

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Analyzing the Impact of Climate Change on Heat Stress Levels among Workers in the National Steel Industry

Mostafa Jafarizaveh^{1,2}, Ali Jafari¹, Mahdi Jafari Nodoushan^{1,3}, Fatemeh Chambari⁴, Farideh Golbabaei^{1*}

¹Department of Occupational Health engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

²Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Gonabad University of Medical Sciences, Gonabad, Iran

³Industrial Diseases Research Center, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

⁴Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 19-4-2025

Accepted: 23-12-2025

ABSTRACT

Introduction: Climate change is a major global challenge, strongly influencing the Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) index and heat stress among steel industry workers. This study evaluates the impact of geographical location and climate change on occupational heat stress exposure in Iran's steel sector.

Material and Methods: This qualitative-analytical study used data from the SABA system and the Iranian Occupational Heat Stress Atlas. Information on steel industries, their distribution, and production capacities across eight climate zones was extracted. WBGT measurements were collected in collaboration with industrial units in different zones. Data analysis was performed using ArcGIS and SPSS. The effects of climate change on heat stress were assessed for three future horizons: 2040, 2060, and 2080.

Results: The findings revealed that climate zones G1 (eastern, southeastern, and desert regions) and G4 (Persian Gulf coastal provinces including Hormozgan, Bushehr, Fars, and Khuzestan), which host the highest steel production capacities, are exposed to the highest levels of heat stress (WBGT index) and water resource scarcity. WBGT values in zones G4 and G6 (Gilan province) exceeded permissible limits, whereas zones G2 (including North Khorasan, Razavi Khorasan, Tehran, Alborz, Qazvin, Hamedan, Markazi, and Chaharmahal-Bakhtiari), G5 (Kurdistan, Kermanshah, Lorestan), and G7 (Ilam, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad) showed the lowest WBGT levels. Considering projected temperature increases in the three future horizons and the acceptable correlation coefficient (0.40) between annual daytime temperature and WBGT index per climate zone, predicted temperature changes may lead to increased WBGT levels, particularly in zones G3, G6, and G8.

Conclusion: Given climate projections and the spatial distribution of steel industries, it is essential to develop climate-responsive policies, implement sustainable water resource management, and reconsider the siting of steel production units. These measures can enhance the resilience of Iran's steel industry against future climate change and mitigate occupational health and environmental risks.

Keywords: Climate change, steel industry, heat stress, WBGT index

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Jafarizaveh M, Jafari A, Jafari Nodoushan M, Chambari F, Golbabaei F. Analyzing the Impact of Climate Change on Heat Stress Levels among Workers in the National Steel Industry. *J Health Saf Work*. 2025; 15(4): 864-886.

* Corresponding Author Email: fgolbabaei@tums.ac.ir

Copyright © 2025 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Climate change, caused by human actions, is intensifying heat stress in workplaces. This is especially noticeable in Iran, where rising temperatures and altered rainfall patterns are worsening health hazards like heat-related illnesses, air pollution, and waterborne diseases. Heat stress is a major concern in countries with hot, dry climates, particularly affecting workers in industries like construction and manufacturing. It poses significant risks to health, safety, and productivity, leading to financial losses. Although people in these regions might be more accustomed to heat, the combined effects of air temperature and sunlight make heat stress a serious problem.

Steel and iron are crucial resources for human activities and technological progress. The environment, underground water supplies, soil quality, and air quality are all influenced by the operations of steel manufacturers, including burning, waste disposal, and waste management. Iran is a major steel producer, ranking 20th worldwide. The steel industry is known for its high levels of heat stress due to the thermal processes involved in production. Given the prevalence of steel industries in Iran, a significant portion of the workforce is employed in this sector. Due to the inherent heat-generating nature of steel production and Iran's diverse climate, this study investigates how the geographical location of steel industries affects occupational heat stress on workers. It also predicts future climate conditions and suggests potential solutions to reduce heat stress among workers in these industries.

2. MATERIAL AND METHODS

This qualitative-analytical study, conducted in 2024, aimed to assess the impact of climate change on heat stress among workers in Iran's steel and iron industries. The research followed a multi-step approach:

Climate Zoning: Iran was classified into eight distinct climate zones based on temperature and precipitation, using the model proposed by Asadollah et al.

Industrial Mapping: Geographic location, production capacity, and distribution of steel and iron units were extracted from national databases (SABA system and Occupational Heat Stress Atlas). These were spatially mapped using ArcGIS 10.5.

Heat Stress Assessment: Annual WBGT index data were collected from industrial units across

different climate zones. These values were matched with geographic data to identify correlations between climate type and heat stress levels. Zones were categorized into three exposure levels: below permissible (A), within permissible (B), and above permissible (C).

Climate Change Projections: Future climate scenarios for 2040, 2060, and 2080 were modeled using projections from Asadollah et al., focusing on temperature and precipitation changes and their potential impact on WBGT levels in each zone.

Data Analysis: Tools used included Google Earth (for geolocation), ArcGIS 10.5 (for spatial mapping), and SPSS 21 (for statistical analysis). Statistical tests included Kruskal-Wallis, Mann-Whitney, Spearman correlation, and Kolmogorov-Smirnov, with a significance level of 0.05.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Climate classification of Iran

Based on the climate classification model by Asadollah et al., Iran exhibits significant climatic diversity, ranging from cold and high-precipitation zones to hot and arid regions (figure1). The largest climate zone, G1 (hot with very low precipitation), covers 53.1% of the country and includes provinces such as South Khorasan, southern Razavi Khorasan, Yazd, Kerman, Isfahan, Semnan, Qom, and Sistan-Baluchestan, with an average annual maximum temperature of 24.2°C. The hottest zone, G4 (very hot with moderate rainfall), spans 16.7% of Iran's area along the Persian Gulf and includes Hormozgan, Fars, Bushehr, and Khuzestan, with an average annual maximum temperature of 26.27°C. The coldest zones—G3 (very cold with low rainfall) and G6 (very cold with high rainfall)—cover 10.8% of the country, located in the northwest and north, including provinces such as West and East Azerbaijan, Ardabil, Zanjan, Golestan, and Mazandaran. The highest precipitation levels were observed in zones G6 and G8 (cold with high rainfall), particularly in Northern provinces like Gilan, Mazandaran, and Golestan (Table1).

Investigating the dispersion and production capacity of industries in different climates

Steel and iron production processes were categorized by heat source location (indoor vs. outdoor), influencing worker exposure to thermal hazards. Indoor operations include casting, steelmaking, and rolling; outdoor processes involve pelletizing and sponge iron production. The highest number of units (105) were in primary rolling,

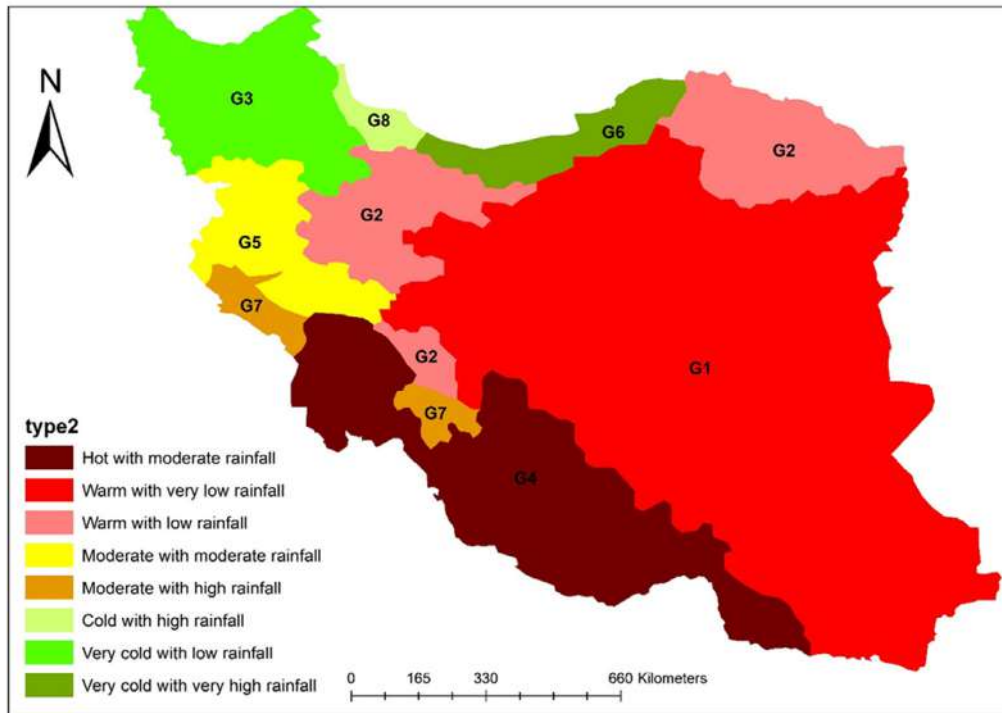


Fig. 1: Climatic classification of Iran

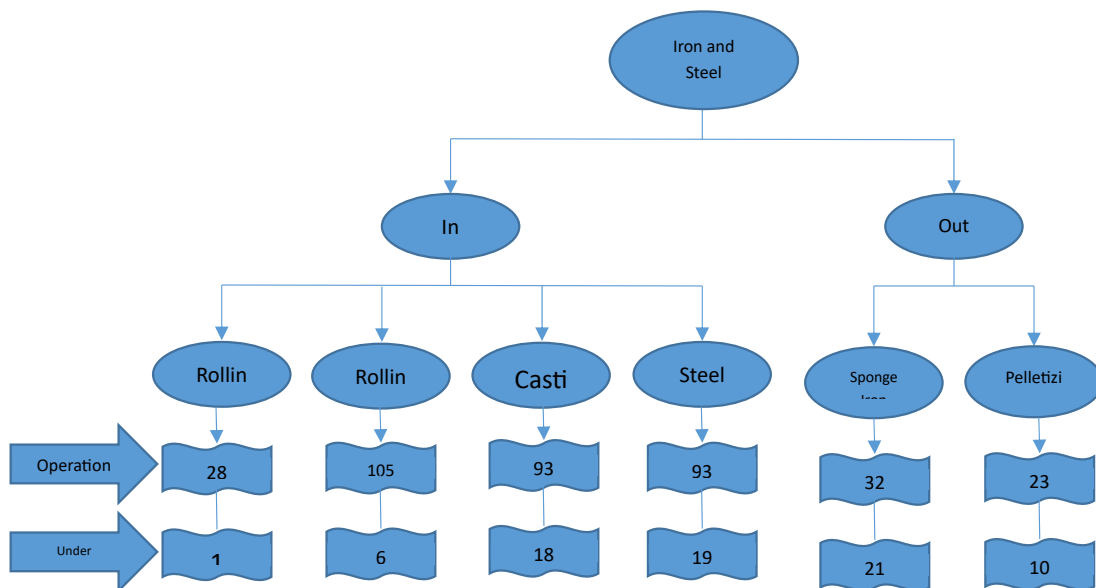


Fig. 2: The trend of development across various sectors of the iron and steel industry in Iran

likely due to lower setup costs. Data also indicate accelerated growth in sponge iron and steelmaking sectors across Iran (Figure2). Steel industries are predominantly concentrated in central Iran (climate zones G1 and G2), with fewer units in

northern humid zones (G6–G8). Production capacity is highest in G1, G4, and G2, accounting for 59%, 19%, and 11% respectively—while G6 and G7 show minimal output. Ongoing expansion is focused in hot, arid zones, raising concerns about

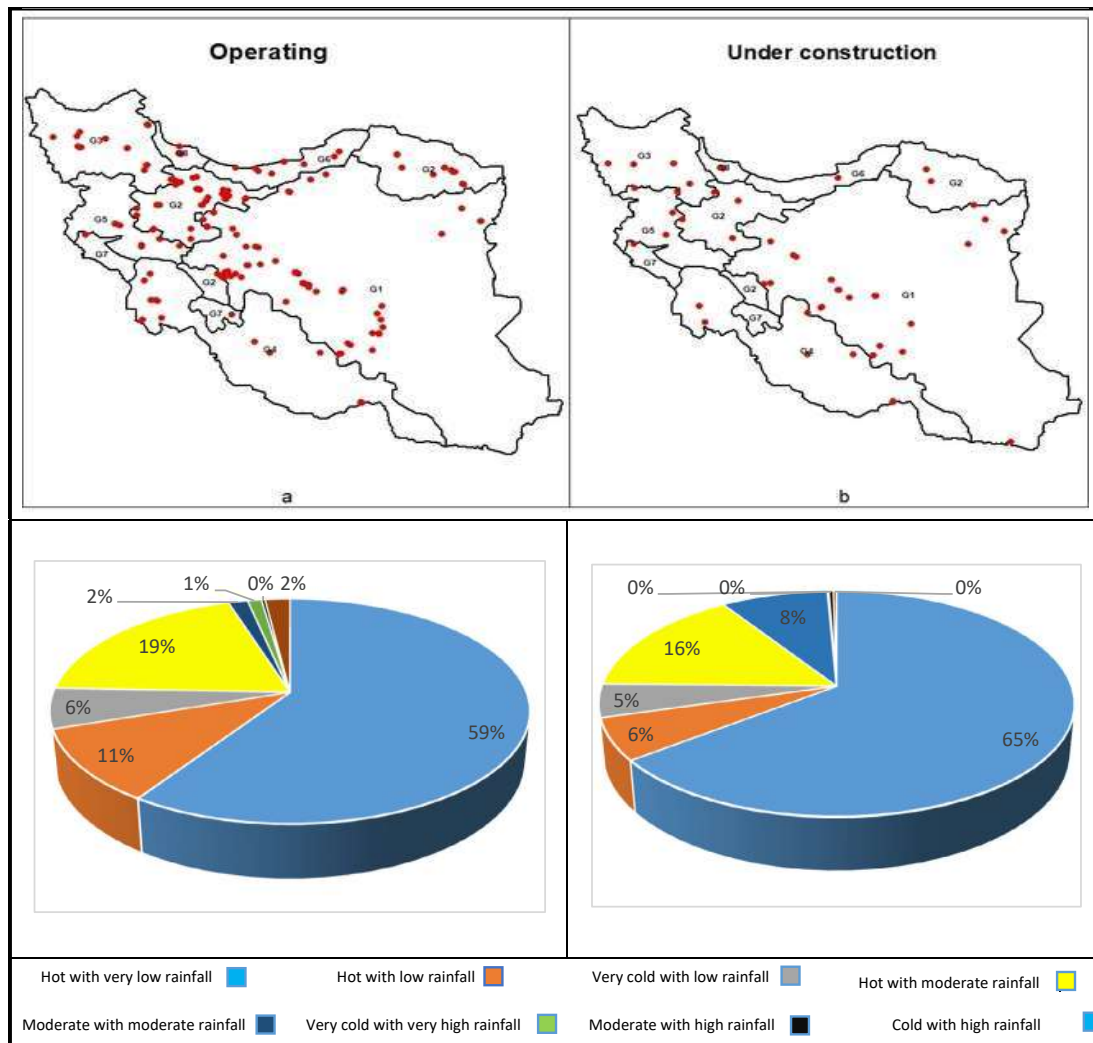


Fig. 3: Distribution and production capacity of industries across various climatic regions.

heat stress, water scarcity, and energy demand (Figure3).

Investigating the effect of geographical location on the level of exposure to thermal stress in the steel industry:

This study assessed worker exposure to heat stress in steel and iron industries across Iran's climate zones using the WBGT index. Statistical analysis revealed that WBGT data did not follow a normal distribution (K-S test), and Kruskal-Wallis results ($P = 0.0001$) confirmed significant differences in WBGT levels among zones. Pairwise comparisons showed that some zones differed significantly while others did not, leading to a classification of regions into three exposure categories (Figure4):

- Zone A (G2, G3, G5, G6, and G7): Located in northeastern, northwestern, and western Iran, this

zone exhibited the lowest heat stress levels, with a mean WBGT of $25.15 \pm 5.5^{\circ}\text{C}$.

- Zone B (G1): Covering eastern, southeastern, and desert regions, this zone showed moderate exposure, with a mean WBGT of $28.86 \pm 4.96^{\circ}\text{C}$.

- Zone C (G4): Including the Persian Gulf coast and western Caspian areas, this zone had the highest exposure, with a mean WBGT of $31.8 \pm 4.2^{\circ}\text{C}$.

Mann-Whitney tests confirmed statistically significant differences in WBGT means across all three zones. These findings underscore the critical role of geographic location

in determining occupational heat stress levels and highlight the need for climate-specific mitigation strategies (Table 2).

Spearman correlation analysis revealed a statistically significant positive relationship

Table 1: Characteristics of each climate

Climate	Province	Weather	Percentage of area	Annual average temperature (°C)	Annual average rainfall (mm)
G1	Semnan, Qom, Isfahan, Yazd, Kerman, Sistan (likely referring to Sistan and Baluchestan), southern Razavi Khorasan, and South Khorasan	Warm with very low rainfall	53.1	24.2	142.04
G2	north Razavi Khorasan, North Khorasan, Tehran, Alborz, Qazvin, Hamedan, Markazi, and Chaharmahal and Bakhtiari	Warm with low rainfall	11.6	23.39	230.22
G3	West Azerbaijan, East Azerbaijan, Ardabil, and Zanjan	Very cold with low rainfall	7.8	19.29	236.39
G4	Fars, Hormozgan, Bushehr, and Khuzestan	Hot with moderate rainfall	16.7	26.27	317.96
G5	Kurdistan, Kermanshah, and Lorestan	Moderate with moderate rainfall	4.8	22.54	346.12
G6	Mazandaran and Golestan	Very cold with very high rainfall	3	19.91	1185.56
G7	Ilam and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	Moderate with high rainfall	2.1	22.88	809.94
G8	Golestan	Cold with high rainfall	0.9	20.92	1264.27

Table 2: Results of the Mann-Whitney test

		P-value	Test
A	B	0.009	Mann-Whitney
	C	0.0001	Mann-Whitney
B	A	0.009	Mann-Whitney
	C	0.006	Mann-Whitney
C	A	0.0001	Mann-Whitney
	B	0.006	Mann-Whitney

Table 3: Results of Spearman's correlation test between ambient temperature and WBGT index

WBGT	temperature	Correlation Coefficient	
		0.407	
		P-value	0.0001
		N	149

between ambient temperature and WBGT levels across climate zones (Table3). This indicates that climatic temperature variations substantially affect industrial heat stress exposure. Given WBGT's composite nature—incorporating dry temperature, humidity, radiant heat, and air flow—the observed dependency underscores the critical role of regional climate in determining thermal burden on workers

Workers in coastal steel industries—especially near the Persian Gulf—experience the highest WBGT levels due to the combination of high temperature and humidity. Desert regions (e.g., Semnan, Isfahan, South Khorasan, Yazd, Qom, Sistan-Baluchestan, Kerman) also show elevated thermal exposure. In contrast, the lowest WBGT values were recorded in cooler, temperate provinces such as Razavi Khorasan, North Khorasan, Alborz, Golestan, Chaharmahal-Bakhtiari, and Lorestan. This spatial distribution confirms the decisive role

of geography and climate in determining heat stress burden. The findings highlight the need for region-specific thermal risk management, climate-adapted control strategies, and enhanced occupational safety measures in industrial environments.

Prediction of climate change and its impact on the steel industry:

Current data show that most steel units in Iran are concentrated in warm zones (23–27°C). Climate projections for 2040, 2060, and 2080 indicate temperature increases of 3–5°C in G1 and G2, regions hosting over 80% of steel production. Southern coastal areas (G4) will see minimal change (0.66–2°C), while northern and northwestern provinces (G6, G8) may experience rises of 7–8°C. These shifts suggest that already hot industrial zones will face intensified heat stress, reinforcing the need for climate-adaptive planning in steel sector development (Figure 5, Table4).

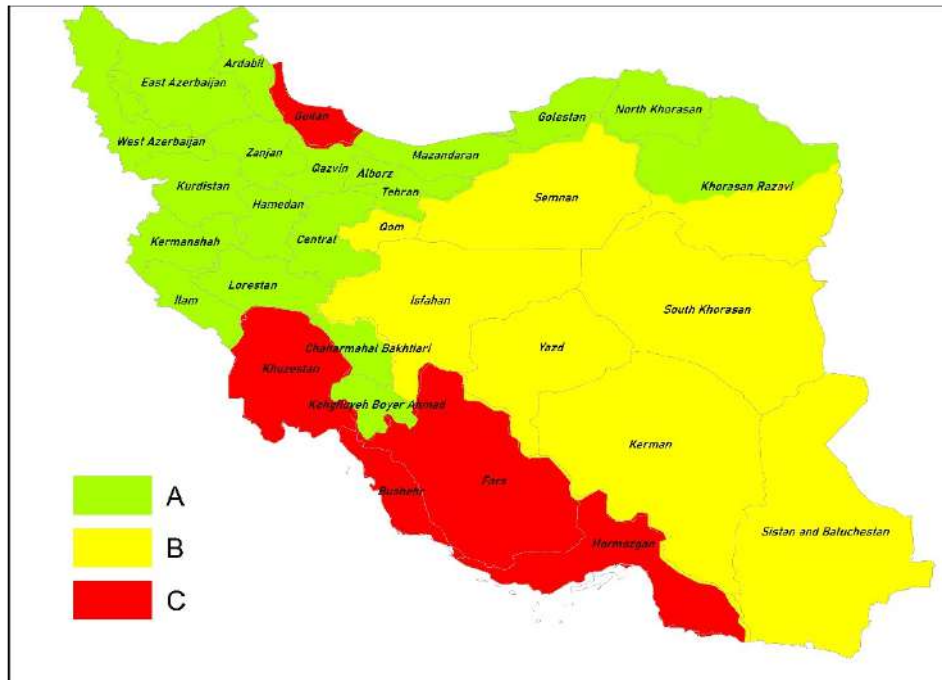


Fig. 4: Division of Iran based on WBGT index

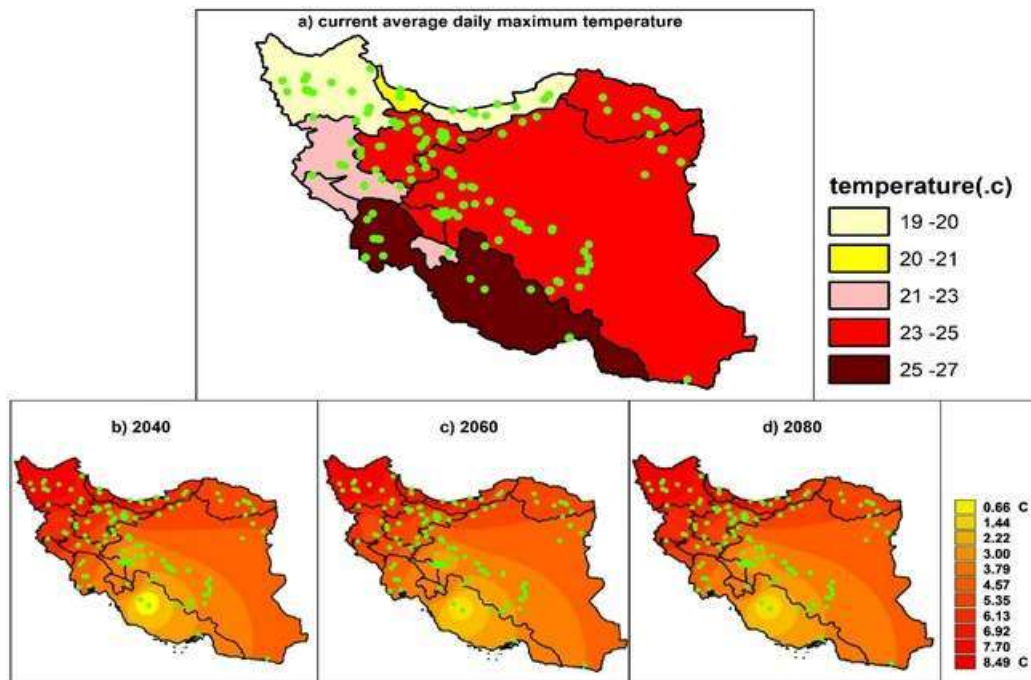
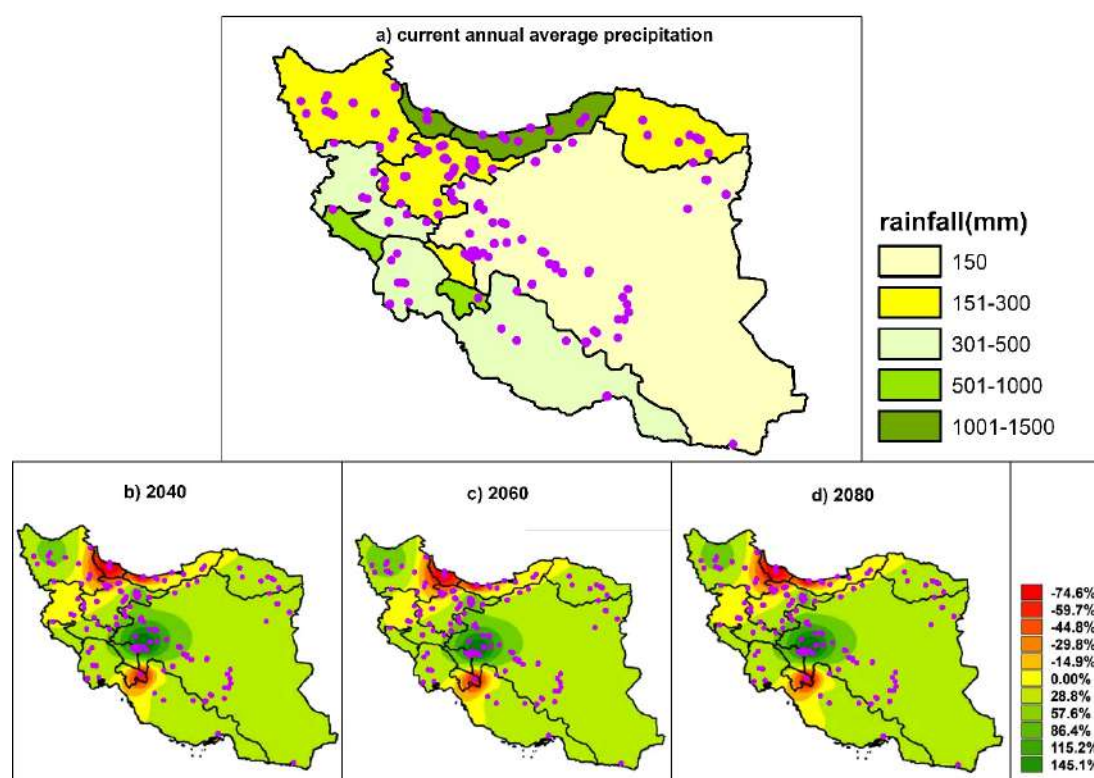


Fig. 5: Distribution of steel industries on the map of average annual maximum daily temperatures at present and predicted changes for the years 2040, 2060, and 2080.

Table 4: Predicted changes in temperature and rainfall across various climatic regions

Climate	Predicted temperature changes (°C)	Predicted changes in rainfall (%)
G1	3-4	50-144%
G2	4-5	10-30%
G3	7-8	20-50%
G4	0.6-2	0-30%
G5	4.5	0-20%
G6	5-6.5	0-30%
G7	3-4	(-20) -10%
G8	6-7	(-20) -(-75) %

**Fig. 6:** Distribution of steel industries on the map of average annual rainfall at present and predicted changes for the years 2040, 2060, and 2080

Access to water is a critical requirement for the steel industry, yet most facilities are located in arid regions with annual precipitation below 300 mm. Climate projections for 2040, 2060, and 2080 suggest increased rainfall in central zones (G1), with up to 145% rise, potentially easing water scarcity in provinces like Isfahan, Yazd, and Tehran. In contrast, humid zones G6 and G8 are expected to experience significant declines—up to 74%—while G5 shows no notable change. These shifts may alter future water stress patterns across industrial regions (Figure 6, Table4).

Climate projections indicate rising temperatures across all provinces in coming decades. Zone C (including Hormozgan, Bushehr, Khuzestan, Fars, and Gilan) currently shows the highest WBGT exposure, and is expected to exceed permissible limits due to a 40% correlation between WBGT and ambient temperature. Zone A will also experience increased heat stress, though likely remaining near acceptable thresholds. In Zone B, which currently has the lowest WBGT levels, regions such as East and West Azerbaijan, Ardabil, Zanjan, Mazandaran, and Golestan may

face notable increases. Conversely, zones G2, G5, and G7 are projected to maintain the lowest future WBGT exposure

4. CONCLUSIONS

Steel production is a strategic industry in Iran, yet workers face significant occupational hazards, notably heat stress. Exposure to elevated temperatures can lead to acute and chronic health effects, including heatstroke and reproductive impacts. This study classified Iran into three WBGT-based exposure zones: Zone A (within permissible limits), Zone B (below limits), and Zone C (above limits). Most steel units are concentrated in Zones A and C, placing workers in these regions at higher thermal risk—consistent with previous national studies.

Steel industries are predominantly located in hot climates (G1, G2, and G4), where WBGT values during peak seasons may reach up to 40°C. Climate change is expected to raise ambient temperatures across all regions, with a 40% correlation to WBGT levels. International research confirms that rising WBGT reduces labor productivity and increases health risks, especially in tropical and subtropical zones.

Regional analysis shows that:

- G1 (hot, arid) holds 59% of steel capacity and faces critical heat stress and water scarcity, despite

projected rainfall increases. Engineering controls and potential relocation are recommended.

- G2 (warm, semi-arid) has moderate exposure and access to surface water, making it viable for future expansion with proper resource management.

- G3 (cold, low rainfall) will experience significant warming and moderate rainfall increase, but distance from raw materials may hinder development.

- G4 (very hot, humid) has the highest WBGT levels and minimal temperature rise, but high humidity intensifies perceived heat, necessitating advanced cooling systems.

- G5 (temperate, moderate rainfall) offers favorable conditions for expansion, though warming trends must be considered.

- G6 and G8 (cold, high rainfall) face rising temperatures and declining precipitation, with ecological sensitivity limiting industrial suitability.

- G7 (temperate, high rainfall), though currently underutilized, may become attractive for future development due to moderate climate and water availability.

Overall, climate-adaptive strategies—including thermal risk mitigation, sustainable water use, and geographic reallocation—are essential to safeguard worker health and ensure long-term resilience of Iran's steel industry.

تحلیل تاثیر تغییرات اقلیمی بر میزان استرس گرمایی شاغلین صنایع فولادی کشور

مصطفی جعفری زاوه^{۱،*}، علی جعفری^۱، مهدی جعفری ندوشن^{۲،۱}، فاطمه چمبری^۳، فریده گلبابایی^۴

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

^۲گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گناباد، گناباد، ایران

^۳مرکز تحقیقات بیماری‌های ناشی از صنعت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران

^۴گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳

چکیده

مقدمه: تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های مهم جهانی است که تأثیرات قابل توجهی بر شاخص WBGT (شاخص دمای تر گوی سان) و استرس گرمایی کارکنان صنایع فولاد دارد. این پژوهش به طور خاص بر ارزیابی تأثیر موقعیت جغرافیایی و تغییرات اقلیمی بر میزان مواجهه با استرس گرمایی در صنایع فولاد ایران متمرکز شده است.

روش کار: این مطالعه کیفی-تحلیلی با بهره‌گیری از داده‌های سامانه صبا و اطلس استرس گرمایی شغلی ایران انجام شد. در مرحله نخست، فهرست صنایع فولاد کشور، پراکندگی جغرافیایی، و ظرفیت تولید آن‌ها در هشت اقلیم مختلف ایران استخراج گردید. سپس، نتایج اندازه‌گیری شاخص WBGT به‌عنوان شاخص مواجهه با استرس گرمایی در صنایع فولاد، با همکاری واحدهای صنعتی واقع در اقلیم‌های مختلف جمع‌آوری شد. برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای ArcGIS و SPSS استفاده گردید. همچنین، تأثیر تغییرات اقلیمی در سه افق زمانی ۲۰۴۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰ بر استرس گرمایی شاغلین صنایع فولادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج این مطالعه نشان دادند که اقلیم G۱ (شرق، جنوب شرقی و کویری ایران) و G۴ (حاشیه خلیج فارس شامل استانهای هرمزگان، بوشهر، فارس و خوزستان) با بیشترین ظرفیت تولید فولاد کشور، در معرض بالاترین میزان مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) و کمبود منابع آبی قرار دارند. شاخص WBGT در اقلیم G۴ و G۶ (استان گیلان) بالاتر از حد مجاز بوده و در مقابل، اقلیم‌های G۲ (شمال خراسان رضوی، خراسان شمالی، تهران، البرز، قزوین، همدان، مرکزی و چهارمحال بختیاری)، G۵ (کردستان، کرمانشاه، لرستان) و G۷ (ایلام، کهگیلویه و بویراحمد) کمترین میزان شاخص WBGT را نشان دادند. با توجه به احتمال افزایش دما طبق پیش‌بینی‌های اقلیمی در سه افق زمانی ۲۰۴۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰ و ضریب همبستگی قابل قبول بدست آمده (۰/۴۰) بین دمای روز سالیانه و شاخص WBGT هر اقلیم، تغییرات دمای پیش‌بینی شده می‌تواند منجر به افزایش شاخص WBGT بویژه در اقلیم‌های G۶، G۳ و G۸ شود.

نتیجه‌گیری: با توجه به پیش‌بینی‌های اقلیمی و الگوی پراکندگی صنایع، توسعه سیاست‌های اقلیم‌محور، مدیریت پایدار منابع آبی، و بازنگری در مکان‌یابی واحدهای صنعتی فولاد ضروری است. این اقدامات می‌توانند تاب‌آوری صنعت فولاد ایران را در برابر تغییرات اقلیمی آینده افزایش داده و از مخاطرات سلامت شغلی و زیست‌محیطی بکاهند.

کلمات کلیدی: تغییرات اقلیمی، صنایع فولاد، استرس گرمایی، شاخص WBGT

مقدمه

براساس تعریف کنوانسیون چارچوب تغییر اقلیم در سازمان ملل^۱ "تغییر اقلیم تغییری است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم به فعالیتهای انسانی نسبت داده میشود که ترکیب جو جهانی را تغییر میدهند و فراتر از تغییرات آب و هوایی طبیعی مشاهده شده در دوره های زمانی قابل مقایسه میباشد"^(۱). بی شک، استرس گرمایی شغلی با تغییرات اقلیمی مرتبط بوده و افزایش دمای جهانی منجر به افزایش مواجهه با گرما در محیط کار میشود^(۲). تغییرات اقلیمی ایران نیز یک روند عمومی گرمایش را به همراه تغییرات اقلیمی موثر بر شدت تغییرات آب و هوا، الگوهای بارش و شیوههای مدیریت زیست محیطی نشان می دهد^(۳). شواهد نشان میدهند که تغییرات اقلیمی در ایران با چالش های سلامتی مختلفی ناشی از افزایش دما، کاهش کیفیت هوا و همچنین بیماری های منتقله از غذا، آب و ناقلین و تبعات سلامت روان و رفاه همراه است^(۴). مطالعه ای نیز در شهر تهران نشان داد که به تناسب گرمایش جهانی، مواجهه افراد با تنش های حرارتی افزایش یافته است^(۵).

استرس های گرمایی به دلیل اثرات مضر آن بر سلامت، ایمنی و بهره وری کارگران، یک نگرانی حیاتی است که به نوبه خود می تواند تاثیر قابل توجهی بر رفاه اقتصادی سازمان نیز بگذارد^(۶). استرس گرمایی می تواند منجر به طیف وسیعی از مشکلات سلامتی از جمله بثورات پوستی، کم آبی بدن و سنکوپ گرمایی شود و با کاهش ظرفیت کار فیزیکی و افزایش غیبت، زیان های مالی و کاهش بهره وری را به دنبال داشته باشد^(۷). استرس گرمایی شغلی در مناطقی با گرمای بالا به ویژه در کشورهای با آب و هوای گرم و خشک تشدید میشوند. در چنین مناطقی علاوه بر دمای هوا، تابش خورشیدی نیز مستقیماً بر عوارض ناشی از گرما تاثیرگذار است^(۸,۹). جالب توجه است که ساکنان مناطق گرم و خشک در مقایسه با مناطق گرم و مرطوب از تحمل گرمایی بالاتری برخوردارند^(۱۰). از سوی دیگر، تحلیلهای اقتصادی نشان میدهد که کشورهای با

آب و هوای گرمتر، که اغلب کشورهای با درآمد پایین و متوسط نیز هستند، به دلیل کاهش بهره وری نیروی کار، زیانهای اقتصادی بیشتری را به لحاظ کاهش تولید ناخالص داخلی^۲ تجربه میکنند^(۱۱,۱۲). شدت و مدت زمان مواجهه با استرس حرارتی بسته به نوع فعالیت شغلی و فرآیندهای صنعتی متغیر است. کارگران مشاغل فضای باز همچون کارهای ساختمانی و کشاورزی، به علت عدم برخورداری از فضای مسقف در معرض نور مستقیم قرار گرفته و عموماً درگیر فعالیتهای بدنی سنگین تری نیز میباشند که افزایش مواجهه با استرسهای حرارتی را به دنبال دارد^(۱۳). صنایع مانند صنایع فلزی، شیشه، سرامیک و غیره، فارغ از باز یا بسته بودن فضای کار، شامل فرآیندهای گرم و داغی میباشند که شاغلان آنها را در معرض استرسهای حرارتی بالا قرار میدهد^(۱۴).

آهن و فولاد، موادی ضروری هستند که به دلیل استفاده گسترده در فعالیتهای مختلف انسانی، نقش تعیین کننده ای دارند. در واقع صنایع فولادی، جهت رشد تکنولوژی و توسعه جوامع یک بخش حیاتی محسوب میشوند^(۱۵). این مواد جزء لاینفک زندگی روزمره هستند و به طور قابل توجهی به پیشرفت و کیفیت زندگی انسان کمک میکنند^(۱۶). پیشبینی میشود تقاضای جهانی برای فولاد تا سال ۲۰۵۰ به میزان قابل توجهی افزایش یابد که بر نقش اساسی آهن و فولاد در تامین نیازهای مختلف تاکید دارد^(۱۷). از سوی دیگر صنعت فولاد به عنوان یکی از صنایع فلزات اولیه، تأثیر قابل توجهی بر محیط زیست، بازار کار، اقتصاد و تقاضای انرژی و آب دارد^(۱۸). طبق مطالعات صورت گرفته در زمان بهره برداری از کارخانه فولاد، فعالیت هایی شامل فرایند احتراق، برداشت از منابع آب زیر زمینی، حمل و نقل مواد اولیه و دفع پسماندها، بر کیفیت هوا، کمیت منابع آب زیرزمینی، تراز صدا، و ویژگی های خاک منطقه تاثیر گذار بوده، در محیط بیولوژیکی و اکولوژی مهمترین اثر منفی خروج گازهای ناشی از احتراق، بر کیفیت زیستگاه های منطقه و پوشش

2. Gross domestic product (GDP)

1. United Nations' Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

گیاهی وارد خواهد شد (۱۹). قابل ذکر است که در بین فرایندهای مختلف شرکت فولاد، فرایند فولادسازی بیشترین تاثیر زیست محیطی را به خود اختصاص داده است. همچنین فرایند تولید گاز کوره کک می تواند بیشترین تاثیرات منفی بر روی تغییرات آب و هوایی داشته باشد (۲۰).

کشور ایران نیز با تولید تقریباً یک درصد از فولاد جهان در رده بیستمین تولیدکننده فولاد دنیا قرار دارد (۲۱) بخش تولید فولاد و محصولات فولادی نمونه بارزی از صنایع است که استرسهای گرمایی در آن به دلیل استفاده ذاتی از فرایندهای حرارتی، خطر شغلی قابل توجهی را ایجاد میکند (۲۲).

با توجه به گستردگی صنایع فولاد در ایران و پراکندگی آنها در اقلیم های متنوع کشور، نیروی کار شاغل در این صنعت در معرض سطوح مختلفی از استرس گرمایی قرار دارد. از آنجاکه ماهیت این صنایع باعث ایجاد تنش های حرارتی قابل توجهی میشود، این مطالعه با هدف بررسی میزان استرس گرمایی شاغلان این صنایع در اقلیم های مختلف، تحلیل تاثیر موقعیت جغرافیایی و تغییرات اقلیمی آینده بر شدت استرس های گرمایی انجام گرفت تا بتوان از نتایج آن در تصمیم گیری های مدیریتی و اجرایی به منظور کنترل استرس های گرمایی استفاده نمود.

روش کار

مطالعه حاضر یک پژوهش کیفی-تحلیلی است که در سال ۱۴۰۳ با هدف تأثیر تغییرات اقلیمی بر استرس گرمایی شاغلان صنایع فولاد و آهن، با طی مراحل زیر انجام شد:

۱. طبقه بندی اقلیمی ایران

طبقه بندی اقلیمی جغرافیای ایران براساس مدل پیشنهادی Asadollah و همکاران (۲۳) صورت گرفت. این مدل، ایران را به هشت منطقه اقلیمی متمایز بر اساس دما و میزان بارش تقسیم بندی می کند.

۲. بررسی پراکندگی موقعیت و ظرفیت تولید صنایع فولادی در اقلیم های مختلف ایران

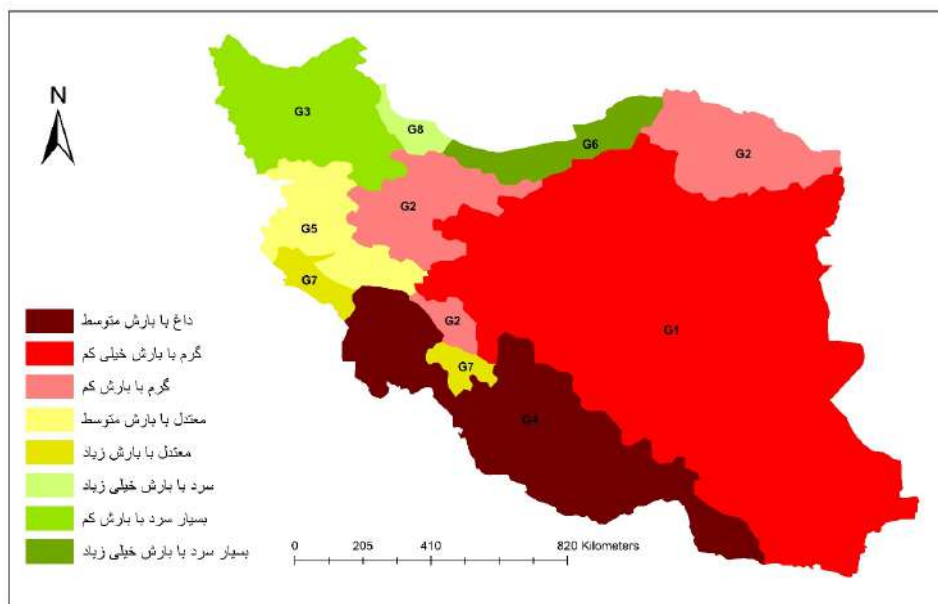
داده های مربوط به موقعیت جغرافیایی، ظرفیت تولید و تعداد واحدهای صنعتی در حوزه فولاد و آهن از پایگاه داده سامانه صبا (صنایع بالا دستی ایران) و اطلس استرس گرمایی شغلی ایران (۲۴) استخراج گردید. سپس، با استفاده از نرم افزار ArcGIS نسخه ۱۰.۵، موقعیت مکانی و ظرفیت تولید این صنایع بر روی نقشه های اقلیمی ایران جانمایی و پراکندگی آن ها ترسیم شد.

۳. بررسی تاثیر موقعیت جغرافیایی بر میزان استرس گرمایی در صنایع فولاد

به منظور ارزیابی میزان استرس گرمایی شاغلان در صنایع فولاد و آهن، از داده های شاخص WBGT که به صورت سالانه اندازه گیری و ثبت شده بود، استفاده گردید. این داده ها، که منعکس کننده شرایط واقعی محیط کار و مواجهه کارکنان با عوامل گرمازا هستند، از واحدهای صنعتی واقع در اقلیم های گوناگون کشور گردآوری شدند و با استفاده از نرم افزار ArcGIS نسخه ۱۰.۵، داده های WBGT با موقعیت جغرافیایی صنایع در اقلیم های مختلف تطبیق داده شد تا ارتباط بین اقلیم و سطوح استرس گرمایی مشخص گردد و سپس مناطق اقلیمی را براساس میانگین شاخص WBGT به سه ناحیه پایین تر از حدود مجاز (A)؛ در حدود مجاز (B) و بالاتر از حدود مجاز (C) تقسیم بندی گردید.

۴. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر استرس گرمایی کارکنان صنعت فولاد

پیش بینی تغییرات اقلیمی در سه بازه زمانی آینده، شامل سال های ۲۰۴۰ (آینده نزدیک)، ۲۰۶۰ (آینده میانی) و ۲۰۸۰ (آینده دور)، با استفاده از مدل های اقلیمی Asadollah و همکاران (۲۳) صورت گرفت. این مدل ها، تغییرات احتمالی در پارامترهای کلیدی اقلیمی مانند دما و بارش را پیش بینی می کنند. هدف اصلی این بخش، تحلیل



شکل ۱: نقشه طبقه بندی اقلیمی ایران

Asadollah و همکاران (۲۳)، ایران دارای تنوع اقلیمی گسترده‌ای است که از مناطق بسیار سرد و پربارش تا مناطق گرم با بارش خیلی کم را شامل می‌شود. این تنوع اقلیمی، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان استرس گرمایی وارد شده به کارکنان صنایع مختلف داشته باشد. (شکل ۱). اقلیم G1 (گرم با بارش خیلی کم) ۵۳/۱٪ از مساحت ایران را در برمیگیرد که بزرگترین اقلیم در ایران محسوب می‌شود که شامل استان‌های خراسان جنوبی، قسمت جنوبی خراسان رضوی، یزد، کرمان، اصفهان، سمنان، قم و سیستان و بلوچستان با میانگین حداکثر دمای سالانه ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد و کمترین میزان بارش است. در مقابل، گرم‌ترین ناحیه، اقلیم G4 (داغ با بارش متوسط) با ۱۶/۷٪ از مساحت ایران در حاشیه خلیج فارس واقع شده که شامل استان‌های هرمزگان، فارس، بوشهر و خوزستان است. این اقلیم دارای میانگین حداکثر دمای سالیانه ۲۶/۲۷ درجه سانتی‌گراد است. سردترین مناطق، اقلیم G3 (بسیار سرد با بارش کم) و G6 (بسیار سرد با بارش خیلی زیاد) در مجموعه ۱۰/۸٪ از مساحت ایران در بخش‌های شمال غربی و شمالی کشور قرار دارند که در برگیرنده استان‌های آذربایجان غربی و

این تغییرات پیش بینی شده و ارزیابی تأثیر بالقوه آن‌ها بر سطوح استرس گرمایی کارکنان شاغل در صنایع فولاد و آهن در مناطق جغرافیایی مختلف ایران است.

روش‌های تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزارهای مختلف به شرح زیر انجام شد:

- Google Earth: برای تعیین دقیق مختصات جغرافیایی واحدهای صنعتی.
- ArcGIS نسخه ۱۰/۵: برای جانمایی و ترسیم نقشه‌های پراکندگی صنایع و اقلیم‌ها.
- SPSS نسخه ۲۱: برای انجام تحلیل‌های آماری آزمون‌های آماری به کار رفته شامل آزمون کروسکال والیس، آزمون من ویتنی، آزمون اسپیرمن و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) بود. سطح معناداری نیز ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

طبقه بندی اقلیمی ایران

براساس طبقه‌بندی اقلیمی ارائه شده توسط

جدول ۱: مشخصات هر اقلیم

اقلیم	استان	آب و هوا	درصد مساحت هر اقلیم	میانگین دما سالانه (°C)	میانگین بارش سالانه (mm)
G1	سمنان؛ قم؛ اصفهان؛ یزد؛ کرمان؛ سیستان؛ جنوب خراسان رضوی؛ خراسان جنوبی	گرم با بارش خیلی کم	۵۲/۱	۲۴/۲	۱۴۲/۰۴
G2	شمال خراسان رضوی؛ خراسان شمالی؛ تهران؛ البرز؛ قزوین؛ همدان؛ مرکزی؛ چهارمحال بختیاری	گرم با بارش کم	۱۱/۶	۲۳/۳۹	۲۳۰/۲۲
G3	آذربایجان غربی و شرقی؛ اردبیل؛ زنجان	بسیار سرد با بارش کم	۷/۸	۱۹/۲۹	۲۳۶/۳۹
G4	فارس؛ هرمزگان؛ بوشهر؛ خوزستان	داغ با بارش متوسط	۱۶/۷	۲۶/۲۷	۳۱۷/۹۶
G5	کردستان؛ کرمانشاه؛ لرستان	معتدل با بارش متوسط	۴/۸	۲۲/۵۴	۳۴۶/۱۲
G6	مازندران؛ گلستان	بسیار سرد با بارش خیلی زیاد	۳	۱۹/۹۱	۱۱۸۵/۵۶
G7	ایلام؛ کهگیلویه و بویراحمد	معتدل با بارش زیاد	۲/۱	۲۲/۸۸	۸۰۹/۹۴
G8	گیلان	سرد با بارش زیاد	۰/۹	۲۰/۹۲	۱۲۶۴/۲۷

است. همچنین، بر اساس داده های بدست آمده از پایگاه داده سامانه صبا احداث صنایع تولید آهن اسفنجی و فولادسازی با سرعت بیشتری نسبت به سایر بخش های صنعت آهن و فولاد در ایران توسعه خواهد یافت (شکل ۲).

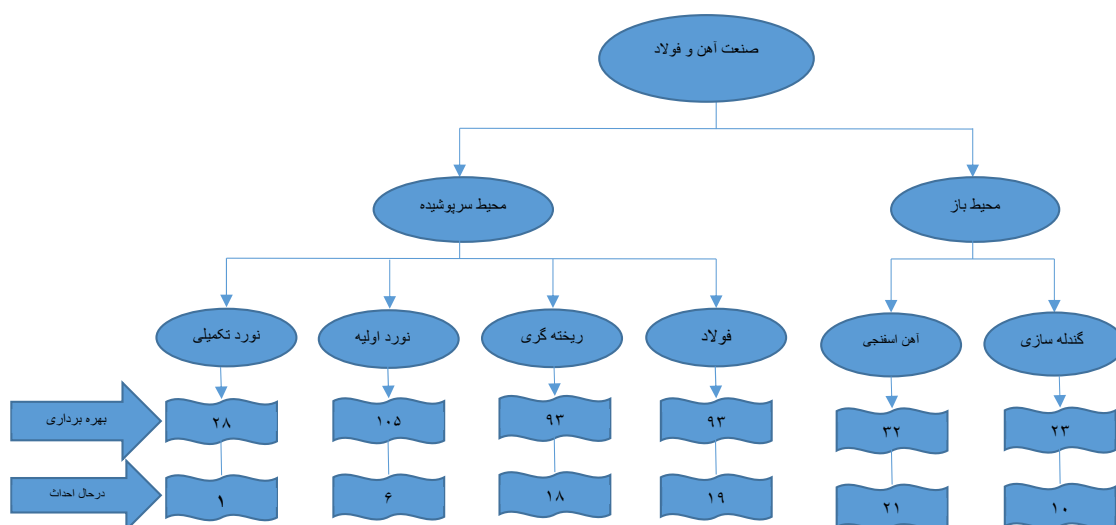
نتایج بررسی پراکندگی و ظرفیت تولید صنایع در اقلیم های مختلف (شکل ۳) نشان می دهد که از نظر تعداد واحدهای صنعتی، بیشترین صنایع در حال بهره برداری در قسمت های مرکزی کشور شامل استان های اصفهان و مرکزی قرار دارند که مناطق اقلیم G1 و G2 (گرم با بارش کم) را در بر می گیرند. در مقابل، در اقلیم های G6 و G7 (معتدل با بارش زیاد) که در استان های کهگیلویه و بویراحمد، ایلام، گیلان، مازندران و گلستان واقع شده اند، تعداد واحدهای صنعتی فولاد به طور محسوسی کمتر است. با مقایسه نقشه های الف و ب در شکل ۳، تفاوت تعداد صنایع در حال احداث و در حال بهره برداری به وضوح مشخص می شود که نشان دهنده ادامه توسعه واحدهای فولاد در اقلیم G1 است.

از نظر ظرفیت تولید، بیشترین ظرفیت تولید فولاد در ایران در اقلیم های G1 (استان های کرمان، خراسان جنوبی و یزد)، G4 (استان های خوزستان و فارس) و G2 (استان های مرکزی و خراسان رضوی) متمرکز شده است، که به ترتیب ۵۹ درصد، ۱۹ درصد و ۱۱ درصد از ظرفیت

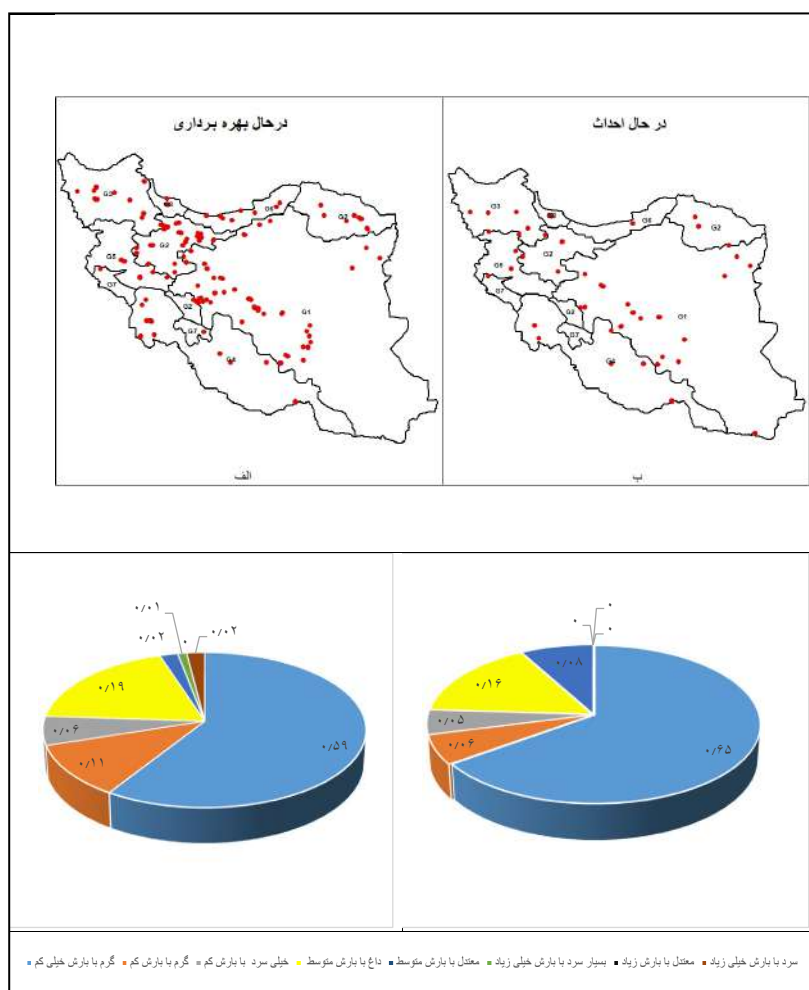
شرقی، اردبیل، زنجان، گلستان و مازندران می باشند. همچنین پربارترین نواحی، اقلیم های G6 و G8 (سرد با بارش زیاد) در نواحی شمالی در استان های گیلان، مازندران و گلستان واقع شده است (جدول ۱).

بررسی پراکندگی و ظرفیت تولید صنایع در اقلیم های مختلف

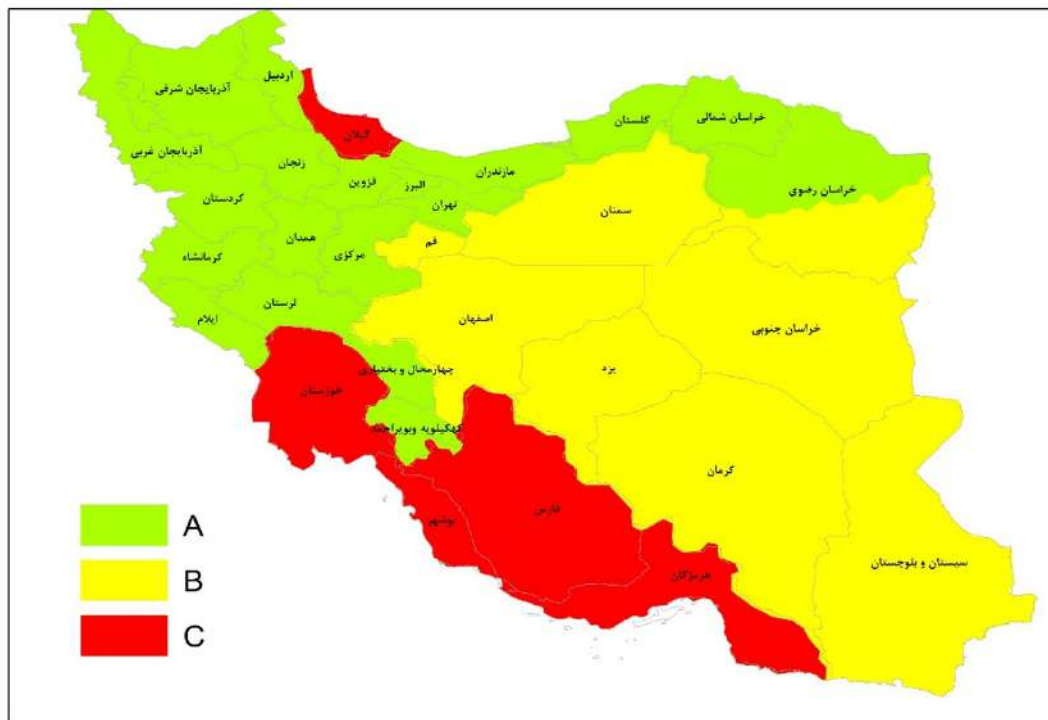
در مطالعه حاضر، فرآیندهای مختلف در صنعت آهن و فولاد بر اساس موقعیت منبع گرما (محیط باز یا بسته) و نوع عملیات بررسی شد. این دسته بندی بر اساس محیط انجام فرآیند، می تواند تأثیر مستقیمی بر میزان مواجهه کارگران با گرما و سایر عوامل زیان آور داشته باشد. فرآیندهایی که در محیط سرپوشیده قرار دارند شامل ریخته گری، فولادسازی، نورد اولیه و نورد تکمیلی هستند، در حالی که فرآیندهای گندله سازی و آهن اسفنجی در محیط باز انجام می شوند. نتایج نشان می دهد که بیشترین تعداد واحدهای صنعتی در بخش نورد اولیه قرار دارد (۱۰۵ واحد). این امر ممکن است به دلیل سادگی نسبی فرآیند نورد اولیه و سرمایه گذاری کمتر مورد نیاز برای راه اندازی این واحدها باشد. شایان ذکر است که در تمامی صنایعی که عملیات فولادسازی انجام می شود، بخش ریخته گری نیز وجود دارد که نشان دهنده یکپارچگی این دو فرآیند



شکل ۲: روند توسعه بخش های مختلف صنعت آهن و فولاد در ایران



شکل ۳: پراکندگی و ظرفیت تولید صنایع در اقلیم های مختلف



شکل ۴: تقسیم بندی ایران براساس شاخص WBGT

از توزیع نرمال تبعیت نمیکند اختلاف میزان WBGT در اقلیم های مختلف با استفاده از آزمون کروسکال والیس انجام شد که مقدار P-value برابر با ۰/۰۰۰۱ می باشد این نشان می دهد که میزان WBGT در اقلیم های مختلف با یکدیگر اختلاف معناداری دارد . سپس با بررسی اختلاف میزان WBGT در اقلیم های مختلف بصورت دو به دو مشخص شد تعدادی از اقلیم ها با یکدیگر اختلاف معنا دار و در تعداد اختلاف معناداری مشاهده نمی شود در نتیجه مناطق اقلیمی را براساس میانگین شاخص WBGT به سه ناحیه A ؛ B و C تقسیم بندی شد.(شکل ۴).

نتایج آزمون من ویتنی در جدول ۲ نشان میدهد که میانگین WBGT در سه ناحیه A، B و C با یکدیگر اختلاف معناداری دارد

ناحیه A: مواجهه شاغلین با استرس گرمایی (WBGT) در این ناحیه که به لحاظ اقلیمی در اقلیم های G2, G3, G5, G6, G7 قرار گرفته و شامل مناطق شمال شرق،

تولید فولاد کشور را در بر می گیرند. در مقابل، کمترین ظرفیت تولید صنایع فولادی متعلق به اقلیم های G6 و G7 است که دارای آب و هوای معتدل و سرد با بارش زیاد می باشند. قابل ذکر است که ظرفیت تولید در حال احداث به ترتیب در اقلیم های G4 ، G1 و G5 (معتدل با بارش متوسط) ۶۵٪، ۱۶٪ و ۶٪ قرار دارد. این یافته ها نشان می دهد که توسعه صنایع فولاد در ایران بیشتر در مناطق گرم و خشک متمرکز بوده و این موضوع می تواند چالش هایی را از نظر استرس گرمایی، مصرف آب و انرژی در این مناطق ایجاد کند.

بررسی تاثیر موقعیت جغرافیایی بر میزان مواجهه با استرس گرمایی در صنایع فولاد:

در این مطالعه، میزان مواجهه شاغلین با استرس گرمایی بر اساس شاخص WBGT در صنایع آهن و فولاد واقع در اقلیم های مختلف کشور مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به انجام آزمون K-S داده های WBGT

جدول ۲: نتایج آزمون من-ویتنی

		P-value	Test
A	B	۰/۰۰۹	Mann-Whitney
	C	۰/۰۰۰۱	Mann-Whitney
B	A	۰/۰۰۹	Mann-Whitney
	C	۰/۰۰۶	Mann-Whitney
C	A	۰/۰۰۰۱	Mann-Whitney
	B	۰/۰۰۶	Mann-Whitney

جدول ۳: نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین دمای محیط و شاخص WBGT

WBGT	temperature	Correlation Coefficient	
		P-value	۰/۴۰۲
		N	۱۴۹

وابستگی مشاهده شده تأکیدی بر نقش تعیین کننده شرایط اقلیمی در بار گرمایی وارده بر نیروی انسانی دارد. یافته ها نشان داد که شاغلین صنایع فولادی واقع در مناطق ساحلی، به ویژه نواحی مجاور خلیج فارس، به دلیل هم زمانی دمای بالا و رطوبت نسبی زیاد، بیشترین میزان مواجهه با استرس گرمایی را بر اساس شاخص WBGT اندازه گیری شده دارند. پس از آن، شاغلین صنایع فولادی در مناطق کویری شامل استان های سمنان، اصفهان، خراسان جنوبی، یزد، قم، سیستان و بلوچستان و کرمان نیز در معرض سطوح قابل توجهی از بار گرمایی قرار دارند. در مقابل، کمترین میزان مواجهه با استرس گرمایی در میان شاغلین صنایع فولادی مربوط به استان های سردسیر و معتدل از جمله خراسان رضوی، خراسان شمالی، البرز، گلستان، چهارمحال و بختیاری، لرستان و سایر مناطق مشابه گزارش شده است. این الگوی توزیع مکانی شاخص WBGT به وضوح نقش تعیین کننده موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی را در میزان بار گرمایی وارده بر نیروی انسانی در صنایع فولاد تأیید می کند.

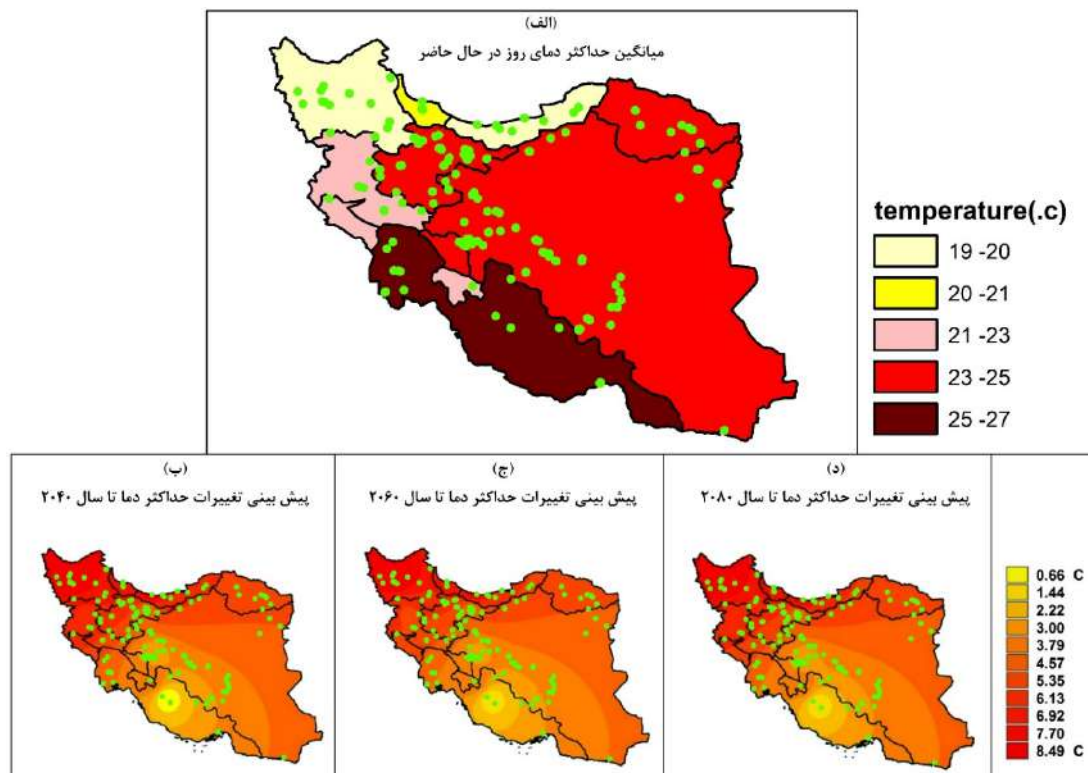
نتایج حاصل، ضرورت اتخاذ رویکردهای منطقه محور در مدیریت ریسک حرارتی، طراحی اقدامات کنترلی متناسب با اقلیم، و ارتقاء ایمنی شغلی در محیط های صنعتی را برجسته می سازد.

شمال غرب و غرب کشور ایران است برابر با میانگین و انحراف $25/15 \pm 5/5$ درجه سانتی گراد می باشد.

ناحیه B: مواجهه شاغلین با استرس گرمایی (WBGT) در این ناحیه که به لحاظ اقلیمی در اقلیم G1 قرار گرفته و شامل مناطق شرق، جنوب شرقی و کویری ایران است برابر با میانگین و انحراف معیار $28/86 \pm 4/96$ درجه سانتی گراد می باشد.

ناحیه C: مواجهه شاغلین با استرس گرمایی (WBGT) در این ناحیه که به لحاظ اقلیمی در اقلیم های G4 قرار گرفته و شامل حاشیه خلیج فارس و غرب دریای مازندران است برابر با $31/8 \pm 4/2$ درجه سانتی گراد می باشد.

علاوه بر این، نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن در جدول ۳ نشان داد که بین دمای هوای محیط در اقلیم های مختلف و میزان مواجهه شاغلین با استرس گرمایی، بر مبنای شاخص WBGT، رابطه ای مثبت و از نظر آماری معنادار وجود دارد. این یافته ها نشان می دهند که تغییرات دمایی ناشی از تفاوت های اقلیمی می توانند به طور قابل توجهی بر سطح استرس گرمایی تجربه شده توسط کارکنان در محیط های صنعتی تأثیرگذار باشند. با توجه به ماهیت ترکیبی شاخص WBGT که شامل دمای خشک، رطوبت نسبی، دمای تابشی و جریان هوا است،



شکل ۵: توزیع صنایع فولادی در نقشه میانگین حداکثر دمای روز سالیانه در حال حاضر و پیش بینی تغییرات آن در سالهای ۲۰۴۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰

۳ تا ۴ درجه سانتی گراد نشان می‌دهند. همچنین در مناطقی که حدود ۸۰٪ صنایع فولاد کشور در آن واقع شده‌اند یعنی اقلیم‌های G1 و G2 میزان افزایش دما برای سال‌های آینده بین ۳ تا ۵ درجه سانتی گراد پیش‌بینی شده است.

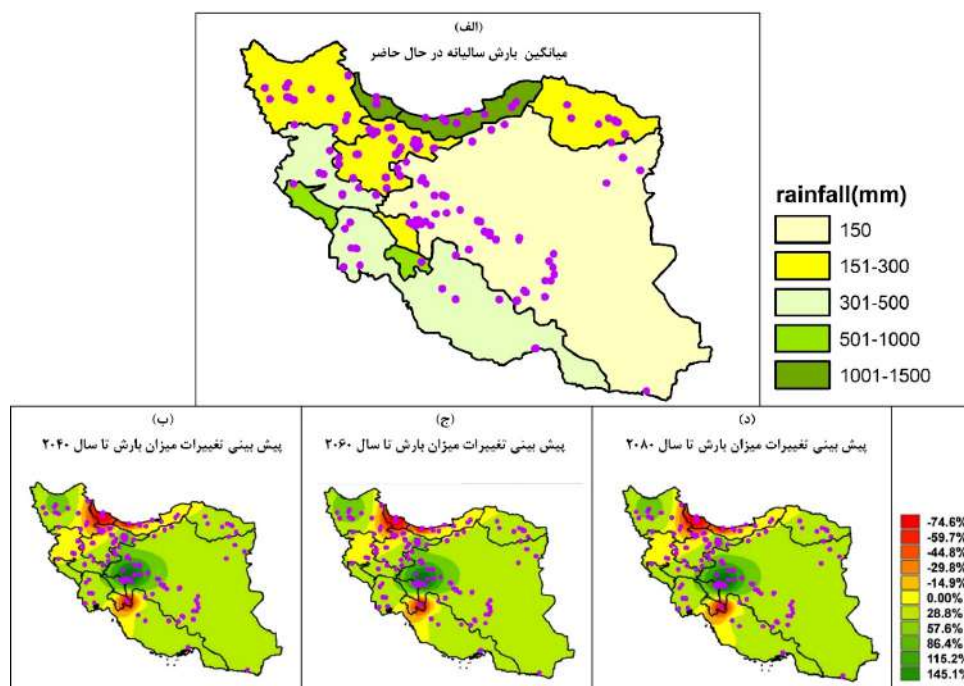
از سوی دیگر، مناطق شمالی و شمال غربی کشور که در حال حاضر دارای میانگین حداکثر دمای روزانه سالیانه بین ۱۹ تا ۲۱ درجه سانتی گراد هستند، در آینده با بیشترین افزایش دما مواجه خواهند شد (۷ تا ۸ درجه سانتی گراد). این مناطق شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان، گیلان، مازندران و گلستان هستند.

در مجموع، مناطق جنوبی حاشیه خلیج فارس و نواحی کویری که هم‌اکنون دمای بالایی دارند، با افزایش دمایی در حدود ۳ تا ۴ درجه سانتی گراد در آینده مواجه خواهند شد. قابل ذکر است که این الگوی تغییرات دمایی

پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر صنایع فولادی

بر اساس داده‌های آب‌وهوایی فعلی، تمرکز عمده صنایع فولادی ایران از نظر تعداد واحدها و ظرفیت تولید در مناطقی با دمای بالا قرار دارد. شکل ۵ (الف) هشت ناحیه اقلیمی را بر اساس بازه‌های حداکثر دمای روز سالیانه با کدهای رنگی نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که اغلب صنایع فولادی در مناطقی با دمای ۲۳ تا ۲۷ درجه سانتی گراد پراکنده شده‌اند.

شکل‌های ۵ (ب، ج، د) همین پراکندگی را در نقشه‌های پیش‌بینی تغییرات دمایی در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۸۰) را نشان می‌دهند. این پیش‌بینی‌ها حاکی از آن‌اند که نواحی جنوبی کشور، به‌ویژه جنوب غربی، کمترین میزان افزایش دما را تجربه خواهند کرد (۰.۶۶ تا ۲ درجه سانتی گراد). این مناطق عمدتاً در اقلیم G4 قرار دارند. در مقابل، مناطق G5 و G7 افزایش دمایی در حدود



شکل ۶: توزیع صنایع فولادی در نقشه میانگین بارش سالیانه در حال حاضر و پیش بینی تغییرات آن در سالهای ۲۰۴۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰

در مقابل، منطقه اقلیمی G5 هیچ گونه تغییر قابل توجهی در میزان بارش نشان نمیدهد. همچنین، مناطق اقلیمی G6 و G8 که در حال حاضر پر بارش ترین نواحی کشور محسوب میشوند، با بیشترین کاهش میانگین بارش سالیانه مواجه خواهند بود. به طور مشخص، در اقلیم G8 کاهش حدود ۷۴٪ و در بخشی از منطقه اقلیم G4 کاهش حدود ۳۰٪ پیش بینی شده است. بر اساس این نتایج، انتظار می رود در سال های آینده از شدت مشکلات مربوط به کمبود منابع آبی در استان های اصفهان، یزد، خراسان رضوی، آذربایجان شرقی و غربی، اردبیل، اراک و تهران کاسته شود. ولی همچنان مشکلات کم آبی در این مناطق وجود خواهد داشت .

پیش بینی تغییرات مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) در نواحی اقلیمی مختلف ایران
بر اساس پیش بینی های اقلیمی (جدول ۴)، کلیه استان های کشور در سال های آینده با افزایش دما مواجه خواهند شد. مطابق نتایج حاصل از اندازه گیری

برای بازه های زمانی آینده میانی (۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۸۰) نیز معتبر است و تفاوت قابل توجهی نسبت به پیش بینی های سال ۲۰۴۰ مشاهده نمی شود. یکی از مهم ترین نیازهای صنعت فولاد، دسترسی مناسب به منابع آب است. در حال حاضر، بخش عمده ای از مساحت ایران از نظر بارش و منابع آبی، در دسته مناطق کم باران قرار می گیرد. پراکندگی صنایع فولادی در اقلیم های مختلف به گونه ای است که می توان گفت اکثر واحدهای صنعتی در مناطقی با میانگین بارش سالیانه کمتر از ۳۰۰ میلی متر مستقر هستند (شکل ۶: الف).

با این حال، براساس پیش بینی های اقلیمی برای سال های ۲۰۴۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰، این مناطق در مقایسه با سایر نواحی کشور، افزایش بارش بیشتری را تجربه خواهند کرد. شکل های ۶ (ب، ج، د) مقدار افزایش میانگین بارش سالیانه را در بازه های ۲۰ ساله آینده نمایش می دهند. بیشترین افزایش، با مقدار ۱۴۵٪، در نواحی مرکزی کشور واقع در اقلیم G1 پیش بینی شده است.

جدول ۴: پیش بینی تغییرات دما و میزان بارش در اقلیم های مختلف

اقلیم	پیش بینی تغییرات دما (درجه سانتی گراد)	پیش بینی تغییرات میزان بارش (%)
G1	۳ تا ۴	۵۰ تا ۱۴۴٪
G2	۴ تا ۵	۱۰ تا ۳۰٪
G3	۷ تا ۸	۲۰ تا ۵۰٪
G4	۶ تا ۲۰	۳۰ تا ۵۰٪
G5	۵ تا ۴	۲۰ تا ۵۰٪
G6	۵ تا ۶/۵	۰ تا ۳۰٪
G7	۳ تا ۴	۲۰ تا ۱۰٪
G8	۶ تا ۷	۲۰ تا ۷۵٪

بحث

صنعت آهن و فولاد یکی از صنایع کلیدی ایران محسوب می شود که کارگران آن با عوامل زیان آور شغلی متعددی، از جمله استرس های گرمایی، مواجه هستند. مواجهه با گرما می تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت افراد ایجاد کند؛ از جمله گرمزدگی، اختلالات مزمن است همچنین تحقیقات نشان می دهد که مواجهه با گرما می تواند بر روی کیفیت مایع منی اثرات منفی ایجاد کند (۲۵).

نتایج این مطالعه نشان می دهد که کشور ایران از نظر مواجهه شاغلین صنایع فولاد با استرس گرمایی (براساس شاخص WBGT) به سه ناحیه A، B و C قابل تقسیم است. ناحیه A در محدوده مجاز، ناحیه B زیر حد مجاز، و ناحیه C بالاتر از حد مجاز قرار دارد. با توجه به تمرکز بیشتر صنایع فولاد در نواحی A (شرق، جنوب شرق و مناطق کویری و C (حاشیه خلیج فارس و دریای مازندران)، شاغلین این مناطق در معرض بیشترین سطح استرس حرارتی قرار دارند. این یافته با مطالعات حمه رضایی و همکاران (۲۶)، منظم و همکاران (۲۷)، و قنبری و همکاران (۲۸) همخوانی دارد.

مطابق نتایج، صنایع فولادی در ایران عمدتاً در اقلیم های گرم و داغ (G1، G2، G4) مستقر هستند. مطالعه مهدوی و همکاران نیز میانگین شاخص WBGT

استرس گرمایی براساس شاخص WBGT، ناحیه C شامل استان های هرمزگان، بوشهر، خوزستان، فارس و گیلان، بالاترین میزان مواجهه شاغلین با استرس گرمایی در صنایع فولاد را به خود اختصاص داده است. با توجه به همبستگی ۴۰٪ میان شاخص WBGT و دمای هوای محیط، انتظار می رود در سال های آینده و با افزایش دما در این مناطق، میزان مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) در ناحیه C در اقلیم G8 به طور چشم گیری افزایش یابد و از حد مجاز فراتر رود.

در ناحیه A نیز، با توجه به روند افزایشی دما، افزایش مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) پیش بینی می شود، اما این افزایش نسبت به ناحیه C کمتر بوده و در محدوده ای نزدیک به حد مجاز قرار خواهد گرفت. همچنین ناحیه B که در حال حاضر کمترین میزان مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) را دارد، در برخی از مناطق اقلیمی خود از جمله اقلیم های G6 و G3 شامل استان های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، مازندران و گلستان افزایش قابل توجهی در دمای هوا و به تبع آن در میزان مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) را تجربه خواهد کرد.

در مقابل، پیش بینی می شود اقلیم های G2، G5 و G7 در سال های آینده کمترین میزان مواجهه با استرس گرمایی (شاخص WBGT) را به خود اختصاص دهند.

در گرم‌ترین فصل سال را حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده است (۲۹)، که تأییدی بر تأثیر اقلیم و موقعیت جغرافیایی بر سلامت شغلی کارکنان است.

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از چالش‌های جهانی، موجب افزایش دمای متوسط در تمامی مناطق خواهد شد. با توجه به همبستگی ۴۰٪ میان دمای محیط و شاخص WBGT، افزایش دما می‌تواند به‌طور مستقیم سطح مواجهه با استرس گرمایی را افزایش دهد. مطالعات متعدد از جمله پژوهش‌های انجام شده توسط Tord Kjellstrom و همکاران (۳۰) و David Newth و همکاران (۳۱) و Takakura و همکاران (۳۲)، اصغری و همکاران (۳۳) نشان دادند که تغییرات اقلیمی موجب افزایش شاخص WBGT و کاهش بهره‌وری نیروی کار خواهد شد. در برخی سناریوها، افزایش شاخص WBGT تا سال ۲۰۹۹ بین ۲٫۶ تا ۵٫۸ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. همچنین، مطالعات Krishnamurthy در هند (۳۴) و Xiaodong در چین (۳۵) تأثیر منفی افزایش WBGT بر بهره‌وری و سلامت کارکنان را تأیید کرده‌اند. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط حبیبی و همکاران (۲)، تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر شیوع استرس‌های حرارتی در میان کارگران مناطق نیمه‌گرمسیری و گرمسیری داشته است. بنابراین، تدوین استراتژی‌های ویژه‌ای برای پیشگیری و افزایش انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی ضروری به‌نظر می‌رسد.

با توجه به پیش‌بینی‌های اقلیمی، انتظار می‌رود که برخی نواحی ایران در آینده با افزایش دما و کاهش بارندگی مواجه شوند که این امر چالش‌های متعددی برای صنعت فولاد ایجاد خواهد کرد. در ادامه، پیامدهای اقلیمی برای هر منطقه به‌طور جداگانه بررسی شده است:

اقلیم گرم با بارش بسیار کم (G1) (شامل استان‌های خراسان جنوبی، جنوب خراسان رضوی، یزد، کرمان، اصفهان، سمنان، قم و سیستان و بلوچستان):

این اقلیم با ۵۹٪ از ظرفیت تولید فولاد کشور، بیشترین سهم را دارد و در ناحیه A از نظر شاخص

WBGT قرار گرفته است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که افزایش دما در این منطقه بین ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود که می‌تواند سطح استرس گرمایی را به محدوده بحرانی برساند. اگرچه افزایش بارش تا ۱۴۴٪ در این مناطق پیش‌بینی شده، اما تقاضای بالای آب در صنایع فولاد ممکن است منجر به کمبود منابع آبی و افزایش هزینه‌های عملیاتی شود. با توجه به تمرکز ۶۵٪ از صنایع در حال احداث در این اقلیم، اجرای راهکارهای مهندسی مانند تهویه مناسب، بازیافت آب، و بررسی امکان انتقال بخشی از واحدها به مناطق خنک‌تر ضروری است.

اقلیم گرم با بارش کم (G2) (شامل استان‌های شمال خراسان رضوی، خراسان شمالی، تهران، البرز، قزوین، همدان، مرکزی و چهارمحال و بختیاری):

این اقلیم با ۱۱٪ از ظرفیت تولید فولاد کشور، در ناحیه B از نظر شاخص WBGT قرار دارد. پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده افزایش دما بین ۴ تا ۵ درجه سانتی‌گراد است، اما تغییرات بارشی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. وجود منابع آبی سطحی و رودخانه‌ای، مزیتی نسبی نسبت به G1 محسوب می‌شود. با توجه به نزدیکی به معادن سنگ آهن، این منطقه می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای توسعه آتی صنعت فولاد باشد، مشروط بر اینکه مدیریت بهینه منابع آبی و کنترل استرس حرارتی صورت گیرد.

اقلیم بسیار سرد با بارش کم (G3) (شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل و زنجان):

این اقلیم با ۶٪ از ظرفیت تولید فولاد کشور، در ناحیه B از نظر شاخص WBGT قرار دارد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که دمای هوا تا ۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و بارش سالیانه تا ۵۰٪ افزایش خواهد داشت. با وجود شرایط سرد، ولی افزایش دمای زیادی در این مناطق پیش‌بینی شده است با این وجود این منطقه از نظر اقلیمی برای استقرار صنایع فولاد مناسب است، اما فاصله زیاد از منابع سنگ آهن می‌تواند هزینه‌های تولید را افزایش دهد.

اقلیم داغ با بارش متوسط (G4): (شامل استان‌های

فارس، هرمزگان، بوشهر و خوزستان):

این اقلیم با ۱۹٪ از ظرفیت تولید فولاد کشور، بالاترین میزان شاخص WBGT (۳۱/۸ درجه سانتی‌گراد) را دارد. افزایش دما بین ۰.۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است که می‌تواند شرایط بحرانی‌تری برای سلامت و بهره‌وری کارکنان ایجاد کند. رطوبت بالا در این منطقه، گرمای محسوس را تشدید کرده و نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده پیشرفته را افزایش می‌دهد. استفاده از پوشش‌های خنک‌کننده برای محیط‌های باز و بررسی امکان انتقال برخی واحدها به مناطق معتدل‌تر توصیه می‌شود.

اقلیم معتدل با بارش متوسط (G5): (شامل

استان‌های کردستان، کرمانشاه و لرستان):

این اقلیم با ۲٪ از ظرفیت تولید فولاد کشور، در ناحیه B از نظر شاخص WBGT قرار دارد. پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده افزایش دما تا ۴.۵ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به دمای معتدل‌تر و منابع آبی بیشتر نسبت به G1 و G4، این منطقه می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای توسعه آینده صنعت فولاد باشد. سهم این اقلیم در صنایع در حال احداث حدود ۸٪ است. با این حال، احتمال افزایش دما بین ۴/۵ درجه سانتی‌گراد در دهه‌های آینده باید در برنامه ریزی‌های توسعه‌ای لحاظ شود.

اقلیم بسیار سرد با بارش بسیار زیاد (G6):

(شامل استان‌های مازندران و گلستان):

این اقلیم با سهم اندک از ظرفیت تولید فولاد، سردترین و پربارش‌ترین منطقه کشور محسوب می‌شود. پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده افزایش دما تا ۶/۵ درجه سانتی‌گراد است. با وجود منابع آبی فراوان، افزایش دما و رطوبت بالا می‌تواند شاخص WBGT را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین، استقرار صنایع در این منطقه ممکن است موجب آسیب به اکوسیستم‌های جنگلی و حیات‌وحش شود.

اقلیم معتدل با بارش زیاد (G7): (شامل استان‌های

ایلام و کهگیلویه و بویراحمد):

این اقلیم کمترین سهم از صنایع فولاد را دارد، اما

با توجه به شرایط معتدل و منابع آبی، می‌تواند در آینده به گزینه‌ای جذاب برای توسعه تبدیل شود. پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده افزایش دما تا ۳ درجه سانتی‌گراد است که آن را به شرایط اقلیم G5 نزدیک می‌کند.

اقلیم سرد با بارش خیلی زیاد (G8): (شامل استان

گیلان):

این اقلیم با ۲٪ از ظرفیت تولید فولاد کشور، علیرغم قرارگیری در منطقه سرد، دارای شاخص WBGT بالا (۳۱.۸ درجه سانتی‌گراد) است که احتمالاً ناشی از رطوبت بالا در روزهای آفتابی است. پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده افزایش دما تا ۷ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش تا ۷۵٪ است. با توجه به شرایط جنگلی و حساسیت زیست‌محیطی، این منطقه برای توسعه صنعت فولاد مناسب نیست.

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که اقلیم‌های G1 و G4 با بیشترین چالش از نظر مواجهه با استرس گرمایی و کمبود منابع آبی روبه‌رو هستند. این مناطق نیازمند اجرای راهکارهایی نظیر سیستم‌های بازیافت آب، بهینه‌سازی تهویه، و برنامه‌ریزی دقیق برای کنترل هزینه‌های تولید می‌باشند. در مقابل، اقلیم‌های G5، G6، G3 و G7 به‌دلیل افزایش متعادل دما و بارش، گزینه‌های مناسب‌تری برای توسعه صنایع فولاد محسوب می‌شوند. با این حال، اقلیم G3 با وجود افزایش ۷ درجه‌ای دما و ۵۰٪ افزایش بارش، به‌دلیل فاصله زیاد از منابع سنگ‌آهن، با هزینه‌های تولید بالاتری مواجه خواهد بود. اقلیم G6 نیز به‌دلیل تخریب بالقوه اکوسیستم‌های طبیعی، کاهش پیش‌بینی‌شده منابع آبی، و رطوبت بالا، گزینه مطلوبی برای توسعه این صنعت نیست. در این میان، اقلیم‌های G5 و G7 با دمای معتدل‌تر و منابع آبی پایدارتر، شرایط بهتری برای انتقال یا توسعه واحدهای فولادی فراهم می‌کنند.

در نهایت، توسعه سیاست‌های سازگار با تغییرات اقلیمی و مدیریت پایدار منابع زیست‌محیطی، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات منفی و افزایش تاب‌آوری صنعت فولاد ایران در برابر تحولات اقلیمی آینده ایفا کند.

REFERENCES

- Pachauri RK, Allen MR, Barros VR, Broome J, Cramer W, Christ R, et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ipcc; 2014.
- Habibi P, Razmjouei J, Moradi A, Mahdavi F, Falla-Aliabadi S, Heydari A. Climate Change and Heat Stress Resilient Outdoor Workers: Findings from Systematic Literature Review. 2023;
- Alizadeh-Choobari O, Najafi MS. Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Clim Dyn*. 2018;50(1):249–60.
- Mousavi A, Ardalan A, Takian A, Ostadtaghizadeh A, Naddafi K, Bavani AM. Climate change and health in Iran: a narrative review. *J Environ Heal Sci Eng*. 2020;18:367–78.
- Mohraz MH, Ghahri A, Karimi M, Golbabaee F. The past and future trends of heat stress based on wet bulb globe temperature index in outdoor environment of Tehran City, Iran. *Iran J Public Health*. 2016;45(6):787.
- Morrissey MC, Brewer GJ, Williams WJ, Quinn T, Casa DJ. Impact of occupational heat stress on worker productivity and economic cost. *Am J Ind Med*. 2021;64(12):981–8.
- Venugopal V, Chinnadurai JS, Lucas RAI, Kjellstrom T. Occupational heat stress profiles in selected workplaces in India. *Int J Environ Res Public Health*. 2016;13(1):89.
- Gao C, Kuklane K, Östergren PO, Kjellstrom T. Occupational heat stress assessment and protective strategies in the context of climate change. *Int J Biometeorol*. 2018;62:359–71.
- Habbane AY, McVeigh JC, Cabawe SOI. Solar radiation model for hot dry arid climates. *Appl Energy*. 1986;23(4):269–79.
- Yan H, Liu Q, Zhao W, Pang C, Dong M, Zhang H, et al. The coupled effect of temperature, humidity, and air movement on human thermal response in hot-humid and hot-arid climates in summer in China. *Build Environ*. 2020;177:106898.
- Borg MA, Xiang J, Anikeeva O, Pisaniello D, Hansen A, Zander K, et al. Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence. *Environ Res*. 2021;195:110781.
- Borg M, Bi P, Xiang J, Anikeeva O. 3F. 004 Occupational heat stress and economic burden: evidence for workplace heat management policies. *Inj Prev*. 2021;27(Suppl 2):A28–A28.
- Golbabaee F, Monazzam MR, Aval MY, Allahyari T, Taban E, Shendi MRA. Investigation of heat stress and heat strain in outdoor workers: a case study in Iran. *Arch Adv Biosci*. 2016;7(4):30–8.
- Yang YC, Wei MC, Hong SJ. Evaluation of occupation hot exposure in industrial workplaces in a subtropical country. *Int J Occup Med Environ Health*. 2017;30(3):379–95.
- Wang T, Müller DB, Graedel TE. Forging the anthropogenic iron cycle. *Environ Sci Technol*. 2007;41(14):5120–9.
- Pauliuk S, Milford RL, Muller DB, Allwood JM. The steel scrap age. *Environ Sci Technol*. 2013;47(7):3448–54.
- Cullen JM, Allwood JM, Bambach MD. Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods. *Environ Sci Technol*. 2012;46(24):13048–55.
- Kolagar M, Saboohi Y, Fathi A. Evaluation of long-term steel demand in developing countries-Case study: Iran. *Resour Policy*. 2022;77:102675.
- Madani S, Malmasi S, Nezakati Esmaealzade R. Environmental Impact Assessment of Steel Plants Using Modified RIAM Method (Case Study: Tiam Steel Plant in Guilan Province). *Environ Sci Technol*. 2017;19(4):409–21.
- Olmez GM, Dilek FB, Karanfil T, Yetis U. The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study. *J Clean Prod*. 2016;130:195–201.
- Saghafi F, Jalilvand MR, Ahmadiyeh E, Nasrolahi Vosta L. Analysis of an industrial tourism business network using social network approach: the case of Isfahan, Iran. *J Islam Mark*. 2023;14(12):3113–32.
- Giahi O, Darvishi E, Aliabadi M, Khoubi J. The efficacy of radiant heat controls on workers' heat stress around the blast furnace of a steel industry. *Work*. 2016;53(2):293–8.
- Asadollah SBHS, Sharafati A, Shahid S. Application of ensemble machine learning model in downscaling and projecting climate variables over different climate regions in Iran. *Environ Sci Pollut Res*. 2022;1–20.
- Golbabaee F, Ahmadi Asour A, Beigzadeh Z, Pourhassan B, Sepahi Zoeram F, Dehghan G, et al. Occupational heat stress atlas of Iran. 1th ed. Tehran university of medical science ; 2023.
- Hamerezaee M, Dehghan SF, Golbabaee F, Fathi A,

- Barzegar L, Heidarnajad N. Assessment of semen quality among workers exposed to heat stress: a cross-sectional study in a steel industry. *Saf Health Work*. 2018;9(2):232–5.
26. Hamerezaee M, Golbabaee F, Nasiri P, Azam K, Dehghan SF, Fathi A, et al. Determination of optimum index for heat stress assessment on the basis of physiological parameters, in steel industries. *J Heal Saf Work*. 2018;8(2).
27. Monazzam MR, Jafariroodbandi A, Amirzadeh F, Tabatabaee SHR. A study on heat stress and its risk assessment in a steel factory. *Iran Occup Heal*. 2013;9(4).
28. Ghanbary Sartang A, Habibi E, Palyzban F, Abedi M, Dehghan H, Sadeghi S. Assessment of occupational exposure to heat stress based on the Wet Bulb Globe Temperature index in the steel industry workers. *J Prev Med*. 2017;4(2):26–31.
29. Mahdavi S, Esmaelzadeh A, Ebrahimzadeh F, Rashidi R, Naeimi N. Comparing the core body temperature and the heat stress indices of HSI and WBGT in Lorestan steels industry workers. *Arch Hyg Sci*. 2014;3(4):160–6.
30. Kjellstrom T, Freyberg C, Lemke B, Otto M, Briggs D. Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change. *Int J Biometeorol*. 2018;62(3):291–306.
31. Newth D, Gunasekera D. Projected changes in wet-bulb globe temperature under alternative climate scenarios. *Atmosphere (Basel)*. 2018;9(5):187.
32. Takakura J, Fujimori S, Takahashi K, Hijioka Y, Honda Y. Site-specific hourly resolution wet bulb globe temperature reconstruction from gridded daily resolution climate variables for planning climate change adaptation measures. *Int J Biometeorol*. 2019;63:787–800.
33. Asghari M, Fallah Ghalhari G, Heidari H, Moradzadeh R, Samadi S, Tajik R, et al. Modeling and predicting trends of heat stress based on climate change phenomenon: A case study in a semi-arid climate. *Environ Heal Eng Manag J*. 2022;9(4):399–407.
34. Krishnamurthy M, Ramalingam P, Perumal K, Kamalakannan LP, Chinnadurai J, Shanmugam R, et al. Occupational heat stress impacts on health and productivity in a steel industry in Southern India. *Saf Health Work*. 2017;8(1):99–104.
35. Li X, Chow KH, Zhu Y, Lin Y. Evaluating the impacts of high-temperature outdoor working environments on construction labor productivity in China: A case study of rebar workers. *Build Environ*. 2016;95:42–52.