

## **Predicting the Impact of Climate Conditions on the Economic Production of Iranian Provinces with The Approach of Random Forest Algorithm**

Lotfali Azari<sup>1</sup>

Aliakbar Naji Meidani<sup>2</sup>

Narges Salehnia<sup>3</sup>

### **Abstract**

The importance of climate as one of the human biological facts in the field of macro-economic and social issues has never been considered as much as today. Investigating the economic effects of climate change requires detailed analyzes at the national and local levels. Although there are several global studies that examine the economic impacts of climate change, so far limited studies have been conducted at local levels within countries, especially in the case of Iran. In this article, an attempt has been made to make a comprehensive analysis of the influence of the economic production of the country's provinces on climate change by using the new data set of the weather conditions of the country's provinces in the period from 2000 to 2020 through the random forest algorithm of machine learning subsets. Submitted. The results show that temperature and precipitation affect production in all provinces of the country. The forecast of production changes in Kerman, Semnan, North Khorasan, Ilam, Qazvin and Kohgiluyeh and Boyer Ahmad provinces is presented with more effectiveness than other provinces, and also the influence of precipitation compared to temperature is presented with higher importance in the model, while the importance of the influence of temperature on production in the warm months of the year are predicted to be less than the cold months of the year.

**Keywords:** *Climate change, Production, Economic Impact, Climate Impacts, Random Forest.*

**JEL Classification:** *E23, Q50, Q51, Q54.*

---

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate in Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Lotfaliazari@mail.um.ac.ir

<sup>2</sup> Associate Professor of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, naji@um.ac.ir.

<sup>3</sup> Associate Professor of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, n.salehnia@um.ac.ir.

## **Introduction**

Climate change is among the vital phenomena related to human societies, and its consequences have been demonstrated, particularly in recent decades, with varying intensity in many regions of the world. The importance of climate as one of the fundamental aspects of human life has never been as significant as it is today in macroeconomic and social issues. Analyzing climate change's economic impacts necessitates precise national and local analyses. Although numerous global studies examine the economic effects of climate change, limited research has been conducted at local levels within countries, especially concerning Iran. This article attempts to provide a comprehensive analysis of the susceptibility of the country's provincial economic production to climate change by utilizing a new dataset of weather conditions in the provinces from 2000 to 2020 through the random forest algorithm of machine learning subsets. Studies indicate a significant relationship between weather and sectors beyond agriculture, forestry, food security, tourism, health, fisheries, livestock, mining, and energy. Weather conditions can directly or indirectly impact various economic sectors, and their effect on economic activities is inevitable. However, research results regarding the impact of weather fluctuations face varied findings. Drought, with a higher recurrence than floods, poses more significant challenges to the economy on scales beyond local levels.

## **Methodology**

The main objective is to analyze the susceptibility of the country's provincial economic production to weather conditions. For this purpose, monthly weather data (temperature and precipitation) are used as features or independent variables, disaggregated by province, to extract the importance coefficients of provinces and the production's susceptibility to weather conditions by utilizing the random forest algorithm. Random forest is a machine learning algorithm that is easy to use and often provides outstanding results without tuning its parameters. Due to its simplicity and usability, this algorithm is considered one of the most widely used machine learning algorithms for classification and regression tasks. A decision tree is one of the most suitable and efficient tools for solving problems related to estimating target variables or classification. The decision tree typically divides the input space into separate regions and assigns a response value to each separated region. Combining decision trees forms an ensemble method known as random forest, which encompasses many learners referred to as base learners. This algorithm, proposed to address issues with decision trees, utilizes a combination of separate and independent decision trees for

modeling data and assessing the importance of variables. Random forest models have recently gained widespread popularity for economic predictions, demonstrating their capability as a competitive method for traditional forecasting models in some previous studies. For random forests to be valuable in predicting economic variables, they should test both model accuracy and the importance of unusual variables in prediction models, a feature inherent in random forests.

### **Results and Discussion**

According to the results, strong evidence was obtained that economic production in all provinces is affected by weather conditions (temperature and precipitation) in all months of the year with a time interval of up to two years, and there is a significant difference in this respect between the actual provinces. It was not observed in the four climates of the country. In addition, it was found that precipitation has a greater role and influence than temperature in this process. In addition, the effect of temperature on production in the cold months of the year is more predicted than in the hot months, and the occurrence of precipitation in the second half of the year (the first six months of the water year) is more important in this process than in the first half of the year. The results obtained from the educational data set in this research show that the sensitivity of production in Iran's provinces to climate change is lower than that of other regions. Also, although weather conditions affect production in the form of monthly data from up to two years ago, this field has been adapted over time. According to the findings of the research and based on the forecast, it was determined that the provinces of Kerman, Semnan, North Khorasan, Ilam, Qazvin, Kohgiluyeh, and Boyer-Ahmad in total have more than 75% of the coefficients of the importance of the influence of production on weather conditions, and other provinces also have different coefficients and in insignificant cases with a total of 25% of the total importance coefficients were located in the next categories. Also, the prediction results of the model show that at low levels of production growth, the impact of production on climate change will be higher, and at higher levels of production growth, this impact will be less.

فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد/ سال یازدهم/ شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۳/ صفحات ۳۴-۱

## پیش‌بینی تاثیر شرایط آب و هوایی بر تولید اقتصادی استان‌های ایران با رویکرد الگوریتم جنگل تصادفی<sup>۱</sup> لطفعلی آذری

دانشجوی دکترای علوم اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، [Lotfaliazari@mail.um.ac.ir](mailto:Lotfaliazari@mail.um.ac.ir)

علی اکبر ناجی میدانی\*

دانشیار اقتصاد دانشگاه فردوسی مشهد، [naji@um.ac.ir](mailto:naji@um.ac.ir)

نرگس صالح نیا

دانشیار اقتصاد دانشگاه فردوسی مشهد، [n.salehnia@um.ac.ir](mailto:n.salehnia@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

### چکیده

اهمیت اقلیم به عنوان یکی از واقعیت‌های زیستی بشر در حوزه مسائل کلان اقتصادی و اجتماعی، هیچ زمانی به اندازه امروز مدنظر نبوده است. بررسی اثرات اقتصادی تغییرات اقلیم نیازمند تحلیل‌های دقیق در سطوح ملی و محلی است. هرچند مطالعات جهانی متعددی وجود دارد که تأثیرات اقتصادی تغییرات آب و هوایی را مورد بررسی قرار می‌دهند، اما تاکنون مطالعات محدودی در سطوح محلی در داخل کشورها، به ویژه در مورد ایران، انجام شده است. در این مقاله سعی شده است تا با بهره‌گیری از مجموعه داده جدید از شرایط آب و هوایی استان‌های کشور در دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ از طریق الگوریتم جنگل تصادفی از زیرمجموعه‌های یادگیری ماشین، تحلیلی جامع از تاثیرپذیری تولید اقتصادی استان‌های کشور از تغییرات آب و هوایی ارائه شود. نتایج نشان می‌دهد که دما و بارش در همه استان‌های کشور بر تولید تاثیرگذارند. پیش‌بینی تغییرات تولید استان‌های کرمان، سمنان، خراسان شمالی، ایلام، قزوین و کهگیلویه و بویراحمد نسبت به سایر استان‌ها با تاثیرپذیری بیشتر ارائه شده و همچنین تاثیرگذاری بارش نسبت به دما با اهمیت بالاتری در مدل ارائه شده است ضمن اینکه اهمیت تاثیرگذاری دما بر تولید در ماه‌های گرم سال کمتر از ماه‌های سرد سال پیش‌بینی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر آب و هوا، تولید، تاثیرات اقتصادی، اثرات اقلیم، جنگل تصادفی.

**طبقه‌بندی JEL:** Q54، Q51، Q50، E23.

<sup>۱</sup> این مقاله برگرفته از رساله دکترای نویسنده اول در دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

\* نویسنده مسئول مکاتبات

## ۱- مقدمه

تغییر اقلیم از جمله پدیده‌های مهم و حیاتی مربوط به جوامع بشری است که با شدت کم و زیاد در بسیاری از مناطق جهان، پیامدهای خود را به ویژه در دهه‌های اخیر نشان داده است. تشدید اثرات گلخانه‌ای معمولاً به عنوان اصلی‌ترین عامل وقوع تغییرات اقلیمی درازمدت در کره زمین عنوان می‌شود و در این فرآیند، گازهای گلخانه‌ای نقش و تاثیرگذاری به‌سزایی دارند که البته تاثیرگذاری دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ )، قابل توجه است (هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). برخی آثار ملموس و پیامدهای تغییر اقلیم را در افزایش میانگین دمای جهانی، ذوب گسترده یخ‌های قطبی و یخچال‌های طبیعی، بالا آمدن سطح آب دریاها و رودخانه‌ها، زیر آب رفتن زمین‌های ساحلی، وقوع تغییرات در الگوی بارندگی مناطق مختلف، انقراض برخی گونه‌های گیاهی و جانوری، تاثیر گسترده بر کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی و مخاطرات مربوط به امنیت غذایی جستجو کرد (مک کیون و گاردنر<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹؛ لال<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹).

مطالعات نشان می‌دهند رابطه جدانشدنی بین آب و هوا و بخش‌هایی فراتر از کشاورزی، جنگل‌داری، امنیت غذایی، گردشگری، بهداشت، شبلات، دام، معدن و انرژی وجود دارد (لیمباخ و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷). شرایط آب و هوایی می‌تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر بخش‌های مختلف اقتصادی اثرگذار باشد و تاثیر آن بر فعالیت‌های اقتصادی اجتناب‌ناپذیر است. با این وجود، نتایج تحقیقات در مورد تاثیرگذاری نوسانات آب و هوا با یافته‌های متفاوتی مواجه است. خشکسالی با تکرارپذیری بیشتر از سیل، چالش‌های بزرگ‌تری را برای اقتصاد در ابعاد فراتر از سطوح محلی ایجاد می‌کند (نیانگینا و رویگو<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸). باوجود تفاوت در مقیاس خسارت توسط یک فاجعه معین و تکنیک برآورد مورد استفاده، شواهد متعددی این استدلال را تقویت می‌کند که تغییر آب و هوا منجر به تشدید نتایج اقتصادی می‌شود (کلاسیتو و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۴) در ایران نیز با وقوع خشکسالی‌های گسترده و پی‌درپی، تنش‌های آبی، محدودیت در

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

<sup>2</sup> Mc Keown & Gardner

<sup>3</sup> Lal

<sup>4</sup> Leimbach et al.

<sup>5</sup> Nyangena & Ruigu

<sup>6</sup> Colacito et al.

تأمین انرژی، پدیده ریزگردها، فرونشست زمین و غیره، شرایط اقلیمی یکی از محدودیت‌های اساسی رشد اقتصادی و متعاقب آن توسعه پایدار است. مطالعات نشان داده است که نوسانات دما و تغییرات شدید آب و هوا تأثیرات عمده‌ای بر فعالیت‌های اقتصادی دارند (دل و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴ و بورک و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵). در کارهای تحقیقاتی اولیه در مورد آب و هوا و رشد اقتصادی (ساجز و وارنر<sup>۳</sup>، ۱۹۹۷ و نوردهاوس<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶) از تحلیل رگرسیون مقطعی استفاده شده است که در معرض سوگیری متغیر حذف شده قرار دارد (شیانگ<sup>۵</sup>، ۲۰۱۶). این موضوع می‌تواند مشکل‌ساز باشد زیرا عملکرد اقتصادی به شدت به نهادهای سیاسی و اقتصادی وابسته است (نورث<sup>۶</sup>، ۱۹۸۷ و اسمقلو و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۵). در ادبیات جدیدتر مدل‌های رگرسیونی از اثرات ثابت برای بررسی روابط بین شوک‌های آب و هوایی، فعالیت انسانی و نتایج اقتصادی بر اساس داده‌های ترکیبی (پانل) استفاده می‌شود (دل و همکاران، ۲۰۱۴؛ کولستاد و مور<sup>۸</sup>، ۲۰۱۹). این مدل‌ها کمتر مستعد سوگیری متغیر حذف‌شده هستند زیرا ناهمگونی گروهی ثابت با زمان مشاهده‌نشده را کنترل می‌کنند. تاثیر منفی خشکسالی‌های مکرر یا سیل بر پس‌انداز، تاثیر منفی تغییرات بارندگی بر تشکیل سرمایه انسانی و توانایی واردات کالاهای سرمایه‌ای که موجب تاثیرگذاری از طریق فناوری می‌شود و عدم قطعیت نیز به دلیل اینکه عوامل تولید به ویژه کشاورزان تمایل به سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های کم‌خطر اما کم‌بازده در مواجهه با شرایط آب و هوایی غیرقابل پیش‌بینی دارند، از کانال‌های متعدد تاثیرگذار تغییرات آب و هوا بر رشد و تولید است. علاوه بر این، بارندگی با تأثیر مستقیم بر بهره‌وری سرمایه، بر رشد تأثیر می‌گذارد (علی<sup>۹</sup>، ۲۰۱۲). مدل‌های سولو-سوان<sup>۱۰</sup>، منکیو و همکاران<sup>۱۱</sup> و رمزی-کاس-

<sup>1</sup> Dell et al.

<sup>2</sup> Burke et al.

<sup>3</sup> Sachs & Warner

<sup>4</sup> Nordhaus

<sup>5</sup> Hsiang

<sup>6</sup> North

<sup>7</sup> Acemoglu et al.

<sup>8</sup> Kolstad & Moore

<sup>9</sup> Ali

<sup>10</sup> Solow-Swan Model

<sup>11</sup> Mankiew et al.

کوپمن<sup>۱</sup>، کاربردهای بی‌نظیری در سنجش تأثیر آب و هوا بر پیش‌بینی‌های رشد اقتصادی داشتند. نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که تغییرات آب و هوایی اثرات منفی بر رشد اقتصادی ایجاد می‌کند. سطوح مصرف و سرمایه‌گذاری از طریق استهلاک به صورت نامطلوب تحت تأثیر قرار می‌گیرند و باعث کاهش مصرف سرانه می‌شوند و در ادامه، تقاضای کل و سطح کلی تولید ناخالص داخلی نیز کاهش می‌یابد (لیمباخ و همکاران، ۲۰۱۷).

بروز تغییرات آب و هوا از جمله بارندگی بر رشد بلندمدت مناطقی که اقتصادشان به بارندگی وابسته است، تأثیر خواهد داشت. بر اساس مطالعات مسترز و مک‌میلیان<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) و مندلسون و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۱) پیش‌بینی می‌شود تغییرات اقلیمی تأثیرات متفاوتی بر انواع مناطق زیست‌محیطی داشته باشد و نتایج مثبتی را برای مناطق معتدل به همراه داشته باشد. تأثیر تغییر اقلیم حتی برای محصولات مختلف در یک منطقه کشاورزی با اقلیم مشابه نیز متفاوت خواهد بود (چانگ<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲). از نظر روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل‌های موجود در مورد تأثیر شرایط آب و هوایی بر تولید ناخالص داخلی، به دلیل نادیده گرفتن تأثیر شرایط متوسط آب و هوایی و یا غفلت از روند متغیرهای یادشده، مورد نقد واقع شده است (کلاوی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). به همین دلیل تمرکز اصلی در این مقاله، بهره‌گیری از مجموعه‌ای از داده‌های آب و هوایی با پوشش گسترده و مقیاس زمانی طولانی همراه با داده‌های تولید ناخالص داخلی استان‌های کشور از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ است که آب و هوای محلی و شرایط آن را با به‌کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی<sup>۶</sup> از زیرمجموعه‌های یادگیری ماشین<sup>۷</sup> به عنوان روشی جدید و کاربردی به منظور پُر نمودن شکاف تحقیقاتی یادشده فراهم آورد. در این مقاله پس از مقدمه، ادبیات موضوع و مبانی نظری به همراه پیشینه تحقیق ارائه می‌شود و در ادامه نسبت به طراحی الگوی مدل و تحلیل تجربی و نهایتاً نتایج و یافته‌های پژوهش اقدام می‌شود.

<sup>1</sup> Ramsey-Cass-Koopmans Model

<sup>2</sup> Masters & McMillan

<sup>3</sup> Mendolsohn et al.

<sup>4</sup> Chang

<sup>5</sup> Callaway et al.

<sup>6</sup> Random Forest

<sup>7</sup> Machine Learning

## ۲- ادبیات موضوع

درک بهتر از رابطه بین آب و هوا و نتایج اقتصادی هنگام پیش‌بینی اثرات گرمایش جهانی بسیار مهم است، زیرا سیاست‌گذاران به اطلاعات قابل اعتمادی در این زمینه نیاز دارند که براساس آن پاسخ‌های خود را مبتنی بر تغییرات آب و هوایی ارائه کنند (نیول و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). اغلب ادبیات موضوعی در حال گسترش مربوط به تاثیرات اقتصادی تغییر آب و هوا بر رابطه جهانی بین متغیرهای آب و هوایی و کل اقتصاد مانند تولید ناخالص داخلی سرانه متمرکز است که در این زمینه به عنوان مثال می‌توان به مطالعات دل و همکاران، ۲۰۱۲؛ بورک و همکاران، ۲۰۱۵؛ داسگوپتا و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷؛ پرتیس و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸؛ نیول و همکاران، ۲۰۲۱ اشاره داشت.

در مطالعات نظری، برای سنجش تاثیر تغییر آب و هوا بر تولید اقتصادی، کانال‌های متعددی عنوان می‌شود؛ نخست اینکه، تخریب اکوسیستم ناشی از تغییر شرایط آب و هوا از طریق برخی از پدیده‌ها مانند سیل، خشکسالی، فرسایش، انقراض گونه‌ها، مرگ و میر بر اثر شرایط نامساعد آب و هوا و سایر موارد شکل می‌گیرد که این وقایع حسب مورد می‌توانند آسیب‌هایی بر تولیدات اقتصاد وارد کنند. دوم اینکه، اختصاص بیشتر منابع برای جبران یا کاهش آثار زیانبار ناشی از گرمایش زمین، محدودیت مضاعف و کاهش منابع برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فیزیکی، سرمایه انسانی و یا تحقیق و توسعه را موجب می‌شود (باباتونده و آدافی<sup>۴</sup>، ۲۰۰۵). تاثیر بر پس‌انداز، تاثیر منفی بر تشکیل سرمایه انسانی و توانایی واردات کالاهای سرمایه‌ای از طریق فناوری، عدم قطعیت و تاثیر مستقیم بر بهره‌وری سرمایه، از دیگر کانال‌های تاثیرگذاری آب و هوا بر رشد و تولید عنوان شده است (علی، ۲۰۱۲).

تغییرات آب و هوا مقدار عرضه و تقاضای بسیاری از کالاها و خدمات را دستخوش تغییر قرار می‌دهد. تغییر در مقادیر عرضه و تقاضا در ادامه منجر به تغییر قیمت‌ها خواهد شد. براین اساس در بسیاری از موارد، تغییر آب و هوا بر رفاه مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و یا هر دو تاثیر خواهد گذاشت و هر دو را کاهش می‌دهد (لیمباخ و همکاران، ۲۰۱۷).

<sup>1</sup> Newell et al.

<sup>2</sup> Dasgupta et al.

<sup>3</sup> Pretis et al.

<sup>4</sup> Babatunde & Adefabi



کلاوی و همکاران، ۲۰۱۱). تأثیرات تغییر شرایط آب و هوایی به دو دسته تقسیم می‌شوند: تأثیرات رفاهی بر مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و سرمایه‌گذاران و تأثیر بر شاخص فعالیت‌های اقتصادی. تأثیرات رفاهی به تغییر در رفاه یا لذت مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و سرمایه‌گذاران ارتباط دارند که از تغییر در قیمت کالاها و میزان مصرف ناشی می‌شوند. این تغییرات شامل تغییر در درآمد مصرف‌کنندگان، بازده تولیدکنندگان و هزینه‌های سرمایه‌گذاران می‌شود. به طور کلی، افزایش قیمت کالاها و خدمات می‌تواند درآمد تولیدکنندگان را افزایش دهد، اما همزمان ممکن است رفاه مصرف‌کنندگان را نیز کاهش دهد. این تغییرات در رفاه اقتصادی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان، به عنوان آسیب‌های تغییر آب و هوا شناخته می‌شوند. (بورک و همکاران، ۲۰۱۵؛ دل و همکاران، ۲۰۱۴؛ کلاوی و همکاران، ۲۰۱۱). اندازه‌گیری تأثیرات تغییر آب و هوا بر شاخص‌های فعالیت‌های اقتصادی نیز از اهمیت بسیاری برخوردار است. این تأثیرات متعدد و متنوع ممکن است از نظر سیاست‌گذاران و مقامات برنامه‌ریزی بخش عمومی، از تأثیرات رفاهی نیز مهم‌تر به نظر بیاید. این تأثیرات مربوط با تغییر در فعالیت‌های اقتصادی است که با شاخص‌های مختلفی مانند تولید ناخالص داخلی، هزینه‌های مصرف‌کننده (مصرف)، سرمایه‌گذاری، هزینه‌های دولت و غیره اندازه‌گیری شوند.

در رویکردهای کلان، تغییر شرایط آب و هوایی از طریق تأثیرگذاری بر سطوح سرمایه‌گذاری و وضعیت نهادها و توانایی اقتصاد برای ارتقاء رشد و بهره‌وری تأثیرگذارند. از دیدگاه خرد، تغییرات آب و هوایی ممکن است از طریق عوامل گوناگون از جمله سلامت جامعه، تندرستی، و بهره‌وری نیروی کار بر سطح تولید تأثیرگذار باشند. این تأثیرات نشان‌دهنده ارتباط پیچیده بین تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های اقتصادی است (داسگوپتا و همکاران، ۲۰۱۷؛ نیول، پرست و سکستون، ۲۰۲۱).

در مدل‌های رشد سنتی که رشد طولانی‌مدت به دلیل تغییرات فن‌آوری برونزا ایجاد می‌شود (سولو<sup>۱</sup>، ۱۹۵۶؛ سوان<sup>۲</sup>، ۱۹۵۶؛ رمزی<sup>۳</sup>، ۱۹۲۸؛ کاس<sup>۴</sup>، ۱۹۶۶؛ کوپمنز<sup>۵</sup>، ۱۹۶۵)

<sup>1</sup> Solow

<sup>2</sup> Swan

<sup>3</sup> Ramsey

<sup>4</sup> Cass

<sup>5</sup> Koopmans

یا به دلیل پس‌انداز، سرمایه انسانی و تحقیق و توسعه (لوکاس<sup>۱</sup>، ۱۹۸۸؛ رومر<sup>۲</sup>، ۱۹۸۶؛ رومر، ۱۹۹۰؛ جونز<sup>۳</sup>، ۱۹۹۵؛ نلسون و فلیس<sup>۴</sup>، ۱۹۶۶)، با توجه به اینکه اقلیم بخشی از شرایط اولیه اقتصادها در نظر گرفته می‌شود، صرفاً با تأثیرات سطحی بر درآمد همراه است (منکیو و همکاران، ۱۹۹۲). دو نکته اساسی وجود دارد که در نظر گرفتن شرایط آب و هوا مانند تغییرپذیری دما و بارندگی در مدل‌های رشد را توجیه می‌کند. نخست اینکه، کشورهای در حال توسعه که اقتصادشان ارتباط گسترده‌ای با میزان بارندگی دارد، ممکن است تغییرات نامنظمی در بارندگی و از جمله رویدادهای شدید را در این زمینه تجربه کنند. چنین رخدادهای دوره‌ای توانایی شکل‌دهی به مسیر بلندمدت اقتصاد را در این کشورها دارند. دوم، اگر تغییر آب و هوا قریب الوقوع باشد، آنگاه تأثیری بیش از تأثیرات سطحی بر اقتصاد این کشورها خواهد داشت، زیرا چنین تغییراتی به جای اینکه یک شوک یک دوره‌ای باشد، ایجاد کننده یک فرآیند است (علی، ۲۰۱۲).

معمولاً به منظور سنجش اثرات تغییر شرایط آب و هوایی بر تولید و رشد اقتصادی مسیرهایی در نظر گرفته می‌شود که از طریق آن مسیرها، تبعات پیامدهای تغییر آب و هوا بر تخریب اکوسیستم، خسارات بر تاسیسات و سرمایه فیزیکی مورد سنجش قرار می‌گیرد. همچنین، شکل‌گیری برخی محدودیت‌ها در تخصیص منابع برای محو یا محدودسازی پیامدهای تغییر شرایط آب و هوایی، زمینه کاهش منابع موردنیاز برای سرمایه‌گذاری در سایر بخش‌ها و زیرساخت‌ها را فراهم می‌آورد. علاوه بر این در مواجهه با شرایط آب و هوایی غیرقابل پیش‌بینی، نااطمینانی به طور خاص در بخش کشاورزی شکل می‌گیرد با این توجیه که عوامل تولید بیشتر تمایل به سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های با خطر کمتر اما بازدهی بالاتر دارند. این موارد از کانال‌های عمده اثرگذار تغییر آب و هوا بر تولید است (باباتونده و آدفی، ۲۰۰۵؛ علی، ۲۰۱۲).

در تحلیل‌های اقتصاد خرد و کلان می‌توان تأثیراتی که تغییر شرایط آب و هوایی بر تولید دارد را تشریح کرد. تغییرات آب و هوا معمولاً قادر است بر سطح تولیدات، میزان سرمایه‌گذاری، وضعیت نهادها، سطح سلامتی جامعه، وضعیت نیروی کار و سایر موارد

---

<sup>1</sup> Lucas

<sup>2</sup> Romer

<sup>3</sup> Jones

<sup>4</sup> Nelson & Phelps

اثرگذار باشد (داسگوپتا و همکاران، ۲۰۱۷ و نیول، پرست و سکسون، ۲۰۲۱). علاوه بر این، تغییر شرایط آب و هوا بر برخی شاخص‌های اقتصادی نیز تاثیرگذار است که به طور نمونه این اثرگذاری را می‌توان در تاثیراتی که بازار بر رفاه عوامل اقتصادی - تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و سرمایه‌گذاران می‌گذارد، مشاهده کرد (کلاوی و همکاران، ۲۰۱۱).

با مبنا قراردادن مدل رشد رمزی برای نشان دادن تأثیرات اقتصادی متغیرهای آب و هوا بر سطح بهره‌وری کل اقتصاد و نرخ رشد بهره‌وری نیروی کار رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$Y = \varphi F(K, AL) \quad (1)$$

که  $Y$  میزان تولید ناخالص داخلی،  $F$  تابع تولید نئوکلاسیک (همگن از درجه یک)،  $K$  موجودی سرمایه،  $A$  بهره‌وری نیروی کار و  $L$  نیروی کار تعریف و البته مترادف کل جمعیت به‌کارگرفته می‌شود.  $\varphi$  خسارات اقتصادی بر روی بهره‌وری کل است که توسط نوردهاوس به شرح رابطه (۲) معرفی شده است.

$$\varphi \equiv \varphi(T) \quad (2)$$

این مشخصات، گسترده‌ترین شکل مدل‌سازی تأثیر تغییر آب و هوا بر تولید اقتصادی را نشان می‌دهد. در نتیجه، یک تغییر دائمی در میانگین دما ( $T$ )، باعث کاهش مصرف بلندمدت با ضریب  $(1 - \varphi)$  می‌شود. سایر متغیرها مانند بارش نیز مانند میانگین دما در مدل وارد می‌شوند. در مدل‌های رشد درون‌زا، گرمایش زمین می‌تواند از طریق انگیزه‌های تحقیق و نوآوری بر  $g_A$  تأثیر گذارد (بارو و سالای‌مارتین<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳؛ استرن<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳ و کلکول و ونز<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰).

رویکرد نظری انتخاب شده در این مقاله برای تحلیل تأثیر تغییر آب و هوا، مبتنی بر تمرکز روی کانال‌های رشد متداول،  $g_A \equiv g_A(T)$  است. تغییرات تولید تحت تأثیر متغیرهای زیر واقع می‌شود؛ (۱) تأثیر فوری (یا آنی) تغییر دما و بارش از طریق تأثیر در سطح بهره‌وری، (۲) تأثیر زودگذر (ناپایدار) بر نرخ رشد برای همگرایی به نرخ رشد بلندمدت اقتصاد (۳) نرخ رشد بلندمدت<sup>۴</sup> (کلکول و ونز، ۲۰۲۰). مدل استخراج شده به

<sup>1</sup> Barro & Sala-i Martin

<sup>2</sup> Stern

<sup>3</sup> Kalkuhl & Wenz

<sup>4</sup> Balanced Growth Path

این سبک، چارچوبی مشخص و روشن برای تعیین معادله رگرسیون رشد فراهم می‌آورد که منعکس‌کننده شرایط کلیدی در یک مفهوم گسسته زمانی است. به شرح رابطه (۳) جایی که  $\Delta T = \dot{T}$  نشان دهنده تغییرات دما و بارش بین دو دوره است:

$$g_y = G(T)\Delta T + F(T) \quad (3)$$

$$F(T) := \Psi(T) + \quad \text{و} \quad \Delta T = \dot{T} \quad \text{و} \quad G(T) := \frac{\phi'(T)}{\phi(T)} \quad \text{با} \quad g_A(T)$$

برای سنجش تاثیرگذاری متغیرهای آب و هوا بر تولید اقتصادی، الگوهای زیر مبتنی بر مطالعات قبلی انجام شده توسط دل و همکاران (۲۰۱۲)، بورک و همکاران (۲۰۱۵) و کلکول و ونز (۲۰۲۰) در مدل‌سازی مدنظر قرار گرفته است.

با توجه به اینکه مطالعات تغییر اقلیم یک رشته نسبتاً جدید است، تکنیک‌های تخمین مورد استفاده در این موضوع نیز به همان اندازه جدید هستند و با تازگی بیشتر در این حوزه تحقیقاتی روبه گسترش، پرکاربرد می‌شوند. با این حال، روش‌های شمارشی<sup>۱</sup> و پویا<sup>۲</sup> روش‌های تخمین رایج در این زمینه به شمار می‌روند. در حالی که رویکرد شمارشی اثرات بین زمانی را در نظر نمی‌گیرد، در رویکرد پویا، چند مدل با متغیرهای تغییر آب و هوا ترکیب می‌شوند که به عنوان عوامل برون‌زا که بر سطح خروجی تأثیر می‌گذارند، تلقی می‌شوند (لیمباخ و همکاران، ۲۰۱۷) در رهیافت پویا معمولاً تابع خسارت از طریق ورود در مدل‌های رشد مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ برای مثال، مدل‌های رشد سولو-سوان و رمزی-کاس-کوپمن بسیار زیاد (از جمله مطالعات بارو و سالای‌مارتین، ۲۰۰۳، استرن، ۲۰۱۳ و کلکول و ونز، ۲۰۲۰) و مدل منکیو، رومر و ویل هم البته کمتر از دو مدل اول (در مطالعات علی، ۲۰۱۲ و نیانگینا و رویگو، ۲۰۱۸)، مورد استفاده واقع شده است. با فرض ثابت ماندن نسبت پس‌انداز در هر سه مدل، تاثیرات منفی تغییر شرایط آب و هوا بر سطح تولید و متعاقب آن کاهش سرمایه‌گذاری مشاهده می‌شود. (دل و همکاران، ۲۰۱۲؛ هادرو<sup>۳</sup>، ۲۰۱۴؛ بورک و همکاران، ۲۰۱۵).

در بررسی‌های داخل یک کشور، اگر میانگین دما در مناطق داخلی یک کشور متفاوت باشد، ممکن است در این فرآیند اطلاعات مهم در مورد ناهنجاری‌های دمایی از بین

<sup>1</sup> Enumerative Approach

<sup>2</sup> Dynamic Approach

<sup>3</sup> Hadero

برود. به این معنا که واحدهای تولیدی مختلف در یک کشور می‌توانند در یک سال معین در معرض شوک‌های دمایی مختلف و متضادی قرار گیرند، به ویژه زمانی که کشور دارای وسعت زیادی است و مناطق آب و هوایی مختلفی در آن واقع است یا بیش از یک منطقه آب و هوایی دارد. بنابراین، تجمیع مطالعات و بررسی‌ها در سطح کشور می‌تواند عدم قطعیت در برآوردها را ایجاد کند و نشانه اثر واقعی آب و هوا را تغییر دهد (بورک و تانوتاما<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹).

فقدان یک مبنای نظری روشن در مورد رابطه بین آب و هوا و اقتصاد در هنگام تصمیم‌گیری در مورد نحوه تطبیق مدل با اشکال مختلف و فروض عملکردی متعدد رابطه بین اقلیم و نتایج اقتصادی، به محققان فضای زیادی برای طرح ایده‌ها و نظریات مختلف در این زمینه داده است. با این حال، این خلاء می‌تواند مشکل‌ساز باشد، زیرا آسیب اقتصادی پیش‌بینی‌شده ناشی از تغییرات آب و هوایی در آینده به مشخصات مدل اختصاص داده شده برای این منظور، بسیار حساس است (نیول و همکاران، ۲۰۲۱).

بسیاری از مطالعات انجام گرفته درخصوص سنجش تاثیرات اقتصادی تغییر شرایط آب و هوایی، از جمله مطالعات آدامز<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۰)، مندلسون، دینر و سن‌گی (۲۰۰۱)، دشنیز و گرین استون<sup>۳</sup> (۲۰۰۷) و گویتارس<sup>۴</sup> (۲۰۰۹) روی بخش کشاورزی تمرکز داشته و اثرات تغییر آب و هوا بر این بخش را مورد تحلیل قرار دادند. در برخی مطالعات برای سنجش تغییرات آب و هوا، از متغیرهای جغرافیایی نیز استفاده شده است، به عنوان نمونه آسمقلو، جونز و رابینسون (۲۰۰۱)، متغیرهای جغرافیایی را در قالب شاخص‌های نهادی لحاظ کردند. همین طور و در این چارچوب، رودریک و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۴)، نشان دادند موقعیت جغرافیایی مناطق و کشورها، یکی از مهم‌ترین متغیرهای توضیح دهنده توسعه اقتصادی است. ایرادی که بر این دسته از مطالعات وارد است، این است که اثرات تغییرات آب و هوا به صورت مستقیم اندازه‌گیری نشده است. با

<sup>1</sup> Burke & Tanutama

<sup>2</sup> Adams et al.

<sup>3</sup> Deschenes & Greenstone

<sup>4</sup> Guiteras

<sup>5</sup> Rodrik et al.

بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی اقلیم، فانکهاوزر و تول<sup>۱</sup> (۲۰۰۵)، مطالعاتی انجام دادند که بر اساس نتایج حاصل از این مطالعات، گرم شدن حدود ۳ درجه سانتی‌گراد دمای هوا، قادر خواهد بود حداقل به میزان ۱۵ درصد تولید ناخالص داخلی را تحت تاثیر منفی قرار دهد. دل و همکاران (۲۰۰۸) با مطالعه تغییرات آب و هوایی و رشد اقتصادی، ضمن بهره‌گیری از شواهد نیم قرن گذشته، از داده‌های مربوط به دما و بارش استفاده کردند. در نتیجه مطالعه آنان، کاهش درختان توجه رشد اقتصادی در کشورهای فقیر ناشی از وقوع پدیده تغییر آب و هوا پیش‌بینی شده است؛ با این توضیح که این پدیده، تاثیر درختان توجهی بر رشد اقتصادی کشورهای توسعه یافته نداشته است. همچنین کاهش سطح تولیدات کشاورزی و صنعتی و افزایش بی‌ثباتی سیاسی در کشورهای کمتر توسعه‌یافته از دیگر پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی در مطالعه آنان گزارش شده است. نتایج مطالعه دیگری از دل و همکاران (۲۰۱۲)، روی ۱۲۵ کشور جهان نشان می‌دهد افزایش دمای هوا، نه تنها موجب کاهش سطح تولید، بلکه به طور ویژه باعث کاهش رشد اقتصادی در کشورهای فقیر می‌شود. براساس نتایج این مطالعه، این تاثیر، خود را در کاهش مقدار تولیدات بخش‌های کشاورزی و صنعتی و همچنین بی‌ثباتی سیاسی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تحقیقات انجام گرفته توسط آبی‌دو و ادوسلا<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) و بر مبنای تجزیه و تحلیل اطلاعات اقتصادی و داده‌های آب و هوایی تعداد ۳۴ کشور آفریقایی در دوره زمانی بین سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۶۱ میلادی گزارش شده است که یک درصد افزایش درجه دما، کاهش ۰/۶۷ درصدی در ارزش تولید ناخالص داخلی را به همراه دارد.

در مطالعاتی دیگر، علی (۲۰۱۲) نسبت به بررسی تاثیر منفی نوسانات بارندگی بر رشد اقتصادی کشور اتیوپی اقدام کرده که نتیجه مطالعه وی مشابه پژوهش انجام شده توسط الشناوی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) در مورد کشور مصر، اثرات کاهشی بر رشد اقتصادی را نشان داده است. برای کشور برزیل نیز نتایج پژوهش انجام شده توسط تبالدی و بیودین<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) نشان داده است که آب و هوا بر تولید اقتصادی در مناطق

<sup>1</sup> Fankhauser & tol

<sup>2</sup> Abidoye & Odusola

<sup>3</sup> Elshennawy et al.

<sup>4</sup> Tebaldi & Beaudin

مختلف این کشور با تأثیر منفی همراه است. در مطالعاتی که توسط کلکول و ونز (۲۰۲۰) انجام گرفته است، مشخص نمودند که دما به طور قابل توجهی بر سطح بهره‌وری و رشد بهره‌وری تأثیرگذار است. در پژوهشی که توسط اولپر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۱)، برای استان‌های کشور ایتالیا، انجام گرفته است، آن‌ها دریافتند اثر تغییر آب و هوا تا پایان قرن، بر تولید ناخالص داخلی سرانه تأثیر ناچیزی خواهد داشت، در حالی که خسارات قابل توجهی بر بخش کشاورزی تحمیل خواهد کرد.

به منظور پرهیز از طولانی شدن بحث و برای تحلیل جامع‌تر روش‌شناختی و همچنین بسط و توسعه این روش‌ها، مطالعه موارد تکمیلی زیر برای بحث در مورد داده‌های آب و هوا در حالت کلی و سایر مقالات که یافته‌های مربوط به این زمینه تحقیقاتی را مورد بررسی قرار داده‌اند، پیشنهاد می‌شود؛ آفهامر<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) در مورد اثرات تغییرات آب و هوایی در حالت کلی، آفهامر و منصور<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) در مورد اثرات تغییرات آب و هوایی مربوط به انرژی، بورک، شیانگ و میگل (۲۰۱۵) در مورد اثرات تغییرات آب و هوایی بر درگیری و منازعات و کارلتون و شیانگ<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) و دل، جونز و اولکن (۲۰۱۴) در مورد کلیات و یافته‌های حاصل از ادبیات موضوع پیامدها و اثرات پدیده تغییر شرایط آب و هوا. همچنین بیای و دلایا<sup>۵</sup> (۲۰۱۴)، کرین دروش<sup>۶</sup> (۲۰۱۸)، یون<sup>۷</sup> (۲۰۲۱)، چاپمن و دسای<sup>۸</sup> (۲۰۲۱) و بوئیان<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعات اقتصادی خود، ضمن بهره‌گیری از داده‌های آماری سالانه متغیرها حسب مورد برای پیش‌بینی و یا طبقه‌بندی، با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و به طور خاص روش جنگل تصادفی، مطالعاتی انجام دادند که روند رو به توسعه‌ای از کاربرد جنگل تصادفی در مطالعات اقتصادی را ارائه می‌کند.

در ایران نیز مطالعاتی با تأکید بر تاثیرگذاری تغییرات آب و هوایی بر بخش کشاورزی

<sup>1</sup> Olper et al.

<sup>2</sup> Auffhammer

<sup>3</sup> Auffhammer & Mansur

<sup>4</sup> Carleton & Hsiang

<sup>5</sup> Biau & D'elia

<sup>6</sup> Crane-Droesch

<sup>7</sup> Yoon

<sup>8</sup> Chapman & Desai

<sup>9</sup> Bhuiyan et al.

انجام شده و تمرکز پژوهش‌ها بر متغیرهای این بخش قرار داشته است. هرچند مطالعاتی محدود از جمله توسط پناهی و اسمعیلی درجانی<sup>۱</sup> (۱۳۹۹) انجام شده که در آن ارتباط منفی بین دمای هوا با رشد اقتصادی و ارتباط مثبت میزان بارش با رشد اقتصادی برای استان‌های کشور در دوره زمانی ۱۳۸۰-۱۳۹۰ ارائه شده و همچنین بررسی اثر تغییر اقلیم بر رشد اقتصادی ایران با استفاده از الگوی رشد نئوکلاسیک سولو-سوان برای دوره زمانی بین سال‌های ۹۵-۱۳۵۰ در مطالعه ملکوتی‌خواه و فرج-زاده<sup>۲</sup> (۱۳۹۹) انجام شده است که در این مدل، متغیر تغییر اقلیم در قالب تابع خسارت در مدل رشد وارد شده و در آن خسارت تابعی از درجه حرارت تعیین شده است.

تمرکز بر مطالعات استانی به ویژه برای کشور پهناوری مثل ایران، زمینه مناسبی برای تبیین موضوع به منظور سیاستگذاری و برنامه‌ریزی برای کاهش آسیب‌های ناشی از تغییر شرایط آب و هوایی بر تولید اقتصادی فراهم می‌کند. بر این اساس در مقاله حاضر با توجه به اینکه بر اساس بررسی انجام گرفته، این پژوهش، اولین مطالعه جامع با بهره‌گیری از دامنه طولانی‌تر داده‌های تولید اقتصادی و متغیرهای آب و هوایی با پوشش گسترده در قالب الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهره‌گیری از هوش مصنوعی به منظور سنجش تاثیرات تغییرات آب و هوایی بر تولید اقتصادی است، به مطالعات رو به گسترش این موضوع کمک خواهد کرد.

### ۳- مدل و روش

به دلیل اهمیت و ضرورت کمی‌سازی و ارزیابی نظریه‌ها و فرضیه‌های اقتصادی در اقتصادسنجی از روش‌های آماری برای تعیین کمیت و تبیین روابط اقتصادی و پیش-بینی پدیده‌های اقتصادی استفاده می‌شود و یادگیری ماشین نیز حوزه وسیع‌تری را در بر می‌گیرد که رایانه‌ها را قادر می‌سازد تا الگوهایی را از داده‌های موجود یاد بگیرند و در حوزه‌های بسیار متنوع، پیش‌بینی کنند یا تصمیم بگیرند. جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین با قابلیت استفاده آسان است که اغلب اوقات نتایج بسیار خوبی را حتی بدون تنظیم پارامترهای آن، فراهم می‌کند. این الگوریتم به دلیل سادگی و قابلیت

<sup>۱</sup> Panaahi & Ismaeili Darjani (2020)

<sup>۲</sup> MalakotiKhah & Farajzadeh (2020)



استفاده، هم برای دسته‌بندی<sup>۱</sup> و هم رگرسیون<sup>۲</sup>، یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین محسوب می‌شود.

### ۳-۱- بررسی الگوریتم جنگل تصادفی

با توجه به محدودیت مدل‌های عددی، در سنوات اخیر برخی از ابزارهای یادگیری و روش‌های جدید برای رفع ایرادها و مشکلات این الگوها مطرح شده و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش‌ها، از برخی رگرسیون‌های گروهی در حال پیدایش نیز بهره‌گیری شده است. جنگل تصادفی یکی از انواع روش‌های یادگیری است که قادر است از الگوریتم پایه برای پیش‌بینی چندگانه تکراری استفاده کند (بریمان<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲). ابداع روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و به طور ویژه یادگیری ماشین به منظور کارآمدسازی محاسبات مبتنی بر داده‌هایی کلان بنا شده است که بتواند مفروضاتی فراتر از مفروضات مدنظر در مدل‌های مرسوم اقتصادسنجی را مدنظر قرار دهد. بنابراین کاربست این روش‌ها می‌تواند در تحلیل‌ها و پیش‌بینی روندهای مورد مطالعه از جمله پیش‌بینی‌های اقتصادی مفید واقع شود. در روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، معمولاً محور کار توسعه الگوریتم‌ها است و هدف، پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های موجود و محدود قرار دارد. الگوریتم جنگل تصادفی توانایی مدیریت تعداد زیادی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده را بدون برازش اضافی دارد و می‌تواند تخمین‌های دقیقی ارائه دهد. با پیشرفت در روش‌های مدرن یادگیری ماشین، این الگوریتم جلب توجه بیشتر اقتصاددانان را به همراه داشته است، زیرا به نوعی مدل‌های غیرخطی را با دقت بیشتری مدیریت می‌کند و از مزیت‌های آن‌ها در مواجهه با چالش‌های مختلف اقتصادی بهره می‌برد (بیای و دلپا، ۲۰۱۴ و اتی و ایمبنز<sup>۴</sup>، ۲۰۱۹).

### ۳-۲- معرفی و روش کار

با توجه به غیرخطی بودن علم اقتصاد، الگوریتم جنگل تصادفی مدل مناسبی است زیرا روابط غیرخطی را به گونه‌ای در نظر می‌گیرد که کاربردی‌تر از مدل‌های سنتی است. (ولوسکو<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰) با الگوریتم جنگل تصادفی می‌توان این روابط غیرخطی را در قالب

<sup>1</sup> Classification

<sup>2</sup> Regression

<sup>3</sup> Breiman

<sup>4</sup> Athey & Imbens

<sup>5</sup> Woloszko

ترکیب چند مقدار یا عبارات اگر-دیگری<sup>۱</sup> تو در تو که کد نامیده می‌شود، تشخیص داد. (بیای و دلیا، ۲۰۱۴) توضیحات و عبارات ریاضی زیر برگرفته از مطالعات چاکرابورتی و جوزف<sup>۲</sup> (۲۰۱۷)، چن و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۹) و اتی و ایمینز (۲۰۱۹) است.

برای درک بهتر روش جنگل تصادفی، ابتدا باید درختان رگرسیون و طبقه‌بندی را تشریح کرد که الگوریتم بر اساس آن شکل می‌گیرد اما قبل از این و همچنین قبل از پرداختن به جنبه‌های ریاضی، به درک کاربردی از نحوه ساخت آن‌ها نیاز است. سه نوع گره<sup>۴</sup> در درخت وجود دارد: گره ریشه<sup>۵</sup>، گره داخلی<sup>۶</sup> و گره برگ<sup>۷</sup>. گره‌ای که در حال تقسیم شدن است، گره والد<sup>۸</sup> نامیده می‌شود و گره‌های زیر آن، گره‌های فرزند<sup>۹</sup> نامیده می‌شوند. در گره ریشه، همه مشاهدات جمع‌آوری می‌شوند و سپس بر اساس مقدار آستانه برای یک متغیر از هم جدا می‌شوند. الگوریتم با یک نمونه داده شده با چندین پیش‌بینی برای متغیر پاسخ به شرح رابطه (۴) شروع می‌شود.

$$(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, y_1) \quad \text{for } i = 1, \dots, n \quad (4)$$

در هر مرحله از درخت، یک تقسیم جدید بسته به یک متغیر منفرد و یک آستانه مشخص  $\theta$  ایجاد می‌شود. میانگین مربعات خطا قبل از تقسیم به صورت رابطه (۵) است که در آن  $Q$  میانگین مربعات خطا و  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  است.

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

پس از اینکه بر روی متغیر  $x_j$  به دنبال شرط  $x_j \geq \theta$  تقسیم انجام شد، دو گره جدید بر این اساس شکل می‌گیرد:

$$L = \{i : x_j > \theta\} \quad R = \{i : x_j < \theta\}$$

میانگین مربعات خطای این دو گره به شرح رابطه (۶) است:

$$Q = Q_{Left} + Q_{Right} = \frac{1}{nL} \sum_{i=1}^{nL} (y_i - \bar{y})^2 + \frac{1}{nR} \sum_{i=1}^{nR} (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

<sup>1</sup> If-else

<sup>2</sup> Chakraborty & Joseph

<sup>3</sup> Chen et al.

<sup>4</sup> Node

<sup>5</sup> Root Node

<sup>6</sup> Internal Node

<sup>7</sup> Leaf Node

<sup>8</sup> parent Node

<sup>9</sup> Child Nodes

که در آن  $L$  و  $R$  به ترتیب نشان دهنده چپ و راست هستند. تصمیم تقسیم، یعنی  $\theta$  مقدار بهینه‌ای خواهد بود که میانگین مربعات خطا را به حداقل می‌رساند. از دو گره فرزند، یک درخت کامل میانگین مربعات خطا، تمام گره‌های درخت را به حداقل می‌رساند که رابطه (۷) مجموع داخلی یک گره را نشان می‌دهد و جمع بیرونی نیز نشان‌دهنده همه گره‌ها است.

$$Q_{Total} = \frac{1}{nL} \sum_{c=1}^c \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (۷)$$

پیش‌بینی‌های درختان رگرسیون و طبقه‌بندی را می‌توان به عنوان انتظارات مشروط بیان کرد به صورت  $f(x) = E(Y | X = x)$  و با استفاده از چندین یادگیرنده پایه  $h_j(x)$  محاسبه می‌شود. یک مقدار  $y$  در گره برگ، یک یادگیرنده پایه است و با میانگین‌گیری این مقادیر، مقادیر  $y$  ناشناخته، به شرح رابطه (۸) پیش‌بینی می‌شود.

$$f(x) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J h_j(x) \quad (۸)$$

که در آن  $J$  تعداد مشاهدات درون گره برگ است. همان‌طور که از رابطه (۸) مشاهده می‌شود، اگر فقط یک یادگیرنده پایه وجود داشته باشد، گره برگ حاوی یک مشاهده خواهد بود و بنابراین باعث برآزش بیش از حد می‌شود که یک تناسب دقیق غیرعادی برای داده‌های آموزشی<sup>۱</sup> است. هنگامی که بعداً داده‌های آزمایشی<sup>۲</sup>، یعنی مقادیر  $y$  ناشناخته را معرفی می‌کنیم، پیش‌بینی میانگین آن گره برگ را می‌گیرد که در این مورد فقط یک مقدار دارد. پیش‌بینی بسیار مغرضانه خواهد بود و در نتیجه باعث دقت پایین می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل بیش-برآزش که اغلب با درخت طبقه‌بندی و رگرسیون اتفاق می‌افتد، روشی به نام بسته‌بندی<sup>۳</sup> معرفی شده است. بسته‌بندی روشی برای ایجاد زیرمجموعه‌های مشتق شده از مجموعه داده اصلی است. تا زمانی که زیرمجموعه، دارای همان تعداد مشاهدات مجموعه داده اصلی باشد با انتخاب تصادفی مشاهدات کار می‌کند. با معرفی تصادفی بودن در انتخاب مشاهدات، زیرمجموعه‌های بسته‌بندی شده فردی، منحصر به فرد خواهند بود، زیرا برخی از مشاهدات چندین بار انتخاب می‌شوند و برخی از مشاهدات

<sup>1</sup> Training Data

<sup>2</sup> Test Data

<sup>3</sup> Bagging

حذف می‌شوند. با ایجاد یک درخت رگرسیون از هر یک از زیرمجموعه‌های بسته‌بندی شده و ترکیب همه درختان، اکنون جنگل تصادفی ساخته می‌شود. در نهایت، هنگامی که الگوریتم برای پیش‌بینی استفاده می‌شود، مشاهده جدید با مقادیر  $y$  ناشناخته از بین همه درختان عبور می‌کند و بدین ترتیب پیش‌بینی، میانگین کل درختان به صورت رابطه (۹) خواهد بود:

$$\hat{y}_i = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B f(x) \quad (9)$$

که در آن  $B$  تعداد کل درختان و  $f(x)$  پیش‌بینی یک درخت است. از ترکیب این معادله با معادله (۵) عبارت (۱۰) به شرح زیر به دست می‌آید:

$$\hat{y}_i = \frac{1}{JB} \sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^J h_j(x) \quad (10)$$

که در آن  $B$  تعداد کل درختان است،  $J$  تعداد مشاهدات در یک گره برگ و  $h_j(x)$  نیز یادگیرنده پایه در داخل یک گره برگ است.

### ۳-۳- تنظیم پارامترها

از آنجا که در این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی، ورودی‌های مدل (متغیرهای مستقل) یا ویژگی‌ها<sup>۱</sup> شامل متغیرهای آب و هوایی با هدف برآورد و پیش‌بینی متغیر وابسته یا هدف<sup>۲</sup> یعنی تولید ناخالص داخلی سرانه بدون نفت به قیمت ثابت به تفکیک استان‌ها محاسبه می‌شود، الگوریتم برای آموزش و آزمایش نیاز به داده‌های آموزشی و آزمون دارد. در معمولی‌ترین تقسیم، داده‌ها به دو دسته ۸۰ درصد به عنوان آموزشی و ۲۰ درصد به عنوان آزمون تقسیم می‌شوند (هستی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹). در این مقاله نیز از یک تقسیم مشابه استفاده شده است که داده‌ها به صورت تصادفی به این دو نسبت تقسیم می‌شوند. مجموعه آموزشی شامل مشاهدات متغیرهای بارش و دما از فروردین ۱۳۷۸ (دو سال قبل از داده‌های مرتبط با تولید اقتصادی سرانه تا اسفند ۱۳۹۹) بر پایه مبانی نظری بخش (۳) مقاله تعیین می‌شود. در انتخاب اندازه درخت، تعداد گره‌های داخلی برای جلوگیری از بیش‌برازش یا کم تناسب با تغییر عمق درخت تنظیم شده است (ولوسکو، ۲۰۲۰). همچنین، حداقل تعداد مشاهدات در هر گره برگ برای انتخاب عمق بهینه درخت تنظیم می‌شود. در این مقاله حداقل اندازه گره برگ

<sup>1</sup> Feature

<sup>2</sup> Target Variable

<sup>3</sup> Hastie et al.

روی عدد ۵ تنظیم شده تا الگوریتم جنگل تصادفی بهترین پیش‌بینی‌ها را ارائه دهد. با اجازه دادن به تغییرات مقادیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و انجام اندازه‌گیری‌های مناسب، این تکنیک بر اساس معادله‌ای مشابه معادلات حداقل‌سازی میانگین مربعات خطا (معادلات ۵، ۶ و ۷) است و متغیرها را با بیشترین قدرت پیش‌بینی ارائه می‌دهد (چاکرابورتی و جوزف، ۲۰۱۷؛ چن و همکاران، ۲۰۱۹ و مولر<sup>۱</sup>، ۲۰۲۲).

### ۳-۴- اعتبارسنجی متقابل

اعتبارسنجی متقابل<sup>۲</sup> یکی از راه‌هایی است که با آن می‌توان تعداد پارامترها (متغیرهای) مدل را به صورت بهینه تعیین کرد و یک روش برای ارزیابی و بررسی تعمیم‌پذیری<sup>۳</sup> مدل است. در روش موسوم به چندلایه<sup>۴</sup> در هر مرحله از فرایند اعتبارسنجی متقابل، مدل به‌دست آمده توسط داده‌های آزمایشی برای پیش‌بینی داده‌های اعتبارسنجی متقابل به کار گرفته می‌شوند و خطا یا دقت حاصل از برازش مدل روی داده‌های اعتبارسنجی متقابل محاسبه می‌شود. اگر مجموعه داده‌های آموزشی را به طور تصادفی به  $k$  زیرنمونه یا لایه<sup>۵</sup> با حجم یکسان تفکیک کنیم، می‌توان در هر مرحله از فرایند اعتبارسنجی متقابل، تعداد  $k - 1$  از این لایه‌ها را به عنوان مجموعه داده آموزشی و یک لایه را به عنوان مجموعه داده اعتبارسنجی در نظر گرفت. نکته مهم این است که هر مشاهده در نمونه داده‌ها به یک گروه اختصاص داده می‌شود و در طول مدت عمل در آن گروه باقی می‌ماند. این بدان معنا است که به هر نمونه فرصتی داده می‌شود که یک بار در مجموعه نگهدارنده مورد استفاده قرار گیرد و برای آموزش مدل  $k - 1$  بار استفاده شود (اتی و ایمبنز، ۲۰۱۹ و مولر، ۲۰۲۲).

### ۴- تحلیل‌های تجربی

در این مقاله سعی شده است تا منابع اطلاعاتی از مراجع معتبر علمی و تخصصی دریافت شود. داده‌های مربوط به تولید ناخالص داخلی از پایگاه‌های اطلاعاتی مرکز آمار ایران برداشت شده است. داده‌های آب و هوایی مشابه اکثر تحقیقات بین‌المللی انجام گرفته، شامل متغیرهای دما و بارش است. منبع اطلاعات در این بخش که یکی از

<sup>1</sup> Mueller

<sup>2</sup> Cross Validation

<sup>3</sup> Generalization

<sup>4</sup> K-Fold

<sup>5</sup> Fold

ویژگی‌ها و نقاط قوت این مقاله نیز محسوب می‌شود، داده‌های شبکه‌ای با وضوح<sup>۱</sup> ۰/۵ درجه جغرافیایی است که از اطلاعات بین‌المللی منتشر شده توسط واحد تحقیقات آب و هوایی وابسته به دانشگاه انگلیای شرقی<sup>۲</sup> در بریتانیا برداشت شده است. این داده‌ها به صورت اطلاعات ماهانه با قابلیت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه طول در ۰/۵ درجه عرض جغرافیایی تهیه شده است که کل مناطق خشکی جهان به جز قطب جنوب را پوشش می‌دهد. خلاصه اطلاعات و آمارهای سالانه مربوط به متغیرها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) خلاصه آمارهای سالانه مربوط به متغیرها

متغیر	میانگین	میانه	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	انحراف معیار
تولید ناخالص داخلی بدون نفت استان‌ها به قیمت ثابت سال ۱۳۹۰ (میلیون ریال)	۱۵۴	۷۷/۴۱۴	۲۰۰۰	۱۱/۵۲۹	۲۶۴
تولید ناخالص داخلی سرانه بدون نفت استان‌ها به قیمت ثابت سال ۱۳۹۰ (میلیون ریال)	۵۵/۲۵۴	۴۸/۱۹۲	۳۲۹/۹۸۴	۱۷/۴۸۴	۳۳/۳۵۶
تغییر تولید ناخالص داخلی سرانه بدون نفت استان‌ها به قیمت ثابت سال ۱۳۹۰ (درصد)	۳/۶۶۸	۲/۹۱۹	۵۶/۳۳۳	-۱۸/۰۸۴	۷/۳۵۳
میانگین سالانه دمای استان‌ها (سانتی-گراد)	۱۶/۲۴۹	۱۵/۸۸۳	۲۵/۷۰۵	۸/۸۵۶	۴/۲۹۳
کل بارش سالانه استان‌ها (میلی‌متر)	۲۶۵/۸۶۸	۲۶۳/۸۵۵	۹۴۳/۳۵۷	۲۶/۵۳۴	۱۱۸/۳۶۴

منبع: یافته‌های تحقیق

به منظور انجام الگوریتم جنگل تصادفی و ساخت درختان تصمیم از محیط برنامه‌نویسی پایچارم<sup>۳</sup> که یکی از پراستفاده‌ترین و پرطرفدارترین محیط‌های توسعه یکپارچه<sup>۴</sup> نرم-افزارها بوده، استفاده شده است. در این نرم‌افزار برنامه‌نویسی متناسب در زبان برنامه-

<sup>1</sup> Resolution

<sup>2</sup> Climate Research Unit (CRU) of the University of East Anglia

<sup>3</sup> PyCharm

<sup>4</sup> Integrated Development Environment (IDE)

نویسی پایتون<sup>۱</sup>، صورت گرفته و خروجی موردنظر استخراج شده است. بر مبنای پنج الگوی برآورد شده، معیارهای امتیاز اعتبارسنجی متقابل به تفکیک هر مدل، میانگین امتیازات و امتیاز آزمون  $R^2$  محاسبه شده که اطلاعات آن در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): امتیازات مربوط به اعتبارسنجی متقابل

مدل	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	میانگین
امتیاز	-۴۹/۴۷۲۴	-۲۸/۲۳۶۲	-۷۵/۲۲۱۷	-۵۰/۲۲۲۵	-۵۸/۵۶۱۷	-۵۲/۳۴۲۹

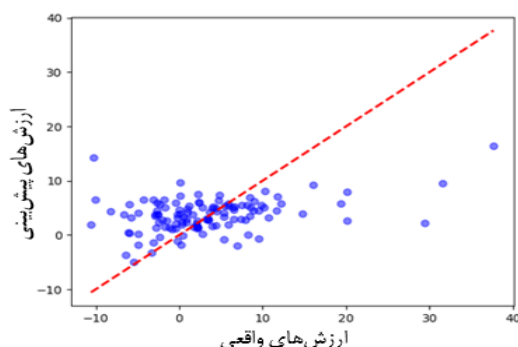
منبع: یافته‌های تحقیق

با عنایت به امتیازات محاسبه شده، مدل دوم به عنوان بهینه از بین پنج مدل تفکیک و گزینش می‌شود و مبنای ارزیابی نهایی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، امتیاز آزمون  $R^2$  در بین داده‌های آموزشی مدل ۰/۱۳ برآورد شده است که نشان می‌دهد ۱۳ درصد از تغییرات در سرانه تولید ناخالص داخلی بدون نفت به قیمت ثابت سال ۱۳۹۰ در مجموعه داده‌های آموزشی توسط ویژگی‌های مدنظر در مدل شامل دما و بارش به تفکیک ماه و با وقفه تا دو سال قبل، تبیین شده است. اهمیت این نسبت در فضایی بدون حضور سایر متغیرهای اساسی اقتصادی تاثیرگذار بر تولید، بیان‌گر اثبات ارتباط بین ویژگی‌ها و متغیر هدف است. این شاخص کمتر از مقدار محاسبه شده در مطالعات کلکول و ونز (۲۰۲۰) گزارش شده است که می‌توان ادعا کرد قدرت توضیح دهنده‌گی و تبیین تغییرات در تولید ایران کمتر از مطالعات جهانی در این زمینه است. با ترسیم مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده در یک نمودار واحد که یک تکنیک تجسمی است برای مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده، به ارزیابی عملکرد مدل و اینکه نتایج پیش‌بینی شده چقدر به مقادیر واقعی نزدیک است، کمک می‌کند. اگر مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده در اطراف خط مورب قرار گیرند، به این معنی است که مدل عملکرد خوبی در پیش‌بینی مقادیر دارد. با این حال، اگر توزیع به طور گسترده و نامنظم باشد، نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی مقادیر خوب عمل نمی‌کند.

بر طبق اطلاعات شکل (۱) الگوی کلی در سه بخش قابل توصیف است؛ اولین مورد جایی است که تغییرات تولید اقتصادی سرانه مقادیری کمتر از ۵- درصد دارند. در این منطقه، پیش‌بینی مدل به نحوی است که تاثیر متغیرهای آب و هوایی بیشتر از مقادیر واقعی، پیش‌بینی شده است یا به عبارت دیگر مدل، مقادیر پیش‌بینی را دست بالا

<sup>۱</sup> Python

گرفته است. مورد دوم محدوده‌ای است که مقدار واقعی بین ۵- درصد تا ۱۵ درصد است که در این محدوده پیش‌بینی مدل مناسب است و متغیر هدف را بر مبنای تغییرات آب و هوایی توانسته است به خوبی پیش‌بینی نماید. در محدوده سوم یعنی مقادیر بالاتر از حدود ۱۲ درصد که عملاً فراوانی کمی نیز در بین داده‌ها دارد، می‌توان ادعا کرد؛ عملاً مدل به طور پیوسته مقادیر پیش‌بینی را دست کم گرفته و روش جنگل تصادفی در پیش‌بینی مقادیر هدف از مجموعه داده‌های موردنظر در این مقاله، در تغییرات بالاتر از حدود ۱۲ درصد و کمتر از حدود ۵- درصد بر اساس داده‌های منتخب برای آموزش، نتوانسته است به خوبی عمل نماید هرچند درخصوص مقادیر بین ۵- درصد تا ۱۲ درصد قدرت پیش‌بینی مطلوبی داشته است. این یافته هم‌راستا با نتایج مطالعه کلکول و ونز (۲۰۲۰) است که اثرگذاری تغییرات آب و هوایی را بر کشورهای فقیر بیشتر از کشورهای توسعه‌یافته گزارش کرده است.



شکل (۱): ارزش‌های واقعی در مقابل پیش‌بینی شده متغیر هدف

منبع: یافته‌های تحقیق

در مرحله پایانی، میزان اهمیت ویژگی‌ها<sup>۱</sup> به تفکیک استخراج شده است. اهمیت ویژگی یکی از رایج‌ترین و مفیدترین روش برای تفسیر و ارتباط نتایج به دست آمده در روش جنگل تصادفی است. اهمیت ویژگی، اندازه‌گیری می‌کند که هر ویژگی چقدر به دقت پیش‌بینی کمک می‌کند و به شناسایی ویژگی‌های موثرتر در مجموعه داده‌ها کمک می‌کند تا ارتباط بین ویژگی‌ها و متغیر هدف بهتر درک شود. این معیار با میانگین گرفتن کاهش ناخالصی بر روی همه درختان تصمیم در جنگل مشخص می‌شود و

<sup>۱</sup> Feature Importance (FI)



ویژگی‌هایی که منجر به کاهش ناخالص بزرگتری در کل مدل شوند، به عنوان مهم‌ترین در نظر گرفته می‌شوند. فهرست کلیه استان‌ها به تفکیک دامنه اهمیت ویژگی در جدول (۳) ارائه شده است. اطلاعات مربوط به اهمیت ویژگی استان‌ها بیانگر این است که شش استان کرمان، سمنان، خراسان شمالی، ایلام، قزوین و کهگیلویه و بویراحمد بالاترین اهمیت را در بین استان‌های کشور از حیث تاثیرپذیری از متغیرهای آب و هوایی دارا بودند و در مجموع این شش استان سهم ۷۵/۷۷ درصدی از کل اهمیت ویژگی‌ها را در مدل به خود اختصاص دادند. این موضوع بیانگر این است که مهم‌ترین استان‌ها از حیث تاثیرگذاری متغیرهای تغییر آب و هوا بر تولید اقتصادی به ترتیب این شش استان هستند و درجه اهمیت آن‌ها نیز به گونه‌ای است که استان کرمان با ۲۵/۵۱ درصد بالاترین اهمیت را داشته است. پس از آن استان‌های سمنان با ۱۷/۶۱ درصد و خراسان شمالی با ۱۲/۳۹ درصد در رده‌های بعدی میزان اهمیت قرار گرفتند. با مینا قرار دادن تفکیک چهار اقلیم ایران شامل اقلیم‌های گرم و خشک، گرم و مرطوب، سرد و معتدل و مرطوب، در این گروه، استان‌هایی از هر دو اقلیم گرم و خشک (کرمان و سمنان) و اقلیم سرد (خراسان شمالی، ایلام، قزوین و کهگیلویه بویراحمد) حضور دارند.

جدول (۳): اهمیت ویژگی استان‌ها

استان	دامنه اهمیت ویژگی	ردیف
کرمان	$20 \leq FI$	۱
سمنان، خراسان شمالی	$10 \leq FI < 20$	۲
ایلام، قزوین، کهگیلویه بویراحمد	$3 \leq FI < 10$	۳
تهران، مرکزی، یزد	$2 \leq FI < 3$	۴
خراسان جنوبی، گیلان، آذربایجان غربی، اردبیل، سیستان و بلوچستان، خوزستان، آذربایجان شرقی	$1 \leq FI < 2$	۵
همدان، اصفهان، خراسان رضوی، گلستان، فارس، کرمانشاه، بوشهر	$0/5 \leq FI < 1$	۶
چهارمحال و بختیاری، مازندران، کردستان، لرستان، زنجان، هرمزگان، قم	$0 \leq FI < 0/5$	۷

منبع: یافته‌های تحقیق

شش استان بعدی شامل؛ استان‌های تهران، مرکزی، یزد، خراسان جنوبی، گیلان و آذربایجان غربی در مجموع با ضریب ۱۲/۲۹ درصد در رتبه‌های بعدی از حیث میزان

اهمیت تغییرات آب و هوایی بر تولید اقتصادی قرار گرفتند و با دارا بودن مقادیر بین ۱/۵ تا ۲/۷۷ تقریباً گروه نسبتاً همگن بعدی را شکل دادند که نسبت به سایر استان‌ها دارای اهمیت بالاتری هستند هرچند در سطح اول اهمیت نیز قرار نگرفتند. در این گروه نیز علاوه بر استان‌هایی از هر دو اقلیم گرم و خشک (یزد و خراسان جنوبی) و اقلیم سرد (تهران، مرکزی و آذربایجان غربی)، استان گیلان از اقلیم معتدل و مرطوب نیز حضور دارد.

پراکندگی ارزش‌های واقعی در مقابل ارزش‌های پیش‌بینی شده تغییرات تولید اقتصادی سرانه برای استان‌های کشور به تفکیک مشخص می‌کند که در نرخ‌های تغییر پایین‌تر، مدل‌های پیش‌بینی، مقادیر پیش‌بینی را معمولاً بیشتر از مقادیر واقعی، برآورد کرده‌اند و این بدین معنا است که مدل‌های طراحی شده برای پیش‌بینی سنجش تغییرات آب و هوا بر روی تغییرات تولید سرانه در مقادیر تغییر پایین، میزان تاثیرپذیری تولید سرانه از تغییرات آب و هوایی را بیشتر و تاثیرگذارتر نشان می‌دهند البته در تغییرات بالاتر، این تاثیرگذاری کمتر نشان داده شده است. در خصوص امتیاز آزمون  $R^2$  در بین استان‌ها مطابق خروجی مدل، برای ۱۱ استان ضریب بالای ۸۰ درصد، برای ۱۰ استان ضریب بین ۷۰ تا ۸۰ درصد، ۴ استان ضریب بین ۶۰ تا ۷۰ درصد و یک استان ضریب بین ۵۰ تا ۶۰ درصد برآورد شده است. بر این اساس در ۲۶ استان کشور، درصد بالایی از تغییرات در سرانه تولید ناخالص داخلی بدون نفت به قیمت ثابت سال ۱۳۹۰ در مجموعه داده‌های آموزشی توسط ویژگی‌های مدنظر در مدل شامل دما و بارش به تفکیک ماه و تا دو سال قبل، تبیین شده است. همچنین این ضریب برای سه استان زنجان، گیلان و هرمزگان عددی بین ۲۰ تا ۴۰ درصد برآورد شده است که باز هم بیان‌گر وجود رابطه بین ویژگی‌ها (متغیرهای مستقل) و متغیر هدف (وابسته) در روش جنگل تصادفی و حکایت از ارتباط بین این دو مجموعه داده، دارد لیکن صرفاً در خصوص استان خراسان جنوبی قدرت توضیح دهنده مدل در سطح بسیار کم ۰/۰۲ درصد گزارش شده است که نشان دهنده این است که صرفاً ۰/۰۲ درصد از تغییرات در جنوبی در مجموعه داده‌های آموزشی توسط ویژگی‌های مدنظر در مدل شامل دما و بارش به تفکیک ماه و تا دو سال قبل، تبیین شده است.

خروجی اطلاعات مربوط به میزان اهمیت ویژگی دما بیان‌گر این است که در مجموع ۳۱/۷۰ درصد اهمیت برای تغییر تولید ناشی از تغییرات دمایی برای ماه‌های مختلف بوده است. دمای مه‌ماه یک سال قبل با ۷/۹۷ درصد بالاترین و سپس دمای مه‌ماه سال جاری و بهمن ماه دو سال قبل قرار گرفته است و کمترین وزن و اهمیت را دمای تیرماه سال جاری و اردیبهشت ماه دو سال قبل دارند. اهمیت دما در ماه‌های گرم، کمتر از اهمیت آن در ماه‌های سرد سال بر تولید بوده است. به عبارت دیگر نوسانات دمایی در ماه‌های سرد سال در فصول پائیز و زمستان نسبت به ماه‌های گرم سال در فصول بهار و تابستان تاثیرگذاری بیشتری بر تولید داشته است. در بررسی تکمیلی نیز می‌توان اظهار داشت که ضریب اهمیت برای دمای مهر تا پایان اردیبهشت ماه از بقیه ماه‌های سال مهم‌تر بوده است. اطلاعات نشان‌دهنده این است که از ۳۱/۷۰ درصد ضریب اهمیت برای دما، برای یک وقفه (سال گذشته) بالاترین میزان اهمیت را داشته است. علاوه بر این، جمع ضرایب اهمیت ماهانه برای یک سال وقفه نیز ۱۵/۰۶ درصد بوده که تقریباً دو برابر ضریب اهمیت دو سال قبل (دو وقفه) تعیین شده است. یعنی تاثیرگذاری دمای ماهانه یک سال قبل بالاترین تاثیرات را بر تولید اقتصادی سال جاری در استان‌های کشور می‌گذارد و پس از آن دمای سال جاری و در مرحله بعدی دمای ماهانه دو سال قبل قرار می‌گیرند. اطلاعات تفصیلی مربوط به خروجی میزان اهمیت ویژگی دما به تفکیک ماه در دوره همزمان و دو دوره قبل در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): اهمیت ویژگی دمای همزمان و با وقفه زمانی

شرح	جمع ضریب اهمیت ویژگی دما (سالانه)	متوسط ماهانه ضریب اهمیت ویژگی دما
همزمان	۹/۲۴	۰/۷۷
یک سال وقفه	۱۵/۰۶	۱/۲۶
دو سال وقفه	۷/۳۹	۰/۶۲
جمع	۳۱/۷۰	۰/۸۸

منبع: یافته‌های تحقیق

همچنین در مدل ۶۸/۳۰ درصد ضریب اهمیت برای بارش در نظر گرفته شده است که تقریباً دوبرابر ضریب اهمیت در نظر گرفته شده برای دما است و این بیان‌گر اهمیت و تاثیرگذاری بالاتر بارش بر تولید اقتصادی استان‌های کشور نسبت به دما است. هرچند

به طور متوسط ضریب اهمیت ویژگی بارش برای طول دوره سه ساله در حدود  $1/90$  درصد استخراج شده است لیکن همانند دما، این اهمیت برای یک وقفه (سال گذشته) بالاترین میزان اهمیت را داشته است. علاوه بر این جمع ضرایب اهمیت ماهانه برای یک سال وقفه نیز  $26/46$  درصد بوده است یعنی تاثیرگذاری بارش ماهانه یک سال قبل بالاترین تاثیرات را بر تولید سرانه سال جاری در استان‌های کشور می‌گذارد و پس از آن بارش دو سال قبل و سپس بارش سال جاری قرار می‌گیرند. اطلاعات تفصیلی مربوط به خروجی میزان اهمیت ویژگی بارش به تفکیک ماه در دوره همزمان و دو دوره قبل در جدول (۵) ارائه شده است.

#### جدول (۵): اهمیت ویژگی بارش همزمان و با وقفه زمانی

شرح	جمع ضریب اهمیت ویژگی بارش (سالانه)	متوسط ماهانه ضریب اهمیت ویژگی بارش
همزمان	۱۹/۱۶	۱/۶۰
یک سال وقفه	۲۶/۴۶	۲/۲۱
دو سال وقفه	۲۲/۶۸	۱/۸۹
جمع	۶۸/۳۰	۱/۹۰

منبع: یافته‌های تحقیق

بالاترین تاثیر را در این بین، بارش آذرماه یک سال قبل با  $10/43$  درصد و سپس بارش اردیبهشت ماه دو سال قبل با  $9/36$  درصد و آذرماه سال جاری با  $4/47$  درصد و آذرماه دو سال قبل با  $3/04$  درصد داشته است و کمترین وزن و اهمیت را بارش شهریورماه در یک سال قبل، دو سال قبل و سال جاری دارند. بررسی اجمالی مشخص کننده این است که اهمیت بارش در ماه‌های واقع در فصول بارندگی از مهرماه تا پایان اردیبهشت‌ماه، به مراتب بالاتر از بارش در سایر ماه‌ها بوده است و بر تولید سرانه تاثیرگذار بوده است. به عبارت دیگر بارش‌های فصول بارشی نسبت به بارش‌های غیرفصلی، اهمیت و تاثیرگذاری بیشتری بر تولید سرانه داشته است. در بررسی تکمیلی نیز می‌توان اظهار داشت که ضریب اهمیت برای بارش ماه شهریور از بقیه ماه‌های سال کم اهمیت‌تر بوده است و بارش‌های آذرماه و اردیبهشت‌ماه بالاترین تاثیر و اهمیت را دارا بودند.

## ۵- نتیجه‌گیری

جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین تحت نظارت از زیرمجموعه‌های روبه‌گسترش هوش مصنوعی است که یکی از پُرکاربردترین الگوریتم‌ها برای پیش‌بینی به حساب می‌آید به طوری که در سالیان اخیر روند روبه‌توسعه‌ای از کاربرد این الگوها در مطالعات اقتصادی نیز شکل گرفته است. در این مقاله، از قابلیت این روش در مدیریت داده‌ها و تبدیل آن به اطلاعات مفید و کاربردی به منظور سنجش تاثیرگذاری تغییرات آب و هوا بر سطح تولید اقتصادی استان‌های ایران و پیش‌بینی آن استفاده مناسبی شده است. با مدنظر قراردادن موقعیت ایران در پهنه‌بندی مناطق خشک و نیمه خشک جهان، تنوع اقلیمی کشور و شکل‌گیری و استمرار برخی مصادیق تغییر شرایط آب و هوایی در سالیان اخیر از جمله خشکسالی و سیل، شناسایی و تحلیل آثار تغییر اقلیم به ویژه بر تولید به عنوان اولویتی حائز اهمیت مطرح است که با توجه به محدودیت تعداد مطالعات داخلی در این زمینه، با هدف طراحی سیاست‌های کارآمد در مقابله، کاهش اثرات یا سازگاری با این پدیده در کنار همکاری‌های بین‌المللی یا منطقه‌ای، انجام این مطالعات نیاز به توسعه جدی دارد.

مطابق نتایج، شواهد محکمی به دست آمد که تولیدات اقتصادی در همه استان‌ها، از شرایط آب و هوایی (دما و بارش) همه ماه‌های سال با وقفه زمانی حداکثر تا دو سال متأثر است و تفاوت معنی‌داری از این حیث بین استان‌های واقع در اقلیم‌های چهارگانه کشور مشاهده نشد. علاوه بر این، مشخص شد که در این فرآیند، بارش نسبت به دما نقش و تاثیرگذاری بیشتری دارد. ضمن اینکه تاثیر دما بر تولید در ماه‌های سرد سال نسبت به ماه‌های گرم، بیشتر پیش‌بینی شده است و وقوع بارش نیز در نیمه دوم سال (شش ماه نخست سال آبی) نسبت به نیمه نخست سال درجه اهمیت بیشتری در این فرآیند دارد.

نتایج به دست آمده بر روی مجموعه داده‌های آموزشی در این پژوهش نشان می‌دهد؛ حساسیت تولید در استان‌های ایران به تغییرات آب و هوا در مقایسه با حساسیت سایر مناطق جهان کمتر است. همچنین هرچند شرایط آب و هوا در قالب داده‌های ماهانه تا دو سال قبل (دو وقفه) بر تولید تاثیرگذار می‌باشند لیکن به مرور در این زمینه سازگاری شکل می‌گیرد.

طبق یافته‌های تحقیق و براساس پیش‌بینی صورت گرفته مشخص شد؛ استان‌های کرمان، سمنان، خراسان شمالی، ایلام، قزوین و کهگیلویه و بویراحمد در مجموع با دارا بودن بیش از ۷۵ درصد کل ضرایب اهمیت تاثیرپذیری تولید از شرایط آب و هوا، بیشترین میزان تاثیرپذیری را دارند و سایر استان‌ها نیز با ضرایب متفاوت و در مواردی ناچیز با مجموع ۲۵ درصد کل ضرایب اهمیت در رده‌های بعدی واقع شدند. همچنین نتایج پیش‌بینی الگو نشان می‌دهد؛ در مقادیر پایین رشد تولید، تاثیرپذیری تولید از تغییر شرایط آب و هوایی بیشتر خواهد بود و در مقادیر بالاتر رشد تولید، این تاثیرگذاری کمتر است.

نتایج حاصل از این مطالعه علاوه بر تبیین شرایط کلی استان‌های کشور از حیث تاثیرپذیری تولیدات آن‌ها از تغییر شرایط آب و هوایی، استان‌های در معرض آسیب بیشتر معرفی شدند. نتایج و یافته‌های این پژوهش، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان را می‌تواند در اتخاذ تصمیمات و تدابیر مبتنی بر سازگاری بیشتر یا مقابله با پیامدهای سوء تغییرات آب و هوایی یاری رساند. همچنین در سطوح محلی و استانی نیز ضرورت دارد نسبت به گزینش رفتارهای سازشی با تغییرات اقلیم در راهبردهای توسعه محلی با هدف ایجاد محیط حمایتی‌تر برای کسب و کارهای سازگار با تغییرات اقلیم، توجه بیشتری صورت پذیرد.

### **تضاد منافع**

نویسندگان مقاله نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

## فهرست منابع

۱. پناهی، حسین و اسمعیل درجانی، نجمه (۱۳۹۹). بررسی اثرات گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی بر رشد اقتصادی (مطالعه موردی: استان‌های ایران طی دوره ۱۳۸۰-۱۳۹۰). *مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۱)، ۷۹-۸۸.
۲. ملکوتی‌خواه، زهرا و فرج‌زاده، زکریا (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر رشد اقتصادی ایران. *نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۳۴(۲)، ۲۲۳-۲۳۸.
1. Abidoye, B. O., & Odusola, A. F. (2015). Climate change and economic growth in Africa: an econometric analysis. *Journal of African Economies*, 24(2), 277-301.
2. Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2001). The colonial origins of comparative development: An empirical investigation. *American economic review*, 91(5), 1369-1401.
3. Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2005). Institutions as a fundamental cause of long-run growth. *Handbook of economic growth*, 1, 385-472.
4. Adams, R. M., Rosenzweig, C., Peart, R. M., Ritchie, J. T., McCarl, B. A., Glycer, J. D., ... & Allen Jr, L. H. (1990). Global climate change and US agriculture. *Nature*, 345(6272), 219-224.
5. Ali, S. (2012). Climate change and economic growth in a rain-fed economy: how much does rainfall variability cost Ethiopia?. Available at SSRN 2018233.
6. Athey, S., & Imbens, G. W. (2019). Machine learning methods that economists should know about. *Annual Review of Economics*, 11, 685-725.
1. Auffhammer, M. (2018). Quantifying economic damages from climate change. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 33-52.
2. Auffhammer, M., & Mansur, E. T. (2014). Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature. *Energy Economics*, 46, 522-530.
3. Auffhammer, M., & Schlenker, W. (2014). Empirical studies on agricultural impacts and adaptation. *Energy Economics*, 46, 555-561.
4. Babatunde, M. A., & Adefabi, R. A. (2005, November). Long run relationship between education and economic growth in Nigeria: Evidence from the Johansen's cointegration approach. In *regional conference on education in West Africa* (pp. 1-2).
5. Barro, R.J., Sala-i Martin, X., (2003). *Economic Growth*, vol. 1. MIT Press Books.
6. Bhuiyan, M. A., Dinçer, H., Yüksel, S., Mikhaylov, A., Danish, M. S. S., Pinter, G., ... & Stepanova, D. (2022). Economic indicators and bioenergy supply in developed economies: QROF-DEMATEL and random forest models. *Energy Reports*, 8, 561-570.

7. Biau, O. (2010). *Euro area gdp forecast using large survey dataset-a random forest approach* (No. 259600029). EcoMod.
8. Breiman, L. (2002). Manual on setting up, using, and understanding random forests. *Berkeley: Statistics Department University of California Berkeley*.
9. Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577), 235-239.
10. Burke, M., & Tanutama, V. (2019). *Climatic constraints on aggregate economic output* (No. w25779). National Bureau of Economic Research.
11. Callaway, J. M., Markovska, N., Cukaliev, O., Causevski, A., Gjoshevski, D., Taseska, V., & Nikolova, S. (2011). Assessing the Economic Impact of Climate Change: National Case studies.
12. Carleton, T. A., & Hsiang, S. M. (2016). Social and economic impacts of climate. *Science*, 353(6304), aad9837.
13. Chakraborty, C., & Joseph, A. (2017). Machine learning at central banks.
14. Chang, C. C. (2002). The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. *Agricultural Economics*, 27(1), 51-64.
15. Chapman, J. T., & Desai, A. (2023). Macroeconomic predictions using payments data and machine learning. *Forecasting*, 5(4), 652-683.
16. Chen, J. C., Dunn, A., Hood, K., Driessen, A., & Batch, A. (2019). Off to the races: A comparison of machine learning and alternative data for predicting economic indicators. In *Big data for 21st century economic statistics*. University of Chicago Press.
17. Colacito, R., Hoffman, B., & Phan, T. (2014). Temperatures and Growth: a Panel Analysis of the US. *University of North Carolina*.
18. Crane-Droesch, A. (2018). Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture. *Environmental Research Letters*, 13(11), 114003.
19. Dasgupta, S., Bosello, F., De Cian, E., & Mistry, M. (2022). Global temperature effects on economic activity and equity: a spatial analysis. *Italy: European Institute on Economics and the Environment*.
20. Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2008). *Climate change and economic growth: Evidence from the last half century* (No. w14132). National Bureau of Economic Research.
21. Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66-95.
22. Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2014). What do we learn from the weather? The new climate-economy literature. *Journal of Economic literature*, 52(3), 740-798.
23. Deschênes, O., & Greenstone, M. (2007). The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. *American economic review*, 97(1), 354-385.



24. Elshennawy, A., Robinson, S., & Willenbockel, D. (2016). Climate change and economic growth: An intertemporal general equilibrium analysis for Egypt. *Economic Modelling*, 52, 681-689.
25. Fankhauser, S., & Tol, R. S. (2005). On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 27(1), 1-17.
26. Guiteras, R., (2009). The impact of climate change on Indian agriculture. Manuscript, Department of Economics, University of Maryland, College Park, Maryland.
27. Hadero, T. (2014). *The impact of climate change on economic growth: time series evidence from Ethiopia* (Doctoral dissertation, Doctoral dissertation, Jimma University).
28. Hastie, T., Tibshirani, R., & Wainwright, M. (2015). Statistical learning with sparsity. *Monographs on statistics and applied probability*, 143(143), 8.
29. Hsiang, S. (2016). Climate econometrics. *Annual Review of Resource Economics*, 8, 43-75.
30. IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
31. Kalkuhl, M., & Wenz, L. (2020). The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 103, 102360.
32. Kolstad, C. D., & Moore, F. C. (2020). Estimating the economic impacts of climate change using weather observations. *Review of Environmental Economics and Policy*.
33. Lal, R. (2009). Sequestering atmospheric carbon dioxide. *Critical Reviews in Plant Science*, 28(3), 90-96.
34. Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., & Schwanitz, J. (2017). Future growth patterns of world regions—A GDP scenario approach. *Global Environmental Change*, 42, 215-225.
35. Malakoti-Khah, Z., & Farajzadeh, Z. (2020). The Impact of Climate Change on Economic Growth in Iran. *Journal of Economics and Agricultural Development*, 34 (2), 223-238 (In Persian).
36. Masters, W. A., & McMillan, M. S. (2001). Climate and scale in economic growth. *Journal of Economic growth*, 6, 167-186.
37. McKeown, A., & Gardner, G. (2009). Climate change reference guide.
38. Mendelsohn, R., Dinar, A., & Sanghi, A. (2001). The effect of development on the climate sensitivity of agriculture. *Environment and Development Economics*, 6(1), 85-101.
39. Muller, M. (2022). *Inflation forecasting with Random Forest a Machine Learning approach to macroeconomic forecasting*. Lund University, Department of Economics.

40. Newell, R. G., Prest, B. C., & Sexton, S. E. (2021). The GDP-temperature relationship: implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108, 102445.
41. Nordhaus, W. D. (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10), 3510-3517.
42. North, D. C. (1987). Institutions, transaction costs and economic growth. *Economic inquiry*, 25(3), 419-428.
43. Nyangena, O., & Ruigu, G. M. (2018). Linking weather variability and economic growth in the east african region: a semi-parametric smooth coefficient approach. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(6), 326-332.
44. Olper, A., Maugeri, M., Manara, V., & Raimondi, V. (2021). Weather, climate and economic outcomes: Evidence from Italy. *Ecological Economics*, 189, 107156.
45. Panaahi, H., & Ismaeili Darjani, N. (2020). Investigating the Impacts of Global Warming and Climate Change on Economic Growth: A Case Study of Iranian Provinces during the Period 2011-2001. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(1), 79-88 (In Persian).
46. Pretis, F., Schwarz, M., Tang, K., Haustein, K., & Allen, M. R. (2018). Uncertain impacts on economic growth when stabilizing global temperatures at 1.5 C or 2 C warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160460.
47. Rodrik, D., Subramanian, A., & Trebbi, F. (2004). Institutions rule: the primacy of institutions over geography and integration in economic development. *Journal of economic growth*, 9, 131-165.
48. Sachs, J. D., & Warner, A. M. (1997). Fundamental sources of long-run growth. *The American economic review*, 87(2), 184-188.
49. Stern, N. (2013). The structure of economic modeling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models. *Journal of Economic Literature*, 51(3), 838-859.
50. Tebaldi, E., & Beaudin, L. (2016). Climate change and economic growth in Brazil. *Applied Economics Letters*, 23(5), 377-381.
51. Woloszko, N. (2020). Adaptive Trees: a new approach to economic forecasting.
52. Yoon, J. (2021). Forecasting of real GDP growth using machine learning models: Gradient boosting and random forest approach. *Computational Economics*, 57(1), 247-265.