



Predicting the Grazing Capacity of Mountainous Rangelands Using a Machine Learning Approach with Emphasis on Climate Change

Mohammadreza Najibzadeh^{1,2}, Hossein Arzani³, Hamidreza Keshtkar^{4*}, Shahram Khalighi Sigaroodi⁵,
Javad Motamedi⁶

1. PhD. Graduated in Rangeland Sciences, Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Member of the scientific board of East Azerbaijan Agriculture and Natural Resources Research Center, Tabriz, Iran.

3. Prof. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

4. Assistant Prof. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

5. Associate Prof. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

6. Associate Prof. Rangeland Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

* Corresponding Author: Hkeshtkar@ut.ac.ir

Received date: 2025/12/19

Accepted date: 2026/05/07



[10.22034/jdmal.2026.2081279.1522](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2081279.1522)

Abstract

Mountain rangelands are vital for forage supply, biodiversity, and the carbon cycle. This research aimed to forecast the long-term grazing capacity of summer rangelands in the Arshad Chaman Kandovan Sahand area and assess climate change effects on vegetation production and cover. Data were gathered from six transects over 16 years (2006–2021). Vegetation measurements included canopy cover and forage yield across three palatability categories (I, II, III), along with soil surface conditions. Climate data—covering minimum, maximum, and average temperatures and precipitation—were sourced from Tabriz, Sahand, and Maragheh stations and analyzed with SPI and SPEI drought indices. GCM data were downscaled using SDSM under RCP scenarios. Machine learning models such as XGBoost, Random Forest, and Linear Regression then simulated grazing capacity. Results showed forage production decreased from 1250 kg/ha in 2006 to 1054 kg/ha in 2021, a 15.6% decline. Similarly, available forage reduced from 408.2 to 316.7 kg/ha, a 22.4% drop. Consequently, short-term grazing capacity fell from 7.3 to 5.7 Animal Unit Months per hectare (AUM/ha). For future projections, the XGBoost model ($R^2 = 0.96$) estimated a 3.5% decline by 2051, while the Random Forest model ($R^2 = 0.85$) predicted a 3.0% decrease. Based on these outcomes, reducing livestock numbers by about 20% by 2051 is recommended. Additionally, vegetation improvement programs—such as seeding and grazing management—should be implemented with local community participation, along with ongoing monitoring.

How to cite this article

Najibzadeh, M. Arzani, H. Keshtkar, H. Khalighi Sigaroodi, Sh. and Motamedi, J. (2026). Predicting the Grazing Capacity of Mountainous Rangelands Using a Machine Learning Approach with Emphasis on Climate Change. *Desert Management*, 13(4), 1-20. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2081279.1522](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2081279.1522)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Extended Abstract

Introduction

Climate change is the leading environmental challenge of this century, causing widespread harm to ecosystems, especially vulnerable arid and semi-arid mountain rangelands (15). Sensitive ecosystems like Iran's Sahand rangelands offer essential services such as forage and carbon storage, but climate change is causing biodiversity loss and water shortages, evidenced by declining habitat quality and productivity in Sahand (3, 6, 20). Human activities like overgrazing worsen these effects by speeding up habitat degradation and soil erosion (7). The threat is complex: altered rainfall patterns reduce water availability, increasing plant death risk, while rising CO₂ levels trigger unpredictable changes in plant physiology and community makeup, harming forage quality and ecosystem stability (3, 4, 12). Remote sensing consistently shows a clear link between less rainfall, lower vegetation health, and reduced forage yield (14). These overlapping pressures highlight the urgent need for advanced predictive tools to support proactive and adaptive management. This study hypothesizes that climate change has already decreased forage production and grazing capacity significantly, and that machine learning models can accurately project future trends. It combines sixteen years of detailed field data on vegetation and forage with climatic variables and future climate scenarios from the statistical downscaling model (SDSM) under RCPs. The study compares the performance of three machine learning algorithms—XGBoost, Random Forest, and Linear Regression—to simulate and forecast grazing capacity changes. This comprehensive, data-driven approach aims to provide reliable projections to guide resilient management strategies and protect these ecosystems from ongoing climate pressures.

Materials and Methods

The research took place in the summer rangelands of Arshad Chaman, situated in the Sahand mountains of East Azerbaijan province in northwestern Iran (see Fig. 1). The study area spans about 280 hectares, located between longitudes 46°17' and 46°21' E and latitudes 37°42' and 37°44' N, with an elevation range of 2700 to 3420 meters above sea level. A hybrid approach was used in this study, combining 16 years of field data from 2006 to 2021 with climate modeling and machine learning techniques to analyze ecological and climatic relationships and to predict grazing capacity over the long term. Vegetation data were harvested through field sampling, focusing on three main sources: vegetation, climate, and satellite imagery.

Field measurements were taken along six permanent 100-meter transects, each with ten 1-m² plots. Parameters recorded included total vegetation cover, cover by palatability classes I, II, and III, as well as bare soil, litter, stone, gravel cover, plant density, and forage production. Forage production was effectively estimated using the double-sampling method: direct clipping in 15 reference plots established a regression between canopy cover and dry weight, which was then used to estimate production in the remaining 60 plots. The annual allowable utilization rate was set at 40% based on range condition, trend, and erosion risk class throughout the study period (Table 1) (6, 27). Additionally, 16-year historical data from the East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research Center supported the field findings.

Historical meteorological data, including temperature and precipitation from the Tabriz, Sahand, and Maragheh stations, were collected. These data were processed to calibrate the SDSM model for future climate projections under various RCP scenarios. Additionally, drought indices like SPI and SPEI, along with NASA satellite-derived climate data, were integrated into the study.

Grazing capacity for the short term was estimated annually. Forage availability was calculated by multiplying the total annual yield by either the allowable utilization rate or the palatability coefficient, whichever was lower. The daily dry matter intake for the dominant Qezel sheep, weighing 71.6 kg, was estimated at 2% of their live weight, following range nutrition standards (6). Monthly grazing capacity, expressed as sheep per hectare per month, was then determined using the standard formula. For the long-term simulation, a detailed database comprising 35 ecological, climatic, and remote sensing parameters was created. These included canopy cover by palatability class, production levels, NDVI, seasonal temperature and precipitation, and drought indices. Three predictive models—Simple Linear Regression, RF, and XGBoost—were developed and compared (11).

Model robustness was assessed through repeated random sub-sampling validation. In 10 independent runs, 70% of the data was randomly used for training and 30% for testing (18). The model's predictive accuracy was measured using R², RMSE, and MAE. This thorough validation method provided dependable and unbiased estimates of the model's ability to predict grazing capacity under future climate scenarios.

Results and Discussion

The floristic composition, including species in palatability classes I, II, and III, is detailed in Table 2. Field data from 2006 to 2021 (Table 3) showed a strong correlation of 0.99 between forage production and available forage within each class. Although total forage had a positive correlation of 0.95 with mean production, Classes I and III were the main factors influencing available forage. The ecosystem remained relatively stable with some yearly fluctuations. However, a notable decline in Class III forage from 164 to 121 kg/ha indicates increased pressure on less palatable species. During this period, a significant climate change was observed (Table 4), with mean annual temperature rising by 0.87 °C and precipitation falling by 61.6 mm over 16 years. Using the SDSM model under RCP 8.5 projections (Table 5), it is predicted that by 2100, precipitation will reduce by 52% and average temperature will increase by 2.68 °C.

These climatic shifts have directly affected rangeland productivity: total forage production fell by 15.6%, and available forage decreased by 22.4%, which reduced short-term grazing capacity from 7.73 to 5.57 Animal Units per Month per hectare (AUM/ha) (Table 6). Long-term models foresee a further 4% decrease in grazing capacity by 2051 under RCP 8.5 (Table 7). Among the predictive machine learning models tested, XGBoost outperformed others with an R^2 of 0.96 and RMSE of 0.32, surpassing Random Forest and Linear Regression (Table 8).

This research underscores the high sensitivity of mountain rangelands to climate change, shown by the correlation between rising temperatures, decreasing precipitation, declining NDVI, and negative SPEI drought indices. The use of advanced models like XGBoost was critical for capturing the complex, non-linear relationships between climate variables and ecological responses. Based on these findings, urgent adaptive management strategies are necessary. Recommendations include a 15% reduction in livestock by 2051, community-based restoration programs targeting resilient species, and improved monitoring through remote sensing indices such as NDVI and SPEI. Efficient water management, including runoff harvesting, is vital to counteract expected rainfall declines. An integrated approach combining scientific monitoring, predictive modeling, and participatory management is essential to ensure the long-term resilience and sustainability of these vulnerable ecosystems amid ongoing climate change.

Keywords: Allowable use, Forage production, Data-driven models, Downscaling, Emission scenarios.

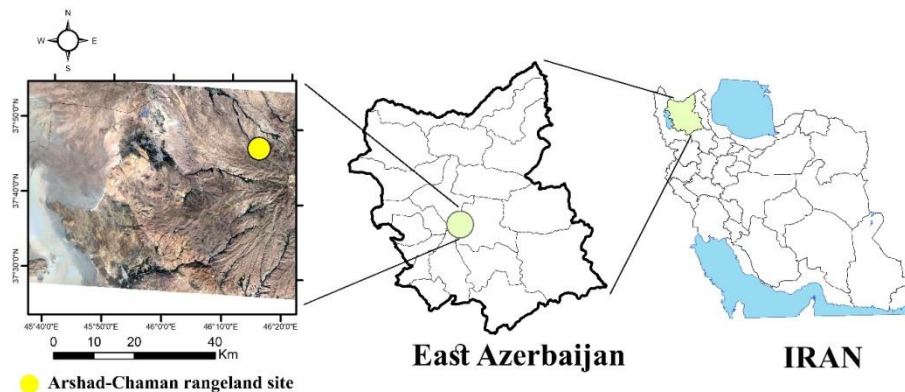


Fig 1. A map showing the study area's location within the province and country.

Table 1. Utilization rate limits of the study area (2006-2021)

Range Condition	Trend	Erosion Suitability Class	Allowable Utilization Rate %
Good or Excellent	Positive or Stable	S1 or S2	40
Good or Excellent	Negative	S1 or S2	35
Fair	Positive or Stable	S1	30
Fair	Positive or Stable	S2	25
Fair	Negative	S2	20
Fair	Positive or Stable	S3	20
Fair	Negative	S3	15
Poor	Positive or Stable	S2	20
Poor	Negative	S2	15
Poor	Positive or Stable	S3	15
Poor	Negative	S3 or N	0

Table 2. Floristic list of the study area, including the palatability classes of the species studied.

Scientific Name	Family	Growth Form	Palatability Class
<i>Achillea cuneatiloba</i> Boiss. & Buhse	Astraceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Aethionema trinervium</i> (DC.) Boiss.	Cruciferae	Broadleaf herbaceous	II
<i>Alopecurus textilis</i> Boiss.	Poaceae	Graminoid	II
<i>Arenaria dianthoides</i> Sm.	Caryophyllaceae	Broadleaf herbaceous	II
<i>Arenaria gypsophiloides</i> Sm.	Caryophyllaceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Astragalus aureus</i> Willd.	Fabaceae	Shrub	III
<i>Astragalus pinnetorum</i>	Fabaceae	Broadleaf herbaceous	I
<i>Bunium microcarpum</i> Freyn & Bornm.	Apiaceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Bornm.</i>			
<i>Bromus tomentellus</i> Boiss.	Poaceae	Graminoid	I
<i>Cirsium haussknechtii</i> Boiss.	Astraceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Delphinium speciosum</i> M.Bieb.	Ranunculaceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Festuca ovina</i> L.	Poaceae	Graminoid	I
<i>Festuca rubra</i> L.	Poaceae	Graminoid	I
<i>Gagea confusa</i> (Salmaki & Zarre)	Liliaceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Helichrysum psychrophilum</i> Boiss.	Astraceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Helychrisum globiferum</i> Boiss.	Astraceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Onobrychis cornuta</i> L.	Fabaceae	Shrub	III
<i>Papaver orientale</i> L.	Fabaceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Poa araratica</i> Gand.	Poaceae	Graminoid	II
<i>Polygonum alpestre</i> C.A.Mey.	Polygonaceae	Broadleaf herbaceous	III
<i>Tanacetum chiliophyllum</i> Fisch. & C.A.Mey.	Astraceae	Broadleaf herbaceous	I
<i>Taraxacum azerbaijanicum</i> Soest	Astraceae	Broadleaf herbaceous	II
<i>Thymus kotschyanus</i> Boiss. & Hohen.	Lamiaceae	Shrub	III
<i>Thymus trautvetteri</i> Klokov & Des.-Shost.	Lamiaceae	Shrub	III
<i>Tragopogon marginatus</i> Boiss. & Buhse	Astraceae	Broadleaf herbaceous	II
<i>Veronica orientalis</i> Mill.	Scrophulariaceae	Broadleaf herbaceous	II

Table 3. Production levels and forage availability across different plant classes in the study area.

Year	Range Condition	Trend	Erosion Capability Class	Allowable Use	Avg. Production kg/ha	Production of Plant Classes kg/ha			Available Forage by Plant Class			Total Available Forage kg/ha
						Class I Plants	Class II Plants	Class III Grazable Plants	Class I Plants	Class II Plants	Class III Grazable Plants	
2006	Good	Positive	S2	40%	1249.81	741.3	99.3	409.2	148.3	29.8	163.7	408.2
2007	Good	Positive	S2	40%	1120.6	613.1	126	381.5	122.6	37.8	152.6	359.3
2008	Good	Positive	S2	40%	1100.6	579.2	132.7	388.7	115.8	39.8	155.5	349.2
2009	Good	Positive	S2	40%	1022.9	576	105.1	341.9	115.2	31.5	136.8	330.3
2010	Good	Stable	S2	40%	1107.46	625.9	148.4	333.2	125.2	44.5	133.3	361.5
2011	Good	Positive	S2	40%	1157.56	681.2	96.6	379.8	136.2	29	151.9	377.4
2012	Good	Positive	S2	40%	1159.82	638.5	130.2	391.2	127.7	39.1	156.5	372.7
2013	Good	Stable	S2	40%	1086.68	590.9	122.5	373.2	118.2	36.7	149.3	347.8
2014	Good	Negative	S2	35%	1099.83	617.7	114.5	367.4	123.5	34.4	146.9	324.0
2015	Good	Stable	S2	40%	1144.24	651	167.7	325.6	130.2	50.3	130.2	375.8
2016	Good	Stable	S2	40%	1162.7	631.8	164.9	366	126.4	49.5	146.4	375.4
2017	Good	Stable	S2	40%	1167.59	735.5	87.1	345	147.1	26.1	138	389.3
2018	Good	Stable	S2	40%	1159.82	638.5	130.2	391.2	127.7	39.1	156.5	372.7
2019	Good	Negative	S2	35%	1143.88	629.7	127.9	386.3	125.9	38.4	154.5	336.0
2020	Good	Negative	S2	35%	1038.42	567.9	113.2	357.2	113.6	34	142.9	304.2
2021	Good	Negative	S2	35%	1054.23	613.4	138	302.9	122.7	41.4	121.1	316.7

The palatability percentage of annuals and Class I plants was considered to be $\geq 50\%$ across all rangeland conditions. For Class II and Class III plants, palatability was considered as 30% and 20%, respectively (6).

Table 4. Climate change trends in the Sahand region from 2006 to 2021

Variable	Initial	Final	Absolute Change	Change %
Mean Temp °C	13.42	14.29	0.87	+6.1
Min Temp °C	8.15	8.65	0.5	+5.8
Max Temp °C	19.47	20.53	1.06	+5.2
Precipitation mm	305.15	243.6	-61.55	-25.3

Temp= Temperature

Table 5. Forecasting Climate Parameter Variations by 2100 with the SDSM Model

Variable	Observed	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	Abs Change	Change %
Mean Max Temp °C	18.16	19.85	20.23	21.44	3.28	+15.3
Mean Min Temp °C	12.31	13.82	14.14	15.26	2.95	+19.4
Mean Temp °C	7.47	8.95	9.13	10.15	2.68	+26.4

Temp= Temperature

Table 6. Yearly variations in vegetation cover, climate factors, and grazing potential.

Year	Total Vegetation Cover %	Total Forage Production	Available Forage	Precipitation mm	Temp °C	SPEI	NDVI	Grazing Capacity*
2006	69.12	1249.81	408.2	305.13	13.42	-0.243	0.173	7.3
2007	69.35	1120.6	359.3	229.95	12.71	-0.334	0.164	6.4
2008	66.18	1100.6	349.2	171.53	13.24	-1.877	0.125	6.3
2009	57.96	1022.9	330.3	241.91	13.09	-1.147	0.141	5.9
2010	62.4	1107.46	361.5	183.92	14.93	-0.298	0.177	6.5
2011	65.2	1157.56	377.4	283.23	12.37	-0.962	0.169	6.8
2012	69.09	1159.82	372.7	217.19	13.43	-0.943	0.191	6.7
2013	65.15	1086.68	347.8	262.54	12.89	-1.078	0.181	6.2
2014	62.37	1099.83	324.0	313.98	13.68	0.81	0.166	5.8
2015	64.37	1144.24	375.8	282.64	13.61	-0.096	0.19	6.7
2016	66.68	1162.7	375.4	290.97	12.87	0.152	0.197	6.7
2017	62.39	1167.59	389.3	204.36	13.35	-0.852	0.141	7.0
2018	69.09	1159.82	372.7	388.74	14.66	-0.121	0.199	6.7
2019	67.06	1143.88	336.0	264.99	13.59	1.072	0.168	6.0
2020	60.22	1038.42	304.2	345.66	12.98	0.137	0.155	5.4
2021	58.82	1054.23	316.7	243.6	14.29	-0.768	0.151	5.7

* Animal Unit Months per Hectare (AUM/ha)

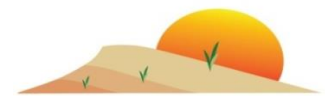
Table 7. Changes in Sahand rangelands' grazing capacity

Year	Grazing Capacity (AUM/ha)	Change Relative to the Base Year (%)
2006	7.3	---
2011	6.8	-6.84
2016	6.7	-8.22
2021	5.7	-21.92
2051	5.47*	-25.1

* Based on the XGBoost model

Table 8. Comparison of models predicting grazing capacity accuracy

Model	R2	RMSE	MAE	Change in grazing capacity until 2051
Linear Regression	0.74	0.68	0.52	-2.5%
XGBoost	0.96	0.32	0.28	-3.5%
Random Forest	0.85	0.47	0.41	-3.0%



پیش‌بینی ظرفیت چرای مراتع کوهستانی با رویکرد یادگیری ماشین با تأکید بر تغییر اقلیم

محمدرضا نجیب زاده^{۱،۲}، حسین ارزانی^۳، حمیدرضا کشتکار^{۴*}، شهرام خلیقی سیگارودی^۵، جواد معتمدی^۶

۱. دانش آموخته دکتری مرتعداری، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، تبریز، ایران.

۳. استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴. استادیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۵. دانشیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۶. دانشیار بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: Hkeshtkar@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸



[10.22034/jdml.2026.2081279.1522](https://doi.org/10.22034/jdml.2026.2081279.1522)

چکیده

مراتع کوهستانی، نقش کلیدی در تأمین علوفه، حفظ تنوع زیستی و تنظیم چرخه کربن دارند. هدف پژوهش حاضر، پیش‌بینی ظرفیت بلندمدت چرای مراتع بیابانی منطقه ارشد چمن کندوان سهند و بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تولید و پوشش گیاهی بود. داده‌های میدانی طی دوره ۱۶ ساله از ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰، از شش نوار (ترانسکت) جمع‌آوری شدند. شاخص‌های پوشش گیاهی شامل درصد پوشش و تولید علوفه در سه طبقه خوشخوراکی I، II و III و همچنین وضعیت سطح خاک اندازه‌گیری شدند. داده‌های اقلیمی شامل دمای کمینه، بیشینه و میانگین و بارش از ایستگاه‌های تبریز، سهند و مراغه استخراج و با شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI تحلیل شدند. داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو با مدل SDSM و سناریوهای RCP ریزمقیاس‌سازی شد و برای شبیه‌سازی ظرفیت چرای از مدل‌های یادگیری ماشین XGBoost، جنگل تصادفی و رگرسیون خطی بهره‌گیری شد. نتایج نشان داد تولید علوفه مرتع از 1250 kg/ha در سال ۱۳۸۵ به 1054 kg/ha در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته است که معادل کاهش ۱۵/۶٪ است و علوفه در دسترس نیز از $408/2$ به $316/7 \text{ kg/ha}$ کاهش داشته است که معادل کاهش ۲۲/۴٪ است. در نتیجه، ظرفیت چرای کوتاه‌مدت از $7/3$ به $5/7$ واحد دامی در هکتار در ماه کاهش یافت. در پیش‌بینی ظرفیت چرای، مدل XGBoost با R^2 برابر $0/96$ کاهش ۳/۵٪ تا سال ۱۴۳۰ و خوارزمیک جنگل تصادفی با R^2 برابر $0/85$ کاهش ۳٪ را نشان داد. بر اساس این نتایج، پیشنهاد می‌شود تعداد دام تا سال ۱۴۳۰ حدود ۲۰٪ کاهش یابد، طرح‌های غنی‌سازی پوشش گیاهی توسط عملیات اصلاح مرتع (مانند بذرپاشی و مدیریت چرا)، با مشارکت جوامع محلی اجرا و پایش مداوم ادامه یابد.

واژگان کلیدی: حذبیره برداری، تولید علوفه، مدل‌های داده‌محور، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای انتشار.

استناد به این مقاله

نجیب زاده، محمدرضا، ارزانی، حسین، کشتکار، حمیدرضا، خلیقی سیگارودی، شهرام و معتمدی، جواد. (۱۴۰۴). پیش‌بینی ظرفیت چرای مراتع کوهستانی با رویکرد یادگیری ماشین با تأکید بر تغییر اقلیم. مدیریت بیابان، ۱۳(۴)، ۱-۲۰. DOI: [10.22034/jdml.2026.208124.1524](https://doi.org/10.22034/jdml.2026.208124.1524)



■ مقدمه

مراتع جهان حدود ۵۴٪ از سطح خشکی زمین معادل حدود $79/5 \text{ km}^2$ میلیون را پوشش می‌دهند. در ایران، سطح مراتع حدود ۸۵ میلیون هکتار است که ۵۲٪ از کل مساحت کشور را تشکیل می‌دهد. با توجه به تغییرات اقلیمی حدود ۷۴٪ از مساحت مراتع جهان تا اواسط قرن حاضر (حدود سال ۲۰۵۰) کاهش زیتوده گیاهی و تولید علوفه را تجربه خواهند کرد و میانگین جهانی کاهش زیتوده حدود ۴ تا ۴/۷٪ پیش‌بینی می‌شود. در سناریوهای گرمایش زیاد مانند RCP8.5 در ایران بیش از ۶۶٪ مراتع در سطوح مختلف تخریب قرار دارند و تنها حدود ۶٪ در وضعیت خوب یا عالی هستند که بخش عمده آن ناشی از تشدید خشکسالی، کاهش بارش، افزایش دما و عوامل انسانی مرتبط با تغییرات اقلیمی است (۲۵، ۱).

تغییر اقلیم ناشی از گازهای گلخانه‌ای، تهدیدی مستقیم برای بوم‌سازگان‌های مرتعی مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۲۷). این پدیده با مهاجرت گونه‌ها به عرض‌های بالاتر و کاهش تنوع زیستی، ضرورت تدوین راهبردهای حفاظتی را برجسته می‌کند (۲۳). همچنین، مدل‌های بوم‌شناختی نشان می‌دهند که افزایش دما رقابت بین گونه‌ها را تشدید می‌کند و تا ۲۰٪ کاهش تنوع زیستی را در پی دارد که اهمیت پایش بلندمدت را نمایان می‌کند (۱۱). تغییر الگوهای بارش و کاهش آن، با افزایش تنش آبی و پیامد مرگ‌ومیر درختان (تا ۳۰٪)، لزوم مدیریت دقیق‌تر منابع آب در مراتع نیمه‌خشک را ضروری می‌سازد (۴). از سوی دیگر، افزایش دی‌اکسید کربن در کوتاه‌مدت رشد گیاهان سه‌کربنه را افزایش می‌دهد (برخلاف گیاهان چهارکربنه که چندان از آن بهره نمی‌برند)؛ اما در بلندمدت این رشد پایدار نبوده و با کاهش نیتروژن خاک، تغییر ترکیب گونه‌ها و افت تنوع زیستی همراه است (۳).

یافته‌های مربوط به تغییر اقلیم در بررسی موردی کوهستان سهند بیانگر این مطلب است که افزایش دما و تغییرات الگوهای بارش نه تنها بر متغیرهای هیدرولوژیک مانند میزان و نوع بارندگی، نرخ نفوذ آب به خاک و شدت سیل‌خیزی منطقه تأثیر منفی گذاشته، بلکه زمینه را برای تشدید تخریب زیستگاه‌های طبیعی توسط عوامل انسانی

مانند چرای بیش از حد، برداشت غیراصولی گیاهان و توسعه ناپایدار فراهم کرده است. این تغییرات منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب در خاک، افزایش رواناب سطحی، کاهش دوره‌های نفوذ مؤثر و در نتیجه افزایش خطر سیلاب‌های ناگهانی و فرسایش خاک شده است. همچنین حساسیت بیشتر بوم‌سازگان به فشارهای انسانی خطر تخریب پایدار پوشش گیاهی و کاهش کیفیت زیستگاه‌های طبیعی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است (۷). ارزیابی‌های مبتنی بر سنجش از دور نیز، با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های اقلیمی، همبستگی مستقیم کاهش بارش سالانه با افت شاخص^۱ NDVI و کاهش تولید علوفه را تأیید کرده‌اند، حال آنکه افزایش دما فشار مضاعفی بر بوم‌سازگان وارد می‌کند (۱۴). در بررسی دیگر، مدل‌سازی جنگل تصادفی کاهش چشم‌گیر گستره جغرافیایی گونه گون زرد (*Astragalus aureus*) را زیر سناریوهای تغییر اقلیم پیش‌بینی کرده‌است و نتایج نشان‌داد که با افزایش دما در اثر تغییر اقلیم، وسعت رویشگاه این گونه به‌میزان قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت (۲۸).

مجموع این یافته‌ها حاکی از تأثیر چندوجهی تغییر اقلیم بر بوم‌سازگان‌های مرتعی است. در این بین، مراتع کوهستانی نظیر مراتع کوهستانی سهند در غرب کشور، از جمله حساس‌ترین زیست‌بوم‌ها به‌شمار می‌آیند، چرا که به‌دلیل ویژگی‌های بوم‌شناختی خاص خود مانند دوره رویشی کوتاه، وابستگی به بارش‌های فصلی و فشار چرای دام، بیش از سایر زیست‌بوم‌ها در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر هستند. از اینرو، بر ضرورت استفاده از مدل‌های پیش‌بینی به‌عنوان ابزاری کلیدی برای شناسایی روندهای آینده و تدوین سیاست‌های مدیریتی تأکید می‌کند. به‌عنوان مثال، ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی مراتع در رابطه با شاخص‌های اقلیمی نشان داده است که عوامل اقلیمی شامل بارش و دما در اولویت اول و مدیریت مرتع از جمله قرق در اولویت دوم، نقش تعیین‌کننده‌ای دارند (۱). همچنین، مرور تأثیر تغییر اقلیمی بر بوم‌سازگانهای چراگاهی نشان می‌دهد که افزایش غلظت CO_2 می‌تواند با

1 Normalized difference vegetation index

بین ۲۲ تا ۵۲mm گزارش شده است. میانگین بارندگی ۷۰ ساله ایستگاه تبریز ۲۹۴mm، دمای بیشینه ۱۸، دمای کمینه ۷ و دمای متوسط ۱۳°C است.

■ روش پژوهش

اجرای پژوهش شامل سه بخش اصلی پوشش گیاهی، داده‌های اقلیمی و داده‌های ماهواره‌ای بود. رویکرد پژوهش ترکیبی و شامل جمع‌آوری داده‌های ۱۶ ساله، سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰، مدل‌سازی با سناریوهای RCP و استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین بود. این روش امکان تحلیل روابط اقلیمی و بوم‌شناختی و پیش‌بینی بلندمدت ظرفیت چرای را فراهم می‌سازد.

داده‌های پوشش گیاهی از طریق برداشت میدانی جمع‌آوری شدند. برای این منظور شش نوار ۱۰۰m که ۴ نوار در جهت شیب و ۲ نوار در جهت عمود برشیب، پیاده شد و در امتداد هر کدام، ۱۰ پلات یک مترمربعی با فاصله ۱۰m از همدیگر مستقر شد. متغیرهای مورد ارزیابی، شامل درصد پوشش تاجی گیاهی، گونه‌ها، تعداد پایه‌های گیاهی از هر گونه، مقدار تولید (رشد سال جاری) گونه‌ها و درصد سنگ و سنگریزه، خاک لخت و میزان لاشبرگ، بودند. همچنین از آمار و اطلاعات درصد پوشش تاجی و مقدار تولید رشد سال جاری گونه‌های گیاهی که طی ۱۶ سال در چارچوب طرح‌های پژوهشی از مراتع منطقه برداشت شده بود و در بانک اطلاعاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، موجود می‌باشد، استفاده شد. در این ارتباط، پوشش تاجی گونه‌ها از طریق اندازه‌گیری ابعاد، مشخص و مقدار تولید آنها با استفاده از روش نمونه‌گیری مضاعف و از طریق رابطه رگرسیونی بین درصد پوشش تاجی با مقدار تولید، برآورد شد. ابتدا در ۱۵ پلات تصادفی حفاظت‌شده در زمان اوج آمادگی مرتع، گونه‌های مورد چرای دام، قطع، خشک و توزین شدند تا تولید واقعی به‌دست آید و همزمان پوشش تاجی آنها در همه پلات‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از رابطه رگرسیونی بین پوشش تاجی و تولید که بر اساس داده‌های این ۱۵ پلات به‌دست آمده بود، تولید در دیگر پلات‌ها شامل ۶۰ پلات یک مترمربعی در طول ۶

محدودیت‌های دیگری مانند تغییر دما، بارش و نیتروژن خاک خنثی شود و تغییرات در ترکیب گونه‌ها و کیفیت علوفه همراه با تنش گرمایی دام، تولید و سلامت دام را زیر تأثیر قرار دهد (۱۲). در این راستا، پژوهش حاضر با ادغام روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین، داده‌های میدانی طولانی‌مدت و سناریوهای^۱ RCPs، به پیش‌بینی ظرفیت چرای مراتع می‌پردازد. در پایان تغییر ظرفیت چرای مراتع سهند تا سال ۱۴۳۰ زیر تأثیر تغییر اقلیم پیش‌بینی می‌شود.

■ مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه

منطقه مورد بررسی در استان آذربایجان شرقی و در شمال غرب ایران قرار دارد (شکل ۱). مختصات جغرافیایی آن بین طول‌های ۴۶°۱۷' تا ۴۶°۲۱' شرقی و عرض‌های ۳۷°۴۲' تا ۳۷°۴۴' شمالی بوده و در فاصله حدود ۶۰km جنوب تبریز واقع است. وسعت منطقه حدود ۲۸۰ha و بخشی از مراتع بیلاقی عشایری است. این منطقه در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه قرار دارد و با توجه به قرارگیری در مناطق نیمه‌استپی، دامنه ارتفاعی آن بین ۲۷۰۰ تا ۳۴۲۰m است. چرای دام در منطقه به‌صورت عشایری و بر اساس پروانه چرای مرتع ارشدچمن انجام می‌شود. دوره چرای دام‌ها از ۱۵ خرداد تا ۱۵ شهریور هر سال و به مدت ۹۰ روز است. تعداد بهره‌برداران پنج خانوار و تعداد دام مجاز ۴۰۰ راس تعیین شده، در حالی که تعداد دام موجود حدود ۲۰۰۰ واحد دامی می‌باشد. ساختار زمانی چرای روزانه دام‌ها به‌طور تقریبی شامل ۴ تا ۵ ساعت صبح، ۲ ساعت ظهر و ۷ تا ۸ ساعت عصر است. ترکیب دام غالب منطقه شامل ۹۴٪ (۵) گوسفند نژاد قزل و ۶٪ (۳۲) بز نژاد خلخال می‌باشد. نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک به منطقه، تبریز، سهند و مراغه هستند.

بررسی منحنی آمبروترمیک ۷۰ ساله ایستگاه تبریز نشان می‌دهد که وضعیت رطوبت در ماه‌های آذر تا اردیبهشت زیاد است و طول فصل مرطوب و خشک هر یک تقریباً ۶ ماه است. نوسان بارندگی در ماه‌های مرطوب

روزانه دام‌ها را با تقریب به‌دست آورد که در پژوهش حاضر نیز به همین منوال عمل شد. به مقدار محاسبه‌شده نیز به‌لحاظ کوهستانی بودن منطقه و نیاز انرژی متابولیسمی دام در چنین شرایطی نسبت به چرای دام در مراتع مسطح بیشتر خواهد بود، مطابق با نظر مک دانلد^۳ (۲۰)، ضریب افزایشی ۳۰٪ لحاظ شد. در پایان، برای تعیین ظرفیت چرای کل مرتع از رابطه ۱ استفاده شد (۱۵):

$$TCC = \frac{A \times SFP \times UR}{ADI \times GP} \quad \text{رابطه ۱:}$$

در رابطه فوق،^۴ TCC نشان‌دهنده ظرفیت چرای کل بر حسب واحد دامی برای کل مرتع، A مساحت مرتع،^۵ SFP معرف تولید کل علوفه فصلی در واحد سطح،^۶ UR ضریب برداشت مجاز،^۷ ADI نیاز روزانه دام به ماده خشک، و^۸ GP طول دوره چرا بر حسب روز می‌باشد.

شبیه‌سازی ظرفیت چرای

شبیه‌سازی ظرفیت چرای با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، ابزاری کارآمد برای درک پیچیدگی‌های حاکم بر سامانه‌های مرتعی و برآورد دقیق‌تر ظرفیت چرای تحت سناریوهای مختلف است (۱۲). در پژوهش حاضر از سه مدل برای پیش‌بینی ظرفیت چرای مراتع استفاده شد که شامل، مدل رگرسیون خطی ساده^۹ برای تحلیل رابطه خطی و تفسیرپذیر متغیرهای اقلیمی و محیطی، مدل^{۱۰} XGBoost برای مدلسازی روابط غیرخطی با کارایی زیاد و کاهش بیش‌برازش (۱۱) و مدل جنگل تصادفی برای ایجاد پایداری پیش‌بینی از طریق ترکیب درختان تصمیم (۹). همه مدل‌ها با داده‌های دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰، پس از پیش‌پردازش و بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی، آموزش داده شدند تا دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی ارزیابی شد.

نوار ۱۰۰m به روش مضاعف برآورد شد. داده‌های اقلیمی نیز از ایستگاه‌های هواشناسی معتبر استخراج و پس از پیش‌پردازش، وارد مدل ریزمقیاس‌نمایی^۱ SDSM شدند تا برای تحلیل سناریوهای تغییر اقلیم و پیش‌بینی ظرفیت چرای دام استفاده شوند.

محاسبه ظرفیت چرای کوتاه‌مدت

ظرفیت چرای کوتاه‌مدت روی‌شگاه‌های منطقه به صورت واحد دامی در هکتار در ماه؛ از تقسیم علوفه قابل برداشت بر مقدار نیاز روزانه معادل واحد دامی چراکننده در طول یک ماه، محاسبه شد. برای این منظور، از ضرب مقدار تولید گونه‌ها در ضرایب درصد خوشخوراکی طبقه‌های گیاهی یا حد بهره برداری مجاز روی‌شگاه (هر کدام که کمتر بود)، مقدار علوفه قابل برداشت، برآورد شد. در این ارتباط، به لحاظ سادگی مدل، درصد خوشخوراکی گیاهان یکساله و گیاهان طبقه I در همه وضعیت‌های مرتع، مساوی یا بیشتر از ۵۰٪، درصد خوشخوراکی گیاهان طبقه II، ۳۰٪ و گیاهان طبقه III، ۲۰٪ لحاظ شد (۶). حد بهره‌برداری مجاز روی‌شگاه نیز، با لحاظ نمودن بیشینه حد بهره‌برداری ۴۰٪ مطابق با نظریه «نصف داشت و نصف برداشت» برای مراتع مناطق نیمه‌خشک و متناسب با تغییرات طبقه وضعیت مرتع، گرایش وضعیت پوشش گیاهی و خاک در سال‌های مختلف و طبقه شایستگی به فرسایش روی‌شگاه، مطابق با دستورالعمل زیر مشخص شد (جدول ۱) (۶).

نیاز روزانه معادل واحد دامی چراکننده در مراتع منطقه نیز که گوسفند در نژاد قزل با میانگین وزن kg ۷۱/۶ است، مطابق با اظهار نظر هولچک^۲ (۱۵)، محاسبه شد. بر اساس این اظهار نظر، نیاز روزانه دام‌های چراکننده در مراتع طبیعی بر حسب ماده خشک به کیلوگرم، ۲٪ وزن بدن دام است که در مواقع خشکسالی این مقدار به ۱/۵٪ وزن بدن، کاهش و در مواقع ترسالی، به ۲/۶٪ وزن بدن دام، افزایش می‌یابد. بدین‌ترتیب با داشتن وزن جنس‌های مختلف دام در سن‌های مختلف، می‌توان نیاز

3 McDonald

4 Total Caring Capacity

5 Seasonal Forage Production

6 Utilization Rate

7 Average Daily Intake

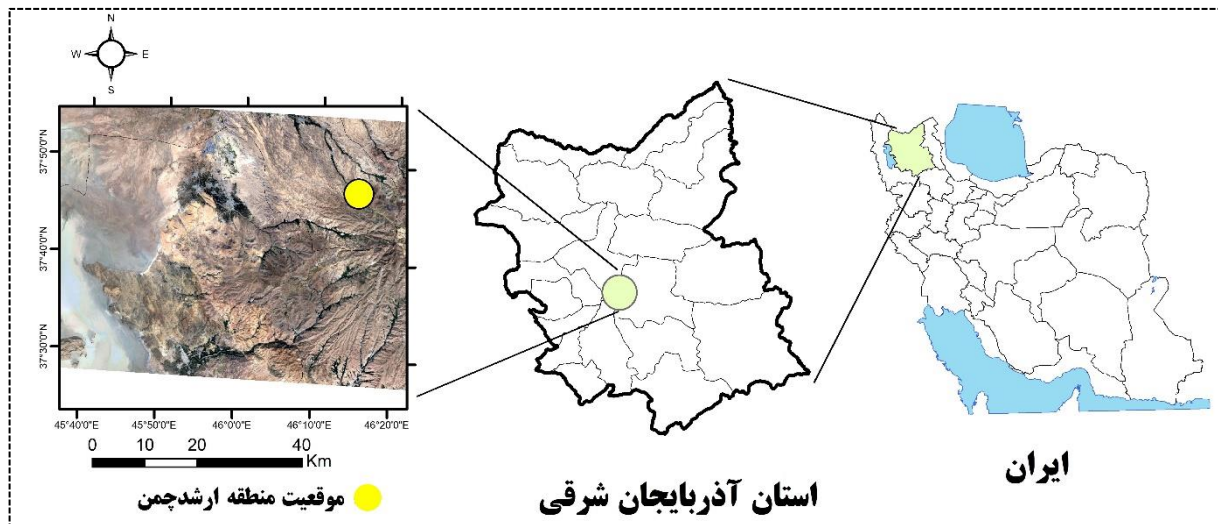
8 Grazing Period

9 Simple Linear Regression

10 eXtreme Gradient Boosting

1 Statistical DownScaling Model

2 Holechek



شکل ۱. نمایی از موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. حدبهره برداری مجاز رویشگاه‌های مرتعی در مناطق نیمه خشک (۶)

طبقه وضعیت مرتع تیپ گیاهی	گرایش وضعیت مرتع	طبقه شایستگی فرسایش	حدبهره برداری مجاز رویشگاه %
خوب یا عالی	مثبت یا ثابت	S_1 یا S_2	۴۰
خوب یا عالی	منفی	S_1 یا S_2	۳۵
متوسط	مثبت یا ثابت	S_1	۳۰
متوسط	مثبت یا ثابت	S_2	۲۵
متوسط	منفی	S_2	۲۰
متوسط	مثبت یا ثابت	S_3	۲۰
متوسط	منفی	S_3	۱۵
ضعیف	مثبت یا ثابت	S_2	۲۰
ضعیف	منفی	S_2	۱۵
ضعیف	مثبت یا ثابت	S_3	۱۵
ضعیف	منفی	N یا S_3	۰

طبقه III، علوفه در دسترس کل^۵، علوفه در دسترس طبقه I، علوفه در دسترس طبقه II، علوفه در دسترس طبقه III، شاخص NDVI، شاخص خشکسالی SPI، شاخص خشکسالی SPEI، دمای کمینه شش ماهه قبل از برداشت^۶، دمای بیشینه شش ماهه قبل از برداشت، بارش شش ماهه قبل از برداشت، دمای میانگین شش ماهه قبل از برداشت، دمای کمینه سه ماهه قبل از برداشت، دمای بیشینه سه ماهه قبل از برداشت، بارش سه ماهه قبل از برداشت، دمای میانگین سه ماهه قبل از برداشت، دمای کمینه سالانه ناسا^۸، دمای بیشینه سالانه ناسا، بارش

در این بررسی، در آغاز پایگاه داده جامع بر اساس داده‌های میدانی و اقلیمی جمع‌آوری شده از مراتع کوهستانی سهند آذربایجان شرقی ایجاد شد. این پایگاه داده شامل ۳۵ متغیر کلیدی بود که از فرم‌های نمونه برداری و داده‌های اقلیمی دریافتی از اداره کل هواشناسی استان و همچنین داده‌های ماهواره‌ای استخراج و سازمان‌دهی شد. متغیرهای مذکور عبارتند از: درصد پوشش گیاهی کل^۱، درصد پوشش گیاهی طبقه I، درصد پوشش گیاهی طبقه II، درصد پوشش گیاهی طبقه III، درصد لاشبرگ^۲، درصد شن و سنگریزه^۳، درصد خاک لخت^۴، تولید کل^۵، تولید طبقه I، تولید طبقه II، تولید

5 Total Production

6 Total Available forage

7 Temperature minimum- Jan to Jun

8 NASA Global Modeling and Assimilation Office
(<https://power.larc.nasa.gov>)

1 Total Vegetation

2 Litter

3 Sand & pavement

4 Bare soil

از دیدگاه بوم‌شناسی مرتع، الگوی مشاهده‌شده حاکی از یک رویشگاه نسبتاً پایدار همراه با نوسان‌ها بین‌سالی است (جدول ۳). در این میان، طبقه I شامل گونه‌های مرغوب و خوشخوراک، بیشترین قابلیت تولید را نشان می‌دهد، درحالی‌که طبقه III شامل گونه‌های کمتر قابل چرا، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات محیطی از خود بروز می‌دهد، به‌گونه‌ای که روند کاهشی آن به آستانه معنی‌داری آماری نزدیک شده است. عدم مشاهده روند کاهشی معنی‌دار در مجموع علوفه را می‌توان به اعمال مدیریت نسبتاً مناسب بهره‌برداری با شدت ۴۰٪ نسبت داد. با این حال، نوسان‌ها مشاهده‌شده احتمالاً تحت تأثیر عواملی مانند خشکسالی‌های دوره‌ای، فشار چرای و تغییرات اقلیمی قرار داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، کاهش علوفه طبقه III از ۱۶۴ kg/ha در سال ۱۳۸۵ به ۱۲۱ kg/ha در سال ۱۴۰۰ می‌تواند نشان‌دهنده افزایش فشار بر گونه‌های کمتر مقاوم باشد.

نتایج تحلیل همبستگی نشان‌دهنده ارتباط بسیار قوی بین علوفه در دسترس و میزان تولید هر یک از طبقه‌های گیاهی با ضریب همبستگی ۰/۹۹ است که بیانگر وابستگی مستقیم علوفه قابل استفاده به تولید اولیه است. همچنین، علوفه کل همبستگی مثبت و قوی (ضریب همبستگی ۰/۹۵) با میانگین تولید نشان داد. در این میان، طبقه‌های I و III با ضرایب همبستگی به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۷۵، نقش غالبی در تعیین مقدار علوفه کل ایفا می‌کنند، در حالی که همبستگی طبقه II با علوفه کل از نظر آماری معنی‌دار نبوده است.

تغییر اقلیمی منطقه

بر اساس داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های تبریز، سهند و مراغه و تحلیل آن، روندی افزایشی در دمای میانگین سالانه طی دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ مشاهده شد (جدول ۴). دمای بیشینه سالانه به‌طور میانگین ۱/۱°C و دمای کمینه حدود ۰/۹°C افزایش نشان داد. بارندگی سالانه نیز روندی کاهشی با میانگین کاهش ۳/۸ mm در هر سال داشت.

سالانه ناسا، دمای میانگین سالانه ناسا، دمای کمینه سالانه واقعی^۱، دمای بیشینه سالانه واقعی، بارش سالانه واقعی و دمای میانگین سالانه واقعی.

این داده‌ها از منابع میدانی مانند اندازه‌گیری‌های پوشش گیاهی، تولید علوفه و وضعیت خاک و ایستگاه‌های هواشناسی تبریز، سهند و مراغه، به همراه داده‌های ماهواره‌ای ناسا گردآوری شدند. سپس، با استفاده از نرم‌افزار R(4.3.1)، کدهای تحلیلی نوشته شد تا روابط بین پارامترها بررسی و مدل‌سازی شود. این کدها شامل پیش‌پردازش داده‌ها مانند نرمال‌سازی، حذف ناهنجاری‌ها و محاسبه همبستگی‌ها، اعمال مدل‌های یادگیری ماشین XGBoost، جنگل تصادفی^۲ و رگرسیون خطی برای شبیه‌سازی ظرفیت چرای بلندمدت بودند. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، مبنای پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر تولید علوفه و ظرفیت چرای قرار گرفت.

اعتبارسنجی مدل

به‌منظور افزایش دقت و کارایی مدل‌ها، فرآیند آموزش و ارزیابی با استفاده از رویکرد نمونه‌برداری تصادفی تکرارشونده انجام شد. در این روش، طی ۱۰ تکرار مستقل، در هر مرحله ۷۰٪ از داده‌ها به‌صورت تصادفی برای آموزش مدل و ۳۰٪ برای آزمون انتخاب شدند (۱۸). عملکرد مدل‌ها با استفاده از سه شاخص اعتبارسنجی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا^۳ (MAE) و ضریب تعیین^۴ (R^2) ارزیابی شد.

■ نتایج

پوشش گیاهی

فهرست گونه‌های گیاهی به همراه طبقه خوشخوراکی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. بر پایه نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی، شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی و علوفه در دسترس برآورد شد. مقدار علوفه قابل استفاده در هر یک از طبقه‌های گیاهی در جدول ۳ ارائه شده است.

¹ Temperature minimum

² Random forest

³ Mean Absolute Error

⁴ Coefficient of determination

جدول ۲. فهرست فلوریستیک منطقه به همراه خوشخوراکی گونه های مورد بررسی

طبقه خوشخوراکی	فرم رویشی	نام فارسی	نام خانواده	نام علمی
III	پهن برگ علفی	بومادران تبریزی	Asteraceae	<i>Achillea cuneatiloba</i> Boiss. & Buhse
II	پهن برگ علفی	آتشین کوهستانی	Cruciferae	<i>Aethionema trinervium</i> (DC.) Boiss.
II	گندمی	دم روباهی بافته	Poaceae	<i>Alopecurus textilis</i> Boiss.
II	پهن برگ علفی	مرجانی میخکی	Caryophyllaceae	<i>Arenaria dianthoides</i> Sm.
III	پهن برگ علفی	مرجانی گچ دوست	Caryophyllaceae	<i>Arenaria gypsophiloides</i> Sm.
III	بوته ای	گون زرد	Fabaceae	<i>Astragalus aureus</i> Willd.
I	پهن برگ علفی	-----	Fabaceae	<i>Astragalus pinnetorum</i>
III	پهن برگ علفی	زیره دانه ریز	Apiaceae	<i>Bunium microcarpum</i> Freyn & Bornm. Bornm.
I	گندمی	جارو علفی	Poaceae	<i>Bromus tomentellus</i> Boiss.
III	پهن برگ علفی	انگنار	Asteraceae	<i>Cirsium haussknechtii</i> Boiss.
III	پهن برگ علفی	زبان پس قفا	Ranunculaceae	<i>Delphinium speciosum</i> M.Bieb.
I	گندمی	علف بره	Poaceae	<i>Festuca ovina</i> L.
I	گندمی	علف بره قرمز	Poaceae	<i>Festuca rubra</i> L.
III	پهن برگ علفی	نجم طلایی	Liliaceae	<i>Gagea confusa</i> (Salmaki & Zarre)
III	پهن برگ علفی	گل بی مرگ طلایی	Asteraceae	<i>Helichrysum psychrophilum</i> Boiss.
III	پهن برگ علفی	گل بی مرگ کروی	Asteraceae	<i>Helychrisum globiferum</i> Boiss.
III	بوته ای	اسپرس پشته ای	Fabaceae	<i>Onobrychis cornuta</i> L.
III	پهن برگ علفی	خشخاش شرقی	Fabaceae	<i>Papaver orientale</i> L.
II	گندمی	چمن آزاراتی	Poaceae	<i>Poa araratica</i> Gand.
III	پهن برگ علفی	هفت بند کوهستانی	Polygonaceae	<i>Polygonum alpestre</i> C.A.Mey.
I	پهن برگ علفی	مینای قره باغی	Asteraceae	<i>Tanacetum chiliophyllum</i> Fisch. & C.A.Mey.
II	پهن برگ علفی	قاصدک	Asteraceae	<i>Taraxacum azerbaijanicum</i> Soest
III	بوته ای	آویشن	Lamiaceae	<i>Thymus kotschyanus</i> Boiss. & Hohen.
III	بوته ای	آویشن تالشی	Lamiaceae	<i>Thymus trautvetteri</i> Klokov & Des.-Shost.
II	پهن برگ علفی	شنگ لبه دار	Asteraceae	<i>Tragopogon marginatus</i> Boiss. & Buhse
II	پهن برگ علفی	سیزاب شرقی	Scrophulariaceae	<i>Veronica orientalis</i> Mill.

* درصد خوشخوراکی گیاهان یکساله و گیاهان طبقه I در همه وضعیت های مرتع، مساوی یا بیشتر از ۵۰٪، درصد خوشخوراکی گیاهان طبقه II، ۳۰٪ و گیاهان طبقه III، ۲۰٪ لحاظ شد (۶).

شد که بیانگر حساسیت زیاد منطقه به گرمایش است. این افزایش تنش حرارتی بر پوشش گیاهی را تشدید کرد و تولید علوفه را کاهش داد؛ به طوری که در پژوهش حاضر کاهش ۱۵/۶٪ تولید علوفه ثبت شد.

دمای کمینه سالانه در سناریوی RCP8.5 افزایش چشمگیری به میزان ۳°C نشان داد که نسبت به درصد تغییر دمای بیشینه یعنی ۱۹/۳٪ بیشتر است. این افزایش دوره های سرد را کاهش داد و بر چرخه های زیستی گیاهان تأثیر گذاشت؛ به ویژه در مراتع کوهستانی که به دماهای کمتر وابسته هستند. در نتیجه، مقاومت گونه های گیاهی طبقه I کاهش یافت و در پژوهش حاضر کاهش ۲۳/۵٪ پوشش گیاهی این طبقه مشاهده شد.

ریزمقیاس نمایی داده های^۱ GCM با مدل SDSM تحت سناریوی RCP8.5 نشان داد که تا سال ۲۱۰۰، بارندگی تا ۵۲٪ کاهش خواهد یافت و میانگین دما تا ۲/۷°C افزایش می یابد که معادل ۲۶٪ افزایش نسبت به میانگین پایه است (جدول ۵). این تغییرات بیانگر خطر تشدید خشکسالی های متوالی در منطقه است.

نتایج نشان دهنده افزایش قابل توجه دمای بیشینه سالانه زیر سناریوی RCP8.5 به عنوان بدترین سناریو است. این افزایش به میزان ۳/۳°C تأثیرات شدید تغییر اقلیم را بر گرمایش منطقه نشان می دهد. حتی در سناریوی خوش بینانه RCP2.6 نیز افزایش ۱/۷°C مشاهده

¹ General Circulation Models

جدول ۳. میزان تولید و علوفه در دسترس طبقه‌های گیاهی در منطقه مورد مطالعه

ردیف	سال	وضعیت مرتع	گرایش مرتع	طبقه شایستگی فرسایش	درصد حد بهره‌برداری مجاز از رویشگاه	میانگین تولید kg/ha	تولید طبقه‌های گیاهی			علوفه در دسترس طبقه‌های گیاهی		
							گیاهان طبقه I	گیاهان طبقه II	گیاهان طبقه III قابل چرا	گیاهان طبقه I قابل چرا	گیاهان طبقه II قابل چرا	گیاهان طبقه III قابل چرا
۱	۱۳۸۵	خوب	مثبت	S2	۴۰	۱۲۴۹/۸	۷۴۱/۳	۹۹/۳	۴۰۹/۲	۲۹۶/۵	۲۹/۸	۸۱/۸
۲	۱۳۸۶	خوب	مثبت	S2	۴۰	۱۱۲۰/۶	۶۱۳/۱	۱۲۶	۳۸۱/۵	۲۴۵/۲	۳۷/۸	۷۶/۳
۳	۱۳۸۷	خوب	مثبت	S2	۴۰	۱۱۰۰/۶	۵۷۹/۲	۱۳۲/۷	۳۸۸/۷	۲۳۱/۷	۳۹/۸	۷۷/۷
۴	۱۳۸۸	خوب	مثبت	S2	۴۰	۱۰۲۳/۰	۵۷۶	۱۰۵/۱	۳۴۱/۹	۲۳۰/۴	۳۱/۵	۶۸/۴
۵	۱۳۸۹	خوب	ثابت	S2	۴۰	۱۱۰۷/۵	۶۲۵/۹	۱۴۸/۴	۳۳۳/۲	۲۵۰/۴	۴۴/۵	۶۶/۶
۶	۱۳۹۰	خوب	مثبت	S2	۴۰	۱۱۵۷/۶	۶۸۱/۲	۹۶/۶	۳۷۹/۸	۲۷۲/۵	۲۹/۰	۷۶/۰
۷	۱۳۹۱	خوب	مثبت	S2	۴۰	۱۱۵۹/۹	۶۳۸/۵	۱۳۰/۲	۳۹۱/۲	۲۵۵/۴	۳۹/۱	۷۸/۲
۸	۱۳۹۲	خوب	ثابت	S2	۴۰	۱۰۸۶/۶	۵۹۰/۹	۱۲۲/۵	۳۷۳/۲	۲۳۶/۴	۳۶/۸	۷۴/۶
۹	۱۳۹۳	خوب	منفی	S2	۳۵	۱۰۹۹/۶	۶۱۷/۷	۱۱۴/۵	۳۶۷/۴	۲۱۶/۲	۳۴/۴	۷۳/۵
۱۰	۱۳۹۴	خوب	ثابت	S2	۴۰	۱۱۴۴/۳	۶۵۱	۱۶۷/۷	۳۲۵/۶	۲۶۰/۴	۵۰/۳	۶۵/۱
۱۱	۱۳۹۵	خوب	ثابت	S2	۴۰	۱۱۶۲/۷	۶۳۱/۸	۱۶۴/۹	۳۶۶	۲۵۲/۷	۴۹/۵	۷۳/۲
۱۲	۱۳۹۶	خوب	ثابت	S2	۴۰	۱۱۶۷/۶	۷۳۵/۵	۸۷/۱	۳۴۵	۲۹۴/۲	۲۶/۱	۶۹/۰
۱۳	۱۳۹۷	خوب	ثابت	S2	۴۰	۱۱۵۹/۹	۶۳۸/۵	۱۳۰/۲	۳۹۱/۲	۲۵۵/۴	۳۹/۱	۷۸/۲
۱۴	۱۳۹۸	خوب	منفی	S2	۳۵	۱۱۴۳/۹	۶۲۹/۷	۱۲۷/۹	۳۸۶/۳	۲۲۰/۴	۳۸/۴	۷۷/۳
۱۵	۱۳۹۹	خوب	منفی	S2	۳۵	۱۰۳۸/۳	۵۶۷/۹	۱۱۳/۲	۳۵۷/۲	۱۹۸/۸	۳۴/۰	۷۱/۴
۱۶	۱۴۰۰	خوب	منفی	S2	۳۵	۱۰۵۴/۳	۶۱۳/۴	۱۳۸	۳۰۲/۹	۲۱۴/۷	۴۱/۴	۶۰/۶

جدول ۴. روند تغییر اقلیمی منطقه سهند ۱۳۸۵-۱۴۰۰

متغیر	سال ۱۳۸۵	سال ۱۴۰۰	تغییر مطلق	% تغییر
دمای میانگین °C	۱۳/۴۲	۱۴/۲۹	+۰/۸۷	+۰/۶۱
دمای کمینه °C	۸/۱۵	۸/۶۵	+۰/۹	+۰/۵۱
دمای بیشینه °C	۱۹/۴۷	۲۰/۵۳	+۱/۰۶	+۰/۵۲
بارش سالانه mm	۳۰۵/۱۵	۲۴۳/۶	-۶۱/۵۵	-۰/۲۵

جدول ۵. پیش‌بینی تغییر متغیرهای اقلیمی تا سال ۲۱۰۰ با استفاده از مدل SDSM

سناریو/دما	میانگین مشاهداتی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	تغییر نسبت به RCP8.5	% تغییر
میانگین دمای بیشینه سالانه °C	۱۸/۱۶	۱۹/۸۵	۲۰/۲۳	۲۱/۴۴	+۳/۲۸	+۱۵/۳
میانگین دمای کمینه سالانه °C	۱۲/۳۱	۱۳/۸۲	۱۴/۱۴	۱۵/۲۶	+۲/۹۵	+۱۹/۳
میانگین دمای سالانه °C	۷/۴۷	۸/۹۵	۹/۱۳	۱۰/۱۵	+۲/۶۸	+۲۶/۴

تغییرات ظرفیت چرای

ظرفیت چرای کوتاه‌مدت از ۷/۳ واحد دامی در هکتار در ماه در سال ۱۳۸۵ به ۵/۷ واحد دامی در سال ۱۴۰۰ کاهش یافت (جدول ۶). نتایج مدل‌سازی بلندمدت نشان داد که در صورت تداوم روند کنونی و رخ دادن سناریوی RCP8.5، ظرفیت چرای تا سال ۱۴۳۰ حدود ۵٪ نسبت به سال ۱۴۰۰ کاهش بیشتری خواهد یافت (جدول ۷).

دقت مدل‌های یادگیری ماشین

مقایسه مدل‌ها نشان داد که XGBoost با ضریب تعیین $R^2=0.96$ و $RMSE=0.32$ بهترین عملکرد را داشت. در مقابل مدل جنگل تصادفی با $R^2=0.85$ عملکرد قابل قبولی ارائه داد، هرچند به طور محسوسی ضعیف‌تر از XGBoost بود (جدول ۸).

جدول ۶. تغییرات سالانه پوشش گیاهی، متغیرهای اقلیمی و ظرفیت چرای

سال	پوشش گیاهی کل %	تولید علوفه کل kg/ha	علوفه در دسترس kg/ha	بارش mm	میانگین دما °C	SPEI ۱۲ ماهه	NDVI	ظرفیت چرای *
۱۳۸۵	۶۹/۱۲	۱۲۴۹/۸	408/2	۳۰۵/۱۳	۱۳/۴۲	-۰/۲۴۳	۰/۱۷۳	7/3
۱۳۸۶	۶۹/۳۵	۱۱۲۰/۶	359/3	۲۲۹/۹۵	۱۲/۷۱	-۰/۳۳۴	۰/۱۶۴	6/4
۱۳۸۷	۶۶/۱۸	۱۱۰۰/۶	349/2	۱۷۱/۵۳	۱۳/۲۴	-۱/۸۷۷	۰/۱۲۵	6/3
۱۳۸۸	۵۷/۹۶	۱۰۲۳/۰	330/3	۲۴۱/۹۱	۱۳/۰۹	-۱/۱۴۷	۰/۱۴۱	5/9
۱۳۸۹	۶۲/۴۰	۱۱۰۷/۵	361/5	۱۸۳/۹۲	۱۴/۹۳	-۰/۲۹۸	۰/۱۷۷	6/5
۱۳۹۰	۶۵/۲۰	۱۱۵۷/۶	377/4	۲۸۳/۲۳	۱۲/۳۷	-۰/۹۶۲	۰/۱۶۹	6/8
۱۳۹۱	۶۹/۰۹	۱۱۵۹/۹	372/7	۲۱۷/۱۹	۱۳/۴۳	-۰/۹۴۳	۰/۱۹۱	6/7
۱۳۹۲	۶۵/۱۵	۱۰۸۶/۶	347/8	۲۶۲/۵۴	۱۲/۸۹	-۱/۰۷۸	۰/۱۸۱	6/2
۱۳۹۳	۶۲/۳۷	۱۰۹۹/۶	324/0	۳۱۳/۹۸	۱۳/۶۸	-۰/۸۱	۰/۱۶۶	5/8
۱۳۹۴	۶۴/۳۷	۱۱۴۴/۳	375/8	۲۸۲/۶۴	۱۳/۶۱	-۰/۰۹۶	۰/۱۹۰	6/7
۱۳۹۵	۶۶/۶۸	۱۱۶۲/۷	375/4	۲۹۰/۹۷	۱۲/۸۷	-۰/۱۵۲	۰/۱۹۷	6/7
۱۳۹۶	۶۲/۳۹	۱۱۶۷/۶	389/3	۲۰۴/۳۶	۱۳/۳۵	-۰/۸۵۲	۰/۱۴۱	7/0
۱۳۹۷	۶۹/۰۹	۱۱۵۹/۹	372/7	۳۸۸/۷۴	۱۴/۶۶	-۰/۱۲۱	۰/۱۹۹	6/7
۱۳۹۸	۶۷/۰۶	۱۱۴۳/۹	336/0	۲۶۴/۹۹	۱۳/۵۹	-۱/۰۷۲	۰/۱۶۸	6/0
۱۳۹۹	۶۰/۲۲	۱۰۳۸/۳	304/2	۳۴۵/۶۶	۱۲/۹۸	-۰/۱۳۷	۰/۱۵۵	5/4
۱۴۰۰	۵۸/۸۲	۱۰۵۴/۳	316/7	۲۴۳/۶۰	۱۴/۲۹	-۰/۷۶۸	۰/۱۵۱	5/7

* واحد دامی در هکتار در ماه

جدول ۷. پیش‌بینی ظرفیت چرای مراتع سهند و مقدار تغییر نسبت به سال پایه

سال	ظرفیت چرای AUM/ha/yr	تغییر نسبت به سال پایه %
۱۳۸۵	۷/۳	---
۱۳۹۰	۶/۸	٪-۶/۸۴
۱۳۹۵	۶/۷	٪-۸/۲۲
۱۴۰۰	۵/۷	٪-۲۱/۹۲
پیش‌بینی ۱۴۳۰	۵/۴۷*	٪-۲۵/۱

* بر پایه مدل XGBoost

جدول ۸. مقایسه دقت مدل‌های پیش‌بینی ظرفیت چرای

مدل	R ²	RMSE	MAE	کاهش ظرفیت تا ۱۴۳۰
رگرسیون خطی	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۵۲	٪-۲/۵
XGBoost	۰/۹۶	۰/۳۲	۰/۲۸	٪-۳/۵
جنگل تصادفی	۰/۸۵	۰/۴۷	۰/۴۱	٪-۳

■ بحث و نتیجه‌گیری

است (۲۱). بر اساس شبیه‌سازی‌های اقلیمی با مدل SDSM و زیر سناریوی RCP8.5، تا پایان قرن حاضر کاهش ۵۲٪ بارش سالانه و افزایش دمای بیشینه، کمینه و میانگین به‌ترتیب به میزان ۳/۳، ۲/۷ و ۳°C پیش‌بینی شد (۱۰). این تغییرات موجب افزایش طول دوره‌های خشکسالی و کاهش ظرفیت چرای از ۷/۳ به ۷/۵ واحد دامی در هکتار در ماه معادل ۲۱/۹٪ خواهد شد (۱۰). ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین نشان داد که

بر اساس نتایج حاصل، کاهش تولید علوفه، به‌ویژه در طبقه‌های گیاهی I و III، همزمان با کاهش پوشش گیاهی کل از ۶۹٪/۱ به ۵۸٪/۸ رخ داده‌است که نشان‌دهنده تضعیف ساختار بوم‌سازگان مرتعی است (۲۲). شاخص NDVI از ۰/۱۷ به ۰/۱۵ کاهش یافت، که با منفی شدن شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه از ۰/۱۰ به -۰/۱۹ - همخوانی دارد و نشان‌دهنده تشدید خشکسالی هواشناسی

۱۴۳۰ برای کاستن از فشار چرای و حفظ تعادل بوم‌سازگان پیشنهاد می‌شود (۲۳، ۲۲). اجرای برنامه‌های احیای مرتع با اولویت‌دهی به گونه‌های مقاوم و همراهی جوامع محلی، همراه با پایش مستمر از طریق شاخص‌های NDVI و SPEI، شناسایی به‌موقع روندهای تخریبی و تدوین سیاست‌های پایدار را امکان‌پذیر می‌سازد (۲۲، ۱۶). همچنین، مدیریت کارآمد منابع آب، از جمله ذخیره و بهره‌برداری از رواناب‌ها، برای مقابله با کاهش پیش‌بینی‌شده حدود ۵۲٪ بارش تا سال ۲۰۵۰ ضروری است. این رویکرد علاوه بر کنترل فرسایش خاک، در حفظ تنوع زیستی نیز مؤثر خواهد بود (۲۸).

رویکردهای یکپارچه و مشارکتی علاوه بر تقویت اقتصاد محلی، می‌تواند از مهاجرت روستایی جلوگیری کند و با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد همخوانی داشته باشد. پژوهش‌های آینده می‌تواند اثر گونه‌های گیاهی مقاوم به گرمایش و خشکسالی بر ظرفیت چرای را با داده‌های ماهواره‌ای پیشرفته و در مراتع مشابه در البرز و زاگرس بررسی کند. تحلیل ترکیبی عوامل انسانی و اقلیمی و به‌روزرسانی مدل‌ها با داده‌های جدید دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش خواهد داد. استفاده از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء برای پایش واقعی‌زمان نیز توصیه می‌شود.

محدودیت‌های پژوهش شامل دوره ۱۶ ساله و دسترسی محدود به داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بیشتر بود. با این حال، روش تحقیق دقیق و داده‌های معتبر صحت نتایج را تضمین می‌کنند. بدون مداخله، مراتع سهند در معرض خطر جدی تخریب قرار دارند، اما با اجرای راهبردهای مبتنی بر شواهد، می‌توان پایداری بوم‌سازگان را حفظ کرد. این یافته‌ها الهام‌بخش پژوهش‌های بیشتر در مدیریت بوم‌سازگان‌های حساس در برابر تغییر اقلیم بوده و بر ضرورت همکاری بین‌المللی تأکید دارند.

نتایج پژوهش حاضر نشان‌دهنده تأثیر عمیق تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی و تولید علوفه در مراتع کوهستانی سهند است، که با الگوهای جهانی همخوانی دارد، اما شرایط محلی نظیر ارتفاع بالا و کوتاه بودن دوره رویشی شدت این تغییر را تشدید کرده است. در دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰، تولید کل علوفه از ۱۲۵۰ به ۱۰۵۴ kg/ha معادل

مدل XGBoost با مقدار R^2 برابر با ۰/۹۶، RMSE معادل ۰/۳۲ و MAE برابر با ۰/۲۸، از دقت بیشتری در پیش‌بینی کاهش حدود ۵٪ ظرفیت چرای تا سال ۱۴۳۰ برخوردار است، در حالیکه مدل جنگل تصادفی با R^2 معادل ۰/۸۵ عملکرد متوسط‌تری دارد (۱۱، ۹). این اختلاف عملکرد به توانایی بیشتر XGBoost در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی شامل دما و بارش و متغیرهای بوم‌شناختی شامل تولید علوفه و پوشش گیاهی نسبت داده می‌شود، به‌طوری‌که همبستگی مثبت بارش با تولید علوفه با $r=0.72$ و همبستگی منفی دما با تولید با $r=-0.65$ به‌خوبی بازنمایی شد.

بر اساس داده‌های پژوهش حاضر و بررسی‌های مرتبط، در منطقه مورد مطالعه، افزایش ۵/۶٪ دمای میانگین با کاهش ۱۵٪ پوشش گیاهی همراستا است (۲۴). این شرایط با کاهش دسترسی به منابع آب و تشدید تنش‌های گیاهی که در بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه خشک گزارش شده، همخوانی دارد و از طریق کاهش ۲۰٪ بارش و مقادیر منفی شاخص SPEI در این مطالعه نیز تأیید می‌شود (۴). چنین تغییراتی، حساسیت بالای مراتع سهند را نسبت به نوسان‌های دمایی که با ویژگی‌های بوم‌شناختی محلی نیز سازگاری دارد، برجسته می‌سازد (۱۷). در این راستا، کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین و به‌ویژه الگوریتم XGBoost، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر ظرفیت چرای و مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرهای اقلیمی و بوم‌شناختی را فراهم کرده است (۳۲).

مطابق با نتایج پژوهش حاضر و هم‌سو با بررسی‌های پیشین، شاخص SPEI ابزاری کارآمد برای تحلیل جامع خشکسالی شناخته شد که قابلیت گسترده‌ای برای استفاده در پژوهش‌های آینده دارد (۱۹). کاهش تولید علوفه و پوشش گیاهی درک عمیق‌تری از پاسخ بوم‌سازگان به افزایش دما و کاهش بارش ارائه می‌دهد و با چارچوب‌های نظری مقاومت و پایداری بوم‌سازگان‌ها هماهنگی کامل دارد (۳۱). این یافته‌ها علاوه بر قابلیت تعمیم به مراتع مشابه در سطح منطقه، می‌تواند مبنای ارزشمندی برای مدل‌سازی‌های بوم‌سازگانی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی فراهم آورد (۲۶).

از منظر کاربردی، کاهش حدود ۲۰٪ تعداد دام تا سال

بر نگرشی یکپارچه و فرابخشی تأکید دارد؛ چرا که پایداری این بوم‌سازگان‌ها تنها با تلفیق دانش علمی، مشارکت محلی و همسویی سیاست‌های کلان با واقعیت‌های اقلیمی حاصل می‌شود. این یافته‌ها چارچوبی برای بررسی‌های آیندنگرانه در مناطق کوهستانی و تدوین برنامه‌های انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر تغییرات محیطی فراهم می‌آورد.

سپاسگذاری

این پژوهش با حمایت و پشتیبانی دانشگاه تهران انجام شده است. نویسندگان از دانشگاه تهران به‌خاطر در اختیار گذاشتن امکانات و تجهیزات نرم‌افزاری لازم، صمیمانه سپاسگزارند.

۱۵/۶٪ کاهش یافت و علوفه در دسترس نیز از ۴۰۸/۲ به ۳۱۶/۷ kg/ha با کاهشی معادل ۲۲/۴٪ کاهش داشت. همچنین می‌توان بیان کرد که زیر تأثیر تغییر اقلیمی (ترکیب افزایش دما و کاهش بارش)، کارکرد بوم‌شناختی، ظرفیت تولیدی و پایداری مراتع کوهستانی سهند روندی نگران‌کننده و نزولی داشته‌است. این شرایط، ضرورت عبور از شیوه‌های مدیریتی سنتی و اتخاذ راهبردهای سازگار، پیش‌گیرانه و مبتنی بر پایش مستمر را ایجاب می‌کند. بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده، تداوم روندهای کنونی تنش‌های بوم‌سازگان را تشدید و تاب‌آوری آن را کاهش می‌دهد. از این‌رو، ارکان مدیریت پایدار شامل تنظیم چرایی بر اساس ظرفیت پویای مرتع، ترویج گونه‌های بومی و مقاوم، حفاظت جامع آب‌وخاک و بهره‌گیری از ابزارهای نوین پایش و مدل‌سازی پیشنهاد می‌شود. پژوهش حاضر

References

- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V., & Prakash, A. (2022). Cross-Chapter Paper 5: Mountains. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2273–2318). Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.022
- Aghajanoloo, F., & Akbarzadeh, P. (2025). Evaluation of vegetation changes in rangelands in relation to climatic indicators (Case study: Badamestan rangeland, Tarom city). *Journal of Rangeland*, 19(1), 32–51. [20.1001.1.20080891.1404.19.1.3.6](https://doi.org/10.1001.1.20080891.1404.19.1.3.6) [In Persian]
- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165(2), 351–372. doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x
- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. J. E. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1–55. doi.org/10.1890/ES15-00203.1
- Arzani, H. (2009). *Forage quality and daily livestock grazing requirements in rangelands*. Tehran: University of Tehran Press. [In Persian]
- Arzani, H., Ahmadi, H., Jafari, M., Azarnivand, H., Salajegheh, A., & Tavili, A. (2008). Manual of determination criteria and index rangeland suitability. Forest, Range and Watershed Management Organization press. [In Persian]
- Askarizadeh, D., Arzani, H., Jafari, M., Bazrafshan, J., & Prentice, A. C. (2018). Surveying of the past, present, and future of vegetation changes in the central Alborz rangelands in relation to climate change. *Remote Sensing and GIS for Natural Resources*, 9(3), 1–18. [http://doi.org/10.1001.1.26767082.1397.9.3.1.5](https://doi.org/10.1001.1.26767082.1397.9.3.1.5). [In Persian]
- Azad, A. A., Farajzadeh Asl, M., & Borna, R. (2019). Analysis of the impact of climate change on the quality of natural habitats (Case study: Sahand Mountain). *Journal of Natural Geography*, 12(44), 1–15. [20.1001.1.20085656.1398.12.44.1.0](https://doi.org/10.1001.1.20085656.1398.12.44.1.0) [In Persian]

9. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. (Kluwer Academic Publishers) doi.org/10.1023/A:1010933404324
10. Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedback. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 673–816). Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157896.007
11. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794). Association for Computing Machinery. doi.org/10.1145/2939672.2939785
12. Delandmeter, M., de Faccio Carvalho, P. C., Bremm, C., dos Santos Cargnelutti, C., Bindelle, J., & Dumont, B. (2024). Integrated crop and livestock systems increase both climate change adaptation and mitigation capacities. *Science of the Total Environment*, 912, Article 169061. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169061
13. Ghahramani, A., Howden, S. M., del Prado, A., Thomas, D. T., Moore, A. D., Ji, B., & Ates, S. (2019). Climate change impact, adaptation, and mitigation in temperate grazing systems: A review. *Sustainability*, 11(24), Article 7224. doi.org/10.3390/su11247224
14. Higgins, S. I., Conradi, T., & Muhoko, E. J. (2023). Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends. *Nature Geoscience*, 16(2), 147–153. doi.org/10.1038/s41561-022-01114-x
15. Holechek, J. L., Pieper, R. D., & Herbel, C. H. (2004). *Range management: Principles and practices* (5th ed.). Prentice Hall. (607 pages).
16. Jafari, M., Tavili, A., Panahi, F., Zandi Esfahan, E., & Ghorbani, M. (2018). *Reclamation of arid lands*. Springer New York, NY. (426 pages). doi.org/10.1007/978-3-319-54828-9
17. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: With applications in R*. Springer New York, NY. (607 pages). doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7
18. Jewitt, D., Erasmus, B. F. N., Goodman, P. S., O'Connor, T. G., & Witkowski, E. T. F. (2015). Climate-induced change of environmentally defined floristic domains: A conservation-based vulnerability framework. *Applied Geography*, 63, 33–42. doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.004
19. Keshtkar, H., & Pourmohammad, P. (2022). Mapping spatial patterns of plant species based on machine-learning and regression models. *Desert*, 27(1), 167–181. doi.org/10.22059/jdesert.2022.88514
20. McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., & Morgan, C. A. (2010). *Animal nutrition* (7rd ed.). Addison-Wesley Longman Ltd. (708 pages).
21. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). *American Meteorological Society*.
22. Motamedi, J., Mohebi, A., & Alizadeh, K. (2024). Nomads' understanding of the effects of climate change and their adaptation strategies in the semi-desert rangeland of southeast Isfahan. *Journal of Range and Watershed Management*, 76(4), 373–388. doi.org/10.22059/jrwm.2023.360026.1710. [In Persian].
23. Najibzadeh, M. R., Bayat, M., Nateghi, S., & Pezeshki, M. H. (2019). Investigating the effects of different harvesting intensities on forage production in Sahand rangelands of Eastern Azerbaijan Province, Iran. *Journal of Rangeland Science*, 9(2), 87–96. [In Persian]
24. Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37–42. doi.org/10.1038/nature01286
25. International Livestock Research Institute, International Union for Conservation of Nature, Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Wide Fund for Nature, United Nations Environment Programme, & International Land Coalition. (2021). *Rangelands Atlas*. ILRI. <https://hdl.handle.net/10568/114064>

26. Rezaei, M., Naderi, F., & Hosseinzadeh, M. (2023). Evaluation of national development programs in the environmental sector and proposing strategies for the seventh program. *Journal of Parliament and Strategy*, 30(115), 335–374. doi.org/10.22034/mr.2023.5562.5366. [In Persian].
27. Rostami, F., Attarod, P., Keshtkar, H., & Nazeri Tahroudi, M. (2022). Impact of climatic parameters on the extent of mangrove forests of southern Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 20(4), 671-682. <https://doi.org/10.22124/CJES.2022.5719>
28. Rostampour, M., & Saghari, M. (2022). Evaluating drought effects on soil properties and plant species diversity of *Ammodendron persicum* reserve in Haji Abad rangelands, South Khorasan. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 9(26), 87–102. doi.org/10.22052/deej.2020.9.26.41. [In Persian].
29. Sardari, F., Arzani, H., & Javadi, S.A. (2019). Range suitability classification for Baluchi sheep grazing in Saravan Rangelands. *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 26(4), 1042-1054. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120713>
30. Sheikhzadeh Ghahnaviyeh, A., Tarkesh Esfahani, M., Bashari, H., & Soltani Koupaie, S. (2021). Investigating geographical shifts of *Astragalus* versus under climate change scenarios using random-forest modeling (Case study: Isfahan and Chaharmahal va Bakhtiari provinces). *Journal of Rangeland*, 15(4), 589–602. [In Persian].
31. Smyth, A. K., Brandle, R., Chewings, V. H., Fleming, M., & James, C. (2009). A framework for assessing regional biodiversity condition under changing environments of the arid Australian rangelands. *The Rangeland Journal*, 31(1), 87–101. doi.org/10.1071/RJ08047
32. Tavakolian, J. (2000). *A perspective on the genetic resources of native livestock and poultry in Iran*. Animal Science Research Institute Press. (451 pages). [in persian]
33. Wang, F., & Tian, D. (2022). On deep learning-based bias correction and downscaling of multiple climate models simulations. *Climate Dynamics*, 59(11–12), 3451–3468. doi.org/10.1007/s00382-022-06277-2

