقادیر آنها در ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ بررسی کند. داده‌های به‌کاررفته، سری زمانی NDVI و LST ماهواره مادیس و سری زمانی داده میزان بارش ماهواره TRMM منطقه مطالعاتی است. در ابتدا، سری زمانی شاخص‌های وضعیت گیاهی (VCI) و شاخص پوشش گیاهی دمایی (IVX) از داده‌های NDVI و LST و سری زمانی SPI-دوازده‌ماهه از داده‌های مقدار بارش ساخته شده است. در ادامه رفتار این سه سری زمانی، توسط هر چهار روش یادشده مدلسازی شده که مطابق با نتایج، SVR بیشترین کارایی و NN کمترین کارایی را در بین این روش‌ها داشته است. سرعت عملکرد LSSVM و سپس ANFIS نیز بیشتر از سایر روش‌ها بوده است. در پایان، با طراحی یک سیستم استنتاج فازی (FIS)، وضعیت خشکسالی در دو فصل بهار و تابستان ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ بررسی شده که نتایج نشان از نرمال بودن وضعیت بهار در همه سال‌ها به‌جز دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۱ و خشکسالی شدید تابستان در همه سال‌ها به‌جز چهار سال ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ داشته است. در واقع این پژوهش قصد داشت به‌کمک روش‌های یادگیری ماشین و استفاده از سری زمانی داده‌های سنجش از دور و هواشناسی و تلفیق آنها در یک سیستم FIS، راهکاری را برای مدلسازی رفتار خشکسالی و پیش‌بینی و پایش آن در آینده ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: اصفهان، شاخص‌های خشکسالی، سنجش از دور، مدلسازی سری زمانی، مخاطرات، یادگیری ماشین.

مقدمه

خشکسالی از مخاطرات طبیعی و اجتناب‌ناپذیری است که از دیرباز، در پهنه وسیع کشورهای مختلف به‌ویژه کشورهای مستقر در مناطق گرم و خشک به‌کرات وقوع یافته و می‌یابد. طبق مطالعات و آمارهای گزارش‌شده، ایران نیز با توجه به وضعیت جغرافیایی و اقلیمی خود با میانگین بارشی معادل یک‌سوم متوسط کل جهان و همچنین یک‌سوم آسیا، در وضعیت مناسبی از لحاظ تأمین آب قرار ندارد [۷]. این مسئله، بیانگر احتمال وقوع خشکسالی‌ها و متعاقباً مخاطرات جانبی بیشتری در آینده نسبت به گذشته است. به‌همین دلیل، تشخیص وقوع خشکسالی، تعیین شدت، پایش و پیش‌بینی آن می‌تواند برای برنامه‌ریزی در استفاده از منابع موجود و کاهش مخاطرات ناشی از این بلای طبیعی مؤثر باشد. هرچند که، تشخیص این پدیده و پایش دائمی آن یکی از مشکلات اصلی سازمان‌های مرتبط با این پدیده است [۱۲]. خشکسالی براساس زمان وقوع به سه نوع هواشناسی، کشاورزی و آبی تقسیم می‌شود [۳۳]. مهم‌ترین نوع، یعنی خشکسالی هواشناسی حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی است که برای کمی‌سازی شدت آن از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که به دو دسته کلی شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور تقسیم می‌شود [۷]. رایج‌ترین شاخص هواشناسی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و در سنجش‌از دور نیز شاخص‌های مرتبط با شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص دمای سطح زمین (LST) است [۷، ۱۲]. برخی از مطالعات، تنها با سری زمانی شاخص‌های هواشناسی به‌ویژه SPI [۸، ۱۱]، برخی دیگر تنها با سری زمانی شاخص‌های سنجش‌از دور همچون NDVI، شاخص وضعیت گیاهی (VCI) و شاخص پوشش گیاهی-دما (TVX) [۲۷، ۲۹، ۳۶، ۳۸] و مطالعاتی نیز با تلفیق سری زمانی شاخص‌های سنجش‌از دور و شاخص‌های هواشناسی وضعیت خشکسالی را پایش کرده‌اند [۱، ۵، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۲۲، ۳۰، ۳۱، ۳۲]. دسته سوم مطالعات نشان از پتانسیل قوی تلفیق داده‌های سنجش‌از دور و داده‌های زمینی در پایش وضعیت خشکسالی داشته است. همچنین برای اینکه بتوان مقادیر آینده این شاخص‌ها را پیش‌بینی کرد، باید رفتار سری زمانی آنها را مدلسازی کرد. بیشتر مطالعات از روش‌های رگرسیون ساده خطی تک‌متغیره یا چندمتغیره برای این کار بهره برده‌اند. با این حال، سری زمانی این شاخص‌ها معمولاً رفتار غیرخطی دارند و بنابراین به روش‌های کاراتری در یادگیری ماشین نیاز است که امکان مدلسازی رفتار این‌گونه شاخص‌ها را داشته باشد. به‌عنوان مثال در برخی پژوهش‌ها از شبکه عصبی (NN) [۲، ۹، ۱۵، ۱۹، ۲۴، ۲۶]، در برخی دیگر از رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) [۲۸، ۱۴] و در یک مقاله [۳۵] از یک سیستم فازی مبتنی بر شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) برای مدلسازی و تجزیه و تحلیل سری زمانی شاخص‌های

خشکسالی استفاده شده است. در یک تحقیق [۲۳]، دو روش NN و SVR، در تحقیقی دیگر [۱۳] دو روش SVR و ANFIS و در نهایت در یک تحقیق [۲۰] دو روش ANFIS و NN در پایش وضعیت خشکسالی با یکدیگر مقایسه شده است. در یک مقاله تقریباً جدید [۳۴] نیز از مقایسه روش ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات (LSSVM) با NN برای تخمین شدت خشکسالی استفاده شده است. تمام این مقالات، بر کارایی روش‌های بالا در مدلسازی رفتار غیرخطی سری زمانی شاخص‌های خشکسالی اذعان دارند.

تاکنون پژوهشی برای مقایسه دقت و سرعت عملکرد همه روش‌های مذکور در مدلسازی هم شاخص‌های هواشناسی و هم شاخص‌های سنجش‌ازدور انجام نگرفته است. از این رو این مقاله قصد دارد با به‌کارگیری چهار روش NN، SVR، LSSVM و ANFIS رفتار سری زمانی دو دسته شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دور را مدلسازی کند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، سری زمانی داده NDVI و LST ماهواره مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و سری زمانی داده مقدار بارش ماهواره TRMM متعلق به منطقه شرقی اصفهان در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ است. توسط این داده‌ها، سه شاخص TVX، VCI (سنجش‌از دور) و SPI-دوازده‌ماهه (هواشناسی) برای پایش خشکسالی ساخته می‌شود. همچنین پس از مدلسازی توسط روش‌ها، مقادیر آینده هر سه شاخص تا دو سال آینده (۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) پیش‌بینی می‌شود. در ادامه، مقاله با طراحی یک سیستم استنتاج فازی (FIS) براساس شاخص‌های TVX، VCI و SPI-دوازده‌ماهه، وضعیت خشکسالی منطقه مطالعاتی را بررسی می‌کند. در واقع در این پژوهش قصد داریم با به‌کارگیری روش‌های مهم یادگیری ماشین و استفاده از سری زمانی داده‌های سنجش از دور و هواشناسی و تلفیق آنها در سیستم FIS، راهکاری را برای مدلسازی رفتار خشکسالی و پیش‌بینی و پایش وضعیت آن در حال و آینده ارائه دهیم.

منطقه و داده‌های مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، منطقه شرقی اصفهان با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۹ دقیقه و ۴۰،۱۱ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۴۵ دقیقه و ۴۷،۰۴ ثانیه شرقی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۹،۶۶ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۵۹ دقیقه و ۵۲،۲۴ ثانیه شمالی است. استان اصفهان دارای پنج زیرمنطقه اقلیمی شامل زیرمنطقه نیمه‌بیابانی، استپی، نیمه‌استپی، کوه‌های مرتفع و جنگل‌های خشک است که منطقه مطالعاتی این پژوهش در بخش نیمه‌بیابانی قرار دارد. در این منطقه، فقط برخی گونه‌های مقاوم به خشکی استقرار یافته‌اند. مناطق پست این

منطقه را اراضی شور تشکیل می‌دهد. همچنین سطح شایان توجهی از آن را ناهمواری‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی ویژه به خود اختصاص داده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش نیز شامل محصولات ماهواره مادیس شامل MOD11 و MOD13 و داده‌های میزان بارش تهیه‌شده توسط ماهواره TRMM است. MOD11 شامل LST و زمان‌های روز و شب، ارزیابی کیفیت، زمان مشاهدات، زوایای دید و ضریب گسیل تخمینی از باندهای ۳۱ و ۳۲ از انواع پوشش زمینی است [۳]. MOD13 نیز شامل داده‌های NDVI است. MOD11 و MOD13 به صورت ۰/۰۱ درجه (معادل تقریباً ۱/۱ کیلومتر) و داده‌های مقدار بارش به صورت ۰/۲۵ درجه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ و در مقیاس ماهانه از سایت ناسا [۳۷] دانلود شده است.

روش‌شناسی

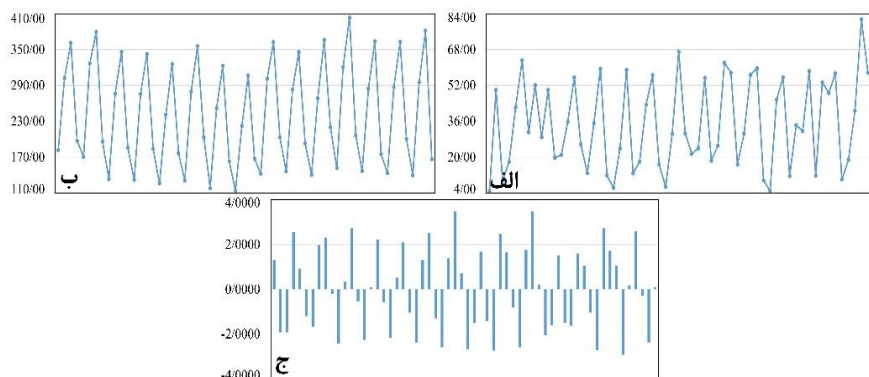
ساخت شاخص‌های خشکسالی

در این بخش، ابتدا با استفاده از داده‌های منطقه مطالعاتی، سری زمانی مربوط به شاخص‌های خشکسالی VCI، TVX و SPI-دوازده‌ماهه ساخته می‌شود. روابط ۱ تا ۳ به ترتیب فرمول این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

$$TVX = \frac{LST}{NDVI} \quad (2)$$

$$SPI = \frac{P - \mu(P)}{\sigma(P)} \quad (3)$$



شکل ۱. نمودارهای سری زمانی فصلی منطقه شرقی اصفهان از زمستان سال ۲۰۰۰ تا پاییز سال ۲۰۱۴ برای شاخص‌های (الف) VCI، (ب) TVX، (ج) SPI-دوازده‌ماهه.

در رابطه ۱، $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ ، به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار $NDVI$ در یک دوره زمانی بلندمدت و $NDVI_i$ مقدار $NDVI$ در ماه کنونی است. در رابطه ۳ نیز P مقدار بارش، $\mu(P)$ میانگین مقدار بارش برای هر دوره زمانی و $\sigma(P)$ انحراف معیار است. با احتساب میانگین P برای یک دوره دوازده‌ماهه، شاخص SPI-دوازده‌ماهه ساخته می‌شود. دلیل استفاده از این سه شاخص پرستفاده بودن آنها در مقالات خشکسالی است. نمایش سری زمانی این شاخص‌ها در مقیاس ماهانه نمی‌تواند برآورد خوبی از خشکسالی داشته باشد. بنابراین، سری زمانی هر سه شاخص در مقیاس فصلی بازسازی می‌شوند. شکل‌های ۱-الف تا ج، نمودار سری زمانی فصلی این سه شاخص متعلق به منطقه شرقی اصفهان بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد.

روش‌های مدلسازی

مدلسازی سری زمانی سه شاخص خشکسالی ساخته‌شده در این پژوهش توسط رابطه ۴ انجام می‌گیرد. در این رابطه، ورودی‌ها مشاهدات گام‌های قبلی (تا گام p) هر یک از شاخص‌ها $(x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}, W)$ و خروجی، مقدار پیش‌بینی شده x_t است.

$$x_t = g(x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}, W) + \varepsilon_t \quad (4)$$

برای این پژوهش p برابر ۴ در نظر گرفته می‌شود، زیرا سری‌های زمانی در مقیاس فصلی مرتب شده است و بازه‌های زمانی به صورت چهار بار یک‌بار تکرار می‌شود (زمستان، بهار، تابستان و پاییز). با این رابطه، مقدار هر شاخص در هر گام تابعی از مقادیر چهار گام قبلی آن شده است، یعنی $x_t = g(x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, x_{t-4}, W) + \varepsilon_t$. در این رابطه، g تابعی است که توسط مدل مورد نظر تعیین می‌شود. مدل‌هایی که در این پژوهش استفاده می‌شود، NN، SVR، LSSVM و ANFIS است. روش جلورونده سه‌لایه با تک‌لایه پنهانی با الگوریتم آموزش پس‌انتشار خطا (BP) به‌عنوان مدل NN به‌کار می‌رود [۶]. برای مدل SVR از یک هسته تابع پایه‌ای شعاعی گوسی (RBF) استفاده می‌شود که معمولاً از انعطاف بیشتری نسبت به سایر هسته‌ها همچون چندجمله‌ای و سیگموئید برخوردار است [۲۵]. مدل LSSVM که از ایده کمترین مربعات به‌جای برنامه‌نویسی درجه دو بهره می‌برد مشابه با SVR نیز از یک هسته RBF استفاده می‌کند [۴]. مدل ANFIS یک سیستم فازی تاکاگی-سوچنو-کانگ (TSK) به‌صورت ساختار شبکه‌ای جلورونده با روش آموزش پیوندی (آموزش لایه اول توسط BP و آموزش لایه چهارم توسط تخمین کمترین مربعات) به‌کار می‌برد [۱۰].

پیااده‌سازی، ارزیابی و بررسی نتایج

برای مدل‌سازی سری زمانی شاخص‌ها توسط چهار روش، داده‌ها به سه بخش آموزشی (برای ساخت مدل)، اعتبارسنجی (برای انتخاب مدل بهینه) و آزمایشی (ارزیابی مدل) تقسیم می‌شوند. در این پژوهش، ۸۰ درصد اولیه داده‌ها به صورت آموزشی، ۱۰ درصد دوم به صورت اعتبارسنجی و ۱۰ درصد بقیه به صورت آزمایشی در روند مدل‌سازی شرکت می‌کند. برای ارزیابی مدل‌ها نیز از سه کمیت رابطه ۵ یعنی متوسط خطای مطلق (MAE)، متوسط خطای اربیبی (MBE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده می‌شود [۱۸، ۳۹]:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^m |t_i - y_i|}{m}, \quad MBE = \frac{\sum_{i=1}^m t_i - y_i}{m}, \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (t_i - y_i)^2}{m}} \quad (5)$$

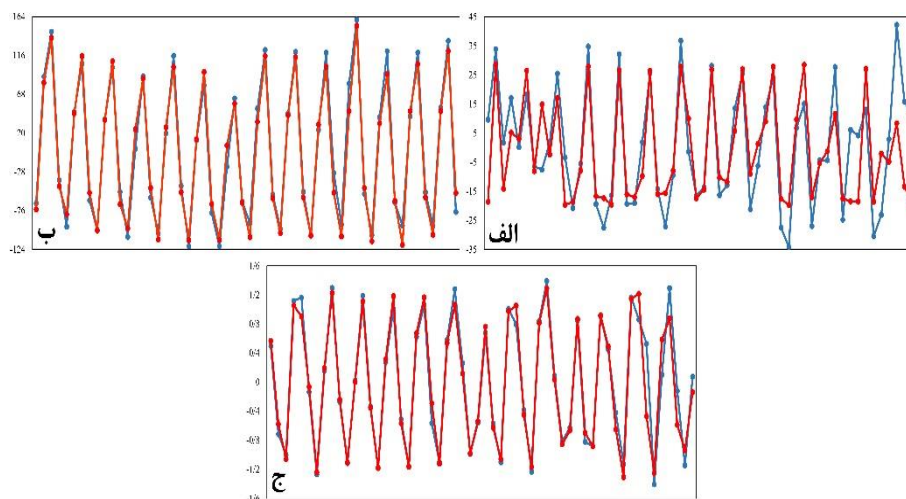
که در آنها، t_i مقدار هدف، y_i مقدار خروجی برآورد شده از مدل و m نیز تعداد مشاهدات است. نتایج ارزیابی حاصل از مدل‌سازی هر چهار روش روی سه شاخص مذکور در جدول ۲ آورده شده و به صورت نمونه نیز نمودار مدل‌سازی سه شاخص در شکل‌های ۲-الف تا ج مشاهده می‌شود.

جدول ۱. ارزیابی نتایج مدل‌سازی شاخص‌های VCI، TVX و SPI-دوازده‌ماهه با روش‌های NN، SVR، LSSVM و ANFIS (کل: کل داده‌ها، آز: آزمایشی)

روش	NN			SVR			LSSVM			ANFIS			کمیت	روش
	RMSE	MBE	MAE	RMSE	MBE	MAE	RMSE	MBE	MAE	RMSE	MBE	MAE		
کل	۲۰/۴۹	۱/۸۸	۱۳/۰۶	۳/۵۹	-۰/۶۴	۶/۶۳	۱۱/۲۱	-۱/۰۳	۱۴/۳۱	۹/۵۰	-۱/۶۸	۱۲/۶۶	کلیت	VCI
آز	۳۱/۱۴	-۹/۶۶	۱۷/۴۸	۸/۸۹	-۸/۸۹	۱۲/۰۶	۲۶/۷۲	-۱۳/۰۶	۲۸/۸۰	۲۴/۳۶	-۱۵/۹۲	۲۶/۰۶	آز	VCI
کل	۲۱/۴۳	۲/۸۸	۱۷/۳۰	۱۰/۳۴	-۲/۷۸	۱۲/۸۱	۱۵/۰۶	۰/۰۰	۱۹/۶۳	۸/۹۴	-۰/۹۶	۱۳/۳۲	کلیت	TVX
آز	۲۰/۰۰	۷/۱۹	۱۶/۴۴	۱۱/۴۷	-۲/۱۲	۱۳/۲۶	۱۳/۶۱	-۱/۲۰	۱۷/۰۱	۲۰/۷۷	-۸/۷۸	۲۳/۷۳	آز	TVX
کل	۱/۱۶	-۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۱۲	-۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۱۲	-۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۳۷	-۰/۰۷	۰/۵۷	کلیت	SPI
آز	۱/۲۴	-۰/۷۹	۰/۹۸	۰/۱۹	-۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۳۶	-۰/۰۸	۰/۳۸	۱/۱۰	-۰/۵۰	۱/۳۶	آز	SPI

مطابق با جدول ۲، خطای RMSE-کل شاخص‌های VCI، TVX و SPI-دوازده‌ماهه حاصل از مدل NN به ترتیب برابر با ۲۰/۴۹، ۲۱/۴۳، ۱/۱۶؛ مدل SVR برابر با ۶/۶۳، ۱۲/۸۱، ۰/۲۰؛ مدل LSSVM برابر با ۱۴/۳۱، ۱۹/۶۳، ۰/۲۱ و مدل ANFIS برابر با ۱۲/۶۶، ۱۳/۳۲، ۰/۵۷

شده است. همچنین خطای MAE-کل هر سه شاخص حاصل از مدل NN برابر با ۱۳/۰۶، ۱۷/۳۰، ۰/۹۵؛ مدل SVR برابر با ۳/۵۹، ۱۰/۳۴، ۰/۱۲؛ مدل LSSVM برابر با ۱۱/۲۱، ۱۵/۰۶، ۰/۱۲ و در نهایت مدل ANFIS برابر با ۹/۵۰، ۸/۹۴، ۰/۳۷ شده است. طبق این نتایج، SVR با کمترین RMSE-کل در هر سه شاخص و کمترین MAE-کل در دو شاخص VCI و SPI، بیشترین کارایی و NN با بیشترین RMSE-کل و بیشترین MAE-کل، کمترین کارایی را در مدلسازی داشته است. همچنین، مقادیر RMSE-آزمایشی و MAE-آزمایشی هر سه شاخص تولیدی توسط مدل SVR کمتر از مقادیر متناظر تولیدی از مدل‌های دیگر شده است که این نشان از دقت زیاد این مدل نیز دارد.



شکل ۲. نمودار مدلسازی شده شاخص‌های (الف) VCI توسط روش ANFIS، (ب) TVX توسط روش SVR، (ج) SPI-دوازده‌ماهه توسط روش LSSVM.

LSSVM دارای RMSE-کل و MAE-کل بالاتری نسبت به SVR در مدلسازی هر سه شاخص بوده، با این حال، MBE-کل (قدرمطلق آن) و MBE-آزمایشی شاخص TVX برای LSSVM کمتر از مقدار نظیر آن برای SVR شده که نشان می‌دهد مقادیر TVX تولیدی از LSSVM انحراف کمتری از مقادیر حقیقی آن نسبت به مدل SVR داشته است. همچنین، سرعت عملکرد LSSVM خیلی بیشتر از SVR شده است. آخرین مدل یعنی ANFIS نیز برخلاف NN یک جواب منحصر به فرد و عملکرد موفق‌تر و دقت بهتری نسبت به آن در مدلسازی کل شاخص‌ها داشته است. به علاوه RMSE-کل و RMSE-آزمایشی شاخص VCI و

RMSE-کل شاخص TVX تولیدی از ANFIS نسبت به LSSVM کمتر شده است و در SPI برعکس. همچنین MAE-کل و MBE-کل (قدرمطلق آن) شاخص TVX تولیدی از ANFIS (همانند LSSVM) کمتر از مقدار نظیر آن برای SVR شده است. در ضمن پس از LSSVM، سرعت عملکرد ANFIS در مدلسازی هر سه شاخص بیشتر از SVR بوده است.

پس از مدلسازی رفتار سری زمانی هر سه شاخص، مقادیر چهار فصل هر یک از شاخص‌ها برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ توسط هر چهار مدل این پژوهش پیش‌بینی می‌شود. جدول‌های ۲ تا ۴، مقادیر پیش‌بینی شاخص‌ها تنها در فصل‌های بهار و تابستان به‌منظور تعیین وضعیت خشکسالی منطقه مطالعاتی در آینده را ارائه می‌دهد.

جدول ۲. مقادیر پیش‌بینی شاخص VCI با چهار مدل این پژوهش در بهار و تابستان ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶

روش	NN		SVR		LSSVM		ANFIS	
	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶
سال	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶
بهار	۱۰/۸۲	۱۰/۹۱	۳۵/۶۶	۱۲/۲۱	۵۴/۵۷	۴۵/۰۹	۳۸/۳۵	۲۲/۷۲
تابستان	۳۰/۱۷	-۱۰/۹۸	۴۰/۶۶	۳۱/۱۴	۴۴/۵۶	۴۱/۸۷	۸۷/۶۵	۳۸/۳۵

جدول ۳. مقادیر پیش‌بینی شاخص TVX با چهار مدل این پژوهش در بهار و تابستان ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶

روش	NN		SVR		LSSVM		ANFIS	
	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶
سال	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶
بهار	۳۰/۱۵۷	۴۱۰/۳۶	۲۳۸/۴۵	۲۶۴/۷۲	۲۹۲/۴۲	۲۸۵/۳۲	۲۵۱/۴۷	۱۹۴/۹۶
تابستان	۳۰۹/۱۶	۱۴۸/۴۹	۲۹۵/۸۷	۳۲۹/۱۰	۳۶۶/۳۱	۳۶۱/۰۰	۲۶۱/۳۶	۲۸۱/۳۶

جدول ۴. مقادیر پیش‌بینی شاخص SPI با چهار مدل این پژوهش در بهار و تابستان ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶

روش	NN		SVR		LSSVM		ANFIS	
	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶
سال	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۶
بهار	-۰/۵۶	۱/۱۴	-۰/۴۵	-۰/۱۹	-۰/۵۵	۱/۹۰	-۰/۲۶	-۰/۳۶
تابستان	-۰/۸۵	۰/۰۰	-۰/۱۷	-۱/۱۳	-۱/۲۴	۱/۸۷	-۱/۰۳	-۱/۲۲

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی موضوع خشکسالی، یکی از مخاطرات طبیعی و موضوعات چالش‌برانگیز کشورمان ایران و مدلسازی شاخص‌ها و پایش وضعیت آن پرداخت. منطقه مطالعاتی، منطقه شرقی اصفهان و شاخص‌های خشکسالی به‌کارگرفته‌شده، سری زمانی فصلی سه شاخص VCI، TVX و SPI بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ بود. چهار روش مهم یادگیری ماشین NN، SVR، LSSVM و ANFIS برای مدلسازی رفتار این سری‌های زمانی به‌کار گرفته شد که در بین آنها SVR بیشترین کارایی و NN کمترین کارایی، همچنین LSSVM و پس از آن ANFIS بیشترین سرعت عملکرد را داشتند. سیستم FIS طراحی‌شده نیز با تعریف قوانین برای این سه شاخص، وضعیت خشکسالی منطقه مطالعاتی را بررسی کرد.

می‌توان ادعا کرد که این پژوهش با به‌کارگیری روش‌های مهم یادگیری ماشین و استفاده از سری زمانی داده‌های سنجش از دور و هواشناسی و تلفیق آنها در سیستم FIS، راهکاری را برای مدلسازی رفتار خشکسالی و پیش‌بینی و پایش وضعیت آن در حال و آینده ارائه داد که تاکنون در مطالعات قبلی مشاهده نشده است. به‌عنوان مثال، در مقاله‌ای، تنها از روش شبکه عصبی و تبدیلات موجک برای مدلسازی خشکسالی استفاده شده و از روش‌های کاراتری همچون SVR، LSSVM و ANFIS استفاده نشده بود [۲]. ضمن آنکه، از شاخص‌های سنجش از دور در آن بهره‌ای برده نشده بود. در مقابل، اگرچه در یکی از مقالات [۵] هم از شاخص‌های سنجش از دور و هم از شاخص‌های هواشناسی برای وضعیت خشکسالی استفاده کرده بود، تنها به روش مدل رگرسیون خطی و چندمتغیره اکتفا شده و از روش‌های یادشده استفاده نشده بود. همچنین در تحقیقی [۹] تنها با استفاده از شاخص‌های غیرسنجش از دور و متکی بر تنها شبکه عصبی، برای ساخت و تدوین یک شاخص ترکیبی برای خشکسالی تلاش شده بود. هیچ یک از این مقالات نیز از سیستم فازی برای تصمیم‌گیری در مورد وضعیت خشکسالی بهره نبرده بودند. ایده چارچوب فازی ارائه‌شده به‌منظور تعیین وضعیت و شدت خشکسالی با استفاده از ترکیب شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دور نیز از جمله نوآوری‌های این مقاله بود که البته باید در مطالعات آینده با چیدمان منطقی‌تر و بهتر از آن بهره‌برداری شود.

منابع

- [۱]. ابراهیم‌زاده، سجاد؛ بذرافشان، جواد؛ قربانی، خلیل (۱۳۹۲). امکان‌سنجی تشخیص تغییرات پوشش گیاهی مبتنی بر شاخص‌های زمینی و ماهواره‌ای خشکسالی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)، مجله هواشناسی کشاورزی، ج ۱، شماره ۱: ۳۷-۴۸.

- [۲]. ابریشم‌چی، احمد؛ مهدیخانی، حسین؛ تجریشی، مسعود (۱۳۸۵). توسعه مدل تلفیقی غیرخطی پیش‌بینی خشکسالی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و تبدیلات موجک، مطالعه موردی: زیرحوضه سد زاینده‌رود، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران.
- [۳]. آخوندزاده، مهدی (۱۳۸۴). تهیه نقشه‌های حرارتی سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری.
- [۴]. پویان‌فر، احمد؛ فلاح‌پور، سعید؛ عزیزی، محمدرضا (۱۳۹۲). رویکرد حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت تخمین رتبه اعتباری مشتریان بانک‌ها، مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، شماره ۱۷: ۱۵۸-۱۳۳.
- [۵]. جلیلی، شیدا؛ مرید، سعید؛ ضیائی‌ان فیروزآبادی، پرویز (۱۳۸۷). مقایسه عملکرد شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی در پایش خشکسالی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۳۹، شماره ۱: ۱۴۹-۱۳۹.
- [۶]. جویباری، یاسر (۱۳۹۳). تهیه نقشه ضریب گسیل و دما با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری.
- [۷]. سلیمانی، علی (۱۳۸۹). تحلیل خطرپذیری خشکسالی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری.
- [۸]. غفوریان، هادی؛ ثنائی‌نژاد، سیدحسین؛ داوری، کامران (۱۳۹۲). بررسی تعیین مناطق مناسب جهت پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ج ۲۸، شماره ۳: ۶۴۸-۶۳۹.
- [۹]. کارآموز، محمد؛ رسولی، کبیر؛ نظیف، سارا (۱۳۸۵). تدوین شاخص ترکیبی خشکسالی با استفاده از شبکه‌های عصبی، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران.
- [۱۰]. گل‌محمدی، محمدحسین؛ صفوی، حمیدرضا (۱۳۸۹). پیش‌بینی سری‌های زمانی تک‌متغیره هیدرولوژیکی با استفاده از سیستم فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

- [۱۱]. محمدیان، آزاده؛ کوهی، منصوره؛ آدینه‌بیگی، آرمان؛ رسولی، جواد؛ بذرافشان، بهاره (۱۳۸۹). مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI ، DI و PNI و پهنه‌بندی آنها (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ج ۱۷، شماره ۱: ۱۸۴-۱۷۷.
- [۱۲]. محمودی کهن، فرهاد (۱۳۸۹). مطالعه قابلیت شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای در پیش‌بینی و آشکارسازی خشکسالی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، گروه سنجش‌ازدور.
- [۱۳]. مرادی، نسرین؛ کمالی، امیرجلال؛ مرادی، مهدی (۱۳۹۲). مقایسه دو مدل SVM و $ANFIS$ در تخمین خشکسالی هواشناسی، اولین همایش ملی بهینه‌سازی مصرف آب، گرگان.
- [۱۴]. نیک‌بخت شهبازی، علیرضا؛ زهرایی، بنفشه؛ ناصری، محسن (۱۳۸۹). پیش‌بینی خشکسالی اقلیمی در حوضه سدهای تهران با استفاده از SVM ، چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران: ۴۰۶-۳۹۷.
- [15]. Barua, S., Perera, B.J.C., Ng, A.W.M., Tran, D., (2010). Drought Forecasting Using an Aggregated Drought Index and Artificial Neural Networks, *Journal of Water and Climate Change*, Vol 1, pp 193–206.
- [16]. Berhan, G., Hill, S., Tadesse, T., Atnafu, S., (2011), Using Satellite Images for Drought Monitoring: A Knowledge Discovery Approach, *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, vol 7(1), pp 135–153.
- [17]. Bhuiyan, C., Singh, R.P., Kogan, F.N., (2006). Monitoring Drought Dynamics in the Aravalli Region (India) Using Different Indices Based on Ground and Remote Sensing Data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (2006), pp 289–302.
- [18]. Chen, C. -C., Lin, C. -J. (2010). LIBSVM: A library for support vector machines. Available from: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>
- [19]. Dastorani, M.T., Afkhami, H., Borroni, B., (2011). Application of Artificial Neural Networks on Drought Prediction in Yazd (Central Iran), *Desert*, Vol 16, pp 39–48.
- [20]. Dastorani, M. T., Afkhami, H., Sharifidarani, H., Dastorani, M., (2010). Application of ANN and ANFIS Models on Dryland Precipitation Prediction (Case Study: Yazd in Central Iran), *Journal of Applied Sciences*, 10 (20), pp 2387–2394.
- [21]. Gebrehiwot, T., Van der Veen, A., Maathuis, B., (2011). Spatial and Temporal Assessment of Drought in the Northern Highlands of Ethiopia, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol 13, pp. 309–321.

- [22]. Jain, S.K., Keshri, R., Goswami, A., Sarkar, A., (2010). Application of Meteorological and Vegetation Indices for Evaluation of Drought Impact: A Case Study for Rajasthan, India, *Natural Hazards*, Vol 54, pp 643–656.
- [23]. Jalili, M., Gharibshah, J., Ghavami, S.M., Beheshtifar, M.R., Farshi, R., (2014). Nationwide Prediction of Drought Conditions in Iran Based on Remote Sensing Data, *IEEE Transactions on Computers*, Vol 63, No 1.
- [24]. Keskin, M.E., Terzi, O., Taylan, E.D., Kucukyaman, D., (2011). Meteorological Drought Analysis Using Artificial Neural Networks, *Scientific Research and Essays*, Vol 6, pp 4469–4477.
- [25]. Khosravi, I., Mohammad-Beigi, M., (2014). Multiple Classifier Systems for Hyperspectral Remote Sensing Data Classification, *Journal of the Indian Society Remote Sensing*, Vol 42, Issue 2, pp 423–428.
- [26]. Mishra, A.K., Desai, V.R., (2006). Drought Forecasting Using Feed-Forward Recursive Neural Network, *Ecological Modelling*, Vol 198, pp 127–138.
- [27]. Muthumanickam, D., Kannan, P., Kumaraperumal, R., Natarajan, S., Sivasamy, R., Poongodi, C., (2011). Drought Assessment and Monitoring Through Remote Sensing and GIS in Western Tracts of Tamil Nadu, India, *International Journal of Remote Sensing*, 32:18, pp 5157–5176.
- [28]. Nikhbakht Shahbazi, A., Heidarnejhad, M., (2012). Meteorological Drought Prediction in Karoon Watershed using Meteorological Variables, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol 3, No 9, pp 1760–1768.
- [29]. Orhan, O., Ekercin, S., Dadaser-Celik, F., (2014). Use of Landsat Land Surface Temperature and Vegetation Indices for Monitoring Drought in the Salt Lake Basin Area, Turkey, *The Scientific World Journal*, Vol 2014.
- [30]. Quiring, S. M., Ganesh, S., (2010). Evaluating the Utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for Monitoring Meteorological Drought in Texas, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (2010), pp 330–339.
- [31]. Rahimzadeh-Bajgiran, P., Omasa, K., Shimizu, Y., (2012). Comparative Evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for Water Stress Detection in Semi-Arid Regions of Iran, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68 (2012), pp 1–12.
- [32]. Rahmizadeh-Bajgiran, P., Shimizu, Y., Hosoi, F., Omasa, K., (2009). MODIS Vegetation and Water Indices for Drought Assessment in Semi-Arid Ecosystems of Iran, *J. Agric. Meteorol.* Vol 65, 4, pp 349–355.
- [33]. Rulinda Coco, M., (2007). Mining Drought from Remote Sensing Images, MSc thesis, Geo-information Science and Earth Observation.
- [34]. Sadri, S., Burn, D. H., (2012). Nonparametric Methods for Drought Severity Estimation at Ungauged Sites, *Water Resources Research*, Vol 48, pp 1–10.
- [35]. Shirmohammadi, B., Moradi, H., Moosavi, V., Taei Semiromi, M., Zeinali, A., (2013). Forecasting of Meteorological Drought Using Wavelet-ANFIS Hybrid Model for Different Time Steps (Case Study: Southeastern Part of East Azerbaijan Province, Iran), *Nat Hazards*, Vol 2013, No 69, pp 389–402.

-
- [36]. Song, X., Saito, G., Kodama, M., Sawada, H., (2004). Early Detection System of Drought in East Asia Using NDVI from NOAA AVHRR Data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 25, pp 3105–3111.
- [37]. www.neo.sci.gsfc.nasa.gov
- [38]. Zeng, L., Shan, J., Xiang, D., (2010). Monitoring Drought Using Multi-Sensor Remote Sensing Data in Cropland of Gansu Province.
- [39]. Zhang, X., Zhang, T., Young, A.A., Li, X., (2014). Applications and Comparisons of Four Time Series Models in Epidemiological Surveillance Data, *PLoS ONE*, Vol 9, Issue 2, pp 1–16.