



نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۴۹

- ۱ توسعه یک روش کارآمد مبتنی بر آموزش ماشین و داده‌های زمینی و ماهواره‌ای برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در ایران

ماهان عزیزی - علی عباسی

- ۲۹ پیش‌بینی و تحلیل احتمال وقوع تغییرات اقلیمی و کمبود آب در یزد

محمد رضا گودرزی - مریم صباغ زاده

- ۴۹ تطبیق پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات شرکت نفت با آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ایران

نیما شهبازی - ایمان عشایری

- ۶۵ بررسی رفتار برشی ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوستتیک در بستر ماسه‌ای

عادل شکیبی نژاد - سجاد قلی‌پور - مسعود مکارچیان

- ۷۳ بررسی آزمایشگاهی همبستگی مدول برجهنگی و مقاومت فشاری تک‌محوری در تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس بستر راه

سیامک شفقتیان - غلام مرادی

- ۱۰۱ بررسی تأثیر اعتماد بین ذی‌نفعان کلیدی، بر موفقیت پروژه‌های ساخت ایران

مجید پرچی جلال - مینا علمدار

سر دبیر: محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید محمود حسینی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر ناصر حافظی مقدس	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر شهناز دانش	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر غلامرضا رخشنده رو	استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده راه و ساختمان
دکتر محمدحسین سبط	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر فرزاد شهبابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکترحسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون مقدس نژاد	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر ابوالفضل محمدزاده مقدم	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

مسئول دفتر نشریه: تکتّم هوشمند

ویراستار ادبی: الهام دهقان

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی باغبان- تکتّم هوشمند

<http://www.srlst.com>

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود.

نشانی: مشهد- دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

وب سایت: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir> پست الکترونیکی: civil-ferdowsi@um.ac.ir شماره تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۲۴

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

- ۱ توسعه یک روش کارآمد مبتنی بر آموزش ماشین و داده‌های زمینی و ماهواره‌ای برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در ایران
ماهان عزیزی - علی عباسی
- ۲۹ پیش‌بینی و تحلیل احتمال وقوع تغییرات اقلیمی و کمبود آب در یزد
محمد رضا گودرزی - مریم صباغ زاده
- ۴۹ تطبیق پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات شرکت نفت با آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ایران
نیما شهبازی - ایمان عشایری
- ۶۵ بررسی رفتار برشی ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک در بستر ماسه‌ای
عادل شکیبی‌نژاد - سجاد قلی‌پور - مسعود مکارچیان
- ۷۳ بررسی آزمایشگاهی همبستگی مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک‌محوری در تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس بستر راه
سیامک شفق‌تیان - غلام مرادی
- ۱۰۱ بررسی تأثیر اعتماد بین ذی‌نفعان کلیدی، بر موفقیت پروژه‌های ساخت ایران
مجید پرچمی جلال - مینا علمدار



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of
Iran**

Developing a Robust Data-Driven Model Based on Ground and Satellite Measured Data for Agricultural Drought Prediction in Iran

Research Article

Mahan Azizi¹, Ali Abbasi²

DOI: [10.22067/jfcej.2024.88855.1311](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.88855.1311)

1. Introduction

In recent decades, global warming has intensified climate change, resulting in more frequent and severe climatic events, including droughts. The detrimental effects of these phenomena on ecosystems and human societies have¹ become increasingly apparent. Drought, a slow-onset yet destructive natural hazard, is typically defined as a prolonged period of abnormally low precipitation relative² to historical averages. Since drought is an inherent climatic phenomenon, effective mitigation of its adverse impacts depends on the availability of timely and accurate forecasts. Consequently, drought indices—which quantify complex interactions between climatic and environmental¹ variables—serve as vital tools for drought monitoring and prediction.

Recent advances in machine learning have significantly² enhanced the modeling of drought and climate indices. Integrating machine learning techniques with traditional drought indices offers a robust approach to improving³ drought forecasting and management. This study aims to develop a high-precision machine learning model for predicting agricultural drought in Iran using the⁴ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), a widely recognized metric for drought assessment. The proposed model seeks to provide actionable insights to support agricultural planning and drought risk mitigation.

2. Methodology

Data Collection

Meteorological and remote sensing data were collected from 70 stations across Iran, including variables such as air temperature, precipitation, land surface temperature, and vegetation indices. Ground-based measurements were supplemented with satellite-derived datasets to ensure

comprehensive spatial coverage.

Feature Selection

To optimize model performance, two feature selection techniques were employed:

Filter Method: Identified predictors with the strongest statistical correlations to the target SPEI index for use as model inputs.

LASSO Regression: Reduced model complexity by applying regularization constraints, thereby eliminating less influential variables.

Machine Learning Algorithms

Four algorithms were implemented for SPEI prediction:

Bias-Corrected Random Forest: A modified Random Forest variant that incorporates bias correction to improve accuracy under diverse climatic conditions.

Random Forest: An ensemble method aggregating predictions from multiple decision trees to enhance stability and reduce overfitting.

Support Vector Machine (SVM): A kernel-based algorithm that classifies drought/non-drought events by mapping data into higher-dimensional feature spaces.

Multilayer Perceptron (MLP): A feedforward neural network capable of learning non-linear patterns through iterative training on hidden layers.

3. Model Evaluation

Model performance was assessed using four metrics:

- **Mean Squared Error (MSE)** and **Root MSE (RMSE):** Quantified prediction errors.
- **Mean Absolute Error (MAE):** Measured average deviation from observed values.
- **R-squared (R^2):** Evaluated the proportion of variance explained by the model.

4. Results

As demonstrated in Tables 1 and 2, the Bias-Corrected

* Manuscript received July 8, 2024, Revised August 18, 2024, Accepted November 12, 2024.

¹ M.Sc. graduate of Water Resources Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email:** aabbasi@um.ac.ir

Random Forest outperformed other models in SPEI prediction:

- **Cluster 1 (Arid regions):** Achieved $R^2 = 0.9858$ and $RMSE = 0.1190$, reflecting exceptional accuracy.
- **Cluster 2 (Semi-arid/humid regions):** Yielded $R^2 = 0.9809$ and $RMSE = 0.1375$, indicating strong predictive capability across diverse climates.

Table 1: Results of Drought Prediction Modeling in Cluster 1 Using Machine Learning Algorithms

Machine Learning Algorithm	Feature Selection Method	R^2	RMSE	MSE	MAE
Multilayer Perceptron	Filter	0.9834	0.1286	0.0165	0.0894
	LASSO	0.9852	0.1210	0.0147	0.0853
Support Vector Machine	Filter	0.9822	0.1330	0.0177	0.0915
	LASSO	0.9848	0.1229	0.0151	0.0839
Random Forest	Filter	0.9832	0.1302	0.0170	0.0911
	LASSO	0.9858	0.1191	0.0142	0.0820
Bias-Corrected Random Forest	Filter	0.9841	0.1263	0.0160	0.0879
	LASSO	0.9858	0.1190	0.0142	0.0821

Table 2: Results of Drought Prediction Modeling in Cluster 2 Using Machine Learning Algorithms

Machine Learning Algorithm	Feature Selection Method	R^2	RMSE	MSE	MAE
Multilayer Perceptron	Filter	0.9770	0.1512	0.0229	0.1141
	LASSO	0.9876	0.1457	0.0213	0.1088
Support Vector Machine	Filter	0.9763	0.1534	0.0235	0.1144
	LASSO	0.9803	0.1401	0.0197	0.1045
Random Forest	Filter	0.9761	0.1578	0.0250	0.1164
	LASSO	0.9800	0.1404	0.0198	0.1059
Bias-Corrected Random Forest	Filter	0.9779	0.1496	0.0225	0.1109
	LASSO	0.9809	0.1375	0.0189	0.1031

The bias-corrected Random Forest model demonstrated superior performance compared to other algorithms, owing to its capacity to effectively integrate diverse datasets while applying systematic bias corrections. Subsequently, the optimal model's outputs were utilized to generate agricultural drought zoning maps based on the SPEI index. These maps serve as valuable tools for identifying drought-prone regions and evaluating drought severity across different areas.

The resulting agricultural drought zoning maps, produced from the model's seasonal predictions, provide detailed insights into the spatial distribution and intensity of drought conditions throughout Iran. As illustrated in Figure 1, the analysis reveals distinct seasonal patterns: northern regions (Gilan and Mazandaran) exhibit relatively wet conditions during spring, while central and southern areas experience more severe drought. Furthermore, Figure 2 highlights how rising temperatures

and reduced precipitation in summer exacerbate drought severity, particularly in parts of Mazandaran, Gilan, Ardabil, and East Azerbaijan.

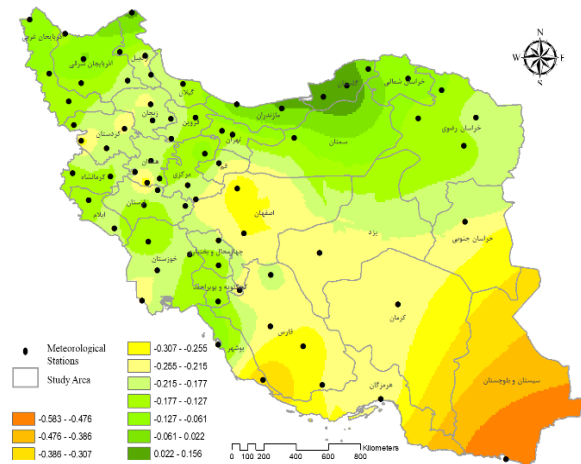


Figure 1: Agricultural Drought Zoning Map in Spring 2021

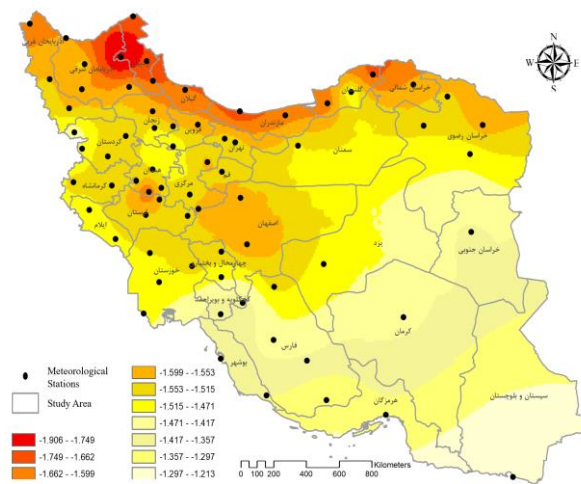


Figure 2: Agricultural Drought Zoning Map in Summer 2021

5- Conclusion

This study demonstrates that integrating multi-source data with the Bias-Corrected Random Forest algorithm significantly enhances drought prediction accuracy. The resulting drought zoning maps, derived from the optimized model, provide policymakers and agricultural experts with actionable insights to improve water resource management and strategic planning.

The findings indicate that this modeling approach can generate precise drought forecasts for diverse regions across Iran. By enabling more effective resource allocation and drought mitigation strategies, the model has the potential to reduce adverse impacts on agricultural productivity and the national economy.



توسعه یک روش کارآمد مبتنی بر آموزش ماشین و داده‌های زمینی و ماهواره‌ای برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در ایران*

مقاله پژوهشی

علی عباسی^(۲)

ماهان عزیزی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.88855.1311

چکیده خشکسالی یکی از خطرناک‌ترین وقایع طبیعی برای هر کشور به حساب می‌آید. به همین علت نظارت و پیش‌بینی این پدیده در دنیای امروز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این پژوهش، از شاخص خشکسالی SPEI که از معروف‌ترین شاخص‌های خشکسالی به شمار می‌رود، برای پیش‌بینی خشکسالی استفاده شده است. برای محاسبه این شاخص، ترکیبی از داده‌های زمینی و سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به وزن مختلف هر کدام از این داده‌ها در محاسبه شاخص خشکسالی، ابتدا پارامترهای مؤثر توسط روش‌های انتخاب پارامتر مؤثر مانند روش فیلتر و روش لاسو برگزیده شده و به عنوان پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از چهار روش یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و پرسپترون چندلایه شاخص خشکسالی محاسبه شده است. برای اعتبارسنجی نتایج هر کدام از این مدل‌ها، از شاخص‌های $RMSE$ ، R^2 ، MSE و MAE استفاده شده و سپس بر اساس مقادیر این شاخص‌ها، مدل جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده با مقادیر $R^2 = 0.9858$ و $RMSE = 0.1190$ برای خوشه ۱ و $R^2 = 0.9809$ و $RMSE = 0.1375$ برای خوشه ۲ به عنوان مدل دارای بهترین عملکرد انتخاب شده است. در نهایت از نتایج مدل پهنه برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی به منظور شناسایی و طبقه‌بندی مناطق مستعد به شرایط خشکسالی استفاده گردید. این نقشه‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با توزیع و شدت خشکسالی در مناطق مختلف در اختیار ذی‌نفعان و متخصصان قرار دهند.

واژه‌های کلیدی خشکسالی، سنجش از دور، یادگیری ماشین، شاخص خشکسالی SPEI، نقشه پهنه‌بندی خشکسالی.

Developing a Robust Data-Driven Model Based on Ground and Satellite Measured Data for Agricultural Drought Prediction in Iran

Mahan Azizi

Ali Abbasi

Abstract Drought is considered one of the most hazardous natural phenomena for any country. Therefore, monitoring and forecasting this phenomenon are of critical importance in today's world. To this end, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), one of the most applied drought indices, was employed for drought prediction. To calculate this index, a combination of ground-based and remote sensing data was utilized. Given the different weights of each of these data types in calculating the drought index, the most relevant parameters were first selected using feature selection methods such as the Filter method and the LASSO method and were considered as input parameters for the model. Furthermore, artificial intelligence was utilized to apply various machine learning algorithms, resulting in the development of several models. These algorithms included Bias-Corrected Random Forest, Random Forest, Support Vector Machine, and Multilayer Perceptron. To validate the results of each of these models, indices such as $RMSE$, R^2 , MSE , and MAE were used. Based on the values of these indices, the Bias-Corrected Random Forest model with $R^2 = 0.9858$ and $RMSE = 0.1190$ for cluster 1 and $R^2 = 0.9809$ and $RMSE = 0.1375$ for cluster 2 was selected as the best-performing model. Finally, the results of the optimized model were used to create drought zoning maps to identify and classify areas prone to drought conditions. These maps can provide valuable information on the distribution and intensity of drought across different regions to stakeholders and experts.

Key Words Drought, Remote sensing, Machine learning, SPEI drought index, Drought maps

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۲۲ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مقدمه

امروزه تغییر اقلیم یکی از معضلات بزرگ جهان به شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر پیرو گرمایش زمین و افزایش میانگین دمای هوا، فجایع اقلیمی نظیر خشکسالی نیز به گونه‌ای شدت پیدا کرده‌اند که اثرات آن‌ها به وضوح بر اکوسیستم و زندگی انسان قابل مشاهده است. خشکسالی پدیده‌ای خزنه و زیان‌بار است که عموماً به حالتی اطلاق می‌شود که میزان بارندگی در یک مدت زمان مشخص از مقدار آستانه مشخص شده کمتر باشد. از آن‌جا که خشکسالی یک پدیده طبیعی است، مقابله با اثرات منفی آن تنها در صورتی امکان‌پذیر است که در مورد وقوع آن هشدار قبلی و به موقعی داده شود [1]. به همین جهت وجود یک سیستم کارآمد برای پیش‌بینی این پدیده امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. بدین منظور استفاده از شاخص‌های خشکسالی که رابطه پیچیده‌ای با اقلیم و محیط دارند، به عنوان روشی مؤثر برای پیش‌بینی و پایش خشکسالی شناخته می‌شود [2]. به طور کلی شاخص‌های خشکسالی ابزارهایی هستند که در تشخیص شروع، شدت و پایان خشکسالی به کمک انسان می‌آیند. نحوه عملکرد این شاخص‌ها بدین صورت می‌باشد که هزاران بیت داده در مورد بارندگی، برف، پوشش گیاهی و... را دریافت کرده، آن‌ها را در بازه‌های زمانی مختلف تجزیه و تحلیل کرده و در نهایت به یک تصویر قابل درک تبدیل می‌کنند.

یکی از مهم‌ترین مراحل در نظارت و تحلیل خشکسالی، استفاده از شاخص‌های خشکسالی مناسب است. به طور کلی، شاخص خشکسالی یک متغیر اصلی برای تعیین مدت و شدت خشکسالی و ارزیابی تأثیرات آن است. با این حال، به دلیل پیچیدگی تعاریف خشکسالی، ارزیابی جامع و سیستماتیک ویژگی‌های خشکسالی در یک منطقه مشخص تنها با یک شاخص امکان‌پذیر نیست. در همین راستا، صدها شاخص خشکسالی توسط محققان در سراسر جهان توسعه یافته است. این شاخص‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: شاخص‌های مبتنی بر زمین، و شاخص‌های سنجش از دوری.

شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین معمولاً از اندازه‌گیری‌های زمینی متغیرهای هواشناسی، مانند بارندگی و

دما، به دست می‌آیند. این شاخص‌ها قادرند به طور دقیق و مؤثر خشکسالی را در اطراف ایستگاه‌های اقلیمی نظارت کنند. برخی از آن‌ها شامل شاخص PDSI[3]، شاخص SPI[4] و شاخص SPEI[5] هستند.

اما برای پوشش گستره مکانی شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین، شاخص‌های سنجش از دور بر اساس داده‌های ماهواره‌ای توسعه یافته‌اند. داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای شامل اطلاعاتی از قبیل بارندگی، دما، تبخیر و تعرق، و پوشش گیاهی هستند که همگی پوشش پیوسته و لحظه‌ای دارند. در دهه‌های اخیر، شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور متعددی مانند شاخص NDVI [6]، شاخص NDDI [7]، و شاخص NMDI [8] توسعه یافته‌اند. با این حال، با وجود اینکه این شاخص‌ها کمبودهای شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین در پوشش مکانی را برطرف می‌کنند، اما از آن‌جا که داده‌های آن‌ها نسبتاً کوتاه‌مدت هستند، نمی‌توانند به طور کامل جایگزین مشاهدات مبتنی بر زمین در بحث نظارت بر خشکسالی شوند. علاوه بر این، کیفیت شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور می‌تواند تحت تأثیر شرایط جوی (مانند ابرها) نیز قرار گیرد.

به طور کلی، در موضوع نظارت بر خشکسالی، شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین معمولاً دقیق‌تر از شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور در نظر گرفته می‌شوند. این امر عمدتاً به این دلیل است که متغیرهای اقلیمی استخراج شده از اندازه‌گیری‌های زمینی معمولاً دقیق‌تر هستند. علاوه بر این، اکثر شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین به طور مستقیم تعادل میان آب و خاک را نظارت می‌کنند نه اطلاعات غیرمستقیم پوشش گیاهی. همچنین، بسیاری از شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور که به تازگی توسعه یافته‌اند نیز معمولاً نیاز به صحت‌سنجی با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر زمین دارند تا اعتبار آن‌ها اثبات گردد [9]. در سالیان اخیر کاربردهای مدل‌های یادگیری ماشین، پیشرفت چشمگیری در مدل‌سازی شاخص‌های خشکسالی و اقلیم‌شناسی از خود نشان داده‌اند [10]. لذا به کارگیری همزمان مدل‌های یادگیری ماشین و شاخص‌های خشکسالی می‌تواند

پایش وضعیت خشکسالی در این ایستگاه استفاده شد. نتایج نشان داد که تابع هسته‌ای خطی در روش ماشین بردار پشتیبان نسبت به دو تابع دیگر دقت بیشتری داشته است.

توفانر و اوزبیاز (۲۰۲۰) [14] نیز در پژوهشی به تخمین شاخص شدت خشکسالی پالمر در منطقه آدیامان واقع در کشور ترکیه پرداختند. در این پژوهش پارامترهای شاخص شدت خشکسالی پالمر به کمک چهار روش رگرسیونی و یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و درخت تصمیم تخمین زده شدند. نتایج پژوهش نشان داد که الگوریتم‌های استفاده شده با شاخص شدت خشکسالی پالمر سازگاری داشته و مدل‌های رگرسیونی محاسبات تخمین شاخص شدت خشکسالی پالمر را تسهیل می‌کنند که این امر برای مطالعات آنالیز و پیش‌بینی خشکسالی بسیار کارآمد می‌باشد. فنگ و همکاران (۲۰۱۹) [15] نیز در مطالعه‌ای از سی عامل خشکسالی مبتنی بر روش‌های سنجش از دور برای بازتولید شاخص SPEI میان سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۷ برای منطقه نیو ساوث ولز در جنوب شرقی استرالیا استفاده کردند. در این پژوهش سه روش پیشرفته یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه، به عنوان مدل‌های رگرسیون در این روش به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده از دو مدل دیگر برای پیش‌بینی شاخص عملکرد بهتری دارد.

موضوع خشکسالی و سازگاری با آن در ایران نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. مجموعه داده‌های شاخص PDSI از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۵ نشان داده است که شدت خشکسالی در ایران، به ویژه در شمال غرب و شمال شرق کشور افزایش یافته است [16]. به گونه‌ای که تنها در سال ۲۰۰۱، حدود هشت میلیون هکتار از اراضی کشاورزی ایران تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفت و میلیون‌ها دلار خسارت به کشور وارد کرد [17]. لذا لزوم ایجاد مدلی کارآمد برای پیش‌بینی این مخاطره طبیعی در ایران، امری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌آید. بنابراین، می‌توان اهداف اصلی این پژوهش را بدین ترتیب بیان کرد:

ابزار قدرتمندی برای نظارت، پیش‌بینی و مدیریت خشکسالی‌ها فراهم آورد. در همین راستا تلاش‌های بسیاری توسط محققان متعدد صورت پذیرفته است تا بتوان داده‌ها را از منابع مختلف ترکیب کرد و شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین را با استفاده از مدل‌های داده‌محور مبتنی بر یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و... بازتولید کرد. به عنوان مثال کوثری و همکاران (۲۰۱۷) [11] در مطالعه‌ای یک روش پیش‌بینی خشکسالی منطقه‌ای بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی و شاخص SPI در سری‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه در استان فارس ایران برای معرفی مدلی جهت پیش‌بینی خشکسالی ارائه نمودند. در این پژوهش از داده‌های بارندگی ۴۱ ایستگاه باران‌سنجی برای محاسبه مقادیر شاخص بارش استاندارد استفاده شد و آزمایش‌های مکرر و اعتبارسنجی آن‌ها برای به دست آوردن بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد مقادیر پیش‌بینی شده شش ماهه اول به طور میانگین ۷۳ درصد تطابق با مقادیر مشاهده شده را داراست. مختارزاد و همکاران (۲۰۱۷) [12] نیز در پژوهشی برای پیش‌بینی خشکسالی از شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی و ماشین بردار پشتیبان استفاده کرده و نتایج این روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها بدین منظور از تمام داده‌های هواشناسی (دما، رطوبت و بارندگی) ایستگاه بجنورد واقع در ایران، میان سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۲ در مقیاس زمانی سه ماهه استفاده گردید تا در نهایت شاخص SPI به عنوان خروجی به دست آید. نتایج نشان داد که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان مدل دقیق‌تری را برای پیش‌بینی ارائه می‌دهد. در پژوهشی دیگر عباسی و همکاران (۲۰۲۰) [13] به بررسی وضعیت خشکسالی در ایستگاه سینوپتیک سقز در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با سه تابع هسته‌ای خطی، چند جمله‌ای و پایه شعاعی و شبکه بیزین پرداختند. برای این منظور از شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت یک و سه ماهه، میان‌مدت شش و ۱۲ ماهه و بلندمدت ۲۴ و ۴۸ ماهه در طی دوره آماری ۴۹ ساله برای

یا چند ایستگاه هواشناسی برای هر استان معین و انتخاب شده و سپس تمامی محاسبات برای محل قرارگیری این ایستگاه‌ها صورت پذیرفت. بر اساس اطلاعات به دست آمده از نشریه سهم و رتبه استان‌ها بر اساس متغیرهای مهم بخش کشاورزی [18] که توسط مرکز آمار ایران منتشر گردیده است، می‌توان استان‌های کشور را بر اساس درصد مساحت اراضی کشاورزی استان از مساحت کل اراضی کشاورزی کشور، بین چهار دسته مختلف تقسیم‌بندی کرد. در ادامه، پس از تخصیص دادن تمامی استان‌ها به یکی از چهار دسته تعریف شده، از هر استان بنا به تعلق به هر یک از دسته‌های ذکر شده به ترتیب ۴، ۳، ۲ و ۱ ایستگاه هواشناسی انتخاب گردید. انتخاب این ایستگاه‌ها از میان مجموع ۴۵۵ ایستگاه سینوپتیک متعلق به سازمان هواشناسی کشور صورت گرفته است. جدول (۱) نمایانگر جزئیات این دسته‌بندی می‌باشد. **Error! Reference source not found.** نیز محل‌های قرارگیری ایستگاه‌های منتخب را در سراسر کشور نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که از ۷۵ ایستگاه پیش‌بینی شده برای این پژوهش، مجموعاً چهار ایستگاه از استان‌های زنجان، خراسان شمالی، همدان و کرمان به علت عدم پوشش‌دهی کامل بازه زمانی مورد نظر در زمینه فراهم بودن داده از سوی سازمان هواشناسی کشور و نیز یک ایستگاه از استان سیستان و بلوچستان به علت عدم پوشش‌دهی منطقه مورد نظر از سوی سنجنده مادیس، مورد تأمین داده قرار نگرفته و به ناچار حذف گردیدند. مشخصات و اطلاعات کلی این ایستگاه‌ها در ادامه و در قالب جدول (۲) ارائه شده است.

در این پژوهش، بازه زمانی ۲۲ ساله از دی ماه ۱۳۷۹ هجری شمسی مصادف با ژانویه ۲۰۰۱ میلادی لغایت دی ماه ۱۴۰۱ شمسی مصادف با ژانویه ۲۰۲۳ میلادی انتخاب شده و مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱. تهیه نقشه پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی.
 ۲. یافتن مناسب‌ترین پارامترها و شاخص‌های خشکسالی مؤثر در ایجاد مدل پیش‌بینی خشکسالی.
 ۳. اعمال الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین و یافتن دقیق‌ترین و بهینه‌ترین الگوریتم.
- ضمناً می‌توان به طور کلی مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش را که حد تمایزی بین این مطالعه و سایر مطالعات پیشین انجام شده بر روی منطقه مورد مطالعه می‌باشند، در این موارد خلاصه کرد:
۱. بهره گرفتن همزمان از داده‌های زمینی و داده‌های سنجش از دوری به منظور افزایش دقت مدل‌سازی با توجه گستردگی منطقه مورد مطالعه.
 ۲. افزایش دقت مدل‌سازی در مناطق با اهمیت کشاورزی بالاتر از طریق تخصیص ایستگاه‌های جمع‌آوری داده بیشتر به استان‌های با سهم بالاتر از مجموع مساحت اراضی زراعی کشور.
 ۳. بهره گرفتن از دو روش متفاوت برای انتخاب پارامترهای مؤثر و چهار الگوریتم یادگیری ماشین متفاوت به منظور انتخاب دقیق‌ترین مدل ایجاد شده.

مواد و روش‌ها

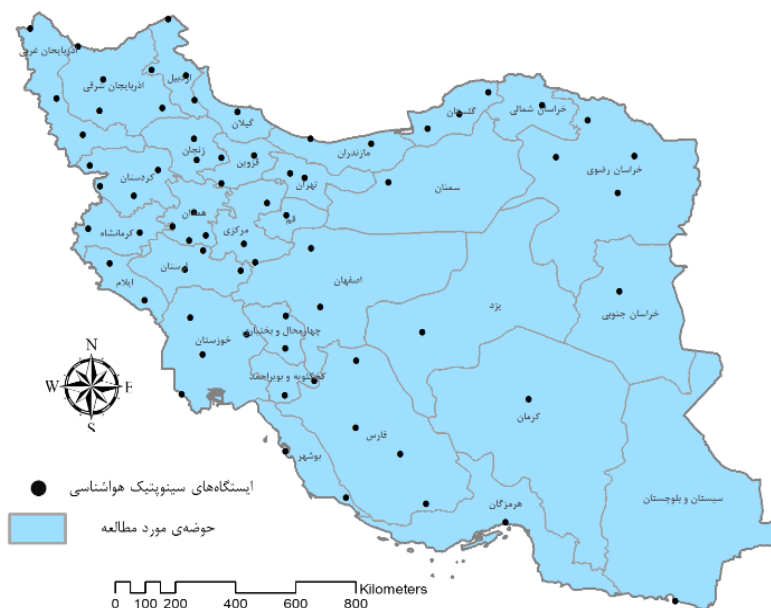
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه انتخابی در این پژوهش کشور ایران می‌باشد. ایران با مساحتی بیش از ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع، کشوری پهناور محسوب می‌شود. به همین علت و نیز به دلیل گستردگی این مساحت بین عرض جغرافیایی ۲۵ الی ۴۰ درجه شمالی، مناطق مختلف کشور شرایط اقلیمی و آب و هوایی متنوعی را در فصول مختلف تجربه می‌کنند. به همین منظور، اهمیت کشاورزی و در پی آن اهمیت اعمال دقت دوچندان در پیش‌بینی خشکسالی در مناطق مختلف کشور، با توجه به تفاوت‌های چشمگیر میان این مناطق، بسیار حائز اهمیت است.

لذا در ابتدا با توجه به تقسیمات رسمی استانی در کشور ایران، که به تعداد ۳۱ استان تفکیک شده است، با در نظر گرفتن معیار سهم هر استان از کل مساحت اراضی زراعی کشور، یک

جدول ۱ جزئیات دسته‌بندی استان‌های کشور بر اساس اهمیت کشاورزی

نام دسته	استان	سهم ایستگاه‌های استان از مجموع ایستگاه‌های مورد مطالعه (درصد)
الف (سهم بیش از ۵ درصد از کل اراضی زراعی کشور)	خراسان رضوی	۵/۷۱٪
	خوزستان	۵/۷۱٪
	آذربایجان شرقی	۵/۷۱٪
	کردستان	۵/۷۱٪
	فارس	۵/۷۱٪
	اردبیل	۵/۷۱٪
	همدان	۴/۲۹٪
	زنجان	۴/۲۹٪
	لرستان	۴/۲۹٪
ب (سهم بین ۳ تا ۵ درصد از کل اراضی زراعی کشور)	آذربایجان غربی	۴/۲۹٪
	کرمانشاه	۴/۲۹٪
	مرکزی	۴/۲۹٪
	گلستان	۴/۲۹٪
	قزوین	۲/۸۶٪
پ (سهم بین ۱ تا ۳ درصد از کل اراضی زراعی کشور)	اصفهان	۲/۸۶٪
	بوشهر	۲/۸۶٪
	ایلام	۲/۸۶٪
	مازندران	۲/۸۶٪
	کهگیلویه و بویراحمد	۲/۸۶٪
	چهارمحال و بختیاری	۲/۸۶٪
	خراسان شمالی	۱/۴۳٪
	کرمان	۱/۴۳٪
	سیستان و بلوچستان	۱/۴۳٪
ت (سهم کمتر از ۱ درصد از کل اراضی زراعی کشور)	گیلان	۱/۴۳٪
	خراسان جنوبی	۱/۴۳٪
	سمنان	۱/۴۳٪
	تهران	۱/۴۳٪
	هرمزگان	۱/۴۳٪
	البرز	۱/۴۳٪
	یزد	۱/۴۳٪
	قم	۱/۴۳٪



شکل ۱ منطقه مورد مطالعه به همراه محل قرارگیری ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

جدول ۲ مشخصات کلی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در این پژوهش

استان	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین بارندگی سالانه (میلی متر)	میانگین دمای سالانه (درجه سانتی گراد)
خراسان رضوی	مشهد	۵۹/۶	۳۶/۲	۲۲۷	۱۵/۹
	سبزوار	۵۷/۶	۳۶/۲	۱۷۶	۱۸/۲
	قوچان	۵۸/۴	۳۷/۱	۳۲۴	۱۲/۵
	تربت حیدریه	۵۹/۲	۳۵/۳	۲۲۱	۱۴/۷
خوزستان	اهواز	۴۸/۷	۳۱/۳	۱۹۳	۲۶/۷
	آبادان	۴۸/۲	۳۰/۴	۱۳۴	۲۶/۶
	ایذه	۴۹/۹	۳۱/۸	۵۷۰	۲۳/۸
	صفی آباد (دزفول)	۴۸/۴	۳۲/۳	۲۸۶	۲۴/۴
آذربایجان شرقی	تبریز	۴۶/۲	۳۸/۱	۲۵۷	۱۳/۴
	جلفا	۴۵/۶	۳۸/۹	۲۲۴	۱۵/۵
	میانه	۴۷/۷	۳۷/۴	۲۶۲	۱۴/۴
	مراغه	۴۶/۱	۳۷/۳	۲۵۲	۱۳/۷
کردستان	سنندج	۴۷/۰	۳۵/۳	۳۵۰	۱۴/۶
	بانه	۴۵/۹	۳۶/۰	۶۹۰	۱۴/۳
	بیجار	۴۷/۶	۳۵/۹	۳۲۰	۱۲/۰
	مریوان	۴۶/۲	۳۵/۵	۸۶۱	۱۳/۶
فارس	شیراز	۵۲/۶	۲۹/۵	۲۸۴	۱۹/۱
	لار	۵۴/۴	۲۷/۷	۱۸۸	۲۴/۸
	آباده	۵۲/۶	۳۱/۲	۱۳۷	۱۴/۹
	فسا	۵۳/۷	۲۸/۹	۲۵۶	۱۹/۹

ادامه جدول ۳ مشخصات کلی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در این پژوهش

استان	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین بارندگی سالانه (میلی متر)	میانگین دمای سالانه (درجه سانتی گراد)
اردبیل	اردبیل	۴۸/۳	۳۸/۲	۲۵۹	۱۰/۱
	مشکین شهر	۴۷/۵	۳۸/۴	۳۷۶	۱۱/۲
	خلخال	۴۸/۵	۳۷/۶	۳۷۱	۹/۲
	پارس آباد	۴۷/۹	۳۹/۶	۲۷۱	۱۵/۱
همدان	فرودگاه همدان	۴۸/۵	۳۴/۹	۳۰۲	۱۲/۴
	نهاوند	۴۸/۴	۳۴/۲	۳۶۵	۱۴/۹
	ملایر	۴۸/۸	۳۴/۳	۳۴۰	۱۳/۹
زنجان	زنجان	۴۸/۵	۳۶/۷	۲۸۶	۱۱/۹
	خرم دره	۴۹/۲	۳۶/۲	۲۹۷	۱۲/۷
	خداپنده	۴۸/۶	۳۶/۱	۳۸۴	۱۱/۵
لرستان	خرم آباد	۴۸/۳	۳۳/۴	۴۶۱	۱۷/۵
	بروجرد	۴۸/۸	۳۳/۹	۴۶۲	۱۵/۳
	الیگودرز	۴۹/۷	۳۳/۴	۳۹۱	۱۳/۲
آذربایجان غربی	ارومیه	۴۵/۱	۳۷/۷	۳۰۳	۱۱/۹
	مهاباد	۴۵/۷	۳۶/۸	۳۷۸	۱۳/۸
	ماکو	۴۴/۴	۳۹/۴	۳۲۲	۱۱/۲
کرمانشاه	کرمانشاه	۴۷/۲	۳۴/۴	۳۸۹	۱۶/۱
	سرپل ذهاب	۴۵/۹	۳۴/۵	۳۸۷	۲۰/۶
	کنگاور	۴۸/۰	۳۴/۵	۳۷۲	۱۳/۶
مرکزی	اراک	۴۹/۸	۳۴/۱	۳۰۱	۱۴/۶
	ساوه	۵۰/۴	۳۵/۱	۱۸۴	۱۹/۹
	خمین	۵۰/۱	۳۳/۶	۲۹۲	۱۵/۶
گلستان	گرگان	۵۴/۴	۳۶/۹	۴۹۰	۱۷/۷
	گنبد کاووس	۵۵/۲	۳۷/۳	۴۳۰	۱۹/۳
	مراوه تپه	۵۵/۹	۳۷/۸	۳۶۳	۱۸/۰
قزوین	قزوین	۵۰/۰	۳۶/۲	۳۰۱	۱۴/۴
	آوج	۴۹/۲	۳۵/۶	۳۷۳	۱۱/۹
اصفهان	اصفهان	۵۱/۷	۳۲/۵	۱۳۱	۱۷/۵
	کاشان	۵۱/۵	۳۴/۰	۱۲۳	۱۹/۸
بوشهر	فرودگاه بوشهر	۵۰/۸	۲۹/۰	۲۲۴	۲۵/۷
	جم	۵۲/۴	۲۷/۸	۳۱۳	۲۶/۱
ایلام	ایلام	۴۶/۴	۳۳/۶	۵۰۹	۱۷/۰
	دهلران	۴۷/۳	۳۲/۷	۲۶۱	۲۶/۹
مازندران	ساری	۵۳/۰	۳۶/۵	۷۴۷	۱۷/۸
	نوشهر	۵۱/۵	۳۶/۷	۱۳۱۸	۱۶/۸

ادامه جدول ۴ مشخصات کلی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در این پژوهش

استان	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)	میانگین دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد)
کهگیلویه و بویراحمد	یاسوج	۵۱/۶	۳۰/۷	۷۷۱	۱۵/۱
	دوگنبدان	۵۰/۸	۳۰/۳	۴۰۹	۲۳/۴
چهارمحال و بختیاری	شهرکرد	۵۰/۸	۳۲/۳	۳۰۹	۱۱/۸
	لردگان	۵۰/۸	۳۱/۵	۵۴۸	۱۶/۰
خراسان شمالی	بجنورد	۵۷/۳	۳۷/۵	۲۴۳	۱۳/۵
کرمان	کرمان	۵۷/۰	۳۰/۳	۱۱۱	۱۷/۴
سیستان و بلوچستان	چابهار	۶۰/۷	۲۵/۳	۱۲۰	۲۶/۷
گیلان	رشت	۴۹/۶	۳۷/۳	۱۲۸۳	۱۶/۵
خراسان جنوبی	بیرجند	۵۹/۳	۳۲/۹	۱۳۲	۱۷/۰
سمنان	سمنان	۵۳/۴	۳۵/۶	۱۳۰	۱۸/۸
تهران	فرودگاه مهرآباد	۵۱/۳	۳۵/۷	۲۳۵	۱۸/۶
هرمزگان	بندرعباس	۵۶/۴	۲۷/۲	۱۳۱	۲۷/۳
البرز	کرج	۵۰/۹	۳۵/۸	۲۶۱	۱۶/۱
یزد	یزد	۵۴/۳	۳۱/۹	۵۱	۲۰/۷
قم	قم	۵۰/۹	۳۴/۸	۱۴۱	۱۹/۰

داده‌ها

خشکسالی به مانند اغلب رویدادهای اقلیمی پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر متغیرها و عوامل متعددی قرار دارد. به همین علت، درک این عوامل و متغیرها برای درک علل، اثرات و راهبردهای کاهش احتمالی اثرات چنین رویدادهایی بسیار حائز اهمیت است. در این میان، خشکسالی به تنهایی وابسته به طیف بسیار گسترده‌ای از این متغیرها و عوامل می‌باشد. لذا واضح است که مورد ارزیابی قرار دادن شرایط خشکسالی در حالی که تمامی عوامل تأثیرگذار بر آن در نظر گرفته شده و در پیش‌بینی آن لحاظ گردیده، امری طولانی، بسیار هزینه‌بر و نیازمند انجام محاسبات بسیار سنگین است. با این حال، در این پژوهش به دلیل گستردگی منطقه مورد مطالعه و نیز به منظور افزایش دقت عملکرد مدل، از متغیرها و شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین و سنجش از دوری متعددی استفاده شده است. تمامی این متغیرها و شاخص‌ها برای بازه زمانی ۲۲ ساله مورد مطالعه، جمع‌آوری گردیده و مورد استفاده قرار

گرفته‌اند. خلاصه‌ای از این داده‌ها و شاخص‌ها در قالب جدول (۳) ارائه شده است.

در ادامه به منظور دستیابی به مقیاسی واحد، تمامی متغیرها و شاخص‌های استخراج شده به تفکیک ماهانه تغییر مقیاس داده شده و نیز برای در نظر گرفتن پاسخ تأخیری ناشی از اثر تأخیری یک متغیر بر دیگری، علاوه بر مقادیر ماهانه، میانگین متحرک سه ماهه برای تمامی داده‌ها و شاخص‌های موجود در این مطالعه، محاسبه شده و نهایتاً از روش Z-score برای استانداردسازی تمامی این داده‌ها استفاده شده است. Z-score یک تکنیک پرکاربرد برای استانداردسازی داده‌ها است که مقادیر را به گونه‌ای تبدیل می‌کند که میانگین آن‌ها صفر و انحراف از معیار آن‌ها یک باشد. این روش به کمک رابطه (۱) قابل تعریف است. در این رابطه x_s نشان‌دهنده مقادیر استاندارد شده، x نشان‌دهنده مقادیر اولیه، μ میانگین تمام داده‌ها و σ انحراف از معیار داده‌ها می‌باشند.

$$x_s = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

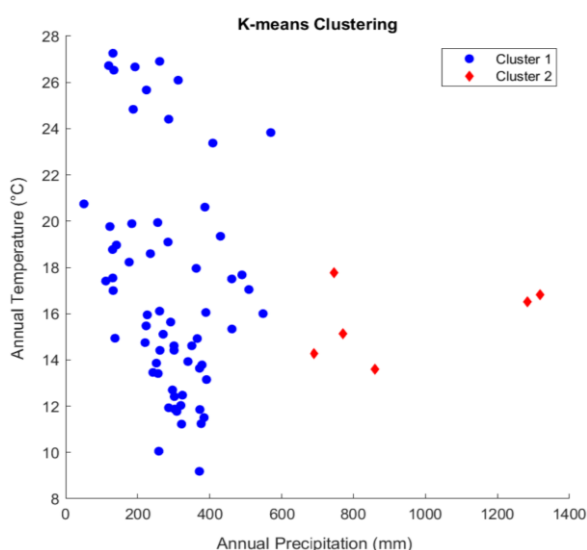
جدول ۵ خلاصه داده‌ها و شاخص‌های مورد استفاده

داده‌ها	منبع دسترسی	نام محصول	تفکیک زمانی	تفکیک مکانی
دمای هوا	سازمان هواشناسی کشور [28]	میانگین دمای ماهانه	ماهانه	ایستگاه
بارندگی	سازمان هواشناسی کشور [28]	مجموع بارش ماهانه	ماهانه	ایستگاه
	GPM [29]	GPMv6	نیم ساعته	۱۱۱۳۲ متر
دمای سطح زمین	MODIS [30]	MOD11A1	روزانه	۱۰۰۰ متر
NDVI	MODIS [31]	MOD09GA	روزانه	۵۰۰ متر
EVI	MODIS [31]	MOD09GA	روزانه	۵۰۰ متر
NMDI	MODIS [31]	MOD09GA	روزانه	۵۰۰ متر
NDWI	MODIS [31]	MOD09GA	روزانه	۵۰۰ متر
NDDI	MODIS [31]	MOD09GA	روزانه	۵۰۰ متر

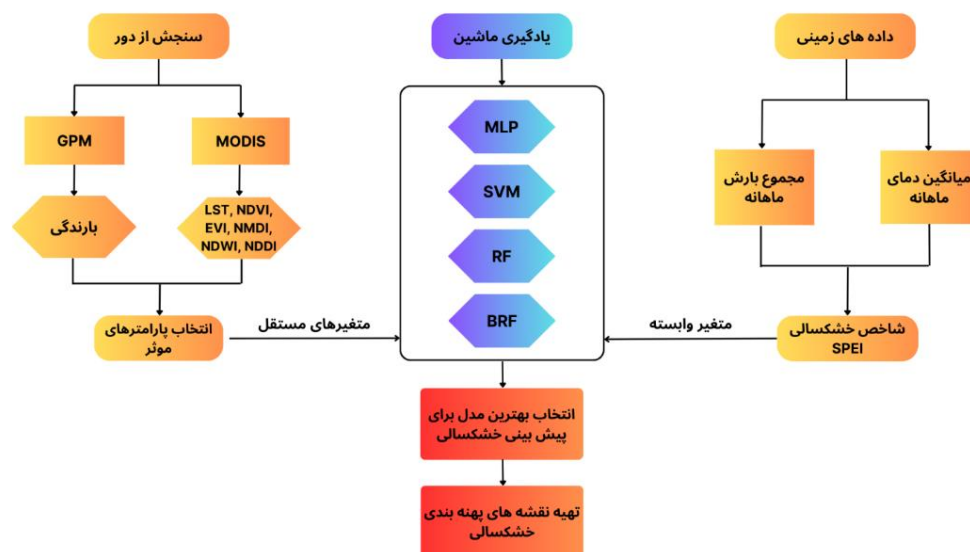
مدل‌سازی

یکی از ملزومات ایجاد یک مدل دقیق و کارآمد در مدل‌سازی، فراهم کردن شرایطی است که پارامترهای دخیل در مدل دارای شرایط و خصوصیات مشابه باشند. خوشه‌بندی تکنیکی برای گروه‌بندی اشیای مشابه یا گروه نقاط می‌باشد که در یادگیری ماشین و تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، در اولین گام از فرایند مدل‌سازی، از میان موارد متعدد الگوریتم‌های خوشه‌بندی موجود، الگوریتم K-means [19] که از محبوبیت بالایی نیز برخوردار است، انتخاب شد و مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، پس از بررسی حالات مختلف، تعداد خوشه‌ها دو در نظر گرفته شده و سپس از دو معیار میانگین بارش سالانه و میانگین دمای سالانه برای تخصیص هر یک از ایستگاه‌ها به یکی از خوشه‌ها استفاده شد. این الگوریتم شش ایستگاه را به خوشه دوم و ۶۴ ایستگاه را به خوشه اول اختصاص داد. در این خوشه‌بندی، ایستگاه‌های بانه، مریوان، نوشهر، رشت، ساری و یاسوج در خوشه دوم و مابقی ایستگاه‌ها در خوشه اول قرار گرفتند. همچنین مطابق با این دسته‌بندی، ایستگاه‌های متعلق به خوشه دوم دارای میانگین بارندگی سالانه ۹۴۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد بودند. این مقادیر برای خوشه اول به ترتیب ۲۸۹ میلی‌متر و ۱۷/۱ درجه سانتی‌گراد بود. این بدین معناست که ایستگاه‌های خوشه دوم به مراتب مرطوب‌تر و دارای دمای نسبتاً پایین‌تری نسبت به ایستگاه‌های خوشه اول بودند. از آنجایی که غالب مساحت ایران دارای اقلیم نسبتاً خشکی می‌باشد، تخصیص بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه به یک خوشه،

منطقی به نظر می‌رسد. نتایج این خوشه‌بندی در شکل (۲) قابل مشاهده است. در مرحله بعد، برای هر خوشه، چهار مدل مختلف یادگیری ماشین، یعنی پرسپترون چندلایه (MLP)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل تصادفی (RF) و جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده (BRF) برای پیش‌بینی خشکسالی توسعه داده شدند و بهترین مدل تعیین شد. در نهایت، از نتایج بهترین مدل برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی استفاده گردید. شکل (۳) روند کلی مراحل مختلف این مدل‌سازی را در قالب یک فلوچارت نشان می‌دهد. در ادامه به تفصیل به بررسی روش‌های استفاده شده خواهیم پرداخت.



شکل ۲ نتایج خوشه‌بندی به روش K-means



شکل ۳. فلوچارت مراحل انجام این پژوهش

انتخاب پارامترهای مؤثر

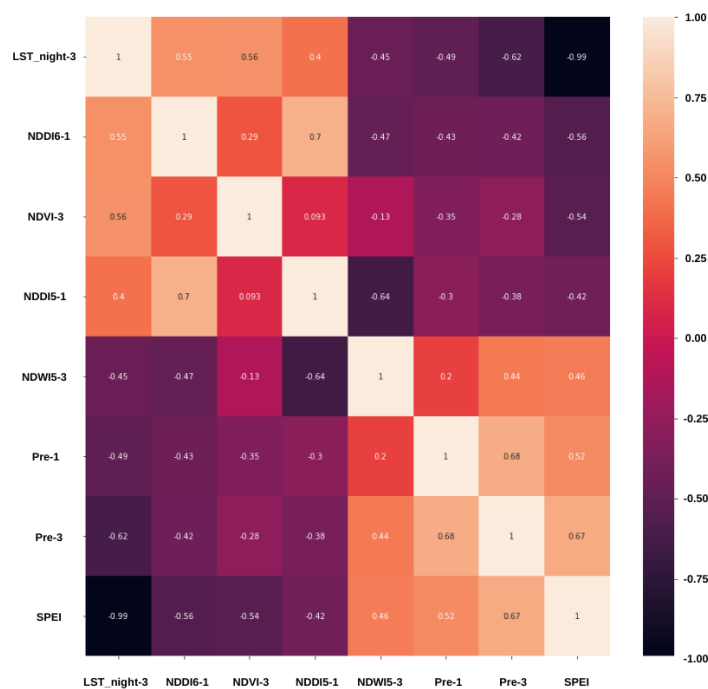
انتخاب پارامترهای مؤثر یک گام مهم در ساخت یک مدل پیش‌بینی است چرا که حذف پارامترهای نامربوط یا زائد می‌تواند تفسیرپذیری و عمومیت‌پذیری مدل را بهبود بخشد. در این پژوهش از دو روش فیلتر و لاسو [21] برای تعیین پارامترهای مؤثر استفاده شد. شکل (۴) و شکل (۵) نشان‌دهنده ماتریس همبستگی پارامترهای انتخاب شده به ترتیب در خوشه‌های ۱ و ۲ با روش فیلتر می‌باشند. در روش فیلتر همبستگی خطی بین هر پارامتر و پارامتر هدف اندازه‌گیری شده و پارامترها بر اساس مقادیر همبستگی آن‌ها با هدف، امتیازدهی می‌شوند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۴ برای ضریب همبستگی، پارامترهایی که همبستگی کمتر از این مقدار با پارامتر هدف دارند، حذف می‌شوند. در ادامه برای جلوگیری از افزونگی، هر پارامتری که همبستگی بالای ۰/۷ با پارامترهای دیگر دارد نیز از لیست خارج می‌شود. اما در روش لاسو به هر یک از پارامترها ضرایبی اختصاص داده می‌شود و بر اساس آن‌ها سعی به حذف پارامترهای کم‌اهمیت‌تر و انتخاب پارامترهای مهم‌تر می‌شود. این موضوع بدین صورت انجام می‌پذیرد که به کم‌اهمیت‌ترین پارامترها ضریب صفر داده شده و از مدل حذف می‌گردند و تنها پارامترهای با ضرایب غیر صفر باقی می‌مانند. لازم به ذکر است که درجه سخت‌گیری مدل در روش لاسو به کمک پارامتر تنظیم λ صورت می‌پذیرد. مقدار بالاتر λ منجر به منظم‌سازی قوی‌تر و در نتیجه نسبت دادن تعداد ضرایب بیشتری به عدد صفر می‌شود. این در حالی است

شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

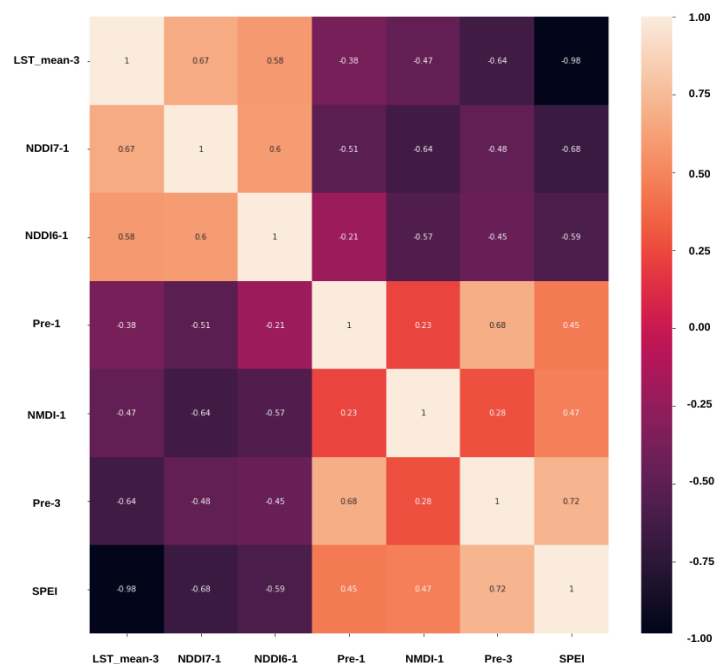
شاخص SPEI یک شاخص خشکسالی است که اولین بار توسط سرانو و همکاران [5] مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص که از تفاضل مقادیر دو پارامتر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل برای تعیین شدت و پایش شرایط خشکسالی استفاده می‌کند، یک شاخص استاندارد شده و بدون بعد است که امکان مقایسه شدت خشکسالی در مکان‌ها و دوره‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کند. از آنجایی که شاخص SPEI از روش Z-score برای استانداردسازی استفاده می‌کند، مقادیر این شاخص عموماً بین ۳- تا ۳ قرار می‌گیرد. در این بازه، مقدار صفر بیانگر شرایط عادی است، در حالی که مقادیر منفی و مثبت به ترتیب شرایط خشک و مرطوب را نشان می‌دهند و به طور کلی، مقادیر کوچک‌تر از ۱- به عنوان شرایط خشکسالی در نظر گرفته می‌شود [15]. از آنجایی که در پژوهش حاضر، شاخص SPEI به عنوان پارامتر مورد پیش‌بینی (متغیر وابسته) مدل یادگیری ماشین عمل می‌کند، محاسبه این پارامتر با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی، که از دقت و قابلیت اعتماد بالاتری برخوردارند، صورت پذیرفته است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، این شاخص از تفاضل مقادیر دو پارامتر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل حاصل می‌شود. در این پژوهش از روش تورنتوویت [20] برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شده است. این روش تبخیر و تعرق پتانسیل را بر اساس داده‌های میانگین ماهانه دما و با در نظر گرفتن رابطه بین دما و تبخیر و تعرق محاسبه می‌کند.

به دست آمده است. نتایج نهایی پارامترهای انتخاب شده در جدول (۴) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در این جدول، Pre بیانگر پارامتر بارندگی و LST بیانگر پارامتر دمای سطح زمین می‌باشند. ضمناً پسوندهای ۱ و ۳ به ترتیب بیانگر میانگین یک ماهه و میانگین متحرک سه ماهه آن پارامتر می‌باشند.

که، مقدار کمتر λ میزان منظم شدن را کاهش داده و به ضرایب بیشتری اجازه می‌دهد که مقادیر غیر صفر داشته باشند. در این پژوهش به کمک روش جست‌وجوی شبکه‌ای بازه ۰/۰۱ تا ۱ به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده و بهینه‌ترین حالت برای λ به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقادیر کمتر از ۰/۰۱ برای λ منجر به انتخاب تعداد بسیار زیادی از پارامترها خواهد شد که به هیچ عنوان بهینه نیست. مقدار λ در این پژوهش برابر با ۰/۰۱



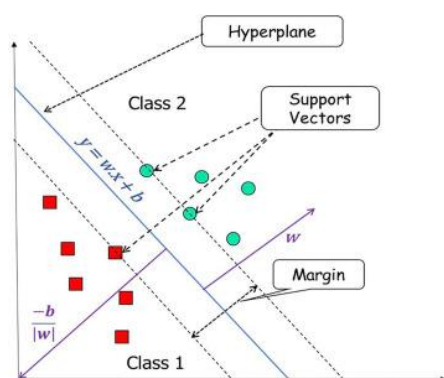
شکل ۴ ماتریس همبستگی پارامترهای انتخاب شده در خوشه ۱ با روش فیلتر



شکل ۵ ماتریس همبستگی پارامترهای انتخاب شده در خوشه ۲ با روش فیلتر

جدول ۶ نتایج انتخاب پارامترهای مؤثر

نام روش	خوشه	تعداد پارامترهای انتخاب شده	پارامترهای انتخاب شده
فیلتر	شماره ۱	۷	LST_night-3, NDDI6-1, NDVI-3, NDDI5-1, NDWI5-3, Pre-1, Pre-3
	شماره ۲	۶	LST_mean-3, NDDI7-1, NDDI6-3, Pre-1, NMDI-1, Pre-3
لاسو	شماره ۱	۶	Pre-3, LST_day-1, LST_mean-3, LST_night-3, NDDI6-1, NDDI7-3
	شماره ۲	۷	Pre-3, LST_day-1, LST_day-3, LST_mean-3, LST_night-3, NDDI7-3, NDVI-3



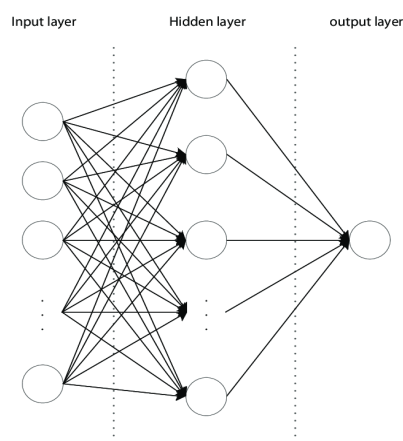
شکل ۷ ساختار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان [33]

ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان (SVM) که اولین بار توسط کورتس و واپنیک [24] مورد استفاده قرار گرفت، یک الگوریتم یادگیری ماشین قدرتمند و پرکاربرد است و زیرمجموعه یادگیری نظارت شده به حساب می‌آید. این الگوریتم ابتدا داده‌های ورودی و خروجی را دریافت کرده و سپس اگر داده‌ها به صورت خطی در فضای ویژگی اصلی مسئله قابل تفکیک نباشند، از یک تابع کرنل برای تبدیل داده‌ها به یک فضای ویژگی با ابعاد بالاتر استفاده می‌کند. هدف از این تبدیل یافتن یک رابطه خطی بین متغیرهای ورودی و مقادیر هدف است. به همین منظور در مدل‌سازی رگرسیونی، SVM به یافتن ابرصفحه‌ای می‌پردازد که بهترین تطابق با داده‌ها را داشته باشد و در عین حال خطاهای پیش‌بینی را به حداقل برساند. این ابرصفحه با تنظیم پارامترهای مدل برای به حداقل رساندن مجموع مقادیر خطا بین مقادیر هدف پیش‌بینی شده و واقعی تعیین می‌شود. اصطلاح بردارهای پشتیبان، اشاره به نزدیک‌ترین نقاط داده به ابرصفحه را دارد که این نقاط بر موقعیت و جهت ابرصفحه تأثیر گذاشته و در تعیین پیش‌بینی‌های مدل نقش دارند. هنگامی که ابرصفحه بهینه تعیین شد، می‌توان از آن برای پیش‌بینی مقادیر هدف و نیز برای داده‌های جدید و نادیده استفاده کرد. مقدار هدف پیش‌بینی شده برای داده‌های جدید بر اساس موقعیت آن‌ها نسبت به ابرصفحه

پرسپترون چندلایه

پرسپترون چند لایه (MLP) نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که اولین بار توسط رازنبال [22] معرفی گردید. MLPها که از چندین لایه گره به هم پیوسته به نام نورون تشکیل شده‌اند، به نوعی شبکه عصبی پیشخور به حساب می‌آیند، به این معنی که اطلاعات در یک جهت و ابتدا از لایه ورودی و سپس از طریق یک یا چند لایه پنهان به لایه خروجی جریان می‌یابند. به طور کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش داده‌های تجربی قانون نهفته بین متغیرهای یک مدل را شناسایی کرده و به نحوی مناسب و با سرعت بالا به ساختار شبکه انتقال می‌دهند [23]. در این شبکه‌ها هر نورون سیگنال‌های ورودی را دریافت کرده، یک تابع فعال‌سازی غیرخطی را به مجموع وزنی ورودی‌ها اعمال کرده و خروجی را به لایه بعدی ارسال می‌کند. ساختار کلی این شبکه‌ها در شکل (۶) مشاهده می‌شود. به طور کلی MLPها قادر به یادگیری روابط پیچیده غیرخطی هستند و به طور گسترده برای کارهایی مانند طبقه‌بندی، رگرسیون و تشخیص الگو مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش تعداد لایه‌های پنهان برابر با ۱ و تعداد نورون‌های لایه پنهان برابر با ۱ می‌باشند. ضمناً از واحد خطی اصلاح شده به عنوان تابع فعال‌سازی استفاده شده است.



شکل ۶ ساختار شبکه پرسپترون چند لایه [32]

جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در الگوریتم جنگل تصادفی هر درخت تصمیم در مجموعه درختان، پیش‌بینی‌های مستقلی انجام می‌دهد و پیش‌بینی نهایی با میانگین‌گیری پیش‌بینی‌های همه درختان به دست می‌آید. با این حال، با وجود اینکه این میانگین‌گیری به نحوی از تولید مقادیر پیش‌بینی شده غیرمنطقی جلوگیری می‌کند، ممکن است پیش‌بینی‌های این الگوریتم، به‌ویژه در شرایطی که به عنوان مثال داده‌های آموزشی ناهمگون هستند یا روابط غیرخطی در داده‌ها وجود دارد و یا زمانی که مجموعه مشاهدات بسیار بزرگ یا بسیار کوچک هستند، مقادیری بایاس از خود نشان دهند [26].

الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده (BRF) به منظور در نظر گرفتن همین اثر، توسط ژنگ و لو [27] معرفی شده است. این الگوریتم ابتدا مطابق با رابطه (۲) یک مدل RF ساده را بر روی داده‌های آموزشی اعمال کرده و نتایج پیش‌بینی شده را به‌دست می‌آورد.

$$Y_{\text{train}} = \text{RF}(X_{\text{train}}) \quad \text{Error! No text of specified style (in document.)}$$

در این رابطه، X_{train} بیانگر متغیرهای مستقل داده‌های آموزش و Y_{train} بیانگر متغیر وابسته داده‌های آموزش می‌باشند. در ادامه مقادیر باقی‌مانده با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده مدل RF توسط رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$r_{\text{train}} = Y_{\text{train}} - \hat{Y}_{\text{train}} \quad \text{Error! No text of specified style (in document.)}$$

در این رابطه، r_{train} بیانگر باقی‌مانده داده‌های آموزش و $\hat{Y}_{\text{train}}$ بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده متغیر وابسته توسط RF می‌باشند.

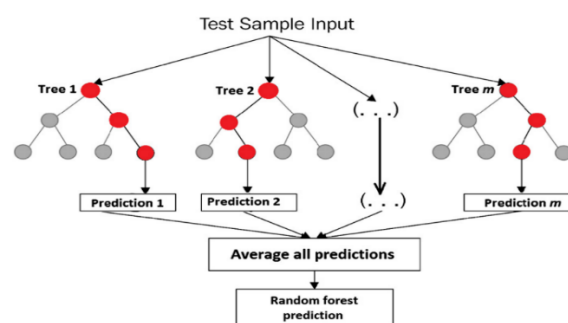
در ادامه مطابق با رابطه (۴)، یک مدل RF دیگر به باقی‌مانده‌ها به عنوان متغیر وابسته و کل داده‌های آموزشی به عنوان متغیرهای مستقل برازش داده می‌شود.

$$r_{\text{train}} = \text{RF}_{\text{res}}(X_{\text{train}}, Y_{\text{train}}) \quad (4)$$

محاسبه خواهد شد. ساختار این الگوریتم در شکل (۷) نمایش داده شده است. در این پژوهش از تابع پایه شعاعی به عنوان تابع هسته استفاده شده و مقیاس آن ۲/۶ در نظر گرفته شده است.

جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی (RF) که اولین بار توسط بریمن [25] مورد استفاده قرار گرفت، یک الگوریتم یادگیری ماشین قدرتمند است که می‌تواند برای مسئله‌های رگرسیونی مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم یک روش یادگیری گروهی است که برای پیش‌بینی، چندین درخت تصمیم را ترکیب می‌کند. جنگل تصادفی پس از دریافت داده‌های ورودی و متغیر هدف، مجموعه‌ای از درختان تصمیم را می‌سازد که در آن هر درخت تصمیم با استفاده از یک زیرمجموعه تصادفی از مجموعه داده‌های مربوط به آموزش ساخته می‌شود. علاوه بر این، یک زیرمجموعه تصادفی از پارامترها در هر گره از درخت انتخاب می‌شود تا بهترین تقسیم را انجام داده و تنوع را در بین درختان فراهم کند. سپس هر درخت تصمیم به صورت بازگشتی و با پارتیشن‌بندی داده‌ها در هر گره بر اساس یک معیار تقسیم انتخابی، که معمولاً کاهش واریانس یا میانگین مربعات خطاست، رشد می‌کند. این تقسیم تا زمانی که حداقل یکی از معیارهای توقف برآورده شود، ادامه می‌یابد. این معیارها می‌توانند شامل رسیدن به حداکثر عمق یا حداقل تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای یک گره برگ باشند. در ادامه، الگوریتم با ترکیب پیش‌بینی‌های همه درخت‌های تصمیم، یک مجموعه ایجاد می‌کند. در رگرسیون، پیش‌بینی‌های فردی از هر درخت برای به دست آوردن پیش‌بینی نهایی میانگین‌گیری می‌شوند. این فرایند میانگین‌گیری به کاهش تأثیر نقاط پرت و نویز در داده‌ها کمک می‌کند. نحوه عملکرد این الگوریتم در شکل (۸) قابل مشاهده است.



شکل ۸ نحوه عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی [34]

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

در هر فرایند مدل‌سازی، عملکرد نهایی یک مدل برای پیش‌بینی متغیر هدف نیاز به ارزیابی دارد. این وظیفه بر عهده معیارهای ارزیابی است. این معیارها، روش‌های عددی هستند که بسته به نوع مسئله، میزان عملکرد مدل را از نظر دقت، یادآوری، خطا یا سایر معیارهای مرتبط ارزیابی کرده و امکان انتخاب بهترین و دقیق‌ترین مدل را فراهم می‌آورند. در این پژوهش از معیارهای ارزیابی MSE ، $RMSE$ ، MAE و R^2 برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شده است. روابط محاسبه این معیارها در ادامه قابل مشاهده است.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

در این روابط n تعداد داده‌ها، y_i مقادیر واقعی، $\hat{y}_i$ مقادیر پیش‌بینی شده و $\bar{y}$ میانگین مقادیر واقعی می‌باشند.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

پس از اعمال پردازش‌های مربوطه بر روی داده‌ها و نیز تنظیم فرآیندهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین، فرایند مدل‌سازی با استفاده از چهار الگوریتم یاد شده و با توجه به نتایج انتخاب پارامترهای مؤثر صورت گرفت. نتایج این مدل‌سازی برای خوشه ۱ در جدول (۵) و برای خوشه ۲ در جدول (۶) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که فرایند مدل‌سازی برای هر یک از ترکیب‌های پارامترهای ورودی به تعداد ۱۰ مرتبه تکرار شد و میانگین نتایج برای هر مدل در جدول‌های مربوطه ثبت گردید.

همان طور که از جدول (۵) و جدول (۶) پیداست، عملکرد تمامی مدل‌ها به طور قابل توجهی بالا می‌باشد. این بدین معنی است که متغیرهای مستقل (پارامترهای ورودی) به

سپس مقادیر پیش‌بینی شده متغیر وابسته داده‌های آزمون توسط همان مدل RF استفاده شده در رابطه (۲)، مطابق رابطه (۵) تولید می‌شوند.

$$Y_{test} = RF(X_{test}) \quad (5)$$

در این رابطه، X_{test} بیانگر متغیرهای مستقل داده‌های آزمون و Y_{test} بیانگر متغیر وابسته داده‌های آزمون می‌باشند.

سپس درست به مانند گام سوم، مقادیر باقی‌مانده داده‌های آزمون توسط همان مدل RF موجود در گام سوم، و مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شوند.

$$r_{test} = RF_{res}(X_{test}, Y_{test}) \quad (6)$$

در این رابطه، r_{test} بیانگر باقی‌مانده داده‌های آزمون می‌باشد.

در انتها مقادیر متغیر وابسته به صورت اصلاح بایاس شده، از طریق رابطه (۷) قابل محاسبه خواهند بود.

$$Y_{bias-corrected} = Y_{test} + r_{test} \quad (7)$$

در این رابطه، $Y_{bias-corrected}$ بیانگر متغیر وابسته به صورت اصلاح بایاس شده، Y_{test} بیانگر متغیر وابسته داده‌های آزمون و r_{test} بیانگر باقی‌مانده داده‌های آزمون می‌باشند. در این پژوهش، تعداد درختان تصمیم در هر دو الگوریتم RF و BRF ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

اعتبارسنجی مدل

هدف نهایی در مدل‌سازی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، توسعه مدلی است که بتواند پیش‌بینی‌های دقیقی بر روی داده‌های جدید و دیده نشده انجام دهد. لذا به هنگام فرایند آموزش مدل، ارزیابی عملکرد آن مدل و نیز اطمینان حاصل کردن از توانایی تعمیم مدل به داده‌هایی فراتر از داده‌های آموزشی، امری ضروری به حساب می‌آید. برای این منظور از مفهوم اعتبارسنجی استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین روش‌های اعتبارسنجی، روش اعتبارسنجی متقابل K-fold می‌باشد. در پژوهش حاضر، از این روش برای اعتبارسنجی تمامی الگوریتم‌های استفاده شده، بهره گرفته شده است. ضمناً در تمامی الگوریتم‌ها $K=5$ در نظر گرفته شده است.

خشکسالی کشاورزی داراست. پس از الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، به ترتیب الگوریتم‌های جنگل تصادفی، پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبان بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. جزئیات عملکرد و نتایج این الگوریتم‌ها در جدول (۵) قابل مشاهده است.

همچنین به مانند خوشه ۱، برای ایستگاه‌های متعلق به خوشه ۲ نیز الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده با ثبت بالاترین مقدار در معیار ضریب تعیین ($R^2 = 0.9809$) و پایین‌ترین مقدار در معیار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 0.1375$) بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی شاخص SPEI و در نتیجه پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی از خود نشان داد. در این خوشه پس از الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، به ترتیب الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و پرسپترون چندلایه بهترین عملکرد را از خود به جای گذاشتند. جزئیات عملکرد و نتایج این الگوریتم‌ها در جدول (۶) قابل مشاهده است.

شدت با متغیر وابسته (پارامتر هدف) مرتبط بوده و می‌تواند به طور مؤثر مقادیر آن را پیش‌بینی کنند. به عنوان مثال، همان طور که از ماتریس‌های همبستگی روش فیلتر در شکل‌های (۴) و (۵) پیداست، ارتباط و وابستگی میان برخی از پارامترهای ورودی با پارامتر هدف به طور قابل توجهی بالاست. مثلاً برای خوشه شماره (۱) پارامتر میانگین متحرک سه ماهه دمای سطح زمین در شب (LST-night-3) و برای خوشه شماره (۲) پارامتر میانگین متحرک سه ماهه میانگین دمای سطح زمین در روز و شب (LST-mean-3) همبستگی بالای ۹۰ درصد با شاخص SPEI به عنوان پارامتر هدف از خود نشان داده‌اند.

با این حال، می‌توان از نتایج به دست آمده این گونه استنباط کرد که برای ایستگاه‌های متعلق به خوشه ۱، الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده با ثبت بالاترین مقدار در معیار ضریب تعیین ($R^2 = 0.9858$) و پایین‌ترین مقدار در معیار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 0.1190$) بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی شاخص SPEI و در نتیجه پیش‌بینی

جدول ۷ نتایج مدل‌سازی پیش‌بینی خشکسالی در خوشه ۱ به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین

نام الگوریتم یادگیری ماشین	روش انتخاب پارامتر مؤثر	R^2	RMSE	MSE	MAE	زمان آموزش مدل (ثانیه)
پرسپترون چندلایه	فیلتر	۰/۹۸۳۴	۰/۱۲۸۶	۰/۰۱۶۵	۰/۰۸۹۴	۴۰
	لاسو	۰/۹۸۵۲	۰/۱۲۱۰	۰/۰۱۴۷	۰/۰۸۵۳	۳۸
ماشین بردار پشتیبان	فیلتر	۰/۹۸۲۲	۰/۱۳۳۰	۰/۰۱۷۷	۰/۰۹۱۵	۱۹
	لاسو	۰/۹۸۴۸	۰/۱۲۲۹	۰/۰۱۵۱	۰/۰۸۳۹	۱۲
جنگل تصادفی	فیلتر	۰/۹۸۳۲	۰/۱۳۰۲	۰/۰۱۷۰	۰/۰۹۱۱	۲۰۴
	لاسو	۰/۹۸۵۸	۰/۱۱۹۱	۰/۰۱۴۲	۰/۰۸۲۰	۲۰۵
جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده	فیلتر	۰/۹۸۴۱	۰/۱۲۶۳	۰/۰۱۶۰	۰/۰۸۷۹	۲۱۴
	لاسو	۰/۹۸۵۸	۰/۱۱۹۰	۰/۰۱۴۲	۰/۰۸۲۱	۲۱۸

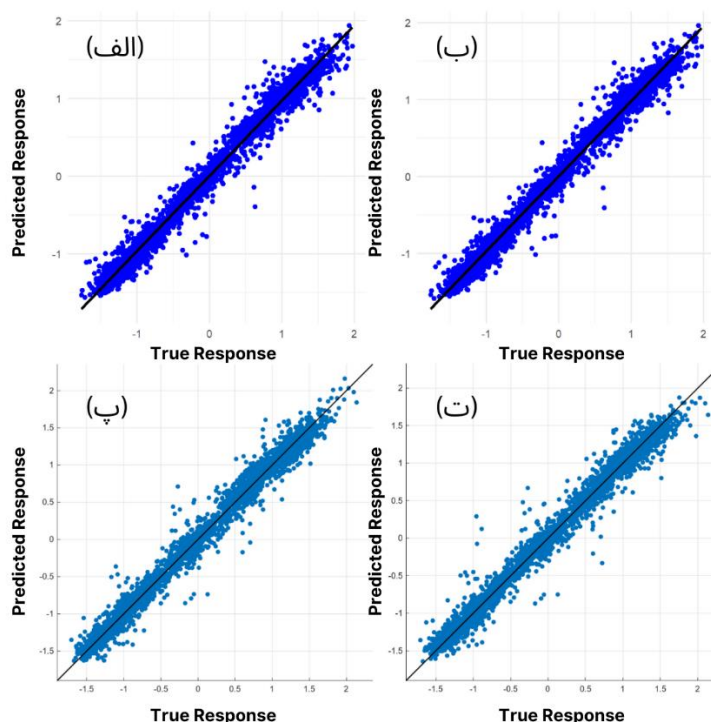
جدول ۸ نتایج مدل‌سازی پیش‌بینی خشکسالی در خوشه ۲ به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین

نام الگوریتم یادگیری ماشین	روش انتخاب پارامتر مؤثر	R^2	RMSE	MSE	MAE	زمان آموزش مدل (ثانیه)
پرسپترون چندلایه	فیلتر	۰/۹۷۷۰	۰/۱۵۱۲	۰/۰۲۲۹	۰/۱۱۴۱	۵
	لاسو	۰/۹۷۸۶	۰/۱۴۵۷	۰/۰۲۱۳	۰/۱۰۸۸	۶
ماشین بردار پشتیبان	فیلتر	۰/۹۷۶۳	۰/۱۵۳۴	۰/۰۲۳۵	۰/۱۱۴۴	۲
	لاسو	۰/۹۸۰۳	۰/۱۴۰۱	۰/۰۱۹۷	۰/۱۰۴۵	۲
جنگل تصادفی	فیلتر	۰/۹۷۶۱	۰/۱۵۷۸	۰/۰۲۵۰	۰/۱۱۶۴	۳
	لاسو	۰/۹۸۰۰	۰/۱۴۰۴	۰/۰۱۹۸	۰/۱۰۵۹	۳
جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده	فیلتر	۰/۹۷۷۹	۰/۱۴۹۶	۰/۰۲۲۵	۰/۱۱۰۹	۳
	لاسو	۰/۹۸۰۹	۰/۱۳۷۵	۰/۰۱۸۹	۰/۱۰۳۱	۴

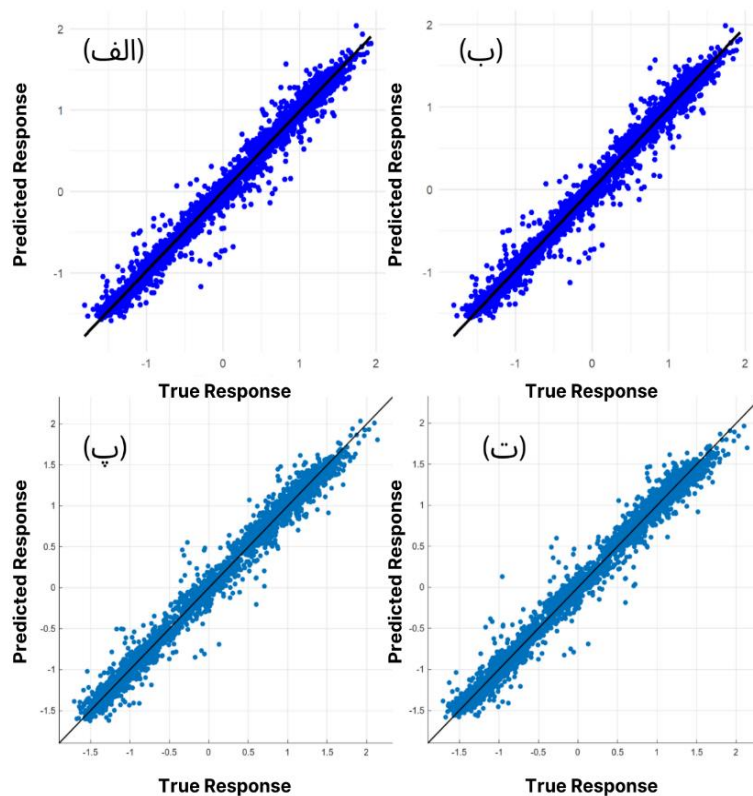
بایاس با الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند به حذف بایاس ایجاد شده و حصول نتایج بهتر در مدل‌سازی منجر گردد. دستیابی به مقادیر ضریب تعیین بالاتر و ریشه میانگین مربعات خطای پایین‌تر برای روش جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده نسبت به جنگل تصادفی ساده، مهر تأییدی بر این ادعا در این پژوهش می‌باشد.

در ادامه شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان‌دهنده مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی SPEI در خوشه ۱ و شکل (۱۱) و شکل (۱۲) بیانگر مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی SPEI در خوشه ۲ می‌باشند. همچنین شکل (۱۳) نشان‌دهنده گراف مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار ضریب تعیین، شکل (۱۴) نشان‌دهنده گراف مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار ریشه میانگین مربعات خطا، شکل (۱۵) نشان‌دهنده گراف مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار میانگین مربعات خطا و شکل (۱۶) نشان‌دهنده گراف مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار میانگین خطای مطلق می‌باشند.

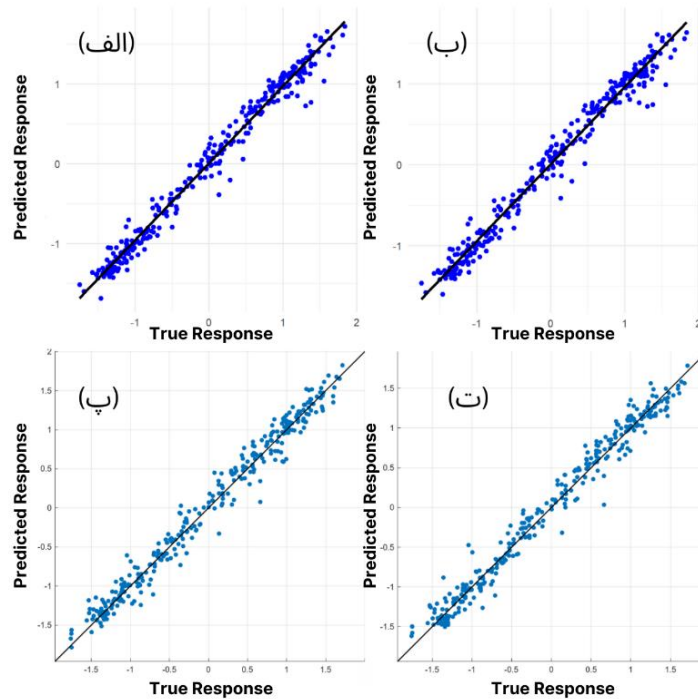
همان‌طور که از نتایج نیز پیداست، به‌طور کلی می‌توان عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی را در مقایسه با ماشین بردار پشتیبان و پرسپترون چندلایه بهتر دانست. این امر به این دلیل می‌باشد که جنگل تصادفی دارای چندین مزیت بوده که آن را در چنین سبک مسائل به انتخابی بهتر تبدیل می‌کند. به عنوان مثال این الگوریتم به دلیل استفاده از چندین درخت تصمیم‌گیری و بوت‌استرپ معمولاً نسبت به دو الگوریتم دیگر مقاومت بیشتری در برابر بیش‌برازش دارد. همچنین می‌توان به تفسیرپذیری بهتر این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم دیگر اشاره کرد. با این حال، جنگل تصادفی معمولاً در بازتولید مشاهدات شدید عملکرد ضعیفی دارد. به طوری که گاه مقادیر بزرگ کمتر از حد و مقادیر کوچک بیشتر از حد برآورد می‌شوند [25]. لذا از آنجایی که خشکسالی معمولاً به عنوان شرایط خشک بیش از اندازه و غیرعادی تلقی می‌شود، استفاده از جنگل تصادفی ممکن است منجر به ایجاد بایاس در فرایند پایش خشکسالی گردد. به همین جهت، ترکیب روش تصحیح



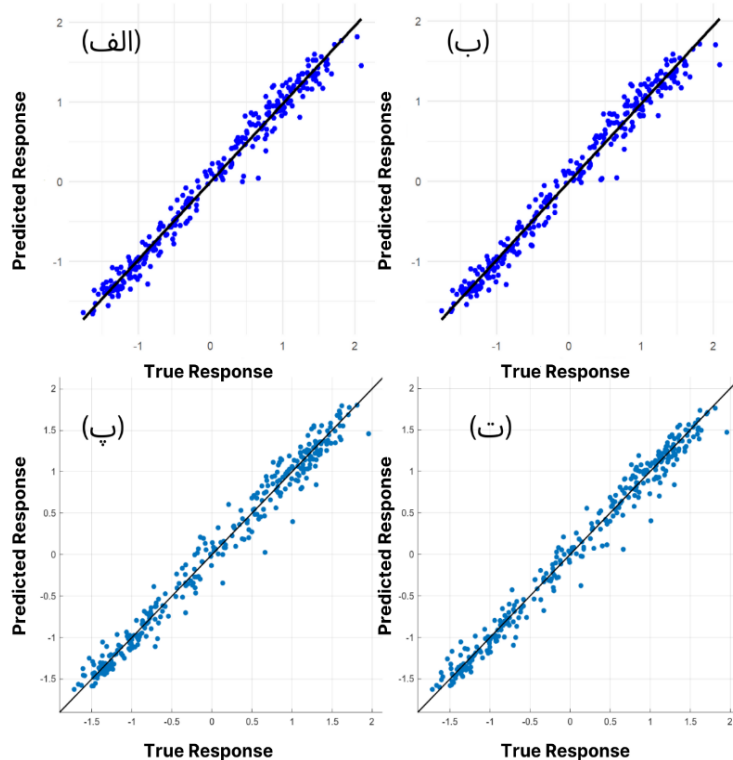
شکل ۹ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی SPEI با روش فیلتر در خوشه ۱: الف) الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، ب) الگوریتم جنگل تصادفی، پ) الگوریتم پرسپترون چندلایه و ت) الگوریتم ماشین بردار پشتیبان



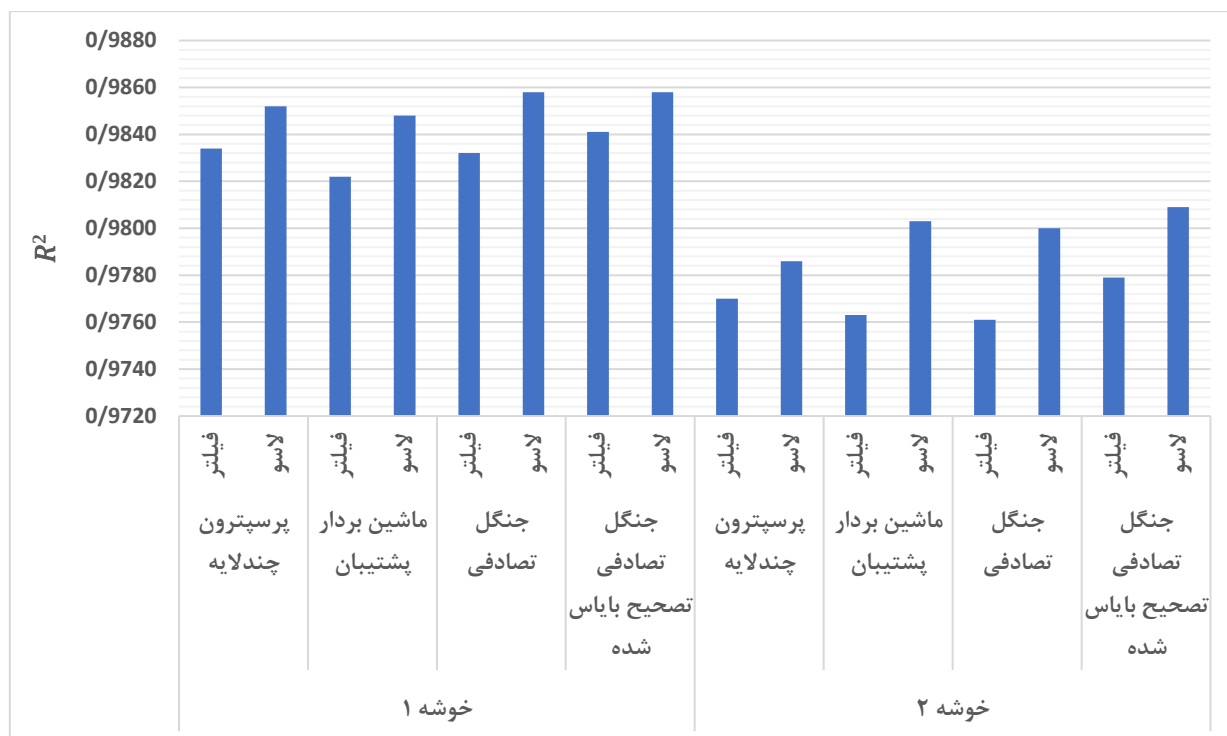
شکل ۱۰ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی SPEI با روش لاسو در خوشه ۱: الف) الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، ب) الگوریتم جنگل تصادفی، پ) الگوریتم پرسپترون چندلایه و ت) الگوریتم ماشین بردار پشتیبان



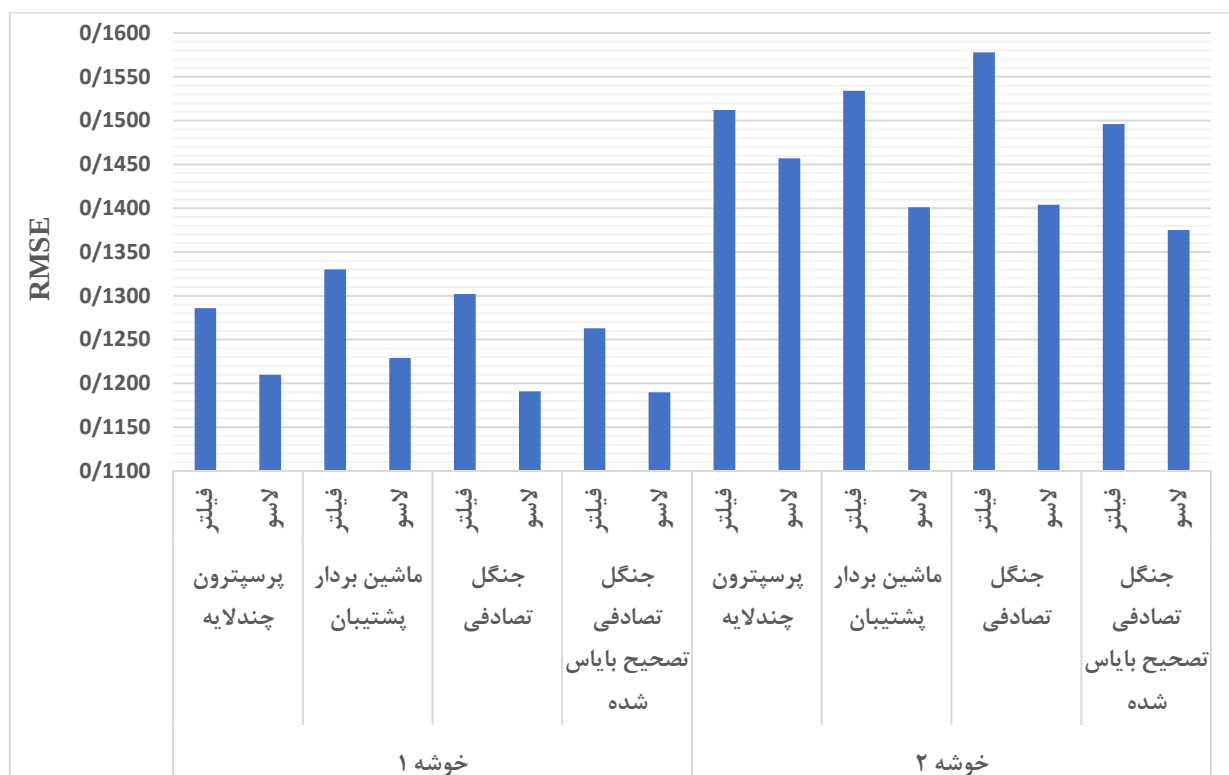
شکل ۱۱ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی SPEI با روش فیلتر در خوشه ۲: الف) الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، ب) الگوریتم جنگل تصادفی، پ) الگوریتم پرسپترون چندلایه و ت) الگوریتم ماشین بردار پشتیبان



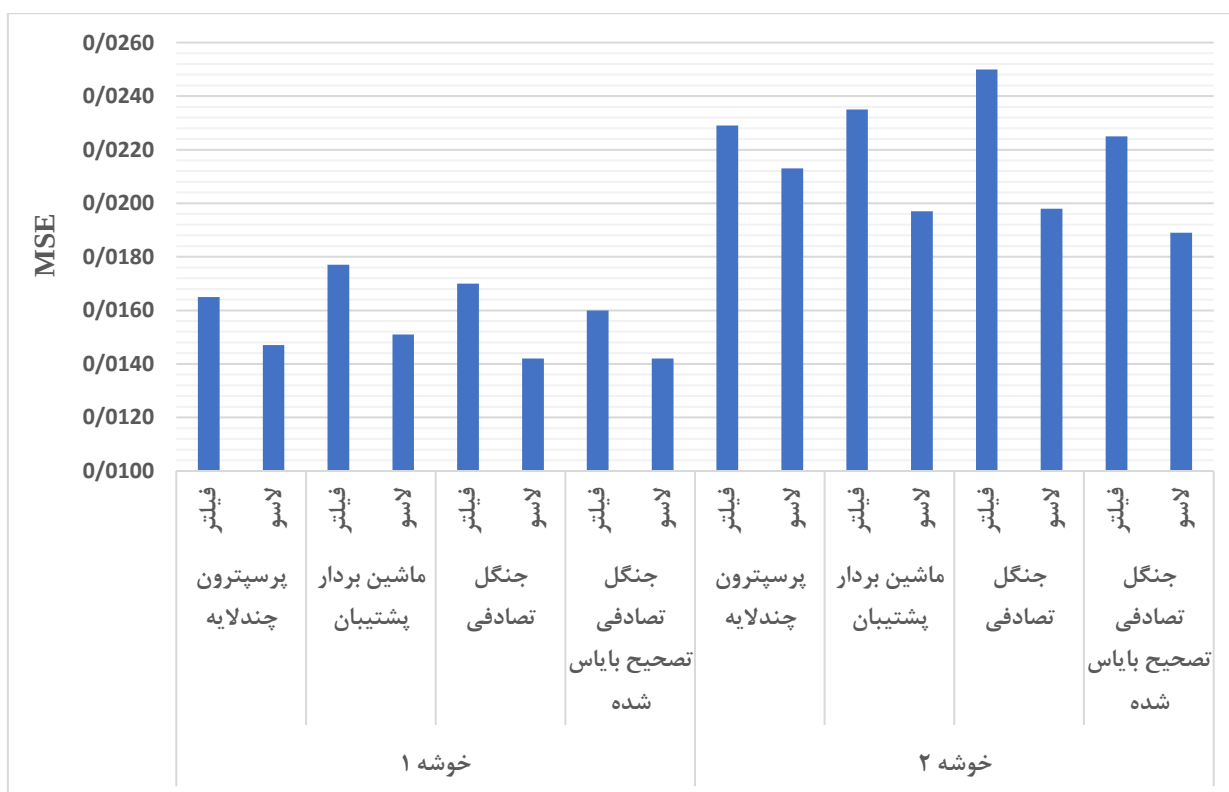
شکل ۱۲ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی SPEI با روش لاسو در خوشه ۲: (الف) الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، (ب) الگوریتم جنگل تصادفی، (پ) الگوریتم پرسپترون چندلایه و (ت) الگوریتم ماشین بردار پشتیبان



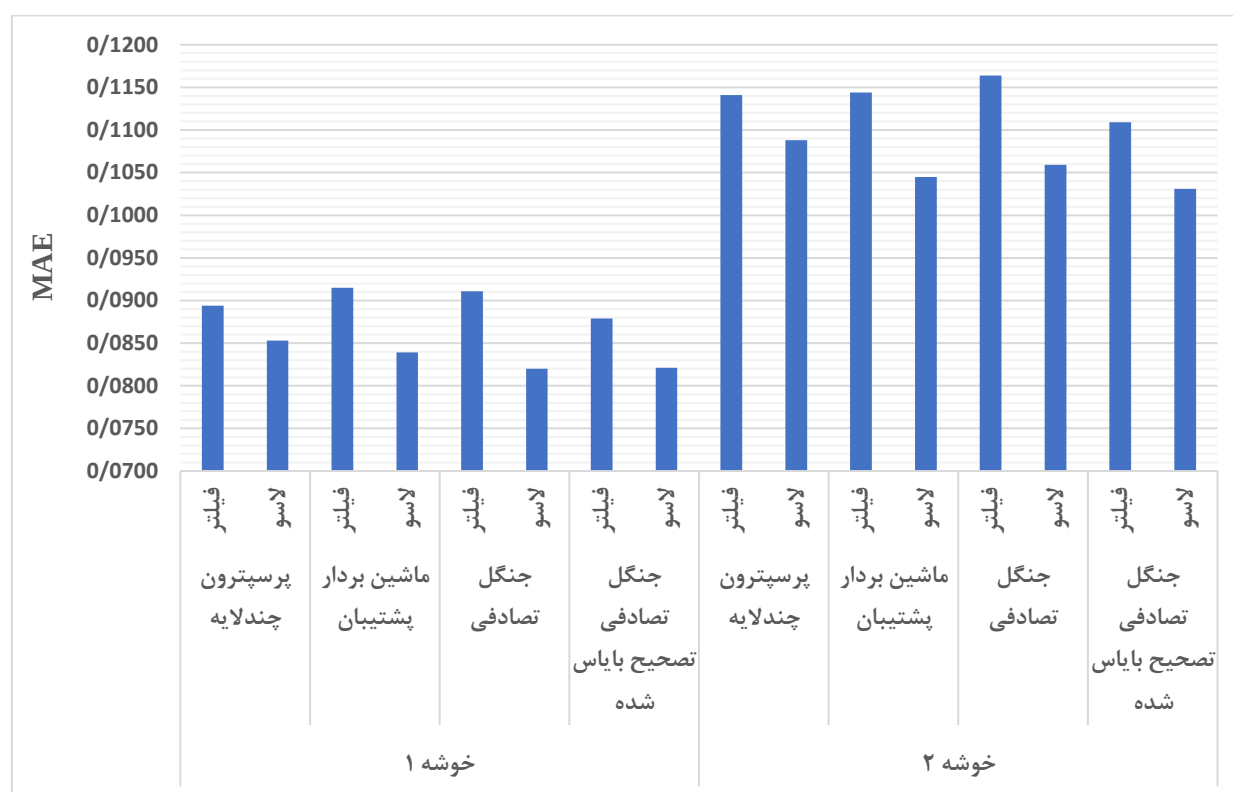
شکل ۱۳ مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار ضریب تعیین



شکل ۱۴ مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار ریشه میانگین مربعات خطا



شکل ۱۵ مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار میانگین مربعات خطا



شکل ۱۶ مقایسه نتایج مدل‌ها بر اساس معیار میانگین خطای مطلق

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی

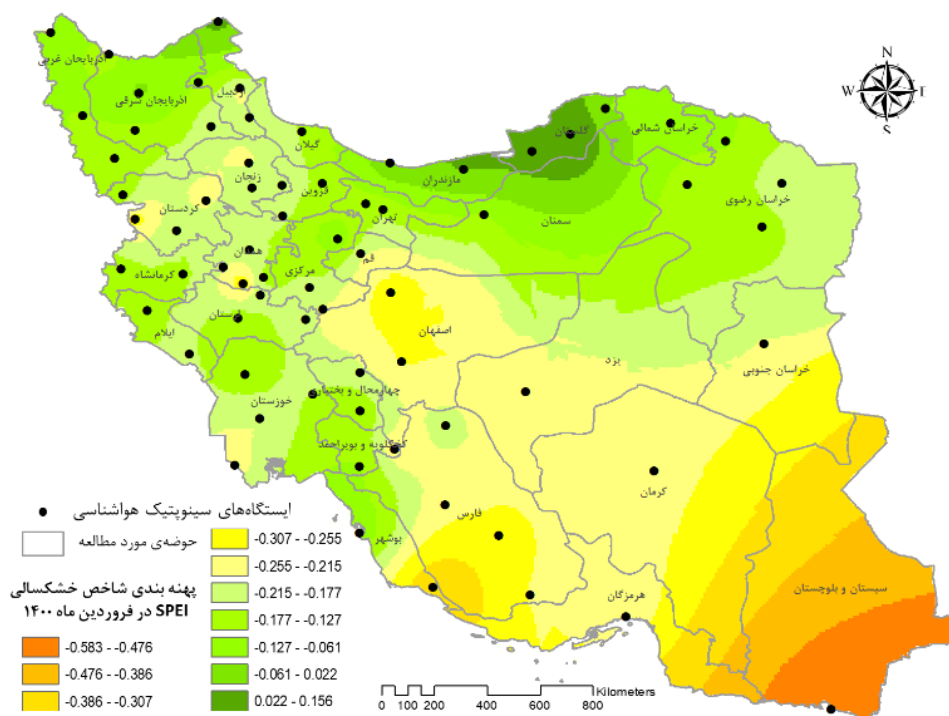
پس از ایجاد مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی و انتخاب مدل با بهترین عملکرد، می‌توان از نتایج این مدل برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی استفاده کرد. این نقشه‌ها ابزاری هستند که برای شناسایی و طبقه‌بندی مناطق مستعد به شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تهیه این نقشه‌ها، از مقادیر پیش‌بینی شده مدل ایجاد شده با الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده برای شاخص SPEI، استفاده شده و این مقادیر در چهار ماه منتخب از سال که هر کدام نمونه‌ای برای یکی از چهار فصل سال می‌باشند، در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه شده و پس از آن بر روی سطح کل کشور درونیابی می‌شوند.

همان‌طور که پیش‌تر نیز مطرح شد، عموماً خشکسالی به حالتی اطلاق می‌شود که شاخص SPEI مقادیری کمتر از -۱ داشته باشد. این در حالی است که مقادیر بزرگ‌تر از یک برای این شاخص نشان‌دهنده شرایط مرطوب، مقادیر بین صفر و منفی یک نشان‌دهنده شرایط نسبتاً خشک و مقادیر بین صفر و یک نشان‌دهنده شرایط نسبتاً مرطوب می‌باشند. به این ترتیب و

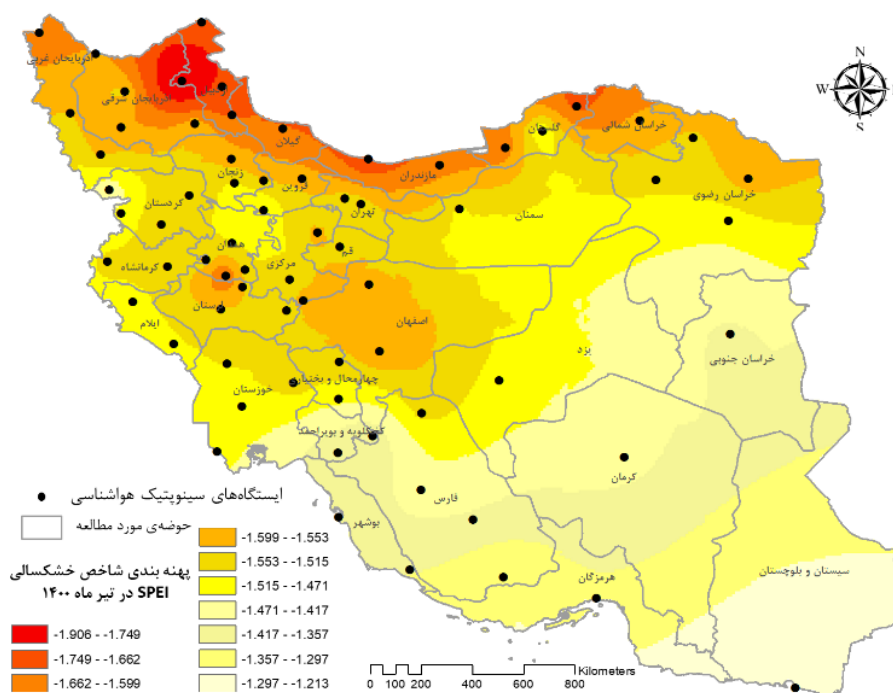
با توجه به شکل (۱۷) که نشان‌دهنده نقشه پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در ایران برای فروردین ۱۴۰۰ می‌باشد، مشاهده می‌شود که مدل پیش‌بینی خشکسالی برای اغلب مناطق کشور حالت نسبتاً خشک را پیش‌بینی کرده و تنها بخش‌هایی از استان‌های گلستان و مازندران را به حالت نسبتاً مرطوب نسبت داده است. در ادامه همان‌طور که از شکل (۱۸) پیداست، مدل برای تمام مناطق کشور در تیر ماه ۱۴۰۰ شرایط خشکسالی را پیش‌بینی کرده است. بررسی دقیق‌تر این نقشه نشان می‌دهد که قسمت‌هایی از استان‌های مازندران، گیلان، اردبیل و آذربایجان شرقی، که همگی از استان‌های پربارش کشور به حساب می‌آیند، تحت شرایط خشکسالی شدیدتری نسبت به سایر مناطق کشور قرار دارند. این بدین خاطر است که به علت برقراری شرایط مرطوب در سایر اوقات سال در این مناطق، کاهش نسبی میزان بارندگی و گرمای هوا در تابستان منجر به افت شدیدتر مقادیر شاخص SPEI نسبت به سایر مناطق در این فصل می‌گردد. شکل (۱۹) نیز به مانند شکل (۱۷) نشان‌دهنده حالت نسبتاً خشک برای اغلب مناطق کشور و حالت نسبتاً مرطوب برای تنها بخش‌هایی از استان‌های مازندران و گیلان در

غالباً آب و هوایی گرم و خشک دارند، شرایط بارش و دمای بسیار متفاوت برای این استان‌ها در این بازه از سال نسبت به سایر اوقات سال می‌باشد که منجر به افزایش نسبی مقادیر شاخص SPEI برای این مناطق در این ماه شده است.

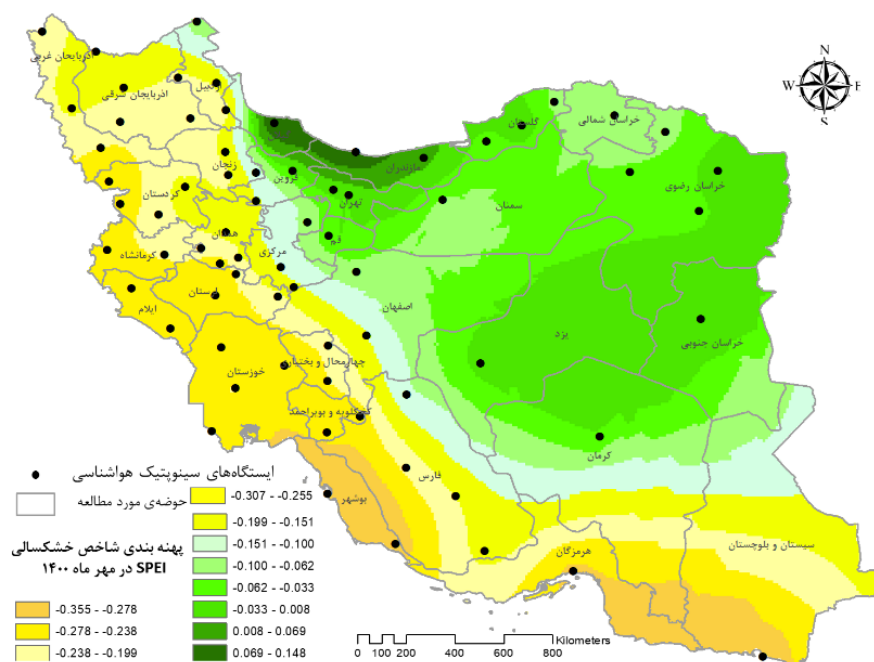
مهر ۱۴۰۰ می‌باشد. در نهایت، شکل (۲۰) نشان از این دارد که مدل حالت کاملاً مرطوب را برای تمام نقاط کشور در دی ۱۴۰۰ پیش‌بینی کرده است. به مانند تفسیر شکل (۱۸) علت برقراری شرایط مرطوب‌تر برای استان‌های جنوبی کشور که



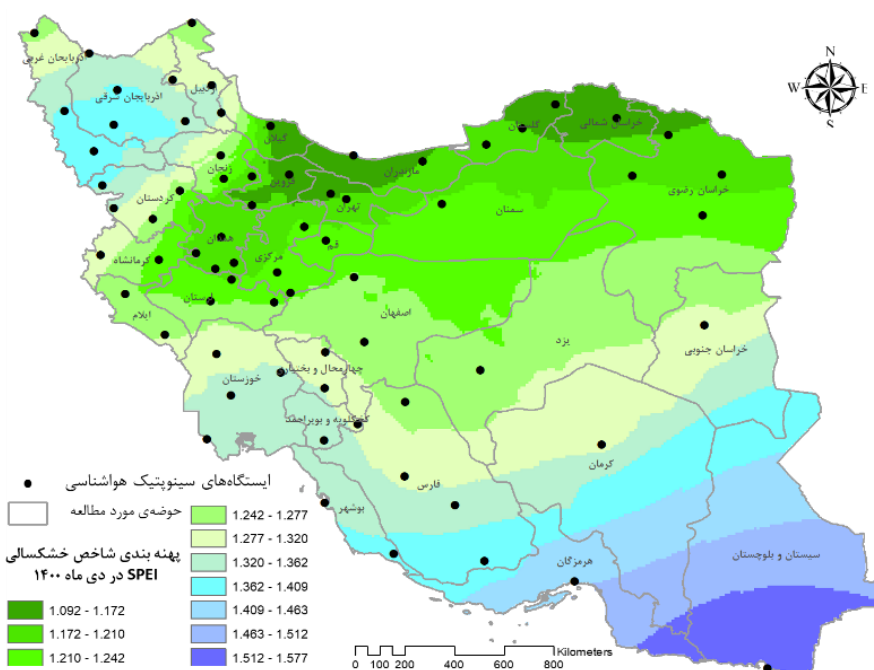
شکل ۱۷ نقشه پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در فروردین ماه ۱۴۰۰



شکل ۱۸ نقشه پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در تیر ماه ۱۴۰۰



شکل ۱۹ نقشه پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در مهر ماه ۱۴۰۰



شکل ۲۰ نقشه پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی در دی ماه ۱۴۰۰

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سعی بر ایجاد راهکاری مناسب برای پیش‌بینی خشکسالی به عمل آمده است. در این مطالعه از چهار الگوریتم یادگیری ماشین به نام‌های جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و پرسپترون

چندلایه به منظور ایجاد مدل پیش‌بینی خشکسالی استفاده گردید که نتایج آن به شرح زیر به دست آمد: (۱) برای ایستگاه‌های متعلق به خوشه ۱، که میانگین بارش سالانه‌ای در حدود ۹۵۰ میلی‌متر دارند، الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده با دقت ۹۸/۵۸ درصد بهترین عملکرد را نشان داد. پس از

واژه‌نامه	
PDSI	شاخص شدت خشکسالی پالمر
SPI	شاخص بارندگی استاندارد شده
SPEI	شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده
NDVI	شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده
NDDI	شاخص تفاوت خشکسالی نرمال شده
NMDI	شاخص خشکسالی نرمال شده چندباندی
MLP	پرسپترون چندلایه
SVM	ماشین بردار پشتیبان
RF	جنگل تصادفی
BRF	جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده
MSE	میانگین مربعات خطا
RMSE	ریشه‌ی میانگین مربعات خطا
MAE	میانگین خطای مطلق
R	ضریب تعیین

آن الگوریتم‌های جنگل تصادفی، پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبان به ترتیب و با فاصله اندک نسبت به دقت الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده، در رده‌های بعدی قرار گرفتند. (۲) برای ایستگاه‌های متعلق به خوشه ۲، که میانگین بارش سالانه آن‌ها کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد، نیز الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده با دقت ۹۸/۰۹ درصد بهترین عملکرد را نشان داد. پس از آن الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و پرسپترون چندلایه به ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. (۳) بررسی‌ها نشان داد که مدل پیش‌بینی خشکسالی که با الگوریتم جنگل تصادفی تصحیح بایاس شده ایجاد شده است، قابلیت پیش‌بینی بسیار دقیقی هم در اقلیم پر باران و هم در اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد. (۴) از نتایج به دست آمده در این مدل‌سازی اقدام به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی شد. این نقشه‌ها که ابزاری مناسب برای شناسایی و طبقه‌بندی مناطق مستعد به شرایط خشکسالی می‌باشند، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با توزیع و شدت خشکسالی در مناطق مختلف در اختیار ذی‌نفعان، از جمله سیاست‌گذاران، کشاورزان و برنامه‌ریزان منابع آب قرار می‌دهد.

مراجع

- [1] D. Dutta, A. Kundu, and N. R. Patel, "Predicting agricultural drought in eastern Rajasthan of India using NDVI and standardized precipitation index," *Geocarto International*, vol. 28, no. 3, pp. 192–209, 2013. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.679975>
- [2] N. M. Alam *et al.*, "Evaluation of drought using SPEI drought class transitions and log-linear models for different agro-ecological regions of India," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 100, pp. 31–43, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.008>
- [3] W. C. Palmer, *Meteorological drought*, vol. 30. US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [4] T. B. McKee, N. J. Doesken, and J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to time scales," in *Eighth Conference on Applied Climatology*, 1993, vol. 17, no. January, pp. 17–22.
- [5] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, and J. I. López-Moreno, "A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index," *Journal of Climate*, vol. 23, no. 7, pp. 1696–1718, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- [6] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," *NASA Spec. Publ*, vol. 351, no. 1, p. 309, 1974.
- [7] Y. Gu, J. F. Brown, J. P. Verdin, and B. Wardlow, "A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States," *Geophysical research letters*, vol. 34, no. 6, 2007.

<https://doi.org/10.1029/2006GL029127>

- [8] L. Wang and J. J. Qu, "NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing," *Geophysical research letters*, vol. 34, no. July, pp. 1–5, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>
- [9] J. Rhee, J. Im, and G. J. Carbone, "Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, no. 12, pp. 2875–2887, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
- [10] Z. M. Yaseen, M. Ali, A. Sharafati, N. Al-Ansari, and S. Shahid, "Forecasting standardized precipitation index using data intelligence models: regional investigation of Bangladesh," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 3435, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82977-9>
- [11] M. R. Kousari, M. E. Hosseini, H. Ahani, and H. Hakimelahi, "Introducing an operational method to forecast long-term regional drought based on the application of artificial intelligence capabilities," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 127, no. 1–2, pp. 361–380, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1624-6>
- [12] M. Mokhtarzad, F. Eskandari, N. Jamshidi Vanjani, and A. Arabasadi, "Drought forecasting by ANN, ANFIS, and SVM and comparison of the models," *Environ. Earth Sci.*, vol. 76, no. 21, p. 729, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7064-0>
- [13] A. Abbasi, K. Khalil, J. Behmanesh, and A. Shirzad, "Application of Support Vector Machine and Bayesian Network method in agricultural drought prediction," *Watershed Engineering and Management*, vol. 12, no. 1, pp. 107–124, 2020. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.122619.1519>
- [14] F. Tufaner and A. Özbeyaz, "Estimation and easy calculation of the Palmer Drought Severity Index from the meteorological data by using the advanced machine learning algorithms," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 9, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08539-0>
- [15] P. Feng, B. Wang, D. L. Liu, and Q. Yu, "Machine learning-based integration of remotely-sensed drought factors can improve the estimation of agricultural drought in South-Eastern Australia," *Agricultural Systems*, vol. 173, pp. 303–316, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.015>
- [16] M. Zoljoodi and A. Didevarasl, "Evaluation of Spatial-Temporal Variability of Drought Events in Iran Using Palmer Drought Severity Index and Its Principal Factors (through 1951-2005)," *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 03, no. 02, pp. 193–207, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2013.32021>
- [17] A. Darvishi, S. Arkhi, and A. Ebrahimi, "Risk and disaster management to mitigate the effects of droughts in Iran," in *Proceeding of the Conference on Drought in Charmahal-Bakhtiari, Shahrekord, The University of Shahrekord*, 2008, pp. 22–23.
- [18] Iran's Statistical Centre, "Shares and rankings of provinces based on important variables in the agricultural sector," 2023.
- [19] J. A. Hartigan and M. A. Wong, "Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm," *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, vol. 28, no. 1, pp. 100–108, 1979. <https://doi.org/10.2307/2346830>
- [20] C. W. Thornthwaite, "An Approach toward a Rational Classification of Climate," *Geogr. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 55–94, 1948. <https://doi.org/10.2307/210739>
- [21] R. Tibshirani, "Regression Shrinkage and Selection via the Lasso," *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 58, no. 1, pp. 267–288, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x>
- [22] F. Rosenblatt, *Principles of neurodynamics: Perceptrons and the theory of brain mechanisms*, vol. 55. Spartan books Washington, DC, 1962.

- [23] A. Aghasi, M. Torbatinejad, and A. Bagherzadeh, "Modelling of rutting behavior of modified polymer asphalt mixture using artificial neural network," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 69–88, 2022. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.76444.1135>
- [24] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273–297, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- [25] L. Breiman, "Random Forests," *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [26] J. Song, "Bias corrections for Random Forest in regression using residual rotation," *Journal of the Korean Statistical Society*, vol. 44, no. 2, pp. 321–326, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jkss.2015.01.003>
- [27] G. Zhang and Y. Lu, "Bias-corrected random forests in regression," *Journal of Applied Statistics*, vol. 39, no. 1, pp. 151–160, 2012. <https://doi.org/10.1080/02664763.2011.578621>
- [28] Iran Meteorological Organization, "Weather data acquisition system," *Ferdowsi Civil Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.88855.1311>
- [29] G. J. Huffman, E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan, "GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06." *NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*, 2019.
- [30] Z. Wan, S. Hook, and G. Hulley, "MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061." *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*, 2021.
- [31] E. Vermote and R. Wolfe, "MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V061." *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*, 2021.
- [32] Z. Zhao, S. Xu, B. H. Kang, M. M. J. Kabir, Y. Liu, and R. Wasinger, "Investigation and improvement of multi-layer perception neural networks for credit scoring," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 7, pp. 3508–3516, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.12.006>
- [33] A. Rani, N. Kumar, J. Kumar, J. Kumar, and N. K. Sinha, "Chapter 6 - Machine learning for soil moisture assessment," *In Deep learning for sustainable agriculture*, pp. 143-168, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85214-2.00001-X>
- [34] A. Afzal *et al.*, "Response surface analysis, clustering, and random forest regression of pressure in suddenly expanded high-speed aerodynamic flows," *Aerospace Science and Technology*, vol. 107, p. 106318, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106318>



Prediction and Analysis of the Probability of Climate Change and Water Scarcity in Yazd

Research Article

Mohammadreza Goodarzi¹ , Maryam Sabaghzadeh²

DOI: [10.22067/jfcej.2024.88585.1306](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.88585.1306)

1. Introduction

Water resource management has long been a fundamental challenge for human societies. The rapid expansion of urbanization has exacerbated this issue, particularly in arid regions where water scarcity is inherently severe. In these areas, characterized by low precipitation and high evaporation rates, communities typically rely on groundwater extraction. However, this solution faces growing limitations due to problems like land subsidence, prompting policymakers to explore alternative approaches such as inter-basin water transfers.

Recent climate change impacts have further intensified water stress in these regions through decreased precipitation and increased temperatures. This trend is particularly evident in arid zones, where diminishing water availability has significantly compounded existing supply challenges in recent years.

2. Materials and Methods

This study developed a water scarcity index by analyzing the balance between water supply and demand in Yazd City - a region with a hot, arid climate and chronic water shortages. Using monthly water supply-demand data from 2013-2014, we employed an LSTM (Long Short-Term Memory) deep neural network to forecast water scarcity patterns over a 20-year horizon.

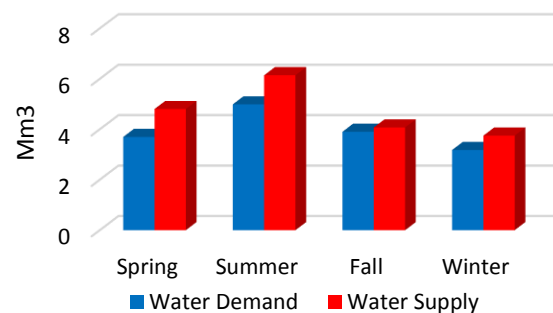
To assess climate change impacts, we incorporated projections from the IPCC's Sixth Assessment Report using the HadGem3-GC31-LL model under three SSP scenarios (SSP126-optimistic, SSP245-moderate, SSP585-pessimistic). The study calculated conditional probabilities for various water scarcity conditions based on predicted temperature and precipitation changes from 1980-2010 baseline data.

3. Results

Seasonal Water Patterns:

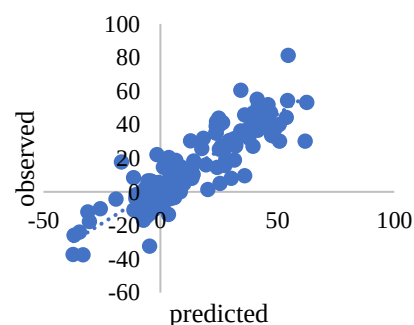
- Summer showed the highest water demand (35% above spring baseline) and supply (28% above spring)

- Winter recorded the lowest consumption (14% below spring) with 22% higher supply
- Negative scarcity indices occurred in January, May, and November (demand exceeding supply)
- March, April, and June showed the most favorable water balances.



Model Implementation:

- LSTM network utilized ReLU activation and Adam optimization
- Trained on 2011-2022 monthly data (80% training, 20% testing)



*Manuscript received June 21, 2024, Revised September 25, 2024, Accepted October 12, 2024.

¹ Corresponding Author, Associate Professor of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. Email: goodarzimr@um.ac.ir

² Ph.D. Student in Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Climate Projections:

- Temperature increases:
 - SSP126: +0.7°C (annual max +0.34°C)
 - SSP245: +0.81°C (+0.14°C)
 - SSP585: +1.26°C (+0.45°C)
- Precipitation changes:
 - SSP126: +77.7%
 - SSP245: +96.69%
 - SSP585: +95.61%

Risk Probabilities:

- SSP126: 34% probability of high-risk scenario (low precipitation, high temperature, high scarcity)
- SSP126: 29.7% probability of favorable conditions
- SSP245 showed increased critical scarcity probabilities
- SSP585 paradoxically indicated both increased precipitation and higher zero-scarcity probabilities

4. Conclusions

1. Despite summer's 35% higher demand, supply management has effectively prevented seasonal shortages in Yazd's extreme heat conditions.
2. All climate scenarios project increased precipitation for Yazd, with gains ranging from 77.7% to 96.69%.
3. Paradoxically, high water scarcity probabilities persist despite projected rainfall increases, suggesting demand growth may outpace supply gains.
4. As results derive from a single GCM (HadGem3-GC31-LL), future studies should incorporate multi-model ensembles to address projection uncertainties.



پیش‌بینی و تحلیل احتمال وقوع تغییرات اقلیمی و کمبود آب در یزد*

مقاله پژوهشی

مریم صباغ زاده^(۲)

محمد رضا گودرزی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.88585.1306

چکیده شهر یزد از دیرباز به دلیل اقلیم گرم و خشک با مشکل کم‌آبی مواجه بوده است و همواره مدیران منطقه تلاش کرده‌اند از طرق مختلف آب مورد نیاز را تأمین کنند. این مطالعه با تعریف شاخص کمبود آب بر اساس عرضه و تقاضای آب در ۱۲ سال گذشته و پیش‌بینی آن برای ۲۰ سال آینده با استفاده از روش *Long Short-Term Memory (LSTM)* به بررسی این موضوع پرداخته است. با توجه به نتایج، در فصل تابستان میزان مصرف آب بیشتر از سایر فصول بود. لذا به بررسی اثر تغییرات آب و هوا بر روی کمبود آب پرداخته شد. بدین منظور دما و بارش آینده با مدل اقلیمی *HadGEM3-GC31-LL* و با سه سناریوی *SSP126*، *SSP245* و *SSP585* که به ترتیب سناریوهای خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه هستند، پیش‌بینی گردید. سپس، ۸۱ حالت مختلف با توجه به تغییرات دما، بارش و کمبود آب تدوین شد و احتمال وقوع هر کدام با استفاده از احتمال شرطی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با وجود پیش‌بینی افزایش بارش سالانه تا ۷۷٪ در سناریوی خوش‌بینانه و تا بیش از ۹۰٪ در دو سناریوی دیگر، در آینده احتمال وقوع کم‌آبی شدید بیشتر خواهد بود. لذا تصمیم‌گیرندگان این منطقه همواره باید به فکر راه‌هایی جهت کاهش مصرف و افزایش تأمین آب باشند.

واژه‌های کلیدی شاخص کمبود آب، تغییر اقلیم، LSTM، احتمال شرطی.

Prediction and Analysis of the Probability of Climate Change and Water Scarcity in Yazd

Mohammad Reza Goodarzi

Maryam Sabaghzadeh

Abstract Yazd, a city historically challenged by a hot and dry climate, has long faced water scarcity issues. Regional managers have consistently sought various methods to secure the necessary water supply. This study examines the situation by defining a water scarcity index based on water supply and demand over the past 12 years and forecasting it for the next 20 years using the LSTM method. According to the results, water consumption is higher in the summer compared to other seasons. Consequently, the impact of climate change on water scarcity was investigated. Future temperature and precipitation were predicted using the HadGEM3-GC31-LL climate model under three scenarios: SSP126 (optimistic), SSP245 (moderate), and SSP585 (pessimistic). Subsequently, 81 different scenarios were developed considering variations in temperature, precipitation, and water scarcity, with the probability of each occurring calculated using conditional probability. The results indicate that despite the increase in annual forecasted precipitation by up to 77% in the optimistic scenario and over 90% in the other two scenarios, the likelihood of severe water scarcity in the future will be higher. Therefore, regional decision-makers must continually seek ways to reduce consumption and enhance water supply.

Key words climate change, Water Shortage Index, LSTM, Conditional probability.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۲۱ می‌باشد.

Email: Goodarzimr@yazd.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۲) دانشجوی دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

مقدمه

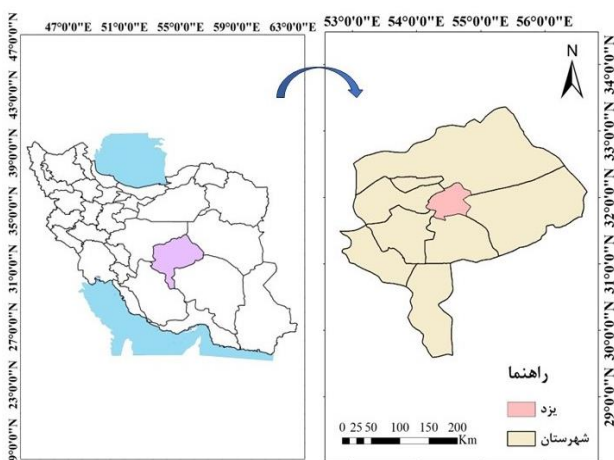
تأمین آب از دیرباز یکی از دغدغه‌های اساسی بشر بوده است [1,2]. با گسترش شهرنشینی این مسئله به یکی از مسائل اساسی مدیران تبدیل شده است [3,4]. این موضوع به خصوص در شهرهای واقع در مناطق با آب و هوای خشک جدی‌تر بوده است [5]. در این شهرها میزان بارندگی بسیار کم و در مقابل میزان تبخیر زیاد است و معمولاً تأمین آب در این مناطق وابسته به آب‌های زیرزمینی است [6]. هر چند برداشت آب از آب‌های زیرزمینی نیز به دلیل پیدایش مشکلاتی نظیر فرونشست دارای محدودیت‌هایی است و در سال‌های اخیر تصمیم‌گیرندگان این مناطق برای تأمین آب از روش‌های دیگری نظیر انتقال آب نیز استفاده کرده‌اند [7-9]. در سال‌های اخیر به دلیل پدیده تغییر اقلیم، کشور ما با کاهش بارش و افزایش دما نیز مواجه بوده است که باعث شده میزان آب در دسترس کاهش یابد [10,11]. این موضوع در مناطق خشک بیشتر احساس شده و باعث افزایش مشکل تأمین آب در سال‌های اخیر در این مناطق شده است [4]. در مطالعات گذشته به روش‌های مختلفی میزان کمبود آب در مناطق گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای مختلفی نیز که بر روی تنش آبی تأثیرگذار هستند، تاکنون در مطالعات در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه به چند مورد از این مطالعات اشاره شده است:

بزرگ حداد و همکاران [12] با استفاده از سنجش از دور پایین رفتن سطح آب را در کشورهای خاورمیانه محاسبه کردند که نشان دهنده کاهش ذخیره کل آب در آن منطقه است. بدین ترتیب وضعیت مصرف و تأمین آب را در کشورهای خاورمیانه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که لبنان، سوریه، عراق و ایران کشورهایی هستند که شاخص کم آبی بسیار منفی دارند. از جمله راهکارهایی که برای رفع این مشکل می‌تواند مؤثر واقع شود همکاری‌های بین‌المللی و تجارت آب مجازی است. بهمنی بهلولی و همکاران [13] جهت بررسی و تحلیل ارتباط میزان مصرف آب شهری با عوامل مختلف در شهرستان زرقان از سیستم دینامیک استفاده کردند. برای این کار از نرم‌افزار Vesim DSS استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف نشان داد که ساخت و ساز از مهم‌ترین عوامل افزایش مصرف آب شهری است و در مورد مصرف آب برای فضای سبز شهری نیز مهم‌ترین عامل نوع پوشش گیاهی است. Dau و همکاران [14] برای

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر روی میزان آب در دسترس، در حوضه رودخانه هوانگ چین، با استفاده از دو سناریوی تغییر اقلیمی مختلف، دما و بارش آینده را پیش‌بینی کردند. سپس با استفاده از HEC-HMS مدل‌سازی بارش - رواناب انجام شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار WEAP تأثیر افزایش جمعیت و تغییر اقلیم بر روی مقدار آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بارش ۱ تا ۸٪ و دما ۰٫۲ تا ۳٫۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و به دلیل افزایش بارش تا سال ۲۰۸۰ در صورتی که افزایش جمعیت صورت نگیرد، کمبود آبی در منطقه وجود نخواهد داشت. Heidari و همکاران [15] تأثیر الگوهای مختلف توسعه شهری را بر روی میزان کمبود آب مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SWAT و سناریوهای تغییر اقلیم میزان آب در دسترس آینده محاسبه شد و با استفاده از مدل یکپارچه آب شهری (IUWM) میزان تقاضای آب در آینده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مناطق شهری تحت الگوی توسعه پراکنده در مقایسه با الگوی تراکم بالا کمبود آب را با شدت، مدت و فراوانی بالاتر تجربه خواهند کرد. تابش و همکاران [16] با دو روش شبکه بیزین و تابع استون - گری مصرف آب شهری را به صورت بلندمدت پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که شبکه بیزین به دلیل در نظر گرفتن روابط علی و معلولی و در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی بهتر عمل می‌کند. مقایسه بین دو مدل نشان داد که دقت شبکه بیزین به مقدار ۵۱٪ بیشتر از تابع استون - گری است. غفاری مقدم و همکاران [17] برای پیش‌بینی مصرف آب شهری در سیستان از پنج الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده کردند و مصرف آب شهری را برای سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۴ تخمین زدند. نتایج نشان داد که در مدل نمایی و هیبرید الگوریتم NDFA (New dynamic firefly alghorithm) دارای کمترین میزان خطاست و در مدل خطی الگوریتم VSSFA (Variable Step Size Firefly Algorithm) دارای کمترین میزان خطا بود. همچنین اوج مصرف در ماه‌های تیر و مرداد بود.

همان‌طور که مشاهده شد تا کنون در هر یک از مطالعات انجام شده برای ارزیابی کمبود آب تنها بخشی از عوامل مؤثر را در نظر گرفته‌اند و یا مصرف آب را در بخش کوچکی در نظر گرفته‌اند و یا فقط بر روی گذشته مطالعه کرده و برای آینده پیش‌بینی نداشته‌اند. در این مطالعه کمبود آب در مقیاس شهری در نظر گرفته شد. بدین منظور شهر یزد به عنوان شهری که در

۱۲۱۵ متر از سطح دریاست و در جهت شمال غرب به جنوب شرق کشیده شده است. از آنجایی که این شهر در مجاورت کویر مرکزی ایران واقع شده است دارای آب و هوای گرم و خشک است. میانگین بارندگی بسیار کم و در حدود ۶۰ میلی‌متر در سال است. در مقابل میزان تبخیر بسیار زیاد است و حدوداً ۴ متر در سال است [19]. آب‌های زیرزمینی موجود در منطقه برای تأمین آب شهر کافی نیستند و این امر مدیران منطقه را بر آن داشت تا از روش‌های دیگری نیز در کنار استفاده از آب زیرزمینی برای تأمین آب مورد نیاز شهر استفاده کنند. طرح انتقال آب از زاینده‌رود به شهر یزد، در سال ۱۳۷۸ به بهره‌برداری رسید. تخصیص اولیه آن ۷۸ میلیون مترمکعب در سال بود که در سال ۱۳۸۳ به ۹۸ میلیون مترمکعب افزایش یافت و هدف، تأمین بخشی از آب مورد نیاز شهرهای یزد، میبد و اردکان بود [20]. خط دوم انتقال آب نیز از بهشت آباد به یزد، با هدف تأمین آب شرب شهر در سال ۱۳۹۲ آغاز شد. با اجرای این طرح، آب به طور مستقیم از حوضه کارون به استان وارد می‌شود. اما این طرح تا به حال پیشرفت زیادی نداشته و هنوز به مرحله بهره‌برداری نرسیده است [21]. از جمله اقدامات دیگر جهت کاهش مصرف آب، جمع‌آوری فاضلاب شهری و تصفیه آن و استفاده مجدد جهت آبیاری فضای سبز شهری بود که در سال ۱۳۸۱ با ظرفیت ۷۵ هزار نفر راه‌اندازی شد. آخرین پروژه، شیرین کردن آب خلیج فارس و انتقال آن به کرمان و یزد بود که هدف عمده این پروژه تأمین آب مورد نیاز صنعت و معدن بود و در درجه دوم با ۱۵ میلیون مترمکعب در سال تأمین بخشی از آب شرب شهرهای هرمزگان، کرمان و یزد را به عهده گرفت [22,23].



شکل ۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه گرم و خشک واقع شده است و همیشه تأمین آب از مشکلات اساسی آن بوده است مورد بررسی قرار گرفت. برای این امر با استفاده از میزان عرضه و تقاضای آب شهر شاخصی با عنوان شاخص کمبود آب تعریف گردید. اما برای بررسی کمبود آب فقط به گذشته بسنده نشد و با استفاده از روش LSTM مقدار آن برای ۲۰ سال آینده نیز تخمین زده شد. همچنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت عوامل مؤثر بر این شاخص کمبود آب، تغییرات آب و هوایی که با عنوان تغییر اقلیم یاد می‌شود، محاسبه شد. از آنجایی که انتظار می‌رود تغییر اقلیم بر روی میزان عرضه و تقاضای آب تأثیرگذار باشد، دما و بارش ۲۰ سال آینده شهر یزد با استفاده از گزارش ششم IPCC که جدیدترین گزارش تغییر اقلیمی است، پیش‌بینی گردید و احتمال وقوع شرایط مختلف در شاخص کمبود آب با توجه به تغییرات دما و بارش مورد محاسبه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی کمبود آب، با ترکیب میزان عرضه و تقاضای آب، شاخص کمبود آب تعریف گردید. سپس از داده‌های ماهانه مربوط به عرضه و تقاضای آب در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ برای پیش‌بینی میزان کمبود آب در ۲۰ سال آینده استفاده شد. برای این کار از روش شبکه عصبی عمیق LSTM استفاده شد. سپس تأثیر تغییر اقلیم بر روی کمبود آب مورد بررسی قرار گرفت. جهت پیش‌بینی دما و بارش آینده از گزارش ششم IPCC و مدل HadGem3-GC31-LL استفاده شد و دما و بارش ۲۰ سال آینده تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 استخراج شد. این سناریوها به ترتیب حالت خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه را در تغییر آب و هوا در نظر می‌گیرند. در نهایت با استفاده از احتمال شرطی احتمال وقوع شرایط مختلف آب و هوایی و کمبود آب محاسبه شد.

منطقه مورد مطالعه

شهر یزد بین عرض جغرافیایی $31^{\circ} 56' 38''$ تا $31^{\circ} 48' 56''$ شمالی و طول جغرافیایی $54^{\circ} 16' 10''$ تا $54^{\circ} 24' 24''$ شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. این شهر با وسعتی در حدود 99/5 کیلومتر مربع، در مرکز استان یزد در مسیر راه اصفهان به کرمان واقع شده است [18]. ارتفاع این شهر به طور متوسط

شاخص کمبود آب

برای تجزیه و تحلیل میزان کمبود آب باید عرضه و تقاضای آب به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد. منظور از تقاضای آب، مصرف آب شهر است. منظور از عرضه آب نیز مقدار آب تأمین شده از منابع مختلف شامل آب‌های زیرزمینی و انتقالی است. مصرف و تأمین آب شهر یزد از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ به صورت ماهانه از شرکت آب و فاضلاب شهرستان یزد تهیه شد. بدین منظور شاخص کمبود آب به صورت زیر تعریف گردید. در صورتی که مقدار این شاخص منفی باشد، نشان دهنده بیشتر بودن میزان تقاضا نسبت به عرضه است. در این صورت شهر با بحران تأمین آب مواجه خواهد شد.

$$SI = \frac{\text{Supplywater} - \text{Demandwater}}{\text{Supplywater}} * 100 \quad (1)$$

روش LSTM

پیش‌بینی سری زمانی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی حافظه بلند مدت (LSTM) یکی از تکنیک‌های پیشرفته و کارآمد در تحلیل داده‌های زمانی است. این روش نوع خاصی از شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) هستند که برای یادگیری روابط بلندمدت در داده‌های سری زمانی طراحی شده‌اند [24].

STM توسط Schmidhuber در سال ۱۹۹۷ معرفی شد تا بر مشکلات RNN‌های استاندارد در یادگیری روابط بلندمدت غلبه کند. RNN‌ها به دلیل اثر محو شدن یا انفجار گرادیان‌ها در فرایند آموزش، در یادگیری روابط بلندمدت دچار مشکل می‌شوند [25]. LSTM با معرفی ساختاری خاص به نام «سلول حافظه» این مشکل را حل می‌کند و یک واحد LSTM شامل چندین بخش اصلی است:

۱. سلول حافظه: اطلاعات را در طول زمان ذخیره می‌کند.
 ۲. دروازه فراموشی (Forget Gate): تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از اطلاعات قبلی را فراموش کند.
 ۳. دروازه ورودی (Input Gate): تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از اطلاعات جدید به سلول حافظه اضافه شود.
 ۴. دروازه خروجی (Output Gate): تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از اطلاعات سلول حافظه به عنوان خروجی استفاده شود.
- این دروازه‌ها از سیگموئید و تانژانت هائپرولیک به عنوان توابع فعال‌سازی استفاده می‌کنند که مقدار آن‌ها بین صفر و یک قرار دارد [26].

طبق این روابط ورودی X_t در زمان t به صورت انتخابی در سلول C_t که توسط دروازه ورودی انتخاب شده است، ذخیره می‌شود. وضعیت آخرین لحظه سلول C_{t-1} به صورت انتخابی توسط دروازه فراموشی فراموش می‌شود. سرانجام دروازه خروجی کنترل می‌کند که چه بخشی از سلول C_t به خروجی h_t اضافه شود. حال اگر I_t را به عنوان دروازه ورودی و F_t را به عنوان دروازه فراموشی در نظر بگیریم. مقدار به روز شده وضعیت دروازه C_t به صورت زیر خواهد بود [27].

$$C_t = F_t * C_{t-1} + I_t * (\text{relu}(W_c * [O_{t-1}, X_t] + b_c)) \quad (2)$$

$$I_t = \sigma(W_i * [O_{t-1}, X_t] + b_i) \quad (3)$$

$$F_t = \sigma(W_f * [O_{t-1}, X_t] + b_f) \quad (4)$$

که در آن W_i, W_f, W_c ماتریس وزنی هستند، O_{t-1} خروجی سلول قبلی است، X_t ورودی، b_i, b_f, b_c بردارهای بایاس هستند. خروجی نهایی O_t به صورت زیر به دست می‌آید.

$$O_t = \sigma_t * \text{Relu}(C_t) \quad (5)$$

ReLU (Rectified Linear Unit) یک تابع فعال‌سازی است که به صورت زیر عمل می‌کند:

$$\text{Relu} = \text{Max}(0, x) \quad (6)$$

این تابع باعث می‌شود مقادیر منفی ورودی به صفر تبدیل شوند و تنها مقادیر مثبت حفظ شوند. در شبکه‌های عصبی، ReLU به دلیل رفتار ساده و عدم ایجاد مشکل اشباع در مقایسه با توابع سیگموئیدی یا هائپرولیک بسیار پرکاربرد است [27].

در این مطالعه جهت بهینه‌سازی نیز از الگوریتم Adam (Adaptive Moment Estimation) استفاده گردید. الگوریتم Adam (Adaptive Moment Estimation) یک روش بهینه‌سازی پرکاربرد در شبکه‌های عصبی است که ترکیبی از دو الگوریتم‌های Momentum و RMSProp را ارائه می‌دهد. هدف اصلی این الگوریتم بهینه‌سازی سرعت همگرایی و دقت در پیدا کردن نقطه بهینه است Adam. به ویژه در مسائلی که داده‌های متنوع و نویز زیادی دارند، بسیار کارآمد است [28].

جهت پیش‌بینی سری زمانی با LSTM در ابتدا داده‌ها نرمال‌سازی شدند یعنی داده‌ها به یک بازه مشخص مانند [۰, ۱] تبدیل شد تا آموزش مدل کارآمدتر شود. سپس داده‌ها به دو مجموعه آموزش و آزمون تقسیم شدند. ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش

استفاده می‌شوند.

SSP1-2.6 (SSP126): این سناریو نشان‌دهنده یک مسیر با سطح پایین انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این مسیر به دنبال اهداف پایداری بالا، کاهش نابرابری‌ها و همکاری‌های بین‌المللی قوی است. در این سناریو، تغییرات اقلیمی تا حد ممکن کاهش می‌یابد [34].

SSP2-4.5 (SSP245): این سناریو یک مسیر میانه را با انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهد. در این مسیر، روندهای اجتماعی و اقتصادی فعلی با بهبودهای تدریجی در تکنولوژی و سیاست‌های زیست‌محیطی ادامه می‌یابد [35].

SSP5-8.5 (SSP585): این سناریو نمایانگر یک مسیر با سطح بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این مسیر بر اساس رشد اقتصادی سریع و اتکای زیاد به سوخت‌های فسیلی پیش می‌رود و به عنوان یک سناریوی بسیار بدبینانه برای تغییرات اقلیمی در نظر گرفته می‌شود [36].

این سناریوها به محققان و سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا تأثیرات احتمالی سیاست‌های مختلف را بر تغییرات اقلیمی و اقدامات کاهش و سازگاری بهتر درک کنند و برنامه‌های مؤثرتری برای مقابله با چالش‌های اقلیمی ایجاد کنند.

بعد از استخراج پیش‌بینی‌های اقلیمی نوبت به ریزمقیاس‌سازی می‌شود. در این تحقیق از مدل Lars-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی (Downscaling) داده‌های مدل گردش عمومی استفاده شده است. دلیل این موضوع این است که دقت GCM ها به دلیل محدودیت‌های مدل‌سازی آن‌ها در مقیاس‌های محلی کافی نیست. GCM ها معمولاً نمی‌توانند پدیده‌های کوچک مقیاس مانند تغییرات محلی آب و هوا را به خوبی شبیه‌سازی کنند. ریزمقیاس‌نمایی، خطاها و سوگیری‌های موجود در داده‌های GCM را اصلاح می‌کند و به ما امکان می‌دهد تا نتایج مطالعات را با مشاهدات واقعی بهتر تطبیق دهیم. در نتیجه، GCM ها بدون انجام فرایند ریزمقیاس‌نمایی قادر به ارائه اطلاعات قابل اعتماد از دما و بارش در مقیاس محلی نیستند [37]. در این تحقیق از مدل Lars-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی داده مدل گردش عمومی استفاده شده است.

و ۲۰٪ برای آزمایش در نظر گرفته شدند [29].

برای ساخت و آموزش مدل از کتابخانه‌هایی مانند TensorFlow یا Keras استفاده گردید. سپس مدل LSTM تعریف شد. این مدل شامل لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی است [30]. سپس تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه، نرخ یادگیری، و تابع خسارت مانند MSE تعیین شد. در نهایت مدل با استفاده از داده‌های آموزشی آزمایش شد و با معیارهایی مانند MAE، RMSE، دقت مدل محاسبه گردید. سپس با استفاده از مدل آموزش دیده، برای آینده پیش‌بینی‌هایی صورت گرفت.

سناریوهای تغییر اقلیم

جهت پیش‌بینی دما و بارش ۳۰ سال آینده از گزارش ششم هیئت بین‌المللی تغییرات اقلیمی (IPCC) که به نام «گزارش ارزیابی ششم (AR6)» شناخته می‌شود، استفاده شد. همچنین از خروجی مدل HadGEM3-GC31-LL که یکی از مدل‌های پیشرفته اقلیمی است و توسط دفتر هواشناسی بریتانیا (Met Office) توسعه یافته است، استفاده شد. این مدل بخشی از خانواده مدل‌های Hadley Centre Global Environment Model (HadGEM) است و برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی اثرات آن بر سیستم‌های مختلف زمین استفاده می‌شود. HadGEM3-GC31-LL به دلیل رزولوشن بالا و تعاملات پیچیده بین اجزای مختلف مدل، دقت بالایی در شبیه‌سازی پدیده‌های اقلیمی مختلف دارد. همچنین توانایی شبیه‌سازی دقیق تعاملات بین جو، اقیانوس، یخ دریا و سطح زمین را دارد که به درک بهتر فرایندهای اقلیمی کمک می‌کند [31]. مدل HadGEM3-GC31-LL به طور مستمر به‌روزرسانی می‌شود تا شامل داده‌ها و فرضیات جدید علمی باشد، که این امر به دقت و قابلیت اطمینان مدل می‌افزاید. در مجموع، مدل HadGEM3-GC31-LL یکی از ابزارهای کلیدی در تحقیقات اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی است که به محققان کمک می‌کند تا تأثیرات بلندمدت تغییر اقلیم را بهتر درک و مدیریت کنند [32,33].

اکنون در گزارش ارزیابی ششم (Assessment Report) IPCC (AR6) گروه جدیدی از سناریوهای انتشار به نام سناریوهای SSP (Shared Socio- Economic Pathways) ارائه شده است. این سناریوها برای بررسی تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیاست‌های مختلف در مقابله با تغییرات اقلیمی

احتمال شرطی

احتمال شرطی (Conditional Probability) مفهومی در نظریه احتمالات است که به بررسی احتمال وقوع یک رویداد به شرط وقوع رویداد دیگری می‌پردازد [38]. این مفهوم کمک می‌کند تا روابط بین رویدادها بهتر درک شود و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری انجام شود. احتمال شرطی در مسائل مربوط به مدیریت و تأمین آب شهری، به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاربردهای زیادی دارد [39]. به عنوان مثال پیش‌بینی منابع آب به شرط وقوع پدیده ال‌نینو، مدیریت عرضه و تقاضای آب به خصوص در تابستان و یا تحلیل ریسک خشکسالی [40-42]. احتمال شرطی بین سه متغیر این امکان را می‌دهد تا روابط پیچیده بین عوامل مختلف ارزیابی شده و تحلیل‌های دقیق‌تری انجام شود. در زمینه مدیریت منابع آب، این تحلیل‌ها می‌توانند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک کمک کنند. با استفاده از این مفهوم، می‌توان تأثیرات تغییرات آب و هوایی و سایر عوامل محیطی را بر منابع آب بهتر پیش‌بینی کرد [43].

در این مطالعه سه متغیر تصادفی دما، بارش و شاخص کمبود آب در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از شرایط مختلف آب و هوایی و شاخص کمبود آب، سناریوهایی تدوین گردید و احتمال وقوع هر سناریو با استفاده از احتمال شرطی محاسبه شد.

$$P(WSI|P,T) = \frac{P(WSI \cap P \cap T)}{P(P \cap T)} \quad (7)$$

که در این رابطه WSI: شاخص کمبود آب، P: بارش و T: دما است.

شاخص‌های ارزیابی

MSE (Mean Squared Error) یا Mean Squared Error (میانگین مربعات خطا) یک معیار ارزیابی برای مدل‌های رگرسیونی و پیش‌بینی است که میزان تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده را محاسبه می‌کند. این معیار به صورت میانگین مربع اختلافات بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تعریف می‌شود [44].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (8)$$

MSE همیشه عددی غیرمنفی است، زیرا اختلاف‌ها به توان دو رسیده‌اند و نمی‌توانند منفی باشند. هر چقدر MSE کوچک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری انجام داده است. مقدار صفر برای MSE به معنای پیش‌بینی کاملاً دقیق و بدون خطاست. با این حال، بازه دقیق مناسب بودن MSE بستگی به مقیاس داده‌ها و حوزه کاری دارد. برای داده‌هایی با مقادیر بزرگ، MSE بزرگ‌تری نیز ممکن است مناسب باشد. اما به طور کلی، هر چقدر MSE کمتر باشد، مدل عملکرد بهتری دارد.

MAE (Mean Absolute Error) این معیار میانگین قدر مطلق اختلافات بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده را محاسبه می‌کند. برخلاف MSE که اختلافات را به توان دو می‌رساند، MAE صرفاً از قدر مطلق این اختلافات استفاده می‌کند و به همین دلیل، کمتر به خطاهای بزرگ حساس است [45].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (9)$$

MAE همیشه مقداری غیرمنفی دارد، زیرا از قدر مطلق استفاده می‌کند. مانند MSE، هر چقدر MAE کوچک‌تر باشد، مدل دقیق‌تر است. نسبت به خطاهای بزرگ حساسیت کمتری دارد، زیرا خطاها به توان دو نمی‌رسند.

MAPE (Mean Absolute Percentage Error) یک

معیار ارزیابی برای مدل‌های پیش‌بینی است که درصد خطای پیش‌بینی نسبت به مقدار واقعی را به صورت میانگین محاسبه می‌کند. این معیار اجازه می‌دهد تا خطاها را به صورت نسبی (درصدی) ارزیابی کنید، که آن را به ویژه برای داده‌هایی با مقیاس‌های متفاوت مفید می‌سازد [46].

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (10)$$

MAPE نشان می‌دهد که به طور میانگین پیش‌بینی‌ها چه درصدی از مقدار واقعی فاصله دارند. چون این معیار به درصد بیان می‌شود، امکان مقایسه خطاها در داده‌هایی با مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌سازد.

MAPE معمولاً بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ است، هر چه MAPE کوچک‌تر باشد، پیش‌بینی دقیق‌تر است. به طور کلی، MAPE

دارد. NSE منفی نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی‌ها عملکرد ضعیفی داشته و استفاده از میانگین داده‌ها نتایج بهتری خواهد داشت.

در تمام این روابط O: مقدار مشاهداتی، P: مقدار پیش‌بینی شده، n: تعداد نمونه‌ها و $\bar{O}$: میانگین مقادیر مشاهداتی است.

نتایج

محاسبه شاخص کمبود آب

همان‌طور که گفته شد برای محاسبه شاخص کمبود آب نیاز به مقدار عرضه و تقاضاست. در این مطالعه از عرضه و تقاضای ماهانه سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ شهر یزد استفاده شد. مقادیر استفاده شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای آشنایی بیشتر با داده‌های عرضه و تقاضای آب شهر یزد، خصوصیات آماری این مقادیر در جدول (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار حداکثر تقاضای آب از عرضه بیشتر است که نشان دهنده کمبود آب در برخی مواقع در این شهر است. اما بیشتر بودن میانگین عرضه نسبت به تقاضا نشان می‌دهد که مدیران و مسئولان شهر در تلاشند به روش‌های گوناگون آب مورد نیاز را تأمین کنند.

از آنجایی که انتظار می‌رفت دما بر میزان مصرف آب تأثیرگذار باشد و برای تحلیل بهتر مقادیر، میانگین عرضه و تقاضای آب به صورت فصلی نیز محاسبه شد که در شکل (۳) نشان داده شده است.

کمتر از ۱۰٪ به عنوان پیش‌بینی بسیار خوب در نظر گرفته می‌شود، بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ معمولاً خوب است، و ۲۰٪ تا ۵۰٪ می‌تواند قابل قبول باشد، اما بیش از ۵۰٪ به عنوان عملکرد ضعیف مدل تلقی می‌شود.

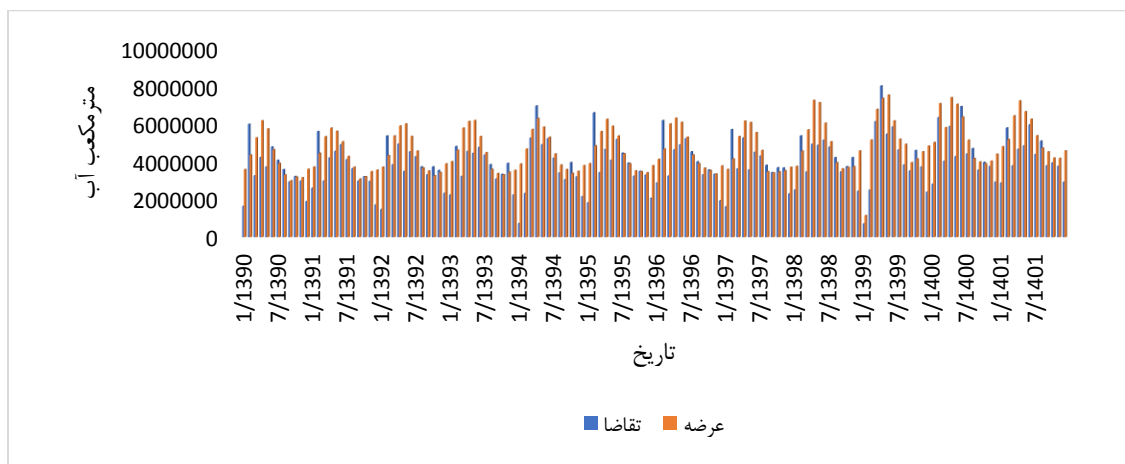
RMSE (Root Mean Square Error) این معیار، میزان خطای پیش‌بینی مدل را به صورت ریشه دوم میانگین مربعات اختلافات بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده محاسبه می‌کند. RMSE به دلیل استفاده از مربع اختلافات، حساسیت بیشتری به خطاهای بزرگ دارد [47].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (11)$$

NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) NSE یک معیار ارزیابی برای مدل‌های هیدرولوژیکی و دیگر مدل‌های پیش‌بینی است که عملکرد مدل را در پیش‌بینی مقادیر مشاهده شده ارزیابی می‌کند. NSE به بررسی میزان تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده نسبت به مقادیر متوسط مشاهده شده می‌پردازد [48].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

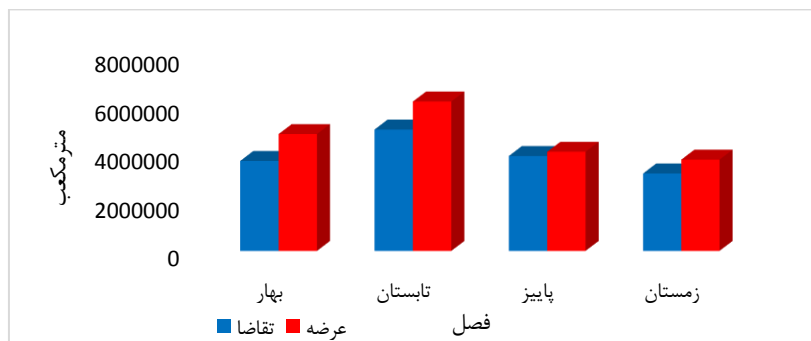
$NSE = 1$ نشان‌دهنده یک مدل کامل و ایدئال است. NSE بین ۰ تا ۱ به معنای عملکرد قابل قبول مدل است. به طور کلی، هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی دقیق‌تری



شکل ۲ مجموع عرضه و تقاضای ماهانه

جدول ۱ خصوصیات آماری داده‌های عرضه و تقاضا

میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	
۴,۶۹	۴,۴۸	۱,۱۵۳	۷,۵۳	۱,۱۸	عرضه آب (میلیون مترمکعب)
۳,۹۴	۳,۸۳	۰,۷۱	۸,۰۱	۱,۲۴	تقاضای آب (میلیون مترمکعب)

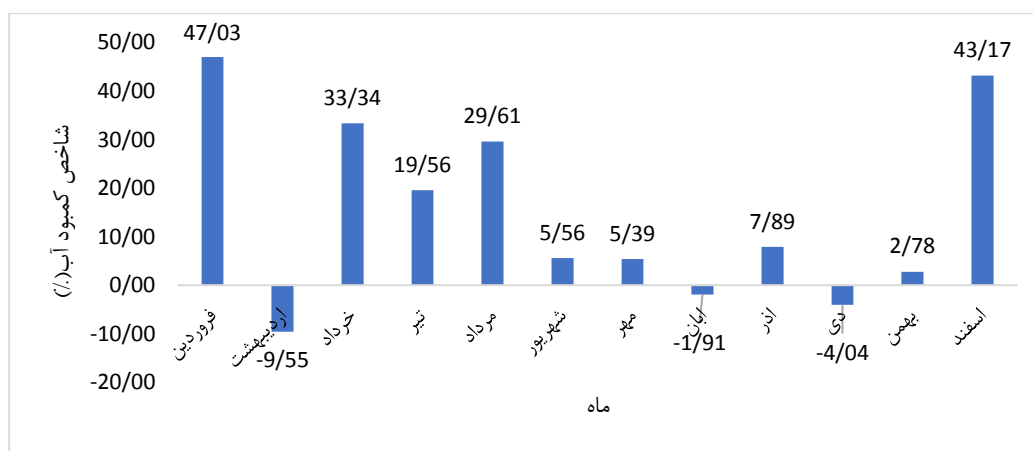


شکل ۳ میانگین عرضه و تقاضای آب فصلی

همان طور که مشخص است در برخی از ماه‌ها میانگین شاخص کمبود آب منفی شده است که بدین معناست که در این ماه‌ها میانگین تقاضا بیشتر از عرضه شده است. این اتفاق در ماه‌های دی، اردیبهشت و آبان افتاده است. بیشترین میزان شاخص نیز مربوط به ماه‌های اسفند، فروردین و خرداد است. همان طور که مشاهده شد در فصل تابستان میزان تقاضا بیشتر از سایر فصل‌هاست اما مثبت بودن شاخص کمبود آب نشان می‌دهد که مدیران منطقه همواره تلاش کرده‌اند در فصل تابستان آب مورد نیاز را عرضه کنند تا از ایجاد مشکل برای مصرف‌کنندگان در تابستان به خصوص در شهر یزد که تابستان با دمای هوای بالایی روبه‌روست و کمبود آب می‌تواند باعث مشکلات زیادی برای مردم شود، جلوگیری کنند.

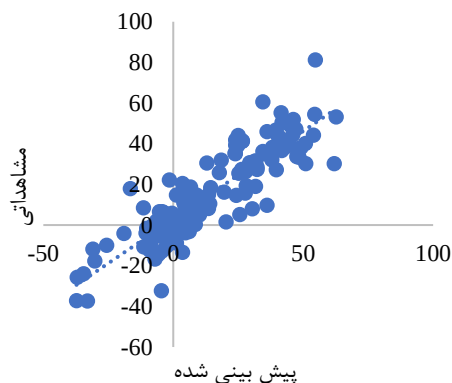
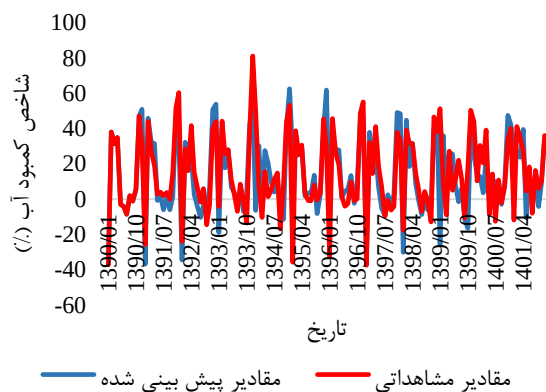
همان طور که در شکل (۳) مشخص است میزان عرضه و تقاضا در فصل تابستان بیش از سایر فصل‌هاست. بعد از آن فصل بهار و پاییز و در نهایت فصل زمستان دارای کمترین مقدار است. با توجه به مصرف متوسط آب در بهار، اگر فصل بهار را به عنوان مبنا در نظر بگیریم. میزان تقاضای آب در فصل تابستان ۳۵٪ بیشتر از فصل بهار است. مقدار عرضه آب نیز در تابستان ۲۸٪ بیشتر از فصل بهار است. فصل زمستان نیز به عنوان فصلی با کمترین میزان مصرف، مقدار مصرف آب در زمستان ۱۴٪ کمتر از فصل بهار است و مقدار عرضه آب در زمستان ۲۲٪ بیشتر از فصل بهار است.

سپس با استفاده از مقادیر عرضه و تقاضا شاخص کمبود آب محاسبه گردید که میانگین ماهانه آن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ میانگین ماهانه شاخص کمبود آب

آب در این ماه‌ها در آینده است. در ماه‌های تیر و مهر بیشترین افزایش را داشته است که این مقدار حدود ۱۱,۵ واحد است.



شکل ۵. منحنی خطی و اسکاتر پلات مقادیر مشاهداتی و محاسباتی

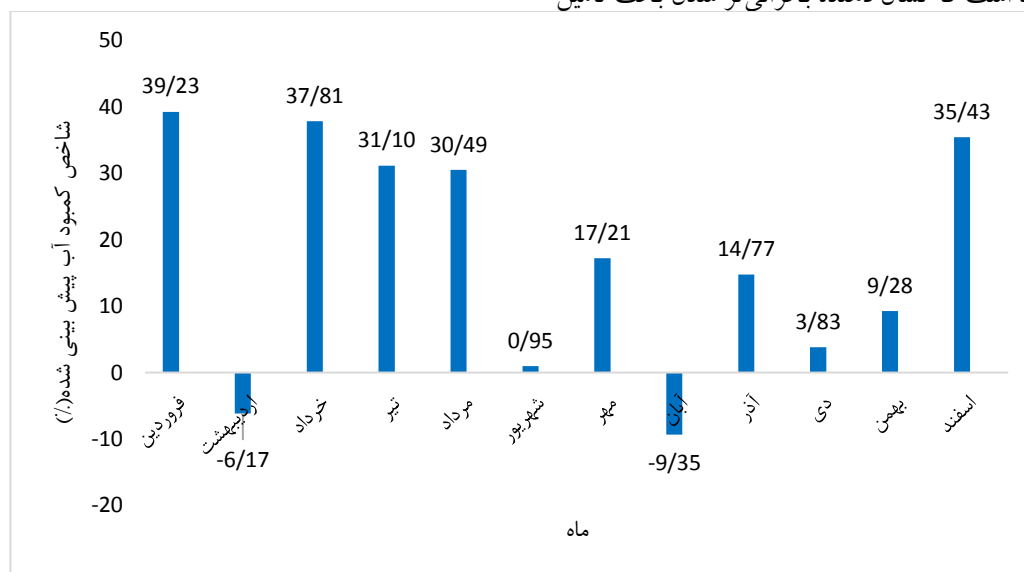
پیش‌بینی سری زمانی شاخص کمبود آب با روش LSTM

برای پیش‌بینی سری زمانی شاخص کمبود آب در ۲۰ سال آینده به صورت ماهانه از روش LSTM استفاده شد. این روش یکی از روش‌های هوش مصنوعی یادگیری عمیق است که در مطالعات مختلف و برای پیش‌بینی مسائل مختلف از آن استفاده شده است. در این روش از تابع فعال‌ساز (Rectified Linear Unit) Relu استفاده گردید، همچنین جهت بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی Adam (Adaptive Moment Estimation) استفاده شد. برای آموزش مدل از داده‌های شاخص کمبود آب ماهانه مربوط به سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. ۸۰٪ داده‌ها به عنوان آموزش و ۲۰٪ برای آزمایش استفاده شد. در شکل (۵) نمودار نقطه‌ای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

دقت پیش‌بینی انجام شده در جدول (۲) نشان داده شده است. همان طور که در جدول مشخص است دقت مدل قابل قبول است.

در شکل (۶) میانگین ماهانه شاخص کمبود آب پیش‌بینی شده برای ۲۰ سال آینده نشان داده شده است. همان طور که در شکل نیز نشان داده شده است در مقادیر پیش‌بینی شده نیز ماه‌های اردیبهشت و آبان دارای شاخص کمبود آب منفی هستند که نشان دهنده بیشتر بودن مقدار تقاضا نسبت به عرضه است.

مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر تاریخی در ماه‌های فروردین، شهریور، آبان و اسفند به ترتیب ۷,۸، ۴,۶، ۷,۴ و ۷,۷۵ واحد کمتر شده است که نشان دهنده بحرانی‌تر شدن بحث تأمین



شکل ۶. شاخص کمبود آب پیش‌بینی شده

پیش‌بینی دما و بارش آینده با سناریوهای تغییر اقلیم

همان‌طور که مشاهده شد میزان عرضه و تقاضای آب و به دنبال آن شاخص کمبود آب در فصل‌های مختلف متفاوت بود. انتظار می‌رود دما و بارش از جمله عوامل تأثیرگذار بر آن باشد. به همین دلیل در کنار پیش‌بینی شاخص کمبود آب در آینده، دما و بارش نیز برای ۲۰ سال آینده با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم پیش‌بینی گردید. جهت این کار سه سناریوی خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه (SSP126, SSP245, SSP585) در نظر گرفته شد. جهت پیش‌بینی دما و بارش آینده از اطلاعات دما و بارش سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ استفاده گردید. به‌منظور بررسی میزان قابل اعتماد بودن اطلاعات شبیه‌سازی شده از سه شاخص آماری ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE) استفاده شد. جدول (۳) نتایج واسنجی پارامترهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده NCEP را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است پارامترهای اقلیمی با دقت خوبی پیش‌بینی شده‌اند.

در شکل‌های زیر متوسط دما و بارش ماهانه پیش‌بینی شده در سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۲۲ تحت سه سناریوی مختلف در مقایسه با متوسط دما و بارش دوره گذشته نشان داده شده است. در مورد دمای حداقل که در شکل (۷) نشان داده شده است. در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، بهمن و اسفند میانگین سالانه دمای حداقل در آینده تحت هر سه سناریو اندکی افزایش خواهد

یافت. در ماه تیر دمای حداقل گذشته و آینده در هر سه سناریو تقریباً یکسان است. در باقی ماه‌ها مقدار دمای گذشته با دمای آینده در سناریوی SSP245 تقریباً یکسان خواهد بود و در سناریوی SS126 اندکی کمتر از مقدار گذشته است و در سناریوی SSP585 اندکی بیشتر از متوسط دمای گذشته است. به طور میانگین تغییر سالانه متوسط دمای حداقل در آینده نسبت به گذشته در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول مشخص است در سناریوی خوش‌بینانه دمای حداقل ۰,۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. در سناریوی متوسط ۰,۸۱ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی بدبینانه ۱,۲۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.

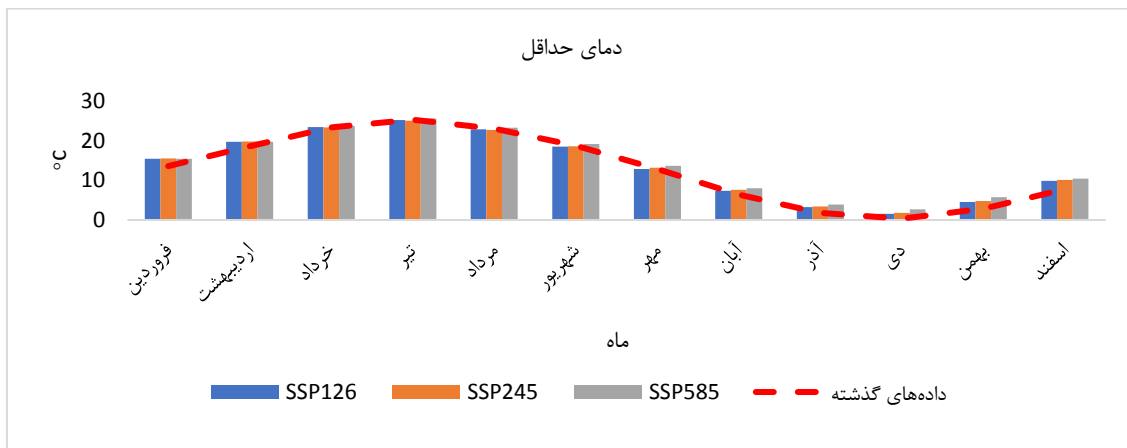
در دمای حداکثر همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، فقط در ماه دی در سناریوی SSP585 و در ماه‌های مهر، آبان و آذر در سناریوی SSP126 مقدار دمای حداکثر در آینده کاهش خواهد یافت. در باقی ماه‌ها متوسط دمای حداکثر گذشته و آینده تقریباً یکسان خواهد بود. به طور متوسط، میانگین دمای حداکثر سالیانه در سناریوی SSP126 نسبت به گذشته ۰,۳۴ افزایش خواهد و این افزایش در سناریوی SSP245 و SSP585 به ترتیب ۰,۱۴ و ۰,۴۵ خواهد بود.

جدول ۲ دقت پیش‌بینی سری زمانی شاخص کمبود آب با روش LSTM

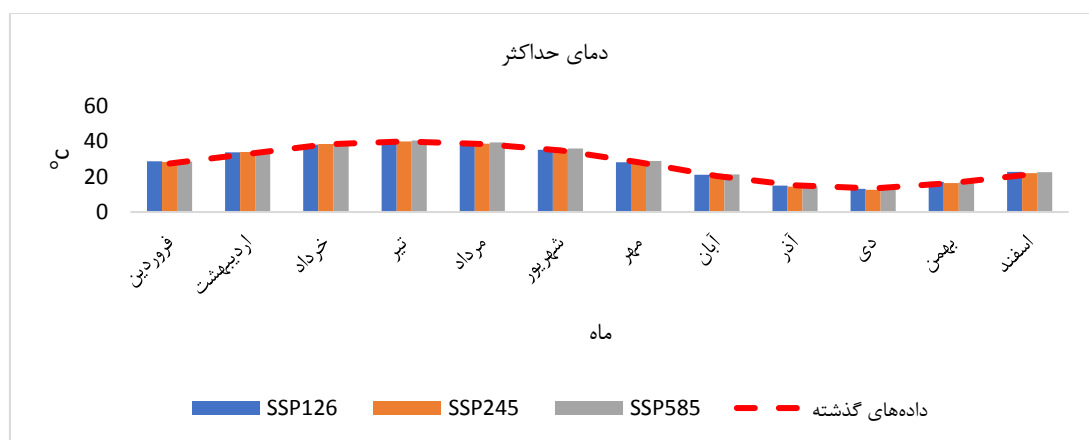
MSE	MAE	MAPE	RMSE	NSE
0.018	0.11	0.32	0.13	0.75

جدول ۳ شاخص‌های خطاسنجی پارامترهای اقلیمی دوره مشاهداتی با شبیه‌سازی شده

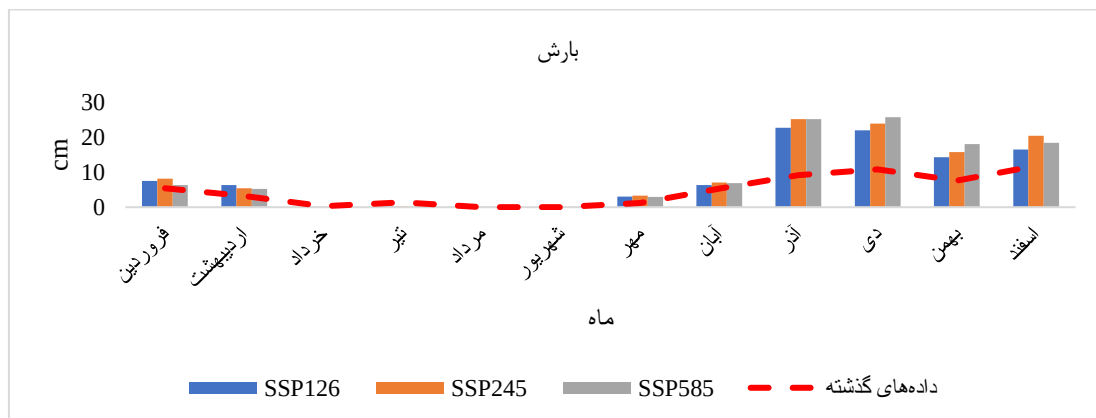
واسنجی				پارامتر
R^2	NSE	RMSE	سال دوره	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۱۲۶	۱۳۵۸-۱۳۹۲	دمای حداقل
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۱۰۵	۱۳۵۸-۱۳۹۲	دمای حداکثر
۰/۹۵۵	۰/۹۴۶	۲/۷۵۶	۱۳۵۸-۱۳۹۲	بارش



شکل ۷ متوسط دمای حداقل ماهانه در دوره آتی (۱۴۰۲-۱۴۲۲) نسبت به مشاهداتی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)



شکل ۸ متوسط دمای حداکثر ماهانه در دوره آتی (۱۴۰۲-۱۴۲۲) نسبت به مشاهداتی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)



شکل ۹ متوسط بارش ماهانه در دوره آتی (۱۴۰۲-۱۴۲۲) نسبت به مشاهداتی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)

این افزایش بارش به خصوص در فصل بهار مشاهده شده است. به طور متوسط میانگین سالانه بارش در سناریوی SSP126، ۷۷,۷٪ افزایش خواهد داشت. در سناریوی SSP245 این مقدار به ۹۶,۶۹٪ و در سناریوی SSP585، ۹۵,۶۱٪ افزایش خواهد داشت.

در مورد بارش وضعیت کاملاً متفاوت است و همان طور که در شکل (۹) نیز مشخص است تغییرات زیادی به خصوص در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند در هر سه سناریو پیش‌بینی شده است. این نشان دهنده این است که در سال‌های آینده شهر یزد با افزایش بارش روبه‌رو خواهد شد. هر چند در دو سال اخیر نیز

تقسیم شد. این کار برای شاخص کمبود آب پیش‌بینی شده برای آینده نیز انجام گرفت. این تقسیم‌بندی بدین صورت انجام گرفت که در ابتدا میانگین بارش و شاخص کمبود آب در گذشته محاسبه شد. برای بارش و شاخص کمبود آب، ۰,۲۵ برابر میانگین کمتر از این مقدار به عنوان حد پایین و ۰,۲۵ برابر بیشتر از مقدار میانگین به عنوان حد بالا در نظر گرفته شد. در مورد دما به دلیل تغییرات کم دما در آینده، میزان تغییرات میانگین در آینده که در جدول (۴) نشان داده شده است، در نظر گرفته شد. بدین صورت که میانگین دمای گذشته به عنوان حد پایین و میانگین دمای گذشته به اضافه مقدار تغییر دمای نشان داده شده در جدول (۴) به عنوان حد بالا در نظر گرفته شد.

سپس تمام مقادیر بین حد پایین و بالا به عنوان دسته متوسط در نظر گرفته شد. در مورد دما و بارش مقادیر کمتر از حد پایین به عنوان دسته کم و بیشتر از حد بالا با عنوان دسته زیاد در نظر گرفته شد. در شاخص کمبود آب، مقادیر کمتر از حد پایین نشان دهنده افزایش تقاضا نسبت به تأمین آب است که باعث افزایش کمبود آب می‌شود. بنابراین به عنوان دسته زیاد در نظر گرفته شده و بیشتر از حد بالا با عنوان دسته کم در نظر گرفته شد. سپس احتمال وقوع ترکیب حالت‌های دما، بارش و شاخص کمبود آب محاسبه شد. در هر سناریوی تغییر اقلیمی ۲۷ حالت ممکن است اتفاق بیفتد که در جدول (۵)، (۶) و (۷) احتمال وقوع هر کدام نشان داده شده است.

با این اوصاف انتظار می‌رود که در آینده مشکل کمبود آب این منطقه کم‌رنگ‌تر خواهد شد. هر چند که در سال‌های اخیر این منطقه با خشکسالی مواجه بوده است و مدیران را بر آن داشت تا برای تأمین آب منطقه برداشت آب‌های زیرزمینی و انتقال آب را افزایش دهند. اما همان طور که افزایش بارش پیش‌بینی شده است عوامل اجتماعی مانند افزایش جمعیت هم می‌توانند بر میزان کمبود آب تأثیرگذار باشند. لذا تنها در نظر گرفتن افزایش بارش خوش‌بینانه است و جهت انجام برنامه‌ریزی دقیق‌تر جهت تأمین آب سایر عوامل مؤثر بر این موضوع نیز باید در نظر گرفته شود.

تحلیل سناریوهای احتمالی

همان طور که در بخش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفت. مقدار دما، بارش و شاخص کمبود آب در آینده با تغییراتی مواجه است اما محاسبه احتمال وقوع وضعیت‌های مختلف مشخص نیست. به عنوان مثال شرایط کاهش دما، افزایش بارش و کاهش شاخص کمبود آب برای منطقه شرایط بسیار مطلوبی است که با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده احتمال دارد اتفاق بیفتد اما این احتمال چه اندازه است و تصمیم‌گیرندگان منطقه تا چه حد می‌توانند به این موضوع امیدوار باشند. در واقع این موضوع از جمله عدم قطعیت‌های محاسبه شاخص کمبود آب در آینده است.

با استفاده از احتمال شرطی می‌توان احتمال وقوع شرایط مختلف را محاسبه کرد. جهت محاسبه این احتمالات دمای میانگین و بارش در هر سه سناریو به سه دسته کم، متوسط و زیاد

جدول ۴ تغییرات متوسط سالانه دمای حداقل و حداکثر و بارش نسبت به دوره آینده

HadGEM3-GC31-LL			دوره پیش‌بینی	داده‌های تاریخی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)	پارامتر
SSP585	SSP245	SSP126			
14.34	13.89	13.78	۱۴۰۲-۱۴۲۲	13.08	میانگین سالانه دمای حداقل (°C)
+1.26	+0.81	+0.7			
27.81	27.5	27.7	۱۴۰۲-۱۴۲۲	27.36	میانگین سالانه دمای حداکثر (°C)
+0.45	+0.14	+0.34			
108.92	109.52	98.95	۱۴۰۲-۱۴۲۲	55.68	میانگین سالانه بارش (mm)
+95.61%	+96.69%	+77.70%			

جدول ۵ محاسبه احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی SSP126

بارش	دمای میانگین	کمبود آب		
		کم	متوسط	زیاد
زیاد	کم	0.297	0.27	0.432
زیاد	متوسط	1	0	0
زیاد	زیاد	0.3	0	0.7
متوسط	کم	0.143	0	0.857
متوسط	زیاد	0.6	0	0.4
کم	کم	0.087	0.391	0.521
کم	متوسط	0.75	0.25	۰
کم	زیاد	0.67	0	0.34

بحرانی شدن شاخص کمبود آب در حالت‌های مختلف بیشتر شده است.

جدول ۷ محاسبه احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی SSP585

بارش	دمای میانگین	کمبود آب		
		کم	متوسط	زیاد
زیاد	کم	0.291	0.251	0.458
زیاد	متوسط	0.6	0.4	0
زیاد	زیاد	0.7	0	0.3
متوسط	کم	0.125	0	0.875
متوسط	متوسط	1	0	0
متوسط	زیاد	0.5	0	0.5
کم	کم	0.115	0.257	0.628
کم	متوسط	0.4	0.6	0
کم	زیاد	0.645	0.021	0.334

در سناریوی تغییر اقلیم SSP585 نیز احتمال صفر (عدم وقوع کمبود آب زیاد) بیشتر شده است که با توجه به پیش‌بینی افزایش بارش در SSP585 قابل توجیه است.

در مطالعات آینده می‌توان عوامل تأثیرگذار دیگر بر روی کمبود آب را در نظر گرفت. همچنین می‌توان میزان تأثیر راه‌های مختلف کاهش مصرف و افزایش عرضه آب را بر روی کمبود آب مورد ارزیابی قرار داد.

در جدول (۵) احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی تغییر اقلیم SSP126 نشان داده شده است. سناریوی خطرناک برای شهر بارش کم، دمای زیاد و کمبود آب زیاد است که احتمال وقوع آن ۰,۳۴ است. اگر چه این احتمال زیاد نیست اما همین احتمال کم نیز باید باعث شود که مسئولان شهر آگاهانه‌تر رفتار کنند. سناریوی خوشایند برای شهر نیز که شامل بارش زیاد، دمای کم و کمبود آب کم است نیز دارای احتمال ۰,۲۹۷ است که نشان می‌دهد نمی‌توان به این قضیه امیدوار بود و حتماً باید مدیریت خوبی جهت مصرف و تأمین آب صورت گیرد.

جدول ۶ محاسبه احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی SSP245

بارش	دمای میانگین	کمبود آب		
		کم	متوسط	زیاد
زیاد	کم	0.302	0.263	0.434
زیاد	متوسط	1	0	0
زیاد	زیاد	0.3	0	0.7
متوسط	کم	0	0	1
متوسط	زیاد	0.5	0	0.5
کم	کم	0.14	0.34	0.52
کم	متوسط	0.571	0.428	0
کم	زیاد	0.653	0.021	0.326

در حالات وقوع مختلف تحت سناریوی تغییر اقلیم SSP245 نیز که در جدول (۶) نشان داده شده است. احتمال وقوع

نتیجه‌گیری

مناطق گرم و خشک به دلیل وجود دمای زیاد و بارش کم همیشه با مشکل کم‌آبی روبه‌رو بوده‌اند و برای تأمین آب مورد نیاز خود از آب زیرزمینی استفاده می‌کردند. در سال‌های اخیر با گسترش شهرنشینی در این مناطق نیاز به آب افزایش یافته و راه‌های دیگری نظیر انتقال آب نیز برای تأمین آب در این مناطق استفاده شده است. شهر یزد از جمله این مناطق است که همیشه تأمین آب یکی از مسائل اساسی آن بوده است. در این مطالعه تلاش شد که کمبود آب و تأثیر آب و هوا بر روی آن هم در گذشته مورد بررسی قرار گیرد و هم برای آینده پیش‌بینی صورت گیرد. بدین منظور شاخص کمبود آب با استفاده از مقادیر ماهانه ۱۲ سال گذشته عرضه و تقاضای آب در شهر محاسبه شد. سپس با استفاده از روش یادگیری عمیق LSTM مقدار این شاخص برای ۲۰ سال آینده پیش‌بینی شد. طبق نتایج فصل تابستان میزان مصرف بیشتر از سایر فصل‌هاست اما تأمین آب همیشه به نحوی صورت گرفته است که در این فصل کمبود آب وجود نداشته باشد تا به دلیل گرمای زیاد هوا در این فصل مردم منطقه با کمبود و قطعی آب مواجه نشوند. بعد از آن دما و بارش آینده با استفاده از گزارش ششم IPCC که جدیدترین گزارش تغییر اقلیم است و با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM3-GC31-LL و با سه سناریوی خوش‌بینانه، بدبینانه و متوسط پیش‌بینی شد. نتایج نشان

داد که بارش شهر یزد در آینده افزایش خواهد یافت. برای بررسی دقیق‌تر کم‌آبی در آینده مقدار کم‌آبی به همراه دما و بارش به حالت‌های مختلف تقسیم شد و احتمال وقوع حالات مختلف با احتمال شرطی محاسبه شد. نتایج نشان داد که با وجود افزایش بارش در آینده باز هم احتمال وقوع کم‌آبی زیاد در آینده بیشتر است. لذا تصمیم‌گیرندگان منطقه باید با هوشیاری بیشتری برای آینده شهر و تأمین آب آن برنامه‌ریزی انجام دهند. این تحقیق بر اساس تنها یک مدل GCM انجام شده است. نتایج بر مبنای مدل‌های GCM دیگر ممکن است متفاوت باشد. لذا برای استفاده‌های کاربردی، در مطالعات آینده، لازم است از نتایج مجموعه‌ای از GCM‌ها استفاده شود و عدم قطعیت نتایج در خصوص مدل‌های GCM در نظر گرفته شود.

واژه‌نامه

Forget Gate	دروازه فراموشی
Down Scaling	ریز مقیاس‌نمایی
Input Gate	دروازه ورودی
Output Gate	دروازه خروجی

سپاسگزاری

مراجع

- [1] A. SalehiBaladehi, F. Arabali, and A. Salehi, "The concept and place of water in Iranian culture and Islamic religion and its crystallization in Mazni culture," *Architecture*, vol. 26, no. 6, pp. 26-35, 2023. (In Persian)
- [2] M. R. Goodarzi, B. Zahabiyou, A. R. Massah Bavani, and A. R. Kamal, "Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharesou basin," *Water and Irrigation Management*, vol. 2, no. 1, pp. 25-40, 2012. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jwim.2012.25090>
- [3] V. Sandeep, A. Khandekar, and M. Kumar, "Water supply, urbanization and climate change," *Resilience, Response, and Risk in Water Systems: Shifting Management and Natural Forcings Paradigms*, pp. 195-215, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4668-6_11
- [4] M. R. Goodarzi, R. H. Mohtar, R. Piryaee, A. Fatehifar, and M. Niazkar, "Urban WEF Nexus: An Approach for the Use of Internal Resources under Climate Change," *Hydrology*, vol. 9, no. 10, p. 176, 2022. <https://doi.org/10.3390/hydrology9100176>
- [5] F. A. Padder and A. Bashir, "SCARCITY OF WATER IN THE TWENTY-FIRST CENTURY: PROBLEMS AND POTENTIAL REMEDIES," *Medalion Journal: Medical Research, Nursing, Health and Midwife Participation*, vol.

- 4, no. 1, pp. 1-5, 2023. <https://doi.org/10.59733/medalion.v4i1.66>
- [6] M. TalebiNia and H. Khosravi, "The Relation between Meteorological Drought and Groundwater Quality in Arid and Semi-arid Climate (Case Study: Isfahan Province)," *The Journal of Irrigation and Water Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 269-285, 2020. (In Persian) 10.22125/iwe.2020.114970
- [7] M. Goodarzi, M. Sabaghzadeh, and A. Rajabpour niknam, "The Relationship between Land Subsidence and Water Use in Yazd Plain Using Sentinel-1 Images," (in eng), *Journal of Applied Research in Geographical Sciences, Research* vol. 25, no. 76, pp. 0-0, 2025. <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.13>
- [8] S. Sadeghi, S. Kazemikia, H. Kheirfam, and Z. Hazbavi, "Experiences and consequences of inter-basin water transfer in the world," *Journal of Iran-Water Resources Research (IWRR)*, 2016. (In Persian)
- [9] A. R. Bagherieh, I. Loloei, and A. Bagherieh, "Numerical Modeling of Tunnels and Lifelines in Liquefiable Grounds Under Seismic Loading," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 27 ,no. 2, pp. 127-144, 2016. <https://doi.org/10.22067/civil.v27i2.33094>
- [10] M. R. Mansouri Daneshvar, M. Ebrahimi, and H. Nejadsoleymani, "An overview of climate change in Iran: facts and statistics," *Environmental Systems Research*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3>
- [11] M. Goodarzi, A. Fatehifar, and F. Avazpoor, "Bivariate Analysis of the Impact of Climate Change on Drought with SPEI Index and Coppola Functions (Case Study: Dugonbadan), *Iran-Water Resources Research*, vol. 15, no. 4, pp. 352-365, 2019. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.4.24.7>
- [12] O. Bozorg-Haddad, B. Zolghadr-Asli, P. Sarzaeim, M. Aboutalebi, X. Chu, and H. A. Loáiciga, "Evaluation of water shortage crisis in the Middle East and possible remedies," *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, vol. 69, no. 1, pp. 85-98, 2020. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.049>
- [13] M. BahmaniBohlooli ,M. MousaviHaghighi, and S. Mousavi, "Investigation And Analysis Of Trend of Urban Green Space Water Consumption And Municipal Water Scarcity Using System Dynamics Approach (Case study: Zarghan city)," *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, vol. 51, no. 3, pp. 551-564, 2020. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2020.278023.668732>
- [14] Q. V. Dau, K. Kuntiyawichai, and A. J. Adeloye, "Future changes in water availability due to climate change projections for Huong Basin, Vietnam," *Environmental Processes*, vol. 8, pp. 77-98, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00475-y>
- [15] H. Heidari, M. Arabi, T. Warziniack, and S. Sharvelle, "Effects of urban development patterns on municipal water shortage," *Frontiers in Water*, vol. 3, p. 694817, 2021. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.694817>
- [16] M. Tabesh, M. MollaRamezani, A. Shorzad, and N. RasiFaghih, "Long-Term Prediction of Domestic Water Demand Using Bayesian Belief Networks," *Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 52.2, no. 107, pp. 47-56, 2022. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jcee.2021.31917.1763>

- [17] Z. GhafariMoghadam and A. SardarShahraki, "Prediction of monthly consumption of drinking water in the Sistan region under climate change impact," *Journal of Natural Environmental Hazards (JNEH)*, vol. 12, no. 37, pp. 75-100, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42994.1912>
- [18] S. Sadati, F. Rostami, and H. Fami, "Sustainable management of water resources in Yazd province: challenges and solutions," *Journal of Agricultural Technology*, 2010.
- [19] M. Goodarzi, M. Sabaghzadeh, and A. Rajabpour niknam, "The Relationship between Land Subsidence and Water Use in Yazd Plain Using Sentinel-1 Images," *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, Research vol. 25, no. 76, pp. 0-0, 2025. (In Persian) <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.13>
- [20] A. Karimi, M. R. Nikoo, R. Karachian, and E. Shirangi, "Assessment of water transport projects impact on long term water supply in Zayandehrud basin by multi-period optimization analysis," *Iranian Water Researches Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 153-163, 2012. (In Persian)
- [21] H. Mohammadi, K. Hakimi, and E. Ahmadi, "Feasibility of implementing inter-basin water transfer projects in Iran (case study: Beheshtabad-Central Plateau water transfer project)," *Human Geography Research (Geographical Research)*, vol. 51, no. 4, 2020. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jhgr.2018.248156.1007603>
- [22] t. sharghi, k. Kalantari, A. Asadi, and m. jomehpour, "Simulating the Simultaneously effects of Climate Change and Policy of Water transfer from Agriculture to Industry on Horticultural Products (Case of Yazd Province)," *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, vol. 47, no. 4, pp. 851-863, 2016. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2016.61332>
- [23] m. akaberi, M. Fatemi, and S. Dehghan Khavari, "Projection of Water Supply and Demand in Yazd Province Using the General Regional Equilibrium Pattern," *Geographical Researches*, Original Research vol. 34, no. 3, pp. 403-412, 2019. <http://dx.doi.org/10.29252/geores.34.3.403>
- [24] Y. Yu, X. Si, C. Hu, and J. Zhang, "A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures," *Neural Computation*, vol. 31, no. 7, pp. 1235-1270, 2019. https://doi.org/10.1162/neco_a_01199
- [25] A. Graves and A. Graves, "Long short-term memory," *Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks*, Vol. 385, pp. 37-45, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24797-2_4
- [26] A. Farzad, H. Mashayekhi, and H. Hassanpour, "A comparative performance analysis of different activation functions in LSTM networks for classification," *Neural Computing and Applications*, vol. 31, pp. 2507-2521, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3210-6>
- [27] A. Gensler, J. Henze, B. Sick, and N. Raabe, "Deep Learning for solar power forecasting—An approach using AutoEncoder and LSTM Neural Networks," in *2016 IEEE international conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2016, pp. 002858-002865. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844673>
- [28] Z. Chang, Y. Zhang, and W. Chen, "Electricity price prediction based on hybrid model of adam optimized LSTM neural network and wavelet transform," *Energy*, vol. 187, p. 115804, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.134>
- [29] T. Cooijmans, N. Ballas, C. Laurent, Ç. Gülçehre, and A. Courville, "Recurrent batch normalization," *arXiv preprint arXiv:1603.09025*, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.09025>

- [30] N. K. Manaswi and N. K. Manaswi, "Understanding and working with Keras," *Deep Learning with Applications using Python: Chatbots and Face, Object, and Speech Recognition with TensorFlow and Keras*, pp. 31-43, 2018. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3516-4_2
- [31] G. S. Jones *et al.*, "The HadGEM3- GC3. 1 contribution to the CMIP6 detection and attribution model intercomparison project," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 16, no. 8, p. e2023MS004135, 2024. <https://doi.org/10.1029/2023MS004135>
- [32] C. J. Williams *et al.*, "Simulation of the mid-Pliocene Warm Period using HadGEM3: experimental design and results from model-model and model-data comparison," *Climate of the Past*, vol. 17, no. 5, pp. 2139-2163, 2021. <https://doi.org/10.5194/cp-17-2139-2021>
- [33] M. B. Andrews *et al.*, "Historical simulations with HadGEM3- GC3. 1 for CMIP6," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 12, no. 6, p. e2019MS001995, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019MS001995>
- [34] M. Dix *et al.*, "CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp126," 2019.
- [35] K. Haleem, A. U. Khan, J. Khan, A. A. Ghanim, and A. M. Al-Areeq, "Evaluating future streamflow patterns under SSP ۲۴۵ scenarios: insights from CMIP6," *Sustainability*, vol. 15, no. 22, p. 16117, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152216117>
- [36] N. M. Reddy and S. Saravanan, "Extreme precipitation indices over India using CMIP6: A special emphasis on the SSP585 scenario," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 16, pp. 47119-47143, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25649-7>
- [37] J. Schmidli, C. Frei, and P. L. Vidale, "Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods," *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 26, no. 5, pp. 679-689, 2006.
- [38] A. Hájek, "Conditional probability," in *Philosophy of statistics*: Elsevier, 2011, pp. 99-135. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51862-0.50003-4>
- [39] A. C. Horne *et al.*, "Informing environmental water management decisions: Using conditional probability networks to address the information needs of planning and implementation cycles," *Environmental Management*, vol. 61, pp. 347-357, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0874-8>
- [40] Z. Hao, F. Hao, V. P. Singh, A. Y. Sun, and Y. Xia, "Probabilistic prediction of hydrologic drought using a conditional probability approach based on the meta-Gaussian model," *Journal of Hydrology*, vol. 542, pp. 772-780, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.048>
- [41] A. O. Anele, E. Todini, Y. Hamam, and A. M. Abu-Mahfouz, "Predictive uncertainty estimation in water demand forecasting using the model conditional processor," *Water*, vol. 10, no. 4, p. 475, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10040475>
- [42] S. Yue, "A statistical measure of severity of El Niño events," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 15, pp. 153-172, 2001. <https://doi.org/10.1007/PL00009789>

- [43] R. Rodrigues Mendes Ribeiro, J. Natal, C. Polpo de Campos, and C. Dias Maciel, "Conditional probability table limit-based quantization for Bayesian networks: model quality, data fidelity and structure score," *Applied Intelligence*, pp. 1-21, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10489-023-05153-8>
- [44] f. yosefvand, s. shabanlou ,and a. rajabi, "Prediction of Sediment Transport in Sewer Using a Combination of Adaptive-Neuro Fuzzy Inference Systems and Genetic Algorithm," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 31-44, 2019. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v32i4.72720>
- [45] B. Balouchi, M. R. Nikoo, M. Shafai Bajestan ,and M. Dehghani, "Application of SVR and GRNN Models in Estimating Maximum Scour Depth at River Confluences under Live-Bed Condition," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 79-92, 2017. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v29i1.43654>
- [46] M. R. Goodarzi, M. Sabaghzadeh, and M. Niazkar, "Evaluation of Snowmelt Impacts on Flood Flows Based on Remote Sensing Using SRM Model," *Water*, vol. 15, no. 9, p. 1650, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15091650>
- [47] H. Fattahi, F. Malekmahmoudi, and H. Ghaedi, "Predicting the most important geomechanical parameter of rock mass using the harmony search and teaching learning based optimization algorithms," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 1-18, 2022. (In Persian) [10.22067/jfcei.2022.72095.1056](https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.72095.1056)
- [48] M. H. Yaqoubi, B. Keshtegar, and H. A. Rahdar, "Model-Based Analysis for Ultimate Axial Load of Circular CFST Columns Using Artificial Neural Network," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 33-48, 2019. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v32i3.73399>



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Adapting Seismic Risk Zonation of the Seismic Design Code of Oil Company Facilities with The Seismic Design Code of Iran

Research Article

Nima Shahbazi¹ , Iman Ashayeri²

DOI: [10.22067/jfeci.2024.89947.1322](https://doi.org/10.22067/jfeci.2024.89947.1322)

1. Introduction

The seismic design code for oil facilities (Publication 038) provides a response spectrum based on the ASCE 7-02 code, utilizing two spectral accelerations: S_S and S_1 . In contrast, in Iran, the commonly used design spectrum is that of Standard 2800, which is based on the peak ground acceleration (PGA) on rock sites, denoted as A . Due to the absence of zonation maps for S_S and S_1 values across different regions of Iran, this study aims to adapt the 038 spectrum to align with the Standard 2800 spectrum.

The objective of this paper is to calculate the values of S_S and S_1 , and ultimately S_{DS} and S_{D1} , for Iran's four seismic hazard zones, based on the standard four-site classification. In the ASCE 7-02 code, two coefficients, F_a and F_v , are used to translate rock site acceleration to surface ground acceleration. These coefficients are directly adopted, without modification, in Publication 038. To calculate the F_a and F_v coefficients, a set of numerical ranges for S_S and S_1 is employed—identical in both codes. In Publication 038, the conversion of a 2475-year return period spectrum to a 475-year return period spectrum is carried out using a 2/3 reduction factor. This paper evaluates the effect of this 2/3 factor using hazard analysis results for the city of Kermanshah, examining its influence on the proposed S_S and S_1 value ranges.

Several relationships and coefficients in Publication 038 are directly borrowed from the ASCE 7-02 code. Therefore, this paper also discusses and assesses the suitability of these coefficients in the context of Iran's seismic hazard conditions.

2. Methodology and Calculation of Coefficients

According to Section 3-7-1 of the Seismic Design Code for Oil Facilities (2016 edition), the values of S_{DS} and S_{D1} can be calculated using Equations (1) and (2), provided that the values of S_S and S_1 are known:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_S \quad (1)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1 \quad (2)$$

Since the coefficients F_a and F_v are equal to 1 for site type 1, and S_{DS} and S_{D1} are the spectral acceleration parameters for a hazard level of 2, we can determine the values of S_S and S_1 for different regions of Iran by matching the spectral acceleration parameters from the Standard 2800 (A.B) with the oil facility design spectrum, using equations (3) and (4):

$$AB(\text{for soil type 1 and } T = 1s) = S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1 \quad (3)$$

$$AB(\text{for soil type 1 and } T = \text{Short period}) = S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_S \quad (4)$$

Since S_S and S_1 are spectral acceleration parameters (in terms of the ground acceleration) for rock sites, these values remain constant for different regions of Iran based on seismic intensity. After calculating the values of S_S and S_1 for the four seismic hazard zones of Iran, the coefficients F_a and F_v for different soil types were calculated using linear interpolation. Then, by applying equations (1) and (2), the values of S_{DS} and S_{D1} corresponding to the seismic hazard sites in Iran were calculated. At this stage, the values of S_S and S_1 were fixed and calculated based on equations (3) and (4) in the previous step.

In the next step, with the values of S_{DS} and S_{D1} , the seismic design spectrum corresponding to the seismic hazard zones of Iran, based on site types, was plotted and compared with the Standard 2800 spectrum. To evaluate the 2/3 factor in equations (1) and (2), which connects the level 2 and level 3 hazard earthquakes, the hazard analysis results for the city of Kermanshah were used. In Table (1), the values of S_S and S_1 are presented for the four seismic zones of Iran. In Tables (2) and (3), the values of S_{DS} and S_{D1} are calculated based on the four seismic zones of Iran.

Manuscript received September 23, 2024, Revised November 29, 2024, Accepted December 10, 2024.

¹ Corresponding Author: Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran.

Email: n.shahbazi@razi.ac.ir

² Associate Professor, Civil Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran.

and soil types. In Figure (1), the DBE seismic design spectrum for soil type I and a very high hazard level is presented.

Table 1. Spectral acceleration values S_s and S_1 for the four seismic hazard zones of Iran

A	S_s	S_1	$0.8 * S_s$	$0.8 * S_1$
0.35	1.313	0.586	1.050	0.469
0.30	1.125	0.503	0.900	0.402
0.25	0.938	0.400	0.750	0.320
0.20	0.750	0.320	0.600	0.256

Table 2. The Value of S_{DS} According to Soil Type and S_s Value

Soil Type	$S_s=0.75$	$S_s=0.94$	$S_s=1.13$	$S_s=1.31$
I	0.50	0.625	0.75	0.875
II	0.550	0.6405	0.75	0.875
III	0.60	0.703	0.7875	0.875
IV	0.60	0.609	0.675	0.7875

Table 3. The Value of S_{D1} According to Soil Type and S_1 Value

Soil Type	$S_1=0.32$	$S_1=0.40$	$S_1=0.50$	$S_1=0.56$
I	0.213	0.2666	0.335	0.3908
II	0.3157	0.3733	0.4355	0.5080
III	0.3754	0.4266	0.5025	0.5862
IV	0.5802	0.64	0.804	0.938

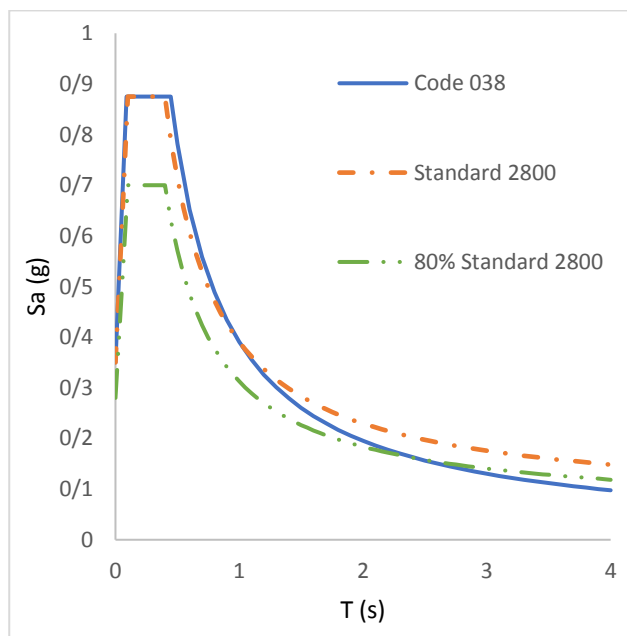


Fig 1. DBE seismic design spectrum for soil type I and a very high hazard level

In Table 4, the proposed range for categorizing the conversion coefficients of acceleration from bedrock to site soil surface is presented. It is recommended that this range be used for calculating the values of F_a , F_v and other coefficients, to better align with the seismic zones of Iran. The proposed range, considering the four seismic zones of Iran, includes a lower bound coefficient of 0.8 and a coefficient of 0.47 derived from the seismic hazard analysis of the city of Kermanshah.

Table 4. Proposed Range for Categorizing Conversion Coefficients of Acceleration from Bedrock to Site Soil Surface

S_s	≤ 0.6	0.80	1.0	1.2	1.4	1.6
S_1	≤ 0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75

3. Conclusion

The following results were obtained:

- It was observed that the design spectrum in Publication 038, derived from the ASCE 7-02 code, is not consistent with the seismic conditions of Iran.
- The values of the coefficients S_s , S_1 , F_a , and F_v , as well as S_{DS} and S_{D1} , were calculated and presented based on the four seismic hazard zones of Iran.
- Seismic design spectra were plotted according to the seismic conditions of Iran and compared with the Standard 2800 spectrum.
- The 2/3 factor, which connects the 2475-year return period spectrum to the 475-year return period spectrum, was evaluated using the hazard analysis results for the city of Kermanshah. It was found that this factor does not provide sufficient accuracy for this region. As a result, based on the average hazard analysis factor for Kermanshah (0.47), the values of S_s and S_1 were recalculated.
- It was observed that the zonation of coefficients in Publication 038 is not suitable for the four seismic hazard zones of Iran.
- A proposed range for categorizing the coefficients that convert spectral acceleration from rock sites to the ground surface was provided, tailored to the seismic conditions of Iran.



تطبیق پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات شرکت نفت با آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ایران*

مقاله پژوهشی

ایمان عشایری^(۱)

نیما شهبازی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.89947.1322

چکیده طیف طرح ارائه شده در آیین‌نامه طرح لرزه‌ای تأسیسات شرکت نفت (نشریه ۰۳۸)، برگرفته از طیف طرح آیین‌نامه ASCE 7-02 آمریکا بوده و بر پایه دو شتاب طیفی S_S و S_1 است. با توجه به اینکه مقادیر شتاب طیفی S_S و S_1 برای مناطق لرزه‌خیزی ایران موجود نیست و از آنجایی که طیف طرح متداول مورد استفاده در ایران، طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ بوده که بر پایه حداکثر شتاب سنگ بستر A می‌باشد، لذا در این مقاله به نحوی طیف طرح نشریه ۰۳۸ با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ تطبیق داده شد و مقادیر S_{DS} ، S_1 و S_{D1} متناسب با مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران محاسبه و طیف‌های طراحی ارائه شد. در بخش دیگر، به ارزیابی ضرایب انتقال شتاب به سطح زمین (F_a و F_v) ارائه شده در نشریه ۰۳۸ پرداخته شد. مشاهده شد که بازه‌بندی این ضرایب، متناسب با شرایط لرزه‌خیزی ایران نیست. لذا بازه پیشنهادی برای ضرایب ذکر شده، بر اساس مقادیر S_S ، S_1 و متناسب با شرایط لرزه‌خیزی ایران ارائه شد. در بخش دیگر این پژوهش، به ارزیابی ضرایب و روابط مورد استفاده در نشریه ۰۳۸ پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد که تعدادی از روابط و ضرایب مورد استفاده در نشریه ۰۳۸، مستقیماً و بدون تغییر از آیین‌نامه ASCE 7-02 آمریکا گرفته شده‌اند و بر اساس نتایج این مطالعه، مناسب شرایط لرزه‌خیزی ایران نیستند. در این مطالعه، برای ارزیابی ضریب تبدیل طیف با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال به طیف با دوره بازگشت ۴۷۵ سال، از نتایج تحلیل خطر شهر کرمانشاه استفاده شد.

واژه‌های کلیدی طیف طرح، آیین‌نامه طرح لرزه‌ای تأسیسات شرکت نفت، استاندارد ۲۸۰۰، شتاب طیفی.

Adapting Seismic Risk Zonation of The Seismic Design Code of Oil Company Facilities with The Seismic Design Code of Iran

Nima Shahbazi

Iman Ashayeri

Abstract The design spectrum presented in the Iranian Seismic Design Code for Petroleum Facilities (Publication-038) is derived from the design spectrum of the US ASCE 7-02 code. It is based on two spectral accelerations S_S and S_1 . Considering that the spectral acceleration values of S_S and S_1 are not available for the seismic regions of Iran and since the seismic design spectrum in Iran is the standard design spectrum of the code-2800, which is based on the maximum acceleration of bedrock A. In this article, we adapt the seismic design spectrum of Publication-038 with the seismic design spectrum of the code-2800. Thereby, we calculate the values of S_S , S_1 , S_{DS} and S_{D1} according to the four seismic zones of Iran and based on the four classifications of ground condition in Iranian seismic design code-2800 and provide the design spectra. In the other part, the evaluation of acceleration transfer coefficients to the ground surface (F_a and F_v) presented in publication-038 is discussed. The results show that the range of these coefficients is not appropriate to the seismic conditions of Iran. Therefore, the suggested range for the mentioned coefficients is presented based on the values of S_S , S_1 and according to the seismic conditions of Iran. In the other part of this research, the coefficients and relationships used in the publication-038 are evaluated. Investigations show that some of the relations and coefficients used in publication-038 are taken directly and without change from the American ASCE 7-02 regulations and based on the results of this study, they are not suitable for the seismic conditions of Iran.

Key words Design Spectrum, Iranian Seismic Design Code for Petroleum Facilities, Standard 2800, Spectral acceleration.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۷/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۹/۲۰ می‌باشد.

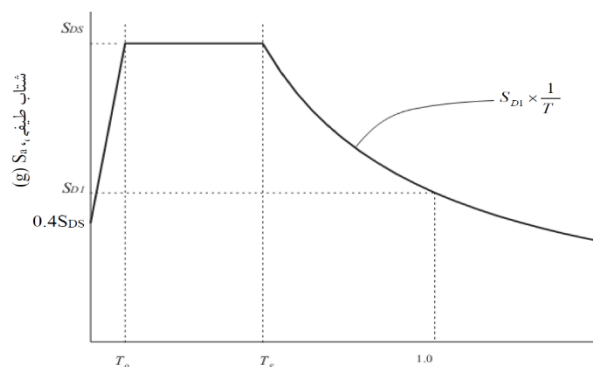
Email: n.shahbazi@razi.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول؛ دانشجوی دکتری تخصصی گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

(۲) دانشیار مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

مقدمه

آیین‌نامه طرح لرزه‌ای تأسیسات شرکت نفت (نشریه ۰۳۸) [1] طیفی را بر اساس آیین‌نامه ASCE7-02 [2] و بر پایه دو شتاب طیفی S_s و S_1 ارائه می‌دهد. S_s و S_1 به ترتیب برابر پارامترهای شتاب طیفی (بر حسب شتاب گرانش زمین) نظیر زلزله نادر (سطح خطر سوم) در زمان تناوب‌های کوتاه و یک ثانیه، روی بستر سنگی (سرعت موج برشی بین ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) حاصل از مطالعه ویژه ساختگاه با میرایی ۵٪ هستند. این در حالی است که در ایران، معمولاً از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ [3] استفاده می‌شود که بر پایه حداکثر شتاب طیفی در سنگ بستر (A) تنظیم شده است. به دلیل عدم وجود پهنه‌بندی مقادیر S_s و S_1 برای مناطق مختلف ایران، در این مطالعه به تطبیق طیف نشریه ۰۳۸ با طیف استاندارد ۲۸۰۰ پرداخته شد. هدف این مقاله، محاسبه مقادیر S_s و S_1 و در نهایت مقادیر S_{DS} و S_{D1} برای مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران، بر اساس دسته‌بندی چهارگانه نوع ساختگاه است. در شکل (۱) طیف طرح نشریه ۰۳۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که این طیف، همان طیف ارائه شده در آیین‌نامه ASCE7-02 آمریکا است.



شکل ۱ طیف طرح نشریه ۰۳۸ [1]

است. همچنین نتایج مطالعات ایشان نشان داد که مقدار نسبت ضریب برش پایه مخازن به ساختمان، برای هر دو ضریب رفتار و چهار نوع خاک در نشریه ۰۳۸ به مقدار ۱۴ درصد بیشتر از نتایج ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در پیوندهای کوتاه و به مقدار حداکثر ۳۶ درصد کمتر از نتایج ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در پیوندهای بلند است [4]. برخورداری و همکاران به مقایسه آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله با ضوابط عمومی آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات و سازه‌های صنعت نفت پرداختند و پیشنهادهایی برای اصلاح ضوابط این آیین‌نامه ارائه کردند [5]. در آیین‌نامه ASCE7-02، برای انتقال شتاب از سنگ بستر به سطح زمین، از دو ضریب F_a و F_v استفاده شده که در نشریه ۰۳۸ نیز مستقیماً از این ضرایب و بدون تغییر استفاده شده است. در جدول (۱)، مقادیر ضریب F_a و F_v ارائه شده توسط نشریه ۰۳۸ ارائه شده است. در این جدول، برای محاسبه مقادیر ضریب F_a و F_v ، از چندین بازه عددی برای مقادیر S_s و S_1 استفاده شده است که در هر دو آیین‌نامه یکسان هستند.

جدول ۱ مقادیر F_a و F_v برحسب نوع ساختگاه و مقادیر شتاب طیفی ارائه شده در نشریه ۰۳۸ [1]

مقدار F_a بر حسب نوع خاک و مقدار S_s					
نوع خاک	مقدار شتاب طیفی روی بستر سنگی در زمان تناوب کوتاه				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s \geq 1.25$
ک	۰	۰	۰	۱	۱
I	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
II	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۱۰	۱/۰۰	۱/۰۰
III	۱/۶۰	۱/۴۰	۱/۲۰	۱/۱۰	۱/۰۰
IV	۲/۵۰	۱/۷۰	۱/۲۰	۰/۹۰	۰/۹۰
مقدار F_v بر حسب نوع خاک و مقدار S_1					
نوع خاک	مقدار شتاب طیفی روی بستر سنگی در زمان تناوب یک ثانیه				
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 \geq 0.50$
ک	۰	۰	۰	۰	۰
I	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
II	۱/۷۰	۱/۶۰	۱/۵۰	۱/۴۰	۱/۳۰
III	۲/۴۰	۲/۰۰	۱/۸۰	۱/۶۰	۱/۵۰
IV	۳/۵۰	۳/۳۰	۲/۸۰	۲/۴۰	۲/۴۰

در نشریه ۰۳۸ تبدیل طیف با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال به طیف با دوره بازگشت ۴۷۵ سال با استفاده از یک ضریب $\frac{2}{3}$ اعمال

امیدی‌نسب به ارزیابی نیروهای طراحی لرزه‌ای مخازن هوایی ذخیره مایعات بر اساس طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ و نشریه شماره ۰۳۸ در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد زلزله پرداخت. بر اساس مطالعات ایشان، در استاندارد ۲۸۰۰، نسبت ضریب برش پایه مخزن به ضریب برش پایه ساختمان شکل‌پذیر در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد به ترتیب برای مخازن با ضریب رفتار ۲ و ۳ در پیوندهای کوتاه، برابر با ۳/۵ و ۵/۲۵ بوده در حالی که این مقدار در نشریه ۰۳۸ به ترتیب ۴ و ۶ حاصل شده

به ترتیب برابر پارامترهای شتاب طیفی (بر حسب شتاب گرانش زمین)، روی بستر سنگی هستند، لذا بر اساس شدت لرزه‌ای، برای مناطق ایران ثابت هستند.

$$AB(\text{for soil type 1 and } T = 1s) = S_{D1} = \frac{2}{3}F_v S_1 \quad (۳)$$

$$AB(\text{for soil type 1 and } T = \text{Short period}) = S_{Ds} = \frac{2}{3}F_a S_s \quad (۴)$$

پس از محاسبه مقادیر S_1 و S_s برای مناطق چهارگانه ایران، ضرایب F_a و F_v برای انواع خاک‌ها با استفاده از درونیابی خطی از جدول (۱) محاسبه شدند. سپس با استفاده از روابط (۱) و (۲)، مقادیر S_{D1} و S_{Ds} متناسب با ساختگاه‌های خطر لرزه‌ای ایران محاسبه شد. در این مرحله مقادیر S_1 و S_s ثابت و بر اساس روابط (۳) و (۴) در گام قبلی محاسبه شده است. در این روابط، منظور از زمان تناوب کوتاه، پارامتر T_s در جدول (۲-۲) ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [3] بوده که برای زمین نوع I برابر ۰/۴ است.

در گام بعدی، با داشتن مقادیر S_{D1} و S_{Ds} ، طیف طرح لرزه‌ای متناسب با پهنه خطرپذیری ایران و بر اساس نوع ساختگاه رسم شده و با طیف استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه می‌شود. برای ارزیابی ضریب $\frac{2}{3}$ در روابط (۱) و (۲) که ارتباط دهنده زلزله سطح خطر ۲ و ۳ هست، از نتایج تحلیل خطر شهر کرمانشاه استفاده می‌شود. پس از ارزیابی این ضریب، به محاسبه ضرایب S_1 و S_s بر اساس نتایج تحلیل خطر کرمانشاه می‌پردازیم. سپس ضرایب و روابط ارائه شده در نشریه ۰۳۸ را بر اساس نتایج به دست آمده بررسی می‌کنیم. در انتها هم بازه پیشنهادی برای مقادیر S_1 ، S_s و ضرایب F_a و F_v ارائه می‌کنیم. لازم به ذکر است که محاسبات انجام شده در این مقاله، صرفاً محدود به ساختگاه نوع I نیست. در واقع همان طور که ذکر شد، S_1 و S_s پارامترهای شتاب طیفی روی بستر سنگی (سرعت موج برشی بین ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) حاصل از مطالعه ویژه ساختگاه با میرایی ۵٪ می‌باشند. F_a و F_v به ترتیب برابر مقادیر ضریب اصلاح طیف در بازه شتاب ثابت و سرعت ثابت، با توجه به نوع ساختگاه و بر اساس جدول (۱) می‌باشند.

با توجه به اینکه ضرایب F_a و F_v برای ساختگاه نوع یک، برابر ۱ هستند و S_{D1} و S_{Ds} پارامترهای شتاب طیف طراحی در سطح خطر دو هستند، لذا می‌توانیم با تطبیق دادن پارامترهای شتاب طیفی استاندارد ۲۸۰۰ (A.B) با مقادیر طیف طراحی تأسیسات شرکت نفت، مقادیر S_1 و S_s را مطابق روابط (۳) و (۴) برای مناطق ایران به دست بیاوریم. از آنجایی که S_1 و S_s

شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، این فرض که میان شتاب طیفی زلزله طرح و نادر یک نسبت $\frac{2}{3}$ وجود دارد از نظر علم تحلیل خطر احتمالاتی صرفاً یک تخمین بوده و نادقیقی آن در بسیاری از مناطق جهان (به ویژه در ایران) اثبات شده است [6]. در این مقاله برای بررسی اثر این ضریب $\frac{2}{3}$ ، از نتایج تحلیل خطر شهر کرمانشاه استفاده شد [7] و اثر این مورد در بازه‌های پیشنهادی ارائه شده برای مقادیر S_1 و S_s لحاظ شده است. تعدادی از روابط و ضرایب نشریه ۰۳۸ نیز مستقیماً و بدون تغییر از آیین‌نامه ASCE 7-02 گرفته شده است لذا در این مقاله به بررسی و ارزیابی این ضرایب در بحث سازگاری با شرایط لرزه‌خیزی ایران نیز پرداخته می‌شود.

روش تحقیق و محاسبه ضرایب

بر اساس بند ۳-۷-۱ آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای شرکت نفت (ویرایش ۱۳۹۵)، با داشتن مقادیر S_1 ، S_s و استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توانیم مقادیر S_{D1} و S_{Ds} را محاسبه کنیم.

$$S_{Ds} = \frac{2}{3}F_a S_s \quad (۱)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3}F_v S_1 \quad (۲)$$

در این روابط، S_{D1} و S_{Ds} به ترتیب پارامترهای شتاب طیف طراحی در زمان تناوب کوتاه و زمان تناوب یک ثانیه روی ساختگاه، حاصل از تحلیل خطر به روش احتمالاتی در سطح خطر دوم با نسبت میرایی ۵٪ می‌باشند. S_1 و S_s به ترتیب برابر پارامترهای شتاب طیفی (بر حسب شتاب گرانش زمین) نظیر زلزله نادر (سطح خطر سوم) در زمان تناوب‌های کوتاه و یک ثانیه، روی بستر سنگی (سرعت موج برشی بین ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) حاصل از مطالعه ویژه ساختگاه با میرایی ۵٪ می‌باشند. F_a و F_v به ترتیب برابر مقادیر ضریب اصلاح طیف در بازه شتاب ثابت و سرعت ثابت، با توجه به نوع ساختگاه و بر اساس جدول (۱) می‌باشند.

با توجه به اینکه ضرایب F_a و F_v برای ساختگاه نوع یک، برابر ۱ هستند و S_{D1} و S_{Ds} پارامترهای شتاب طیف طراحی در سطح خطر دو هستند، لذا می‌توانیم با تطبیق دادن پارامترهای شتاب طیفی استاندارد ۲۸۰۰ (A.B) با مقادیر طیف طراحی تأسیسات شرکت نفت، مقادیر S_1 و S_s را مطابق روابط (۳) و (۴) برای مناطق ایران به دست بیاوریم. از آنجایی که S_1 و S_s

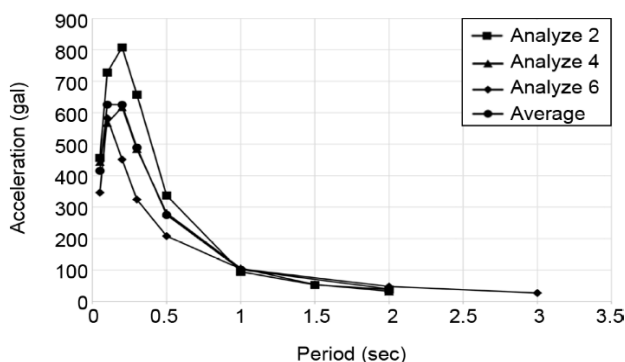
جدول ۵ مقدار S_{DS} بر حسب نوع خاک و مقدار S_s

نوع خاک	$S_s = 0.75$	$S_s = 0.94$	$S_s = 1.13$	$S_s = 1.31$
I	0.50	0.625	0.75	0.875
II	0.550	0.6405	0.75	0.875
III	0.60	0.703	0.7875	0.875
IV	0.60	0.609	0.675	0.7875

جدول ۶ مقدار S_{D1} بر حسب نوع خاک و مقدار S_1

نوع خاک	$S_1 = 0.32$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 = 0.56$
I	0.213	0.2666	0.335	0.3908
II	0.3157	0.3733	0.4355	0.5080
III	0.3754	0.4266	0.5025	0.5862
IV	0.5802	0.64	0.804	0.938

در شکل‌های (۲ و ۳)، به ترتیب نمودار شتاب طیفی شهر کرمانشاه بر روی سنگ بستر با دوره بازگشت ۴۷۵ سال و ۲۴۷۵ سال ارائه شده است. در این شکل‌ها، منظور از تحلیل ۲، ۴ و ۶، استفاده از روابط کاهندگی امبراسیس، زارع و قاسمی [8-10] و منظور از Average، میانگین مقادیر این سه تحلیل است. در شکل (۴) نیز نسبت شتاب سنگ بستر با دوره بازگشت ۴۷۵ سال (DBE) به ۲۴۷۵ سال (MCE) در زمان تناوب‌های مختلف بر اساس نتایج تحلیل خطر شهر کرمانشاه ارائه شده است [7]. مشاهده می‌شود که در تمام بازه زمان تناوبی، نسبت شتاب کمتر از ضریب $\frac{2}{3}$ است. در جدول (۷)، مقادیر S_s و S_1 بر اساس ضریب میانگین در شکل (۴) که برابر ۰/۴۷ است، محاسبه شده است.



شکل ۲ نمودار شتاب طیفی شهر کرمانشاه با دوره بازگشت ۴۷۵ سال [7]

کرمانشاه نیستند.

در جدول (۲) مقادیر S_s ، S_1 برای مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران ارائه شده است. این ضرایب با تطبیق دادن طیف استاندارد ۲۸۰۰ با طیف آیین‌نامه شرکت نفت محاسبه شده و ثابت هستند. در قسمت دیگر این جدول، ۸۰ درصد مقادیر S_s ، S_1 محاسبه شده است. بر اساس بند ۳-۴-۲ نشریه شماره ۰۳۸، کران پایین طیف طرح نباید از ۸۰ درصد طیف استاندارد ۲۸۰۰ کمتر باشد. در جداول (۳) و (۴)، مقدار F_a و F_v بر اساس مقادیر S_s ، S_1 و انواع خاک با استفاده از درونیابی خطی محاسبه شده است. در جداول (۵) و (۶) نیز مقدار S_{D1} و S_{DS} براساس مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران و انواع خاک محاسبه شده است.

جدول ۲ مقادیر شتاب طیفی S_s و S_1 برای مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی

ایران

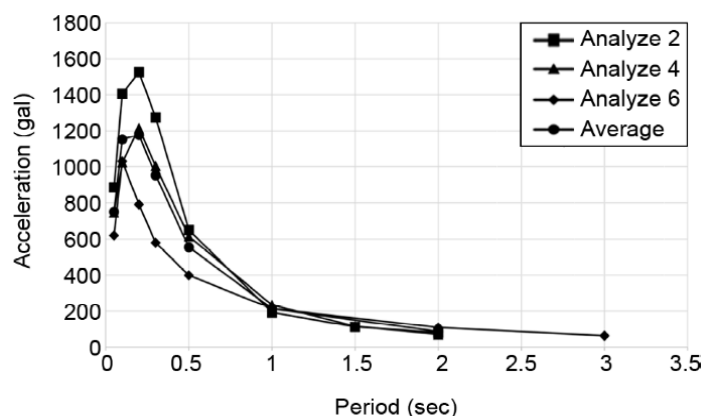
A	S_s	S_1	$0.8*S_s$	$0.8*S_1$
۰/۳۵	۱/۳۱۳	۰/۵۸۶	۱/۰۵	۰/۴۶۹
۰/۳	۱/۱۲۵	۰/۵۰۳	۰/۹	۰/۴۰۲
۰/۲۵	۰/۹۳۸	۰/۴	۰/۷۵	۰/۳۲
۰/۲	۰/۷۵	۰/۳۲	۰/۶	۰/۲۵۶

جدول ۳ مقدار F_a بر حسب نوع خاک و مقدار S_s

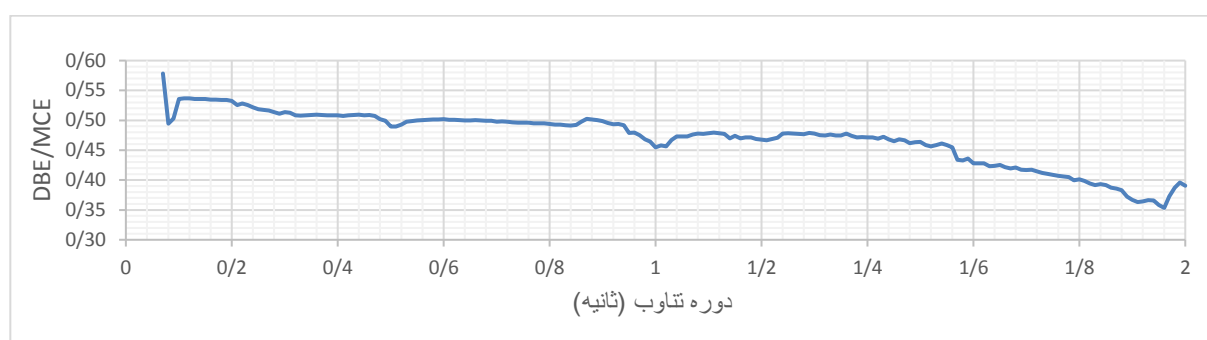
نوع خاک	$S_s = 0.75$	$S_s = 0.94$	$S_s = 1.13$	$S_s = 1.31$
I	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
II	۱/۱	۱/۰۲۴	۱/۰	۱/۰
III	۱/۲	۱/۱۲۴	۱/۰۵	۱/۰
IV	۱/۲	۰/۹۷۴۴	۰/۹	۰/۹

جدول ۴ مقدار F_v بر حسب نوع خاک و مقدار S_1

نوع خاک	$S_1 = 0.32$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 = 0.56$
I	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
II	۱/۴۸	۱/۴	۱/۳	۱/۳
III	۱/۷۶	۱/۶	۱/۵	۱/۵
IV	۲/۷۲	۲/۴	۲/۴	۲/۴



شکل ۳ نمودار شتاب طیفی شهر کرمانشاه با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال [7]



شکل ۴ نمودار نسبت شتاب طیفی شهر کرمانشاه با دوره بازگشت ۴۷۵ به ۲۴۷۵ سال

رسم شده است. همان طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، بر اساس بند ۳-۴-۲ نشریه شماره ۰۳۸، کران پایین طیف طرح نباید از ۸۰ درصد طیف استاندارد ۲۸۰۰ کمتر باشد. لذا در قسمت‌هایی که طیف محاسبه شده بر اساس نشریه ۰۳۸ و شرایط لرزه‌خیزی ایران، کمتر از ۸۰ درصد طیف ۲۸۰۰ باشد، باید از همان ۸۰ درصد طیف ۲۸۰۰ در آن بازه دوره تناوبی استفاده شود. برای رسم طیف نشریه ۰۳۸، از شکل (۱) ارائه شده در این مقاله استفاده شد. بر اساس بند ۳-۷-۱ آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای شرکت نفت (ویرایش ۱۳۹۵) [1]، در این شکل پارامترهای T_0 و T_s ، ضرایب مربوط به خاک و بر اساس زمان تناوب بوده که در این مقاله به ترتیب براساس روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند.

$$T_0 = 0.2 \times \frac{SD_1}{SD_s} = 0.2 \times \frac{SM_1}{SM_s} = 0.2 \times \frac{F_v S_1}{F_a S_s} \quad (5)$$

$$T_s = \frac{SD_1}{SD_s} = \frac{SM_1}{SM_s} = \frac{F_v S_1}{F_a S_s} \quad (6)$$

از آنجایی که در روابط (۱) و (۲)، برای تبدیل طیف با دوره

جدول ۷ مقادیر شتاب طیفی S_s و S_1 برای مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران بر اساس ضریب ۰/۴۷

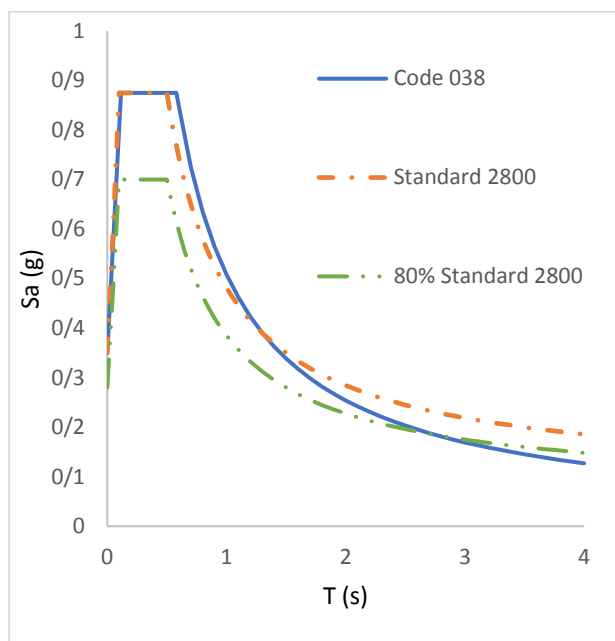
A	S_s	S_1
۰/۳۵	۱/۸۷۳	۰/۸۳۶
۰/۳۰	۱/۶۰۵	۰/۷۱۷
۰/۲۵	۱/۳۳۸	۰/۵۷۱
۰/۲۰	۱/۰۷۰	۰/۴۵۷

طیف‌های طراحی

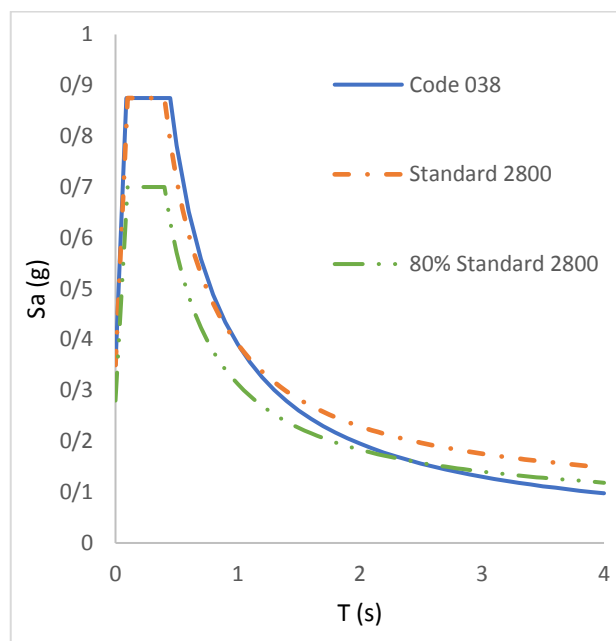
در شکل‌های (۵) تا (۸)، به ترتیب طیف طرح لرزه‌ای DBE برای انواع خاک و سطوح خطر بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم ارائه شده است. در این نمودارها منظور از Code 038، طیف طرح محاسبه شده نشریه ۰۳۸ بر اساس شرایط لرزه‌خیزی ایران بوده که در این مقاله محاسبه شده است. منظور از Standard 2800 نیز همان طیف استاندارد ۲۸۰۰ ایران است. همچنین در این نمودارها، ۸۰ درصد مقادیر طیف استاندارد ۲۸۰۰ برای مقایسه

تناوب یک ثانیه روی ساختگاه، حاصل از تحلیل خطر به روش احتمالاتی در سطح خطر سوم (زلزله نادر) با نسبت میرایی ۵٪ است.

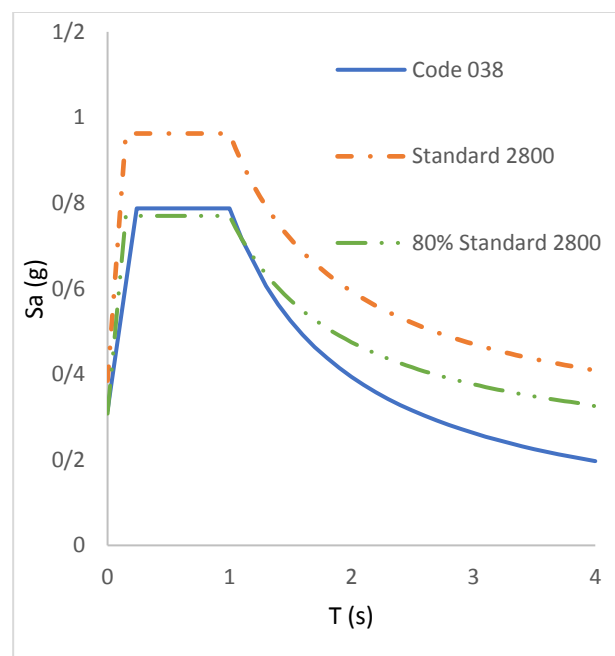
بازگشت ۲۴۷۵ سال به ۴۷۵ است از یک ضریب ثابت دو سوم استفاده شده، لذا در این روابط می‌توانیم از S_{M1} و S_{MS} به جای S_{D1} و S_{DS} استفاده کنیم. منظور از S_{M1} و S_{MS} به ترتیب پارامترهای شتاب طیف طراحی در زمان تناوب کوتاه و زمان



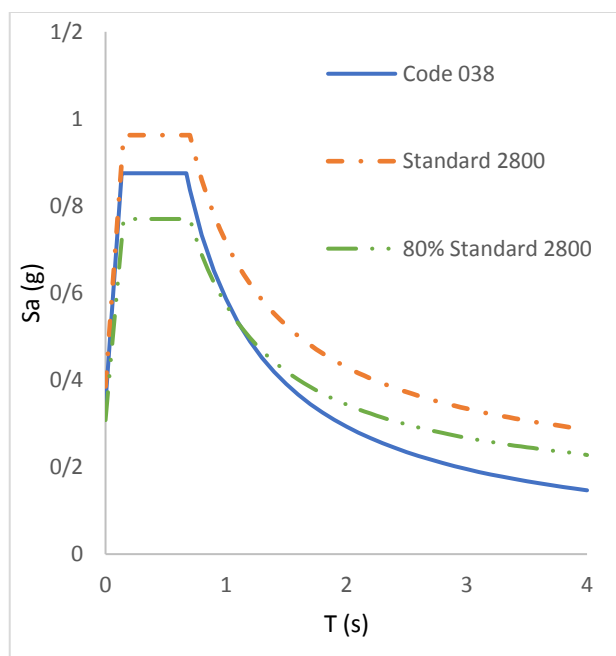
(ب)



(الف)

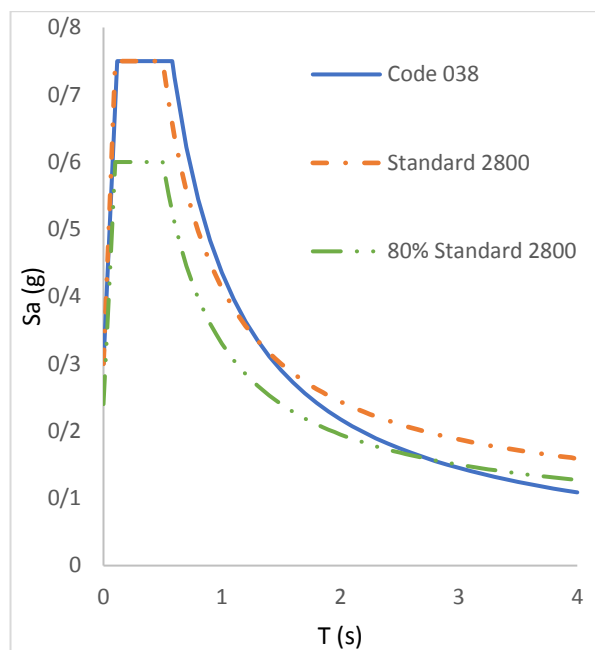


(د)

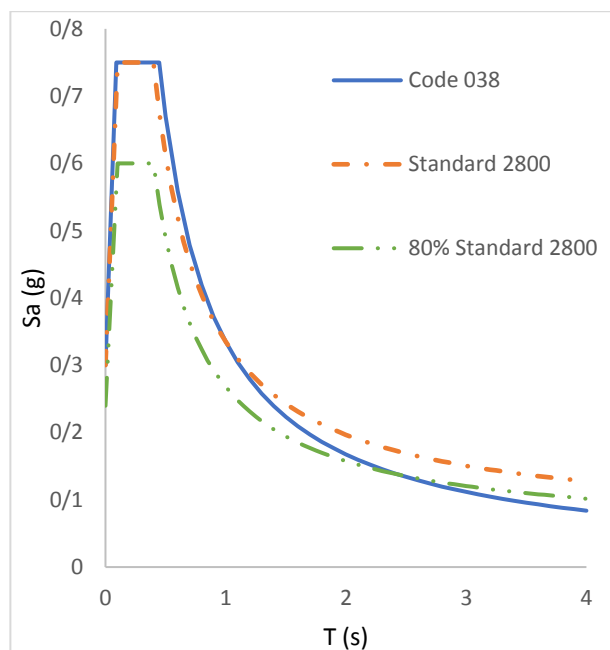


(ج)

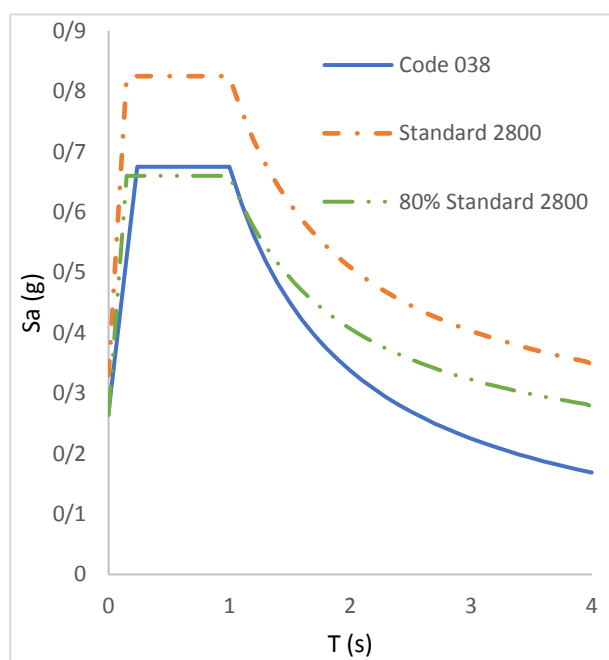
شکل ۵ طیف طرح لرزه‌ای DBE در سطح خطر بسیار زیاد و ساختگاه نوع: (الف) I، (ب) II، (ج) III، (د) IV



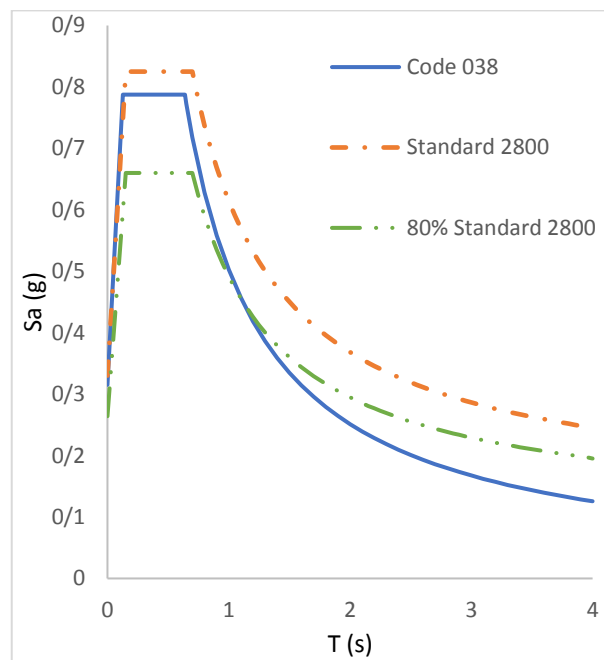
(ب)



(الف)

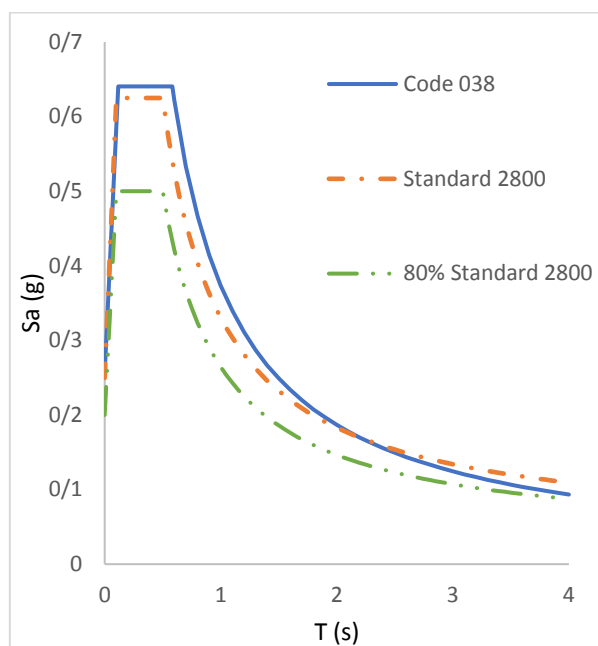


(د)

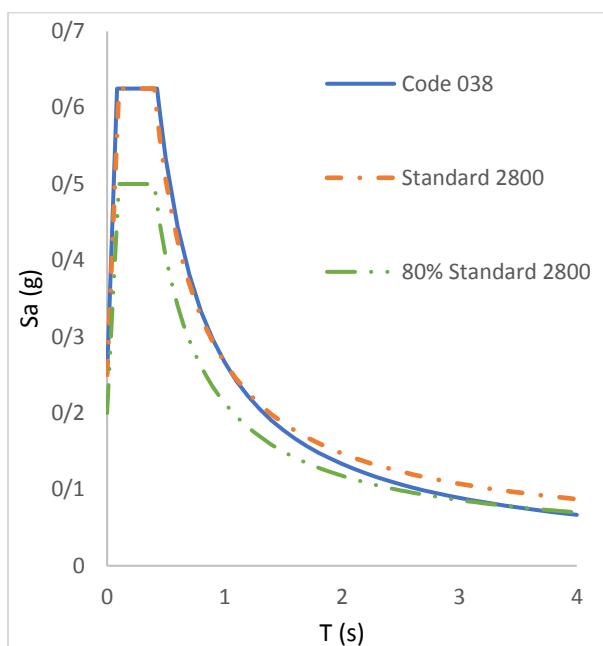


(ج)

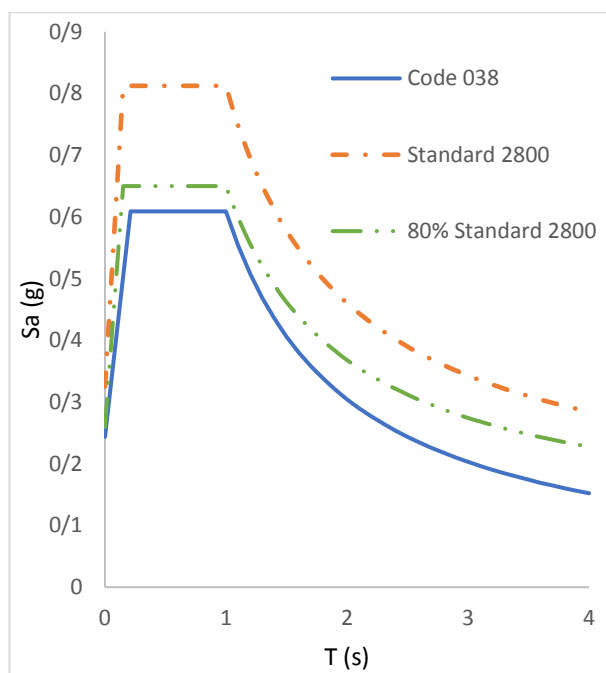
شکل ۶ طیف لرزه‌ای DBE در سطح خطر زیاد و ساختگاه نوع: I (الف)، II (ب)، III (ج)، IV (د)



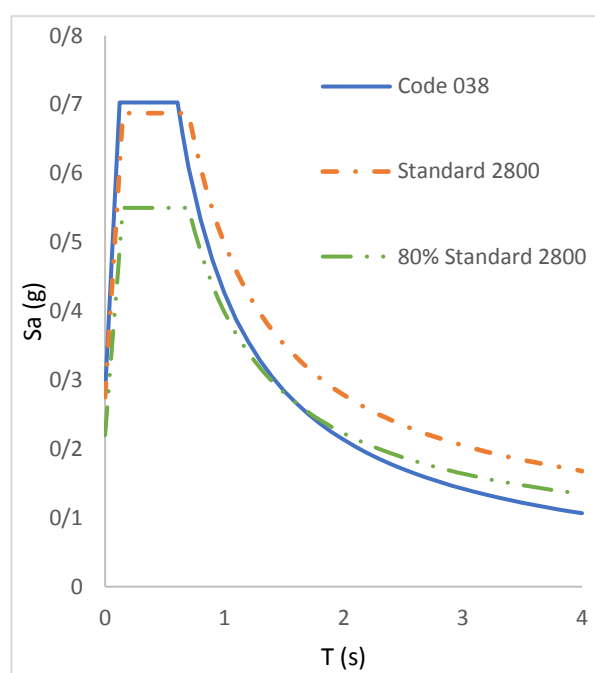
(ب)



(الف)

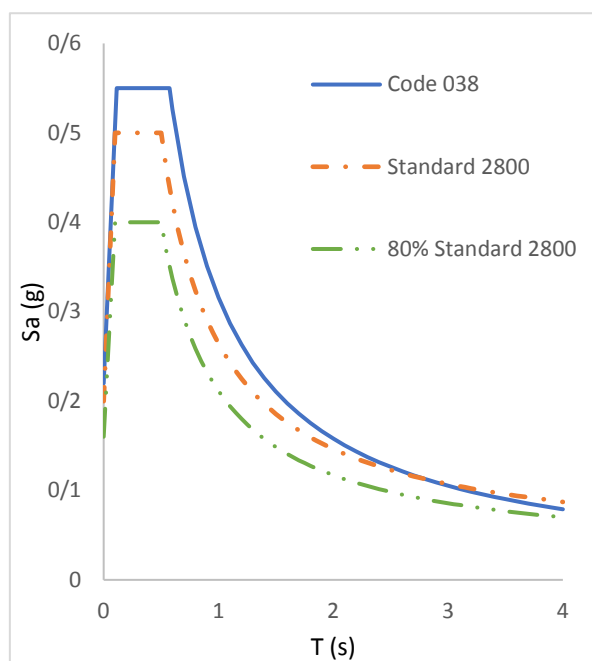


(د)

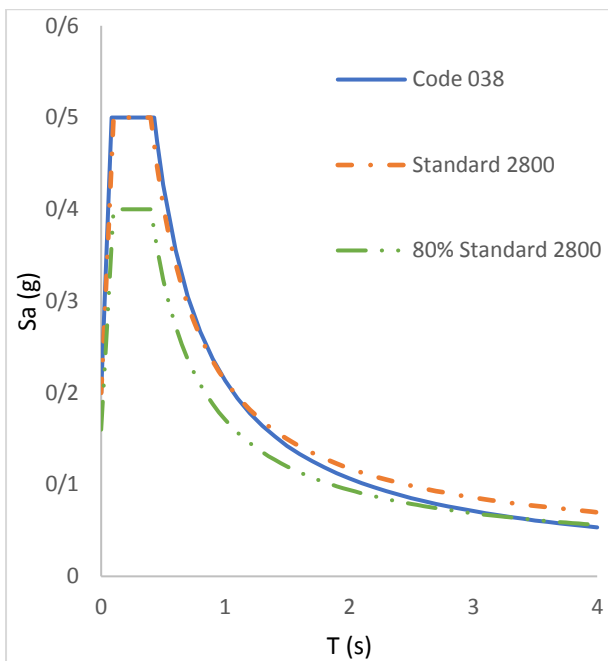


(ج)

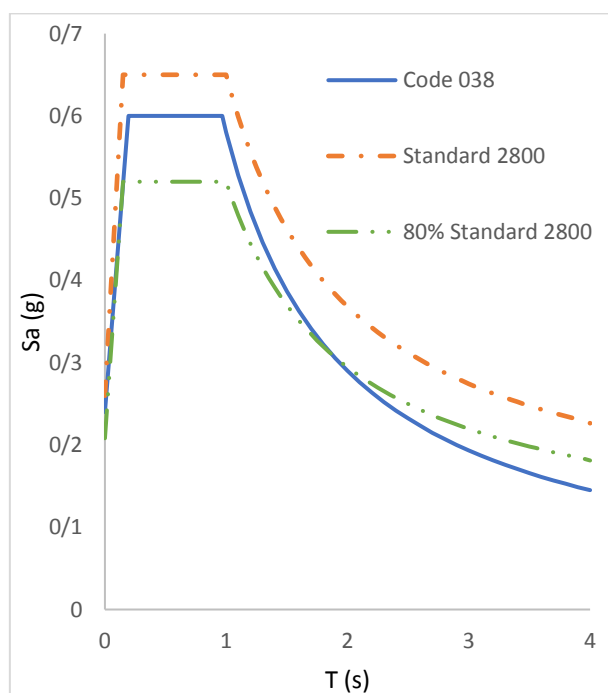
شکل ۷ طیف طرح لرزه‌ای DBE در سطح خطر متوسط و ساختمان‌های نوع: I (الف)، II (ب)، III (ج)، IV (د)



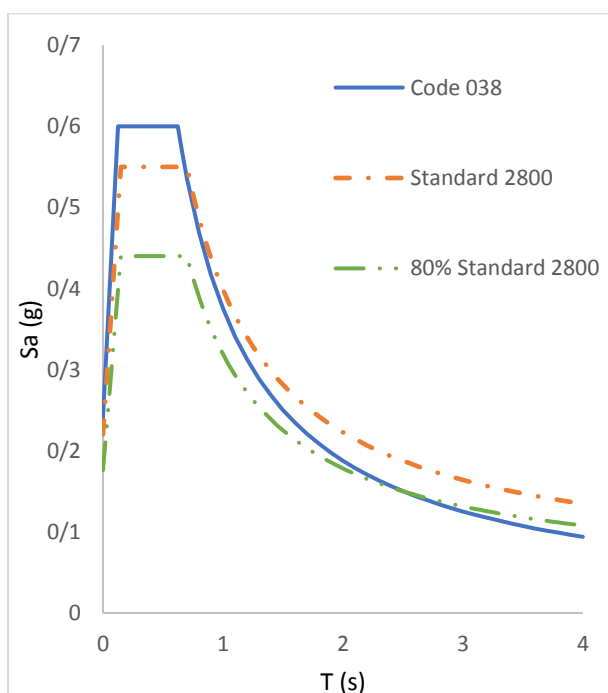
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸ طیف لرزه‌ای DBE در سطح خطر کم و ساختگاه نوع: (الف) I، (ب) II، (ج) III، (د) IV

استاندارد ۲۸۰۰ کمتر می‌شود و برای ساختگاه نوع ۱ و ۲، تقریباً از پریود ۲/۵ ثانیه به بعد از ۸۰ درصد مقادیر طیف ۲۸۰۰ نیز

مشاهده می‌شود که در پهنه با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد، در زمان تناوب‌های بالا، مقادیر طیف تطبیقی نشریه ۰۳۸ از مقادیر

۲/۵ در سه بازه کمتر از ۰/۱، ۰/۴ و بیشتر از ۰/۸ ارائه شده است. در جدول (۹) نیز مقدار نسبت S_{DS} به ۲/۵ برحسب نوع ساختگاه و مقدار S_s محاسبه شده در این مقاله ارائه شده است. مشاهده می‌شود که حداقل این ضریب برابر ۰/۲ و حداکثر آن برابر ۰/۳۵۰ است. در نتیجه بازه ارائه شده در نشریه ۰۳۸، مناسب مناطق لرزه‌خیزی ایران نیست.

جدول ۸ ضریب کاهش مدول برشی خاک در اثر زلزله، (fe) [1]

طبقه بندی نوع زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰	نسبت S_{DS} به ۲/۵		
	$\leq ۲/۵$	۰/۴	$\geq ۰/۸$
I	۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۹۰
II	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۶۰
III	۰/۹۰	۰/۵۰	۰/۱۰
IV	۰/۶۰	۰/۰۵	*

* انجام مطالعات ویژه ساختگاه الزامی است.

جدول ۹ نسبت S_{DS} به ۲/۵ برحسب نوع ساختگاه و مقدار S_s

نوع خاک	$S_s = ۰/۷۵$	$S_s = ۰/۹۴$	$S_s = ۱/۱۳$	$S_s = ۱/۳۱$
I	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵
II	۰/۲۲	۰/۲۵۶	۰/۳	۰/۳۵۰
III	۰/۲۴	۰/۲۸۱	۰/۳۱۵	۰/۳۵۰
IV	۰/۲۴	۰/۲۴۴	۰/۲۷	۰/۳۵۰

ضریب کرانه بالای زمان تناوب محاسباتی

در جدول (۱۰)، ضریب کرانه بالای زمان تناوب محاسباتی ارائه شده در جدول ۴-۷ نشریه ۰۳۸ مشاهده می‌شود. در جدول (۱۱) نیز مقادیر متناظر ارائه شده توسط آیین‌نامه ASCE 7-02 مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که این جدول نیز مستقیماً از آیین‌نامه ASCE 7-02 گرفته شده است. در جدول نشریه ۰۳۸، ضریب کرانه بالای زمان تناوب محاسباتی C_{Tu} بر اساس چهار بازه S_{D1} کمتر از ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ ارائه شده است. این در حالی است که مقدار S_{D1} محاسبه شده در این مقاله در بازه ۰/۲۱۳ تا ۰/۹۳۸ است و بازه ارائه شده در نشریه ۰۳۸، مناسب مناطق لرزه‌خیزی ایران نیست.

کمتر می‌شود. در ساختگاه‌های نوع ۳ و ۴، شرایط متفاوت‌تر بوده و تقریباً از زمان تناوب ۱/۲۵ ثانیه به بعد طیف تطبیقی نشریه ۰۳۸ از ۸۰ درصد مقادیر طیف استاندارد ۲۸۰۰ کمتر است. لذا در نواحی که مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ از ۸۰ درصد کمتر است، باید از همان ۸۰ درصد طیف ۲۸۰۰ استفاده شود.

در پهنه با خطر لرزه‌خیزی زیاد نیز تقریباً شرایط مشابه بوده و در ساختگاه نوع ۱ و ۲، تقریباً از زمان تناوب ۲/۵ ثانیه به بعد طیف تطبیقی نشریه ۰۳۸ از ۸۰ درصد استاندارد ۲۸۰۰ کمتر شده است. در ساختگاه‌های نوع ۳ و ۴ نیز تقریباً از زمان تناوب ۱ ثانیه به بعد مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ کمتر شده است.

در پهنه با خطر لرزه‌خیزی متوسط و در ساختگاه‌های نوع ۱ و ۲، مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ از ۸۰ درصد استاندارد ۲۸۰۰ کمتر نشده و در زمان تناوب‌های بالا تقریباً با این طیف برابر است. در ساختگاه نوع ۳، تقریباً از زمان تناوب ۱/۵ ثانیه به بعد مقادیر طیف ۰۳۸ از ۸۰ درصد استاندارد ۲۸۰۰ کمتر شده است. در ساختگاه نوع ۴ شرایط متفاوت بوده و در تمام بازه زمان تناوبی، مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ از ۸۰ درصد مقادیر طیف استاندارد ۲۸۰۰ کمتر است.

در پهنه با خطر لرزه‌خیزی کم و در ساختگاه‌های ۱ و ۲، در تمامی بازه زمان تناوبی، مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ از ۸۰ درصد استاندارد ۲۸۰۰ بیشتر است. در ساختگاه نوع ۳ و ۴ به ترتیب از زمان تناوب ۳ و ۲ ثانیه مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ از ۸۰ درصد مقادیر طیف استاندارد ۲۸۰۰ کمتر است.

در ساختگاه‌های نوع ۱ تا ۳، با کاهش مقدار بیشینه شتاب (PGA) از ۰/۳۵ به ۰/۲، مقادیر طیف تطبیقی ۰۳۸ نسبت به طیف استاندارد ۲۸۰۰ بالاتر می‌رود و هر چقدر که به شتاب کمتر نزدیک می‌شویم (۰/۲)، این اختلاف بیشتر می‌شود. در ساختگاه نوع ۴ و در بیشینه شتاب ۰/۲۵، این موضوع نقض شده که دلیل آن کمتر بودن مقدار F_a جدول (۱) نسبت به ساختگاه نوع ۳ است.

بررسی ضرایب ارائه شده در نشریه ۰۳۸

مدول برشی خاک

در جدول (۸)، ضریب کاهش مدول برشی خاک در اثر زلزله که در جدول شماره ۵-۱ نشریه ۰۳۸ ارائه شده، مشاهده می‌شود. در این جدول مقدار این ضریب، بر اساس مقدار نسبت S_{DS} به

جدول ۱۰ ضریب کرانه بالای زمان تناوب محاسباتی (C_{Tu}) ارائه شده توسط نشریه ۰۳۸ [1]

C_{Tu}	S_{D1}
۱/۴	≥ 0.3
۱/۵	۰/۲
۱/۶	۰/۱۵
۱/۷	≤ 0.1

جدول ۱۱ ضریب کرانه بالای زمان تناوب محاسباتی (C_u) ارائه شده توسط آیین نامه ASCE 7-02 [2]

Design Spectral Response Acceleration at 1 Second, S_{D1}	Coefficient C_u
≥ 0.4	1.4
0.3	1.4
0.2	1.5
0.15	1.6
0.1	1.7
≤ 0.05	1.7

بوده و بازه‌بندی ارائه شده در این بند، متناسب با شرایط لرزه‌خیزی ایران نیست. این موضوع در بند ۸-۶-۵ مربوط به خطوط خدماتی و بند ۱۲-۳-۱۳ مربوط به فاصله آزاد از سطح مایع مخازن نیز مشاهده می‌شود.

بازه‌بندی ضرایب F_v و F_a

در جدول (۱) بازه‌بندی مقادیر ضرایب تبدیل شتاب روی بستر سنگی به سطح خاک ساختگاه نشریه ۰۳۸ مشاهده شد. با توجه به ضرایب محاسبه شده در این مقاله، بازه‌بندی این ضرایب مناسب شرایط لرزه‌خیزی ایران نیست. لذا در جدول (۱۲)، بازه پیشنهادی برای دسته‌بندی مقادیر ضرایب تبدیل شتاب روی بستر سنگی به سطح خاک ساختگاه ارائه شده است. پیشنهاد می‌شود برای تطابق مناسب‌تر با مناطق لرزه‌خیزی ایران، از این بازه‌بندی برای محاسبه مقدار F_v و F_a و سایر ضرایب استفاده شود. بازه پیشنهادی با در نظر گرفتن مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران، ضریب ۰/۸ کران پایین و ضریب ۰/۴۷ حاصل از تحلیل خطر شهر کرمانشاه ارائه شده است.

جدول ۱۲ بازه پیشنهادی برای دسته‌بندی مقادیر ضرایب تبدیل شتاب روی بستر سنگی به سطح خاک ساختگاه

S_s	≤ 0.6	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶
S_1	≤ 0.25	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه طیف طرح ارائه شده در نشریه ۰۳۸ بر پایه دو شتاب طیفی S_s و S_1 است و از آنجایی که پهنه‌بندی مقادیر S_s و S_1 برای مناطق ایران موجود نیست، لذا در این مقاله به تطبیق طیف نشریه ۰۳۸ با طیف طرح متداول مورد استفاده در ایران (استاندارد ۲۸۰۰) پرداخته شد. این موضوع با تطبیق روابط شتاب طیفی بر روی سنگ بستر انجام شد. سپس ضرایب ارائه شده در نشریه ۰۳۸ مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج تحلیل خطر شهر کرمانشاه نیز برای بررسی دقیق‌تر ضرایب استفاده شد. با توجه به تأکید آیین‌نامه‌های زلزله به ملاحظات خاص ژئوتکنیک لرزه‌ای در ساختگاه‌های خاص، کلیه تفاسیر و نتایج این مقاله بر شرایطی که در آیین‌نامه‌ها انجام مطالعات ویژه ساختگاه توصیه شده است، وارد نمی‌باشند. در ادامه نتایج ارائه می‌شوند:

حداقل برش پایه

بر اساس بند ۴-۸-۲-۱ نشریه ۰۳۸ [1]، مشاهده می‌شود در صورتی که مقدار S_1 برابر یا بیشتر از مقدار ۰/۶ باشد، باید رابطه ۳-۴ ارائه شده در نشریه ۰۳۸ نیز در بحث برش پایه کنترل شود این موضوع در حالی است که بر اساس نتایج این مقاله و بدون در نظر گرفتن ضریب حاصل از تحلیل خطر شهر کرمانشاه، مقادیر S_1 در ایران کمتر از ۰/۶ است. این موضوع در بند ۷-۲-۲-۱ مربوط به روش بار جانبی معادل، بند ۱۱-۳-۱ مربوط به روش تحلیل استاتیکی معادل و در پیوست ۳ مربوط به روندنمای طراحی سازه غیرساختمانی و اعضای غیرسازه‌ای نیز تکرار شده و بازه‌بندی روابط این بندها نیز به دو دسته S_1 کمتر از ۰/۶ و بیشتر یا مساوی ۰/۶ تقسیم شده است.

طراحی لرزه‌ای خط لوله زمینی

بر اساس بند ۱۳-۴-۶-۱ نشریه ۰۳۸، در بحث طراحی تجویزی لوله‌ها، ملاحظات لازم برای طراحی به دو دسته S_{DS} کمتر مساوی ۰/۳ و بیشتر از ۰/۳ تقسیم شده است. بر اساس نتایج این مقاله، بازه S_{DS} متناسب با شرایط لرزه‌خیزی ایران بین ۰/۵ تا ۰/۸۷۵

واژه‌نامه		۱. مشاهده شد که طیف طرح نشریه ۰۳۸، برگرفته از طیف آیین‌نامه ASCE 7-02 آمریکا بوده و متناسب با شرایط لرزه‌ای ایران نیست.
Design Spectrum	طیف طرح	۲. مقدار ضرایب S_1 ، S_s ، F_a و F_v و S_{D1} و S_{DS} بر اساس مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران محاسبه و ارائه شد.
Spectral Acceleration	شتاب طیفی	۳. طیف‌های طرح لرزه‌ای متناسب با شرایط لرزه‌خیزی ایران رسم و با طیف استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شد.
Damping	میرایی	۴. ضریب $\frac{2}{3}$ ارتباط دهنده طیف ۲۴۷۵ سال به طیف ۴۷۵ سال، بر اساس نتایج تحلیل خطر شهر کرمانشاه مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد این ضریب برای این منطقه دقت کافی را ندارد. در نتیجه بر اساس میانگین ضریب تحلیل خطر شهر کرمانشاه (۰/۴۷)، مقادیر S_1 و S_s مجدداً محاسبه شد.
Return Period	دوره بازگشت	۵. مشاهده شد که بازه‌بندی انجام شده ضرایب در نشریه ۰۳۸، مناسب مناطق چهارگانه لرزه‌خیزی ایران نیست.
Fundamental Period	زمان تناوب (مود اصلی)	۶. بازه پیشنهادی برای دسته‌بندی مقادیر ضرایب تبدیل شتاب روی بستر سنگی به سطح خاک ساختگاه، متناسب با شرایط لرزه‌خیزی ایران ارائه شد.
Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)	تحلیل خطر احتمالاتی	
Peak Ground Acceleration – (PGA)	بیشینه شتاب	
Equivalent Static Analysis	تحلیل استاتیکی معادل	

سپاسگزاری

مراجع

- [1] *Iranian Seismic Design Code for Petroleum Facilities, (No.038-16), National Iranian Oil Company, Tehran, Iran, NIOC, 3th edition, 2016.*
- [2] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures. (ASCE 7-02), American Society of Civil Engineers., second edition, 2002.
- [3] *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800) 4th edition, Building and Housing Research Center, BHRC, Tehran, Iran, 2015.*
- [4] F. Omidinasab, "Evaluation of Seismic Design Forces of Liquid Storage Elevated Tanks based on Standard Design 2800 and Publication No. 38 in the Area with very High Relative risk of Earthquake," *Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 212-231, 2023. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2023.404123.1333>.
- [5] M. A. Barkhordari, M. Zaheri, and M. Ghafarinia, "Comparison of the design code of buildings against earthquakes with the general rules of the code of seismic design of facilities and structures in the oil industry and providing suggestions for modifying the rules," presented at the An Attitude Towards Earthquake Design Regulations (Standard 2800); Present and future, 2009.
- [6] E. V. Leyendecker, R. J. Hunt, A. D. Frankel, and K. S. Rukstales, "Development of maximum considered earthquake ground motion maps," *Earthquake Spectra*, vol. 16, no. 1, pp. 21-40, 2000. <https://doi.org/10.1193/1.1586081>.

-
- [7] M. Biglari, I. Ashayeri, and R. Moftizadeh, "Urban planning of Kermanshah city based on the seismic geotechnical hazards," *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 203-211, 2015.
- [8] N. N. Ambraseys, J. Douglas, S. Sarma, and P. Smit, "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration," *Bulletin of earthquake engineering*, vol. 3, pp. 1-53, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-0183-0>.
- [9] M. Zare, "An introduction to applied seismology," *Tehran: International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, 2005.
- [10] H. Ghasemi, M. Zare, Y. Fukushima, and K. Koketsu, "An empirical spectral ground-motion model for Iran," *Journal of seismology*, vol. 13, pp. 499-515, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9143-x>



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of Iran**

Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed

Research Article

Adel Shakibi Nezhad¹, Sajjad Gholipour² , Masoud Makarchian³

DOI: [10.22067/jfcej.2024.90055.1323](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.90055.1323)

1-Introduction

Using available materials such as cement, lime, slag, and other additives to improve and increase the bearing capacity of soft soils is considered a traditional method of soil stabilization. In contrast, adding metallic and non-metallic elements or replacing part of the soil with aggregates represents newer methods of soil reinforcement.

In soil improvement using the stone column method, a portion of the weak soil is excavated through pits or holes of a specific diameter and spacing. Coarse-grained materials are then poured into these pits and compacted, forming columns that transfer structural loads to more resistant soil layers.

Previous research involving 3D numerical analysis of stone column behavior in layered soil with geosynthetic materials indicates that bearing capacity increases by 166% in unreinforced cases. When stone columns are reinforced with geosynthetics, the bearing capacity can increase up to eight times, depending on the aggregates' friction angle, stiffness, and the geosynthetic's shape.

A study on geotextile performance—comparing horizontal placement with confinement inside stone columns—demonstrated that bearing capacity rises with increased geotextile stiffness. Additionally, horizontal reinforcement placement is more effective than confinement within stone columns in reducing settlement.

Most research on stone columns has focused on improving design methods, their role in accelerating consolidation settlement, analyzing failure mechanisms, and enhancing vertical bearing capacity. However, the lateral confinement of stone columns by geosynthetics under shear loads—particularly in sandy soils under higher

overburden stresses at greater depths—has received less attention, highlighting the need for further investigation.

To address this gap, this research examines the shear behavior of geotextile-reinforced stone columns, focusing on their weakness due to insufficient confinement. Using a large-scale direct shear test device under high overburden stresses—an innovative aspect of this study—the shear strength of both single and grouped stone column samples (reinforced and unreinforced) in a sand bed is evaluated.

2 –Experimental program and material specifications

To prepare the direct shear test specimens, SP-type sand was used for the sand bed, while GP-type granular materials were used to construct the stone columns. Geotextile materials were employed to reinforce the stone columns; their full specifications are presented in Table 1.

A large-scale direct shear device with a shear box measuring $30 \times 30 \times 14$ cm was used for the tests, in accordance with ASTM D-3080. The device consists of the following components: the main body, the shear box, the sample saturation box, the vertical and horizontal loading systems, and the measurement system.

The tests were conducted under vertical stresses of 100, 200, and 300 kPa at a shearing speed of 1 mm/min in a strain-controlled manner.

* Manuscript received October 1, 2024, Revised November 17, 2024, Accepted December 23, 2024.

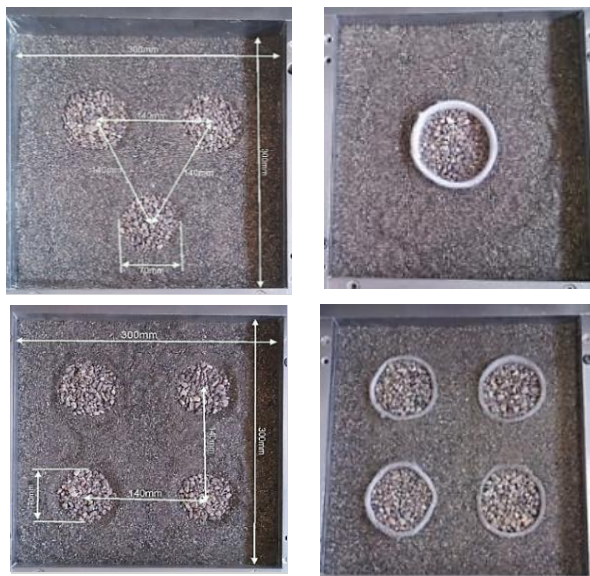
¹ Master of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University

² Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of Technology. **Email:** Sgholipour@uut.ac.ir

³ Associate Professor of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University.

Table1. Specifications of sand bed and stone column materials

Parameters	Values	
Type of materials	Sand	Stone column
USCS	SP	GP
G_s	2.67	2.72
D_{10} (mm)	0.21	1.9
C_u	2.71	2.26
C_c	0.85	1.42
D_r	50%	65.7 %
γ_d (kN/m ³)	14.5	15.84
$\gamma_{d(max)}$ (kN/m ³)	16.36	16.65
$\gamma_{d(min)}$ (kN/m ³)	13.03	14.49
c (kPa)	3.4	2.3
ϕ (°)	34.2	48.3

**Figure 1. Images of prepared samples with different stone column arrangements**

In this study, considering the dimensions of the shear test box, stone columns modeled in the sand bed were examined in single and group triangular and square arrangements with diameters of 7 and 9 cm. To prepare the samples, before the sand was poured, for the construction of stone columns, metal pipes were placed in a specific location in the shearing box and then sand was slowly poured from a certain height around the metal pipe. After preparing the sand bed, the stone column materials were poured into the pipe in layers of 5, 5 and 4 cm and each layer was compacted using a rod weighing 1.5 kg and with a drop height of 10 cm and then the metal pipe was slowly removed from the sand bed and the sample was placed in

the testing position. Figure 1 shows images of prepared samples with different geometric arrangements.

After preparing the samples, to determine the shear strength parameters through large-scale direct shear testing, the samples were subjected to overhead stresses of 100, 200, and 300 kPa and horizontal loading at a speed of 1 mm/min under shear force, and the results were studied for different parameters. The effect of the parameters on the results is presented in detail in the results section.

3- Test results

Based on the results of the stress-strain diagrams in the case of a single unreinforced stone column, with increasing the A_r amount (ratio of the stone column surface to the sand bed), a slight improvement in the shear strength and internal friction angle occurs compared to the bed soil without columns, which is due to the replacement of some of the bed soil with higher quality and more resistant soil.

The test results of stone columns reinforced with geotextile in the Figures 2 and 3 show that the maximum strength of single reinforced stone columns has increased shear strength compared to the case of bed sand. Also, the initial stiffness of the stone column group has increased compared to the bed sand, and the shear strength has also increased significantly. The reason for the increased resistance in single and group stone columns is the replacement of bed soil with stone column materials and the presence of geotextile containment. These enclosing, by mobilizing tensile stresses and preventing rupture during large displacements, have increased the shear resistance due to apparent adhesion in stone column specimens.

According to the trend of the curves, it is observed that the behavior of reinforced stone columns, unlike bed sand and unreinforced stone columns, has changed and they show strain hardening behavior and with increasing horizontal displacement, an increase in residual strength is observed in the tested samples.

Considering the increase in shear strength caused by stone columns located in the sand bed and the confinement of stone columns by geosynthetics, the main reasons for the improvement can be interpreted as follows; (1) the increase in shear strength can be caused by the creation of apparent adhesion between materials due to confinement effects, (2) the strain of geosynthetics during shear displacement can cause further confinement and create additional shear strength, (3) the lateral confinement effect

caused by the presence of adjacent stone columns in the soil between the group of stone columns can cause a greater increase in strength compared to individual columns.

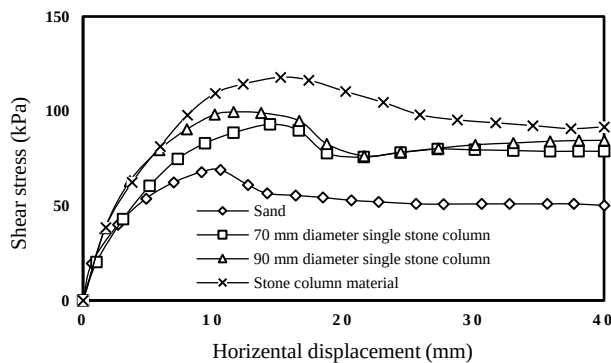


Figure 2. Shear stress variations in confined single stone columns

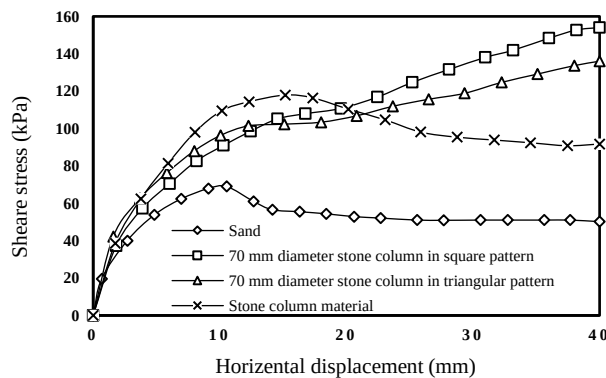


Figure 3. Shear stress variations for a group of confined stone columns

4- Conclusion

A summary of the most important results of the behavior of stone columns reinforced by geotextiles located in sandy soil is presented as follows:

- The behavior of specimens improved by single and group unreinforced stone columns is similar to that of a sand bed without stone columns, due to the lack of sufficient confining pressure from the loose soil of the bed.
- Using an unreinforced stone column in a loose sand bed with a surface area ratio of up to about 17% of the sand surface area has resulted in an increase of about 12% in the angle of internal friction of the sand for a single column and an increase of 26% for a group of columns, with no increase in adhesion.
- Unlike unreinforced samples, in all cases of the bed improved with reinforced stone columns, strain

hardening behavior was observed after the samples reached maximum shear strength.

- The use of single reinforced stone columns has resulted in a 3 to 4 degree increase in the internal friction angle and 9.4 to 14 kPa in the adhesion of the sand bed, which indicates a significant increase in the adhesion rate of about 3 times.



بررسی رفتار برشی ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک در بستر ماسه‌ای*

مقاله پژوهشی

مسعود مکارچیان^(۳)

سجاد قلی‌پور^(۲)

عادل شکیبی نژاد^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2024.90055.1323

چکیده یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های سست، استفاده از ستون‌های سنگی است که باعث کاهش نشست، افزایش مقاومت در برابر روانگرایی، بهبود ظرفیت باربری، تسریع زهکشی قائم و افزایش سرعت تحکیم می‌شود. در این مقاله تأثیر محصورکننده‌های ژئوتکستایل بر روی پارامترهای باربری جانبی ماسه سست مسلح شده با ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور توسط دستگاه برش مستقیم، بزرگ مقیاس، ستون‌های سنگی در حالت‌های غیرمسلح و مسلح شده با ژئوتکستایل مدل شده و تحت تنش‌های نرمال مختلف به صورت تکی و گروهی با قطرهای متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج بیانگر افزایش مقادیر مقاومت و پارامترهای برشی ماسه سست از طریق مسلح نمودن ستون‌های سنگی است، به طوری که استفاده از ستون سنگی غیرمسلح در بستر ماسه سست با سطح مقطع تا ۱۷٪ سطح ماسه، باعث افزایش حدود ۱۲٪ در زاویه اصطکاک داخلی ماسه و ۷۰٪ در مقاومت برشی حداکثر شده است. همچنین استفاده همزمان از ستون سنگی و ژئوتکستایل موجب بهبود جزئی حدود ۳٪ در میزان زاویه اصطکاک داخلی و تا حدود ۶۰٪ در مقدار چسبندگی و ۲/۲ برابر در مقاومت برشی گردیده است.

واژه‌های کلیدی ستون سنگی، بهسازی خاک، ژئوتکستایل، برش مستقیم بزرگ مقیاس.

Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed

Adel Shakibi Nezhad

Sajjad Gholipour

Masoud Makarchian

Abstract There are various methods to improve loose soils. One of the improvement methods is the use of stone columns. This method decrease settlement, increase the resistance to liquefaction, improve load bearing capacity, vertical drainage and increase the speed of consolidation. In this paper, the effect of geotextile enclosures on the lateral bearing capacity of loose soil reinforced by stone columns are investigated. In order to study the behavior of stone columns, large-Scale Direct shear apparatus was used. The stone columns modeled in this apparatus have been tested in unreinforced and reinforced with geotextile materials under different normal stresses and in single and group mode with different diameters. The results show an increase in the value of the shear parameters of loose sand by reinforcing stone columns, so that the use of unreinforced stone column in the loose sand bed up to 17% of the sand surface increases the internal friction angle of the sand by 12% and 70% in the maximum shear strength, and the simultaneous use of the stone column and geotextile have led to a slight improvement of about 3% of the internal friction angle, and up to about 60% adhesion and 2.2 times the shear resistance depending on different parameters.

Key words Stone Column, Soil Improvement, Geotextile, Large-Scale Direct Shear.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۷/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۰/۳ می‌باشد.

(۱) فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

(۲) نویسنده مسئول؛ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه.

(۳) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

مقدمه

استفاده از مصالح مختلف در دسترس همانند سیمان، آهک، سرباره و سایر افزودنی‌ها در خاک به منظور بهسازی و افزایش باربری خاک‌های نرم از روش‌های سنتی [1] و افزودن المان‌های فلزی [2] و غیرفلزی و همچنین جایگزینی بخشی از خاک توسط سنگدانه‌ها از روش‌های جدید تقویت و تسلیح خاک محسوب می‌شود. در بهسازی خاک به روش ستون سنگی، بخشی از خاک نامرغوب با حفر چاهک‌هایی با قطر و فاصله معین از یکدیگر، ریختن مصالح شن، ماسه و یا سنگریزه به درون چاهک‌ها و متراکم کردن آن‌ها، ستون‌هایی به صورت قائم ایجاد می‌شود که این ستون‌ها می‌توانند بار را از سازه به لایه‌های مقاوم خاک انتقال نمایند [3].

با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی رفتار و شناسایی ضعف‌ها و بهبود عملکرد ستون‌های سنگی انجام شده است. این تحقیقات در زمینه مدل‌های فیزیکی، مطالعات میدانی و تحلیل‌های عددی با بررسی رفتار ستون‌های تسلیح شده با ژئوسنتتیک‌ها در خاک‌های مختلف به‌ویژه خاک‌های نرم رسی انجام گرفته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک بهسازی شده از طریق ستون سنگی، نسبت به حالت خاک بدون ستون سنگی، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند [4,5].

استفاده از ستون‌های سنگی مسلح با لایه‌های افقی ژئوتکستایل جهت پایداری شیب‌های ماسه‌ای نشان داد که ستون سنگی مسلح در وسط شیب تأثیر قابل توجهی تا حدود $1/5$ برابر نسبت به حالت غیرمسلح در افزایش پایداری دارند [6].

تسلیح ستون‌های سنگی به وسیله محصورکننده‌های ژئوگرید و همچنین افزایش نسبت طول به قطر، باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی ستون‌های سنگی می‌شود [7].

بسیج نیروی کششی در محصورکننده‌های ژئوسنتتیک در اثر بارگذاری افقی، ظرفیت باربری جانبی ستون‌های سنگی را افزایش می‌دهد. در ستون‌های سنگی غیرمسلح با افزایش A_r (درصد مساحتی از صفحه برش که با ستون سنگی جایگزین شده است)، مقاومت برشی به صورت جزئی افزایش می‌یابد، در حالی که برای ستون‌های سنگی مسلح، با افزایش A_r افزایش بیشتری در مقاومت برشی ایجاد می‌شود [8].

بررسی تأثیر عوامل مختلف بر کارایی ستون‌های سنگی در افزایش باربری و کاهش نشست زمین‌های سست نشان داد که با افزایش نسبت سطح ستون سنگی به دلیل افزایش برهم‌کنش ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و نیز افزایش مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون خاک اطراف ستون‌ها، تأثیر قابل توجهی بر باربری دارند [9].

ستون‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ستون‌های سنگی غیرمسلح، پاسخ نرم‌تر همراه با نرم‌شوندگی کرنش را نسبت به بارگذاری نشان می‌دهند. تأثیر مسلح کردن ستون سنگی با افزایش قطر آن‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع به علت کاهش تنش کششی در ژئوسنتتیک است [10].

با محصورسازی ستون‌های سنگی به وسیله مصالح ژئوسنتتیک، انبساط جانبی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. ظرفیت باربری نهایی گروه ستون‌های سنگی مسلح، بیشتر از ظرفیت باربری گروه ستون‌های سنگی غیرمسلح اندازه‌گیری شده است [11].

اجرای ستون‌های سنگی در زمین‌های سست، موجب افزایش ظرفیت باربری زمین می‌شود که دلیل این موضوع وجود مصالح مرغوب‌تر و با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر ستون سنگی است [12].

محصورکننده‌های ژئوتکستایل کرنش‌های شعاعی ستون سنگی را کاهش می‌دهند و با زیاد شدن کرنش محوری، میزان کاهش کرنش شعاعی کمتر می‌شود. زیاد شدن کرنش محوری، باعث افزایش چسبندگی مجازی در نمونه‌های مسلح می‌شود که در صورت استفاده از ژئوتکستایل‌های سخت‌تر، مقدار این چسبندگی افزایش بیشتری پیدا می‌کند [13].

بررسی رفتار برشی بسترهای رسی اصلاح شده با ستون‌های سنگی در ترکیب با ژئوتکستایل‌ها، توسط آزمایش برش مستقیم بزرگ مطالعه شده که نتایج نشانگر بهبود قابل توجه رفتار مقاومت برشی رس ناشی از محصورسازی ژئوتکستایل متناسب با خصوصیات مقاومتی و فیزیکی ستون‌های سنگی و ژئوتکستایل است [14].

پایداری خاکریزهای مسلح شده توسط ستون‌های سنگی و ژئوسنتتیک‌ها در خاک رس توسط تحلیل عددی بررسی و مشاهده گردید که ژئوسنتتیک‌ها مشارکت مهمی در پایداری

خاک‌های نرم ایفا می‌کنند و استفاده همزمان با ستون‌های سنگی، ریسک گسیختگی را کاهش می‌دهد [15].

تأثیر محصورسازی ژئوتکستایل بر رفتار ستون‌های سنگی توسط آزمایش‌های سه‌محوری بررسی شد که نتایج افزایش در مقاومت و زاویه اصطکاک نمونه‌ها را با وجود ژئوتکستایل نشان داد [16].

نتایج تحلیل عددی سه‌بعدی بررسی رفتار ستون‌های سنگی در خاک لایه‌ای به همراه ژئوستتیک‌ها نشان داد که درصد افزایش باربری در حالت ستون سنگی تنها ۱۶۶٪ و در حالت ستون سنگی مسلح با ژئوستتیک بسته به زاویه اصطکاک سنگدانه‌ها، سختی و اندازه ژئوستتیک حدود هشت برابر به دست آمد [17].

نتایج مطالعه مشابه دیگر در رابطه با تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بیانگر این است که هر دوی افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌های ستون سنگی و سختی مصالح ژئوستتیک محصورکننده، منجر به افزایش و بهبود کارایی می‌گردد، ولی کارآمدی پارامتر سختی ژئوستتیک نسبت به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای در این رابطه به مراتب بیشتر می‌باشد [18].

رفتار گروه شمع‌های دانه‌ای اصلاح شده با ضایعات تایر همراه با ژئوستتیک‌ها واقع بر بستر خاک نرم تحت بارهای استاتیکی و سیکلیک مطالعه شد که نتایج بیانگر افزایش ظرفیت باربری در حالت بدون ژئوستتیک حدود ۵۸٪ و در حالت استفاده از ژئوستتیک حدود ۳۳۵٪ می‌باشد و همچنین کاهش نشست تحت بارهای سیکلیک به طور متوسط حدود ۴۰٪ کمتر از حالت غیرمسلح گزارش شده است [19].

مطالعه عملکرد ژئوتکستایل در دو حالت قرارگیری به صورت افقی و محصور شده داخل ستون‌های سنگی از طریق آزمایش‌های بارگذاری صفحه نشان داد که با افزایش سختی ژئوتکستایل ظرفیت باربری افزایش یافته و به لحاظ کاهش نشست، قرارگیری تسلیح‌کننده به صورت افقی نسبت به حالت محصور شده داخل ستون سنگی کارایی بیشتری را دارد [20].

در مطالعه مشابه انجام گرفته در ایران توسط دیناروند و اردکانی [21]، استفاده از ستون سنگی به همراه ژئوتکستایل جهت بهسازی بستر ماسه‌ای با ارزیابی پارامترهای مختلف از

جمله میزان ریزدانه خاک تا حدود ۴۰٪ تحت تنش‌های سربار تا ۶۰ کیلوپاسکال از طریق آزمایش‌های برش مستقیم بررسی شد که نتایج، افزایش مقاومت نهایی تا ۴۰٪ به ازای ستون‌های تکی و گروهی را نشان داد. همچنین بر اساس نتایج مشاهده گردید که با افزایش ریزدانه خاک، میزان بازدهی تأثیر ستون سنگی بر مقاومت برشی کاهش می‌یابد [21]. با وجود تشابه نوع مصالح بستر ماسه‌ای و دستگاه آزمایش برش مستقیم در تحقیق دیناروند و اردکانی [21] با تحقیق جاری، علاوه بر تفاوت در اندازه و ابعاد پارامترهای مورد بررسی، از تفاوت‌های مهم دو پژوهش میزان دانسیته نسبی بستر ماسه‌ای، میزان سربار اعمالی، میزان ریزدانه خاک، شرایط رطوبتی خاک بستر و بررسی آرایش مثلثی گروه ستون سنگی علاوه بر آرایش مربعی قابل ذکر می‌باشد.

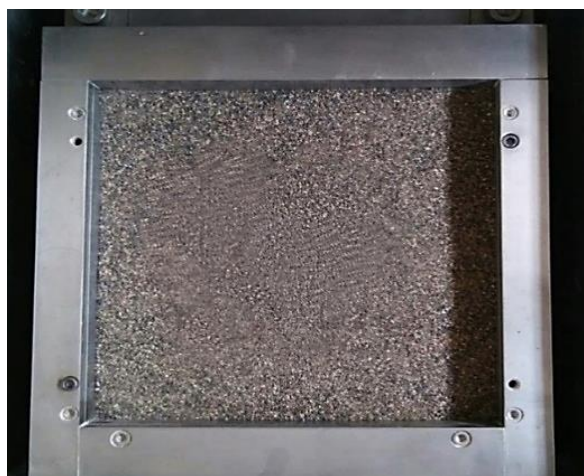
تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف در رابطه با ستون‌های سنگی عموماً متمرکز بر بهبود روش‌های طراحی، نقش ستون‌ها در تسریع نشست‌های تحکیمی، بررسی مکانیزم شکست، لغزش و انبساط جانبی این ستون‌ها و افزایش ظرفیت باربری قائم بوده است، در صورتی که کاربرد محصورسازی جانبی ستون‌های سنگی توسط ژئوستتیک‌ها تحت بارهای جانبی به ویژه در خاک‌های ماسه‌ای تحت تنش‌های سربار بزرگ‌تر متناظر با اعماق زیاد (ستون‌های با طول بزرگ‌تر) کمتر مورد توجه قرار گرفته است و ضرورت بررسی و مطالعه بیشتر این موضوع را می‌رساند. بنابراین در این تحقیق با توجه به ضعف برشی ستون‌های سنگی به دلیل عدم محصورشدگی کافی، برای بررسی رفتار ستون سنگی مسلح با مصالح ژئوتکستایل در برابر نیروی جانبی و برشی، از دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس تحت میزان تنش‌های سربار بزرگ‌تر متناسب با ستون‌های سنگی با عمق‌های بیشتر، استفاده شده است که به عنوان نوآوری تحقیق محسوب می‌گردد. به طوری که روند تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های فیزیکی ستون سنگی تکی و گروهی، در دو حالت مسلح و غیرمسلح در بستر ماسه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های آزمایش برش مستقیم، از

GP قرار می‌گیرد. مشخصات مصالح در جدول (۱) ارائه شده است.



(الف) ماسه سیلیسی مورد استفاده در بستر



(ب) مصالح درشت‌دانه مورد استفاده در ستون سنگی



(ج) ژئوتکستایل مورد استفاده جهت تسلیح ستون سنگی

شکل ۱ تصاویر مصالح شن، ماسه و ژئوستتیک مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایش

ماسه سیلیسی جهت ایجاد بستر و از مصالح دانه‌ای سیلیسی جهت ساخت ستون‌های سنگی و همچنین به منظور تسلیح ستون‌های سنگی، از مصالح ژئوتکستایل استفاده شده است که تصاویر مصالح مورد اشاره در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

ماسه سیلیسی مورد استفاده که از رودخانه قره‌چای واقع در مسیر همدان - تهران و نزدیک به شهر جوقان همدان تهیه شده، بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی و منحنی دانه‌بندی در شکل (۲)، مطابق با سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (متحد)، در رده و نام SP قرار می‌گیرد. پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای، توسط آزمایش برش مستقیم و با فرض دانسیته نسبی D_r ۵۰٪ اندازه‌گیری شد که بر این اساس به کمک رابطه (۱) مقدار وزن مخصوص خشک خاک به ازای دانسیته نسبی ۵۰٪ برابر با $14/5$ کیلونیوتن بر مترمکعب، مقدار زاویه اصطکاک داخلی $34/2^\circ$ و چسبندگی آن در حدود $3/4$ کیلوپاسکال به دست آمد. مشخصات کامل ماسه مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است.

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}} \times \frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d} \quad (1)$$

در این رابطه، D_r دانسیته نسبی، γ_d وزن مخصوص خشک خاک متناظر با دانسیته نسبی مورد نظر، ($\gamma_{d(\max)}$) وزن مخصوص خشک بیشینه و ($\gamma_{d(\min)}$) وزن مخصوص خشک کمینه خاک است.

به منظور ساخت و ایجاد ستون‌های سنگی در بستر ماسه‌ای از مصالح سنگدانه‌ای کوارتزی تیز گوشه با دانه‌بندی مصنوعی جهت افزایش دقت و انطباق بیشتر نتایج آزمایشگاهی با ابعاد واقعی ستون سنگی استفاده شده است. دانه‌بندی مصنوعی مطابق با ضوابط طراحی (پوش دانه‌بندی طرح شماره یک) پیشنهادی در کتاب طراحی و ساخت ستون سنگی تهیه شده است، بدین صورت که دانه‌های مخلوط شن و ماسه با رعایت پوش دانه‌بندی پیشنهادی و تبدیل ابعاد واقعی دانه‌ها به ابعاد مدل مورد استفاده قرار گرفت [3].

منحنی دانه‌بندی مصالح ستون سنگی مطابق شکل (۳) است که با توجه به نمودار و بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک (USCS)، مصالح ساخت ستون سنگی در رده

جدول ۲ مشخصات مصالح ژئوتکستایل

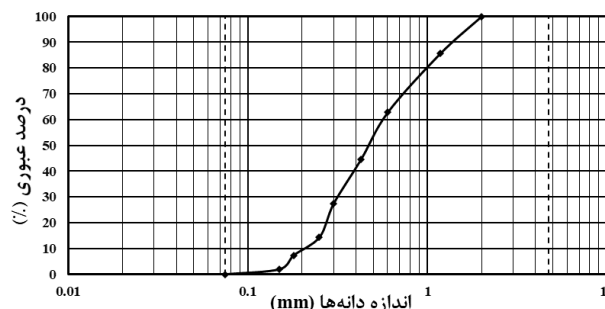
پارامتر	مقدار
جرم واحد سطح (g/m^2)	۵۰۶
ضخامت (mm)	۳/۷۲
مقاومت کششی نهایی (kN/m)	۱۴/۹۹
کرنش در مقاومت کششی نهایی (%)	۳۷/۷
سختی سکانت در کرنش نهایی (kN/m)	۳۹/۷۶

تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌ها، از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس تمام اتوماتیک ساخت شرکت موادساخت‌آزما استفاده شده است که قابلیت انجام آزمایش بر روی نمونه‌های تا اندازه حداکثر ۱۵ برابر d_{85} را داراست. دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس دارای متعلقاتی شامل بدنه اصلی، جعبه برش به ابعاد $۱۴ \times ۳۰ \times ۳۰$ سانتی‌متر و جعبه اشباع‌سازی نمونه، سیستم بارگذاری قائم و افقی و سیستم اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات است که نحوه انجام آزمایش مطابق با استاندارد شماره ASTM D-3080 [22] بوده و تمامی مراحل بارگذاری افقی و قائم و نیز قرائت‌های نیرو و تغییر مکان افقی، به صورت خودکار انجام و نتایج ذخیره می‌گردد.

جهت بارگذاری قائم در آزمایش‌ها، از جک هیدرولیکی نصب شده بر روی جعبه برش و اعمال نیرو به صورت کنترل تنش استفاده شده است. نیروی اعمال شده از طرف جک، از طریق شفتی به قطر ۵ سانتی‌متر به صفحه فلزی فوقانی جعبه برش که جهت اعمال یکنواخت نیرو بر روی سطح نمونه ایجاد شده، انجام گرفته است. همچنین بر روی صفحه بالایی، زبانه‌ای به شکل مقعر طراحی شده تا شفت بارگذاری با قرار گرفتن در آن، بار را به مرکز صفحه وارد نماید. جهت اعمال نیروی افقی از موتور الکتریکی که دارای قابلیت تبدیل نیروی الکتریکی به مکانیکی است استفاده شده که تمامی آزمایش‌ها، با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه برای برش نمونه و به صورت کنترل کرنش تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است.

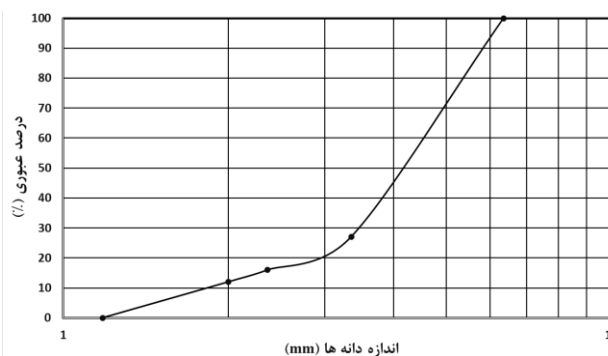
به منظور اندازه‌گیری نیروهای افقی و قائم از نیروسنج‌های الکترونیکی با ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن و دقت اندازه‌گیری ۱۰ نیوتن و برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های افقی و قائم، از دو عدد



شکل ۲ نمودار دانه‌بندی مصالح بستر ماسه‌ای

جدول ۱ مشخصات مصالح بستر ماسه و ستون سنگی

پارامتر	مقدار	نوع مصالح
ستون سنگی	ماسه	USCS
GP	SP	G_s
۲/۷۲	۲/۶۷	$D_{10} \text{ (mm)}$
۱/۹	۰/۲۱	C_u
۲/۲۶	۲/۷۱	C_c
۱/۴۲	۰/۸۵	D_r
۶۵/۷	۵۰٪	$\gamma_a \text{ (kN/m}^3\text{)}$
۱۵/۸۴	۱۴/۵	$\gamma_{d(\max)} \text{ (kN/m}^3\text{)}$
۱۶/۶۵	۱۶/۳۶	$\gamma_{d(\min)} \text{ (kN/m}^3\text{)}$
۱۴/۴۹	۱۳/۰۳	$c \text{ (kPa)}$
۲/۳	۳/۴	$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$
۴۸/۳	۳۴/۲	



شکل ۳ نمودار دانه‌بندی مصالح ستون سنگی

مصارح ژئوستنتیکی مورد استفاده برای تسلیح ستون‌های سنگی، از گروه ژئوتکستایل‌ها و از نوع بافته شده می‌باشد که تصویر و مشخصات آن به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۲) نشان داده شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش با توجه به ابعاد جعبه آزمایش برش، اندازه نمونه‌ها $30 \times 30 \times 14$ سانتی‌متر بوده که ستون‌های سنگی مدل شده در بستر ماسه به صورت آرایش تکی و گروهی صورت گرفته، به طوری که ستون‌های سنگی با قطرهای ۷ و ۹ سانتی‌متر با آرایش‌های گروهی مثلثی و مربعی مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به فرض دانسیته نسبی 50% برای بستر ماسه‌ای نمونه‌ها به منظور ملموس بودن نتایج استفاده از ستون سنگی، جهت ساخت بستر ماسه‌ای از روش ریزش ماسه از ارتفاع مشخص و نرخ ثابت و یکنواخت استفاده شد، به طوری که ارتفاع مناسب برای رسیدن به دانسیته نسبی مورد نظر به روش آزمون و خطا تعیین گردید.

قبل از شروع به ریختن ماسه، برای ساخت ستون‌های سنگی، لوله‌های فلزی به قطرهای مورد نظر را در محل مشخص درون جعبه برش قرار داده و سپس ماسه به آرامی و از ارتفاع معین پیرامون لوله فلزی ریخته می‌شود. پس از آماده‌سازی بستر ماسه‌ای، مصالح ستون سنگی در لایه‌های ۵، ۵ و ۴ سانتی‌متر درون لوله ریخته شده و هر لایه با استفاده از میله توپری به وزن $1/5$ کیلوگرم و با ارتفاع سقوط ۱۰ سانتی‌متر متراکم می‌شود و این کار به منظور رسیدن به دانسیته نسبی مورد نظر ستون سنگی ($65/7\%$) به تعداد ۲۰ مرتبه برای هر لایه انجام می‌شود. در مرحله آخر، لوله فلزی به آرامی از درون بستر ماسه‌ای خارج شده و متراکم‌سازی نهایی پس از خروج لوله ادامه یافته تا اینکه نمونه در مرحله انجام آزمایش قرار گیرد.

مراحل آماده‌سازی نمونه ستون‌های سنگی مسلح شده توسط ژئوتکستایل، مشابه حالت غیرمسلح است، با این تفاوت که در این حالت با دوختن لوله‌های ژئوتکستایل به هم و ایجاد و قرارگیری استوانه درون لوله فلزی، نمونه مسلح تهیه می‌گردد. شایان ذکر است که با توجه به اینکه لوله مذکور بعد از ایجاد ستون سنگی از بستر خاک خارج می‌شود؛ بنابراین با اندازه‌گیری وزن مصالح مورد نیاز برای ساخت ستون سنگی و در نظرگیری حجم لوله فلزی از محاسبات، مقدار وزن مخصوص خشک مصالح دانه‌ای و دانسیته نسبی متناظر با آن با کسر حجم لوله محاسبه می‌گردد.

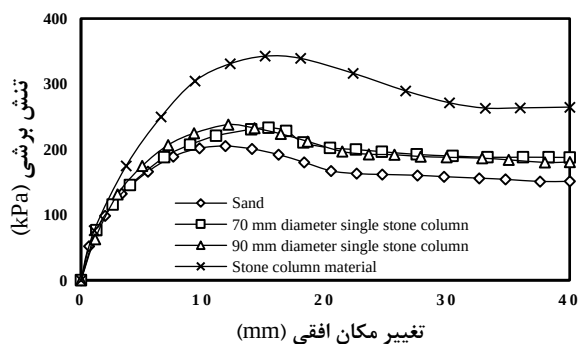
جابه‌جایی سنج الکترونیکی با دقت اندازه‌گیری $0/01$ میلی‌متر استفاده شد. تصویری از دستگاه آزمایش به همراه متعلقات آن در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

با توجه به نیاز به تعیین وزن مخصوص خشک حداقل ماسه، به همین منظور مطابق استاندارد شماره ASTM D-4254-00 [23]، ماسه به آرامی و بدون لرزش و ضربه توسط قیف استاندارد به صورت دایره‌وار از ارتفاع $2/5$ سانتی‌متری از سطح خاک درون ظرف ریخته شده و سپس با صاف کردن سطح لبه قالب و توزین خاک درون قالب و اندازه‌گیری حجم قالب، مقدار وزن مخصوص خشک حداقل ماسه محاسبه گردید. همچنین جهت تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر ماسه مطابق با استاندارد شماره ASTM D-4253-00 [24]، نمونه در ۵ لایه یکسان در داخل قالب مخصوص آزمایش ریخته شد؛ سپس با قرار دادن وزنه‌هایی به میزان تنش 14 کیلوپاسکال بر روی سطح ماسه، هر لایه به مدت زمان ۸ دقیقه، با فرکانس 60 هرتز و دامنه حرکتی $0/33$ میلی‌متر توسط دستگاه میز لرزه متراکم و وزن خاک درون قالب اندازه‌گیری شد. با تقسیم وزن خاک قالب به حجم آن، وزن مخصوص حداکثر ماسه محاسبه گردید.

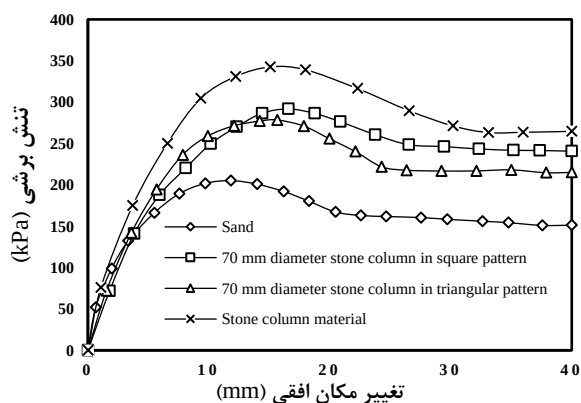


شکل ۴ تصویری از دستگاه برش مستقیم و متعلقات آن

برشی بستر بهسازی شده توسط ستون‌های سنگی غیرمسلح، جایگزینی بخشی از خاک نامرغوب با خاک مرغوب و با مقاومت برشی بیشتر نسبت به بستر ماسه‌ای است. مشاهده می‌شود که رفتار بستر ماسه‌ای بهسازی شده با ستون‌های سنگی به دلیل عدم وجود محصورکننده، مشابه بستر ماسه‌ای بدون ستون سنگی است، به طوری که نمونه‌های آزمایش بعد از رسیدن به نقطه مقاومت حداکثر، رفتار نرم‌شوندگی کرنشی داشته و پس از آن مقاومت برشی باقی‌مانده در مقدار ثابتی قرار می‌گیرد. نتایج گزارش شده توسط سایر محققان نیز چنین رفتار مشابهی را به لحاظ نرم‌شوندگی کرنشی نسبت به بارگذاری نشان دادند [8,10]. در این پژوهش رفتار نرم‌شوندگی کرنشی در همه نمونه‌های آزمایش شده برای ستون‌های سنگی تکی و گروهی غیرمسلح، به ازای تنش‌های سربار مختلف مشاهده گردید.

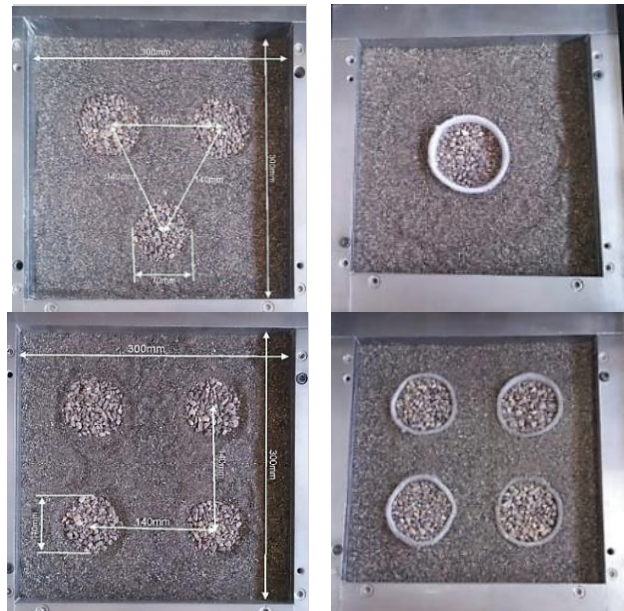


شکل ۶ تغییرات تنش برشی در تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال برای ستون‌های سنگی تکی محصور نشده



شکل ۷ تغییرات تنش برشی در تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال برای گروه ستون‌های سنگی محصور نشده

نمونه‌های با گروه ستون سنگی در دو آرایش هندسی به شکل مثلثی و مربعی ساخته شده است، به طوری که فاصله مراکز ستون‌ها از یکدیگر برابر با $2d$ می‌باشد (d قطر ستون سنگی است). شکل (۵) تصاویری از نمونه‌های آماده‌سازی شده با آرایش‌های هندسی مختلف را نشان می‌دهد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی از طریق انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، نمونه‌ها تحت تنش‌های سربار به میزان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و بارگذاری افقی با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تحت نیروی برش قرار گرفته و نتایج به ازای پارامترهای مختلف مطالعه گردید که بررسی تأثیر پارامترها بر نتایج به تفصیل در بخش نتایج ارائه شده است.



شکل ۵ تصاویری از نمونه‌های آماده‌سازی شده با آرایش‌های مختلف ستون سنگی

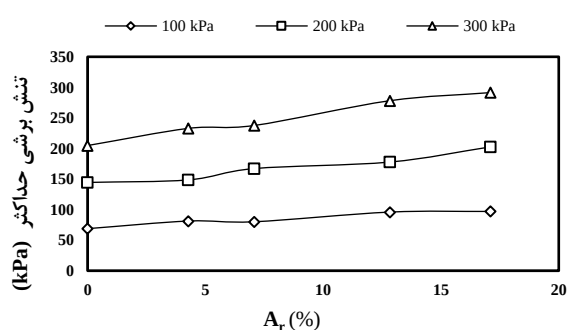
نتایج

نتایج آزمایش ستون‌های سنگی غیرمسلح

نتایج آزمایش ستون‌های سنگی غیرمسلح در نمودار شکل‌های (۶) و (۷) برای تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب به ازای ستون‌های تکی و گروهی نشان داده شده است. همان طوری که از نمودارها قابل مشاهده است، مقاومت برشی بستر بهسازی شده افزایش می‌یابد. دلیل افزایش مقاومت

چسبندگی مصالح ستون سنگی، تقریباً ثابت باقی مانده و افزایشی مشاهده نگردید.

تغییرات حداکثر مقاومت برشی نسبت به تغییرات A_r ، برای ستون‌های سنگی غیرمسلح در نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که در همه حالت‌ها، با افزایش میزان A_r ، مقاومت برشی به ازای تنش‌های سربار مختلف افزایش می‌یابد ولی در گروه ستون‌های سنگی به دلیل حجم بیشتر جایگزینی خاک بستر با مصالح مقاوم ستون سنگی و همچنین تأثیر هم‌افزایی محصورشدگی ایجاد شده توسط ستون‌ها بر ماسه میان آن‌ها، این افزایش مقاومت در میزان تنش برشی، بیشتر و محسوس‌تر است. نمودار همچنین نشان می‌دهد در ستون‌های سنگی غیرمسلح با افزایش قطر و تعداد ستون‌ها و محصورشدگی احتمالی خاک بستر مابین ستون‌های سنگی توسط ستون‌ها، ظرفیت باربری جانبی افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک بهسازی شده با ستون سنگی، نسبت به حالت خاک بدون ستون سنگی، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند [4].



شکل ۸ تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییرات A_r (%) به ازای تنش‌های سربار مختلف برای انواع ستون‌های سنگی غیرمسلح

نتایج آزمایش ستون‌های سنگی مسلح

نتایج آزمایش ستون‌های سنگی تسلیح شده با ژئوتکتستایل در نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) به ازای تنش سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود که مقاومت حداکثر ستون‌های سنگی تکی مسلح، نسبت به حالت ماسه بستر افزایش مقاومت برشی داشته است. همچنین مطابق نمودار شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که سختی اولیه گروه ستون‌های سنگی نسبت به ماسه بستر افزایش یافته و مقاومت برشی نیز افزایش چشم‌گیری داشته است. دلیل این افزایش مقاومت در ستون‌های سنگی تکی و گروهی، جایگزینی خاک بستر با مصالح ستون سنگی و وجود

در ستون‌های سنگی تکی غیرمسلح، با افزایش میزان A_r (درصد سطح بستر که با ستون‌های سنگی اشغال شده است)، بهبود جزئی در مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی، در مقایسه با خاک بستر بدون ستون به وجود می‌آید که دلیل این امر، جایگزینی مقداری از خاک بستر با خاک مرغوب‌تر و مقاوم‌تر است.

با توجه به خلاصه نتایج پارامترهای مقاومت برشی در جدول (۳)، مشاهده می‌شود که با بهسازی بستر ماسه‌ای توسط ستون‌های سنگی تکی، زاویه اصطکاک داخلی نمونه بهسازی شده، ۳ الی ۴ درجه افزایش می‌یابد که این افزایش برای ستون‌های سنگی تکی مسلح نشده به قطرهای ۷ و ۹ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۸/۷۷٪ و ۱۱/۶۹٪ بوده است.

جدول ۳ پارامترهای مقاومت برشی ستون‌های سنگی محصور نشده و غیرمسلح

حالت ستون سنگی مورد آزمایش	A_r (%)	ϕ (°)	c (kPa)
ماسه بستر	۰	۳۴/۲	۳/۵
۷ سانتی‌متر تکی	۴/۲۸	۳۷/۲	۲/۷
۹ سانتی‌متر تکی	۷/۰۷	۳۸/۲	۴/۱
گروه ۷ سانتی‌متر با آرایش مثلثی	۱۲/۸	۴۲/۳	۱/۸
گروه ۷ سانتی‌متر با آرایش مربعی	۱۷/۱	۴۴/۲	۲/۶
مصالح ستون سنگی	۱۰۰	۴۸/۳	۲/۳

با توجه به نتایج جدول (۳) مشاهده می‌شود که به دلیل جایگزینی حجم قابل توجهی از خاک بستر با مصالح ستون سنگی که زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به ماسه بستر دارد، افزایش ۸ الی ۱۰ درجه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی گروه ستون‌های سنگی ملاحظه می‌گردد. میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی نسبت به بستر ماسه‌ای در هر یک از گروه‌های ستون سنگی با اندازه قطر ۷ سانتی‌متری و برای آرایش‌های مثلثی و مربعی به ترتیب برابر با ۲۳/۶۸٪ و ۲۹/۲۳٪ بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که مصالح مرغوب و با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر و همچنین محصورسازی جانبی ماسه توسط ستون‌های سنگی، باعث افزایش ظرفیت باربری ستون‌های سنگی می‌شود [12]. در ستون‌های سنگی غیرمسلح برخلاف افزایش زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی نمونه‌های مورد آزمایش، به دلیل عدم محصورشدگی ستون‌ها و عدم

خلاصه نتایج پارامترهای مقاومت برشی ستون‌های سنگی محصور شده برای حالت‌های مختلف در جدول شماره (۴) ارائه شده است. بر اساس نتایج ملاحظه می‌گردد که در ستون‌های سنگی تکی مسلح با افزایش A_r چسبندگی به مقدار مناسبی افزایش پیدا کرده است که بیانگر ایجاد چسبندگی ظاهری به دلیل اثرات محصورکنندگی ژئوتکستایل می‌تواند باشد. با این حال میزان چسبندگی در گروه ستون‌های سنگی مسلح نسبت به حالت تکی و بستر ماسه‌ای، افزایش چشم‌گیر و چند برابری داشته است که دلیل عمده افزایش بیشتر می‌تواند علاوه بر تأثیر افزایش چسبندگی ناشی از وجود محصورکننده ژئوتکستایل در ستون سنگی، به تأثیر هم‌افزایی محصورکنندگی ماسه بستر بین گروه ستون‌های سنگی ایجاد شده توسط ستون‌های سنگی اشاره کرد.

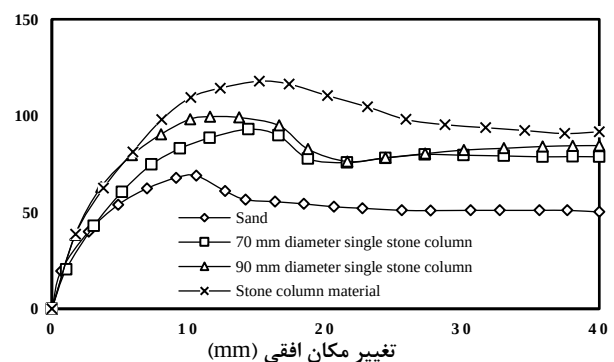
جدول ۴ پارامترهای مقاومت برشی ستون‌های سنگی محصور شده و مسلح

حالت ستون سنگی مورد آزمایش	A_r (%)	ϕ (°)	c (kPa)
ماسه بستر	۰	۳۴/۲	۳/۵
۷ سانتی‌متر تکی	۴/۲۸	۳۷/۳	۱۲/۹
۹ سانتی‌متر تکی	۷/۰۷	۳۸/۲	۱۷/۵
گروه ۷ سانتی‌متری با آرایش مثلثی	۱۲/۸۳	۴۲/۳	۴۱/۹
گروه ۷ سانتی‌متری با آرایش مربعی	۱۷/۱۰	۴۴/۳	۵۲/۷
مصلح ستون سنگی	۱۰۰	۴۸/۳	۲/۳

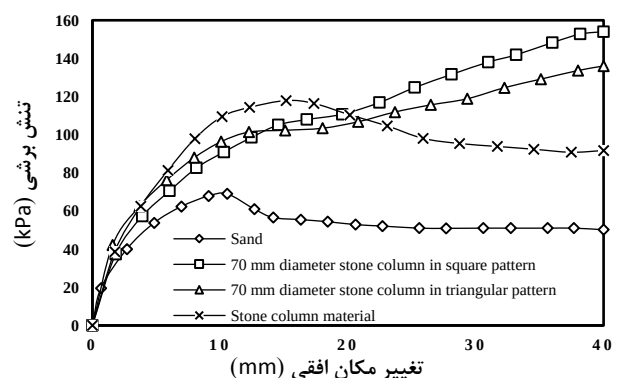
میزان افزایش چسبندگی ستون‌های سنگی تکی مسلح به قطرهای ۷ و ۹ سانتی‌متر نسبت به ماسه بستر به ترتیب برابر با ۹/۴ و ۱۴ کیلوپاسکال معادل ۲/۶۸ و ۳ برابر است. برای گروه ستون‌های به قطر ۷ سانتی‌متر و آرایش مثلثی و مربعی به ترتیب برابر با ۳۸/۴ و ۴۹/۲ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شده است که با فرض مساحت سطح یکسان، دلالت بر افزایش چسبندگی متوسطی در حدود ۶۰٪ است. برخلاف حالت ستون‌های سنگی غیرمسلح، زاویه اصطکاک داخلی ستون‌های سنگی نسبت به حالت‌های مشابه غیرمسلح تغییر محسوسی نداشته است، اما نسبت به ماسه بستر (همانند حالت غیرمسلح) افزایش داشته است، میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی ستون‌های سنگی تکی مسلح نسبت به ماسه بستر، به ترتیب برابر با ۳ الی ۴ درجه است. برای گروه ستون‌های به قطر ۷ سانتی‌متر و آرایش مثلثی و مربعی به ترتیب برابر با ۴ الی ۱۰ درجه افزایش یافته

محصورکننده‌های ژئوتکستایل است که این محصورکننده‌ها با بسیج تنش‌های کششی و عدم گسیختگی در تغییرمکان‌های بزرگ، موجب افزایش مقاومت برشی ناشی از چسبندگی ظاهری در نمونه‌های ستون سنگی شده‌اند.

با توجه به منحنی‌های شکل‌های فوق مشاهده می‌شود که رفتار ستون‌های سنگی مسلح برخلاف ماسه بستر و ستون‌های سنگی غیرمسلح تغییر رفتار داده و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهند و با افزایش تغییرمکان افقی، افزایش مقاومت باقی‌مانده در نمونه‌های مورد آزمایش مشاهده می‌شود. این نوع تغییر رفتار از حالت نرم‌شوندگی به سخت‌شوندگی در همه ستون‌های سنگی مسلح و به ازای تنش‌های سربار مختلف ملاحظه می‌شود. دلیل این رفتار، می‌تواند به وجود محصورکننده‌های ژئوتکستایل و بسیج نیروهای کششی از طرف ژئوتکستایل‌ها نسبت داده شود. رفتار سخت‌شوندگی کرنشی در نمونه‌های ستون سنگی مسلح شده با انواع ژئوستتیک، در تحقیقات محققان دیگر نیز مشاهده شده است [7,8,10].



شکل ۹ تغییرات تنش برشی به ازای تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال در ستون‌های سنگی تکی محصور شده



شکل ۱۰ تغییرات تنش برشی به ازای تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال برای گروه ستون‌های سنگی محصور شده

ژئوتکستایل با افزایش قطر آن است. افزایش قطر ستون‌های سنگی، باعث کاهش اثر محصورکنندگی ژئوستتیکی می‌شود؛ با این وجود در نهایت ظرفیت باربری ستون سنگی را افزایش می‌دهد [10,12].

بررسی مکانیزم محصورکنندگی و تفسیر نتایج

شکل (۱۲) تصویر نمونه‌های آزمایش شده در وضعیت تغییر شکل یافته ستون سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل را نشان می‌دهد که با تزریق دوغاب سیمان زودگیر تهیه شده است. ملاحظه می‌شود که با توجه به مقاومت کششی و برشی محصورکننده ژئوتکستایل و عدم گسیختگی آن در اثر اعمال نیرو و تغییر مکان افقی، ستون سنگی به دلیل انعطاف زیاد ژئوتکستایل، تحت تغییر شکل خمشی در صفحه برش قرار گرفته است و به خوبی چسبندگی ظاهری ایجاد شده ناشی از ژئوتکستایل را نمایش می‌دهد.

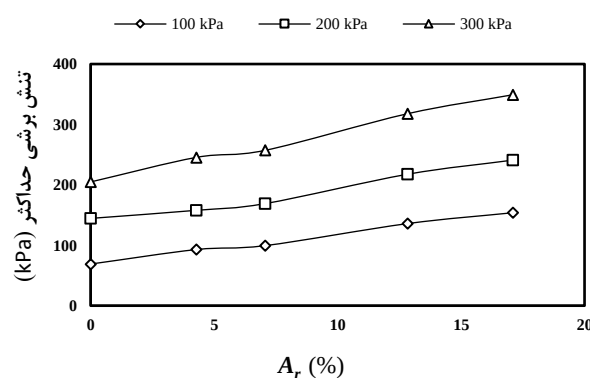
با توجه به افزایش مقاومت برشی ناشی از ستون‌های سنگی ایجاد شده در بستر ماسه و محصورسازی ستون‌های سنگی توسط ژئوستتیک‌ها، می‌توان دلایل اصلی میزان بهبود و بهسازی را بدین صورت تفسیر کرد: (۱) افزایش مقاومت برشی می‌تواند ناشی از ایجاد چسبندگی ظاهری بین مصالح ناشی از اثرات محصورکنندگی باشد، (۲) کرنش ژئوستتیک‌ها در طول جابه‌جایی برشی می‌تواند باعث محصورسازی بیشتر و ایجاد مقاومت برشی اضافی گردد و (۳) اثر محصورسازی جانبی ناشی از وجود ستون‌های سنگی مجاور در خاک حد فاصل میان گروه ستون‌های سنگی، می‌تواند باعث افزایش مقاومت بیشتر نسبت به ستون‌های تکی گردد.



شکل ۱۲ نمونه تغییر شکل یافته ستون سنگی مسلح

است. دلیل افزایش مقاومت برشی در حالت‌های مسلح، تأمین فشار محصورکننده از طرف ژئوتکستایل‌ها و همچنین به کشش افتادن ژئوتکستایل‌ها در اثر تغییر مکان افقی است که باعث بسیج نیروهای کششی و در نتیجه افزایش چسبندگی مجازی در نمونه مورد آزمایش شده است. نتایج سایر محققان نیز نشان داد که ظرفیت باربری و سختی ستون‌های سنگی با محصور کردن آن‌ها افزایش یافته و موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی زمین بهسازی شده می‌شود [11,13].

نمودار شکل (۱۱) تغییرات مقاومت برشی را نسبت به مقادیر A_r بستر ماسه‌ای ستون‌های سنگی مسلح نشان می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر A_r ، مقدار مقاومت برشی نمونه‌ها به ازای تنش‌های سر بار مختلف نسبت به ماسه بستر افزایش چشم‌گیری داشته است. دلیل افزایش مقاومت برشی در نمونه‌های ستون سنگی مسلح شده نسبت به ماسه بستر، علاوه بر افزایش مقادیر A_r ، وجود محصورکننده ژئوتکستایل در ستون‌های تکی و محصورکنندگی خود ستون‌های سنگی در حالت گروهی است که با فراهم کردن محصورشدگی جانبی برای ستون‌های سنگی و همچنین تأمین نیروی کششی در تغییر مکان‌های بیشتر، باعث افزایش بیشتر در مقاومت برشی نمونه‌ها شده است.



شکل ۱۱ تغییرات مقاومت برشی نسبت به مقادیر A_r (%) به ازای تنش‌های سر بار مختلف

در شکل (۱۱) افزایش مقاومت برشی در ستون‌های سنگی تکی و گروه ستون‌ها مشاهده می‌شود، اما در ستون‌های سنگی تکی، افزایش مقاومت برشی با بیشتر شدن قطر ستون‌ها کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع کاهش تنش کششی ایجاد شده در

بررسی قوانین مقیاس

در رابطه با قوانین شبیه سازی و بررسی اثرات مقیاس در مدل های کوچک مقیاس نسبت به مدل های واقعی، موضوعات اندازه دانه ها، ابعاد جعبه آزمایش و منحنی دانه بندی حائز اهمیت است که مورد بررسی قرار می گیرد. مطابق مراجع و تحقیقات مختلف [25-27]، به منظور اجتناب از اثرات مقیاس اندازه دانه ها بر نتایج مدل سازی، در تعیین پارامترهای مقاومت برشی حداقل نسبت اندازه نمونه به حداکثر اندازه دانه ها، بایستی بزرگ تر از حدود شش برابر رعایت گردد که با توجه به اینکه اندازه بزرگ ترین دانه مصالح مورد استفاده در ستون سنگی حدود ۶ میلی متر و اندازه مدل آزمایش ۳۰۰ میلی متر بوده است، بنابراین نسبت اندازه مدل به اندازه دانه ها حدود ۵۰ برابر به دست می آید که بسیار بیشتر از حداقل مقدار است و در این مورد تأثیر قابل توجهی بر نتایج نخواهد داشت. در رابطه با قوانین شبیه سازی اندازه دانه ها در مدل و پروتوتایپ، یکی از بهترین و دقیق ترین روش های تبدیل اندازه دانه ها برای رسیدن به پاسخ مشخصات مکانیکی سازگار میان مصالح مدل و پروتوتایپ، روش دانه بندی موازی توسعه یافته توسط لائو (۱۹۶۴) است که در این مطالعه نیز با بهره گیری از این روش، منحنی دانه بندی مدل مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است [27].

خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق با توجه به ضعف برشی ستون های سنگی به دلیل عدم محصورشدگی کافی، رفتار ستون های سنگی مسلح شده توسط ژئوتکستایل واقع در بستر خاک ماسه ای از طریق انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ مقیاس به ویژه با تمرکز بر تنش سربار بزرگ تر متناسب با کارهای اجرایی، مورد مطالعه قرار گرفته و روند تغییرات مقاومت برشی نمونه های فیزیکی ستون سنگی به صورت تکی و گروهی ارزیابی شد که خلاصه ای از مهم ترین نتایج به صورت ذیل ارائه می گردد:

۱. رفتار نمونه های بهسازی شده از طریق ستون های سنگی تکی و گروهی غیرمسلح، به دلیل عدم تأمین فشار کافی محصورکنندگی از طرف خاک سست بستر، همانند بستر ماسه ای بدون ستون سنگی است. این نمونه ها بعد از رسیدن

به حالت مقاومت برشی حداکثر، رفتار نرم شوندگی کرنشی از خود نشان می دهند.

۲. در بستر بهسازی شده با ستون های سنگی تکی غیرمسلح، با افزایش قطر ستون ها، بهبود در مقاومت برشی با افزایش ۳ الی ۴ درجه ای زاویه اصطکاک داخلی حاصل گردید و در بستر بهسازی شده با گروه ستون های سنگی غیرمسلح با آرایش های هندسی مثلثی و مربعی، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به بستر بدون ستون سنگی، به میزان ۸ الی ۱۰ درجه افزایش مشاهده شد. مقادیر چسبندگی در نمونه های بهسازی شده بستر ماسه ای با ستون های سنگی غیرمسلح، به دلیل عدم محصورشدگی ستون ها و عدم چسبندگی مصالح ستون سنگی، تقریباً ثابت باقی ماند.

۳. استفاده از ستون سنگی غیرمسلح در بستر ماسه سست با سطح مقطعی تا حدود ۱۷٪ سطح ماسه، باعث افزایش حدود ۱۲٪ زاویه اصطکاک داخلی ماسه برای ستون تکی و افزایش ۲۶٪ برای حالت گروه ستون و عدم افزایش چسبندگی شده است. دلیل این امر می تواند جایگزینی مقداری از خاک سست بستر با مصالح مقاوم ستون سنگی و تأثیر احتمالی محصورسازی جانبی ناشی از خود ستون های مجاور در خاک بستر باشد.

۴. بر خلاف نمونه های غیرمسلح، در همه حالت های بستر بهسازی شده با ستون های سنگی مسلح، پس از رسیدن نمونه ها به مقاومت برشی حداکثر، رفتار سخت شوندگی کرنشی مشاهده شد. دلیل این رفتار وجود محصورکننده های ژئوتکستایل و بسیج نیروهای کششی از سوی آن ها در تغییر مکان های بیشتر و ایجاد مقاومت بیشتر است.

۵. ستون های سنگی تکی مسلح باعث افزایش مقاومت برشی بستر ماسه ای می شود. این افزایش مقاومت برشی که با افزایش قطر ستون ها همراه است، ناشی از بهبود پارامترهای مقاومتی خاک از جمله زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه است، به طوری که استفاده از ستون های سنگی تکی مسلح، موجب افزایش ۳ الی ۴ درجه ای در زاویه اصطکاک داخلی و ۹/۴ الی ۱۴ کیلو پاسکال در چسبندگی بستر ماسه ای شده که بیانگر افزایش قابل توجه در میزان چسبندگی تا حدود ۳ برابری می باشد.

ASTM	انجمن آزمایش مصالح امریکا	۶. در گروه ستون‌های سنگی مسلح، با افزایش سطح جایگزین شده خاک بستر با ستون‌های سنگی، زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها نسبت به حالت بدون تسلیح بهبود جزئی نشان داده است، لیکن میزان چسبندگی نمونه خاک افزایش چشم‌گیری به مقدار متوسط حدود ۶۰٪ به ازای سطح یکسان ستون سنگی به نمایش گذاشته که این افزایش چسبندگی، ناشی از اثر مقاومت کششی محصورکننده‌ها در تغییر مکان‌های بزرگ و همچنین تأثیر محصورسازی جانبی خود ستون‌ها برای ماسه بستر است. برای گروه ستون‌های سنگی مسلح به ازای پارامترهای مختلف میزان و صرف نظر از میزان نسبت سطح ستون‌های سنگی، چسبندگی تا ۵ برابر حالت غیرمسلح افزایش نشان داده است.	
A _r	درصد مساحت ستون سنگی نسبت به بستر ماسه	واژه‌نامه	ژئوتکستایل
SP	ماسه بد دانه‌بندی شده		ستون سنگی
GP	شن بد دانه‌بندی شده		ژئوسنتتیک
D _r	دانسیته نسبی		بهسازی
G _s	چگالی ویژه		سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک
γ _d	وزن مخصوص خشک		
γ _{dmax}	وزن مخصوص خشک بیشینه		
γ _{dmin}	وزن مخصوص خشک کمینه		
D ₁₀	اندازه مؤثر		
C _u	ضریب یکنواختی		
C _c	ضریب خمیدگی		
c	چسبندگی		
φ	زاویه اصطکاک داخلی خاک		
kPa	کیلو پاسکال	Geotextile	ژئوتکستایل
		Stone column	ستون سنگی
		Geosynthetic	ژئوسنتتیک
		Improvement	بهسازی
		USCS	سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک
	سپاسگزاری		

سپاسگزاری

مراجع

- [1] R. Rezvani, M. Azizi, P. Nopars, and A. Nabizadeh, "Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 55-70, 2020. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v33i2.85864>
- [2] S. Gholipour, and M. Makarchian, "Experimental and Numerical Study of Load-Bearing and Settlement Behavior of Circular Skirted foundations Compared to other Types of Foundations," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 85-104, 2020. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jfcej.2021.61489.0>
- [3] R. D. Barksdale, and R. C. Bachus, "Design and Construction of Stone Columns," *Federal Highway Administration*, vol. 1, no. FHWA/RD-83/026, 1983.
- [4] D. M. Wood, W. Hu, and D. F. T. Nash, "Group Effects in Stone Column Foundations: Model Test," *Geotechnique*, vol. 50, pp. 689-698, 2000. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.689>
- [5] N. Mehrannia, J. Nazariafshar, F. Kalantary, "Experimental Investigation on the Effect of Geometry and Reinforced Floating Stone Columns on Bearing Capacity," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 74-88, 2018. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.57449>

- [6] M. Hajiazizi, and M. Nasiri, "Experimental and Numerical Investigation on Stability of Reinforced Sandy Slope using Reinforced Stone Column with Horizontally Laminated Geotextile Disks," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 55-72, 2019. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.62412>
- [7] S. N. Malarvizhi, and K. Ilamparuthi, "Load Versus Settlement of Clay Bed Stabilized with Stone & Reinforced Stone Columns," *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Korea, 2004, pp. 322-329.
- [8] S. R. Mohapatra, K. Rajagopal, and J. Sharma, "Direct Shear Tests on Geosynthetic-Encased Granular Columns," *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 44, pp. 396-405, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.01.002>
- [9] S. Ghaffarpour, S. Gharbanbeygi, M. Yaghoubi, "Evaluation of Distinct Factor Affecting the Bearing Capacity in Ground Improvement with Stone Column Group," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 137-150, 2019. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.61713>
- [10] S. Murugesan, and K. Rajagopal, "Model Test on Geosynthetics-Encased Stone Column," *Journal of Geosynthetics International*, vol. 14, pp. 346-354, 2007. <https://doi.org/10.1680/gein.2007.14.6.346>
- [11] M. Ghazavi, and J. N. Afshar, "Bearing Capacity of Geosynthetic Encased Stone Columns," *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 38, pp. 26-36, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.04.003>
- [12] L. Keykhosropur, A. Soroush, and R. Imam, "3D Numerical Analyses of Geosynthetic Encased Stone Columns," *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 35, pp. 61-68, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.07.005>
- [13] C. S. Wu, and Y. S. Hong, "Laboratory Tests on Geosynthetic-Encapsulated Sand Columns," *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 2, pp. 107-120, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.003>
- [14] S. A. Naeini, and N. Gholampoor, "Effect of Geotextile Encasement on the Shear Strength Behavior of Stone Column-Treated Wet Clays," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 49, pp. 292-303, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0329-z>
- [15] G. Zheng, X. Yu, H. Zhou, et al. "Stability Analysis of Stone Column-Supported and Geosynthetic-Reinforced Embankments on Soft Ground," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 48, no. 3, pp. 349-356, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.12.006>
- [16] M. Miranda, and A. I. Costa, "Laboratory Analysis of Encased Stone Columns," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 44, no. 3, pp. 269-277, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.12.001>
- [17] S. Naskar, S. K. Gupta, A. K. Choudhary, and K. K. Sharma, "3D Finite Element Analysis of Stone Column Behaviour in Layered Soil with Geosynthetic Reinforced Soil Beds," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09322-w>

- [18] A. O. Elwakeel, and R. M. Elsherbini, "Effect of Column Material Internal Angle of Friction and the Geotextile Stiffness on the Behavior of Group of Geosynthetic-Encased Stone Column," *Indian Geotechnical Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01005-5>
- [19] N. M. Pradeep, K. Suresh, G. Sanjoli, and N. Mayank, "Behavior of Group of Geosynthetic encased Granular Piles with Tire Chips- Aggregates Mixture under Static and Cyclic Loading–A Model Study," *Construction and Building Materials*, vol. 431, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136507>
- [20] S. L. Abishikth, and A. R. Sudha, "A Study on the Inclusion of Geosynthetic to Clayey Soil Improved using Stone Column," *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 2, no. 6, 2022. <https://doi.org/10.22067/jfeci.2024.90055.1323>
- [21] R. Dinarvand, and A. Ardakani, "Behavior of Geosynthetic-encased Granular Column in Silty Sand Soil by Direct Shear Test," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 961-972, 2018. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12979.5308>
- [22] ASTM D-3080 "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions," *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, 2004. https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-23
- [23] ASTM D-4254 "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density," *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, 2016. <https://doi.org/10.1520/D4254-16>
- [24] ASTM D-4253, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils using a Vibratory Table," *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, 2016. <https://doi.org/10.1520/D4253-16E01>
- [25] N. D. Marachi, C. K. Chan, and H. B. Seed, "Evaluation of Properties of Rockfill Materials," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ASCE)*, vol. 98, no. sm1, pp. 95-114, 1972. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001735>
- [26] J. N. Stoeber, "Effects of Maximum Particle Size and Sample Scaling on the Mechanical Behavior of Mine Waste Rock; a Critical State Approach," Master's Thesis, Colorado State University, Fort Collins, USA, 2012.
- [27] J. Lowe, "Shear Strength of Coarse Embankment Dam Materials," *Proceedings from the 8th International Congress on Large Dams*, Paris, France, vol. 3, pp. 745-761, 1964.



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Experimental Study of the Correlation between Resilient Modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil

Research Article

Siamak Shafaghathian¹ , Gholam Moradi²

DOI: [10.22067/jfpei.2024.83919.1248](https://doi.org/10.22067/jfpei.2024.83919.1248)

1- Introduction

According to AASHTO recommendations, the resilient modulus (MR) is one of the fundamental parameters for designing pavement layers and determining their thickness. MR represents the elastic modulus of soil, calculated based on reversible strains under dynamic loads and varying stress states. Analyzing MR variations is one of the most effective methods for evaluating the performance of stabilized pavement layers.

Recently, to conserve resources, the use of innovative materials (rather than traditional ones) for soil stabilization has become widespread. These materials include enzymes, polymers, sulfates, ions, resins, oils, and others, which effectively mitigate risks associated with soil stabilization. Furthermore, in line with environmental concerns and the Kyoto Protocol's recommendations, biological stabilization methods—such as the use of biopolymers—have been introduced. Biopolymers offer advantages like simplicity, cost-effectiveness (requiring no specialized equipment), short mixing times, and high efficiency, particularly in clay soils.

Determining MR through laboratory testing is time-consuming and expensive. As per AASHTO guidelines, MR can instead be estimated using validated correlations with other soil parameters, such as the California Bearing Ratio (CBR) and uniaxial compressive strength (q_u). However, the applicability of these correlations must be verified for each specific scenario.

In this study, the focus is on subgrade clay soil. For stabilization, Nicoflok solid polymer (chemical method) and Beta-glucan biopolymer (biological method) were employed. Through laboratory experiments, their effects on q_u and MR were investigated. Subsequently, the accuracy of the Thomson correlation for stabilized soils with these additives was analyzed.

2- Materials and Tests

In the present study, soil samples were collected from the subgrade of Amol-Sari Freeway in Mazandaran province. Based on the gradation, hydrometer analysis, and Atterberg limit tests, the soil is classified as high-plasticity clay (CH) under the Unified Soil Classification System (USCS).

Beta-glucan solution as a biopolymer and Nicoflok powder as a solid polymer were used for biological and chemical stabilization respectively. Beta-glucans comprise of D-Glucose monomers and have glycosidic bonds found in various forms such as cells, bran, fungi and bacteria in nature.

To examine the effect of stabilization, compaction tests (ASTM D698), unconfined compressive strength tests (ASTM D2166), and resilient modulus tests (AASHTO T307) were conducted.

3- Test Results

In general, stabilizing clay with calcium-based cations such as Nicoflok and cement resulted in a decrease in maximum dry density and an increase in optimum moisture content due to the accumulation of particles in larger spaces, low cation density and pozzolanic reaction. However, this trend stopped with the addition of Nicoflok to the highest value and the optimum moisture content decreased to some extent, which can be due to an increased effect of the hydrophobic properties of Nicoflok particles. Beta-glucan is a water-absorbing polymer with a density less than soil; therefore, the accumulation of low-density Beta-glucan fibers increased the optimum moisture content and decreased the maximum soil density. The optimum moisture content increased with the increase in the concentration of Beta-glucan.

The unconfined compressive strength test results are shown in Table 1.

*Manuscript received August 13, 2023, Revised November 18, 2023, Accepted December 24, 2024.

¹ Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil engineering, Khodabandeh Branch, Islamic Azad University, Khodabandeh, Iran. **Email:** shafaghathian@tabrizu.ac.ir

² Associate Professor, Department of Civil engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

Table1- Unconfined compressive strength test results

		Chemical			Biological		
		0.3 %	0.7 %	1 %	2 g/lit	4 g/lit	8 g/lit
3	E _{sec}	129.7	144.14	131.46	121.8	182.42	150.41
	q _u	1.92	3.33	3.15	2.73	3.34	3.5
7	E _{sec}	199.27	144.8	202.58	205.6	244.65	241.05
	q _u	2.32	3.62	4.32	4.56	5.02	4.32
14	E _{sec}	196.67	149.21	200.57	207.58	254.5	252.04
	q _u	2.96	4.07	4.61	5.05	5.46	4.21
28	E _{sec}	197.62	160.04	202.6	208.42	250.1	248.8
	q _u	3.43	4.31	4.94	5.48	5.6	4.2

Chemical stabilization using Nicoflok increased the resilient modulus. This trend proceeded with the increase in Nicoflok percentage and its effect on improving cementing performance and particle bonding. The increasing rate of M_R was more evident in the first 14 days of curing. The highest amount of M_R was 358 MPa achieved at an additive value of 1% and a curing period of 28 days.

In the biological stabilization, M_R increased up to a concentration of 4 gr/L and after that it did not change much until a concentration of 8 gr/L and even decreased from day 14. At a concentration of 8 gr/L fungus and erosion were observed on the samples, which could have been caused by the increase of uncombined Beta-glucan fiber colonies with clay particles at this concentration in the stabilized soil structure.

4- Assessing the accuracy of Thomson's model in estimating M_R of the studied soil

Equation 1 states the Thomson model:

$$M_R = a \cdot q_u + b \quad (1)$$

In which a and b are constants. In this model, M_R is linearly correlated with q_u . To evaluate this relationship in different stress states (different test sequences), the data of two curing periods of 14 and 28 days in three doses of Nicoflok and Beta-glucan was considered.

5- Conclusion

1. Density and Optimum Moisture Content Changes

Chemical and biological stabilization of clay **reduce** density and **increase** optimum moisture content. This trend occurs due to:

- Pozzolanic reactions in chemical stabilization,
- Accumulation of lightweight fibers in the soil structure in biological stabilization.

In chemical stabilization, when Nicoflok content increases to **1%**, the optimum moisture content decreases again due to the polymer's hydrophobic properties, while maximum dry density increases.

2. Compressive Strength and Elastic Modulus

Both Nicoflok and Beta-glucan enhance compressive strength and modulus of elasticity. However, the trends differ:

- Chemical stabilization (Nicoflok): Rapid strength gain occurs within the first 7 days, then slows.

- Biological stabilization (Beta-glucan): The optimal concentration is 4 g/L. At 8 g/L, strength and stiffness decline after 7 days due to excessive unbound fiber colonies (visible as fungal growth and surface erosion).

3. Resilient Modulus (M_R) Behavior

- Nicoflok increases M_R more significantly than Beta-glucan, especially during the initial 14-day curing period, with slower progress afterward.
- At 8 g/L Beta-glucan, M_R decreases after 14 days.

4. Thomson Model Accuracy

- The Thomson model reliably estimates M_R for Nicoflok-stabilized clay, particularly under serviceability stress conditions typical for highways (Fig. 1).
- Its accuracy is lower for Beta-glucan-stabilized soil.



بررسی آزمایشگاهی همبستگی مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک محوری در تثبیت شیمیایی و زیستی

خاک رس بستر راه*

مقاله پژوهشی

غلام مرادی^(۲)

سیامک شافغاتیان^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.83919.1248

چکیده با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن آزمایش، برای تعیین مدول برجهندگی (M_R) در اهداف طراحی، استفاده از روابط معتبر همبستگی با پارامترهای معمول خاک، مفید و رایج می‌باشد که اعتبار این روابط در خاک‌های تثبیت شده، کمتر بررسی شده است. تثبیت خاک ضعیف بستر راه، یکی از روش‌های پرهیز از هزینه‌های مالی و زمانی روش جایگزینی می‌باشد. طبق توصیه پیمان زیست‌محیطی کیوتو، تحقیق بر روی استفاده از مصالح نوین مانند پلیمرها و روش‌های نوین مانند تثبیت زیستی با اهداف ژئوتکنیکی مانند راهسازی گسترش یافته است. در این پژوهش تأثیر تثبیت شیمیایی و زیستی بر مقاومت فشاری تک محوری (q_u) و M_R مدل تامسون در همبستگی این دو پارامتر در خاک رس بستر مورد مطالعه، بررسی شد. در تثبیت شیمیایی از یک پلیمر جامد به نام نیکوفلاک و در تثبیت زیستی از یک بیوپلیمر به نام بتاگلوکان استفاده شد. هر دو مثبت، وزن مخصوص خشک خاک را کاهش و رطوبت بهینه و همچنین q_u آن را افزایش می‌دهند. برخلاف نتایج نزدیک در آزمایش q_u پلیمر جامد، M_R خاک تثبیت شده را بیش از بیوپلیمر افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل پراکندگی داده‌های آزمایش، مدل تامسون برای تخمین M_R بر حسب q_u در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب بوده و در خاک تثبیت شده با بتاگلوکان از دقت کافی برخوردار نیست.

واژه‌های کلیدی مدول برجهندگی (M_R)، مدل تامسون، تثبیت شیمیایی و زیستی بستر رسی، نیکوفلاک، بتاگلوکان.

Experimental Study of the Correlation between Resilient modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil

Siamak Shafaghatian,

Gholam Moradi

Abstract Due to the high cost and time-consuming nature of testing, it is useful and common to use valid correlation relationships with common soil parameters to determine the resilient modulus (M_R) for design purposes. However, the validity of these relationships for stabilized soils has been less investigated. Stabilization of weak subgrade soil is a method of avoiding weak soil replacement costly and time-consuming problems. According to the Kyoto Protocol, a lot of research has been done on novel materials such as polymers and new methods like biological stabilization. This study aimed to investigate the effect of chemical and biological stabilization of clay subgrade soil on the resilient modulus and uniaxial compressive strength (q_u) and accuracy of the Thompson model for correlation between these two parameters. For chemical stabilization, a solid polymer called Nicoflok and for biological stabilization, a biopolymer solution called Beta-glucan were employed. In both methods, the dry unit weight of the soil decreased and its optimum water content and q_u increased. Despite similar results in the uniaxial test, the solid polymer increased the M_R of the stabilized soil more than the biopolymer. Based on the regression analysis of tests data, the Thompson model had more accurate results in the Nicoflok stabilized soil than the biopolymer ones.

Key Words Resilient modulus (M_R), The Thompson model, Chemical and biological stabilization of clay subgrade soil, Nicoflok, Betaglucan.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۰/۳ می‌باشد.

Email: shafaghatian@tabrizu.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خدابنده، خدابنده، ایران،

(۲) دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،

مقدمه

طبق توصیه آشتو، مدول برجهدگی (Resilient Modulus) (MR) یکی از پارامترهای اساسی به منظور طراحی و تعیین ضخامت لایه‌های روسازی آسفالتی می‌باشد [1] و [2]. MR، مدول الاستیک خاک بر اساس کرنش‌های برگشت‌پذیر، در حالت‌های مختلف تنش و تحت بارهای دینامیکی می‌باشد [3]. بررسی تغییرات MR یکی از مؤثرترین روش‌های ارزیابی نتایج تثبیت خاک لایه‌های روسازی می‌باشد. بنابراین در تحقیقات گوناگون به منظور بررسی تأثیر تثبیت با مصالح سنتی مانند آهک، سیمان، خاکستر بادی، سرباره‌ها و... به خصوص در خاک بستر، از آن استفاده شده است [4] و [5] و [6] و [7]. اخیراً به منظور کاهش فشار بر منابع، استفاده از مصالح نوین به جای مصالح سنتی برای تثبیت خاک مطرح شده و گسترش یافته است [8]. این مصالح به دسته‌های کلی پلیمرها، یون‌ها، آنزیم‌ها، سولفات‌ها، رزین و نفت و چند شاخه فرعی دیگر تقسیم می‌شوند [9]. پلیمر یک ماکرومولکول آلی است که از ترکیب مولکول‌های منفرد به نام مونومر تشکیل شده است [10]. در ابتدا بیشتر با اهداف کشاورزی از جمله کاهش نفوذپذیری و افزایش پایداری خاک استفاده شد [11] و [12] ولی به تدریج در مهندسی عمران نیز گسترش یافت و اخیراً تأثیر این مواد در زمینه‌های متنوعی مانند کاهش فرسایش و افزایش پایداری بستر راه و فرودگاه، مخازن دفن زباله و افزایش مقاومت فشاری تک محوری (qu) و C.B.R خاک رسی، بررسی و مفید ارزیابی شده است [13] و [14] و [15] و [16] و [17]. اخیراً با جدی شدن مخاطرات زیست محیطی و توصیه‌های پیمان زیست محیطی کیوتو، روش‌های نوین تثبیت از جمله تثبیت زیستی مطرح گردیده که استفاده از بیوپلیمرها یکی از شاخه‌های این روش می‌باشد [18] و [19]. بیوپلیمرها، پلیمرهای سنتز شده توسط موجودات زنده و در واقع بیومولکول‌های پلیمری هستند [20] که عمدتاً در صنایع پزشکی و مکمل‌های غذایی استفاده می‌شوند [21]. در مهندسی عمران ابتدا به عنوان ماده آبگیر فوق روان کننده و کاهنده آب، در تهیه دوغاب سیمان استفاده شده [22] و اخیراً در مهندسی ژئوتکنیک با توجه به تأثیر مثبت آن در اتصال دانه‌ها و کاهش فرسایش و نفوذپذیری، برای تثبیت خاک مورد توجه قرار گرفته است [23]. استفاده از این مثبت‌ها به دلیل عدم نیاز به تجهیزات خاص و زمان کوتاه اختلاط، ساده و مقرون به صرفه بوده و در خاک رس مؤثرتر

است [24] و [25].

آزمایش تعیین MR، زمان‌بر و گران است و بر اساس آیین-نامه آشتو می‌توان آن را از روابط معتبر همبستگی با سایر پارامترهای خاک مانند C.B.R و مقاومت فشاری تک محوری (qu) تخمین زد. البته اعتبار کاربرد این روابط برای هر موقعیت باید بررسی شود [26]. از سال ۱۹۶۰ روابط مستقیم خطی بین C.B.R و MR توسط هولکوم و فاستر و هولکوم و کلامپ ارائه گردید که در ادامه توسط گریم و هال با ارائه رابطه نمایی اصلاح شد. مدل نمایی نیز توسط محققان مختلف در چند مرحله اصلاح شد. در سال ۱۹۸۵ اوزان با اضافه کردن یک عدد ثابت به روابط نمایی، مدل جدیدی را پیشنهاد داد که ضرایب آن در NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) تغییر یافت [26] و [27] و [28]. تحقیقات بر روی خاک تثبیت شده در این زمینه محدود می‌باشد. تامسون در سال ۱۹۶۶ یک مدل همبستگی MR با qu را برای خاک تثبیت شده با آهک ارائه کرد که کاربرد آن توسط آشتو توصیه شده است [1] که در ادامه به دلیل نتایج محافظه کارانه، توسط لیتل و همکاران [29] اصلاح شد. توهی و همکاران در سال ۲۰۱۳ نتایج محافظه کارانه مدل تامسون را در خاک رسی تثبیت شده با آهک و با در نظر گرفتن تأثیر حالت تنش گزارش کردند. در حالی که پارک و همکاران در سال ۲۰۱۴ با انجام آزمایش ستون تشدید، ضرایب مدل تامسون را برای خاک نخاله ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و فوم متخلخل محاسبه و دقت بالای مدل را در خاک مذکور نتیجه گرفتند.

در این تحقیق، خاک مورد مطالعه، رس بستر راه بوده و برای تثبیت شیمیایی و زیستی به ترتیب از پلیمر جامد نیکوفلاک و بیوپلیمر بتاگلوکان استفاده شده و با انجام آزمایش (آزمایش‌های مدول برجهدگی در آزمایشگاه مرکزی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی و سایر آزمایش‌ها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران دانشگاه تبریز انجام شده است)، تأثیر هر کدام بر qu و MR بررسی گردیده و طرح بهینه اجرایی بر اساس هر یک از این دو پارامتر پیشنهاد شده است. سپس دقت مدل همبستگی تامسون در خاک تثبیت شده با هر ماده و تأثیر حالت تنش در آن بررسی شده است.

مصالح

خاک

در این تحقیق از خاک بستر آزادراه آمل - ساری در استان

اجزای تشکیل دهنده نیکوفلاک بر اساس اطلاعات تولید کننده و پس از کنترل مجدد آن در ایران (آزمایشگاه مرجع مرکزی دانشگاه علم و صنعت ایران) آمده است.

تثبیت زیستی

در تثبیت زیستی از محلول بتاگلوکان در آب مقطر به عنوان بیوپلیمر استفاده شد. بتاگلوکان‌ها، متشکل از منومرهای دی‌گلوکز و دارای پیوندهای گیلوساید بوده و در طبیعت در اشکال مختلف مثل سلول، سبوس، قارچ و باکتری یافت می‌شوند [19] و با ساختار شاخک‌دار و مارپیچی، پتانسیل بالایی جهت جذب و اتصال با مولکول‌ها از طریق پیوند هیدروژنی نشان می‌دهند [32]. پودر بتاگلوکان در شکل (۱) نشان داده شده است.

روش تثبیت آزمایشگاهی خاک برای نمونه‌گیری

تثبیت شیمیایی

ابتدا مثبت نیکوفلاک با مقادیر ۰/۳، ۰/۷ و ۱ درصد و سیمان پرتلند نوع دو (سیمان زنجان - تپ ۲ - ۴۲۵) با مقدار ثابت ۳ درصد (همگی نسبت به وزن خاک خشک) به ترتیب به خاک خشک اضافه و به خوبی ترکیب شدند تا مخلوط یکنواخت به دست آید و سپس اختلاط با آب مقطر انجام شد (شکل ۲ - الف).

مازندران ایران استفاده شد. طبق نتایج آزمایش دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ، این خاک بر اساس سیستم متحد، رس با حد روانی بالا (CH) طبقه‌بندی گردید. در جدول (۱) نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM آمده است.

جدول ۱ نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک

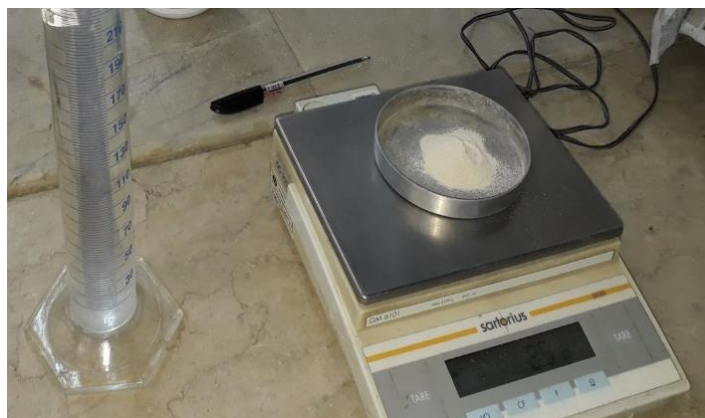
نوع خاک	CH
LL (%)	۵۳
PL (%)	۲۲
PI (%)	۳۱
Gs	۲/۶۱
$\gamma_{dmax} (g/cm^3)$	۱/۶۱
$\omega_{opt} (%)$	۱۹/۶

تثبیت شیمیایی

در تثبیت شیمیایی از پودر نیکوفلاک که یک ترکیب معدنی پلیمری است، به عنوان پلیمر جامد استفاده شد. هر واحد منومر در ساختار این پلیمر یک زنجیره طولانی داشته و از نوع شانه‌ای می‌باشد و معمولاً به همراه سیمان برای تثبیت خاک و تقویت آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد [15] و [31]. در جدول (۲)

جدول ۲ اجزای نیکوفلاک

SiO ₂	CaO	F	Na ₂ O	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	سایر
۴۵/۱۲	۳۷/۱۳	۴/۰۸	۲/۸۱	۲/۴۶	۱/۱۳	۱/۰۱	۰/۷۳	۵/۵۳



شکل ۱ پودر بتاگلوکان

آزمایش‌های انجام شده آزمایش تراکم (ASTMD698)

برای بررسی اثر تثبیت بر مشخصات تراکمی خاک مورد مطالعه، در تثبیت شیمیایی، پس از ترکیب خاک با سیمان و نیکوفلاک، در هر مرحله از آب مقطر استفاده شد. در تثبیت زیستی، محلول بتاگلوکان در هر مرحله به مقدار حساب شده به خاک خشک اضافه شده و آزمایش، گام به گام انجام شد. آزمایش تراکم برای هر نمونه با روش و دز مشخص، دو بار تکرار و در صورت کم بودن اختلاف نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (ASTMD2166)

برای سهولت خروج نمونه با حداقل دست‌خوردگی، از قالب دو تکه استفاده شد. نمونه‌ها پس از دوره‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بارگذاری گردیدند. برای بررسی تأثیر تثبیت بر خصوصیات شکل‌پذیری خاک، علاوه بر q_u ، مدول الاستیسیته سکانتی معادل ۵۰ درصد مقاومت ($E_{sec50\%}$) که به طور اختصار در این تحقیق با E نمایش داده می‌شود نیز تعیین شد. برای هر دز و دوره عمل‌آوری، دو نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و در صورت کم بودن اختلاف نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

آزمایش تعیین MR (AASHTOT307)

جهت تأمین داده‌های کافی برای بررسی روابط همبستگی، دوره‌های عمل‌آوری برای هر دز از مثبت، ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد (شکل ۳ - الف و ۳ - ب). طبق الگوی بارگذاری خاک بستر راه در استاندارد آشتو، نمونه پس از آماده‌سازی با هزار ضربه، تحت سه تنش همه جانبه با روند کاهشی قرار می‌گیرد. در هر کدام از آن‌ها با ۵ تنش سیکلی یا انحرافی با روند کاهشی به صورت جداگانه ۱۰۰ ضربه به نمونه وارد می‌گردد و میانگین مقادیر پنج ضربه آخر جهت محاسبه MR در هر حالت تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزئیات آزمایش آمده است (شکل ۳ - ج).



(الف)



(ب)

شکل ۲ نحوه آماده سازی نمونه‌ها: الف) نیکوفلاک و سیمان، ب) بتاگلوکان

تثبیت زیستی

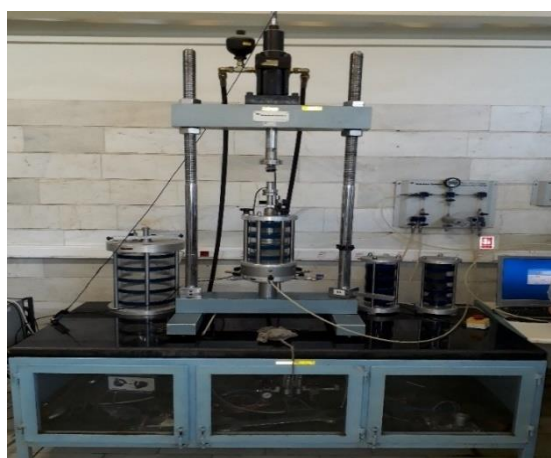
محلول بتاگلوکان پس از تهیه با غلظت‌های ۲، ۴ و ۸ گرم بر لیتر در آب مقطر و اطمینان از یکنواختی آن، به تدریج در چند مرحله به خاک خشک اضافه و عملیات اختلاط انجام شد (شکل ۲ - ب).



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳ (الف) ساخت و (ب) عمل‌آوری نمونه‌های آزمایش تعیین M_R و (ج) دستگاه آزمایش سه‌محوری دینامیکی (شرکت Wykham France)

جدول ۳ نتایج آزمایش تراکم

تثبیت زیستی			تثبیت شیمیایی			خاک تثبیت نشده	
۸ g/lit	۴ g/lit	۲ g/lit	۱٪	۰.۷٪	۰.۳٪		
۱/۵۳	۱/۵۲	۱/۵۱	۱/۵۷	۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۶۱	$\gamma_{d \max} (g/cm^3)$
۲۵/۵	۲۵	۲۲	۲۳	۲۵	۲۱	۱۹/۶	$\omega_{opt} (\%)$

کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می‌شود [33] ولی با افزایش درصد نیکوفلاک به بالاترین مقدار، این روند متوقف شد و رطوبت بهینه تا حدودی کاهش یافت که این امر می‌تواند به علت افزایش تأثیر خصوصیات آب‌گریزی ذرات نیکوفلاک در این حالت باشد [34]. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش شیمیایی در شکل (۴) نشان داده شده است.

تحلیل نتایج

آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم در جدول (۳) آمده است.

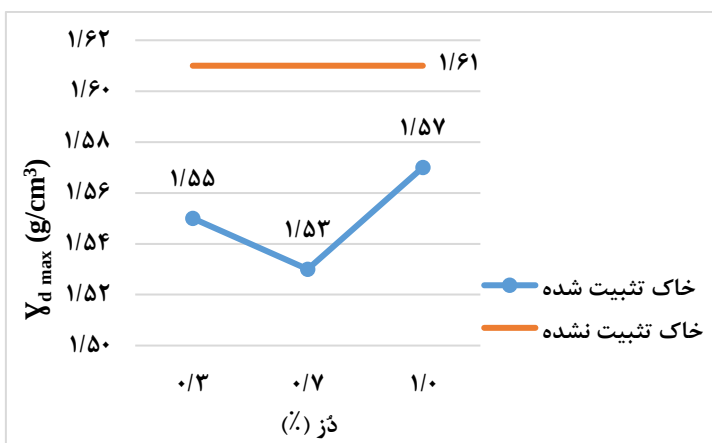
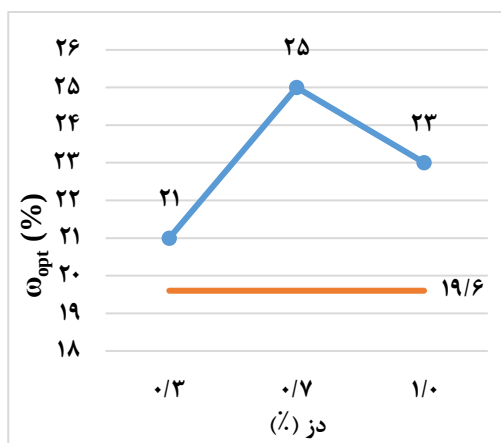
تثبیت شیمیایی

به طور کلی تثبیت خاک رس با مثبت‌های با پایه کلسیم مثل نیکوفلاک و سیمان به دلایلی از جمله تجمع ذرات در فضاهای بزرگ‌تر، وزن مخصوص کم مثبت و واکنش پوزولانی موجب

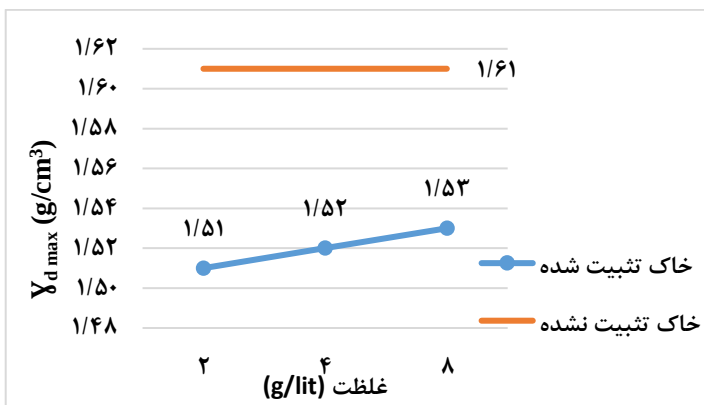
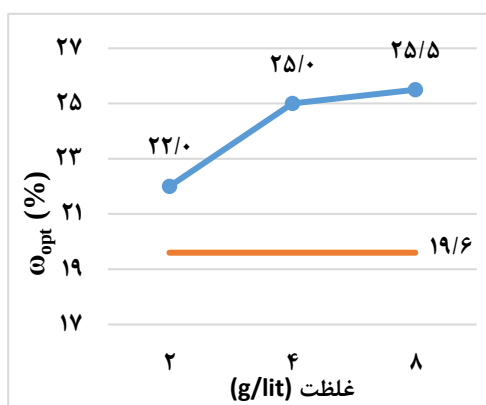
تثبیت زیستی

رطوبت بهینه با افزایش غلظت بتاگلوکان، مطابق نتایج تحقیقات منبع ۳۲، افزایش یافت. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش زیستی در شکل (۵) نشان داده شده است.

بتاگلوکان جاذب آب بوده و چگالی آن کمتر از خاک می باشد. بنابراین تجمع فیبرهای بتاگلوکان با دانسیته کم موجب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص حداکثر خاک شد.



شکل ۴ نتایج آزمایش تراکم در تثبیت شیمیایی خاک (نیکوفلاک)



شکل ۵ نتایج آزمایش تراکم در تثبیت زیستی خاک (بتاگلوکان)

جدول ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (q_u) برای خاک تثبیت شده (MPa)

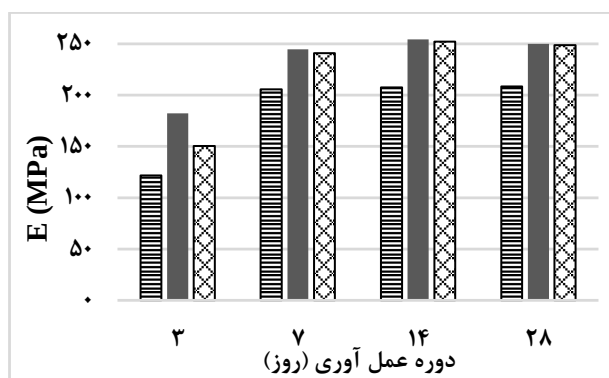
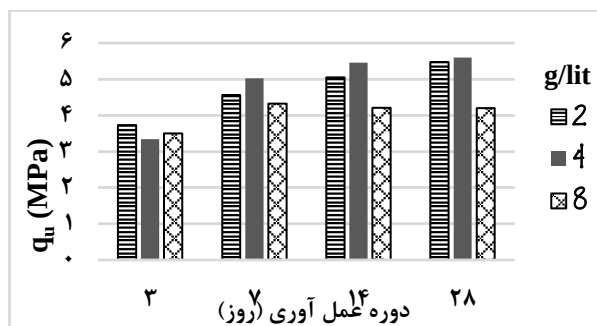
سه روزه		هفت روزه		چهارده روزه		بیست و هشت روزه			
q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}		
۱/۹۲	۱۲۹/۱۷	۲/۳۲	۱۹۹/۲۷	۲/۹۶	۱۹۶/۶۷	۳/۴۳	۱۹۷/۶۲	شیمیایی	% ۰/۳
۳/۳۳	۱۴۴/۱۴	۳/۶۲	۱۴۴/۸	۴/۰۷	۱۴۹/۲۱	۴/۳۱	۱۶۰/۰۴		% ۰/۷
۳/۱۵	۱۳۱/۴۶	۴/۳۲	۲۰۲/۵۸	۴/۶۱	۲۰۰/۵۷	۴/۹۴	۲۰۲/۶		% ۱
۲/۷۳	۱۲۱/۸	۴/۵۶	۲۰۵/۶	۵/۰۵	۲۰۷/۵۸	۵/۴۸	۲۰۸/۴۲	زیستی	۲ g/lit
۳/۳۴	۱۸۲/۴۲	۵/۰۲	۲۴۴/۶۵	۵/۴۶	۲۵۴/۵	۵/۶	۲۵۰/۱		۴ g/lit
۳/۵	۱۵۰/۴۱	۴/۳۲	۲۴۱/۰۵	۴/۲۱	۲۵۲/۰۴	۴/۲	۲۴۸/۸		۸ g/lit

مقاومت فشاری تک محوری (q_u)

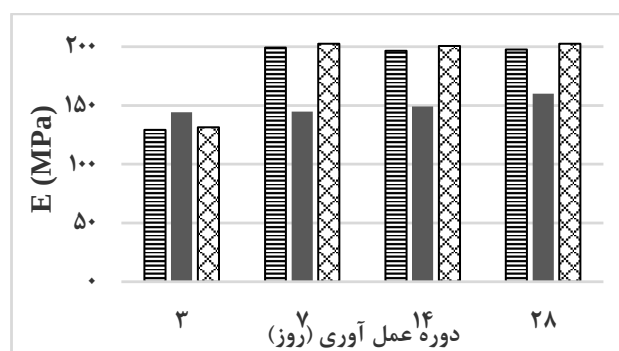
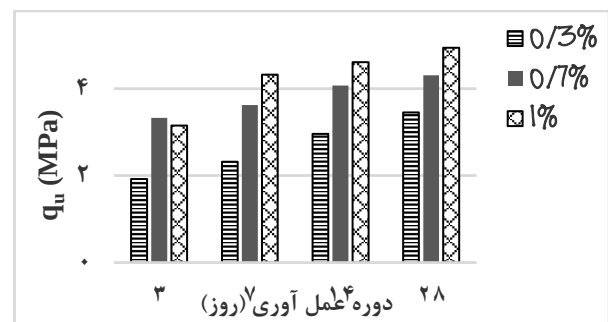
q_u و E خاک تثبیت نشده به ترتیب ۰/۵۷ و ۳۶/۲۸ مگاپاسکال حاصل شد. نتایج خاک تثبیت شده به روش شیمیایی و زیستی در جدول (۴) آمده است.

تثبیت شیمیایی

q_u نمونه‌ها با افزایش درصد نیکوفلاک افزایش یافت. این امر ناشی از تأثیر مستقیم نیکوفلاک در چسبندگی و همچنین تأثیر آن در بهبود عملکرد سیمان در تثبیت خاک می‌باشد. روند افزایش q_u و E تا ۷ روز سریع بود و بعد از آن کند شد. بالاترین مقاومت در میزان یک درصد و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به میزان ۴/۹۴ مگاپاسکال حاصل شد. E در این حالت ۲۰۲/۶ مگاپاسکال است. از آنجا که در این میزان، q_u و E چهارده روزه و بیست و هشت روزه از نظر الزامات طراحی، تفاوت قابل توجهی ندارند برای صرفه‌جویی در زمان اجرای پروژه، بر اساس معیار q_u ، میزان یک درصد مثبت و دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد. در نمودارهای شکل (۶) مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی بر حسب دوره عمل‌آوری و در درصدهای مختلف پلیمر مقایسه شده‌اند.

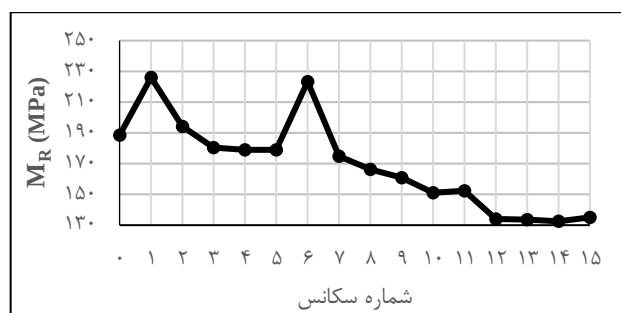


شکل ۷ مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت زیستی در غلظت‌های مختلف محلول بتاگلوکان

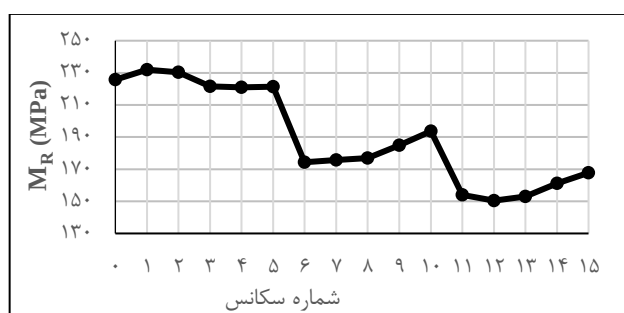


شکل ۶ مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی در درصدهای مختلف نیکوفلاک

۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد که مشابه حالت بهینه با معیار q_u می باشد.

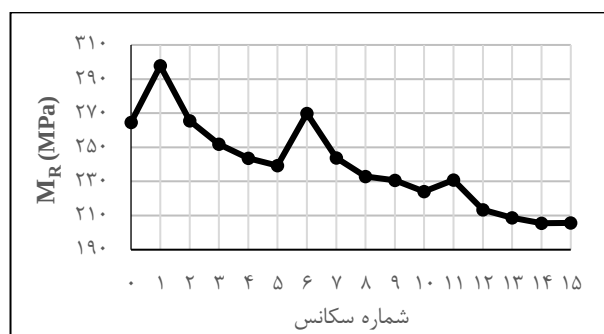


(الف)

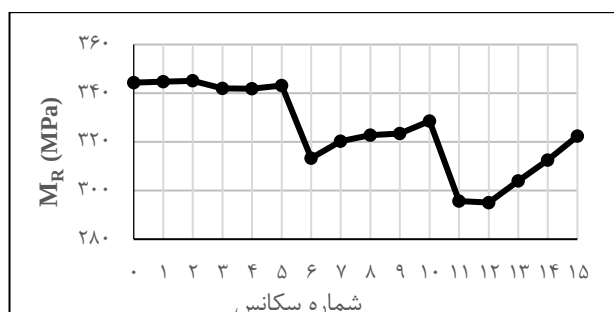


(ب)

شکل ۸ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۰/۳ درصد نیکوفلاک در دوره های عمل آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه



(الف)



(ب)

شکل ۹ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۰/۷ درصد نیکوفلاک در دوره های عمل آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

آزمایش تعیین M_R

الگوی بارگذاری خاک بستر به همراه نتایج M_R خاک تثبیت نشده در جدول (۳) آمده است. حالت واقعی تنش سیکنی و محدود کننده (Confining Pressure) در بهره برداری، بین سکانس ۱ (S_1) و سکانس ۲ (S_2) آزمایش می باشد. بنابراین میانگین این دو مقدار به عنوان M_R طراحی در هر حالت در نظر گرفته شد.

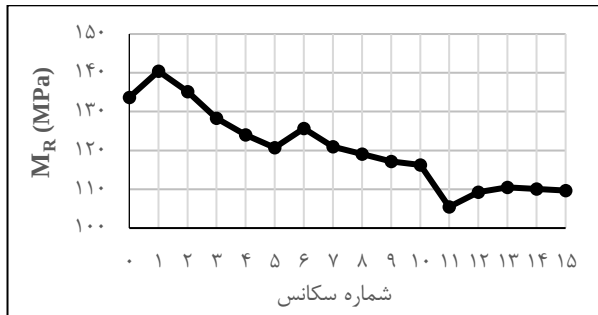
جدول ۵ M_R خاک تثبیت نشده تحت الگوی بارگذاری بستر (AASHTO T307)

M_R	تنش سیکنی	فشار محدود	سکانس
MPa	kPa	kPa	شماره
-	۲۴/۸	۴۱/۴	۰
۹۴/۳۹	۱۲/۴	۴۱/۴	۱
۹۱/۲۵	۲۴/۸		۲
۸۶/۹۲	۳۷/۳		۳
۸۶/۰۷	۴۹/۷		۴
۸۳/۱۲	۶۲		۵
۸۸/۰۶	۱۲/۴	۲۷/۶	۶
۸۴/۹۱	۲۴/۸		۷
۸۲/۹۰	۳۷/۳		۸
۷۹/۶۳	۴۹/۷		۹
۷۷/۲۰	۶۲		۱۰
۷۹/۸۳	۱۲/۴	۱۳/۸	۱۱
۷۰/۰۱	۲۴/۸		۱۲
۶۹/۸۸	۳۷/۳		۱۳
۷۰/۸۰	۴۹/۷		۱۴
۷۰/۸۴	۶۲		۱۵

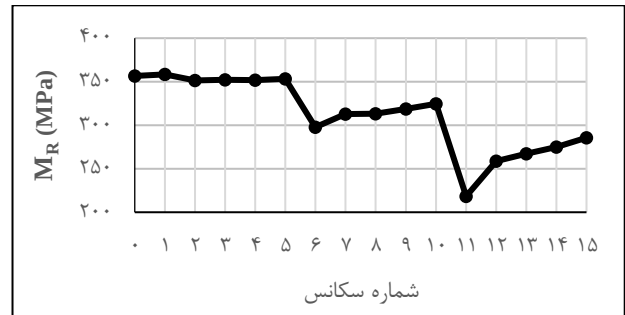
نتایج آزمایش تعیین M_R خاک تثبیت شده در نمودارهای شکل های (۸) تا (۱۳) نمایش داده شده است.

تثبیت شیمیایی

تثبیت شیمیایی با نیکوفلاک، M_R را افزایش داد. روند افزایشی با بالا رفتن درصد نیکوفلاک و تأثیر آن در بهبود عملکرد سیمان و اتصال دانه ها ادامه یافت. سرعت افزایش مقدار M_R در ۱۴ روز اول عمل آوری بالاتر است. بیشترین مقدار M_R طراحی در میزان افزودنی یک درصد و دوره عمل آوری ۲۸ روزه به میزان ۳۵۸ مگاپاسکال حاصل شد. با توجه به نزدیک بودن نتایج و الزامات طراحی و اجرایی، مقدار افزودنی یک درصد با دوره عمل آوری



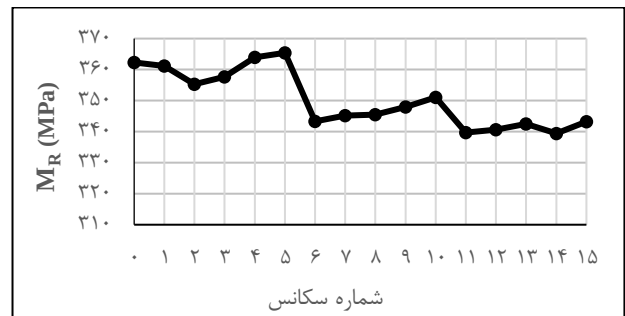
(الف)



(الف)



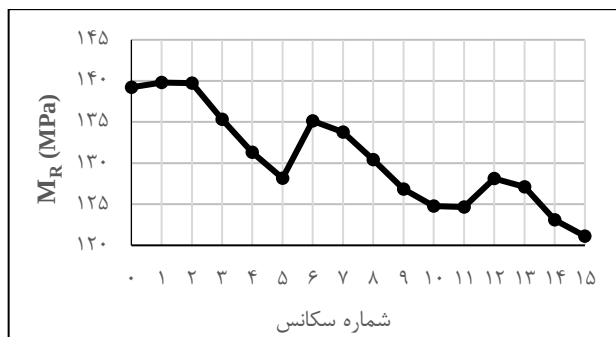
(ب)



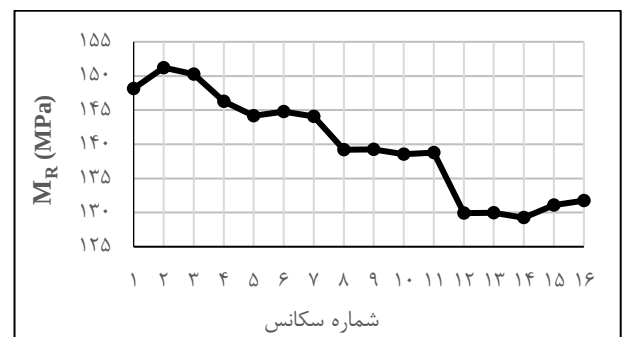
(ب)

شکل ۱۲ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۴ گرم برلیتر بتاگلوکان در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

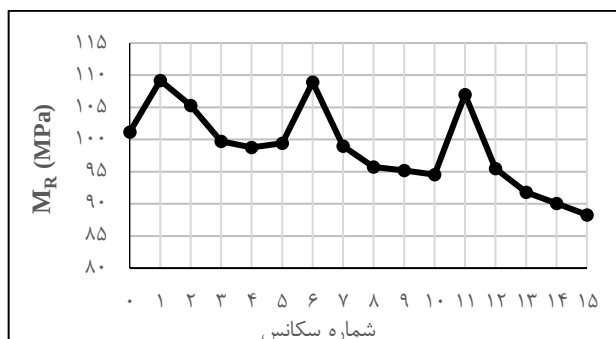
شکل ۱۰ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۱ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه



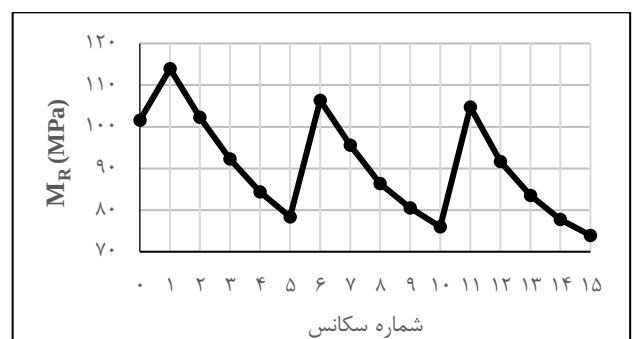
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

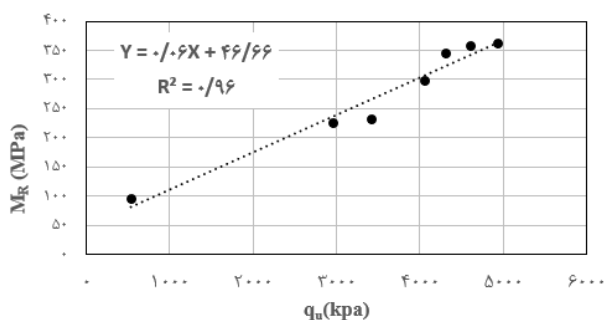
شکل ۱۳ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۸ گرم بر لیتر بتاگلوکان در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

شکل ۱۱ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۲ گرم برلیتر بتاگلوکان در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

در شکل (۱۵) آمده است. ردیف اول مربوط به نتایج خاک تثبیت نشده می باشد.

جدول ۶ مشخصات خاک تثبیت شده به روش شیمیایی جهت ارزیابی مدل تامسون در S1

دز	دوره عمل آوری	q_u	M_R
%	روز	kPa	MPa
-	-	۵۴۰	۹۴/۳
۰/۳	۱۴	۲۹۵۷	۲۲۶
	۲۸	۳۴۳۰	۲۳۱/۹۶
۰/۷	۱۴	۴۰۶۹	۲۹۷/۷۸
	۲۸	۴۳۱۲	۳۴۴/۷۱
۱	۱۴	۴۶۰۶	۳۵۸/۳۷
	۲۸	۴۹۳۶	۳۶۱/۱



شکل ۱۵ ارزیابی دقت مدل تامسون در تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی در S1

سایر نتایج به همراه دقت همبستگی برای نتایج M_R طراحی حاصل از آزمایش تعریف شد، در جدول (۷) آمده است. داده های تحلیل نشان می دهد که به غیر از S11 در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، دقیق ترین برآزش در هر تنش همه جانبه، در کمترین تنش انحرافی ملاحظه می شود. بنابراین با افزایش تنش انحرافی از دقت مدل در تخمین M_R طراحی بر اساس q_u کاسته می شود. بر خلاف خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، مدل تامسون برای خاک تثبیت شده با بتا گلوکان از دقت کافی برخوردار نیست. دقت مدل در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک حساسیت بیشتری نسبت به تغییر تنش همه جانبه نشان می دهد و در محدوده S1 تا S5 که عمده ترین حالات واقعی تنش در راه های اصلی و بزرگراه ها را شامل می شود بالاترین دقت را دارد. در شکل (۱۶) نتایج M_R حاصل از آزمایش و مدل تامسون خاک تثبیت شده به روش شیمیایی، در این محدوده مقایسه شده اند.

تثبیت زیستی

مشابه روند آزمایش M_R, q_u تا غلظت ۴ گرم بر لیتر افزایش یافت و پس از آن تا غلظت ۸ گرم بر لیتر تغییر چندانی نداشت و حتی از ۱۴ روز به بعد کاهش یافت. به دلایلی که در بخش بیان شد، در غلظت ۸ گرم بر لیتر بر روی بدنه نمونه ها قارچ و فرسایش ملاحظه شد (شکل ۱۴). بیشترین مقدار M_R طراحی در غلظت ۴ گرم بر لیتر و دوره ۲۸ روزه به میزان ۱۵۴/۵ مگاپاسکال حاصل شد ولی با توجه به نزدیک بودن نتایج، الزامات طراحی و اجرایی و هزینه تهیه مثبت بیوپلیمر، غلظت ۲ گرم بر لیتر با دوره عمل - آوری ۲۸ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب می شوند.



شکل ۱۴ نمونه تثبیت شده به روش زیستی با غلظت ۸ گرم بر لیتر محلول بتاگلوکان

ارزیابی دقت مدل تامسون در تخمین M_R خاک مورد مطالعه

رابطه (۱) مدل تامسون را بیان می کند:

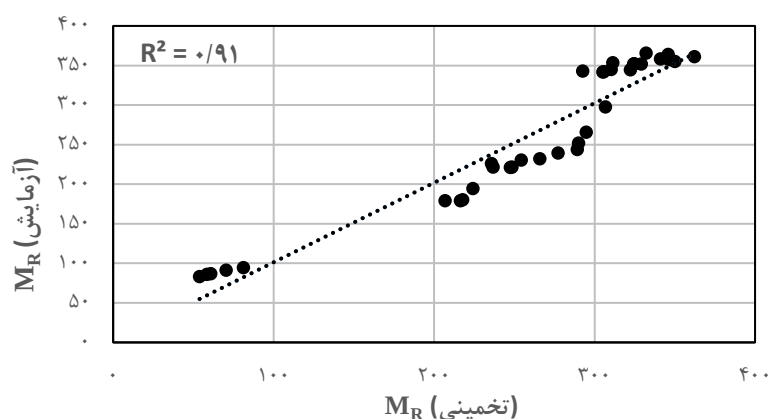
$$M_R = a \cdot q_u + b \quad (1)$$

که در آن a و b اعداد ثابت هستند.

در این مدل، M_R با یک رابطه خطی با q_u همبستگی دارد. برای ارزیابی این رابطه در حالت های مختلف تنش (سکانس های مختلف آزمایش M_R)، داده های دو دوره عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه در دزهای سه گانه مثبت نیوفلاک و بتاگلوکان آمده، در نظر گرفته شد. بنابراین برای تحلیل پراکندگی مدل تامسون در خاک تثبیت شده با هر یک از مثبت ها، برای هر حالت تنش در سکانس های ۱۵ گانه، ۷ داده موجود می باشد. به عنوان مثال نتیجه تحلیل داده های نیکوفلاک در S1، بر اساس اطلاعات جدول (۶)

جدول ۷ دقت مدل تامسون (R^2) در تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی و زیستی

S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	شیمیایی
۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۶	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	
۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۸۶	زیستی
S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	
۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۳	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۶۱	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	زیستی
۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۶	۰/۳۵	۰/۳۷	

شکل ۱۶ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و تخمینی M_R (مدل تامسون) خاک تثبیت شده به روش شیمیایی (نیکوفلاک) در محدوده S1 تا S5جدول ۸ دقت رابطه خطی همبستگی M_R و E در حالت‌های مختلف تنش

S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	شیمیایی
۰/۳۹	۰/۴	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۵	۰/۵۴	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	
۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۴	۰/۴	زیستی
S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	
۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۳	۰/۳۶	۰/۴۵	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	زیستی
۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۳	

ارزیابی دقت همبستگی بین M_R و E در خاک مورد مطالعه

با وجود ماهیت مشابه، همبستگی بین M_R و E در منابع و تحقیقات معتبر بررسی نشده ولی با توجه به وجود روابط معتبر همبستگی بین q_u و E برای خاک تثبیت شده لایه‌های روسازی [1] و با در نظر گرفتن مدل خطی رابطه (۱)، همبستگی بین این دو پارامتر با توجه به نتایج آزمایش‌ها به روشی مشابه تحلیل

گردید که نتایج آن در جدول (۸) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تخمین M_R با E در خاک مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد.

با تحلیل پراکندگی داده‌ها طبق شکل (۱۷) در کارهای با اهمیت کم می‌توان بازه‌ای برای تخمین M_R خاک تثبیت شده با نیکوفلاک و بتاگلکان با تعیین E خاک در نظر گرفت که دامنه بازه در بتاگلکان کمتر از نیکوفلاک می‌باشد.

می شود. در تثبیت زیستی با بتاگلوکان، بهترین نتایج در غلظت ۴ گرم بر لیتر به دست آمده و در غلظت ۸ گرم بر لیتر، شاخص های مقاومتی و سختی خاک به خصوص از دوره ۷ روز به بعد به دلیل افزایش کلونی های فیبر ترکیب نشده با دانه های رس که بعضا به صورت قارچ و فرسایش در بدنه این نمونه ها قابل مشاهده هست، کاهش می یابد.

۳. برخلاف نتایج نزدیک در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، نیکوفلاک M_R خاک را بیش از بتاگلوکان افزایش می دهد که سرعت افزایش آن در هر دو مثبت در دوره ابتدایی عمل آوری (۱۴ روزه) بیشتر است و بعد از آن کند می شود. در غلظت ۸ گرم بر لیتر بتاگلوکان، به خصوص از دوره ۱۴ روز به بعد، M_R خاک کاهش می یابد.

۴. مدل تامسون برای تخمین M_R خاک تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب است و برای بتاگلوکان از دقت کافی برخوردار نیست. در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، بالاترین دقت مدل در محدوده S_1 تا S_5 که محدوده حالت تنش بهره برداری اغلب راه های اصلی و بزرگراه ها است، به دست آمد. بنابراین استفاده از این مدل برای تخمین M_R خاک رس تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب می باشد.

۵. تخمین M_R خاک تثبیت شده با استفاده از مدل خطی رابطه همبستگی با E ، نتایج دقیقی ندارد ولی در کارهای با اهمیت کم می توان یک بازه بر اساس این مدل به کار برد که استفاده از آن در خاک تثبیت شده با بتاگلوکان مناسب تر است.

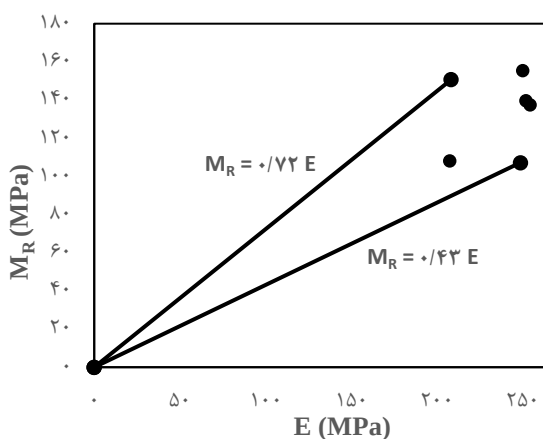
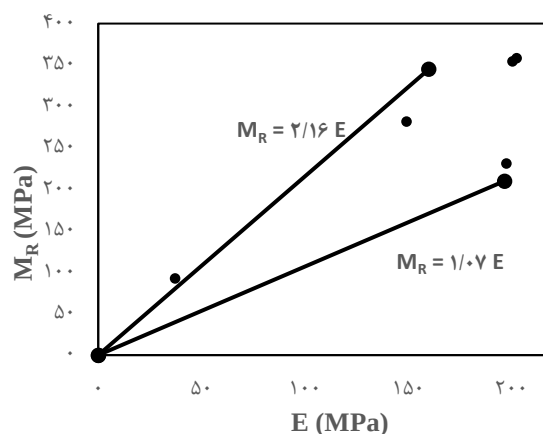
۶. با توجه به نتایج به دست آمده، در صورت اولویت مزیت های اجرایی (زمان و هزینه)، تثبیت شیمیایی با نیکوفلاک و در صورت اولویت مزیت های زیست محیطی، تثبیت زیستی با بیوپلیمر مناسب می باشد.

تشکر و قدردانی

از همکاری مدیران و متخصصان محترم آزمایشگاه مرکزی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی، به ویژه آقایان مهندس علی محمد اسمعیلی و مهندس حبیب جولانی و سرکار خانم مهندس شهربانو مقدسی، نهایت قدردانی به عمل می آید.

فهرست علائم

q_u مقاومت فشاری تک محوری، kg/cm^2



شکل ۱۷ بازه تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی (نیکوفلاک) و زیستی (بتاگلوکان) با E در کارهای با اهمیت کم

نتیجه گیری

تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس ضعیف بستر، جهت اجتناب از جابه جایی و جایگزینی با استفاده از پلیمر نیکوفلاک و بیوپلیمر بتاگلوکان قابل انجام است. از تحقیقات انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

۱. تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس باعث کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه می شود که این امر در تثبیت شیمیایی بیشتر به دلیل واکنش های پوزولانی و در تثبیت زیستی به دلیل تجمع فیبرهای سبک در ساختار خاک می باشد. در تثبیت شیمیایی با افزایش وزن نیکوفلاک به ۱ درصد، رطوبت بهینه به دلیل تأثیر خصوصیات آب گریزی پلیمر، مجددا کاهش پیدا کرده و وزن مخصوص حداکثر افزایش می یابد.

۲. نیکوفلاک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را افزایش می دهد که روند آن در ۷ روز اول سریع است بعد از آن کند

S_n	سکانس n ام	E	مدول الاستیسیته سکانتی kg/cm^2 ، ۵۰٪
R^2	دقت تحلیل پراکندگی (رگرسیون)	CH	رس با حد روانی بالا
		PI و PL، LL	حدود اتبرگ، %
	سیاسگزاری	Gs	چگالی جامد دانه‌های خاک
		ω_{opt}	رطوبت بهینه، %
		$\gamma_{d \max}$	وزن مخصوص حداکثر، g/cm^3

مراجع

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice*, 2008.
- [2] A. Yousefi, W.M. Hasan, A. Saghai, P. Ayar, M. Ameri, "Evaluation of mechanical properties of asphalt mixtures containing anti-stripping additives of GRIPPER® L, TeraGrip and WETMUL-95," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 31-34, 2021. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jfeci.2022.72939.1070>
- [3] M.J. Qazizadeh, A. Kavussi, A.A. Sadeghi, H. Farhad, "Development of Fatigue Predictive Models for Asphalt Concrete Mixes Containing Electric Arc Furnace Steel Slag Based on Fracture Energy Concept," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 17-34, 2019. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v32i2.66310>
- [4] M. Arm, "Variation in deformation properties of processed MSWI bottom ash: results from triaxial tests," *Waste Management*, vol. 24, no. 10, pp. 1035-1042, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.07.013>
- [5] E.O. Tastan, T.B. Edil, C.H. Benson, A.H. Aydilek, "Stabilization of organic soils with fly ash," *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 137, no. 9, pp. 819-833, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000502](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502)
- [6] A. Ardah, Q. Chen, M. Abu-Farsakh, "Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements," *Transportation Geotechnics*, vol. 11, pp. 107-119, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.05.002>
- [7] S. Bhuvaneshwari, R. Robinson, S. Gandhi, "Resilient modulus of lime treated expansive soil," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 305-315, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0610-z>
- [8] N. Pishvaei, M.J. Sharahi, M. Amelsakhi, "Laboratory Investigating into the Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 85-96, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jfeci.2023.74674.1112>
- [9] P. Kolay, A. Pant, V. Puri, S. Kumar, "Effect of Liquid Polymer Stabilizer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soil," *In Indian Geotechnical Conference*, 2016, pp. 15-17.
- [10] G.H. Hamdi, "Evaluation the Effect of Polyvinyl Chloride on Moisture Sensitivity of HMA," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, 2019. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/civil.v32i2.65335>
- [11] W. Miller, R. Willis, G. Levy, "Aggregate stabilization in kaolinitic soils by low rates of anionic polyacrylamide," *Soil use and management*, vol. 14, no. 2, pp. 101-105, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1998.tb00623.x>
- [12] T. Zhang, Y. Deng, H. Lan, F. Zhang, H. Zhang, C. Wang, Y. Tan, R. Yu, "Experimental Investigation of the

- Compactability and Cracking Behavior of Polyacrylamide-Treated Saline Soil in Gansu Province,” *China Polymers*, vol. 11, no. 1, p. 90, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11010090>
- [13] W.J. Orts, A. Roa-Espinosa, R.E. Sojka, G.M. Glenn, S.H. Imam, K. Erlacher, J.S. Pedersen, “Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications,” *Journal of materials in civil engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 58-66, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(58))
- [14] D. Yongfeng, L. Songyu, H. Jian'an, L. Kan, D. Yanjun, J. Fei, “Strength and permeability of cemented soil with PAM,” *Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*, 2012, pp. 1800-1807. <https://doi.org/10.1061/9780784412350.0155>
- [15] A.M. Gridchin, S. Zlotykh, “PMC Nicoflok research effect as mechanochemical activator on the cement characteristic used,” *Bulletin of Belgorod State Technological University Named. After V. G. Shukhov*, vol. 5, no. 8, 2018. https://doi.org/10.12737/article_5af5a72640c9f7.36216170
- [16] I. Gavrilina, A. Bondar, “Analysis of using nicoflok polymer-mineral additive for replacing stone materials as road bases,” *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 451, 2018, pp. 26-28. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012086>
- [17] P. Kolay, B. Dhakal, “Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, pp. 2479-2491, 2020. doi.org/10.1007/s10706-019-01163-x
- [18] K. Chiet, K. Kassim, K. Chen, U. Martula, C. Yah, A. Arefnia, Effect of Reagents Concentration on Biocementation of Tropical Residual Soil,” *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 136, 2015, pp. 27-29. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/136/1/012030>
- [19] I. Chang, J. Im, G.-C. Cho, “Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering,” *Sustainability*, vol. 8, no. 3, p. 251, 2016. <https://doi.org/10.3390/su8030251>
- [20] R.S. Dassanayake, S. Acharya, N. Abidi, “Biopolymer-based materials from polysaccharides: Properties, processing, characterization and sorption applications,” *Advanced Sorption Process Applications*, ch. 1, 2018. [10.5772/intechopen.80898](https://doi.org/10.5772/intechopen.80898)
- [21] K. Van de Velde, P. Kiekens, “Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications,” *Polymer testing*, vol. 21, no. 4, pp. 433-442, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00107-6)
- [22] K. Khayat, A. Yahia, “Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout,” *ACI Materials Journal*, vol. 94, no. 5, pp. 365-372, 1997.
- [23] D.M. Cole, D.B. Ringelberg, C.M. Reynolds, “Small-scale mechanical properties of biopolymers,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, vol. 138, no. 9, pp. 1063-1074, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000680](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000680)
- [24] W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, “Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review,” *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 118-136, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>

- [25] Z.B. Ebrahimialavijeh Bahareh, Mokhtari Maryam, "Investigation of the effect of Polypropylene Fibers on compression strength and tensile strength of organic soil stabilized with lime and Xanthan-Gum biopolymer," *AUT Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 1853-1870, 2021. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17185.6490>
- [26] A. Dione, M. Fall, Y. Berthaud, F. Benboudjama, A. Michou, "Implementation of Resilient Modulus-CBR relationship in Mechanistic Pavement Design," *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, vol. 1, no. 2, pp. 65-71, 2014.
- [27] V.E. UZ, M. Saltan, İ. GÖKALP, "Comparison of DCP, CBR, and RLT test results for granular pavement materials and subgrade with structural perspective," *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2015.
- [28] B.R. Christopher, C.W. Schwartz, R. Boudreaux, R.R. Berg, *Geotechnical aspects of pavements Reference Manual*, United States. Federal Highway Administration, 2006.
- [29] N. Toohey, M. Mooney, R. Bearce, "Relationship between resilient modulus and unconfined compressive strength for lime-stabilized soils," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 139, no. 11, pp. 1982-1985, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000925)
- [30] D.-W. Park, H.V. Vo, Y. Lim, "Recycling of Dredged Soil Waste Using Air-foam Stabilization Method as Highway Construction Material," *Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure*, 2014. <https://doi.org/10.1061/9780784478455.006>
- [31] A.V. Khruleva, G.I. Sobko, Application of Innovative Technologies in the Construction of Highways by the Stabilized Soils (Experience of the Nizhny Novgorod Region), *Main Direction of Highway-Nizhny Novagorod Region-Russian*, 2012. Available: <http://www.guad.nnov.ru/?id=2936>
- [32] I. Chang, G.-C. Cho, "Geotechnical behavior of a beta-1, 3/1, 6-glucan biopolymer-treated residual soil," *Geomechanics and Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 633-647, 2014. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.6.633>
- [33] J.R. Prusinski, S. Bhattacharja, "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils," *Transportation research record*, vol. 1652, no. 1, pp. 215-227, 1999. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
- [34] F. Rezaie Moghaddam, B. Jafari Nader, T. Rezaie Moghaddam, "Laboratory Investigation of the Effect of "NICOFLOK" Polymer on the Compressive and Tensile Strength of Desert and Coastal Sand at the pavement Layers," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 733-748, 2021. <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16612.6288>



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Investigating the Effect of Trust among Key Stakeholders on the Success of Iranian Construction Projects

Research Article

Majid Parchamijalal¹ , Mina Alamdar²

DOI: [10.22067/jfcei.2025.89894.1321](https://doi.org/10.22067/jfcei.2025.89894.1321)

1- Introduction

The construction industry is regarded as one of the most vital engines of the national economy in any country. It also plays a significant role in enhancing individuals' quality of life. In this sector, project success is crucial, as it positively influences the economic growth of nations. However, construction projects often fail to meet predetermined benchmarks in terms of time, cost, and quality.

The performance of project management in any construction endeavor inherently depends on the actions of individuals who collectively interact as a project team. Since these interactions occur at the human level, the concept of "**trust**" becomes fundamentally significant. Research has shown that low levels of trust among project team members lead to poor project performance.

Civil projects are at the core of a country's economic development. Evidently, the execution of these projects plays a pivotal role in national economies. Due to the dynamic nature of the construction industry, projects constantly face uncertainties, making project management challenging and often resulting in subpar performance.

Although extensive research has been conducted on the factors contributing to "project success," numerous studies indicate that many projects still fail. Some empirical studies suggest that these failures may stem from inefficiencies in human-related **success** factors, including weak collaboration and a lack of trust within the project team.

Despite the significant impact of trust on project success, existing project management research has paid relatively little attention to this concept compared to traditional topics such as cost and quality management. Therefore, this study aims to explore the role of trust among key stakeholders in the construction industry—consultants, contractors, and clients—in achieving successful project outcomes.

2-Research Methodology

This research is an applied study based on its objective, as it aims to provide a structural equations model and explain concepts in real conditions, striving to present optimal models to develop and improve the success of construction projects.

To this end, a comprehensive review of the previous literature was conducted to identify trust indicators (35 items) and project success criteria (15 items). With the guidance of experts and the Delphi method, 15 trust indicators and 10 project success criteria (optimal indicators and criteria) were selected, and a conceptual model of the relationship between them was constructed using structural equations modeling, with calculations performed using SMART.PLS software.

Initially, after reviewing previous studies and finalizing the number of trust indicators and project success criteria, a questionnaire consisting of three sections (personal information, trust indicators, and project success criteria) was designed. The design and content validity index (CVI) was calculated, with all questions scoring above 0.75, indicating the content validity of the questionnaire.

Following the finalization of the questionnaire, the sample size was determined using Cochran's formula, and based on an unlimited statistical population including consultants, contractors, and clients in Iran's construction industry with a 10% allowable error rate, 96 cases were determined. The questionnaire was then completed by experts in Tehran through in-person and remote methods, such as social media and email.

After collecting the questionnaires, structural equations modeling was prepared and analyzed using Smart PLS software.

In general, structural equations modeling is a statistical method for validating the conceptual model of research. The researcher must first identify various factors forming the phenomenon under study. Then, based on existing theoretical foundations, hypothesize relationships between

* Manuscript received September 20, 2024, Revised November 25, 2024, Accepted March 3, 2025.

¹ Associate Professor, Department of project and construction management, University of Tehran.

Email: parchamijalal@ut.ac.ir

² M.Sc. Project and construction management, University of Tehran Fine Arts Campus

factors and identify a number of items to measure for each factor. After hypothesizing and drawing the initial conceptual model, this model should be implemented in the SMART PLS or LISREL software environment.

In structural equations modeling, statistical concepts such as variance and covariance are used as criteria for measuring the dispersion or dependency between variables. The main application of this technique is in multivariate discussions that cannot be conducted in a bivariate manner (single independent and dependent variable).

Finally, using the structural equations model, the conceptual model can be validated. The structural equations modeling method is not used for model construction but for model evaluation and validation. The researcher must draw an initial model and then use this method to validate the model.

3-Results

The results of this study indicate a strong positive relationship between trust among key stakeholders of Iran's construction projects and project success. The results also show that the criterion of honesty, with a factor loading of 0.888, has the highest share, and the emotional bond criterion, meaning having an emotional connection between partners like ethnic ties, kinship, friendship, etc., with a factor loading of 0.527, has the lowest share in explaining the trust construct.

Other main findings of this research are as follows:

- The findings of this quantitative study support the research hypothesis, showing a significant positive relationship between trust among key stakeholders in the construction industry (consultant, contractor, client) and project success.
- The path coefficient (regression coefficient in standard state) indicating the relationship between trust and project success is 0.695, and the T Value is 16.865, showing a strong positive relationship between trust among key project stakeholders and project success in Iran (if the T number is greater than 1.64, 1.96, or 2.58, it indicates the validity of the relationship between constructs and, as a result, confirms the research hypotheses at confidence levels of 90%, 95%, and 99% respectively).
- The criterion of honesty, with a factor loading of 0.888, plays the highest role in explaining the trust construct in Iran's construction projects. This means that stakeholders believe that honesty in a partner can have the greatest impact on building trust.
- The criterion of emotional bond, meaning having an emotional connection between partners like ethnic ties, kinship, friendship, spatial proximity, etc., with a factor loading of 0.527, plays the lowest role in explaining the trust construct (Table 7). In other words, although ethnic or local ties are factors that increase trust in a construction project, they have a lesser weight compared to other trust indicators.
- According to experts, there is a direct relationship between keeping promises in contracts and reducing disputes, and even reducing costs and increasing quality, because the contractor feels obligated to

adhere to the quality mentioned in the contract without the presence of supervisory factors and to carry out the work according to the schedule and specified quality and cost, avoiding unauthorized delays. The client, by being endowed with this ethical quality, feels obligated to pay the invoice amounts on time and adhere to other commitments, including oral instructions issued by them. Therefore, these factors definitely lead to increased trust and project success.



بررسی تأثیر اعتماد بین ذی‌نفعان کلیدی، بر موفقیت پروژه‌های ساخت ایران*

مقاله پژوهشی

مینا علمدار^(۲)

مجید پارچمی‌جلال^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2025.89894.1321

چکیده با وجود تأثیری که اعتماد بر موفقیت پروژه‌ها دارد، در تحقیقات موجود مدیریت پروژه، به مفهوم اعتماد نسبت به موضوعات سنتی مدیریت پروژه مانند مدیریت هزینه و کیفیت توجه کمی شده است. لذا هدف این پژوهش بررسی نقش وجود اعتماد در بین ذی‌نفعان کلیدی صنعت ساخت (مشاور، پیمانکار، کارفرما) بر موفقیت پروژه‌های این حوزه می‌باشد. برای این منظور در ابتدا با مروری جامع بر ادبیات پیشین، شاخصه‌های اعتماد (۳۵ مورد) و معیارهای موفقیت پروژه (۱۵ مورد) شناسایی و با استفاده از نظر خبرگان و روش دلفی ۱۵ شاخصه اعتماد و ۱۰ معیار موفقیت پروژه‌های ساخت‌وساز (شاخصه‌ها و معیارهای بهینه) انتخاب و با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری، مدل مفهومی ارتباط بین آن‌ها ساخته و با استفاده از نرم‌افزار SMART.PLS محاسبات مربوط انجام شد. نتایج بیانگر این حقیقت است که بین وجود اعتماد در بین ذی‌نفعان کلیدی پروژه‌های صنعت ساخت‌وساز ایران و موفقیت پروژه به طور مثبت رابطه‌ای قوی وجود دارد. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد معیار صداقت با داشتن بار عاملی ۰/۸۸۸، بیشترین سهم و معیار پیوند عاطفی که به معنای داشتن ارتباط عاطفی بین شرکا مانند پیوند قومیتی، خویشاوندی، دوستی و... می‌باشد، با داشتن بار عاملی ۰/۵۲۷، کم‌ترین سهم را در تبیین سازه اعتماد ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی اعتماد، ذی‌نفعان، موفقیت پروژه، صنعت ساخت.

Investigating the Effect of Trust among Key Stakeholders on the Success of Iranian Construction Projects

Majid Parchamijalal

Mina Alamdar

Abstract Despite the influence that trust has on the success of projects, in the existing project management research, little attention has been paid to the concept of trust compared to traditional project management issues such as cost and quality management. Therefore, the purpose of this research is to examine the role of trust among the key stakeholders of the construction industry (consultant, contractor, employer) on the success of projects in this field. For this purpose, at first, with a comprehensive review of the previous literature, trust indicators (35 items) and project success criteria (15 items) were identified and using the opinion of experts and the Delphi method, 15 trust indicators and 10 success criteria of construction projects were identified. optimal indicators and criteria) were selected and using structural equation modeling, a conceptual model of the relationship between them was built and related calculations were performed using SMART.PLS software. The results show the fact that there is a strong positive relationship between the existence of trust among the key stakeholders of Iran's construction industry projects and the success of the project. Also, the results of this research show that the criterion of honesty with a factor load of 0.888 has the highest share and the criterion of emotional connection, which means having an emotional connection between partners such as ethnic ties, kinship, friendship, etc., has the lowest share with a factor load of 0.527 plays a role in explaining the trust structure.

Key Words Trust, Stakeholders, Project success, Construction industry.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۶/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ می‌باشد.

Email: Parchamijalal@ut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار گروه مدیریت پروژه و ساخت دانشکده معماری دانشگاه تهران. ایران.

(۲) دانشجوی ارشد مدیریت پروژه و ساخت دانشکده معماری دانشگاه تهران. ایران

مقدمه و تاریخچه پژوهش

پروژه‌های ساختمانی از طریق توسعه زیرساخت‌ها که منجر به رشد اقتصادی می‌شود، نقش مهمی در پیشرفت یک کشور ایفا می‌کنند. آن‌ها با دقت برنامه‌ریزی شده‌اند تا به اهداف خاصی دست یابند. با این حال، همه پروژه‌ها به اهداف برنامه‌ریزی شده دست پیدا نمی‌کنند. عوامل زیادی در موفقیت‌ها و شکست‌های یک پروژه نقش دارند که به عرصه‌ای جالب برای تحقیق تبدیل می‌شوند [1].

صنعت ساخت‌وساز درصد قابل توجهی از تولید ناخالص داخلی کشورهای مختلف از جمله ایران را شامل است. موفقیت این صنعت منجر به افزایش رشد اقتصادی بلندمدت می‌شود.

بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، پروژه‌های صنعت ساخت‌وساز در کشورهای مختلف بخش عظیمی از بودجه سالانه کشور را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین، موفقیت پروژه‌های ساخت‌وساز برای دولت و جامعه ضروری است. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری برای بهینه‌سازی مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز انجام شده است تا بتوان پروژه‌های این صنعت را با موفقیت انجام داد و نرخ موفقیت آن‌ها را افزایش داد [2].

پروژه‌های ساخت‌وساز معمولاً به دلیل فعالیت‌های متعدد لازم برای تکمیل پروژه، انواع مختلف منابع مورد نیاز و مدیریت مقادیر بزرگ قراردادهای پیچیده هستند. آنچه معمولاً در پروژه‌هایی که به دلیل شرایط نامساعد خارجی از زمان‌بندی عقب می‌مانند اتفاق می‌افتد، این است که پروژه با توجه به برنامه زمان‌بندی پروژه و هزینه‌های بیش از حد بودجه‌گذاری شده، دچار اشکال می‌شود و در حفظ هدف اصلی پروژه و الزامات کارفرما دچار چالش می‌شود [3].

موضوع موفقیت پروژه در قلب مدیریت پروژه قرار دارد، به عبارت دیگر موفقیت پروژه موضوع بسیار مهمی در مدیریت پروژه می‌باشد و تمام فرایندهای انجام شده در مدیریت پروژه جهت رسیدن به موفقیت پروژه می‌باشد. همچنین موفقیت پروژه جز اولویت‌های اصلی مدیران پروژه و ذینفعان پروژه است.

عوامل زیادی بر میزان موفقیت پروژه تأثیر می‌گذارد. بنابراین ساخت‌وساز یک تجارت مخاطره‌آمیز است و احتمال شکست همیشه وجود دارد، بنابراین شرکت‌های ساختمانی باید عواملی را در نظر بگیرند که می‌توانند تأثیر مستقیمی بر موفقیت آن‌ها در عملکرد پروژه ساختمانی داشته باشند [4].

در این پژوهش فرض بر آن است که وجود اعتماد در بین ذینفعان کلیدی صنعت ساخت (مشاور، پیمانکار، کارفرما) تأثیر مثبتی بر موفقیت پروژه‌های ساخت دارد. حضور یا عدم حضور اعتماد بین عواملی که روی یک پروژه کار می‌کنند، عامل اصلی تعیین کننده موفقیت یا شکست آن است. اعتماد بین سازمانی مستلزم آن است که یک شرکت، خود را در شرایط نامطمئن قرار دهد و به یک شریک متکی باشد، با این امید که او از آن سوء استفاده نکند، بلکه به گونه‌ای عمل کند که منافع مورد انتظار طرف مقابل را به همراه داشته باشد.

اعتماد

اعتماد به معنای واگذاری امور به نهاد دیگری با این باور است که توانایی‌های خاصی دارد و می‌تواند از آن‌ها به نحو مناسب استفاده کند. در شرایطی که اطمینان و کنترل بر موجودیت دیگری تضمین می‌شود، اعتماد لازم نیست، بلکه زمانی لازم است که رویدادهای آینده نامطمئن می‌شوند و موجودیت‌ها به یکدیگر وابسته می‌مانند. بنابراین اعتماد به آمادگی برای قرار گرفتن در معرض خطر مرتبط است. با وجود اعتماد، شرکت خطرات مرتبط با ناتوانی در پیش‌بینی فعالیت‌های آتی شریک خود و احتمال عدم تحقق قراردادهای منعقد شده را می‌پذیرد [4].

علی‌رغم تحقیقات گسترده در مورد مفهوم اعتماد در چند دهه گذشته، این مفهوم همچنان یکی از چالش برانگیزترین مفاهیم برای مطالعه است [5]. عملکرد مدیریت پروژه در هر تلاش ساخت‌وساز ذاتاً متکی به اقدامات افراد پروژه است که به طور جمعی به عنوان یک تیم پروژه با هم تعامل دارند با توجه به اینکه این تعاملات در سطح انسانی صورت می‌گیرد، موضوع اعتماد اساساً حائز اهمیت است [6].

بنابراین اعتماد تأثیر مهمی بر موفقیت پروژه دارد و عدم رسیدگی به آن احتمالاً منجر به مشکلاتی برای مدیر پروژه می‌شود [7]. تعاریف متعددی از اعتماد در ادبیات مدیریت پروژه موجود است. رایج‌ترین عناصر تعاریف مختلف اعتماد عبارتند از انتظارات مثبت، اطمینان، آسیب‌پذیری، خطر، وابستگی متقابل، وضعیت ذهنی روانی ذهنی و ماهیت متغیر تعریف بر اساس زمینه.

اعتماد بین فردی تمایل یک طرف برای آسیب‌پذیر بودن در برابر اقدامات طرف دیگر است. در این تعریف، یک طرف درک

سازه‌ای اعتماد تعبیر می‌شود [13]. همچنین در آیات قرآنی نیز به اعتماد و اهمیت آن اشاره شده مانند آیه اول سوره مائده و آیه هشتم سوره مؤمنون.

در انجام پروژه‌های ساختمانی، ذی‌نفعان مهمی مانند شهرداری، آتش‌نشانی و... وجود دارد ولی در این پژوهش، مبحث اعتماد بین ذی‌نفعان کلیدی که به نحوی در چهارچوب قراردادهای عوامل اصلی انجام دهنده پروژه می‌باشند مورد بررسی قرار گرفته است.

عوامل مؤثر بر اعتماد

ویژگی‌های مؤثر بر اعتماد در تیم پروژه ساخت‌وساز توسط بسیاری از محققان در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته است [14]. عوامل کلیدی مؤثر بر اعتماد ثابت نیستند اما بر اساس افزایش مدت همکاری قابل تغییر هستند. کامپو (Campo) و همکاران اعتماد را به دوره‌های قبل از شروع توافق و در طول توسعه توافق تقسیم کردند. پوپو (Poppo) و همکاران نیز منشأ اعتماد را در سایه گذشته و سایه آینده طبقه‌بندی می‌کنند. عوامل قابل اعتماد درک شده، به جز گرایش شخصی به اعتماد، در دسته‌های توانایی، خیرخواهی و صداقت دسته‌بندی می‌شوند. گرایش شخصی ممکن است به عنوان تمایل به اعتماد به دیگران در نظر گرفته شود و ممکن است تحت تأثیر تجربه قبلی، شهرت و انتظارات همکاری باشد.

توانایی (Ability) منعکس کننده مهارت، شایستگی و ویژگی‌های یک شریک است و تأثیر زیادی بر برخی از حوزه‌های خاص دارد. خیرخواهی (Benevolence) نشان می‌دهد که یک شریک به دیگران وابستگی دارد و اعتقاد بر این است که می‌خواهد به دیگران نیکی کند [15]. همچنین شایستگی (Competency) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های قابل اعتماد در صنعت ساخت‌وساز است. در سطح ارتباط مشتری - پیمانکار، پیمانکاران می‌توانند با عملکرد شایسته خود اعتماد را ایجاد کنند. همچنین شایستگی یک پایه اساسی برای اعتماد است و از آن به عنوان اعتقاد یک طرف به اینکه طرف دیگر برای انجام کارها و وظایف محول شده صلاحیت دارد یاد می‌شود [9]. در مورد انواع قرارداد، کادفوس (kadevors) اشاره می‌کند

می‌کند که ریسک پیامدهای منفی به جای نتایج مطلوب وجود دارد. به عبارت دیگر اگر طرف مقابل از اعتماد انجام شده سوء استفاده کند می‌تواند به اعتماد کننده ضرر و خسارت وارد کند. دولوی (Doloi) اعتماد را به عنوان عاملی تعریف می‌کند که کارها و تعهدات را بدون اعمال آن، باید از طریق ترتیبات قانونی و قراردادی انجام داد [8].

رولینسون (Rowlinson) همچنین اعتماد را از دیدگاه چینی توصیف می‌کند: او معتقد بود که اعتماد یک پدیده اجتماعی است که می‌تواند هماهنگی ایجاد کند و یک نگرش مثبت است که باید ایجاد و حفظ شود. او اشاره کرد که اعتماد، چند وجهی، چند رشته‌ای و چند بعدی است و می‌تواند در طول زمان تغییر کند. علاوه بر این، او معتقد بود که اگر طرف مورد اعتماد به تعهدات خود عمل نکند، اعتماد بیش از حد می‌تواند مضر و مخرب باشد [9].

دانشمندان علوم اجتماعی معمولاً در یک زمینه چند منظری اعتماد را بررسی می‌کنند، اینکه چگونه اعتماد تحت تأثیر ابعاد مختلف مانند تاریخ اجتماعی، فرهنگ و نهادها قرار می‌گیرد. اقتصاددانان نیز از اعتماد در توسعه نظریه بازی استفاده کرده‌اند [10].

پژوهشگران معتقد هستند که اعتماد، پدیده‌ای پویا، پیچیده و همراه با معانی مختلف است که در طیفی از نظریه‌ها و مفاهیم به کار رفته است که در حوزه‌های مختلف، با توجه به ماهیت و خصوصیت‌های خاص آن‌ها، گسترده شده است [11].

تعریف کارلسن (Karlsen) و همکاران و رز و شلیچتر (Rose and Schlichter) این تفکر را آغاز می‌کند که روابط اعتماد علت و معلولی است زیرا اعتماد پاسخی خوش‌بینانه به عملی است که توسط شخص دیگری انجام می‌شود [12].

با وجود جهت‌گیری‌های نظری مختلف و اظهار نظرهایی که بیان می‌دارند که اعتماد هرگز به طور دقیق تعریف نشده است و هیچ تعریف جهانی پذیرفته شده‌ای در خصوص اعتماد وجود ندارد، می‌توان به وجه مشترکی میان این تعاریف دست یافت که این وجه مشترک، اطمینان یک طرف (اعتمادکننده) به برخورداری طرف دیگر رابطه (اعتمادشونده) از یک سری صفات مشخص مانند صداقت، حسن نیت و ... است که از آن‌ها به ویژگی‌های

جدول ۱ شاخصه‌های اعتماد مورد استفاده در مدل مفهومی

منبع	شاخصه‌های اعتماد
[14,18-21]	۱. صداقت
[14,18,22,23]	۲. تعهد و وفای به عهد
[14,24,25]	۳. ثبات رفتار
[14,22,25]	۴. حسن نیت
[15,26]	۵. سرمایه‌گذاری عاطفی (پیوند عاطفی)
[14,15], [18-20], [27-29]	۶. تبادل اطلاعات
[14,20,24]	۷. احترام متقابل
[14,15,18,20,27,30]	۸. تجربه همکاری
[15,18,20,27,29,30]	۹. ارتباطات
[18,27]	۱۰. انعطاف‌پذیری و سازگاری
[14,18,20,27-29,31]	۱۱. توانایی حل مسئله
[14,15,18,20,27-29]	۱۲. شهرت و اعتبار
[14,15,20,27,29]	۱۳. کامل بودن قرارداد
[15,32]	۱۴. دانش تخصصی
[18,27]	۱۵. توان مالی

موفقیت پروژه

امروزه پروژه‌های ساختمانی بسیار پیچیده‌تر و دشوارتر از گذشته شده‌اند. یک پروژه ساخت‌وساز در نتیجه ترکیبی از بسیاری از رویدادها و تعاملات برنامه‌ریزی شده یا برنامه‌ریزی نشده در طول عمر یک پروژه و تغییر شرکت‌کنندگان و فرایندها در یک محیط دائماً در حال تغییر، تکمیل می‌شود. با این حال، مفهوم موفقیت پروژه به طور مبهم در ذهن متخصصان ساخت‌وساز تعریف شده است [33].

با وجود تلاش‌های مستمر در تمامی کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه برای دستیابی به موفقیت پروژه‌ها، اما اکثر پروژه‌ها همچنان با چالش‌های زیادی روبه‌رو هستند که مانع از موفقیت آن‌ها می‌شود. بنابراین، بسیاری از مطالعات به دنبال بررسی این چالش‌ها هستند که بسته به شرایط اقتصادی، سیاسی و اجتماعی از کشوری به کشور دیگر متفاوت است.

تعیین عوامل موفقیت خاص برای محیط‌های محلی ضروری است تا اطمینان حاصل شود که مکانیسم‌های مناسب بر این اساس اجرا می‌شوند. یکی از دلایل دشواری‌های مدیریت پروژه‌ها، به ویژه در بخش دولتی، عدم تعیین عوامل کلیدی

که انواع قراردادهای سنتی تمایل به خنثی کردن توسعه اعتماد در میان طرفین قرارداد دارند. شرکت‌ها می‌توانند با ایجاد پاداش‌های عینی، شفاف و قابل اندازه‌گیری پروژه و همچنین با انتخاب رویکرد کارکنان پروژه که ساختار تیمی پایدار، اعضای تیم آشنا و عضویت تمام وقت را تضمین می‌کند، به ایجاد اعتماد کمک کنند [8].

برخی پژوهشگران پابندی به قول‌ها و وعده‌ها، ثبات رویه، عدم سوء استفاده از دیگری و پرهیز از تقلب را توصیف‌کننده مقوله قابلیت اعتماد بودن می‌دانستند و برخی دیگر داشتن تجربه، توانایی فنی و پابندی به تعهدات قراردادی را به عنوان شاخصه اعتماد برشمردند [11].

ثبات، با قابل اتکا بودن، قابل پیش‌بینی بودن و قضاوت مناسب فرد در برخورد با موقعیت‌ها و سازگاری بین حرف و عمل او مرتبط می‌باشد. ناسازگاری بین حرف و عمل یک فرد، باعث کاهش اعتماد ما به آن شخص می‌شود [16].

ارتباط مؤثر بین شرکای پروژه باعث افزایش اعتماد می‌شود. در ادامه، تجربه و ارتباط چهره‌به‌چهره تأثیر مهمی بر اعتماد بین فردی دارد. پژوهشگران همچنین دریافتند که استفاده از سیستم مدیریت اسناد الکترونیکی در پروژه‌ها منجر به سطح بالایی از اعتماد بین شرکتی می‌شود [9].

تحقیقات طبیعی نیز نشان می‌دهد که عوامل ایجاد و تقویت اعتماد عبارتند از راست‌گویی، وفای به عهد، امانت‌داری، پیشینه، انصاف، حسن خلق و محبت، شنونده فعال بودن، شناخت، همنشین، شاهد، سوگند و تذکر [17].

شاخصه‌های اعتماد

با مطالعه مقالات معتبر و تحقیقات پیشین در ادبیات مربوط به اعتماد در مجموع ۳۵ شاخصه اعتماد مرتبط با صنعت ساخت شناسایی شدند که با توجه به نظر خبرگان و به روش دلفی از بین این ۳۵ مورد، موارد کم‌اهمیت‌تر حذف و شاخصه‌های هم‌معنی با هم ادغام شدند و در نهایت برای استفاده در مدل مفهومی و پرسشنامه، ۱۵ مورد از شاخصه‌ها انتخاب شدند که در جدول (۱) نشان داده شده است.

پروژه‌ها معیارهای دیگر موفقیت پروژه توسط ویلیامز است. موفقیت به عنوان دستیابی به نتایجی شناخته می‌شود که بهتر از فعالیت‌های احتمالی یا طبیعی مرتبط با موضوعات زمان‌بندی، هزینه، کیفیت، ایمنی و رضایت ذی‌نفعان است، در واقع در دوره‌های قبلی، معیارهای موفقیت، هزینه، زمان، کیفیت و رضایت ذی‌نفعان بود و در سال ۲۰۰۴ موضوع رضایت از عملکرد فنی مطرح شد [36].

عوامل و معیارهای موفقیت پروژه

موفقیت پروژه از دو منظر بررسی می‌شود، یکی تعیین عواملی که باعث موفقیت می‌شوند و دیگری معیارهایی که موفقیت پروژه با آن سنجیده می‌شود. معیارهای موفقیت پروژه باعث می‌شوند که پروژه‌ها از نظر موفقیت یا شکست با یکدیگر قابل مقایسه باشند و عوامل موفقیت نیز فعالیت‌هایی هستند که پروژه‌ها به وسیله آن‌ها موفق می‌شوند [36].

عوامل موفقیت پروژه، شرایط یا اثراتی هستند که در نتایج پروژه دخیل هستند و می‌توانند موفقیت پروژه را تسهیل کنند و یا مانع از آن شوند. آن‌ها در موفقیت یا شکست پروژه سهیم هستند ولی مبنای قضاوت نمی‌باشند، اما طبق مطالعات هنگام استفاده از معیار، آن را با عامل موفقیت هم‌معنی می‌دانند و گاهی به جای یکدیگر استفاده می‌شوند. در واقع معیارهای موفقیت پروژه مجموعه‌ای از اصول یا استانداردهایی هستند که پروژه می‌تواند توسط آن‌ها مورد قضاوت واقع شود. این‌ها شرایطی هستند که قضاوت می‌تواند روی آن‌ها صورت گیرد [39].

معیارهای موفقیت، نتایج کلیدی را تشکیل می‌دهند که باید برای دستیابی به موفقیت در یک پروژه اولویت‌بندی شوند. آن‌ها یک ابزار مدیریت پروژه قدرتمند برای به حداقل رساندن شکست پروژه هستند و به همین دلیل، توجه عمیق محققان در حوزه مدیریت ساخت‌وساز را به خود جلب کرده‌اند [40].

لیم و محمد عوامل موفقیت پروژه را این گونه تعریف کرده‌اند: مجموعه‌ای از عوامل محیطی، واقعیات و یا عوامل تأثیرگذار می‌باشند که می‌توانند خروجی‌های پروژه را تحت تأثیر خود قرار دهند، انجام پروژه را سرعت ببخشند یا آن را با مشکل مواجه کنند.

در عملکرد پروژه، چهار بعد مختلف از عوامل اساسی موفقیت وجود دارد. اولین عامل پیروی از اهداف طراحی است

موفقیت پروژه‌ها (CFS) در سراسر مراحل پروژه و عدم شناسایی عناصر موفقیت در قالب سنجش کارایی و اثربخشی است.

موفقیت پروژه به عنوان تحقق اهداف از پیش تعیین شده پروژه، که معمولاً معیارهایی مانند زمان، هزینه و عملکرد را شامل می‌شود، دیده می‌شود [34].

به طور معمول زمان، هزینه و کیفیت توسط بسیاری از محققان به عنوان معیاری برای سنجش موفقیت پروژه استفاده شده است. این سه معیار در مجموع به عنوان «مثلث آهنین» در اصطلاح مدیریت پروژه نیز نامیده می‌شوند [35].

در سال ۲۰۰۱ پیشنهاد شد که این معیارها برای اندازه‌گیری موفقیت پروژه کافی نیستند. به همین دلیل، گموندن و همکاران در سال ۲۰۰۵ ادعا کردند موفقیت پروژه با در نظر گرفتن محدودیت‌های سه‌گانه زمان، بودجه و کیفیت، بعد داخلی موفقیت فنی، کسب شایستگی، برآورده کردن هزینه هدف محصول جدید، بعد خارجی (موفقیت مالی، دستیابی به سهم بازار و برآوردن الزامات نظارتی محصول جدید) ارزیابی می‌شود [36]. علاوه بر این، موفقیت پروژه و معیارهای موفقیت باید «ادراک ذی‌نفعان متعدد» را در بر گیرد [37].

به دلیل حضور بسیاری از ذی‌نفعان در محیط متنوع پروژه‌های امروزی، مفهوم موفقیت، خود دستخوش تغییرات زیادی شده است. با الزامات و دستورالعمل‌ها، ایده موفقیت پروژه برای کمک به شرکت‌کنندگان پروژه طراحی شده است که به پروژه‌هایی با مطلوب‌ترین نتایج دست یابند.

موفقیت کامل پروژه در تمامی پروژه‌ها تقریباً موضوعی دست‌نیافتنی است [34].

تعریف ساده برای موفقیت پروژه تنها بر اساس مرحله اجرای چرخه عمر پروژه بود، اما در این روزها تعریف موفقیت پروژه از ابتدا تا پایان چرخه عمر پروژه و محصول الزامی است [38].

رجبلو و همکاران بیان می‌کنند انگیزه‌ای که باعث موفقیت پروژه می‌شود، موضوع سود یا منفعت ذی‌نفعان و دستیابی آن‌ها به اهداف و ایده‌هایشان است و موفقیت را در محصول پروژه و مدیریت پروژه می‌دانستند. با توجه به دیدگاه سازمان پایه (مالک پروژه)، همچنین رجبلو و همکاران بر اهمیت ذی‌نفعان تأکید کردند و بیان کردند که اگر در ابتدا از ذی‌نفعان الهام گرفته و در پاسخ به پروژه از آن‌ها کمک گیرند، تنها در این صورت است که یک پروژه می‌تواند موفق باشد. عملکرد شرکت در یک برنامه از

به عنوان مثال شناسایی ضعیف محدوده (Scope) پروژه، یکی از عوامل اصلی شکست پروژه‌ها است زیرا منجر به اصلاحات و تغییرات مکرر می‌شود [3].

شاید محبوب‌ترین کلمه هر کارشناس پروژه «موفقیت» باشد. هنگام صحبت در مورد پروژه‌ها دو مفهوم اصلی موفقیت وجود دارد: موفقیت پروژه و موفقیت در مدیریت پروژه. شباهت‌ها و همچنین تفاوت‌هایی بین این دو بعد موفقیت پروژه وجود دارد. تفاوت اصلی مربوط به پیوند موفقیت پروژه با نتیجه ارزیابی دستیابی به اهداف کلی پروژه است، در حالی که موفقیت در مدیریت پروژه به اندازه‌گیری‌های سستی زمان، هزینه و عملکرد کیفیت مربوط می‌شود.

با این حال، به دلیل وجود بسیاری از مدل‌های مختلف موفقیت در هر دو پروژه و مدیریت پروژه، ایجاد تمایز قوی بین آن‌ها، بیشتر به دلیل روابط متقابل آن‌ها، دشوار است. ممکن است یک پروژه، بدون موفقیت در مدیریت پروژه، به موفقیت برسد، اما موفق شدن در مدیریت پروژه می‌تواند میزان موفقیت آن را افزایش دهد. بین شیوه‌های مدیریت پروژه و موفقیت در مدیریت پروژه رابطه مثبت معناداری وجود دارد. موفقیت مدیریت پروژه یکی از عناصر موفقیت پروژه است، زیرا دومی بدون آن به سختی قابل دستیابی است [47].

مدل مفهومی

مدل مفهومی مهم‌ترین مؤلفه‌های تحقیق و روابط پیش‌فرض بین مؤلفه‌ها را توضیح می‌دهد [36]. اساساً، مدل مفهومی چشم‌اندازی است از آنچه محقق معتقد است با پدیده مورد مطالعه در جریان است. پس از یک مطالعه اولیه، مدل مفهومی و فرضیه تحقیق مطابق شکل (۱) ایجاد شد. در این مدل فرض بر این است که وجود اعتماد در بین ذی‌نفعان کلیدی صنعت ساخت با موفقیت پروژه و در نتیجه با معیارهای موفقیت مرتبط بوده و رابطه آن‌ها نیز مثبت است. به عبارت دیگر، فرض بر این است که وجود شاخصه‌های اعتماد، معیارهای موفقیت پروژه را محقق می‌کند در ادامه این تحقیق، پس از طراحی پرسشنامه و جمع‌آوری اطلاعات عملکرد پروژه و نظرات کارشناسان، مدل مفهومی نهایی و در نرم‌افزار SMART.PLS تعریف و تحلیل شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها می‌پردازیم.

که به قرارداد امضا شده با مشتری مربوط می‌شود. عامل دوم سود مصرف‌کنندگان نهایی است که به سود محصولات نهایی پروژه برای مشتریان مربوط می‌شود. عامل سوم، منفعت سازمان در حال توسعه است که به سود حاصل از اجرای پروژه توسط سازمان در حال توسعه مربوط می‌شود.

در نهایت، سود زیرساخت‌های فناورانه ملی و همچنین زیرساخت‌های فناورانه کسب و کار شرکت‌کننده در مرحله تولید، آخرین بعد است. ترکیبی از همه این ابعاد یک ارزیابی کلی از عملکرد پروژه ارائه می‌دهد [34].

معیارهای مختلفی برای موفقیت توسط مطالعات مختلف تعیین شده است. چان (Chan) و همکارانش دو گروه از معیارهای کلیدی عملکرد برای پروژه‌های ساخت را پیشنهاد می‌دهند. گروه اول سنجه‌های عینی هستند که موضوعات زمان، هزینه، ایمنی و محیط را در بر می‌گیرد. گروه دوم شامل سنجه‌های ذهنی است که متشکل است از کیفیت، کارکردپذیری و رضایتمندی شرکت‌کنندگان مختلف پروژه.

میلوسویچ و پاتاناکول (Milosevic & Pattanakol) از منظر مدیریت پروژه، معیارهای موفقیت پروژه (CSF)ها را به عنوان ویژگی‌ها، شرایط، متغیرهایی تعریف می‌کنند که می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر موفقیت یک پروژه در صورت تداوم، نگهداری و مدیریت مناسب داشته باشند [41].

با مطالعه در ادبیات پیشین، عوامل و معیارهای موفقیت پروژه ۱۰ مورد از این معیارها برای استفاده در مدل مفهومی و پرسشنامه انتخاب شدند که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ معیارهای موفقیت پروژه مورد استفاده در مدل مفهومی

معیارهای موفقیت	منبع
۱. زمان	[36,42-46]
۲. هزینه	[36,42-46]
۳. کیفیت	[36,42,43]
۴. نیازمندی‌های عملکردی (کارایی)	[36,46]
۵. ایمنی	[36,44]
۶. رضایت ذی‌نفعان	[36,43-46]
۷. مزیت رقابتی	[36,44]
۸. شهرت و اعتبار	[36,44]
۹. محدوده	[36,42,43,46]
۱۰. موفقیت در مدیریت پروژه	[36,45]

الگوهای بهینه‌ای در جهت توسعه و ارتقای موفقیت پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه دهد.

رویکرد تحقیق از نوع پیمایشی - مقطعی است، زیرا به منظور گردآوری داده‌ها درباره یک یا چند صفت در یک مقطع از زمان (یک روز، یک هفته، یک ماه) از طریق نمونه‌گیری از جامعه انجام می‌شود.

تحقیق پیمایشی روشی است برای به دست آوردن اطلاعاتی درباره دیدگاه‌ها، باورها، نظرات، رفتارها، انگیزه‌ها یا مشخصات گروهی از اعضای یک جامعه. همچنین پیمایش را می‌توان روشی علمی در تحقیقات اجتماعی قلمداد کرد که شامل روش‌های منظم و استاندارد برای جمع‌آوری اطلاعات درباره افراد، خانواده‌ها یا مجموعه‌های بزرگ‌تری از گروه‌های مختلف جامعه است.

در حقیقت پیمایش را می‌توان هم به ابزار استفاده برای جمع‌آوری داده‌ها و هم به فرایندهای به کار گرفته شده هنگام بهره‌گیری از آن ابزار تلقی کرد.

این پژوهش به توصیف جامعه بر اساس یک یا چند متغیر می‌پردازد. روش مقطعی (Cross Sectional) نیز بر گردآوری داده‌ها درباره یک یا چند صفت در یک مقطع زمانی خاص دلالت دارد.

راهبرد یا استراتژی تحقیق نیز از نوع کمی است، زیرا ارائه مدل معادلات ساختاری مبتنی بر داده‌ها و تجزیه و تحلیل‌های عددی نرم‌افزاری صورت می‌گیرد. لذا مداخله کنترل شده، غیر شخصی و عینی است.

طراحی و توسعه پرسشنامه

در این مطالعه پس از استخراج و نهایی شدن تعداد شاخصه‌های اعتماد و معیارهای موفقیت پروژه، پرسشنامه‌ای شامل سه بخش (مشخصات فردی، شاخصه‌های اعتماد و معیارهای موفقیت پروژه) طراحی شد و سپس شاخص اعتبار طراحی و محتوا (CVI) محاسبه شد که برای تمامی سؤالات این شاخص بالای ۰٫۷۵ بود که نشان دهنده روایی محتوایی پرسشنامه است. در ادامه مرحله، شاخصه‌های اعتماد به عنوان متغیرهای انعکاسی مستقل و معیارهای موفقیت پروژه به عنوان متغیرهای انعکاسی وابسته شناسایی شدند.

جمع‌آوری داده‌ها

پس از نهایی شدن سؤالات پرسشنامه، تعداد نمونه‌های آماری بر



شکل ۱ مدل مفهومی

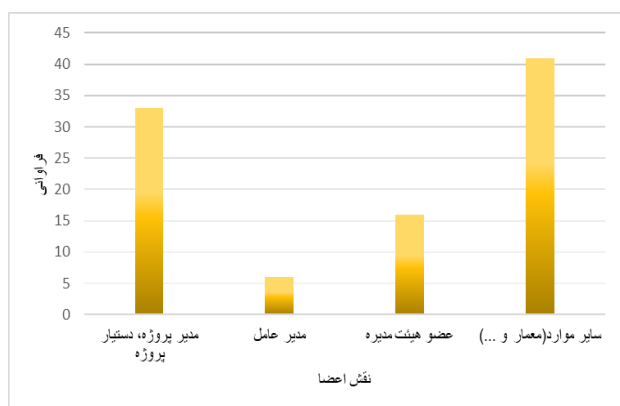
ساختار تحقیق مطالعات مقدماتی

تعریف مسئله. در این بخش، موضوع اصلی که این تحقیق را تعریف می‌کند و محدوده و اهداف تحقیق مشخص شده است. همان طور که در مقدمه توضیح داده شد، موضوع اصلی تحقیق این بود که نویسندگان معتقد بودند که بین اعتماد و موفقیت پروژه رابطه مثبت وجود دارد، اما در پروژه‌های ساختمانی ایران به این موضوع، توجه قابل قبولی نشده است. هدف اصلی این مطالعه شناسایی معیارهای موفقیت پروژه‌های ساخت و شاخصه‌های اعتماد مربوط به این حوزه و روابط بین آنهاست که در نهایت در نرم‌افزار SMART.PLS در قالب یک مدل ارائه خواهد شد.

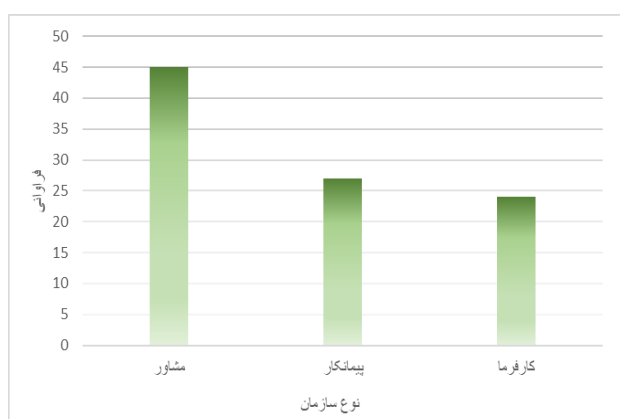
پیشینه تحقیق. در این بخش مفاهیمی مانند اعتماد و موفقیت پروژه به اختصار شرح داده شده و سپس مطالعات قبلی (از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲) با کلیدواژه‌های موفقیت پروژه، چالش‌های موفقیت پروژه، شاخصه‌های اعتماد، معیارهای موفقیت پروژه و همچنین پروژه‌های ساخت‌وساز بررسی شده و در نهایت با مصاحبه با خبرگان، ۱۵ شاخصه اعتماد و ۱۰ معیار موفقیت انتخاب شده است.

توسعه مدل

انتخاب روش تحقیق. پژوهش حاضر بر اساس هدف، از نوع تحقیقات کاربردی است، زیرا در راستای ارائه یک مدل معادلات ساختاری و تبیین مفاهیم در شرایط واقعی است و سعی دارد



شکل ۴ سمت افراد نمونه آماری



شکل ۵ نوع سازمان

بیش از نیمی از اعضای نمونه آماری بین ۷ - ۱۰ سال سابقه حضور در فعالیتهای عمرانی صنعت ساخت را دارند و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تا حد زیادی با مشکلات این صنعت و علل عدم موفقیت پروژه‌ها آشنا هستند.

حدود ۴۰٪ خبرگانی که در این نمونه آماری حضور داشتند تجربه شرکت در بیش از شش پروژه ساخت را دارند و باقی نیز تجربه حداقل سه پروژه را داشته‌اند. بنابراین می‌توان از مرتبط بودن پاسخ‌ها به پروژه‌های ساخت اطمینان حاصل کرد.

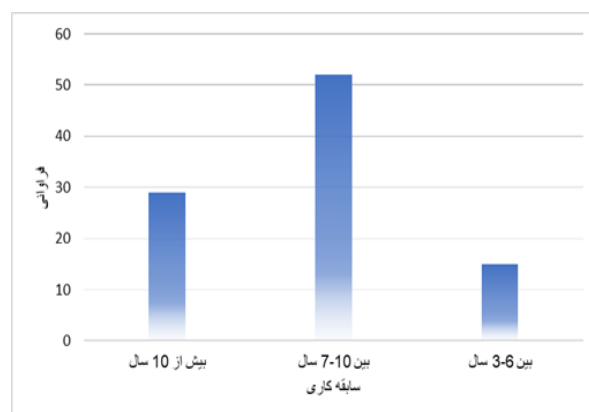
حدود ۷۵٪ پاسخ‌دهندگان جز عوامل اجرایی پروژه یعنی مدیر پروژه یا دستیار مدیر پروژه و مهندسان ساخت بوده‌اند که از نزدیک با این صنعت در ارتباط بوده‌اند.

باقی افراد هم‌چون مدیر عامل و اعضای هیئت مدیره بودند که از دید بالا بر پروژه‌ها نظارت داشته‌اند.

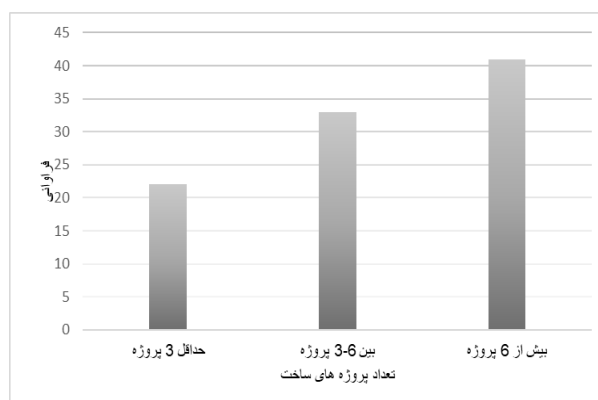
نزدیک به ۴۵٪ از افراد نمونه آماری، در شرکت‌های مشاور

اساس فرمول کوکران (Cochran) و بر اساس جامعه آماری نامحدود مشتمل بر مشاوران، پیمانکاران و کارفرمایان صنعت ساخت‌وساز ایران با درصد مجاز اشتباه ۱۰ درصد، ۹۶ مورد تعیین شد و سپس این پرسشنامه به دو روش حضوری و غیر حضوری از طریق ارسال سؤالات به افراد یاد شده از روش‌های مختلف مانند شبکه‌های اجتماعی و پست الکترونیک و... توسط خبرگان در شهر تهران تکمیل گردید. از آنجایی که این پیمانکاران، مشاوران و کارفرمایان (سرمایه‌گذار و مالک) در سراسر ایران فعالیت و پروژه دارند و در ضمن شاخصه‌ها، مواردی نیستند که در نقاط مختلف تغییر فاحش داشته باشند، نتایج به دست آمده از شهر تهران را می‌توان قابل تعمیم به کل کشور دانست.

در ادامه برخی از ویژگی‌های اعضای نمونه آماری انتخاب شده در نمودارهای زیر نشان داده شده است:



شکل ۲ سابقه کاری اعضای نمونه آماری



شکل ۳ تعداد پروژه‌های ساختی که اعضای نمونه آماری در آن مشارکت داشته‌اند

جدول ۳ پایای شاخص‌ها

سازه‌ها	پایایی ترکیبی (CR)	آلفای کرونباخ
اعتماد	0.937	0.928
موفقیت پروژه	0.913	0.896

(۱) پایایی شاخص، (۲) روایی همگرا، (۳) روایی واگرا که پایایی شاخص نیز خود توسط سه معیار سنجیده می‌شود: (۱) آلفای کرونباخ، (۲) پایایی ترکیبی، (۳) ضرایب بارهای عاملی [48]. مقدار آلفای کرونباخ بالاتر از ۰,۷ نشانگر پایایی قابل قبول است و طبق گفته نونالی (Nunally) معیار پایایی ترکیبی نیز ۰,۷ و بالاتر می‌باشد که از این نظر طبق جدول (۳) شاخص‌ها در محدوده قابل قبول هستند.

مورد بعدی در مورد پایایی شاخص بارهای عاملی است که آن‌ها از طریق محاسبه مقدار همبستگی شاخص‌های یک سازه با آن سازه محاسبه می‌شوند که اگر این مقدار برابر و یا بیشتر از مقدار ۰,۴ شود پایایی شاخص تأمین می‌شود.

متطابق شکل (۶) بارهای عاملی همه شاخص‌ها و معیارها بالای ۰,۴ می‌باشد و بنابراین پایایی شاخص مدل اندازه‌گیری در مجموع قابل قبول است.

روایی همگرا (AVE) نشان دهنده همبستگی درونی بین گویه‌های سنجش سازه اصلی است. روایی همگرا در صورتی معنی‌دار در نظر گرفته می‌شود که بارگذاری هر عامل بیشتر از ۰,۵ باشد.

با توجه به جدول روایی هر دو سازه اعتماد و موفقیت پروژه مورد تأیید است. آخرین مورد در سنجش مدل اندازه‌گیری روایی واگراست که از دو طریق ارزیابی می‌شود: (۱) بارهای عاملی متقابل و (۲) ماتریس فورنل و لارکر. در روش بارهای عاملی متقابل میزان همبستگی بین شاخص‌های یک سازه با آن سازه و میزان همبستگی بین شاخص‌های یک سازه با سازه‌های دیگر مقایسه می‌گردد.

در صورتی که معلوم شود میزان همبستگی بین یک شاخص با سازه دیگری غیر از سازه خود بیشتر از میزان همبستگی آن

صنعت ساخت مشغول به کار بودند و نیمی دیگر از پاسخ‌دهندگان تقریباً، به طور مساوی در شرکت‌های پیمانکاری و کارفرمایی مشغول به کار بودند.

مدل‌سازی معادلات ساختاری

پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها، مدل‌سازی معادلات ساختاری، توسط نرم‌افزار Smart PLS نسخه سوم تهیه و تحلیل شد. اسمارت پی. ال. اس. نرم‌افزاری آماری، با رابط کاربری گرافیکی است که از آن برای انجام «مدل‌سازی معادلات ساختاری» با روش کمترین مربعات جزئی یا روش PLS یا به عبارتی partial least squares استفاده می‌شود.

همان طور که گفته شد در این پژوهش از پرسشنامه برای استخراج اطلاعات و داده‌ها از پاسخ‌دهندگان مختلف استفاده شد. هدف از این مرحله تعیین رابطه علی بین متغیرهای تحقیق (اعتماد و موفقیت پروژه) با توجه به تجربیات پاسخ‌دهندگان در پروژه‌های عمرانی می‌باشد.

ارزیابی مدل پیشنهادی

پس از اینکه پایایی پرسشنامه‌ها با شاخص‌های ذکر شده در بالا محاسبه شد، باید وارد فاز مدل اندازه‌گیری و همچنین مدل ساختاری شویم.

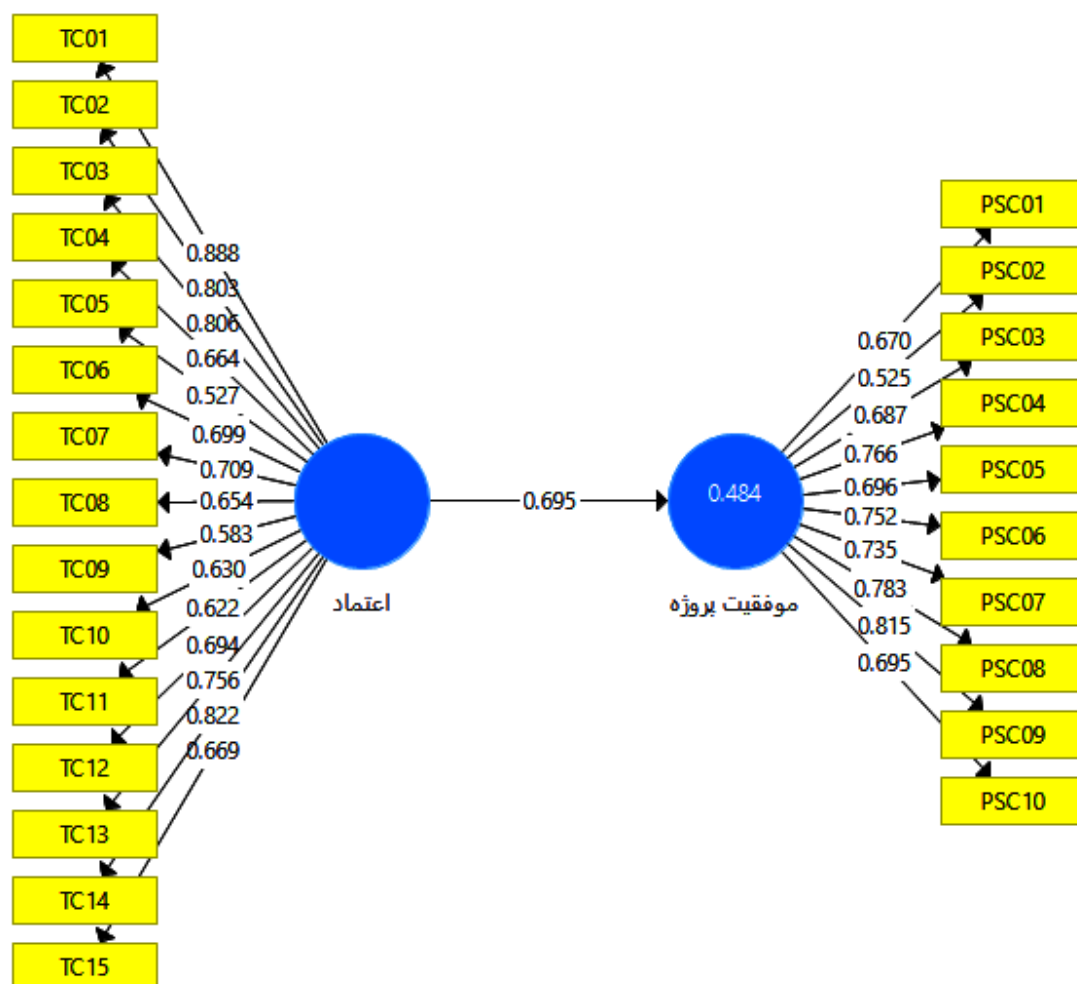
مدل اندازه‌گیری. مدل اندازه‌گیری چگونگی توضیح و تبیین متغیرهای پنهان توسط متغیرهای آشکار (سؤالات) مربوط را بررسی می‌نماید. مدل اندازه‌گیری یا مدل خارجی شامل بخشی از مدل کلی می‌شود که در بر گیرنده یک متغیر به همراه سنج‌های (سؤالات) مربوط به آن است. اولین مرحله در تحلیل PLS ارزیابی مدل اندازه‌گیری است.

مدل اندازه‌گیری این پژوهش شامل دو مدل به عنوان اعتماد و موفقیت پروژه با شاخص‌های مربوط است. برای برازش مدل اندازه‌گیری سه مورد استفاده می‌شود:

PSC10) و به همین صورت همبستگی بین شاخص‌های اعتماد با سازه اعتماد از همبستگی میان آن‌ها با سازه موفقیت پروژه بیشتر است که این نشان از روایی و اگرایی قابل قبول مدل دارد (TC01-TC15).

شاخص با سازه مربوط به خود است، روایی و اگرایی مدل زیر سؤال می‌رود.

همان گونه در ماتریس جدول (۵) مشخص است همبستگی بین شاخص‌های موفقیت پروژه با سازه موفقیت پروژه از همبستگی میان آن‌ها با سازه اعتماد بیشتر است (-PSC01-PSC10).



شکل ۶ بارهای عاملی

جدول ۴ روایی همگرا

سازه	میانگین واریانس استخراج شده (AVE)
اعتماد	0.501
موفقیت پروژه	0.513

جدول ۵ ماتریس بارهای عاملی متقابل

معیارها	کد PLS	اعتماد	موفقیت پروژه
زمان	PSC01	0.314	0.67
هزینه	PSC02	0.235	0.525
کیفیت	PSC03	0.514	0.687
کارایی	PSC04	0.700	0.766
ایمنی	PSC05	0.372	0.696
رضایت ذی نفعان	PSC06	0.574	0.752
مزیت های رقابتی	PSC07	0.364	0.735
شهرت و اعتبار	PSC08	0.623	0.783
محدوده	PSC09	0.578	0.815
موفقیت در مدیریت پروژه	PSC10	0.349	0.695
صداقت	TC01	0.888	0.669
وفای به عهد	TC02	0.803	0.45
ثبات رفتار	TC03	0.806	0.611
حسن نیت	TC04	0.664	0.578
پیوند عاطفی	TC05	0.527	0.251
تبادل اطلاعات	TC06	0.699	0.520
احترام متقابل	TC07	0.709	0.479
تجربه همکاری	TC08	0.654	0.434
ارتباطات	TC09	0.583	0.211
انعطاف پذیری	TC10	0.63	0.509
توانایی حل مسئله	TC11	0.622	0.399
شهرت و اعتبار	TC12	0.694	0.355
کامل بودن قرارداد	TC13	0.756	0.521
دانش تخصصی	TC14	0.822	0.634
توان مالی	TC15	0.669	0.391

با توجه به معیار فورنل و لارکر، ماتریس فورنل و لارکر مطابق جدول (۶) صورت می گیرد که خانه های این ماتریس حاوی مقادیر ضرایب همبستگی بین سازه ها و قطر اصلی ماتریس جذر مقادیر AVE مربوط به هر سازه است. مدل اندازه گیری در صورتی روایی و اگرای قابل قبولی دارد که اعداد مندرج در قطر اصلی از مقادیر زیرین خود بیشتر باشد.

جدول ۶ ماتریس فورنل و لارکر

سازه	اعتماد	موفقیت پروژه
اعتماد	0.708	
موفقیت پروژه	0.695	0.717

مدل ساختاری. مدل ساختاری نشان می دهد چگونه متغیرهای پنهان در پیوند با یکدیگر قرار گرفته اند. پس از طراحی پرسشنامه و بررسی روایی و پایایی پرسشنامه، برای ارزیابی روابط بین متغیرها و تعیین رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل (ضریب مسیر B) و تعیین تأثیر گویه های متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته (R²) وارد مرحله مدل سازی می شویم.

در مدل ساختاری، تعیین اهمیت ضرایب مسیر و ارزیابی سطح R² امری مهم است. ابتدایی ترین معیار برای سنجش رابطه بین سازه ها در مدل ساختاری، اعداد معناداری T است.

در صورتی که مقدار این اعداد از ۱٫۹۶ بیشتر شود، نشان از صحت رابطه بین سازه ها و در نتیجه تأیید فرضیه های پژوهش

با ۰,۴۸۴ است. بر اساس استاندارد ذکر شده، این موضوع بیانگر این واقعیت است که وجود اعتماد در بین ذی‌نفعان کلیدی صنعت ساخت در ایران می‌تواند ۴۸/۴ درصد در موفقیت پروژه‌های عمرانی مؤثر باشد. طبق استاندارد عدد ۰,۴۸۴ در عین قابل قبول بودن در محدوده متوسط و قوی قرار دارد.

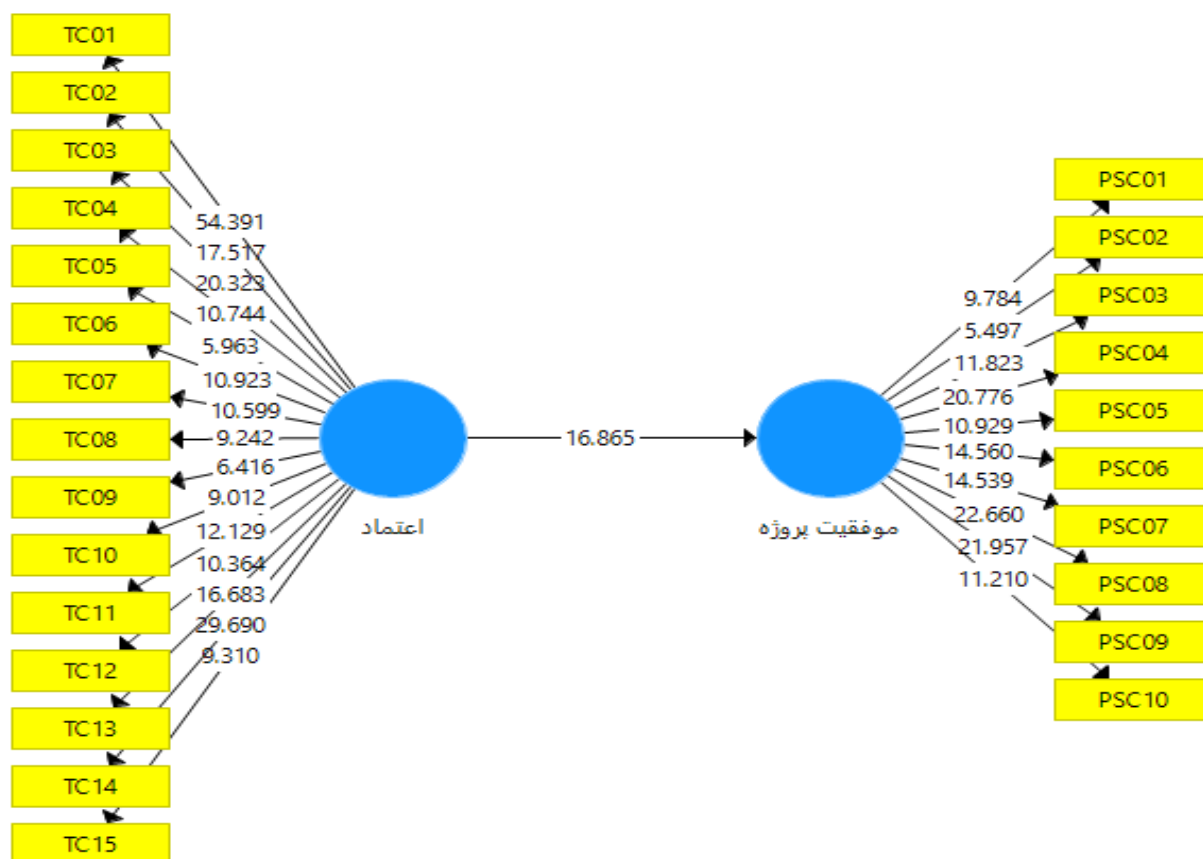
معیار استون گیسر (Q^2) که توسط استون و گیسر (Stone-Geyser) در سال ۱۹۷۵ معرفی شد، قدرت پیش‌بینی مدل را مشخص می‌سازد. به اعتقاد آن‌ها مدل‌هایی که دارای برازش بخش ساختاری قابل قبول هستند، باید قابلیت پیش‌بینی شاخص‌های مربوط به سازه‌های مدل را داشته باشند.

در سطح اطمینان ۹۵٪ است [36]. مطابق شکل (۷) اعداد معناداری سازه‌های اعتماد و موفقیت پروژه بالای ۱,۹۶ می‌باشد که بیانگر صحت رابطه آن‌ها می‌باشد.

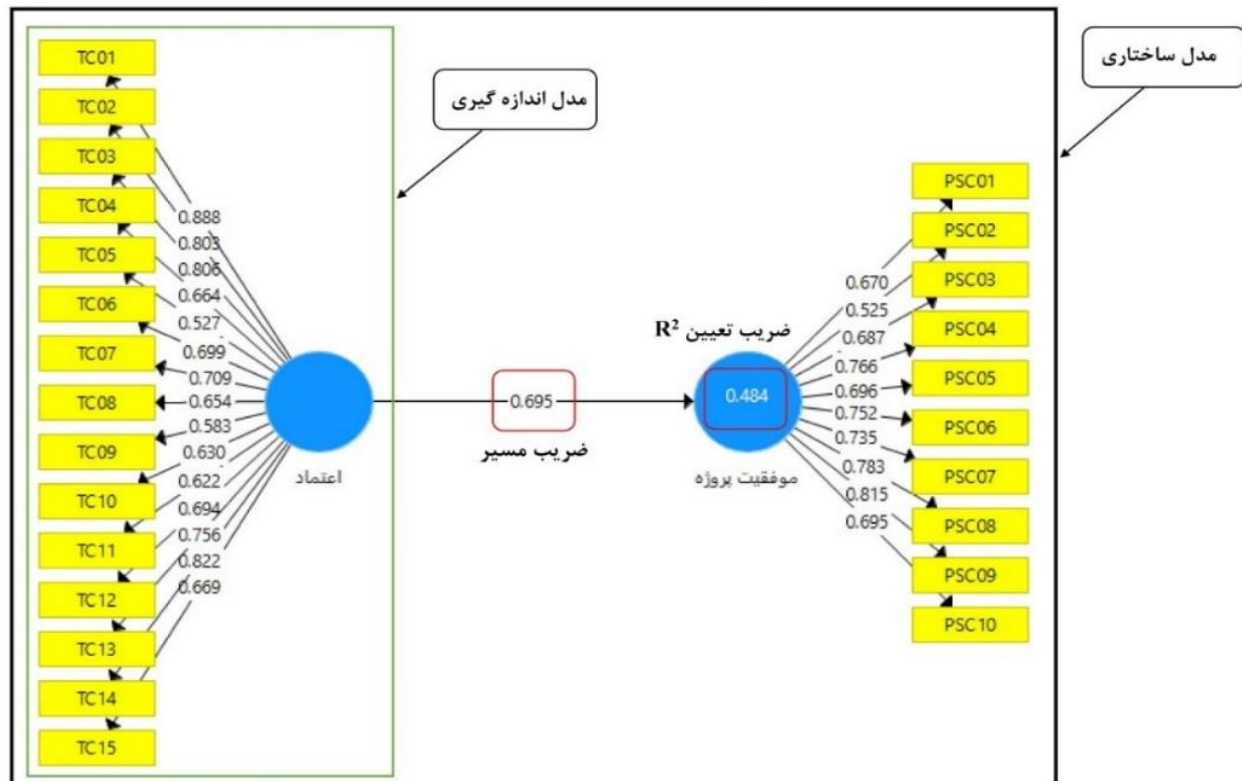
چین (Chin) مقادیر ۰,۶۷، ۰,۳۳ و ۰,۱۹ را برای R^2 در مدل‌های مسیر PLS به ترتیب به صورت قابل توجه، متوسط و ضعیف توصیف می‌کند.

به عبارت دیگر، اگر این شاخص کمتر از ۱۹ درصد باشد، متغیر مستقل به اندازه کافی متغیر وابسته را توصیف نمی‌کند. در نتیجه می‌توان گفت که برای توصیف متغیر وابسته به متغیرهای دیگری نیاز است.

همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، R^2 برابر



شکل ۷ اعداد معناداری T (T value)

شکل ۸ ضریب مسیر و ضریب R^2

۰,۶۹۵ است و این عدد نشان دهنده رابطه مثبت بین این دو متغیر است. لازم به ذکر است که ابتدا باید مقدار T بررسی شود. به عبارت دیگر، اگر مقدار T بزرگتر از ۱,۹۶ باشد، فرضیه تأیید می‌شود. طبق شکل (۶) مقدار T بین دو متغیر ۱۶,۸۶۵ است که نشان می‌دهد این رابطه توسط پاسخ‌دهندگان مهم تلقی می‌شود و فرضیه تحقیق تأیید شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

- بر اساس شکل (۷) ضریب مسیر (ضریب رگرسیون در حالت استاندارد) برای ارتباط بین اعتماد و موفقیت پروژه برابر با ۰,۶۹۵ و طبق شکل (۶) T Value، ۱۶,۸۶۵ است که بیانگر این است که بین وجود اعتماد در بین ذی‌نفعان کلیدی پروژه و موفقیت پروژه به طور مثبت در ایران رابطه قوی وجود دارد. (در صورتی که عدد T از ۱,۶۴، ۱,۹۶ یا ۲,۵۸ بیشتر شود، نشان از صحت رابطه بین سازه‌ها و در نتیجه تأیید فرضیه‌های پژوهش در سطح اطمینان ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ می‌باشد).
- جدول (۷) رتبه‌بندی شاخصه‌های اعتماد بر اساس بار عاملی (B) محاسبه شده توسط PLS را نشان می‌دهد. بر اساس بار

هنسلر در مورد شدت قدرت پیش‌بینی مدل در مورد سازه‌ها سه مقدار ۰,۰۲، ۰,۱۵ و ۰,۳۵ را تعیین نموده است. با توجه به اینکه معیار فوق در مدل مفهومی برابر با ۰,۲۱۰ می‌باشد و در رده متوسط تا قوی قرار دارد، به این معنی است که مدل قدرت پیش‌بینی تقریباً مناسبی در قبال شاخص‌های سازه موفقیت پروژه دارد. و در آخر به گفته هیر و همکاران برای اینکه مناسب بودن یا مناسب نبودن یک مدل تعیین گردد، از شاخص «ریشه میانگین مربعات باقی مانده استاندارد شده» (SRMR) استفاده می‌شود.

مقادیر این شاخص باید بین ۰,۰۸ تا ۰,۱ باشد. اگر این شاخص کمتر از ۰,۰۸ باشد یعنی مدل به دست آمده مناسب نیست. در این مطالعه عدد به دست آمده ۰,۱ می‌باشد که نشان از مناسب بودن مدل به دست آمده می‌باشد.

ارزیابی فرضیه تحقیق

فرضیه اصلی این تحقیق رابطه بین اعتماد و موفقیت پروژه‌های عمرانی در ایران بود. در این تحقیق ثابت شد که در ایران بین اعتماد و موفقیت پروژه رابطه مثبت وجود دارد. همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، ضریب مسیر بین این دو متغیر

پیمان‌های خود را رعایت می‌کنند) به این موضوع پرداخته‌اند. ۷. از منظر خبرگان بین وجود وفای به عهد در طرفین قرارداد و کاهش اختلافات و دعاوی و حتی کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت، رابطه مستقیم وجود دارد چرا که پیمانکار خود را متعهد می‌داند که حتی بدون وجود عوامل نظارتی کیفیت مد نظر درج شده در قرارداد را رعایت کند و کارها را طبق زمان‌بندی و با کیفیت و هزینه تعیین شده انجام دهد و تأخیر غیر مجاز ایجاد نکند و کارفرما نیز با مزین شدن به این صفت اخلاقی خود را متعهد می‌داند که مبلغ صورت وضعیت‌ها را به موقع پرداخت کند و به سایر تعهدات خود از جمله دستور کارهای شفاهی صادره از طرف خود پایبند باشد، لذا این موارد قطعاً باعث افزایش اعتماد و موفقیت پروژه خواهد بود.

جدول ۷ رتبه‌بندی معیارهای موفقیت پروژه بر اساس بار عاملی

رتبه	بار عاملی	کد شاخصه در PLS	شاخصه اعتماد
1	0.888	TC01	صداقت
2	0.822	TC14	دانش تخصصی
3	0.806	TC03	ثبات رفتار
4	0.803	TC02	تعهد و وفای به عهد
5	0.756	TC13	کامل بودن قرارداد
6	0.709	TC07	احترام متقابل
7	0.699	TC06	تبادل اطلاعات
8	0.694	TC12	شهرت و اعتبار
9	0.669	TC15	توان مالی
10	0.664	TC04	حسن نیت
11	0.654	TC08	تجربه همکاری
12	0.63	TC10	انعطاف‌پذیری و سازگاری
13	0.622	TC11	توانایی حل مسئله
14	0.583	TC09	ارتباطات
15	0.527	TC05	پیوند عاطفی

جدول (۸) رتبه‌بندی معیارهای موفقیت پروژه را نشان می‌دهد. بر این اساس بار عاملی معیارهای موفقیت پروژه، در تمامی موارد بالای ۰/۵۰ بودند و در نتیجه معنی‌داری آن‌ها تأیید می‌شود.

۷. جدول (۸) همچنین نشان می‌دهد که اتمام پروژه بر اساس طرح نهایی یعنی رعایت محدوده پروژه و شهرت و اعتبار برای شرکت، با داشتن بارهای عاملی ۰/۸۱۵ و ۰/۷۸۳، از

عاملی شاخصه‌های اعتماد، تمامی موارد به دلیل بار عاملی بیش از ۰/۵۰ معنی‌دار بودند. به عبارت دیگر همه شاخصه‌های پانزده‌گانه درج شده در جدول، رابطه مستقیم با اعتماد دارند و هر چه قدر مقدار هر کدام از این شاخصه‌ها در یکی از طرفین یا هر دو بیشتر باشد، باعث افزایش اعتماد بین دو طرف خواهد شد.

۳. جدول (۷) نشان می‌دهد معیار صداقت با داشتن بار عاملی ۰/۸۸۸ بیشترین سهم را در تبیین سازه اعتماد در پروژه‌های ساخت ایران ایفا می‌کند، این بدان معناست که از نظر ذی‌نفعان، وجود صداقت در یک شریک می‌تواند بیشترین تأثیر را در ایجاد اعتماد در آن‌ها داشته باشد.

۴. نتایج این پژوهش همچنین نشان می‌دهد معیار پیوند عاطفی که به معنای داشتن ارتباط عاطفی بین شرکا مانند پیوند قومیتی، خویشاوندی، دوستی، قرابت مکانی و... می‌باشد، با داشتن بار عاملی ۰/۵۲۷ کم‌ترین سهم را در تبیین سازه اعتماد ایفا می‌کند (جدول ۷). به عبارت دیگر در یک پروژه ساخت‌وساز پیوند قومیتی یا بومی بودن دو طرف، اگر چه از عوامل افزایش اعتماد است ولی نسبت به سایر شاخصه‌های اعتماد، وزن کمتری را به خود اختصاص داده است.

۵. بعد از عامل صداقت، دانش تخصصی و ثبات رفتار با داشتن بارهای عاملی ۰/۸۲۲ و ۰/۸۰۶ پررنگ‌ترین شاخصه‌ها در ایجاد اعتماد در یک شریک بوده‌اند که این نتیجه حاصل می‌شود که شرکت‌های پیمانکاری و مشاوران برای جلب اعتماد کارفرمایان باید دانش تخصصی خود را در همه زمینه‌ها بالا ببرند تا با جلب اعتماد آن‌ها بتوانند یک گام به موفقیت پروژه نزدیک‌تر شوند.

همچنین ثبات رفتار به عنوان یک ویژگی فردی باید در ذی‌نفعان کلیدی صنعت ساخت تقویت شود تا طرفین بتوانند روی یکدیگر حساب و به هم اعتماد کنند. وجود این ویژگی به خصوص در کارفرمایان بسیار ضروری است تا اعتماد بین کارفرما با پیمانکار و یا مشاور افزایش یابد و برعکس آن عدم ثبات رفتار باعث تزلزل و فرو ریختن اعتماد خواهد بود.

۶. شاخصه تعهد و وفای به عهد نیز در جایگاه چهارم قرار دارد که از منظر دینی نیز بسیار مورد تأکید قرار گرفته است، برای مثال آیه اول سوره مائده (یا ایها الذین آمنوا أوفوا بالعقود...) ای کسانی که ایمان آورده‌اید! به پیمان‌ها و قراردادهای وفا کنید... و آیه ۸ سوره مؤمنون (والذین هم لأماناتهم وعهدهم راعون...) و مؤمنان رستگار کسانی هستند که امانت‌ها و

واژه‌نامه

مدل‌سازی معادلات ساختاری	
Structural equation modeling (SEM)	
عوامل کلیدی موفقیت پروژه‌ها	
Key factors for project success (KFS)	
مثلث آهنین	Iron Triangle
معیارهای موفقیت پروژه	Project success criteria
عوامل موفقیت پروژه	Project success factors
روش مقطعی	Cross Sectional
شاخص روایی محتوا	Content Validity Index (CVI)
روش کمترین مربعات جزئی	partial least squares
پایایی ترکیبی	Composite Reliability
روایی همگرا	convergent validity
میانگین واریانس استخراج شده	
Average variance extracted (AVE)	
ریشه میانگین مربعات باقی مانده استاندارد شده	
Root Mean Squared Standardized Residuals	

سپاسگزاری

مهم‌ترین معیارهای موفقیت پروژه در ایران از نظر پاسخ‌دهندگان بوده است.

۸. همچنین کیفیت، زمان و هزینه یعنی مثلث طلایی موفقیت پروژه به ترتیب پایین‌ترین رتبه‌ها را با بارهای عاملی ۰,۶۸۷، ۰,۶۷۰ و ۰,۵۲۵ در ایران دارند. این بدان معناست که امروزه دیدگاه افراد نسبت به موفقیت پروژه تغییرات بسیاری کرده است و دیگر موفقیت پروژه را صرفاً به اتمام آن در زمان و هزینه پیش‌بینی شده و با کیفیت از پیش تعیین شده محدود نمی‌کنند. به بیان دیگر، افراد، امروزه با توجه شرایط صنعت ساختمان، دستیابی به معیارهای دیگر موفقیت پروژه را نسبت به مثلث طلایی در الویت می‌دانند.

جدول ۸ رتبه‌بندی شاخصه‌های اعتماد بر اساس بار عاملی

رتبه	بار عاملی	کد شاخصه در PLS	معیار موفقیت پروژه
1	0.815	PSC09	اتمام پروژه بر اساس طرح نهایی (محدوده)
2	0.783	PSC08	شهرت و اعتبار برای شرکت
3	0.766	PSC04	نیازمندی‌های عملکردی (کارایی)
4	0.752	PSC06	رضایت ذی‌نفعان
5	0.735	PSC07	مزیت‌های رقابتی برای شرکت
6	0.696	PSC05	ایمنی
7	0.695	PSC10	موفقیت در مدیریت پروژه
8	0.687	PSC03	کیفیت
9	0.670	PSC01	زمان
10	0.525	PSC02	هزینه

مراجع

- [1] Y. C. Yong and N. E. Mustafa, "Critical success factors for Malaysian construction projects: An investigative review," *International Journal of Built Environment and Sustainability*, vol. 4, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v4.n2.180>
- [2] A. I. Maghsoodi and M. Khalilzadeh, "Identification and evaluation of construction projects' critical success factors employing fuzzy-TOPSIS approach," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 5, pp. 1593-1605, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1970-2>

- [3] G. L. Phetlhu and H. Nel, "The stakeholders' perceptions on critical success factors for construction projects," *International Journal of Construction Management*, vol. 19, no. 3, pp. 235-249, 2018.
- [4] U. Ryciuk, "Identification of factors related to trust formation in construction supply chains," *Procedia Engineering*, vol. 182, pp. 627-634, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.168>
- [5] H. Akrouf and M. F. Diallo, "Fundamental transformations of trust and its drivers: A multi-stage approach of business-to-business relationships," *Industrial Marketing Management*, vol. 66, pp. 159-171, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2017.08.003>
- [6] S. Strahorn, G. Brewer, and T. Gajendran, "The influence of trust on project management practice within the construction industry," *Construction Economics and Building*, vol. 17, no. 1, pp. 1-19, 2017. <http://dx.doi.org/10.5130/AJCEB.v17i1.5220>
- [7] G. M. Gad and J. S. Shane, "Trust in the construction industry: A literature review," presented at the *Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network*, Atlanta, GA, USA, pp. 869-878, 2014. <https://doi.org/10.1061/9780784413517.217>
- [8] D. Zuppa, S. Olbina, and R. Issa, "Perceptions of trust in the US construction industry," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 23, no. 5, pp. 571-587, 2016. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2015-0081>
- [9] G. M. El Sabbagh, "A step towards IPD implementation: establishing trust in DBB projects," *Journal of Construction Management and Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 458-472, 2019.
- [10] W. Jiang, Y. Lu, and Y. Le, "Trust and project success: A twofold perspective between owners and contractors," *Journal of Management in Engineering*, vol. 32, no. 6, p.04016022, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000469](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000469)
- [11] Y. G. Joybari, M. H. S. Hosseini, I. Shakri, and M. Amiri, "Identifying the sources of trust of the employer to the contractor based on the characteristics of the contractor's reliability (case study: urban construction projects of Tehran)," *Welfare and Social Development Planning Quarterly*, vol. 9, no. 3, pp. 45-60, 2017. <https://doi.org/10.22054/qjsd.2017.8249>
- [12] G. F. de Oliveira and R. Rabechini Jr, "Stakeholder management influence on trust in a project: A quantitative study," *International Journal of Project Management*, vol. 37, no. 1, pp. 131-144, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.11.001>
- [13] R. Zeffane, "Do age, work experience and gender affect individuals' propensity to trust others? An exploratory study in the United Arab Emirates," *International Journal of Sociology and Social Policy*, vol. 38, no. 7/8, pp. 493-510, 2018. <https://doi.org/10.1108/IJSSP-07-2017-0093>
- [14] S. Tai, C. Sun, and S. Zhang, "Exploring factors affecting owners' trust of contractors in construction projects: a case of China," *SpringerPlus*, vol. 5, no. 1, article 1812, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3393-9>
- [15] D. Wang, K. Li, and S. Fang, "Analyzing the factors influencing trust in a construction project: evidence from a Sino-German eco-park in China," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 24, no. 4, pp. 331-343, 2018. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.3069>
- [16] S. M. Alvani and S. S. H. Hosseini, "A reflection on the theoretical foundations, concepts, and models of institutional (organizational) trust," *Journal of Measurement & Educational Evaluation Studies*, vol. 3, pp. 1-15, 2014.
- [17] N. Karimiyan, M. Esfahani, and N. Dialameh, "Identifying trust-building factors in the organization with an emphasis

- on Islamic teachings," *Scientific Research Quarterly of Islamic Management*, vol. 4, no. 2, pp. 45-60, 2017.
- [18] A. Hansen-Addy and E. Nunoo, "Critical factors affecting trust in construction partnering in the UK," *Environment*, vol. 6, no. 24, pp. 75-85, 2014.
- [19] F. T. Hartman, *Ten commandments of better contracting: A practical guide to adding value to an enterprise through more effective SMART contracting*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2003. <https://doi.org/10.1061/9780784406533>
- [20] J. F. Yeung, A. P. Chan, and D. W. Chan, "The definition of alliancing in construction as a Wittgenstein family-resemblance concept," *International Journal of Project Management*, vol. 25, no. 3, pp. 219-231, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.10.003>
- [21] D. Wang, *Trust factors and trust-building mechanics in engineering*, Ph.D. dissertation, Zhgnan University, 2008
- [22] E. Wong, D. Then, and M. Skitmore, "Antecedents of trust in intra-organizational relationships within three Singapore public sector construction project management agencies," *Construction Management and Economics*, vol. 18, no. 7, pp. 797-806, 2000. <https://doi.org/10.1080/014461900433087>
- [23] G. Wood, P. McDermott, and W. Swan, "The ethical benefits of trust- based partnering: the example of the construction industry," *Business Ethics: A European Review*, vol. 11, no. 1, pp. 4-13, 2002. <https://doi.org/10.1111/1467-8608.00254>
- [24] S.-O. Cheung, H. C. H. Suen, K. K. W. Wong, and T. Ng, "Behavioral aspects in construction partnering," *International Journal of Project Management*, vol. 21, no. 5, pp. 333-343, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00052-2)
- [25] J. T. Karlsen, K. Græe, and M. J. Massaoud, "Building trust in project- stakeholder relationships," *Baltic Journal of Management*, vol. 3, no. 1, pp. 22-33, 2008. <https://doi.org/10.1108/17465260810844239>
- [26] W. K. Wong, K. K. W. Wong, S.-O. Cheung, and H. C. H. Suen, "A framework for trust in construction contracting," *International Journal of Project Management*, vol. 26, no. 8, pp. 821-829, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.11.004>
- [27] P. S. P. Wong and S. O. Cheung, "Structural equation model of trust and partnering success," *Journal of Management in Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 70-80, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2005\)21:2\(70\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2005)21:2(70))
- [28] I. W. G. Kwon and T. Suh, "Trust, commitment and relationships in supply chain management: a path analysis," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 26-33, 2005. <https://doi.org/10.1108/13598540510578351>
- [29] P. S. Fong and B. W. Lung, "Interorganizational teamwork in the construction industry," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 133, no. 2, pp. 157-168, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:2(157))
- [30] M. P. Buvik and M. Rolfsen, "Prior ties and trust development in project teams: A case study from the construction industry," *International Journal of Project Management*, vol. 33, no. 7, pp. 1484-1494, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.06.002>
- [31] M. M. Khalfan, P. McDermott, and W. Swan, "Building trust in construction projects," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 12, no. 6, pp. 385-391, 2007. <https://doi.org/10.1108/13598540710826308>
- [32] J. Lee, J.-G. Park, and S. Lee, "Raising team social capital with knowledge and communication in information

- systems development projects," *International Journal of Project Management*, vol. 33, no. 4, pp. 797-807, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.12.001>
- [33] N. Janatyan, M. Hashemianfar, and M. Kasaei, "Integrated model of critical success factors of construction projects: A case of Esfahan," *International Journal of Research in Industrial Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 381-395, 2018. <https://doi.org/10.22105/riej.2018.143702.1053>
- [34] A. Albtoush, N. Gharaibeh, M. Al-Btoush, and A. Al-Hadid, "Critical success factors of construction projects in Jordan: An empirical investigation," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 1087-1099, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00470-8>
- [35] E. G. Sinesilassie, A. Tabish, A. Jha, and A. Beshah, "Modeling success factors for public construction projects with the SEM approach: Engineer's perspective," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 26, no. 10, pp. 2410-2431, 2019. <https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2018-0162>
- [36] M. Heydari, F. A. M. Rahim, and N. M. Aziz, "Developing a model to evaluate the impact of initiation activities on project success in Iran by considering managing stakeholder engagement as a moderator," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 397-418, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00659-y>
- [37] M. H. Anzabi, S. H. Yazdani, and H. Khaksar, "Investigating the perception of different stakeholders regarding the importance of project, plan and portfolio success criteria in an EPC project," in *Proceedings of the International Conference on Economic Management and Industrial Engineering*, 2015, pp. 120-130.
- [38] A. Frefer, M. Mahmoud, A. Haleema, and A. F. Almamlook, "Overview success criteria and critical success factors in project management," *Industrial Engineering & Management*, vol. 7, no. 1, pp. 1-6, 2018. 10.4172/2169-0316.1000244
- [39] B. J. Molaei and S. R. Rouhani, "Review of critical success factors (CSF) in construction projects," *Quarterly Scientific Journal of Human Resources & Capital Studies*, vol. 6, no. 3, pp. 50-69, 2022.
- [40] I. Y. Wuni and G. Q. Shen, "Critical success factors for modular integrated construction projects: a review," *Building Research & Information*, vol. 48, no. 7, pp. 763-784, 2020. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1669009>
- [41] F. T. Berssaneti and M. M. Carvalho, "Identification of variables that impact project success in Brazilian companies," *International Journal of Project Management*, vol. 33, no. 3, pp. 638-649, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.07.002>
- [42] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*, 6th ed., Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017.
- [43] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Seventh Edition and The Standard for Project Management (Brazilian Portuguese)*, Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021.
- [44] M. Ahmadvand and H. Eghbali, "Evaluating the Role Played by BIM in Successful Execution of Construction Projects in Iran," unpublished, 2020. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3568470>
- [45] T. Williams, "Identifying success factors in construction projects: A case study," *Project Management Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 97-112, 2016. <https://doi.org/10.1002/pmj.21558>
- [46] B. A. Hussein and O. J. Klakegg, "Measuring the impact of risk factors associated with project success criteria in

- early phase," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 119, pp. 711-718, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.079>
- [47] M. Radujković and M. Sjekavica, "Project management success factors," *Procedia Engineering*, vol. 196, pp. 607-615, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.048>
- [48] A. Davari and A. R. Rezazadeh, *Structural Equation Modeling with PLS Software*, Tehran: Publications of Academic Jihad Publishing Organization, 2017.

CONTENTS

Developing a Robust Data-Driven Model Based on Ground and Satellite Measured Data for Agricultural Drought Prediction in Iran	1
Mahan Azizi - Ali Abbasi	
Prediction and Analysis of the Probability of Climate Change and Water Scarcity in Yazd	29
Mohammad Reza Goodarzi - Maryam Sabaghzadeh	
Adapting Seismic Risk Zonation of The Seismic Design Code of Oil Company Facilities with The Seismic Design Code of Iran	49
Nima Shahbazi - Iman Ashayeri	
Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed	65
Adel Shakibi Nezhad - Sajjad Gholipour - Masoud Makarchian	
Experimental Study of the Correlation between Resilient Modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil	73
Siamak Shafaghatian, - Gholam Moradi	
Investigating the Effect of Trust among Key Stakeholders on the Success of Iranian Construction Projects	103
Majid Parchamijalal - Mina Alamdar	



**JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD**

ISSN 2008-7454

General Director: F. Irani
Editor-Chief: M. R. Esfahani
Published: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

M. Reza Esfahani	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
K. badv	Professor, Urmia University
J. Bolouri Bazaz	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Pouya	Professor, Ecole des Ponts Paris tech
S. M. Hosseini	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
N. Hafezi Moghaddas	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseinia	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Sh. Danesh	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Gh. Rakhshandehro	Professor, Shiraz University
M. H. Sebt	Professor, Amirkabir University of Technology
F. Shahabian Moghadam	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Kavussi	Professor, Tarbiat Modares University
H. Ganji Doost	Professor, Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
F. Moghadas Nejad	Professor, Amirkabir University of Technology
A. Mohammadzadeh Moghaddam	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
M. Kianoush	Professor, University of Ryerson

Text Editor: M. Dehghan

Administrative Director: T. Hooshmand

Typist: A. Noie – T. Hooshmand

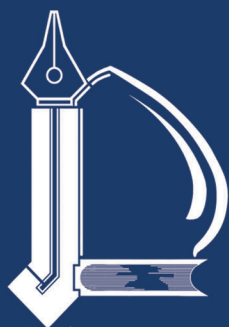
Journal of Civil Engineering

Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN

Tel: +98 51 38806024; **Email:** civil-ferdowsi@um.ac.ir

Web site: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



*Ferdowsi University
of Mashhad*

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Serial No. 49

ISSN 2783-2805

- | | |
|---|-----|
| Developing a Robust Data-Driven Model Based on Ground and Satellite Measured Data for Agricultural Drought Prediction in Iran | 1 |
| Mahan Azizi - Ali Abbasi | |
| Prediction and Analysis of the Probability of Climate Change and Water Scarcity in Yazd | 29 |
| Mohammad Reza Goodarzi
Maryam Sabaghzadeh | |
| Adapting Seismic Risk Zonation of The Seismic Design Code of Oil Company Facilities with The Seismic Design Code of Iran | 49 |
| Nima Shahbazi - Iman Ashayeri | |
| Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed | 65 |
| Adel Shakibi Nezhad - Sajjad Gholipour
Masoud Makarchian | |
| Experimental Study of the Correlation between Resilient Modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil | 73 |
| Siamak Shafaghatian, - Gholam Moradi | |
| Investigating the Effect of Trust among Key Stakeholders on the Success of Iranian Construction Projects | 101 |
| Majid Parchamijalal - Mina Alamdar | |

Vol. 38, No. 1
Spring, 2025