

## Research Paper

### Forecasting the instability of railway lines based on climate changes with emphasis on temperature (Case study: Kerman-Zahedan route)

Sadegh Karimi <sup>1\*</sup>, Ali Mehrabi <sup>2</sup>, Abed Heydarizadeh <sup>3</sup>

1. Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2. Associate Professor, Department of Geography, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3. Graduated in Environmental Hazards, Department of Geography, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

#### ARTICLE INFO

**PP:** 355-371

Use your device to scan and  
read the article online



**Keywords:** *Climate Hazards, Climate Changes, Railways, Instability of Railway Lines, GCM Model.*

#### Abstract

The existence of climate variability (especially temperature) and more importantly its fluctuations and changes in different regions of the country can have different effects on its railway lines. Fluctuations and temperature changes can affect many different aspects of the rail transportation system, especially rail instabilities; Therefore, evaluating the effect of climatic conditions, especially temperature fluctuations and changes on railway instabilities (bending, shifting and breaking lines), requires a more accurate analysis of the relationships between these two variables, which is the goal of this research. In this research, in order to predict long-term temperature and analyze its effects on railway lines, the General Circulation Model (GCM) has been used. SDSM was used for local and regional forecasts. The data used in this research include the monthly average data of Kerman, Bam and Zahedan synoptic stations with the base period of 1961-1990 and HadCM3 model data (data of the third generation global climate model under scenario A2 and B2). The temperature was predicted for three periods of 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2099 and compared with the base period. The findings for both observational and predicted datasets showed that the SDSM model works correctly in the micro-scale rotation of HadCM3 model output temperature in all three stations with a small difference and has an acceptable accuracy for temperature prediction. The results showed that, except for Zahedan in some cold months of the year, we see an increase in temperature in all months of the year in the stations, and this increase in temperature will reach its peak in 2099.

**Citation:** Karimi, S., Mehrabi, A., Heydarizadeh, A. (2024). **Forecasting the instability of railway lines based on climate changes with emphasis on temperature (Case study: Kerman-Zahedan route).** *Geography(Regional Planning)*, 13(51), 355-371.

**DOI:** [10.22034/jgeoq.2024.403910.4047](https://doi.org/10.22034/jgeoq.2024.403910.4047)

## Extended Abstract

### Introduction

General circulation models of the atmosphere provide useful information about the response of the atmosphere to the increase in greenhouse gas concentrations, but the general circulation models of the atmosphere do not have the spatial and temporal accuracy necessary to evaluate the climate of the coming decades at the local scale and meteorological stations. and make predictions. In recent years, out of the four general categories of microscaling methods (dynamic microscaling, synoptic classification, random weather generation, and statistical methods), statistical microscaling methods have received more attention from researchers than other methods. has taken. This group of microscaling methods, which includes the SDSM model, downscales based on the statistical history of large-scale predictors and local predictors. The main superiority of this method and the reason for choosing this model in this research is its economy, simplicity and high speed in the regional microscaling process. SDSM statistical exponential micro-scale model was developed by Wilby et al as a tool for statistical micro-scaling. The basis of this model is multivariable regression and it predicts climate parameters such as precipitation and temperature in the long term according to large-scale climate signals (NCEP variables).

### Methodology

In order to evaluate the consequences of climate change on the Kerman-Zahedan railway line, the general atmospheric circulation model, the output of the HadCM3 model was used under scenarios A2 and B2. The investigated stations are: Kerman, Bam and Zahedan. Scenario A2 and B2 are used to investigate climate change in conditions where the increase of greenhouse gases is in accordance with the observations of the 20th century and the basic data of 1970-2001, provided that the increase of greenhouse gases from the past period at a rate of 1% per The year will continue until its concentration is doubled. Since the data produced by atmospheric general circulation models are

large in scale and differ from the observed data in the local scale, there is a need for downscaling. Therefore, SDSM statistical scaling method was used in this research and its results were evaluated. In this research, although the analysis of the output results of two scenarios A2 and B2 did not lead to the same results, both scenarios indicate an increase in temperature variables in the studied stations and along the Kerman-Zahedan railway route in the coming periods.

### Results and Discussion

The annual average temperature increase in Kerman station under scenario B2 in the statistical periods of 2040-2011, 2070-2041, and 2071-2099 is 1.15, 2.12, and 2.96 degrees Celsius, respectively. The highest monthly temperature increase in three periods in July is 3.13, 4.19, and 5.73 degrees Celsius compared to the base period, and seasonally, the highest temperature increase in Kerman city was in the summer season. The results of the Bam synoptic station temperature forecast show the increase in temperature in two scenarios B2 and A2, that this temperature increase in the statistical period of 2099-2071 is more than the statistical periods of 2077-2041 and 2040-2011, and the temperature forecast under Scenario A2 shows a higher temperature increase than scenario B2. The calculations related to the analysis of the condition of the average temperature component for Zahedan station are slightly different, so that the year is divided into two periods: in the next weather period, from January to May, the temperature will decrease compared to the past, and from June to October, it will increase. The temperature trend of the temperature components showed that the temperature increase component has a stationary state; While the temperature reduction component has an unstable state that has an increasing and decreasing trend in its different months, which is well evident in the statistical period of 2040-2011 in both B2 and A2 satellites.

### Conclusion

The results show an increase in temperature until the year 2100 along the entire studied rail route. Among the studied decades, the 2100s will have the highest temperature

increase compared to the base period. The analysis of temperature changes showed that the climate of the region is changing and is going through the process of temperature increase and relative warming; Therefore, it is necessary for the railway officials to think of solutions to protect the infrastructure against the buckling of the rails in extreme heat or cold and to adapt the railway lines to the effects of climate change over time and slowly. Because with the increase in temperature in different periods, the temperature of the railway lines also

increases, and when the train passes, the temperature of the railway line also increases by about two times. This increase in temperature reduces the resistance of the rail line and as a result the line buckles, which causes life and financial risks due to the train leaving the rail line. Of course, one of the ways to measure these predictions again is to use automatic temperature data loggers along the rail track and to monitor short and long term temperature changes so that damage points can be determined exactly and remedies can be sought.

## References

1. Ansari, H., Judge, K. (1386). Zoning of dry periods using standardized rainfall index in GIS environment (Khorasan province). *Geographical Research Quarterly*, No. 108, pp. 60-97. [In Persian]
2. Asakereh, H. (2008). Kriging Application in Climatic Element Interpolation A Case Study: Iran Precipitation in 1996.12.16. *Geography and Development*, 6(12), 25-42. [In Persian]
3. Basist, A., Bell, G.D., Meentemeyer, V. (2021). Statistical relationships between topography and precipitation patterns. *Journal of climate*, 7, pp. 1305–1315.
4. Dehghan, Z., Fathian, F., Eslamian, S. (2015). Comparative Assessment of SDSM, IDW and LARS-WG Models for Simulation and Downscaling of Temperature and Precipitation. *Water and Soil*, 29(5), 1376-1390. [In Persian]
5. Guderzi, M., Hosseini, S. A., Masgari, I. (2015). *Water and Meteorological Models: Zanjan*, Azar Kalk Publications, 250 pages. [In Persian]
6. Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., Melville, B.W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), pp. 475-480.
7. <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=dst-sdi>
8. Jahangir, M. H., Gharadaghi, L. (2022). Assessing the Performance of SDSM Models in Downscaling Annual Precipitation and Temperature Values Simulated Via CANESM2 Model: A Case Study of East Azerbaijan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 10(32), 45-60. [In Persian]
9. Javadizadeh, F., Kordavani, P., Alijani, B., Asadian, F. (2017). The effectiveness of SDSM statistical exponential microscale model models in predicting temperature parameters in Minab watershed. *Natural Geography*, 11(42), 47-66. [In Persian]
10. Khan, M.S., Coulibaly, P., Dibike, Y. (2011). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*. 319(1), pp. 357-382.
11. Khosravi, A., Azari, M. (1401). Determining the temporal and spatial trend and point of change of temperature and precipitation in Kashf River basin. *Applied Research in Geographical Sciences*, 334 – 320 [In Persian]
12. Khosravi, A., Azari, M. (2022). Spatio-temporal trend and change detection of temperature and precipitation of Kashafroud basin. *Researches in Geographical Sciences*, 22(66), pp. 289-306
13. Kim, J., Chang, J., Baker, N., Wilks, D., Gates, W. (1984). The statistical problem of climate inversion-Determination of the relationship between local and largescale climate. *Monthly Weather Review*, 112(10), pp. 2069-2077.
14. Landman, W.A., Goddard L. (2002). Statistical Recalibration of GCM forecasts over Southern Africa using Model Output statistics. *Int. J. Climatology*. 15, pp. 2038-2055.

15. Omidvar, B., Altaj, S. (2014). The effects of climate change on rail transport and the methods of calculating the risk of its consequences, the fifth regional climate change conference, Tehran. [In Persian]
16. Rahimiani Iranshahi, H., Moradi, H. R., Jalili, K. (2022). Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 1-12. [In Persian]
17. Rezaei, M., No Thani, M., Abkar, A., Rezaei, M., Mirkazehi, M. (2015). Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Temperature Indexes in Two Arid and Hyper Arid Regions (Case Study: Kerman and Bam) . *jwmr*. 5(10), 117-131. [In Persian]
18. Sadat Ataf, S. (2015). Investigating the temporal and spatial changes of the country's annual rainfall based on the atmospheric general circulation model and SDSM. Master's thesis in Water Resources Engineering, Malayer University. [In Persian]
19. Solgi, A., Zarei, H. (2018) Application of Gene Expression Programming and Support Vector Regression models to Modeling and Prediction Monthly precipitation. *jgs* 2018; 18 (50) :91-103 [In Persian]
20. Statistics Center of Iran Meteorological Organization, 2017. [In Persian]
21. Timbal, B. (2009). generalization of statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. *Environ.Model. Software*. 24, pp. 341-358.
22. Vaughan, A., Tebbutt, W., Hosking, S., Richard, E., Turner, E. (2021). Convolutional conditional neural processes for local climate downscaling. *Geoscientific Model Development*, 420, pp. 1-25.
23. Widmann, M., Bretherton, C.S., Salathe., E.P. (2003). Statistical precipitation downscaling over the northwestern United State using numerically simulated precipitation as a predictor. *J. Clim*. 16, pp. 799-816.
24. Wilby M. (2001). Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. *Prog. In Physi. Geog*. 21, pp. 530-548.
25. Wilby R.L., Dawson C.W. (2007). SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User Manual, 94pp.
26. Wilby, R., Dawson, C., Barrow, E. (2002). SDSM 4.2–A decision support tool for the assessment of regional climate change impact. *Environmental modelling and software*, 17(2), pp.145-157.
27. Wilby, R.L., Dawson, C.W. (2004). Statistical downscaling model (SDSM) version 3.1: User manual. Retrieved April, 15, 2007.



مقاله پژوهشی

پیش‌بینی ناپایداری خطوط راه‌آهن بر اساس تغییرات اقلیمی با تأکید بر دما (مطالعه موردی: مسیر کرمان-زاهدان)

صادق کریمی\* - دانشیار آب و هواشناسی، بخش جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.  
علی مهربانی - دانشیار بخش جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.  
عابد حیدری زاده - کارشناس ارشد مخاطرات محیطی، بخش جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>شماره صفحات: ۳۷۱-۳۵۵</p> <p>از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید</p> 	<p>وجود تنوع اقلیمی (به خصوص دما) و مهم‌تر از آن نوسانات و تغییرات آن در مناطق مختلف کشور می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر خطوط ریلی آن بگذارد. نوسان‌ها و تغییرات دمایی می‌تواند بر بسیاری از جنبه‌های مختلف سیستم حمل و نقل ریلی به ویژه ناپایداری‌های ریلی تأثیرگذار باشد؛ لذا ارزیابی اثر شرایط اقلیمی به ویژه نوسان‌ها و تغییرات دما بر ناپایداری‌های ریلی (خمیدگی، جابجایی و شکستگی خطوط)، نیازمند تجزیه و تحلیل دقیق‌تر روابط بین این دو متغیر است که هدف این تحقیق است. در این پژوهش به منظور پیش‌بینی بلندمدت دمایی و تحلیل اثرات آن بر خطوط ریلی، از مدل گردش عمومی جو (GCM) استفاده شده است. برای پیش‌بینی‌های محلی و ناحیه‌ای از روش ریزمقیاس نمایی آماری SDSM استفاده گردید. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های میانگین ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک کرمان، بم و زاهدان با دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و داده‌های مدل HadCM3 (داده-های نسل سوم مدل جهانی اقلیم تحت سناریو A2 و B2) می‌باشد. دما برای سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ پیش‌بینی و با دوره پایه مقایسه شد. یافته‌های حاصل برای هر دو مجموعه داده مشاهداتی و پیش‌بینی شده، نشان داد مدل SDSM در ریزمقیاس گردانی دمایی خروجی مدل HadCM3 در هر سه ایستگاه با اختلاف کم به درستی عمل می‌کند و از دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی دما برخوردار است نتایج نشان داد به جز در محدوده زاهدان در برخی ماه‌های سرد سال، شاهد افزایش دما در تمامی ماه‌های سال در ایستگاه‌ها هستیم و این افزایش دما در سال ۲۰۹۹ به اوج خود خواهد رسید.</p>

استناد: کریمی، صادق؛ مهربانی، علی و حیدری زاده، عابد. (۱۴۰۲). پیش‌بینی ناپایداری خطوط راه‌آهن بر اساس تغییرات اقلیمی با تأکید بر دما (مطالعه موردی: مسیر کرمان-زاهدان). فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۱۳(۵۱)، صص ۳۵۵-۳۷۱.

DOI:10.22034/jgeog.2024.403910.4047

## مقدمه

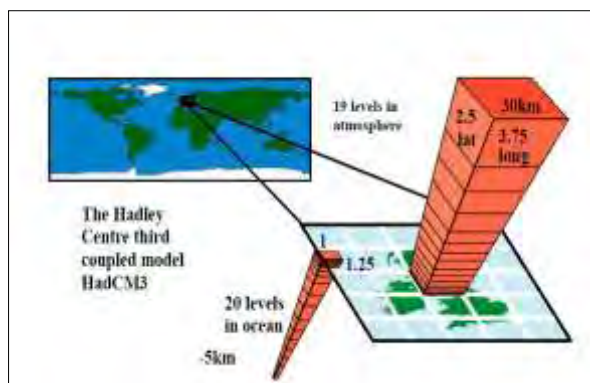
در دنیای امروز حمل و نقل نقش کلیدی و مهمی را در فرآیند توسعه اقتصادی سیاسی و اجتماعی به عهده دارد. در این میان صنعت ریلی به سبب مشخصه‌هایی نظیر کاهش مصرف سوخت، آلودگی زیست محیطی کمتر، ایمنی بالا، مصرف زمین کمتر و حجم بالای انتقال کالا و مسافر از اولویت بیشتری نسبت به سایر وسایل حمل و نقلی برخوردار است. از این رو، تمرکز بر بهبود آن از نیازمندی‌های اجتناب ناپذیر محسوب می‌شود. تعمیر و نگهداری خطوط ریلی همواره سهم بزرگی از بودجه راه‌آهن را به خود اختصاص می‌دهد و به تناسب افزایش ترافیک بر روی خط افزایش بار محوری و سرعت قطارها این هزینه‌ها تشدید می‌شود؛ لیکن با مدیریت و شناخت صحیح از عوامل مؤثر در خرابی خطوط و استفاده از علم روز برای تعمیر و نگهداری می‌توان گام مهمی در زمینه بهبود کیفیت خطوط و نیز صرفه‌جویی در راه‌آهن برداشت (امیدوار و التچ، ۱۳۹۴: ۱۱۴). در این راستا طبقه‌بندی خطوط بر حسب تعمیر و نگهداری و مدرنیزه کردن عملیات تعمیر و نگهداری جزو مهمترین عوامل است. از طرفی عوامل آب و هوایی به خصوص مخاطرات آب و هوایی بر عملکرد زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی (شبکه‌های ارتباطی) تأثیرگذار است. بررسی اثرات اقلیم بر ناپایداری‌های احتمالی زیرساخت‌های مذکور برای سیستم‌های اجرایی و عملیاتی نیازمند مطالعات عمیق در این حوزه است؛ چراکه اثر عوامل آب و هوایی بویژه دما در مکان‌های جغرافیایی مختلف، متفاوت است. نوسان‌ها و تغییرات دمایی می‌تواند بر بسیاری از جنبه‌های مختلف سیستم حمل و نقل ریلی به ویژه ناپایداری‌های ریلی تأثیرگذار باشد (امیدوار و التچ، ۱۳۹۴: ۱۲۳). مطالعه تغییرات دمایی هوا در آتی برای درک بهتر تغییرات اقلیمی یاد شده در منطقه مورد مطالعه برای شناخت بهتر روابط پیچیده بین اقلیم منطقه و ناپایداری‌های ریلی (خمیدگی، جابجایی و شکستگی خطوط)؛ همچنین پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با تأکید بر تغییرات دمایی با استفاده از سناریوهای پیش‌بینی کننده اقلیم در مقیاس کلان و سپس خرد، اهدافی است که این پژوهش به دنبال آنهاست. باید در نظر داشت که دمای هوا یکی از پر کاربردترین پارامترهای مورد استفاده برای تشخیص تغییر اقلیم در مقیاس جهانی و منطقه‌ای است. زیرا دارای تغییرات زمانی و مکانی زیادی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی است؛ به طوری که کمینه و بیشینه‌های دمایی طوری تغییر پیدا می‌کند که آستانه‌های جدیدی برای ایجاد ناپایداری ریلی (خمیدگی، جابجایی و شکستگی خطوط) به وجود خواهد آورد. بنابراین مطالعه تغییرات آن، برای درک بهتر تغییرات اقلیمی یاد شده در منطقه مورد مطالعه برای شناخت بهتر روابط پیچیده بین اقلیم منطقه و ناپایداری‌های ریلی (خمیدگی، جابجایی و شکستگی خطوط) ضروری به نظر می‌رسد و از اهمیت زیادی برخوردار است. بر همین اساس با توجه به وضعیت جاری و آتی دما در منطقه، این سؤال به ذهن متبادر می‌شود: بر اساس پیش‌بینی سناریوهای اقلیمی، شرایط دمایی آینده چگونه خواهد بود و چه تأثیری بر ناپایداری‌های ریلی خواهد داشت؟ بنابراین هدف پژوهش، ارزیابی اثر شرایط اقلیمی به ویژه نوسان‌ها و تغییرات دما بر ناپایداری‌های ریلی (خمیدگی، جابجایی و شکستگی خطوط) است.

## مبانی نظری

با در نظر گرفتن واقعیت دوم به نام تغییر اقلیم، روابط یاد شده به شدت پیچیده می‌شود. در حال حاضر این حقیقت روشن است که بشر وضعیت جو زمین را تغییر می‌دهد و طبیعی است اگر علت اصلی این امر را در رشد بی‌رویه جمعیت و متعاقب آن نیاز به فناوری و در نتیجه افزایش تقاضای جامعه جهانی برای حامل‌های انرژی دانست؛ هم اکنون قسمت اعظم انرژی‌های در دست بشر، به سوخت‌های فسیلی متکی است. چنانچه این روند در چند دهه آینده ادامه یابد، تغییرات اقلیمی شدیدی در سطح جهان به وقوع خواهد پیوست. معمولاً دو روند کلی برای تعیین رفتار آینده سیستم اقلیمی استفاده می‌شود که عبارتند از: روند کاملاً تجربی - آماری و روند دینامیکی با استفاده از قواعد اولیه فرآیند کنترل سیستم اقلیمی. اخیراً تأکید بر استفاده از روش‌های دینامیکی سیستم اقلیمی یا مدل چرخش عمومی جو می‌باشد که به طور گسترده‌ای مورد استفاده اند (Landman and Goddard, 2002). مدل‌های چرخش عمومی جو (GCM) مورد استفاده در مباحث تغییر اقلیم یا پیش‌بینی‌های فصلی، دارای تفکیک نمونه‌ای چندین کیلومتر هستند (Timbal et al, 2009). بنابراین یک منطقه، به وسیله تعدادی شبکه‌های سلولی معرفی می‌شود.

اساس مدل‌های GCM بر مبنای قوانین اساسی فیزیکی جو قرار دارد و به مدل‌های گردش عمومی جو نیز مشهورند. همه عوامل اقلیمی شایان توجه، در مدل‌های گردش عمومی جو منظور شده است. برای مثال توجه به سلسله مراتب و برهم کنش اقیانوس، جو، یخ‌های دریایی و سطوح خشکی‌ها در این مدل سرلوحه مدل‌سازی است و خود به سه نوع چرخش عمومی جو (AGCM)، چرخش عمومی اقیانوس (OGCM) و مزدوج (AOGCM) تقسیم می‌شوند. در مدل‌های گردش عمومی جو معادلات توضیح-دهنده تکامل زمانی دما، باد، بارش، بخار آب و فشار در ارتباط با لایه نازک اتمسفر (حدود ۵۰ متر) می‌باشد. در مدل‌های چرخش عمومی اقیانوسی، توجه اساسی به واکنش اقیانوس‌ها و دریاها در مقابل افزایش CO<sub>2</sub> است. با این وجود توجه به گردش حرارتی-نمکی و احتمال تغییر در تولیدات زیستی نیز در معرض توجه است. واضح است که شرایط مزبور تحت تأثیر توزیع زمانی-مکانی پهنه‌های یخی اقیانوسی است. در مدل چرخش عمومی مزدوج (جوی-اقیانوسی) متغیرهای مربوط به چرخش عمومی جو-اقیانوس به همراه روابط متقابل خشکی-اقیانوس، اکوسیستم‌های اقیانوس با جو و مختصات شیمیایی و فیزیکی نیز سیستم‌های انسانی در معرض توجه قرار می‌گیرد. به کارگیری مدل‌های چرخشی عمومی جو برای بازسازی اقلیم گذشته یا پیش‌بینی اقلیم آینده، این قبیل مدل‌ها را به مدل‌های جهانی اقلیم معروف نموده است. هدف مدل‌های GCM محاسبه شاخص-های سه بعدی اقلیم در شبکه‌های مشخص است (گودرزی، ۱۳۹۵: ۱۱۱).

مدل‌های گردش عمومی جو، اطلاعات مفیدی درباره پاسخ جو به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کنند اما مدل‌های گردش عمومی جو دارای دقت فضای و زمانی لازم نیستند تا اقلیم دهه‌های آتی را در مقیاس محلی و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی، ارزیابی و پیش‌بینی قرار دهند. آنها می‌توانند وضع اقلیم آینده را در یک مقیاس نسبتاً وسیع، ۳۰۰ کیلومتر (حدود سطحی در حدود مساحت کشور پرتغال) پیش‌بینی کنند که ممکن است در داخل این شبکه گسترده چندین ایستگاه هواشناسی واقع شده باشد. علت ضعف این مدل‌ها در عدم پیش‌بینی در مقیاس‌های مکانی و زمانی کوچک‌تر، به نبود سامانه‌های قدرت‌مند محاسبات عددی، غیراقتصادی بودن و زمانبر بودن آنها بر می‌گردد. برای چیره‌گی بر این مشکل بایستی خروجی مدل‌های اقلیمی را به مقیاس‌های کوچک‌تر تبدیل کرد تا بتوان اقلیم محلی و ایستگاهی را مورد پیش‌بینی و ارزیابی قرارداد که به این فرایند «ریزمقیاس‌نمایی» می‌گویند. در سال‌های اخیر از میان چهار دسته کلی روش‌های ریزمقیاس‌سازی (ریزمقیاس‌سازی دینامیکی، دسته‌بندی سینوپتیکی، ایجاد آب و هوا به روش تصادفی و روش‌های آماری) روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری، بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است. این گروه از روش‌های ریزمقیاس‌سازی که مدل SDSM را نیز شامل می‌شود، کاهش مقیاس را مبتنی بر سابقه آماری پیشگوهای بزرگ مقیاس و پیش‌بینی شونده‌های موضعی پایه‌ریزی می‌نماید. برتری اصلی این روش و دلیل انتخاب این مدل در این پژوهش، اقتصادی بودن، سادگی و سرعت بالا در فرایند ریزمقیاس‌سازی ناحیه‌ای می‌باشد. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM توسط ویلی و همکاران، به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس‌نمودن به روش آماری توسعه یافته است. مبنای این مدل رگرسیون چند متغیره می‌باشد و پارامترهای اقلیمی چون بارش و دما را در درازمدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی (متغیرهای NCEP) پیش‌بینی می‌کند. به دلیل اینکه در مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری، ساخت داده‌های هواشناسی با استفاده از ترکیب دو روش احتمالاتی و رگرسیونی صورت می‌گیرد؛ لذا در بین طبقه‌بندی مدل‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی، از جمله بهترین مدل‌ها می‌باشد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳). مرکز تحقیقات و پیش‌بینی‌های اقلیمی هادلی در اداره هواشناسی انگلستان یکی از مراکز جهانی است که هدایت مطالعات اقلیمی و مدل‌سازی را بر عهده دارد. یکی از جدیدترین مدل‌های جفت شده گردش عمومی جوی-اقیانوسی AOGCM مدل HadCM3 است که در مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم هادلی در انگلستان اجرا و به وسیله گوردون و همکاران ارائه شده است. این مدل زیر مجموعه‌ای از چهارمین گزارش ارزیابی IPCC می‌باشد که از طریق مرکز توزیع داده‌ها (DDC) قابل دسترسی است (بغدادی، ۱۳۹۵). در این مدل، شبیه‌سازی‌ها بر مبنای تقویم سال ۳۶۰ روزه و ماه‌های ۳۰ روزه انجام می‌شود. قدرت تفکیک بالای مؤلفه اقیانوسی، مهم‌ترین مزیت این مدل است. از دیگر مزیت‌های این مدل، هماهنگی خوب بین مؤلفه-های جوی و اقیانوسی آن است (سادات اعطاف، ۱۳۹۵).



شکل ۱- توصیف مدل HadCM3

### پیشینه پژوهش

در ادامه به بررسی اجمالی تحقیقات مرتبط با موضوع این تحقیق پرداخته می‌شود:

کیم و همکاران (۱۹۸۴) اولین کسانی بودند که جهت ریزمقیاس‌نمایی عناصر اتمسفری از مدل‌های جهانی استفاده کردند. بعدها *جیورجیا* و *میرانز* (۱۹۹۱)، هیوستون و کرانی (۱۹۹۶)، ویلی و همکاران (۲۰۰۱)، ویلی و همکاران (۲۰۰۲) و ویلی و داوسون (۲۰۰۴) از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده نمودند. به دنبال آنها پژوهشگران دیگری به شرح ذیل از این روش استفاده کردند. ویلی و همکاران (۲۰۰۷) کلیه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی را در چهار گروه دینامیکی، سینوپتیکی، آماری و تابع انتقالی طبقه‌بندی کردند. از آنجا که مدل‌های دینامیکی و سینوپتیکی جهت بیه‌سازي متغیرهای اقلیمی نیاز به کامپیوتر و ابزار پیچیده دارند، امروزه مدل‌های آماری خصوصاً تابع انتقالی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این گروه بر حسب اینکه بر پایه روابط آماری یا ریاضی استوار باشند، به دو دسته مدل‌های آماری و مدل‌های ریاضی تقسیم‌بندی می‌شوند. از مدل‌های ریاضی می‌توان به شبکه عصبی اشاره نمود. همچنین مدل SDSM یکی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی تابع انتقالی آماری به حساب می‌آید. خان و همکاران (۲۰۱۱) به منظور ارزیابی دقت و میزان عدم قطعیت، سه گروه داده بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه کانادا را در قالب سه مدل SDSM LARS-WG و شبکه عصبی مورد شبیه‌سازی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در بین سه مدل مذکور، مدل SDSM بهترین دقت را در شبیه‌سازی داده‌ها از خود نشان داد.

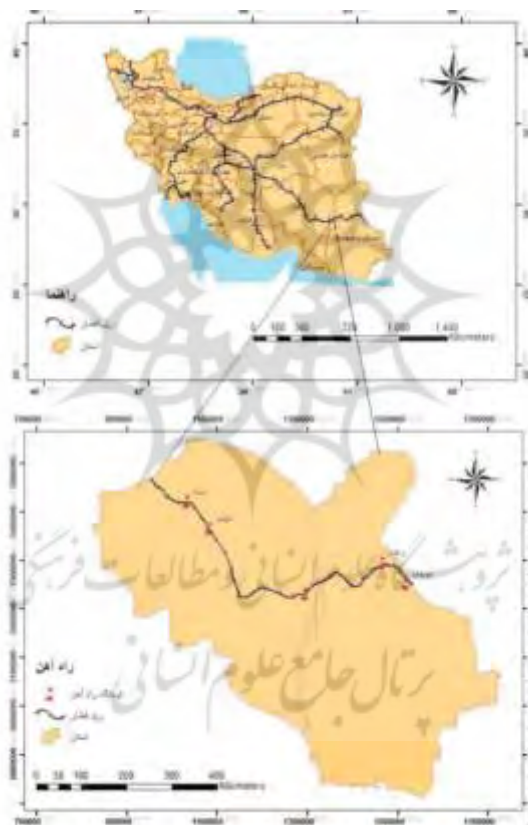
در مطالعه هاشمی و همکاران (۲۰۱۱) به منظور ارزیابی دقت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در حوضه کلوسا واقع در جنوب ایسلند (نیوزیلند) دو روش LARS-WG و SDSM مورد تحلیل قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که دقت دو روش شبیه به یکدیگر بوده و می‌توان از دو روش برای مطالعات تغییر اقلیم بهره گرفت. چیم و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM را روی روند داده‌های حداقل دمای ایستگاه‌های کشور پاکستان را در دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۱ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که طبق آزمون من‌کندل روند افزایشی حداقل دمای سالانه معنادار است. علاوه بر آن تحلیل‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های دما مدل شده و داده‌های واقعی وجود دارد علاوه بر آن ضریب همبستگی پیرسون برای اکثر نواحی بالای ۹۰ درصد بود. روش‌های آماری مختلف برای بررسی روند به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تغییر معنادار اقلیمی بیشتر در نواحی شمالی کشور پاکستان رخ داده است. دهقان و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به بررسی عملکرد مدل‌های SDSM، IDW و LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی دما و بارش ایستگاه سینوپتیک پارس‌آباد پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کالیبراسیون و صحت‌سنجی دو مدل SDSM و LARS-WG در مورد دما نشان داد که دو مدل دارای توانایی بیشتری در شبیه‌سازی دما نسبت به بارش می‌باشند و در تمام مدل‌ها، برای بیشتر ماه‌های گرم، افزایش دما مشاهده گردید. بطور کلی، نتایج نشان دادند که هر سه مدل عملکرد مشابه و خوبی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی دما دارند. رضایی و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه خود مقادیر بارش مدل بزرگ مقیاس جوی HadCM3 را با استفاده از روش مقیاس‌نمایی SDSM برای منطقه کرمان برآورد کردند. مطابق نتایج به دست آمده با استفاده از مدل SDSM بارش سالانه ایستگاه کرمان تا سال ۲۰۹۹ کاهش خواهد یافت. به دنبال آن محققان زیادی تا به امروز از این روش برای ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌بینی‌های اقلیمی در



تحقیقات خود استفاده نموده‌اند؛ از جمله سلگی و همکاران (۱۳۹۷) جوادی و همکاران (۱۳۹۷)، جهانگیر و قره‌داغی (۱۴۰۰)، رحیمیانی ایرانشاهی و همکاران (۱۴۰۱)، خسروی و آذری (۱۴۰۱)، واقان و همکاران (۲۰۲۱)، بیسیست و همکاران (۲۰۲۱) و خسروی و آذری (۲۰۲۲).

## روش تحقیق

محور ریلی کرمان-زاهدان از شهر کرمان شروع می‌شود و با عبور از مناطق بم، فهرج، کورین و نصرت آباد وارد شهر زاهدان می‌شود. محدوده مورد نظر شامل محدوده شرقی استان کرمان می‌باشد. در این پژوهش بعد از اخذ داده‌ها از سازمان هواشناسی، به مرتب‌سازی هر فراسنج براساس ماه‌های میلادی برای ورود به مدل اقدام شد. برای ارزیابی تغییرات دمایی در محدوده ریلی کرمان-زاهدان از سه ایستگاه به دلیل تشابه دوره آماری دوره ۳۰ ساله استفاده شد. در محدوده ریلی سه ایستگاه سینوپتیک کرمان، بم و زاهدان که قدیمی‌ترین آمار درجه حرارت در محدوده ریلی را دارا می‌باشند، استفاده شد. ایستگاه‌های مذکور دارای دوره آماری ۱۹۶۱-۱۹۹۰ می‌باشند که برای همخوانی با مدل مناسب می‌باشد و ایستگاه‌های دیگر مانند نصرت آباد، میانه جیرفت و ... به دلیل نبود و نقص داده دمایی حذف گردید. مختصات ایستگاه‌ها و موقعیت آنها در جدول (۱) و شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده ریلی دو استان مورد مطالعه منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دوره آماری
۱	کرمان	۵۶ ۵۸	۳۰ ۱۵	۱۷۵۳	۱۹۶۱-۱۹۹۰
۲	بم	۵۸ ۲۱	۲۹ ۶	۱۰۶۶	۱۹۶۱-۱۹۹۰
۳	زاهدان	۶۰ ۵۳	۲۹ ۲۸	۱۳۷۰	۱۹۶۱-۱۹۹۰

منبع: یافته‌های پژوهشگر

## ساختار مدل SDSM

به دلیل آن که خروجی مدل HadCM3 بطور سلولی و با ابعاد وسیع هستند؛ لذا استفاده از اطلاعات این سلول برای محدوده‌ها با موقعیت‌های کوچک‌تر مانند ایستگاه‌های هواشناسی، می‌تواند خطای زیادی را هنگام مقایسه متغیرهای آب و هوایی شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی آن محدوده ایجاد کند. مدل SDSM به عنوان مدلی از ترکیب روش‌های تولیدکننده تصادفی آب و هوا و تابع تغییر شناخته شده است. این مدل یکی از کارآمدترین مدل‌ها جهت انجام مطالعات آب و هوایی در سطح دنیا محسوب می‌گردد که در سال ۲۰۰۱ توسط ویلی و همکاران به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس‌نمایی آماری در انگلستان تهیه شده است. مراحل کار با این مدل را می‌توان در هشت مرحله زیر خلاصه کرد: آماده‌سازی داده‌ها، تعیین روابط بین متغیرهای پیش‌بینی کننده و پیش‌بینی شونده (غربالگری)، واسنجی مدل، تولید داده‌های تاریخی و صحت‌سنجی مدل، آنالیز داده‌ها و تولید سناریوهای اقلیمی آینده.

## آماده‌سازی داده‌ها

سه نوع داده برای این منظور مورد نیاز می‌باشد: دیدبانی، واکاوی و سناریوهای اقلیمی برون‌داد مدل گردش عمومی. از آنجا که هدف شبیه‌سازی دما می‌باشد، بایستی در ابتدا داده‌های ماهانه دما در یک ستون تحت فرمت Notepad ذخیره شوند.<sup>۱</sup>

## کنترل کیفیت داده‌ها<sup>۲</sup>

در این مرحله به بررسی فایل‌های ورودی از نظر داده‌های مفقوده یا مقادیر مشکوک اقدام می‌گردد. در مدل SDSM بخش کنترل کیفیت این مسئولیت را به عهده دارد. وظیفه این بخش شناسایی داده‌های مفقوده، می‌باشد (Wilby and Dawson, 2004). در این گام کنترل داده‌های دیدبانی (پیش‌بینی شونده) ایستگاه مورد مطالعه از نظر داده‌های مشکوک و مفقود انجام می‌گیرد.

## تبدیل داده‌ها<sup>۳</sup>

در صورتی که داده‌ها دارای توزیع نرمال نبوده و دارای چولگی باشند مانند بارش روزانه، بر روی آنها فرآیند تبدیل انجام می‌گیرد. تبدیلات عبارتند از: ریشه‌چهارم، لگاریتم و ... . حالت پیش‌فرض عدم انجام تبدیل بر روی داده‌ها (مثل دمای میانگین، دمای بیشینه و کمینه و ...) می‌باشد.

## غربالگری

در این گام کاربر انواع متغیرهای پیش‌بینی کننده را به همراه یک متغیر پیش‌بینی شونده (به عنوان نمونه بارش و یا دما) به مدل معرفی می‌کند، مدل با توجه به تنظیمات کاربر شرطی یا غیرشرطی بودن فرآیندها، روابط بین متغیرها را بررسی نموده و میزان همبستگی متغیر پیش‌بینی شونده را با تک تک متغیرهای پیش‌بینی کننده اعلام می‌کند. هرچه میزان همبستگی جزئی متغیرها بزرگتر باشد، نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تری بین پارامترهاست. اگر فرآیند بین پیش‌بینی کننده - پیش‌بینی شونده دارای یک قاعده فرآیند متوسط باشد (مانند حداکثر دما)، فرآیند غیر شرطی به مدل معرفی می‌شود، در غیر این صورت (مانند بارش که مقادیر آن به رخداد روزهای تر مربوط است)، فرآیند شرطی خواهد بود (Wilby and Dawson, 2004).

<sup>۱</sup> - داده‌های واکاوی و برون‌داد مدل‌های گردش عمومی (فقط داده‌های مدل HadCM3 برای ایران در دسترس هستند) تحت سناریوهای انتشار مختلف از این آدرس قابل دانلود هستند: <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=dst-sdi>

<sup>۲</sup> - Quality Control

<sup>۳</sup> - Data Transformation

در پایان این مرحله، کاربر با توجه به جداول و نمودارهای ارائه شده توسط مدل و تجربه خویش برخی از متغیرهای پیش‌بینی کننده را که با متغیر پیش‌بینی شونده همبستگی بیشتری دارند، انتخاب می‌کند و از آنها برای واسنجی مدل استفاده خواهد کرد.

### واسنجی مدل

واسنجی فرآیندی است که در آن معادلات ریزمقیاس نمایی بر مبنای معادلات وایازی چندگانه بر اساس داده‌های روزانه متغیر پیش‌بینی شونده (در اینجا دما) و متغیرهای بزرگ مقیاس پیش‌بینی کننده جوئی (در اینجا داده‌های واکاوی NCEP) ساخته می‌شود. پارامترهای مدل وایازی شده به شیوه استاندارد PAR ذخیره می‌شوند. در این مرحله متغیرهای بزرگ مقیاس NCMP/NCAR انتخاب شده در مرحله قبل و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های منتخب (دما یا بارش) با استفاده از معادله وایازی<sup>۱</sup> وایازی<sup>۱</sup> خطی در یک دوره ۲۵ ساله (۱۹۶۱-۱۹۸۵) برای تنظیم و آموزش مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار مدل در این مرحله باید توسط کاربر مشخص شود که آیا شرطی است یا غیر شرطی و آیا مدل ماهانه، فصلی یا سالانه است. در مرحله واسنجی می‌توان با تعیین قدرت تفکیک زمانی و نوع تغییرپذیری، مدل را برحسب تغییرپذیری ماهانه، فصلی یا سالانه بسته به متغیر پیش‌بینی شونده آموزش داد (Wilby et al., 2001).

### صحت‌سنجی مدل

در این مرحله نرم‌افزار SDSM قادر است دسته‌هایی از سری‌های زمانی آب و هوایی روزانه را برای متغیرهای پیش‌بینی کننده و مدل رگرسیونی واسنجی شده تولید کند. این بخش قادر به صحت‌سنجی مدل واسنجی شده با تولید سری‌های زمانی مصنوعی و مقایسه آنها با سری‌های تاریخی می‌باشد. این بخش می‌تواند داده‌های گم شده تاریخی را نیز به خوبی ساخته و جای آنها را پر کند (Wilby and Dawson, 2007). کاربر در این مرحله باید طول دوره لازم جهت تولید داده و فایل مدل واسنجی شده را وارد کند. در ضمن اینکه کاربر می‌تواند تعیین کند که مدل بین یک تا صد دسته سری زمانی اقلیمی تولید کند. این سری‌ها همگی دارای میانگین و انحراف معیار شبیه به هم هستند.

### آنالیز داده‌ها

آماره‌های برای مقایسه دو مجموعه داده در این قسمت توسط مدل SDSM فراهم شده است. در این مرحله، کمیت‌های آماری نظیر حداکثر، حداقل، جمع و ... برای هر دو مجموعه داده مشاهداتی و پیش‌بینی شده محاسبه می‌شود که می‌توان آنها را مورد مقایسه قرار داد. در مرحله آنالیز داده‌ها کاربر قادر است تا داده‌های تاریخی مشاهداتی و داده‌های تاریخی تولید شده در بخش صحت‌سنجی را مقایسه کند و میزان صحت نتایج مدل را بررسی نماید. انواع آزمون‌ها و آماره‌های لازم توسط کاربر در بخش تنظیمات مشخص می‌شوند.

### تولید سناریوی اقلیمی

آخرین مرحله، تولید سناریو/های اقلیمی است. پس از ارزیابی رابطه واسنجی به دست آمده، می‌توان با دقت قابل قبولی از این رابطه برای ریزگردانی خروجی مدل HadCM3 با دو سناریوی A2 و B2 استفاده کرد. در این مرحله از مدل SDSM اقدام به تولید سناریوی آب و هوایی پیش‌بینی شده برای دوره پایه و آینده می‌شود که با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده برای دوره پایه می‌توان توانمندی مدل را در ریزگردانی خروجی HadCM3 مورد ارزیابی قرار داد. در این گام نرم‌افزار با کمک فایل مدل واسنجی شده و برای دوره تعیین شده توسط کاربر و با توجه به تعداد دسته سری زمانی مورد نیاز کاربر، دسته‌های مختلف از سری‌های زمانی را برای آینده پیش‌بینی می‌کند. به این ترتیب سناریوهایی جهت آینده اقلیم محلی در ایستگاه‌های مورد نظر ساخته می‌شوند (Wilby and Dawson, 2002).

<sup>1</sup> - Regression



شکل ۳- مراحل فرآیند ریزمقیاس‌نمایی و تولید سناریوهای اقلیمی (Wilby et al, 2002)

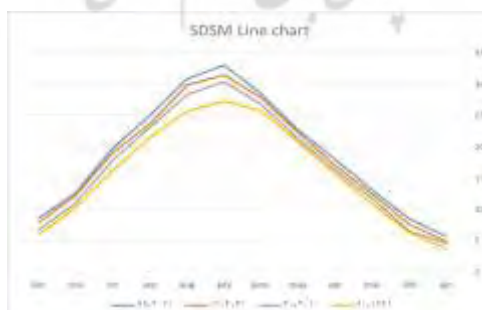
### روش درون‌یابی IDW

پیشرفت‌های اخیر آمار فضایی و جایگزینی متغیر ناحیه‌ای به جای متغیر تصادفی، منجر به تغییر روش‌های کمی در آمار کلاسیک شده است؛ همچنین گسترش سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در ارتباط با آمار فضایی، مسبب رواج روش‌های درون‌یابی<sup>۱</sup> در تهیه انواع نقشه‌های پهنه‌بندی شده است (عساکره، ۱۳۸۷). کلیه روش‌های درون‌یابی بر مبنای این فرضیه توسعه یافته‌اند که نقاط نزدیک به یکدیگر نسبت به نقاط دورتر، همبستگی و تشابه بیشتری دارند. در روش IDW، فرض اساسی بر این است که میزان تشابه و همبستگی بین همسایه‌ها با فاصله بین آنها متناسب است؛ بنابراین می‌توان آن را به صورت تابعی با عکس فاصله هر نقطه از نقاط همسایه تعریف کرد. این روش در حالتی که نقاط نمونه به اندازه کافی و با پراکنش مناسب در مقیاس محلی وجود داشته باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مزایای این شیوه، نشان دادن خطوط ناپیوسته مانند شکستگی‌ها، خطواره‌ها، گسل‌ها و رودخانه‌ها که ایجاد ناپیوستگی در سطح می‌کنند، می‌باشد (انصاری و داوری، ۱۳۸۶). در این پژوهش برای پهنه‌بندی پیش‌بینی‌های دمایی در منطقه مورد مطالعه از این روش استفاده شده است.

### بحث و یافته‌های تحقیق

#### تحلیل و پیش‌بینی تغییرات دما در ایستگاه کرمان

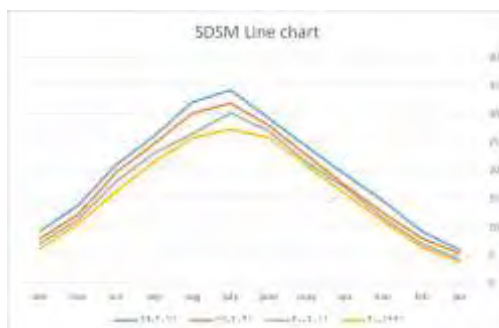
مقادیر شبیه‌سازی شده میانگین دمای روزانه به وسیله نرم‌افزار HadCM3 برای دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۱۹۹۹ ایستگاه کرمان تحت سناریوی A2 و B2 در شکل (۴) و (۵) آورده شده است. میانگین سالانه افزایش دما در ایستگاه کرمان تحت سناریوی B2 در دوره‌های آماری ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۹۹ به ترتیب به میزان ۱/۱۵، ۲/۱۲، ۲/۹۶ درجه سانتیگراد می‌باشد. بیشترین میزان افزایش دمای ماهانه در سه دوره در ماه جولای به میزان ۳/۱۳، ۴/۱۹، ۵/۷۳ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه است و از لحاظ فصلی بیشترین افزایش دما در شهرستان کرمان در فصل تابستان بوده است (شکل ۴).



شکل ۴- میانگین دمای ماهانه ایستگاه کرمان تحت سناریوی B2 منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

<sup>1</sup> - Interpolation

میانگین ماهانه افزایش دما در شهرستان کرمان تحت سناریوی A2 در دوره‌های آماری ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۹۹ به ترتیب به میزان ۱/۱۷، ۲/۱۴ و ۲/۹۵ درجه سانتیگراد و بیشترین افزایش دمای ماهانه در ماه جولای به میزان ۳/۱۶، ۴/۲۲ و ۵/۷۰ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه است (شکل ۵).



شکل ۵- میانگین دما ایستگاه کرمان تحت سناریوی A2 منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

میزان همبستگی سناریوهای B2 و A2 در مورد ایستگاه کرمان بالای ۹۵ درصد می‌باشد که این میزان همبستگی در مورد میزان دمای کرمان نشان‌دهنده افزایش میزان دما تا سال ۲۱۰۰ می‌باشد. در بین دهه‌های مورد مطالعه، دهه ۲۱۰۰ بیشترین افزایش دما را نسبت به دوره پایه خواهد داشت که این آنالیز روند تغییرات دما، نشان‌دهنده تغییر اقلیم منطقه بوده و روند افزایش دما و گرم شدن نسبی را طی می‌کند.

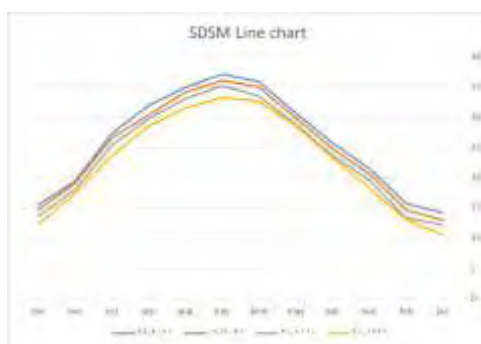
#### تحلیل و پیش‌بینی تغییرات دما در ایستگاه بم

نتایج حاصل از پیش‌بینی دمای ایستگاه سینوپتیک بم، نشان‌دهنده افزایش دما در دو سناریوی B2 و A2 است که این افزایش دما در دوره آماری ۲۰۷۱-۲۰۹۹ از دوره‌های آماری ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۱۱-۲۰۴۰ بیشتر بوده و پیش‌بینی دما تحت سناریوی A2 افزایش دمای بیشتری را نسبت به سناریوی B2 نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، میانگین افزایش دما در ایستگاه بم تحت سناریوی B2 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ به ترتیب به میزان ۱، ۲/۱۱، ۳/۰۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه است. بیشترین افزایش دما در کل دوره آماری مربوط به ماه جولای است که در دوره ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ به ترتیب ۲، ۲/۹۰ و ۳/۸۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به میانگین ماهانه دوره پایه می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶- میانگین دمای ایستگاه بم تحت سناریوی B2 منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

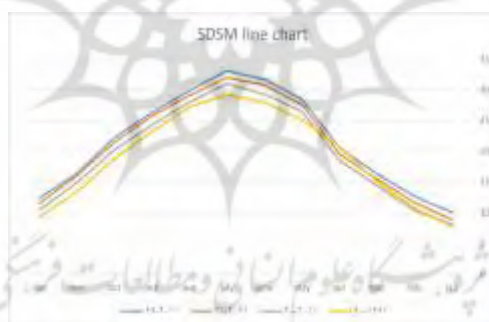
میانگین افزایش دما در ایستگاه سینوپتیک بم تحت سناریوی A2 در دوره‌های آماری ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰، ۲۰۷۱-۲۰۹۹ به ترتیب به میزان ۱، ۲/۵۰ و ۴/۲۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه است. از لحاظ دمای ماهانه، بیشترین افزایش دما مربوط به ماه جولای است که در دوره‌های آماری ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ به ترتیب ۱/۸۹، ۳/۲۷ و ۵/۰۶ نسبت به میانگین همین ماه در دوره پایه است. بیشترین افزایش دمای فصلی مربوط به فصل تابستان است (شکل ۷).



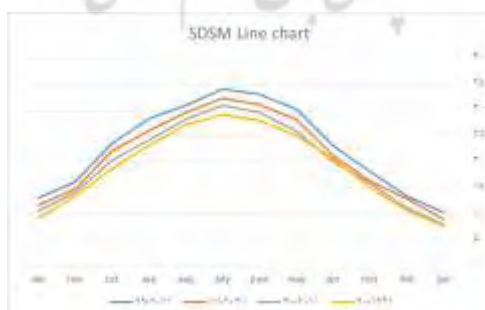
شکل ۷- میانگین دمای ماهانه ایستگاه سینوپتیک بم تحت سناریوی A2 منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

### تحلیل و پیش‌بینی تغییرات دما در ایستگاه زاهدان

محاسبات مربوط به تحلیل وضعیت مؤلفه میانگین دما برای ایستگاه زاهدان کمی متفاوت است، به طوری که سال به دو دوره تقسیم می‌شود: در دوره آب و هوای آینده از ماه ژانویه تا می دما نسبت به گذشته کاهش و از ژوئن تا اکتبر افزایش خواهد یافت. روند دمای مؤلفه‌های دمایی نشان داد که مؤلفه افزایش دما دارای یک حالت ایستاست؛ در حالی که مؤلفه کاهش دما دارای حالت نایستاست که دارای روند افزایشی و کاهشی در ماه‌های مختلف خود است که در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۴۰ در هر دو سناریوی B2 و A2 به خوبی مشهود است. اختلاف قابل ملاحظه میانگین دما بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی کننده‌ها را می‌توان به دلیل کویری بودن شهرستان زاهدان و وجود ناهمواری در این منطقه قابل توجیه دانست. این موضوع در نمودار روند میانگین دما به وضوح نمایان است (شکل ۸ و ۹).



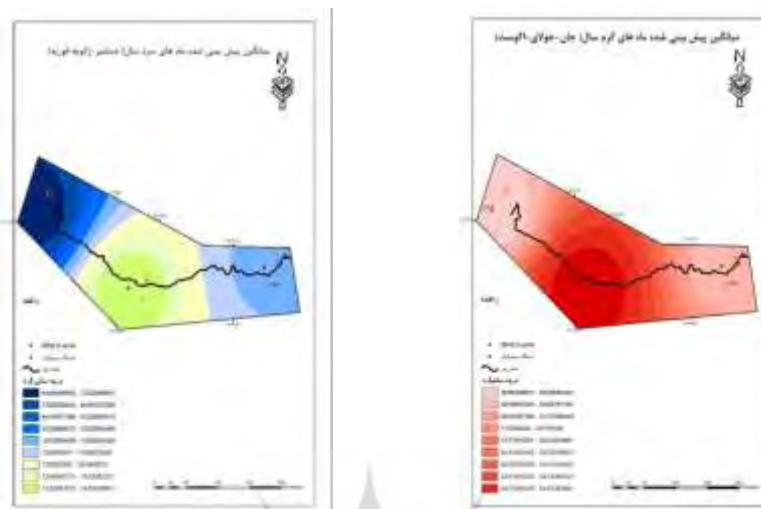
شکل ۸- میانگین دمای ماهانه در ایستگاه زاهدان تحت سناریوی B2 منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۹- میانگین دمای ماهانه ایستگاه زاهدان تحت سناریوی A2 منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

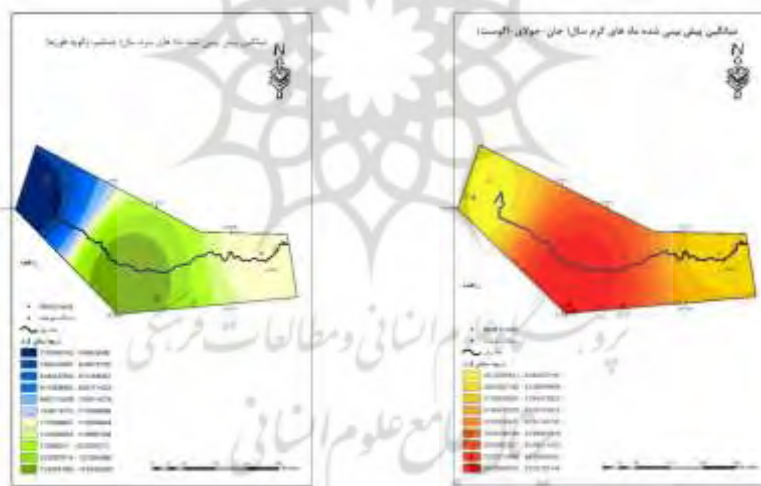
تحلیل پهنه‌ای پیش‌بینی‌ها در منطقه مورد مطالعه (مسیر ریلی کرمان - زاهدان)

در این مرحله سعی شد تا تغییرات مکانی دمای میانگین فصل تابستان و زمستان از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۱۰۰ بر اساس خروجی مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 و B2 مدل‌های GCM بررسی گردد. بدین جهت خروجی این مدل‌ها به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و بر اساس روش IDW تهیه شده است. روش مد نظر در اکثر سناریوهای مورد آزمون و در اکثر ادوار آبی مورد نظر، بهترین شکل از پهنه‌بندی را برای منطقه ارائه نموده است.



شکل ۱۰- میانگین دمای بیشینه ماه‌های گرم سال تحت سناریوی B2 (شکل سمت راست)

شکل ۱۱- میانگین دمای کمینه ماه‌های سرد سال تحت سناریوی B2 (شکل سمت چپ) منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۱۲- میانگین دمای بیشینه ماه‌های گرم تحت سناریوی A2 (شکل سمت راست)

شکل ۱۳- میانگین دمای کمینه ماه‌های سرد سال تحت سناریوی A2 (شکل سمت چپ) منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

## نتیجه‌گیری

به منظور ارزیابی پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم بر روی خط ریلی کرمان- زاهدان، از مدل گردش عمومی جو، خروجی مدل HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 استفاده گردید. ایستگاه‌های مورد بررسی عبارتند از: کرمان، بم و زاهدان. از سناریوی A2 و B2 به منظور بررسی تغییر اقلیم در شرایطی استفاده می‌شود که افزایش گازهای گلخانه‌ای مطابق مشاهدات قرن بیستم و داده‌های پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۱ باشد، به این شرط که افزایش گازهای گلخانه‌ای از دوره گذشته با سرعت یک درصد در هر سال تا رسیدن به غلظت آن به دو برابر ادامه داشته باشد. از آنجا که داده‌های تولید شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ مقیاس می‌باشند و با داده‌های دیده‌بانی شده در مقیاس محلی تفاوت دارند، نیاز به کوچک مقیاس کردن وجود دارد. از این رو

در این تحقیق از روش کوچک مقیاس کردن آماری SDSM استفاده گردید و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش هر چند آنالیز نتایج خروجی دو سناریوی A2 و B2 منجر به نتایج یکسانی نشد، ولی هر دو سناریو بیانگر افزایش در متغیرهای دمایی در ایستگاه‌های مورد مطالعه و در طول مسیر ریلی کرمان- زاهدان در دوره‌های آتی می‌باشد. نتایج نشان‌دهنده افزایش میزان دما تا سال ۲۱۰۰ در طول کل مسیر ریلی مورد مطالعه می‌باشد. در بین دهه‌های مورد مطالعه، دهه ۲۱۰۰ بیشترین افزایش دما را نسبت به دوره پایه خواهد داشت. آنالیز روند تغییرات دما نشان داد که اقلیم منطقه در حال تغییر بوده و روند افزایش دما و گرم شدن نسبی را سپری می‌کند؛ لذا ضروری است که مسئولین راه‌آهن برای حفاظت از زیرساخت‌ها در مقابل کماتش ریل‌ها در گرما یا سرمای شدید و برای سازگاری خطوط ریلی با اثرات تغییر اقلیم به مرور زمان و آرام آرام چاره‌اندیشی کنند. چراکه با افزایش دما در دوره‌های مختلف، دمای خطوط ریلی نیز افزایش پیدا می‌کند که در هنگام عبور قطار دمای خط ریلی نیز تا حدود دو برابر افزایش پیدا می‌کند. این افزایش دما باعث کاهش مقاومت خط ریل و در نتیجه کماتش خط می‌شود که باعث رخداد خطرات جانی و مالی در اثر خروج قطار از خط ریلی می‌شود. البته یکی از راهکارهای سنجش دوباره این پیش‌بینی‌ها، استفاده از دیتالاگرهای خودکار دماسنجی در طول مسیر ریل و پایش تغییرات دمایی کوتاه و بلندمدت است تا بر اساس آن نقاط آسیب دقیقاً مشخص و برای آن چاره‌جویی شود. این چالش‌ها تا حد زیادی می‌تواند هزینه‌های راه‌آهن و سطح متغیر آسیب‌پذیری و عدم قطعیت‌های مرتبط با شرایط آب و هوایی آینده و مقادیر ترافیک را تشدید کند. در مورد موفقیت مدل در برآورد میزان تغییرات می‌توان گفت که با توجه به نتایج اخذ شده از مدل و صحت‌سنجی آن و در نظرگیری سناریوهای اقلیمی به عنوان یک متغیر مستقل در فرایند مدل‌سازی، به نتایج آن بیش از سایر مدل‌های آماری می‌توان اطمینان کرد. با توجه به مطالعات انجام گرفته در مورد استفاده از سناریوهای تغییر آب و هوا به عنوان یک متغیر مستقل و میزان تاثیرپذیری عناصر آب و هوایی از آن در سال‌های آتی نشان داد که داده‌های گردش عمومی جو یک نقطه قوت مدل‌های گردش عمومی جو نسبت به روش‌های رایج آماری است.

## منابع

۱. امیدوار، بابک؛ التج، سهیلا. (۱۳۹۴). اثرات تغییر اقلیم بر حمل و نقل ریلی و روش‌های محاسبه ریسک عواقب آن، پنجمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران.
۲. انصاری، حسن؛ داوری، کامران. (۱۳۸۶). پهنه‌بندی دوره‌های خشک با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده در محیط GIS (استان خراسان). فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۱۰۸، صص ۹۷-۶۰.
۳. جوادی زاده، فرشاد؛ کردوانی، پرویز؛ علیجانی، بهلول؛ اسدیان، فریده. (۱۳۹۷). کارایی الگوهای مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در حوضه آبریز میناب. جغرافیای طبیعی، ۱۱(۴۲)، ۴۷-۶۶.
۴. جهانگیر، محمد حسین؛ قره‌داغی، لیلا. (۱۴۰۰). ارزیابی روش‌های SDSM در ریزمقیاس کردن اندازه بارش و دما سالانه شبیه‌سازی شده با مدل ۲CANESM (منطقه مورد مطالعه: استان آذربایجان شرقی). نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان ۱۰ (۳۲): ۶۰-۴۵.
۵. خسروی، آرمان؛ آذری، محمد. (۱۴۰۱). تعیین روند زمانی و مکانی و نقطه تغییر دما و بارش در حوضه کشف رود. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۳۳۴-۳۲۰.
۶. دهقان، زهره؛ فتحیان، فرشاد؛ اسلامیان، سعید. (۱۳۹۳). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های IDW، LARS-WG و SDSM برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس کردن دما و بارش. نشریه آب و خاک، ۲۹(۵)، ۱۳۷۶-۱۳۹۰.
۷. رحیمیانی ایرانشاهی، حمید؛ مرادی، حمیدرضا؛ جلیلی، خلیل. (۱۴۰۱). روند تغییرات بارش و دما در مقیاس‌های زمانی مختلف در حوزه آبخیز کرخه. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۲): ۱-۱۲.
۸. رضائی، مریم؛ نه تانی، محمد؛ آبکار، علیجان؛ رضایی، معصومه؛ میرکازهی، مهری. (۱۳۹۳). بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، سال ۵، شماره ۱۰.



۹. سادات اعطاف، سمیه. (۱۳۹۵). بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش سالانه کشور براساس مدل گردش عمومی جو و SDSM. پایان-نامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی منابع آب، دانشگاه ملایر.
۱۰. سلگی، اباذر؛ زراعی، حیدر؛ شهنی دارابی، مهرنوش؛ علیدادی، صابر. (۱۳۹۷). پیشنگری بارش ماهانه با استفاده از مدل‌های برنامه ریزی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۱۸، شماره ۵۰، ۹۱-۱۰۳.
۱۱. عساکره، حسین. (۱۳۸۲). کاربرد روش کریجینگ در میانمایی بارش. فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۶ (۱۲)، ۴۲-۲۵.
۱۲. گودرزی، مسعود؛ حسینی، سید اسعد؛ مسگری، ابراهیم. (۱۳۹۵). مدل‌های آب و هواشناسی: زنجان، انتشارات آذر کلک، ۲۵۰ص.
۱۳. مرکز آمار سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۷.
14. Basist, A., Bell, G.D., Meentemeyer, V. (2021). Statistical relationships between topography and precipitation patterns. *Journal of climate*, 7, pp. 1305-1315.
15. Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., Melville, B.W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), pp. 475-480.
16. <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=dst-sdi>
17. Khan, M.S., Coulibaly, P., Dibike, Y. (2011). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*. 319(1), pp. 357-382.
18. Khosravi, A., Azari, M. (2022). Spatio-temporal trend and change detection of temperature and precipitation of Kashafroud basin. *Researches in Geographical Sciences*, 22(66), pp. 289-306
19. Kim, J., Chang, J., Baker, N., Wilks, D., Gates, W. (1984). The statistical problem of climate inversion-Determination of the relationship between local and largescale climate. *Monthly Weather Review*, 112(10), pp. 2069-2077.
20. Landman, W.A., Goddard L. (2002). Statistical Recalibration of GCM forecasts over Southern Africa using Model Output statistics. *Int. J. Climatology*. 15, pp. 2038-2055.
21. Timbal, B. (2009). generalization of statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. *Environ.Model. Software*. 24, pp. 341-358.
22. Vaughan, A., Tebbutt, W., Hosking, S., Richard, E., Turner, E. (2021). Convolutional conditional neural processes for local climate downscaling. *Geoscientific Model Development*, 420, pp. 1-25.
23. Widmann, M., Bretherton, C.S., Salathe., E.P. (2003). Statistical precipitation downscaling over the northwestern United State using numerically simulated precipitation as a predictor. *J. Clim.* 16, pp. 799-816.
24. Wilby M. (2001). Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. *Prog. In Physi. Geog.* 21, pp. 530-548.
25. Wilby R.L., Dawson C.W. (2007). SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User Manual, 94pp.
26. Wilby, R., Dawson, C., Barrow, E. (2002). SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impact. *Environmental modelling and software*, 17(2), pp.145-157.
27. Wilby, R.L., Dawson, C.W. (2004). Statistical downscaling model (SDSM) version 3.1: User manual. Retrieved April, 15, 2007.