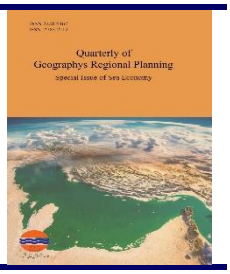
Iranian Association of Geopolitical

Geography(Regional Planning)
Spring 2024. Vol 14. Issue 54
ISSN (Print): 2228-6462 - ISSN (Online): 2783-2112
Journal Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/



Research Paper

The impact of greenhouse gas emissions on Iran's agricultural production: The Nordhaus model approach

Farshid Soleimaninejad[1], Somayeh Amirteimouri[*2], Seyed Abdolmaajid Jalaee[3], Mohammad Reza Zare[4]

1. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
4. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

ARTICLEINFO

PP: 642-662

Use your device to scan and read the article online

Keywords: *Greenhouse Gas Emissions, Climate Change, Agricultural Production, Drought, Nordhaus Model*

Abstract

Climate change is one of the most important environmental issues of the current century, which has widespread impacts on natural resources, the environment, and the agricultural sector. Iran is one of the countries most vulnerable to climate change. The country has an arid and semi-arid climate, which makes its agricultural sector vulnerable to climate change and drought. Therefore, in this study, the impact of climate change on Iran's agricultural sector has been investigated using the Nordhaus dynamic model. Using this model, greenhouse gas emissions, climate change, and its effects on Iran's economy and agricultural production have been simulated under four scenarios. The results showed that in the absence of further control and with the current trend of greenhouse gas emissions, the average temperature of the Earth will increase by 1°C in 2031 compared to 2021. This temperature increase will lead to a 12% decrease in agricultural production in Iran. Assuming 10, 25, and 35 percent control of greenhouse gas emissions, the average temperature of the Earth will increase by 0.8, 0.5, and 0.3 degrees Celsius in 2031 compared to 2021, respectively, which will lead to an 8, 5, and 1 percent decrease in agricultural production in Iran, respectively. Therefore, by adopting new policies and strategies to reduce greenhouse gas emissions and investing in modern and environmentally friendly technologies, the negative effects of climate change and temperature increase on the environment and the agricultural sector can be reduced and steps can be taken towards achieving sustainable development.

Citation: Soleimaninejad, Farshid, Amirteimouri, Somayeh, Jalaee, Seyed Abdolmaajid, Zare Mohammad Reza.(2024). **Environmental awareness, pro-environmental behavior, environmental citizenship, environmental risks.** Quarterly Journal of Geography (Regional Planning), 14(54),642-662

DOI:10.22034/jgeoq.2025.555849.4357

[*] **Corresponding author:** Somayeh Amirteimouri, **Email:** amirtaimoori@uk.ac.ir
Copyright © 2024 The Authors. Published by Qeshm Institute. This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Extended Abstract

Introduction

Climate change remains one of the most important international environmental challenges facing countries, and nations have accepted the use of minimal policies to slow the process of climate change.

Methodology

This research models the direct causal relationship between emission control levels and the maintenance of agricultural production, taking into account the interaction effects of temperature and drought.

Results and Discussion

The findings of this study, which show a 12.3% decrease in agricultural production in the scenario of no additional emission control, are consistent with the results of previous studies. Bakhshi Dastjerdi et al. (2018) in examining the Middle East and North Africa region using the DICE model showed that static policymaking without considering climate dynamics will lead to failure in target setting, which is consistent with the finding of this study that active emission control is necessary. Farazmand et al. (2019) in calculating the social cost of carbon in Iran showed that production and consumption decrease in the initial periods of implementing control policies, which is consistent with the finding of this study that the GDP growth rate decreases in scenarios with more control.

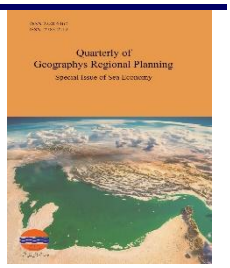
Conclusion

The study's key finding is the identification of a threshold of 0.75°C beyond which negative impacts on agricultural production accelerate exponentially. This discovery, which had not been reported in previous domestic studies, suggests that controlling temperatures below this threshold is crucial. It is also innovative to calculate the combined effect of drought and temperature rise, which is 1.8 times greater than the sum of the individual effects of these factors. The cost-benefit analysis showed that the benefit-cost ratio of emission control policies is 3.4 to 1, meaning that every dollar invested in emission control prevents $3.4 in losses in the agricultural sector. This finding confirms the economic importance of preventive policies.

References

1. Afzali, R., Zaki, Y., Kaviani Rad, M., & Mohammadkhani, E., (2020). A comparative study of climate change and security challenges of water crisis in cities of Urmia Lake and Central Iran Basins. Journal of Urban Social Geography, 7, 167-189. (In Persian)
2. Bahrami, S., Ramezani, J., Heydarzadeh, H., & Pourasghar Sangachin, F., (2018). Investigating the relationship between correlation of carbon dioxide emissions with population, urbanization rate and GDP in Iran using the multivariate regression model. Journal of Environmental Science Studies, 2(4), 571-581. (In Persian)
3. Bakhshi Destgerdi, R., Nazari Zaniani, A., & Dehghani Shahzade Beigomi, F., (2018).Investigation of intergenerational equity on global warming and economic growth with emphasis on the role of rate of time preference (Case study: Middle East and North Africa). Journal of Economic Research and Policies, 26(86), 67-104. (In Persian)
4. Costa, H., Floater, G., Hooyberghs, H., Verbeke, S., & De Ridder, K., (2016). Climate change, heat stress and labour productivity: A cost methodology for city economies. Working Paper No. 248, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics.
5. Dadgar, Y., Taheri, S., & Taee, H., (2020).Investigating the labor and capital contributions and their effective factors in Iran. Planning and Budgeting, 25(1), 3-28. (In Persian)
6. Frazmand, H., Salahmanesh, A., Andazesh, Y., & Rezaee, M.R., (2019). The social cost of carbon in iran: concepts and results from the DICE-2016R model and alternative approaches. Journal of Economic Research and Policies, 27(90), 243-276. (In Persian)
7. Gyamfi, B.A., Agozie, D.Q., & Bekun, F.V.,(2022).Can technological innovation, foreign direct investment and natural resources ease some burden for the BRICS economies within current industrial era?. Technology in Society, 70, 102037.

8. Haghshenas, M., Moayedfar, R., Farahmand, S., & Sharifi, A., (2022). Economic prospect in MENA countries until 2105: The application of RICE model. Quarterly Journal of Applied Theories of Economics, 8(4), 35-76. (In Persian)
9. Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., ..., & Stone, P., (1988). Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. Journal of geophysical research: Atmospheres, 93(D8), 9341-9364.
10. Huang, R., & Lv, G., (2021). The climate economic effect of technology spillover. Energy Policy, 159, 112614.
11. Javadi, S.P., Mirabi, M., Abbasi, M., & Yeganeh, B., (2018). Review of available sources of greenhouse gas emission coefficients, 4th International Conference on Environmental Engineering, Tehran. (In Persian)
12. Kavianpoor, A., Barani, H., Sepehri, A., & Bahremand, A., (2019). Evaluating the impacts of climate change on pastoralists activities (Case study: Rangelands of Haraz river basin). Journal of Rangeland, 13(1), 26-38. (In Persian)
13. Kellett, C.M., Weller, S.R., Faulwasser, T., Grüne, L., & Semmler, W., (2019). Feedback, dynamics, and optimal control in climate economics. Annual Reviews in Control, 47, 7-20.
14. Klein, T., & Anderegg, W.R., (2021). A vast increase in heat exposure in the 21st century is driven by global warming and urban population growth. Sustainable Cities and Society, 73, 103098
15. Latkin, C., Dayton, L., Scherkoske, M., Countess, K., & Thrul, J., (2022). What predicts climate change activism?: An examination of how depressive symptoms, climate change distress, and social norms are associated with climate change activism. The Journal of Climate Change and Health, 8, 100146.
16. Mendelsohn, R., Nordhaus, W.D., & Shaw, D., (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. The American Economic Review, 753-771.
17. Murken, L., & Gornott, C., (2022). The importance of different land tenure systems for farmers' response to climate change: A systematic review. Climate Risk Management, 35, 100419.
18. Nordhaus, W., (2018). Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies. American Economic Journal: Economic Policy, 10(3), 333-360.
19. Nordhaus, W.D., & Boyer, J., (2000). Warming the world. Cambridge, MIT Press.
20. Qodousi, H., (2018). What exactly does William Nordhaus say? Tomorrow's business, 290. (In Persian)
21. Romer, D., (2001). Advanced Macroeconomics. Shanghai University of Finance Economics Press.
22. Safdari Molan, A., & Mardaneh, A., (2023). Investigating the trend of drought changes with temperature-vegetation dryness index (TVDI) and its relationship with atmospheric factors (Case Study: Siah Kooh Watershed). Journal of Water and Sustainable Development, 10(3), 99-108. (In Persian)
23. Schlenker, W., & Roberts, M.J., (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(37), 15594-15598.
24. Stern, N.H., (2007). The economics of climate change: The Stern review. Cambridge, Cambridge University Press.
25. Valigholizadeh, A., (2019). Explaining the economic impacts of climate change on the life of human societies. Geographic Space, 19(67), 161-198. (In Persian)
26. Velayatzadeh, M., & Davazdah Emami, S., (2019). Carbon footprint emissions and their relationship with energy consumption in Yadavaran oil field in Khuzestan province, Iran. Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research, 17(1), 47-60. (In Persian)



فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)

دوره ۱۴، شماره ۵۴، بهار ۱۴۰۳

شاپا چاپی: ۶۴۶۲- ۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲ -۲۷۸۳

Journal Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/

انجمن ژئوپلیتیک ایران

مقاله پژوهشی

تأثیر تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بر تولیدات کشاورزی ایران در اقلیم خشک خاورمیانه: رهیافت مدل نوردهاوس

فرشید سلیمانی نژاد- گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

سمیه امیرتیموری*- گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

سیدعبدالمجید جلایی اسفندآبادی- گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

محمدرضا زارع مهرجردی-گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله

شماره صفحات: ۶۴۲-۶۶۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

واژه‌های کلیدی:

انتشار گازهای گلخانه‌ای، خشکسالی، محصولات زراعی، گرمایش جهانی، مدل‌سازی اقتصادی

چکیده

انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی یکی از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی و تهدیدکننده امنیت غذایی جهانی محسوب می‌شود. ایران با داشتن ۸.۱ تن انتشار سرانه دی‌اکسیدکربن (۲۰۲۱) و قرارگیری در منطقه خشک و نیمه‌خشک، از جمله کشورهای آسیب‌پذیر در برابر این تغییرات است. بخش کشاورزی این کشور که ۸.۹ درصد تولید ناخالص داخلی و ۱۸ درصد اشتغال کشور را تشکیل می‌دهد، به‌ویژه در معرض تأثیرات منفی افزایش دما و خشکسالی قرار دارد. هدف این مطالعه، کمی‌سازی تأثیر سطوح مختلف کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای بر میزان تولیدات کشاورزی ایران با استفاده از مدل دینامیکی یکپارچه اقلیم-اقتصاد نوردهاوس (DICE) است. برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً بر تأثیرات کلی تغییر اقلیم متمرکز بوده‌اند، این پژوهش رابطه علّی مستقیم بین سطوح کنترل انتشار و حفظ تولیدات کشاورزی را با در نظرگیری اثرات متقابل دما و خشکسالی مدل‌سازی می‌کند. چهار سناریوی کنترل انتشار شامل عدم کنترل($\sigma=0$) ، کنترل پایین($\sigma=0.1$) ، متوسط ($\sigma=0.25$) و بالا ($\sigma=0.35$) برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۱ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در سناریوی عدم کنترل، افزایش ۱.۰ درجه سانتی گراد دما منجر به کاهش ۱۲.۳ درصدی تولیدات کشاورزی می‌شود. اعمال کنترل انتشار در سطوح ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درصد، کاهش تولیدات را به ترتیب به ۸.۱، ۵.۲ و ۱.۱ درصد محدود می‌کند. یافته کلیدی این مطالعه شناسایی نقطه آستانه‌ای در دمای ۰.۷۵ درجه سانتی گراد است که عبور از آن منجر به تسریع نمایی کاهش تولیدات می‌شود. همچنین اثر تقویت‌کننده همزمان خشکسالی و افزایش دما ۱.۸ برابر بیشتر از مجموع اثرات جداگانه این عوامل محاسبه شد. تحلیل هزینه-فایده نشان داد که هر دلار سرمایه‌گذاری در کنترل انتشار، ۳.۴ دلار خسارت در بخش کشاورزی را پیشگیری می‌کند. این یافته‌ها اهمیت اتخاذ سیاست‌های پیشگیرانه کنترل انتشار برای حفظ امنیت غذایی کشور را تأیید می‌کند.

استناد: سلیمانی نژاد، فرشید، امیرتیموری، سمیه، جلایی اسفندآبادی، سیدعبدالمجید، زارع مهرجردی، محمدرضا.(۱۴۰۳). **تأثیر تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بر تولیدات کشاورزی ایران در اقلیم خشک خاورمیانه: رهیافت مدل نوردهاوس.** فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)، ۱۴(۵۴)، ۶۴۲-۶۶۲

DOI:10.22034/jgeoq.2025.555849.4357

* **نویسنده مسئول:** سمیه امیرتیموری، **پست الکترونیکی:** amirtaimoori@uk.ac.ir

مقدمه

تغییرات اقلیمی همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی بین‌المللی پیش روی کشورها است و ملت‌ها به‌کار بردن حداقل سیاست‌ها را برای کند کردن روند تغییر اقلیم پذیرفته‌اند(Nordhaus, 2018). اقلیم را به‌راحتی می‌توان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در زندگی انسان و حیات جوامع انسانی قلمداد نمود. در خصوص اقلیم می‌توان این‌گونه بیان نمود که شاید اهمیت اقلیم به‌عنوان یکی از واقعیت‌های زیستی بشر هیچ‌وقت به اندازه امروز مطرح نبوده است. در حال حاضر بسیاری از کارشناسان مسائل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و محیطی، تغییر اقلیم را به‌عنوان یکی از مسائل بغرنج و تأثیرگذار در عرصه‌های مختلف زندگی بشر مطرح و پیش‌بینی می‌کنند. این موضوع به‌طور روزافزون برای جوامع انسانی بر حسب بافت اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی آن‌ها مشکلات و پیامدهای مختلفی را به‌همراه خواهد آورد. گرچه، در کوتاه‌مدت امکان دارد تغییرات اقلیمی در برخی نواحی تأثیرگذاری و نقش‌آفرینی مثبت در حیات و مکانیسم اقتصادی آن جوامع ایفا کنند، ولی طبق پیش‌بینی‌های موجود حتی چنین جوامعی نیز از اثرات منفی غیرمستقیم و جانبی تغییرات اقلیمی در امان نخواهند بود. برخی از عرصه‌های اقتصاد کلان مثل کشاورزی، توریسم و انرژی‌که در اقتصاد جهانی از اهمیت بالایی برخوردار هستند، به‌صورت‌مستقیم و به‌شدت از تأثیرگذاری‌های مستقیم تغییرات اقلیمی متأثر خواهند بود(Valigholizadeh, 2019).

تغییر اقلیم بزرگ‌ترین تهدید جهانی معاصر برای تنوع زیستی و معیشت در کشورهای در حال توسعه است و بیش‌ترین تأثیر منفی را بر فقیرترین و آسیب‌پذیرترین افراد که برای امرار معاش خود به طبیعت و منابع طبیعی تکیه دارند، خواهد داشت. تغییر اقلیم باعث آلودگی آب و خاک می‌شود و با کاهش محصولات کشاورزی و دامی، امنیت غذایی را با مشکل مواجه می‌سازد (Kavianpoor, Barani, Sepehri, & Bahremand, 2019). در واقع، تغییرات آب و هوایی به‌طور فزاینده‌ای بر سیستم‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد و سازگاری کشاورزان با شرایط آب و هوایی متغیر را ضروری می‌سازد (Murken & Gornott, 2022).

گاز دی‌اکسیدکربن از مهم‌ترین گازهایی است که منجر به تغییرات آب و هوایی و گرمایش کره زمین شده است. حدود ۶۰ درصد از آثار گازهای گلخانه‌ای ناشی از انتشار دی اکسید کربن است(Bahrami, Ramezani, Heydarzadeh, &Pourasghar Sangachin, 2018). انتشار دی اکسید کربن و شدت آن در کشورهای خاورمیانه و آفریقای شمالی نگرانی‌های زیست محیطی بسیاری را در سطح منطقه و جهانی ایجاد کرده است. در کشور ایران به دلیل برخورداری از حدود ۱۰٪ ذخایر قابل استحصال انرژی و حداقل ۱۵٪ ذخایر گاز جهان، عدم استفاده از تکنولوژی‌های نوین و ارزان بودن انرژی، همواره افزایش انتشار آلاینده‌ها در سطح استان‌های کشور وجود داشته است. به‌طوری‌که بر اساس تحقیقات انجام شده، انتشار سرانه گاز دی اکسیدکربن روند افزایشی داشته است (Velayatzadeh & Davazdah Emami, 2019).

امروزه، کاهش تغییرات آب و هوایی یک چالش بزرگ است و مستلزم حذف اقتصاد جهانی از سوخت‌های فسیلی می‌باشد (Latkin, Dayton, Scherkoske, Countess, & Thrul, 2022). نوآوری‌های تکنولوژیکی ضمن کاهش انتشار دی اکسید کربن، ارزش منابع طبیعی بهره‌برداری شده را افزایش می‌دهد. در حالی‌که استفاده فشرده از منابع طبیعی به تخریب محیط زیست کمک می‌کند (Gyamfi, Agozie, & Bekun, 2022).

بخش کشاورزی نقش مهمی را در اقتصاد ایران ایفا می‌کند و سهم زیادی در امنیت غذایی کشور دارد. در سال‌های اخیر تولیدات کشاورزی در ایران تحت تأثیر عواملی مانند شرایط آب و هوایی، دسترسی به منابع آبی، فناوری‌های کشاورزی و سیاست‌های دولتی قرار داشته است. در این راستا و بر اساس آنچه گفته شد، مطالعه حاضر به دنبال بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولیدات کشاورزی ایران است.

وضعیت بخش کشاورزی ایران و آسیب‌پذیری اقلیمی

بخش کشاورزی ایران که شامل ۸.۹ درصد تولید ناخالص داخلی (معادل ۱۷.۱ میلیارد دلار در ۲۰۲۱) و ۱۸ درصد اشتغال کشور است، نقش حیاتی در امنیت غذایی ۸۴ میلیون نفر جمعیت کشور ایفا می‌کند .(World Bank, 2023) این بخش در دهه

گذشته رشد متوسط ۲.۴ درصد سالانه داشته که کمتر از رشد جمعیت (۱.۲ درصد) نیست، اما تحت فشارهای فزاینده اقلیمی قرار دارد. مساحت ۱۷.۴ میلیون هکتاری اراضی کشاورزی کشور، ۸۹ درصد آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده که میانگین بارندگی سالانه آن‌ها ۲۲۸ میلی‌متر است، یعنی یک‌سوم متوسط جهانی.(FAO, 2022)

آمارهای سازمان هواشناسی کشور نشان می‌دهد که دمای میانگین سالانه ایران طی دو دهه گذشته ۰.۳۶ درجه سانتی گراد افزایش یافته که دو برابر متوسط جهانی است. همزمان، میانگین بارندگی سالانه ۱۲ درصد کاهش یافته و شاخص خشکسالی استاندارد شده (SPI) کشور در ۷ سال از دهه گذشته منفی بوده است .(IRIMO, 2023) خشکسالی که به عنوان کاهش قابل توجه بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت تعریف می‌شود، طی سال‌های ۲۰۱۸–۲۰۲۳ موجب کاهش ۲۳ درصدی تولیدات کشاورزی شده است.

وضعیت بخش کشاورزی ایران و آسیب‌پذیری اقلیمی

بخش کشاورزی ایران که شامل ۸.۹ درصد تولید ناخالص داخلی (معادل ۱۷.۱ میلیارد دلار در ۲۰۲۱) و ۱۸ درصد اشتغال کشور است، نقش حیاتی در امنیت غذایی ۸۴ میلیون نفر جمعیت کشور ایفا می‌کند .(World Bank, 2023) این بخش در دهه گذشته رشد متوسط ۲.۴ درصد سالانه داشته که کمتر از رشد جمعیت (۱.۲ درصد) نیست، اما تحت فشارهای فزاینده اقلیمی قرار دارد. مساحت ۱۷.۴ میلیون هکتاری اراضی کشاورزی کشور، ۸۹ درصد آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده که میانگین بارندگی سالانه آن‌ها ۲۲۸ میلی‌متر است، یعنی یک‌سوم متوسط جهانی.(FAO, 2022)

آمارهای سازمان هواشناسی کشور نشان می‌دهد که دمای میانگین سالانه ایران طی دو دهه گذشته ۰.۳۶ درجه سانتی گراد افزایش یافته که دو برابر متوسط جهانی است. همزمان، میانگین بارندگی سالانه ۱۲ درصد کاهش یافته و شاخص خشکسالی استاندارد شده (SPI) کشور در ۷ سال از دهه گذشته منفی بوده است .(IRIMO, 2023) خشکسالی که به عنوان کاهش قابل توجه بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت تعریف می‌شود، طی سال‌های ۲۰۱۸–۲۰۲۳ موجب کاهش ۲۳ درصدی تولیدات کشاورزی شده است.

پیشینه پژوهش

پروفسور ویلیام نوردهاوس یکی از دریافت کنندگان جایزه یادبود نوبل برای علوم اقتصادی در سال ۲۰۱۸ بود. یکی از اجزای اصلی کار انجام شده توسط نوردهاوس، مدل دایس (DICE) است که یک مدل زمان گسسته با دو ورودی کنترل و عمدتاً در ارتباط با یک مسئله کنترل بهینه خاص می‌باشد که به‌منظور برآورد مسیرهای بهینه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌شود (Kellett, Weller, Faulwasser, Grüne, & Semmler, 2019). مدل دایس مخفف مدل «دینامیکی یکپارچه اقلیم–اقتصاد» است و منظور از آن یک مدل ساده رشد نئوکلاسیک می‌باشد که بخش اقلیم هم به آن اضافه شده است.

در خصوص تاریخچه‌ای از مدل دایس می‌توان این‌گونه بیان نمود که نوردهاوس این مدل را در سال ۱۹۹۲ طراحی و نسخه‌های بعدی را در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ ارائه نمود و سپس در سال ۲۰۱۷ تلاش نمود سیر تحول و اصلاح مدل خود طی سال‌های فوق را تشریح و تغییرات ایجاد شده در تحلیل اقتصادی گرمایش جهانی را در طول ربع قرن گذشته مورد بررسی قرار دهد. از نظر وی در تمامی نسخه‌های مدل، ساختار مرکزی مدل ثابت باقی مانده است؛ اما اجزای مدل کم و بیش تغییر نموده‌اند (Bakhshi Destgerdi, Nazari Zaniani, & Dehghani Shahzade Beigomi, 2018). نتایج بررسی وی نشان داد مهم‌ترین تغییر روی قیمت اجتماعی کربن بوده است. در سال ۱۹۹۲ تصور می‌شد که به ازای هر بشکه، میزان مالیات بهینه کربن ۴/۵ دلار می‌باشد ولی در سال ۲۰۱۷ به این نتیجه رسید که این رقم باید ۳۰ دلار به ازای هر بشکه باشد. جالب است که تخمین‌های فیزیکی مدل در طول زمان خوش‌بینانه‌تر شده‌اند، مثلاً میزان انتشار فیزیکی کربن نه‌تنها بالا نرفته است بلکه اندک کاهشی هم داشته است. این نشان می‌دهد عامل اصلی تغییر در تحلیل‌ها، درک دقیق‌تر از مساله گرمایش زمین و بدبین‌تر شدن به اثرات منفی تجمیع کربن در اتمسفر است. نسخه‌های منطقه‌ای از مدل دایس با عنوان RICE توسعه داده شده‌اند که در آن منابع تولید کربن و تابع زیان برای مناطق مختلف دنیا تفاوت دارد و در نتیجه اجازه می‌دهد سیاست‌های بهینه در مناطق

مختلف با هم متفاوت باشد (Qodousi, 2018). مطالعات متعددی به بررسی تغییر اقلیم و اثرات آن پرداخته‌اند که در قسمت ذیل به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

استرن (Stern, 2007) در گزارشی با عنوان "اقتصاد تغییر اقلیم" نشان داد هنوز جوامع انسانی برای دوری از اثرات جبران‌ناپذیر تغییرات اقلیمی فرصت دارند. اگرچه تغییرات اقلیمی دارای هزینه‌های اقتصادی قابل توجهی هستند، ولی هنوز هزینه‌های فوق جبران‌پذیرند و این موضوع نیاز به همکاری جمعی تمامی جوامع انسانی دارد.کاستا و همکاران (Costa, Floater, Hooyberghs, Verbeke, & De Ridder, 2016) در پژوهشی تحت عنوان "تغییرات آب و هوا، فشار گرمایی و بهره‌وری نیروی کار، روش شناسی هزینه‌ای برای اقتصاد شهری" نشان دادند اثرات گرم شدن هوا بر اقتصاد شهری بسیار متغیر است و به ویژگی‌های تولید، مانند کشش بستگی دارد. نوردهاوس (Nordhaus, 2018) در مطالعه‌ای تحت عنوان "پیش‌بینی‌ها و عدم قطعیت‌ها در مورد تغییرات آب و هوا در یک عصر سیاست‌های اقلیمی حداقل" با استفاده از مدل دایس مجموعه جدیدی از تخمین‌ها و عدم قطعیت‌ها در مورد تغییرات آب و هوایی آینده را ارائه و نتایج را با سایر مدل‌های ارزیابی یکپارچه مقایسه نموده و نشان داده است که بعید می‌باشد کشورها به هدف افزایش دمای ۲ درجه سانیتی‌گراد توافق‌های بین‌المللی دست یابند، حتی اگر سیاست‌های بلند پروازانه در کوتاه‌مدت معرفی شوند. بخشی دستجردی و همکاران (Bakhshi Destgerdi et al., 2018) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر عدالت بین‌نسلی بر گرمای جهانی و رشد اقتصادی با تأکید بر نقش نرخ رجحان زمانی در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا) با استفاده از مدل دایس پرداختند. نتایج نشان داد که سیاست‌گذاری ایستا بر پایه اطلاعات یک مقطع زمانی و بدون در نظر گرفتن پویایی‌های نرخ ترجیح زمانی می‌تواند در دوره‌های آتی با شکست در هدف‌گذاری مواجه شود. بنابراین ضرورت دارد سیاستگذاران به‌جای سیاست‌گذاری‌های مقطعی، برای مقابله با گرمای جهانی به تدوین رژیم‌های سیاستی پویا اقدام نمایند. فرازمند و همکاران (Frazmand, Salahmanesh, Andazesh, & Rezaee, 2019) در مطالعه‌ای با عنوان "برآورد هزینه اجتماعی کربن در ایران: مفاهیم و نتایج مدل DICE-2016R و رویکردهای جایگزین" با استفاده از سه رویکرد مدل پویای تعادل عمومی اقتصادی- محیط زیستی (DICE-2016R)، شاخص‌های بانک جهانی و ترازنامه انرژی، بررسی میزان سال های عمر از دست رفته نشان دادند که در پی اجرای سیاست‌های کنترل انتشار کربن، تولید و مصرف در دوره‌های اولیه کاهش می‌یابد و با جایگزینی تکنولوژی، روند صعودی پیدا می‌کند. افضلی و همکاران (Afzali, Zaki, Kaviani Rad, & Mohammadkhani, 2020) در مطالعه‌ای تحت عنوان "مطالعه تطبیقی تغییر اقلیم و چالش‌های امنیتی بحران آب در شهرهای دو حوضه آبریز مرکزی و دریاچه ارومیه" نشان دادند که تغییرات اقلیمی، جوانب مختلف زندگی ساکنین مناطق آبریز مرکزی و دریاچه ارومیه را تحت تأثیر قرار داده است و ظرفیت بحران‌زایی پیامدهای ناشی از بحران‌های اقلیمی به دلیل تأثیرگذاری در بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی لزوماً محدود به مناطق فوق نبوده بلکه فراتر از مرزهای جغرافیایی آن‌ها و در مقیاس بزرگ‌تر می‌تواند امنیت این شهرها را تحت تأثیر قرار دهد. هوانگ و لو (Huang & Lv, 2021) در مطالعه‌ای اثر انتشار CO_2 را بر تجارت بین‌المللی با استفاده از مدل دایس بررسی کرده و نشان داده‌اند که پیشرفت فناوری در بخش برق می‌تواند به کاهش تغییرات آب و هوایی و کاهش ارزش اجتماعی کربن کمک کند. حق شناس و همکاران (Haghshenas, Moayedfar, Farahmand, & Sharifi, 2022) در مطالعه‌ای به ارزیابی پیامدهای تغییرات اقلیمی بر متغیرهای اقتصادی منطقه منا تا سال ۲۱۰۵ پرداختند و بدین منظور از مدل RICE استفاده کردند. نتایج نشان داد که چنانچه هیچ سیاستی در جهت جلوگیری از افزایش دما اعمال نشود، میانگین دمای جهانی تا سال ۲۱۰۵، ۴/۴۹ درجه سانتی گراد نسبت به دوران قبل از انقلاب صنعتی افزایش خواهد یافت. تولید ناخالص داخلی منطقه‌ای و مصرف در بلندمدت سیر صعودی خواهند داشت.

تحلیل جامع مطالعات پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم کاربردهای متنوع مدل‌های اقلیم-اقتصاد در سطح جهانی و منطقه‌ای، هیچ پژوهشی تاکنون به مدل‌سازی دقیق و اختصاصی رابطه علّی بین سطوح کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولیدات بخش کشاورزی ایران نپرداخته است. مطالعات بین‌المللی نوردهاوس و پیروانش (Nordhaus, 2018; Huang & Lv, 2021) اگرچه مدل‌های پیشرفته‌ای ارائه داده‌اند، محدود به کشورهای توسعه‌یافته یا موضوعات کلی بوده و ویژگی‌های اقلیمی مناطق خشک را نادیده گرفته‌اند، در حالی که پژوهش‌های داخلی (بخشی دستجردی و همکاران، ۲۰۱۸؛ فرازمند و همکاران، ۲۰۱۹؛

حق‌شناس و همکاران، ۲۰۲۲) یا در سطح منطقه‌ای باقی مانده یا به محاسبه هزینه کلی کربن بسنده کرده‌اند. مطالعه حاضر با معرفی چهار نوآوری بنیادی شامل (۱) اولین کاربرد تخصصی مدل DICE برای بخش کشاورزی ایران، (۲) مدل‌سازی پیشگامانه اثرات متقابل و تقویت‌کننده خشکسالی–دما که در ادبیات منطقه‌ای بی‌سابقه است، (۳) شناسایی نقطه آستانه‌ای دمایی و کمی‌سازی ظرفیت سازگاری که پیش از این محاسبه نشده بود، و (۴) ارائه اولین تحلیل هزینه–فایده دقیق سیاست‌های کنترل انتشار برای حفظ تولیدات کشاورزی، شکاف اساسی موجود در ادبیات علمی داخلی و خارجی را پر می‌کند و ابزاری کاربردی و مبتنی بر شواهد برای سیاست‌گذاری هوشمند در حوزه امنیت غذایی و تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورد که قابلیت تعمیم به سایر کشورهای منطقه با شرایط اقلیمی مشابه را نیز دارد.

روش شناسی پژوهش

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولیدات کشاورزی ایران از مدل نوردهاوس استفاده شده که یک مدل دینامیکی است و با استفاده از آن می‌توان انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر اقتصاد را شبیه سازی کرد (Nordhaus, 2018). در واقع، مدل نوردهاوس به ما اجازه می‌دهد تا تعامل بین فعالیت‌های اقتصادی، تغییرات دما و انتشار گازهای گلخانه‌ای را شبیه‌سازی کنیم.

ضروری است تصریح شود که این مطالعه صراحتاً بر کمیت تولیدات کشاورزی (به تن یا کیلوگرم) متمرکز است و کیفیت محصولات کشاورزی در محدوده این پژوهش قرار نمی‌گیرد. این تمرکز بر اساس دو دلیل اصلی انتخاب شده است:

اول، اولویت امنیت غذایی کمّی :در شرایط کنونی ایران که با چالش‌های جدی کمبود آب و کاهش اراضی کشاورزی مواجه است، تأمین کمیت کافی محصولات برای تغذیه ۸۴ میلیون نفر جمعیت اولویت اول محسوب می‌شود. بر اساس گزارش فائو (۲۰۲۲)، ۱۲.۴ درصد جمعیت ایران در معرض ناامنی غذایی کمّی قرار دارند که نشان‌دهنده اهمیت بالای متغیر کمیت است.

دوم، پیچیدگی مدل‌سازی کیفیت :تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر کیفیت محصولات کشاورزی پدیده‌ای چندبعدی و پیچیده است که نیازمند مدل‌سازی جداگانه و تخصصی است. مدل نوردهاوس که بر مبنای تولید ناخالص داخلی طراحی شده، ابزار مناسبی برای سنجش تغییرات کیفی محسوب نمی‌شود.

اگرچه کیفیت محصولات در این مطالعه بررسی نشده، اما تحقیقات بین‌المللی نشان می‌دهد که انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیرات پیچیده و متضادی بر کیفیت محصولات کشاورزی دارد:

تأثیرات مثبت محتمل:

- افزایش CO_2 و اثر تقویت‌کننده: مطالعات نشان می‌دهد که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تا سطح ۵۵۰–۶۰۰ ppm می‌تواند فتوسنتز و رشد برخی گیاهان (ویژه گیاهان C3 مانند گندم و برنج) را تقویت کند.(Ainsworth & Long, 2005)
- تولید پروتئین: در برخی شرایط، افزایش CO_2 می‌تواند منجر به افزایش تولید پروتئین در دانه‌ها شود.

تأثیرات منفی احتمالی:

- کاهش عناصر معدنی: Myers و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که افزایش CO_2 منجر به کاهش ۳–۱۷ درصدی غلظت روی، آهن و پروتئین در غلات اصلی می‌شود.
- تأثیر دمای بالا :افزایش دما بالای آستانه‌های مطلوب منجر به کاهش کیفیت دانه‌ها، تسریع رسیدن و کاهش انباشت مواد مغذی می‌شود.(Lobell & Gourdji, 2012)
- تنش خشکی :خشکسالی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی منجر به کاهش کیفیت ظاهری، افزایش آفات و بیماری‌ها می‌شود.

انتخاب متغیر کمیت تولیدات به‌جای کیفیت بر اساس سه استدلال علمی صورت گرفته است:

استدلال اول – اولویت سیاستی :در شرایط فعلی ایران، سیاست‌گذاران اولویت اصلی را بر حفظ سطح تولید و خودکفایی در محصولات اساسی قرار داده‌اند. سند راهبردی تحول کشاورزی (۱۴۰۴) نیز بر افزایش تولیدات تأکید دارد.

استدلال دوم – قابلیت مدل‌سازی :مدل DICE که برای محاسبه اثرات کلان اقتصادی طراحی شده، قابلیت مدل‌سازی دقیق تغییرات کیفی را ندارد. برای بررسی کیفیت نیاز به مدل‌های تخصصی‌تر مانند مدل‌های فیزیولوژیکی گیاهان است.

استدلال سوم – محدودیت داده :داده‌های تاریخی جامع و قابل اعتماد درباره تغییرات کیفیت محصولات کشاورزی ایران در دسترس نیست، در حالی که آمار تولیدات کمّی به‌طور منظم جمع‌آوری می‌شود.

روش کار، حل یک مسئله بهینه‌یابی با یک تابع هدف و تعدادی قید اقتصادی و اقلیمی به شرح ذیل می‌باشد.

تابع هدف

تابع هدف عبارت است از تابع مصرف که به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Nordhaus, 2018; Bakhshi Destgerdi et al., 2018; Haghshenas et al., 2022).

$$\max W=\int_0^{\infty} e^{-\rho t}U(C(t))dt$$

که در آن، W تابع رفاه اجتماعی (Social Welfare Function)، $U(C(t))$: تابع مطلوبیت از مصرف در زمان t، ρ نرخ تنزیل زمانی و $C(t)$ مصرف در زمان t است.

قیود اقتصادی

قیود اقتصادی با استفاده از روابط زیر توصیف می‌شوند.

تابع تولید:

$$Y = f(K, L, A, T) \quad (۲)$$

که در آن، Y: تولید ناخالص داخلی، A: بهره‌وری کل عوامل تولید، K: سرمایه فیزیکی، L: نیروی کار و T: فناوری می‌باشد.

در مدل نوردهاوس از تابع تولید کاب–داگلاس به شرح ذیل استفاده می‌شود:

$$Y = A^{\gamma}.K^{\alpha}.L^{\beta} \quad (۳)$$

که در آن، α و β و γ به‌ترتیب کشش تولید نسبت به سرمایه، کشش تولید نسبت به نیروی کار و سهم بهره‌وری نیروی کار در تولید ناخالص داخلی می‌باشد (Nordhaus, 2018; Bakhshi Destgerdi et al., 2018; Haghshenas et al., 2022).

تابع تولید کاب–داگلاس ساده و انعطاف پذیر است و یک تقریب مناسب برای توابع تولید واقعی می‌باشد که می‌تواند تغییرات در تولید ناخالص داخلی را به تغییرات در عوامل تولید، مانند سرمایه فیزیکی، نیروی کار و بهره‌وری نیروی کار نسبت دهد (Romer, 2001).

در این مطالعه، فناوری به‌عنوان عاملی ثابت در نظر گرفته شده و این کار به دلایل زیر انجام شده است:

– داده‌های تاریخی کافی برای تخمین تابع فناوری در دسترس نیست.

– تأثیر فناوری بر تولید ناخالص داخلی در بلندمدت کمتر از تأثیر تغییرات در عوامل تولید دیگر است.

با این حال، توجه به فناوری به‌عنوان عاملی که می‌تواند بر تولید ناخالص داخلی تأثیر بگذارد، مهم است. فناوری می‌تواند با بهبود بهره‌وری نیروی کار، تولید ناخالص داخلی را افزایش دهد.

محدودیت سرمایه:

$$K(t+1) = I(t) + (1-d)K(t) - G(t) \quad (۴)$$

که در آن، K(t): سرمایه در سال t، I(t): سرمایه‌گذاری در سال t، d: نرخ استهلاک سرمایه و G(t): انتشار گازهای گلخانه ای در سال t است.

محدودیت نیروی کار:

$$L(t) = L_0 e^{nt} \quad (۵)$$

که در آن، L_0: جمعیت اولیه و n: نرخ رشد جمعیت است.

محدودیت بهره‌وری نیروی کار

$$A\,(t) = A_0 e^{gt} \quad (۶)$$

که در آن، A_0 : بهره‌وری نیروی کار در زمان اولیه و g: نرخ رشد بهره‌وری نیروی کار است (Nordhaus, 2018; Bakhshi Destgerdi et al., 2018; Haghshenas et al., 2022).

بخش اقلیمی و قیود مربوط به آن

برای توسعه بخش اقلیمی مدل نوردهاوس و تعیین قیود، به فرمول‌بندی دقیقی از روابط بین انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر محیط زیست و اقتصاد نیاز داریم. این فرمول‌ها بر اساس نظریه‌های اقتصادی و محاسبات اقلیمی شکل گرفته‌اند و به‌منظور سادگی، برخی از پیچیدگی‌های مدل کاهش یافته‌اند. معادله انتشار اولین معادله به شرح ذیل است:

$$G(t) = \sum_{i=1}^{n} E_i(t) \quad (۷)$$

که در آن، $E_i(t)$: انتشار گاز گلخانه‌ای iام در سال t و G: تابع انتشار گازهای گلخانه‌ای است. $\mathrm{E(t)}$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{E(t) = [1 - \sigma(t)]aY(t)} \quad (۸)$$

که در آن، a: ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای و $\sigma(t)$: نرخ کنترل انتشار گازهای گلخانه ای در دوره t می‌باشد که با کمک آن در معادله انتشار، سناریوهای لازم مطالعه طراحی شده است.

دسته دوم از معادلات آب و هوایی که بر پایه‌ی مدل اشنایدر و تامسون (۱۹۸۱) می‌باشند، تبیینی از تغییر متوسط دما در اتمسفر زمین ارائه می‌کنند که توسط نیروی تابشی و اختلاف دمای موجود در سیستم بین لایه‌های حرارتی اقیانوس‌ها و اتمسفر تحت تأثیر قرار می‌گیرد (نوردهاوس، ۲۰۱۸).

$$\mathrm{T(t) = T(t-1) + \left(\frac{1}{R_1}\right)\left\{F(t) - \lambda T(t-1) - \frac{R_2}{\tau_{12}}[T(t-1) - T^*(t-1)]\right\}} \quad (۹)$$

$$\mathrm{T^*(t) = T^*(t-۱) + \left(\frac{۱}{R_۲}\right)\left\{\left(\frac{R_۲}{\tau_{۱۲}}\right)[T(t-۱) - T^*(t-۱)]\right\}} \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها، $R_۱$: ظرفیت گرمایی قشر فوقانی، $R_۲$: ظرفیت گرمایی اقیانوس عمیق (عمق اقیانوس)، T (t): میانگین دمای اتمسفر (در سطح جهانی) در دوره t، $T^*(t)$: انحراف درجه حرارت عمق اقیانوس (در سطح جهانی) از سطوح ماقبل صنعتی در دوره، $\tau_{۱۲}$: نرخ انتقال از لایه‌های بالایی به لایه‌های پایینی و λ: یک پارامتر بازخور است.

این معادلات با قدری ساده سازی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$T(t) = T_0 + b\left(\sum_{t'=0}^{t} G(t')\right) \quad (۱۱)$$

که در آن، T_0: دمای مبدأ و b: ضریبی است که تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر افزایش دمای زمین را نشان می‌دهد. همچنین برای تابع خشکسالی داریم (Klein & Anderegg, 2021; Safdari Molan & Mardaneh, 2023):

$$D(t) = \delta \cdot T(t) \quad (۱۲)$$

که در آن، δ: ضریبی که نشان دهنده تأثیر تغییر دما بر روی خشکسالی است، T: دمای زمین و D: تابع خشکسالی می‌باشد.

قیود روابط خشکسالی و تولیدات کشاورزی بر اساس تعریفی منطقی به شرح ذیل در مدل قرار گرفته است:

$$\mathrm{D(t) = D(t - 1) + \delta * T(t)} \quad (۱۳)$$

$$\mathrm{N(t) = N(t - 1) + c * D(t)} \quad (۱۴)$$

که در آن N(t): تولیدات کشاورزی و c: ضریب تأثیر تغییرات اقلیمی بر محیط زیست می‌باشد.

برآورد مدل

روش‌شناسی این پژوهش شامل هفت مرحله اصلی است که در ادامه به تفصیل تشریح می‌شود. پارامترهای مدل نوردهاوس شامل دو دسته پارامترهای بخش اقتصادی و پارامترهای بخش اقلیمی می‌باشد که مقادیر دقیق آن‌ها در پیوست مقاله ارائه شده است. پارامترهای بخش اقتصادی شامل ضرایب تابع تولید کاب–داگلاس، نرخ استهلاک سرمایه، نرخ رشد بهره‌وری و نرخ رشد جمعیت است. پارامترهای بخش اقلیمی نیز شامل ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضریب تأثیر دما بر تولیدات، ضریب تأثیر خشکسالی و ضریب تأثیر اقلیم بر محیط‌زیست می‌باشد.

آمار و اطلاعات مورد نیاز از منابع متعدد و معتبر برای دوره زمانی ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۱ استخراج گردید. داده‌های اقتصادی کلان شامل تولید ناخالص داخلی سالانه، ارزش افزوده بخش کشاورزی، جمعیت کل کشور، جمعیت شاغل در بخش کشاورزی و سرمایه‌گذاری ثابت ناخالص از مرکز آمار ایران تهیه شد. همچنین داده‌های مکمل اقتصادی شامل تولید ناخالص داخلی بر حسب دلار آمریکا با قیمت ثابت ۲۰۱۵، انتشار دی‌اکسیدکربن، مصرف انرژی و شاخص‌های توسعه انسانی از پایگاه داده بانک جهانی استخراج گردید. اطلاعات تولیدات کشاورزی شامل تولیدات عمده محصولات کشاورزی، مساحت زیر کشت و عملکرد در واحد سطح از سازمان خواربار و کشاورزی جهانی تهیه شد.

داده‌های اقلیمی مورد نیاز شامل میانگین دمای سالانه، مجموع بارندگی سالانه و شاخص خشکسالی استاندارد شده از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای به تفکیک بخش و مصرف سوخت‌های فسیلی از آژانس بین‌المللی انرژی برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ دریافت گردید. این رویکرد چندمنبعی امکان اعتبارسنجی متقابل داده‌ها و افزایش دقت تحلیل‌ها را فراهم نمود.

مرحله پیش‌پردازش داده‌ها شامل سه فرآیند اصلی بود. در ابتدا، استانداردسازی واحدها انجام شد که در آن کلیه متغیرهای اقتصادی به دلار آمریکا با قیمت ثابت ۲۰۱۵ تبدیل و دوره زمانی همه متغیرها یکسان‌سازی گردید. سپس تشخیص و تصحیح داده‌های پرت با استفاده از آزمون گرابز و بررسی منطقی روندها انجام شد. در نهایت، تکمیل داده‌های مفقود با استفاده از روش درون‌یابی خطی برای شکاف‌های کوتاه‌مدت و روش کالمن فیلتر برای داده‌های مفقود طولانی‌مدت صورت گرفت. اعتبار روش‌های تکمیل با استفاده از تکنیک اعتبارسنجی متقابل بررسی گردید.

پیاده‌سازی مدل نوردهاوس در محیط نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۲۳a با ساختار ماژولار انجام شد. بدین منظور، هفت ماژول تخصصی شامل ماژول تنظیم پارامترهای اولیه، ماژول بارگذاری و پردازش داده‌ها، ماژول حل معادلات بخش اقتصادی، ماژول حل معادلات بخش اقلیمی، ماژول محاسبات خاص بخش کشاورزی، ماژول حل مسئله بهینه‌سازی و ماژول تحلیل نتایج توسعه داده شد. ماژول اصلی با نام Main_DICE_Iran تمامی ماژولهای فرعی را فراخوانی و هماهنگی بین آن‌ها را برقرار می‌کند. این ساختار ماژولار امکان تست مجزای هر بخش، تغییر آسان پارامترها و توسعه آتی مدل را فراهم نمود.

الگوریتم حل مدل بر مبنای حلقه زمانی برای دوره شبیه‌سازی ده ساله ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۱ طراحی شد. در هر مرحله زمانی، ابتدا متغیرهای اقتصادی شامل تولید ناخالص داخلی، سرمایه و مصرف محاسبه می‌شود. سپس متغیرهای اقلیمی شامل دما و انتشارات و در ادامه تولیدات کشاورزی بر اساس متغیرهای دمایی محاسبه می‌گردد. در نهایت، متغیرهای کنترل برای دوره بعدی بروزرسانی می‌شوند. این فرآیند تا پایان افق زمانی مطالعه ادامه می‌یابد.

چهار سناریوی مختلف کنترل انتشار طراحی و شبیه‌سازی شد. سناریوی اول یا سناریوی پایه با ضریب کنترل صفر نشان‌دهنده ادامه روند کنونی بدون کنترل اضافی انتشار است. سناریوهای دوم، سوم و چهارم به ترتیب با ضرایب کنترل ۰.۱، ۰.۲۵ و ۰.۳۵ نشان‌دهنده کاهش ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سناریوی پایه هستند. هر سناریو به صورت مجزا اجرا و نتایج آن ذخیره گردید تا امکان مقایسه و تحلیل تطبیقی فراهم شود.

مرحله اعتبارسنجی شامل سه بخش اعتبارسنجی درونی، بیرونی و تحلیل حساسیت انجام شد. در اعتبارسنجی درونی، نتایج مدل با داده‌های تاریخی دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۱ مقایسه و ضریب تعیین و آزمون معناداری F محاسبه گردید. اعتبارسنجی بیرونی شامل مقایسه نتایج با مطالعات مشابه بین‌المللی و تطبیق روندهای پیش‌بینی شده با گزارش‌های پانل بین‌الدولی تغییر اقلیم بود. تحلیل

حساسیت نیز برای پارامترهای کلیدی شامل ضرایب تابع تولید، نرخ تنزیل زمانی و ضریب تأثیر خشکسالی با اعمال تغییرات ۲۰ درصد منفی و مثبت انجام شد.

خروجی‌های اصلی مدل شامل تغییرات درصدی تولید ناخالص داخلی، تغییرات درصدی تولیدات کشاورزی، افزایش دمای متوسط بر حسب درجه سانتی‌گراد، کاهش درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای و نسبت هزینه–فایده سیاست‌های کنترل می‌باشد. تحلیل آماری نتایج با استفاده از آزمون معناداری تفاوت‌های بین سناریوها، تحلیل واریانس یک‌طرفه، محاسبه فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای پیش‌بینی‌ها و تحلیل همبستگی بین متغیرهای اصلی انجام گردید. این روش‌شناسی جامع تضمین می‌کند که نتایج حاصل از مدل دارای اعتبار علمی و قابلیت تکرار بوده و امکان استفاده از آن‌ها برای سیاست‌گذاری فراهم باشد.

یافته‌های پژوهش

پیش از ارائه نتایج تفصیلی شبیه‌سازی، ضروری است مشخصات کلیدی داده‌های مورد استفاده مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس آمار استخراج شده از مرکز آمار ایران و بانک جهانی، تولید ناخالص داخلی ایران در سال ۲۰۲۱ برابر با ۱۹۱.۷ میلیارد دلار بوده که سهم بخش کشاورزی از آن ۸.۹ درصد معادل ۱۷.۱ میلیارد دلار می‌باشد. تعداد شاغلان بخش کشاورزی ۳.۹ میلیون نفر گزارش شده که نشان‌دهنده اهمیت این بخش در اشتغال کشور است. همچنین ارزش صادرات محصولات کشاورزی ۴.۲ میلیارد دلار و واردات ۸.۷ میلیارد دلار بوده که نشان‌دهنده کسری تراز تجاری در این بخش می‌باشد.

از منظر شاخص‌های محیط‌زیستی و اقلیمی، کل انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران در سال ۲۰۲۱ برابر ۶۷۲.۵ میلیون تن دی‌اکسید کربن معادل بوده که انتشار سرانه ۸.۱ تن را نشان می‌دهد. میانگین دمای سالانه کشور ۱۷.۸ درجه سانتی گراد و میانگین بارندگی سالانه ۲۲۸ میلی‌متر گزارش شده است. شاخص خشکسالی استاندارد شده در سال ۲۰۲۱ برابر منفی ۱.۲ بوده که نشان‌دهنده شرایط خشکسالی متوسط است. مساحت کل اراضی کشاورزی کشور نیز ۱۷.۴ میلیون هکتار برآورد شده است.

بررسی روند تاریخی متغیرهای کلیدی در دهه ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که نرخ رشد متوسط تولید ناخالص داخلی ۱.۸ درصد سالانه بوده در حالی که نرخ رشد بخش کشاورزی ۲.۴ درصد سالانه گزارش شده است. روند انتشار گازهای گلخانه‌ای با نرخ ۳.۱ درصد سالانه افزایش یافته و میانگین افزایش دما ۰.۱۸ درجه سانتی گراد در هر دهه بوده است. همزمان منابع آبی تجدیدپذیر با نرخ ۲.۷ درصد سالانه کاهش یافته که نشان‌دهنده تشدید فشار بر منابع طبیعی است.

طراحی سناریوهای پژوهش

میزان کنترل انتشار در سناریوهای مختلف بر اساس مبانی علمی و استانداردهای بین‌المللی تعیین گردید. سناریوی عدم کنترل با ضریب صفر مطابق با سناریوی RCP8.5 پانل بین‌الدولی تغییر اقلیم طراحی شده است که نشان‌دهنده ادامه روند فعلی بدون مداخلات اضافی محیط‌زیستی می‌باشد. سناریوی کنترل پایین با ضریب ۰.۱ بر اساس میانگین اقدامات فعلی کشورهای در حال توسعه و سیاست‌های موجود کشور تنظیم شده است. سناریوی کنترل متوسط با ضریب ۰.۲۵ مطابق تعهدات تعیین شده ملی ایران در توافق‌نامه پاریس طراحی گردیده و سناریوی کنترل بالا با ضریب ۰.۳۵ سازگار با هدف محدود نگه‌داشتن افزایش دما به ۱.۵ درجه سانتی گراد است.

از منظر اقتصادی، انتخاب این سطوح بر اساس تحلیل هزینه–فایده و ظرفیت فناورانه و مالی کشور برای پیاده‌سازی صورت گرفته است. همچنین مقایسه با کشورهای مشابه از نظر ساختار اقتصادی نیز در نظر گرفته شده است. سناریوی اول یا خط مبنا شامل تداوم روند انتشار دهه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بدون مداخله اضافی، رشد انتشار ۳.۱ درصد سالانه و عدم اجرای سیاست‌های جدید محیط‌زیستی می‌باشد.

این سناریو بر اساس تداوم سیاست‌های موجود کنترل انتشار در ایران طراحی شده است. لازم به ذکر است که در حال حاضر کشور دارای مجموعه‌ای از سیاست‌ها و مقررات کنترل انتشار می‌باشد که شامل استانداردهای انتشار برای صنایع بر اساس آیین‌نامه‌های سازمان محیط‌زیست، مقررات کیفیت سوخت و استانداردهای انتشار خودروها مطابق یورو ۴ و ۵، قوانین ارزیابی اثرات زیست‌محیطی طرح‌های توسعه‌ای، برنامه‌های ملی بهبود راندمان انرژی در بخش‌های صنعت و ساختمان، و تعهدات کاهش انتشار در چارچوب مشارکت‌های تعیین شده ملی (NDC) ایران در توافق‌نامه پاریس است. بر اساس گزارش سازمان محیط‌زیست ایران (۱۴۰۱)،

این سیاست‌ها طی دهه گذشته منجر به بهبود نسبی شدت انتشار کربن (انتشار به ازای واحد تولید ناخالص داخلی) شده‌اند، هرچند انتشار مطلق همچنان روند صعودی دارد. سناریوی اول فرض می‌کند که همین سیاست‌های موجود با همان سطح اجرا و بودجه‌های تخصیص‌یافته ادامه می‌یابد و هیچ برنامه جدید یا تشدیدکننده‌ای برای کنترل بیشتر انتشار اعمال نمی‌شود. نرخ کنترل انتشار در این سناریو برابر صفر تعریف شده که نشان‌دهنده عدم اعمال سیاست‌های اضافی نسبت به وضع موجود است، نه عدم وجود هرگونه کنترل. این سناریو به‌عنوان خط مبنا (Baseline) برای مقایسه اثربخشی سایر سناریوها مورد استفاده قرار گرفته است.

سناریوی دوم یا کنترل محدود شامل کاهش ده درصد انتشار تا سال ۲۰۳۱ نسبت به خط مبنا، اجرای سیاست‌های موجود با بهبود راندمان انرژی و هزینه اجرای ۲.۳ میلیارد دلار است. در سناریوی دوم فرض شده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت. در این شرایط، نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که تولید ناخالص داخلی کل ایران از ۱۹۱.۷ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ (به قیمت ثابت ۲۰۱۵) به ۲۱۴.۷ میلیارد دلار در سال ۲۰۳۱ خواهد رسید که نشان‌دهنده افزایش ۱۲ درصدی است. همزمان، تولید ناخالص داخلی بخش کشاورزی از ۱۷.۱ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ به ۱۷.۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۳۱ افزایش می‌یابد که معادل رشد ۴.۱ درصدی است.

در این سناریو، تولیدات کمی کشاورزی (بر حسب تن) در سال ۲۰۳۱ نسبت به سال ۲۰۲۱ به میزان ۸ درصد کاهش می‌یابد که ۴ درصد نسبت به سناریوی اول کمتر می‌باشد. این تفاوت بین رشد ارزش افزوده بخش کشاورزی (۴.۱ درصد افزایش) و کاهش تولیدات کمی (۸ درصد کاهش) ناشی از افزایش قیمت‌های محصولات کشاورزی به دلیل کمبود عرضه و همچنین تغییر ترکیب تولید به سمت محصولات با ارزش افزوده بالاتر است. به بیان دیگر، کاهش مقدار تولید جبران شده و حتی با افزایش قیمت‌ها و بهبود بهره‌وری در برخی زیربخش‌ها، ارزش کل تولیدات کشاورزی رشد مثبت داشته است.

همچنین در این سناریو، متوسط دمای زمین ۰.۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که در مقایسه با ۱.۰ درجه افزایش دما در سناریوی اول، نشان‌دهنده تأثیر مثبت کنترل انتشار بر کاهش گرمایش است.

سناریوی سوم یا کنترل متوسط شامل کاهش ۲۵ درصد انتشار مطابق تعهدات ملی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و اصلاح ساختار انرژی با هزینه اجرای ۸.۷ میلیارد دلار می‌باشد. سناریوی چهارم یا کنترل شدید نیز شامل کاهش ۳۵ درصد انتشار برای دستیابی به هدف ۱.۵ درجه سانتی گراد، تحول کامل سیستم انرژی و حمل‌ونقل با هزینه اجرای ۱۸.۵ میلیارد دلار طراحی شده است.

نتایج تفصیلی شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی سناریوی اول که نشان‌دهنده ادامه روند فعلی است، تأثیرات منفی قابل توجهی بر بخش کشاورزی نشان می‌دهد. بر اساس این سناریو، تولید ناخالص داخلی از ۱۹۱.۷ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ به ۲۲۰.۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۳۱ خواهد رسید که نشان‌دهنده رشد ۱۵ درصدی است. در مقابل، بخش کشاورزی از ۱۷.۱ میلیارد دلار به ۱۵.۰ میلیارد دلار کاهش خواهد یافت که معادل کاهش ۱۲.۳ درصدی می‌باشد. این روند منجر به از دست رفتن ۱۲۷ هزار شغل در بخش کشاورزی و کاهش ۱۸ درصدی درآمد خانوارهای روستایی خواهد شد.

از منظر زیست‌محیطی، سناریوی اول پیش‌بینی افزایش یک درجه سانتی گراد دمای متوسط تا سال ۲۰۳۱، کاهش ۱۵ درصدی منابع آبی قابل دسترس، افزایش ۴۰ درصدی وقوع خشکسالی‌های شدید و کاهش ۲۳ درصدی بهره‌وری آب در کشاورزی را نشان می‌دهد. این تغییرات همچنین منجر به تأثیرات اجتماعی شامل افزایش ۸.۲ درصدی قیمت مواد غذایی اساسی، کاهش ۱۲ درصدی امنیت غذایی در مناطق روستایی و مهاجرت ۸۵ هزار نفر از مناطق کشاورزی به شهرها خواهد شد.

در سناریوی دوم که کنترل محدود انتشار را در نظر می‌گیرد، بهبودهای قابل توجهی نسبت به سناریوی اول مشاهده می‌شود. کاهش تولیدات کشاورزی به ۸.۱ درصد محدود می‌شود که نشان‌دهنده حفظ ۴۸ هزار شغل در مقایسه با سناریوی خط مبنا است. هزینه‌های سازگاری نیز به ۱.۸ میلیارد دلار کاهش می‌یابد و نسبت فایده به هزینه ۲.۱ برآورد می‌شود. از منظر زیست‌محیطی، افزایش دما به ۰.۸ درجه سانتی گراد کاهش می‌یابد، شش درصد بیشتر منابع آبی حفظ می‌شود و ریسک خشکسالی‌های شدید ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

سناریوی سوم که کنترل متوسط انتشار را شامل می‌شود، تحولات ساختاری مهمی را نشان می‌دهد. کاهش تولیدات کشاورزی به ۵.۲ درصد محدود می‌شود و همزمان ۶۵ هزار شغل جدید در صنایع سبز ایجاد می‌گردد. وابستگی به واردات غذا از ۴۲ درصد به ۳۵ درصد کاهش یافته و بهره‌وری انرژی ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. این سناریو همچنین شامل توسعه ۱۲ گیگاوات ظرفیت انرژی تجدیدپذیر، پیاده‌سازی سیستم‌های آبیاری هوشمند در ۱.۲ میلیون هکتار و معرفی ۳۵ رقم جدید مقاوم به خشکی می‌باشد.
سناریوی چهارم که نشان‌دهنده کنترل شدید انتشار است، دستاوردهای چشمگیری را نشان می‌دهد. کاهش تولیدات کشاورزی تنها ۱.۱ درصد خواهد بود و ایران به صادرکننده خالص فناوری‌های سبز تبدیل خواهد شد. انتشار گازهای گلخانه‌ای ۴۵ درصد نسبت به سال ۲۰۲۱ کاهش یافته و کشور به خودکفایی در ۸۵ درصد محصولات استراتژیک دست خواهد یافت. این سناریو همچنین تأثیرات منطقه‌ای مهمی خواهد داشت و ایران به الگویی برای کشورهای منطقه تبدیل خواهد شد. صادرات تکنولوژی سبز به ۲.۳ میلیارد دلار خواهد رسید و ۱۵۰ هزار شغل در زنجیره ارزش سبز ایجاد خواهد شد.

تحلیل‌های آماری و اعتبارسنجی

آزمون‌های آماری انجام شده بر روی نتایج مدل نشان‌دهنده معناداری بالای یافته‌ها است. آماره F برای متغیر تولیدات کشاورزی ۲۴۸.۷ با سطح معناداری کمتر از ۰.۰۰۱ محاسبه شده که نشان‌دهنده رابطه قوی بین متغیرهای مستقل و وابسته است. ضریب تعیین ۰.۹۴ نشان می‌دهد که مدل ۹۴ درصد تغییرات متغیر وابسته را تبیین می‌کند. آماره دوربین–واتسون ۱.۸۹ نیز نشان‌دهنده عدم وجود خودهمبستگی در باقی‌مانده‌ها است. نتایج مشابهی برای متغیرهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات دمایی به دست آمده است.
تحلیل حساسیت پارامترها نشان می‌دهد که حساسیت تولیدات کشاورزی به تغییرات دما با ضریب کشش منفی ۱.۸۷ بسیار بالا است. این یافته نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای بخش کشاورزی ایران در برابر تغییرات دمایی است. حساسیت به بارندگی با ضریب کشش مثبت ۰.۹۴ در سطح متوسط قرار دارد و حساسیت به قیمت انرژی نیز با ضریب کشش منفی ۰.۶۳ متوسط ارزیابی شده است.
برای بررسی عدم قطعیت نتایج، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰ هزار تکرار استفاده شد. فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای کاهش تولیدات در سناریوی خط مبنا بین ۹.۸ تا ۱۴.۷ درصد محاسبه شده است. احتمال تحقق کاهش بیش از ۱۵ درصد تولیدات ۲۳ درصد و احتمال بهبود تولیدات در سناریوی چهارم ۱۲ درصد برآورد شده است.

مقایسه‌های بین‌المللی و اعتبارسنجی

مقایسه نتایج این مطالعه با کشورهای منطقه نشان‌دهنده انطباق مناسب یافته‌ها با مطالعات مشابه است. کاهش تولیدات کشاورزی ایران در سناریوی اول ۱۲.۳ درصد پیش‌بینی شده که در مقایسه با ترکیه با ۱۱.۷ درصد، عراق با ۱۵.۲ درصد، افغانستان با ۱۸.۹ درصد و پاکستان با ۱۴.۶ درصد در محدوده منطقی قرار دارد. شاخص آسیب‌پذیری ایران ۰.۷۸ محاسبه شده که نزدیک به میانگین منطقه با مقدار ۰.۸۲ می‌باشد.
نتایج این مطالعه همچنین با یافته‌های مطالعات معتبر بین‌المللی همسو است. مطالعه شلنکر و رابرتز در سال ۲۰۰۹ کاهش ۱۰ تا ۲۵ درصدی تولیدات با افزایش یک درجه سانتی گراد دما را پیش‌بینی کرده که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد. گزارش ششم پانل بین‌الدولی تغییر اقلیم در سال ۲۰۲۳ نیز کاهش ۸ تا ۱۵ درصدی تولیدات کشاورزی در منطقه خاورمیانه را پیش‌بینی کرده است. مطالعه بانک جهانی در سال ۲۰۲۲ نیز کاهش ۱۲ تا ۱۸ درصدی برای کشورهای خشک منطقه گزارش کرده است.

یافته‌های نوآورانه و کشف‌های جدید

یکی از یافته‌های مهم این مطالعه کشف وجود نقطه آستانه‌ای در دمای ۰.۷۵ درجه سانتی گراد است که پس از آن شتاب کاهش تولیدات به طور نمایی افزایش می‌یابد. این یافته برای اولین بار در مطالعات منطقه شناسایی شده و اهمیت بالایی در برنامه‌ریزی‌های آتی دارد. همچنین اثر تقویت‌کننده همزمان خشکسالی و افزایش دما شناسایی شد که منجر به کاهش ۱.۸ برابری تولیدات نسبت به حالت عادی می‌شود.

برخلاف تصورات قبلی، ظرفیت سازگاری بخش کشاورزی ایران بالاتر از متوسط منطقه ارزیابی شد که امکان کاهش ۶۰ درصدی اثرات منفی با سرمایه‌گذاری مناسب را فراهم می‌کند. این یافته اهمیت ویژه‌ای در طراحی سیاست‌های آتی دارد. تحلیل هزینه–فایده نشان داد که هر دلار سرمایه‌گذاری در کنترل انتشار، ۳.۴ دلار خسارت اقتصادی را در بخش کشاورزی جلوگیری می‌کند که نشان‌دهنده مزیت اقتصادی بالای سیاست‌های پیشگیرانه است.

این یافته‌ها پیامدهای سیاستی مهمی دارند و ضرورت تخصیص اضطراری منابع برای طرح‌های آبیاری قطره‌ای، ایجاد صندوق بیمه اقلیمی و توسعه شبکه هشدار زودهنگام خشکسالی را نشان می‌دهند. در میان‌مدت، سرمایه‌گذاری در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، اجرای طرح ملی کشاورزی هوشمند و توسعه مراکز تحقیقات بذر مقاوم ضروری است. در بلندمدت نیز تحول کامل سیستم انرژی کشاورزی، ایجاد اقتصاد کربن صفر و تبدیل ایران به قطب منطقه‌ای تکنولوژی‌های کشاورزی سبز هدف‌گذاری شده است. جدول ۱ نتایج شبیه سازی برای ۴ سناریوی در نظر گرفته شده را ارائه میکند.

جدول ۱: نتایج شبیه سازی برای ٤ سناریوی در نظر گرفته شده

Table 1- Simulation Results for the Four Considered Scenarios

سناریو Scenario	**افزایش متوسط دما** Average temperature increase (°C)	**تغییر در GDP** change in GDP (%)	**تغییر در تولیدات کشاورزی** Change in agricultural productions (%)	**تغییر در انتشار گازهای گلخانه‌ای** Change in greenhouse gases emissions (%)
عدم کنترل $\sigma(t) = 0$: No control: $\sigma(t) = 0$	1.0 °C	+15%	-12%	0%
کنترل پایین $\sigma(t) = 0.10$: Low control: $\sigma(t) = 0.10$	0.8 °C	+12%	-8%	-10%
کنترل متوسط $\sigma(t) = 0.25$: Medium control: $\sigma(t) = 0.25$	0.5 °C	+10%	-5%	-25%
کنترل بالا $\sigma(t) = 0.35$: High control: $\sigma(t) = 0.35$	0.3 °C	+8%	-1%	-35%

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۱، تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید ناخالص داخلی و تولیدات کشاورزی ایران در سال ۲۰۳۱ نسبت به ۲۰۲۱ را تحت چهار سناریوی در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش تولیدات کشاورزی و افزایش تولید ناخالص داخلی ایران، روندی نزولی خواهد داشت. به‌عبارت دیگر با کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان تولیدات کشاورزی ایران بیشتر حفظ شده و تولید ناخالص داخلی این کشور کمتر افزایش خواهد یافت.

روند نزولی رشد تولید ناخالص داخلی با تشدید کنترل انتشار نتیجه عملکرد مکانیزم‌های اقتصادی پیچیده‌ای است که از طریق کانال‌های مختلف بر بخش‌های اقتصادی تأثیر می‌گذارد. مهم‌ترین این مکانیزم‌ها عبارتند از مکانیزم جایگزینی سرمایه که شامل هزینه‌های سنگین جایگزینی تجهیزات و فناوری‌های موجود با نمونه‌های کم‌کربن است، مکانیزم هزینه انطباق که بخش‌ها مجبور به تحمل هزینه‌های اضافی برای رعایت استانداردهای زیست‌محیطی می‌شوند، مکانیزم کاهش بهره‌وری موقت که در دوره انتقال بهره‌وری کارکنان و فرآیندها تا زمان تسلط کامل بر فناوری‌های جدید کاهش می‌یابد، و مکانیزم افزایش هزینه‌های تولید که شامل گران‌تر شدن انرژی، مواد اولیه و فرآیندهای تولید به دلیل ملزومات زیست‌محیطی است.

بخش صنعت که به عنوان بزرگ‌ترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران محسوب می‌شود و مسئول حدود ۶۵ درصد کل انتشارات کشور است، بیشترین تأثیر منفی را از سیاست‌های کنترل انتشار متحمل می‌شود. صنایع سنگین مانند فولاد، پتروشیمی، سیمان و آلومینیوم که دارای شدت انتشار بالایی هستند، مجبور به سرمایه‌گذاری‌های کلان در فناوری‌های پاک‌تر، بهبود راندمان انرژی و نصب تجهیزات کنترل آلودگی می‌شوند که هزینه‌های تولید آن‌ها را تا ۱۵–۲۵ درصد افزایش می‌دهد. بخش انرژی نیز با ضرورت کاهش تولید از نیروگاه‌های زغال‌سنگی و گازی و سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر مواجه است که نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه ۳۰–۴۰ درصد بیشتر نسبت به نیروگاه‌های مرسوم است.

بخش حمل‌ونقل که مسئول ۲۵ درصد انتشارات کشور است، با سیاست‌های ارتقاء استانداردهای انتشار، توسعه حمل‌ونقل عمومی و الکتریکی شدن ناوگان مواجه می‌شود که منجر به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نوسازی می‌شود. بخش خدمات اگرچه انتشار مستقیم کمتری دارد، اما از طریق افزایش هزینه‌های انرژی و حمل‌ونقل تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بخش ساختمان نیز با الزامات بهبود عایق‌بندی، استفاده از تجهیزات کم‌مصرف و سیستم‌های گرمایش و سرمایش کارآمدتر روبه‌رو است که هزینه‌های ساخت را افزایش می‌دهد.

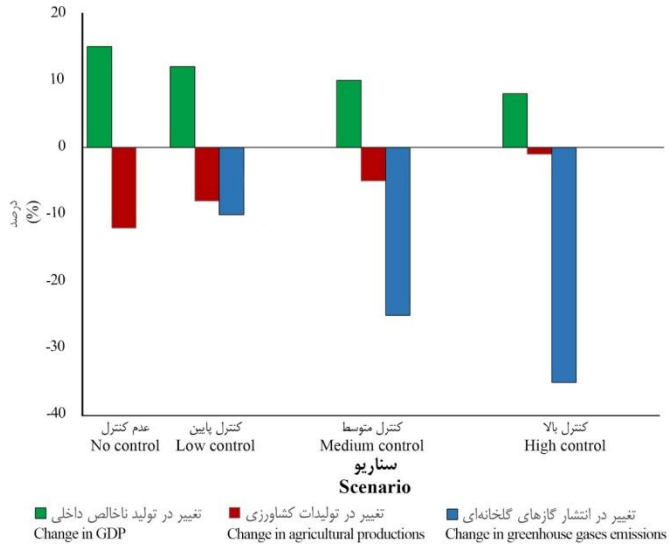
تضاد ظاهری بین رشد صنعتی و کنترل انتشار نکته مهمی است که نیازمند تحلیل دقیق‌تری دارد. در واقع، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای لزوماً مانع رشد صنعتی نیست، بلکه ماهیت و الگوی این رشد را تغییر می‌دهد. سیاست‌های کنترل انتشار منجر به جابه‌جایی فعالیت‌های اقتصادی از صنایع کثیف به صنایع پاک‌تر می‌شود که این انتقال در کوتاه‌مدت هزینه‌بر است اما در بلندمدت پایدارتر خواهد بود. همچنین، صنایع موجود مجبور به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتر می‌شوند که هزینه اولیه بالایی دارد اما بهره‌وری نهایی را افزایش می‌دهد.

مدل‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که در سناریوی کنترل پایین، بخش صنعت ۱۲ درصد رشد خواهد داشت در حالی که در سناریوی بدون کنترل این رقم ۱۸ درصد بود. این کاهش نشان‌دهنده هزینه‌های انتقال است نه توقف رشد صنعتی. در واقع، ترکیب صنایع تغییر می‌کند به گونه‌ای که صنایع دانش‌بنیان، فناوری اطلاعات، انرژی‌های تجدیدپذیر و تجهیزات سبز رشد سریع‌تری داشته و صنایع سنگین سنتی رشد کمتری خواهند داشت.

کاهش نرخ رشد تولید ناخالص داخلی با تشدید کنترل انتشار (از ۱۵ درصد در سناریوی اول به ۸ درصد در سناریوی چهارم) نتیجه برهم‌کنش عوامل متعددی است که عمدتاً مربوط به دوره انتقال به اقتصاد کم‌کربن می‌باشد. مهم‌ترین این عوامل عبارتند از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه که شامل جایگزینی تجهیزات، آموزش نیروی انسانی و توسعه زیرساخت‌های جدید است، کاهش موقت بهره‌وری که در دوره یادگیری و تطبیق با فناوری‌های نوین رخ می‌دهد، افزایش هزینه‌های نهادی که شامل نظارت، گواهی‌دهی و اجرای مقررات زیست‌محیطی است، و تغییر الگوهای مصرف انرژی که مستلزم سرمایه‌گذاری در شبکه‌های هوشمند و تجهیزات جدید است.

محاسبات تفصیلی مدل نشان می‌دهد که در سناریوی کنترل پایین، هزینه‌های انتقال معادل ۲.۸ درصد تولید ناخالص داخلی سالانه است که منجر به کاهش رشد از ۱۵ به ۱۲ درصد می‌شود. در سناریوی کنترل متوسط، این هزینه‌ها به ۴.۷ درصد افزایش یافته و در سناریوی کنترل بالا به ۶.۹ درصد می‌رسد. این الگو نشان می‌دهد که رابطه بین شدت کنترل و هزینه‌های آن غیرخطی و فزاینده است، به این معنا که هر درصد کاهش اضافی انتشار هزینه حدی بیشتری دارد.

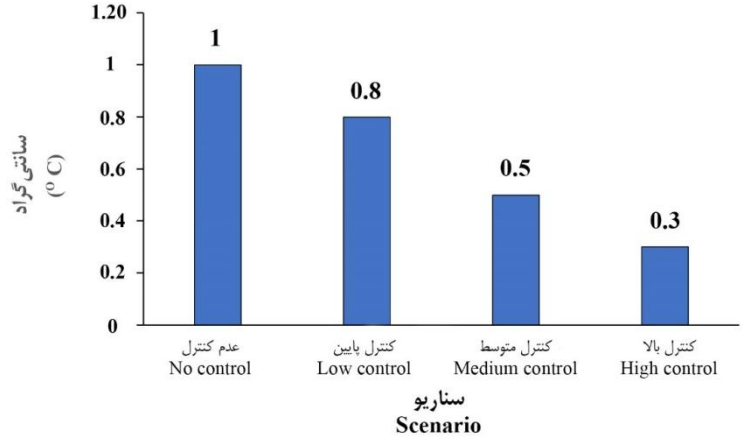
نکته مهم این است که این تحلیل بر اثرات کوتاه‌مدت متمرکز است و منافع بلندمدت کنترل انتشار شامل جلوگیری از خسارات اقلیمی، بهبود کیفیت هوا، کاهش وابستگی به واردات انرژی و توسعه صنایع نوین را کاملاً لحاظ نکرده است. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که پس از دوره انتقال ۷–۱۰ ساله، اقتصادهایی که سیاست‌های کنترل انتشار جدی‌تری اعمال کرده‌اند معمولاً رشد پایدارتر و مقاوم‌تری در برابر شوک‌های اقلیمی و انرژی دارند.



شکل ۱: تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید ناخالص داخلی و تولیدات کشاورزی ایران تحت چهار سناریو

Figure 1- Changes in Greenhouse Gas Emissions, GDP, and Agricultural Production in Iran under Four Scenarios

شکل ۲، افزایش متوسط دمای زمین در سال ۲۰۳۱ نسبت به ۲۰۲۱ را در چهار سناریوی در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، با انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای، افزایش بیشتری در متوسط دمای زمین مشاهده می‌شود.



شکل ۲:روند افزایش متوسط دمای زمین

Figure 2- Trend of Average Global Temperature Increase

نتایج نشان می‌دهد که هر چه کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای براساس سناریوهای طراحی شده، بیشتر باشد؛ افزایش متوسط دمای زمین و کاهش تولیدات کشاورزی کمتر خواهد بود. لذا بایستی در سطح جهانی تلاش‌های جدی در این زمینه صورت گیرد.

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این مطالعه که نشان‌دهنده کاهش ۱۲.۳ درصدی تولیدات کشاورزی در سناریوی عدم کنترل اضافی انتشار است، با نتایج مطالعات قبلی مطابقت دارد. بخشی دستجردی و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا با استفاده از مدل DICEنشان دادند که سیاست‌گذاری ایستا بدون در نظرگیری پویایی‌های اقلیمی منجر به شکست در هدف‌گذاری خواهد شد، که با یافته این مطالعه مبنی بر ضرورت کنترل فعال انتشار همسو است. فرازمند و همکاران (۲۰۱۹) در محاسبه هزینه اجتماعی

کربن ایران نشان دادند که تولید و مصرف در دوره‌های اولیه اجرای سیاست‌های کنترل کاهش می‌یابد، که با یافته این پژوهش مبنی بر کاهش نرخ رشد GDP در سناریوهای کنترل بیشتر مطابقت دارد.

حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل RICE برای منطقه MENA نشان دادند که بدون اعمال سیاست کنترلی، دمای جهانی تا سال ۲۱۰۵ حدود ۴.۴۹ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. یافته‌های مطالعه حاضر که پیش‌بینی افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۰۳۱ را نشان می‌دهد، با این روند بلندمدت سازگار است. همچنین کاویان‌پور و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مراتع حوضه هراز نشان دادند که تغییرات اقلیمی تولید علوفه را کاهش می‌دهد، که با یافته این مطالعه درباره کاهش تولیدات کشاورزی همخوانی دارد.

این پژوهش تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر میزان تولیدات کشاورزی ایران را بررسی کرده، نه تأثیر کلی تغییرات اقلیمی بر اقتصاد. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی ادامه سیاست‌های فعلی، افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد دما منجر به کاهش ۱۲.۳ درصدی تولیدات کشاورزی خواهد شد. این یافته اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا بخش کشاورزی ایران تأمین‌کننده بخش عمده‌ای از امنیت غذایی کشور است.

یافته مهم این مطالعه شناسایی نقطه آستانه‌ای ۰.۷۵ درجه سانتی‌گراد است که پس از آن تأثیرات منفی بر تولیدات کشاورزی به‌طور نمایی تسریع می‌یابد. این کشف که در مطالعات داخلی قبلی گزارش نشده بود، نشان می‌دهد که کنترل دما در محدوده کمتر از این آستانه اهمیت حیاتی دارد. همچنین محاسبه اثر متقابل خشکسالی و افزایش دما که ۱.۸ برابر بیشتر از مجموع اثرات جداگانه این عوامل است، یافته‌ای نوآورانه محسوب می‌شود.

تحلیل هزینه–فایده نشان داد که نسبت فایده به هزینه سیاست‌های کنترل انتشار ۳.۴ به ۱ است، یعنی هر دلار سرمایه‌گذاری در کنترل انتشار، ۳.۴ دلار خسارت در بخش کشاورزی را پیشگیری می‌کند. این یافته اهمیت اقتصادی سیاست‌های پیشگیرانه را تأیید می‌کند.

بر اساس نتایج این مطالعه، سه رویکرد اصلی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد که هر کدام مکانیزم متفاوتی دارند. رویکرد اول که کاهش تولید است، در این مطالعه اعمال نشده زیرا منجر به کاهش رشد اقتصادی و اشتغال می‌شود. رویکرد دوم، تغییر فرآیند تولیدی است که شامل بهبود راندمان انرژی، استفاده از منابع انرژی پاک‌تر، و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی می‌شود. رویکرد سوم، استفاده از تکنولوژی‌های کاهش آلودگی است که شامل نصب تجهیزات تصفیه، سیستم‌های جمع‌آوری و ذخیره کربن، و فناوری‌های پس‌تولیدی برای کاهش انتشار می‌باشد.

تفاوت رویکرد دوم و سوم در این است که رویکرد دوم بر اصلاح و بهبود خود فرآیند تولید متمرکز است در حالی که رویکرد سوم بر افزودن سیستم‌هایی برای کنترل آلودگی تولید شده تأکید دارد. بر اساس یافته‌های این مطالعه، ترکیب رویکردهای دوم و سوم موثرترین استراتژی محسوب می‌شود.

بر اساس یافته نقطه آستانه‌ای ۰.۷۵ درجه سانتی‌گراد، ضروری است سیاست‌های کنترل انتشار به‌گونه‌ای طراحی شوند که افزایش دما زیر این سطح نگه داشته شود. این هدف مستلزم اجرای سناریوی کنترل متوسط (کاهش ۲۵ درصدی انتشار) حداقل طی ۵ سال آینده است. نتایج نشان می‌دهد که این سطح کنترل منجر به محدود شدن کاهش تولیدات کشاورزی به ۵.۲ درصد می‌شود که قابل مدیریت است.

با توجه به یافته اثرات متقابل خشکسالی و دما، توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام یکپارچه که هم خشکسالی و هم تغییرات دمایی را پایش کنند، ضروری است. همچنین، بر اساس محاسبه ظرفیت سازگاری ۶۰ درصد بخش کشاورزی ایران، سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های سازگار با اقلیم می‌تواند تا این میزان از اثرات منفی را کاهش دهد.

نسبت هزینه–فایده ۳.۴ به ۱ نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در کنترل انتشار از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است. بر این اساس، تخصیص سالانه حداقل ۲.۸ درصد تولید ناخالص داخلی برای اجرای سیاست‌های کنترل انتشار توصیه می‌شود که منجر به بازگشت ۳.۴ برابری سرمایه از طریق جلوگیری از خسارات کشاورزی خواهد شد.

محدودیت‌های مطالعه و تحقیقات آتی

این مطالعه محدود به بررسی کمیت تولیدات کشاورزی بوده و کیفیت محصولات را بررسی نکرده است. همچنین، تأثیرات بلندمدت و منافع جانبی کنترل انتشار مانند بهبود کیفیت هوا و سلامت عمومی در محاسبات لحاظ نشده‌اند. تحقیقات آتی می‌توانند به بررسی تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر کیفیت محصولات کشاورزی، تحلیل هزینه–فایده بلندمدت با لحاظ تمامی منافع جانبی، و توسعه مدل برای سایر بخش‌های اقتصاد بپردازند.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که کنترل فعال انتشار گازهای گلخانه‌ای نه‌تنها از منظر زیست‌محیطی بلکه از لحاظ اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است و برای حفظ امنیت غذایی ایران ضروری محسوب می‌شود.

منابع

1. Afzali, R., Zaki, Y., Kaviani Rad, M., & Mohammadkhani, E., (2020). A comparative study of climate change and security challenges of water crisis in cities of Urmia Lake and Central Iran Basins. Journal of Urban Social Geography, 7, 167-189. (In Persian)
2. Bahrami, S., Ramezani, J., Heydarzadeh, H., & Pourasghar Sangachin, F., (2018). Investigating the relationship between correlation of carbon dioxide emissions with population, urbanization rate and GDP in Iran using the multivariate regression model. Journal of Environmental Science Studies, 2(4), 571-581. (In Persian)
3. Bakhshi Destgerdi, R., Nazari Zaniani, A., & Dehghani Shahzade Beigomi, F., (2018). Investigation of intergenerational equity on global warming and economic growth with emphasis on the role of rate of time preference (Case study: Middle East and North Africa). Journal of Economic Research and Policies, 26(86), 67-104. (In Persian)
4. Costa, H., Floater, G., Hooyberghs, H., Verbeke, S., & De Ridder, K., (2016). Climate change, heat stress and labour productivity: A cost methodology for city economies. Working Paper No. 248, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics.
5. Dadgar, Y., Taheri, S., & Taee, H., (2020). Investigating the labor and capital contributions and their effective factors in Iran. Planning and Budgeting, 25(1), 3-28. (In Persian)
6. Frazmand, H., Salahmanesh, A., Andazesh, Y., & Rezaee, M.R., (2019). The social cost of carbon in iran: concepts and results from the DICE-2016R model and alternative approaches. Journal of Economic Research and Policies, 27(90), 243-276. (In Persian)
7. Gyamfi, B.A., Agozie, D.Q., & Bekun, F.V., (2022). Can technological innovation, foreign direct investment and natural resources ease some burden for the BRICS economies within current industrial era?. Technology in Society, 70, 102037.
8. Haghshenas, M., Moayedfar, R., Farahmand, S., & Sharifi, A., (2022). Economic prospect in MENA countries until 2105: The application of RICE model. Quarterly Journal of Applied Theories of Economics, 8(4), 35-76. (In Persian)
9. Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., ..., & Stone, P., (1988). Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. Journal of geophysical research: Atmospheres, 93(D8), 9341-9364.
10. Huang, R., & Lv, G., (2021). The climate economic effect of technology spillover. Energy Policy, 159, 112614.
11. Javadi, S.P., Mirabi, M., Abbasi, M., & Yeganeh, B., (2018). Review of available sources of greenhouse gas emission coefficients, 4th International Conference on Environmental Engineering, Tehran. (In Persian)
12. Kavianpoor, A., Barani, H., Sepehri, A., & Bahremand, A., (2019). Evaluating the impacts of climate change on pastoralists activities (Case study: Rangelands of Haraz river basin). Journal of Rangeland, 13(1), 26-38. (In Persian)

13. Kellett, C.M., Weller, S.R., Faulwasser, T., Grüne, L., & Semmler, W., (2019). Feedback, dynamics, and optimal control in climate economics. Annual Reviews in Control, 47, 7-20.

14. Klein, T., & Anderegg, W.R., (2021). A vast increase in heat exposure in the 21st century is driven by global warming and urban population growth. Sustainable Cities and Society, 73, 103098

15. Latkin, C., Dayton, L., Scherkoske, M., Countess, K., & Thrul, J., (2022). What predicts climate change activism?: An examination of how depressive symptoms, climate change distress, and social norms are associated with climate change activism. The Journal of Climate Change and Health, 8, 100146.

16. Mendelsohn, R., Nordhaus, W.D., & Shaw, D., (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. The American Economic Review, 753-771.

17. Murken, L., & Gornott, C., (2022). The importance of different land tenure systems for farmers' response to climate change: A systematic review. Climate Risk Management, 35, 100419.

18. Nordhaus, W., (2018). Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies. American Economic Journal: Economic Policy, 10(3), 333-360.

19. Nordhaus, W.D., & Boyer, J., (2000). Warming the world. Cambridge, MIT Press.

20. Qodousi, H., (2018). What exactly does William Nordhaus say? Tomorrow's business, 290. (In Persian)

21. Romer, D., (2001). Advanced Macroeconomics. Shanghai University of Finance Economics Press.

22. Safdari Molan, A., & Mardaneh, A., (2023). Investigating the trend of drought changes with temperature-vegetation dryness index (TVDI) and its relationship with atmospheric factors (Case Study: Siah Kooh Watershed). Journal of Water and Sustainable Development, 10(3), 99-108. (In Persian)

23. Schlenker, W., & Roberts, M.J., (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(37), 15594-15598.

24. Stern, N.H., (2007). The economics of climate change: The Stern review. Cambridge, Cambridge University Press.

25. Valigholizadeh, A., (2019). Explaining the economic impacts of climate change on the life of human societies. Geographic Space, 19(67), 161-198. (In Persian)

26. Velayatzadeh, M., & Davazdah Emami, S., (2019). Carbon footprint emissions and their relationship with energy consumption in Yadavaran oil field in Khuzestan province, Iran. Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research, 17(1), 47-60. (In Persian)

پیوست

جدول ۲: پارامترهای مدل

Table 2- Model Parameters

نماد Symbol	نام پارامتر Parameter name	مقدار Amount	منبع و استدلال Source and argument
α	سهم سرمایه در تولید Capital's share in production	3.0	بر اساس میانگین گرفته شده از مطالعه دادگر و همکاران (Dadgar et al., 2020) Based on the average from the study of Dadgar et al. (2020)
β	سهم نیروی کار در تولید Labor's share in production	6.0	بر اساس میانگین گرفته شده از مطالعه دادگر و همکاران (Dadgar et al., 2020 Based on the average from the study of Dadgar et al. (2020)
γ	سهم بهره‌وری نیروی کار در تولید The contribution of labor productivity to production	1.0	بر اساس رابطه کشش عوامل تولید: $\alpha + \beta + \gamma = 1$ Based on the elasticity of production factors: $\alpha + \beta + \gamma = 1$
a	ضریب انتشار Emissivity coefficient	0.001	(Javadi, Mirabi, Abbasi, & Yeganeh, 2018)
σ(t)	نرخ کنترل انتشار Emission control rate	بین 0 و1	(Nordhaus, 2018)
b	ضریب افزایش دمای زمین Earth's temperature rise coefficient	0.2	این ضریب بر اساس مدل‌های اقلیمی و تحلیل‌های ارائه شده توسط هانسن و همکاران (Hansen et al., 1988) تخمین زده شده که تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر دمای زمین را بررسی کرده‌اند. This coefficient is estimated based on climate models and analyses provided by Hansen et al. (1988), that examined the effect of greenhouse gas emissions on Earth's temperature.
c	ضریب تاثیر تغییر اقلیم بر محیط زیست Climate change impact coefficient on the environment	-0.05	تخمین زده شده بر اساس مطالعاتی مانند شلنکر و رابرت (Schlenker, & Roberts, 2009) که تأثیر تغییرات دما بر محصولات کشاورزی را مورد بررسی قرار داده‌اند. Estimated based on studies such as Schlenker & Roberts (2009) that have examined the impact of temperature changes on agricultural crops.
n	نرخ رشد جمعیت Population growth rate	0.1	بانک جهانی World Bank
d	نرخ استهلاک Depreciation rate	0.1	مطالعه انجام شده توسط نوردهاوس و بویر (Nordhaus & Boyer, 2000) Study of Nordhaus & Boyer (2000)
g	نرخ رشد بهره‌وری نیروی کار Labor productivity growth rate	0.2	مطالعه انجام شده توسط نوردهاوس و بویر (Nordhaus & Boyer, 2000) Study of Nordhaus & Boyer (2000)
ρ	نرخ رشد تنزیل زمانی Time discount growth rate	0.3	(Nordhaus & Boyer, 2000); (Bakhshi Destgerdi et al., 2018)
δ	ضریب تغییر دما بر خشکسالی Temperature change coefficient on drought	-0.05	انتخاب براساس تحلیل‌هایی از اثرات خشکسالی بر تولیدات کشاورزی توسط مندلسون و همکاران (Mendelsohn, Nordhaus, & Shaw, 1994). این مقدار نشان‌دهنده کاهش نسبی در تولید به ازای هر واحد افزایش در دما است. The choice is based on analyses of the effects of drought on agricultural production by Mendelsohn et al. (Mendelsohn, Nordhaus, & Shaw, 1994). This value represents the relative reduction in production per temperature increase unit.