دانشگاه فردوسی مشهد

نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۴۱

نشریه مهندسی عمران فردوسی
سال ۳۶، شماره ۱، ۱۴۰۲
شماره پیاپی ۴۱

ISSN 2783-2805

ارزیابی پتانسیل و مقادیر تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت گرمسار به روشهای نوسانات سطح ایستابی و پیسکوپو ۱
الهام فیجانی - سحر میثمی - مرتضی مظفری

مدل‌سازی عددی سه-بعدی اندرکنش گسل شیب‌لغز و تونل با پوشش بتنی ۱۹
محمدامین برفه‌ئی - مهدا مرتضوی زنجانی - عباس سروش

پیش‌بینی تقاضای سفر با استفاده از روشهای سری زمانی میانگین متحرک خود همبسته (مطالعه موردی: آزادراه قم-تهران) ۳۵
حسن خاکسار - سید احمد الماسی
محمد مهدی خبیری - امیر گلرو - حسن بهمنی

بررسی امکان دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با استفاده از سیستمهای فتوولتاییک و در نظر گرفتن الزامات طرحهای توسعه شهری ۵۱
سیدسجاد رضائی نسب - عباسعلی طایفی نصرآبادی - سمیه اسدی
سیدعلی حاج سید تقیا

پاکسازی یک خاک رسی آلوده به ماده دی متیل فتالات با استفاده از روش الکتروکینتیک ۶۹
حسام فتحعلی - علی رئیسی استبرق - کرامت الله رضایی تیره شبانکاره
عبدالحسین هورفر

مطالعه آزمایشگاهی رفتار خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن ۸۵
نیلوفر پیشوایی - مرتضی جیریایی شراهی - مسعود عامل سخی

سال۳۶، شماره۱
بهار، ۱۴۰۲

نشریه مهندسی عمران فردوسی

ISSN: 2008-7454

سردبیر: 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 شهابیان 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

ویراستار ادبی: الهام دهقان

مسئول دفتر نشریه : تکتم هوشمند

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

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز **(ISC)** نمایه می‌شود. http://www.srlst.com

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

وب سایت : **http://civil-ferdowsi.um.ac.ir** : پست الکترونیکی : **civil-ferdowsi@um.ac.ir** شماره تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۲٤

چاپ : چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

ارزیابی پتانسیل و مقادیر تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت گرمسار به روشهای نوسانات سطح ایستابی و پیسکوپو	الهام فیجانی – سحر میثمی– مرتضی مظفری	۱
مدل‌سازی عددی سه‌بعدی اندرکنش گسل شیب‌لغز و تونل با پوشش بتنی	محمدامین برفه‌ئی- مهدا مرتضوی زنجانی عباس سروش	۱۹
پیش‌بینی تقاضای سفر با استفاده از روشهای سری زمانی میانگین متحرک خود همبسته (مطالعه موردی: آزادراه قم-تهران)	حسن خاکسار – سید احمد الماسی محمد مهدی خبیری – امیر گلرو حسن بهمنی	۳۵
بررسی امکان دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با استفاده از سیستمهای فتوولتاییک و در نظر گرفتن الزامات طرحهای توسعه شهری	سیدسجاد رضائی نسب عباسعلی طایفی نصرآبادی سمیه اسدی - سیدعلی حاج سید تقیا	۵۱
پاکسازی یک خاک رسی آلوده به ماده دی متیل فتالات با استفاده از روش الکتروکینتیک	حسام فتحعلی- علی رئیسی استبرق کرامت الله رضایی تیره شبانکاره عبدالحسین هورفر	۶۹
مطالعه آزمایشگاهی رفتار خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن	نیلوفر پیشوایی- مرتضی جیریایی شراهی مسعود عامل سخی	۸۵

Journal Ferdowsi Civil Engineering, 36, 1, 2023. (1-18)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods

Research Article

Elham Fijani[1], Sahar Meysami[2], Morteza Mozafari[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77818.1169

1. Introduction

Groundwater is one of the main sources of fresh water, especially in arid and semi-arid areas. In recent years, the increase in population and water demands have led to excessive withdrawal from the aquifer, which has seriously threatened groundwater resources. Therefore, investigating the potential of groundwater recharge and estimating the amount of recharge is essential for the sustainable management of groundwater and the preservation of human health and the environment. The drawdown movement of water recharging water table can be termed as groundwater recharge, which ultimately increases the amount of groundwater storage (Healy 2010). Many researches have been conducted in Iran and other parts of the world to investigate the potential and amount of groundwater recharge of aquifers. Scanlon et al. (2002) have divided the methods of estimating water recharge into three categories of surface water area, unsaturated area and saturated area based on hydrological zones. Each of these areas provides the amount of recharge in time and space scale, and in each area, the recharge estimation methods are divided into physical methods, tracking and numerical modeling. Estimation methods in surface water and unsaturated areas generally provide an estimate of net recharge, while saturated area methods evaluate the amount of actual recharge. Many recharge estimation methods are based on the water balance equation. Hung Vu and Merkel (2019) investigated the groundwater recharge amount of Hanoi city in Vietnam with different methods. The obtained results showed that the water level fluctuation method is more consistent and more reasonable than the other approaches. In 2022, Githinji et al. investigated the potential groundwater recharge of two regions of Kenya by integrating factors that influence groundwater recharge using Analytical Hierarchical Process, and Fuzzy-Analytical Hierarchical Process in ArcGIS. The factors investigated in this research included land use, slope, drainage density, geomorphology, geology, line density and soil texture. The obtained maps showed that high groundwater recharge potential zones occur within the generally flat flood plains consisting of alluvium lithology. In contrast, low potential groundwater recharge zones occur in the upland plains. Considering that Garmsar plain is located in a hot and dry area and groundwater is the main source of water supply for agriculture, drinking and industry of the people of this region, the study of groundwater supply of Garmsar plain is of great importance as a sustainable management. Therefore, the purpose of this research is to evaluate the recharge potential as well as to estimate the amount of groundwater recharge in the Garmsar Plain aquifer. For this purpose, in this study, first, the recharge potential of the Garmsar Plain aquifer was investigated based on six factors of slope, land use, lithology, geomorphology, drainage density and line density, and then, in order to validate and estimate the amount of groundwater recharge, Piscopo method and the method of groundwater level fluctuations is used, which is based on the water balance equation.

2. Study Area

The aquifer of the Garmsar Plain is a part of the secondary watershed of the Central Desert and the main watershed of the Central Plateau. Garmsar study area is located in Semnan province on the road from Tehran to Semnan. This area is spread in the north of the main catchment area of the central plateau, between longitudes 52°7 to 53°4 east and latitudes 34°52 to 35°46 north. The extent of this area is about 5532 square kilometers, and the extent of the plain and its heights are equal to 2322 and 3210 square kilometers, respectively. Geographically, this region is located in the southern part of the Alborz Mountains and the northern part of the central desert. This region has a dry climate, so that the minimum and maximum average annual temperature is 4 and 20 °C,

*Manuscript received: July 22, 2022, Revised, November 9, 2022, Accepted, December 17, 2022.

[1] Corresponding Author. Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.
Email: efijani@ut.ac.ir.
[2] Master Student of Hydrogeology, School of Geology, College of Science, University of Tehran.
[3] Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

respectively, and the minimum and maximum average temperature values for the highlands and the plain are 12.9 and 19.9 °C, respectively (the annual temperature of the basin is 13.7 °C). According to the studies conducted during the 45-year statistical period from 1345-46 to 1389-90, the average annual rainfall in the highlands and plains is estimated to be 200.9 and 81.4 mm, respectively. The evaporation parameter has been analyzed and investigated in the 30-year period of 1360-90. The annual evaporation from the open water surface in the plain and the highlands of the study area is 1970 and 1364.5 mm, respectively. The temperature difference between summer and winter in this area is large and this plain is poor in terms of vegetation. From the geological point of view, the aquifer of the Garmsar Plain study area is limited to the alluvial terraces from the east and to the Kahrizak conglomerate and Upper Red formation from the northeast. The north and northwest of this plain is covered by the Lower Red formation with chalk, salt and clay units, and the south, southwest and southeast edges of the plain are covered by Quaternary deposits. The main aquifer of the plain is formed in the Garmsar alluvial cone. The Garmsar alluvial fan is the result of the accumulation of sedimentary deposits of the Hableh River on the impermeable bedrock of Marl and Shale. The Hableh River is the main source of recharging the plain and the aquifer is of unconfined type. The alluvial aquifer of Garmsar Plain has an area of 785 square kilometers; the average thickness of the alluvium and the saturated layer are about 140 meters and 35 meters, respectively.

3. Methodology

Groundwater recharge depends on many geological factors. Due to the fact that the factors affecting groundwater recharge are extensive and their field investigation requires spending a lot of money and time, remote sensing and geographic information system is considered a suitable tool to investigate the potential of recharge. In this research, six factors of slope, land use, geomorphology, lithology, drainage density and line density have been used to investigate the recharge potential. Each of these parameters is scored according to table (1) and combined according to equation (1) and finally the final map is obtained.

$$RP = (S_r \times S_w) + (D_r \times D_w) + (LU_r \times LU_w) + (L_r \times L_w) + (LDr \times LD_w) + (GM_r \times GM_w) \quad (1)$$

Where r is the rank assigned to each of the parameter classes, which has values between 1 and 4, and w is the weight of each parameter.

The method of water table fluctuations is based on the water balance equation and by analyzing the fluctuations of the groundwater level, it provides an estimate of the amount of recharge. The water table fluctuation method is based on the assumption that the increase of the groundwater level in unconfined aquifers due to recharge has reached the water table level. The data required in this method is the data of the groundwater level and specific yield and is calculated with the following relationship:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2)$$

Where R is the groundwater recharge [L/T], Δh is the fluctuation of the groundwater level during the recharge period [L], Δt is the length of the recharge period [T] and Sy is the specific yield (without dimension). In the above equation, it is assumed that the water that reaches the water table immediately turns into groundwater storage.

Table1. Ranks and weights assigned to each parameter

Parameter	Class	Rank	Weight
slope	Low (0-50º) Moderate (50-20º) High (20º<)	3 2 1	**0.1**
Land use	Agricultural lands and pastures Gardens Bare lands and human facilities	3 2 1	**0.15**
Geomorphology	Landforms with very high permeability (river bed and alluvial plain) Landforms with high permeability (alluvial fan) Landforms with medium permeability (karst domains) Landforms with low permeability (irregular slopes, erosive blades, fault abysses)	4 3 2 1	**0.25**
Lithology	Discrete formations with high permeability Hard formations with moderate permeability Formations with low permeability	4 2 1	**0.2**
Drainage Density	Low density (0-1.5 km/km^2) Medium density (1.5-3 km/km^2) High density (3-5.3 km/km^2)	3 2 1	**0.2**
Linear Density	Low density (0-0.37 km/km^2) Medium density (0.37-1.08 km/km^2) High density (1.08-2.96 km/km^2)	1 2 3	**0.1**

Another method used in this study to evaluate the amount of recharge is the Piscopo method. This method is provided by Piscopo and is calculated as follows:

Soil permeability + rainfall + slope percentage = recharge amount (3)

In this method, the above factors are added together and classified according to table (2).

Table2. Classification of effective factors in recharge

Slope		Rainfall		Soil permeability		Recharge	
Slope%	Rank	Rainfall(mm)	Rank	Range	Rank	Range	**Rank**
<2	4	850<	4	High	5	11-13	**10**
2-10	3	700-850	3	Moderate to high	4	9-11	**8**
10-33	2	500-700	2	Moderate	3	7-9	**5**
33<	1	<500	1	Low	2	5-7	**3**
				Very Low	1	3-5	**1**

4. Result and Discussion

To prepare the final groundwater recharge potential map, the rank of each parameter was multiplied by its weight and then added together. The final map obtained shows that the top part of the alluvial fan has the highest recharge potential due to the high permeability and low water density. After that, the highest amount of recharge due to high permeability, agricultural activities and suitable slope is related to Garmsar alluvial fan. The amount of recharge potential decreases in the southern and western parts of the region due to the areas with low permeability and barren lands (Figure 1).

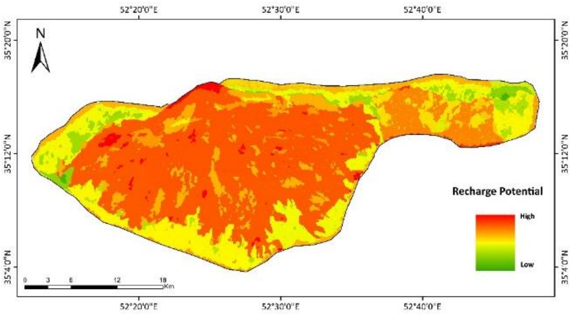


Figure 1. groundwater recharge potential map

Temporal variations of the groundwater level are among the most important characteristics of the aquifer. Groundwater level changes depend on recharge and discharge amounts, distance from recharge areas and pumping rate, and unit hydrograph is a suitable indicator for long-term changes of groundwater level. To investigate the unit hydrograph of Garmsar plain, the data of observation wells in the water years 1372-73 to 1395-96 were used. The results showed that the average long-term drawdown in Garmsar plain aquifer is 0.93 meters per year.

In order to calculate the net recharge by the method of water table fluctuations, the water level data of 40 observation wells during the water years of 1388-1389, 1389-1390 and 1390-1391 were analyzed. The information of the observation wells was entered into the geographic information system software and a Thiessen polygon was drawn for each well. Then, the amount of water volume decreased or increased in each piezometer was obtained from the multiplying the specific yield with the area of the polygon and the difference in the water level of the piezometers according to equation (2). Since every year some water from the aquifer is pumped out, the amount of discharge was also included in the calculations. In order to obtain the amount of pumping and discharge of the wells in each polygon, it was calculated and added to equation (2) as follows:

$$R=S_y\frac{dh}{dt}=S_y\frac{\Delta h}{\Delta t}+\text{pumping} \qquad (4)$$

According to the calculations, the value of Δh of the aquifer varies from -2 m to 0.8 m. Also, according to the information obtained from the regional water organization, the average specific yield is 0.05. By multiplying the changes in the groundwater level in each observation well with the amount of specific irrigation and then summing it with the discharge amount, the recharge rate in each observation well is obtained. After the recharge rate of each observation well based on which the Thiessen polygon was drawn was calculated, interpolation was done and the net recharge zoning map was obtained (Figure 2). The amount of annual recharge of the aquifer varies from 1.95 mm in the southern parts to 478 mm in the northern parts by the method of water table fluctuations.

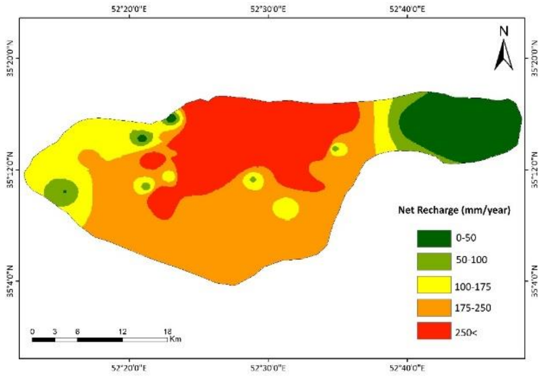


Figure 2. Groundwater recharge zoning map using water table fluctuations method

In the next step, the Piscopo method was used to prepare a zoning map of the groundwater recharge in the Garmsar plain aquifer. In this method, to calculate the slope, a digital elevation model of the area was prepared and after extracting the slope, it was ranked according to the criteria of table (2). The slope of the area varies from 2 to 37%. The annual rainfall of the plain was collected from the meteorological system and the regional water organization of Semnan. The amount of rainfall in the study area and Garmsar plain is less than 500 mm; as a result, according to table (2), the entire area of the aquifer has a rank of one. In order to obtain the infiltration rate, the region's permeability information was collected and divided into five categories according to table (2). Finally, the maps related to the three factors of slope, permeability and rainfall were combined. Figure (3) shows that the amount of recharge decreases from the north to the south of the region, and the highest amount of recharge is related to the northern parts of the aquifer, which is located at the top of the alluvial fan.

According to the results of both methods of estimating the amount of groundwater recharge, the highest amount of recharge occurred in the place of the alluvial fan and the groundwater inflow to the aquifer, where the materials are coarser and have higher permeability. In addition, the areas with high amounts of recharge are mostly located in agricultural lands. In the final map of groundwater recharge potential, the areas with the highest potential are in the northern parts of the aquifer, which is consistent with the recharge values estimated by both methods. Although the results of the comparison of recharge values and recharge potential are slightly different in some parts of the region.

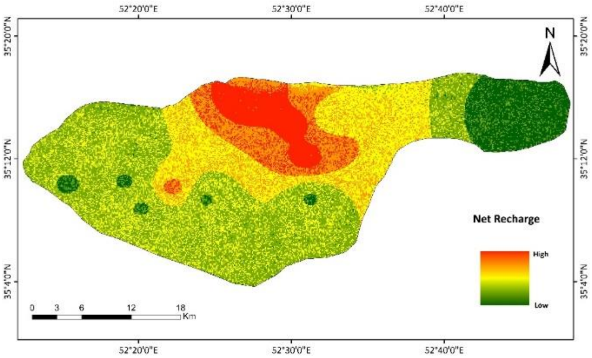


Figure 3. Groundwater recharge zoning map using Piscopo method

5. Conclusion

Since the Garmsar aquifer is the main source of agriculture in the region, the sustainable water management is essential. For this reason, in this research, maps of recharge potential were prepared at first. The obtained results showed that the recharge potential depends a lot on the permeability and land use, and the top part of the alluvial fan itself has a high potential. After that, the amount of net recharge of the area was evaluated by two methods of water table fluctuation and Piscopo. The zoning map obtained from the water table fluctuation method shows that the amount of recharge decreases from the north to the south and east of the region, and the initial parts of the Garmsar alluvial fan have the highest amount of net recharge.

In the map obtained by the Piscopo method, the general trend shows that the amount of groundwater recharge decreases from the north to the south. It is noteworthy that the trend obtained from the two methods is the same and they differ from each other only in some points, and both of these methods confirm the result obtained from the recharge potential map. Therefore, the method used in this research can be used to evaluate the potential and recharge values. However, due to the lack of data, the results may be subject to some uncertainty. Therefore, it is recommended to carry out additional tests, especially in measuring of hydraulic conductivity in the area.

مهندسی عمران فردوسی

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

ارزیابی پتانسیل و مقادیر تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت گرمسار به روشهای نوسانات سطح ایستابی و پیسکوپو*

مقاله پژوهشی

الهام فیجانی[۱]   سحر میثمی[۲]   مرتضی مظفری[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77818.1169

چکیده منابع آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین آب شیرین به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک به شمار می‌آید. برآورد میزان تغذیه یکی از مسائل بسیار مهم در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و ارزیابی پتانسیل برداشت از آبخوان می‌باشد. در این پژوهش ابتدا میزان پتانسیل تغذیه در آبخوان دشت گرمسار با استفاده از شش فاکتور شیب، کاربری اراضی، ژئومورفولوژی، لیتولوژی، تراکم زهکشی و تراکم خطواره‌ها به دست آمد و سپس به منظور صحت‌سنجی نقشه حاصل، ارزیابی تغذیه به روش نوسانات سطح ایستابی و روش پیسکوپو انجام شده است. نتایج به دست آمده از نقشه‌های پتانسیل تغذیه نشان دادند که میزان آن از سمت مخروط افکنه در شمال محدوده به سمت نواحی حاشیه کاهش پیدا می‌کند. میزان تغذیه سالانه آبخوان به روش نوسانات سطح ایستابی از ۱/۹۵ میلی‌متر در نواحی جنوبی تا ۴۷۸ میلی‌متر در نواحی شمالی تغییر می‌کند. نقشه‌های به دست آمده از هر دو روش روند یکسانی را در منطقه نشان دادند؛ به طوری که شمال محدوده آبخوان که در رأس مخروط افکنه گرمسار قرار دارد، دارای بیشترین میزان تغذیه است و این میزان به سمت جنوب و حاشیه آبخوان کاهش پیدا می‌کند. نتایج به دست آمده از ارزیابی مقدار تغذیه به خوبی نقشه پتانسیل را تأیید کردند.

واژه‌های کلیدی تغذیه آب زیرزمینی، نوسانات سطح ایستابی، آبخوان گرمسار، پتانسیل تغذیه.

Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods

Elham Fijani   Sahar Meysami   Morteza Mozafari

Abstract *Groundwater resources are one of the main sources of freshwater supply, especially in arid and semi-arid areas. Estimating the amount of recharge is one of the most important problems in the sustainable management of groundwater resources and assessing the abstraction potential of the aquifer. In this research, first, the recharge potential in the Garmsar plain aquifer was obtained using six factors including slope, land use, geomorphology, lithology, drainage density, and line density, and then, to validate the resulting map, recharge was evaluated using the water table fluctuations and Piscopo methods. The results from the recharge potential map showed that its amount decreases from the alluvial fan in the north of the area to the margins. The amount of annual recharge of the aquifer varies from 1.95 mm in the south to 478 mm in the north of the area by the water level fluctuations method. The maps obtained from both methods showed the same trend in the area; the north of the aquifer area, which is located at the top of the Garmsar alluvial fan, has the highest amount of recharge, and the values decrease towards the south and the edge of the aquifer. The results obtained from the evaluation of the groundwater recharge value confirmed the potential map well.*

Key Words Groundwater recharge, water table fluctuations, Garmsar aquifer, recharge potential.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۴/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۶ می‌باشد

(۱) نویسنده مسئول: استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران.

Email: Efijani@ut.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران.

(۳) استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران.

مقدمه

آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی آب شیرین به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک که مقدار بارندگی کمی دارند، به شمار می‌آید. در سالهای اخیر افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش نیازهای آبی، برداشت بی‌رویه از آبخوان را منجر شده که این مسئله منابع آب زیرزمینی را با تهدید جدی مواجه کرده است. از این رو بررسی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی و برآورد میزان تغذیه موضوع مهمی است که بررسی آن به منظور مدیریت پایدار آبهای زیرزمینی و حفظ سلامت انسان و محیط امری ضروری به شمار می‌آید.

تغذیه عبارت است از جریان رو به پایین آب به سمت سطح ایستابی که باعث افزایش ذخیره آبخوان می‌شود [1]. تغذیه به دو صورت متمرکز و پراکنده اتفاق می‌افتد. تغذیه متمرکز تغذیه ناشی از گودیها و فروافتادگیهایی نظیر رودخانه، دریاچه و... می‌باشد. تغذیه پراکنده ناشی از بارش یا آبیاری بوده که نسبتاً یکنواخت است و در سطح بزرگ روی می‌دهد [2]. راشتون تغذیه را به دو گروه تغذیه واقعی و تغذیه پتانسیل تقسیم‌بندی کرده است. تغذیه واقعی آبی است که به سطح ایستابی رسیده و از مطالعات آب زیرزمینی تخمین زده می‌شود. در حالی که تغذیه پتانسیل معرف میزان آب نفوذی است که براساس مطالعات آبهای سطحی و منطقه غیراشباع تخمین زده می‌شود [3].

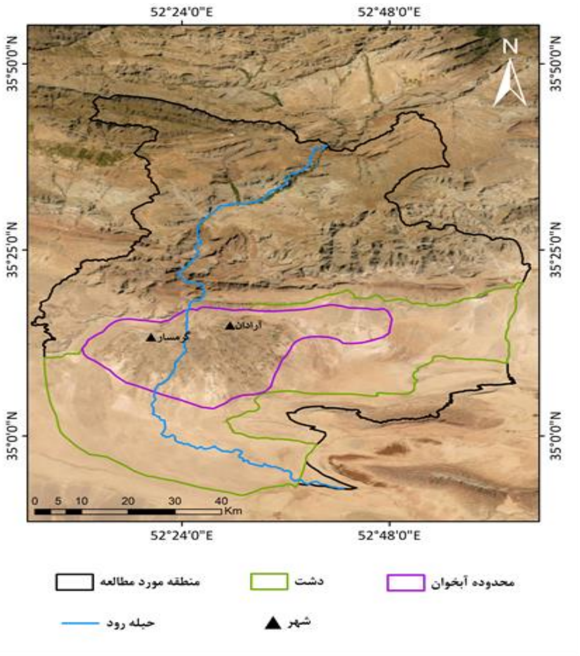
مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با بررسی پتانسیل و میزان تغذیه آبخوانها در ایران و سایر نقاط جهان انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. اسکانلون و همکاران روشهای برآورد تغذیه را بر اساس نواحی هیدرولوژیکی به سه دسته ناحیه آب سطحی، ناحیه غیراشباع و ناحیه اشباع تقسیم‌بندی کرده‌اند. هر کدام از این نواحی میزان تغذیه را در مقیاس زمان و مکان ارائه می‌کنند و در هر ناحیه روشهای برآورد تغذیه خود به روشهای فیزیکی، ردیابی و مدل‌سازی عددی تقسیم می‌شوند. روشهای برآورد در نواحی سطحی و غیراشباع عموماً برآوردی از تغذیه خالص ارائه می‌دهند، در حالی که روشهای ناحیه اشباع مقدار تغذیه واقعی را ارزیابی می‌کند. بسیاری از روشهای برآورد تغذیه بر معادله بیلان آب استوار هستند. احمدی و همکاران [4] میزان تغذیه دشت نیشابور را به روش نوسانات سطح ایستابی و رویکرد مدل‌سازی معکوس بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در عمده پلیگونهای دشت بهترین برازش با حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای حاصل می‌شوند. مقدار متوسط سالانه تغذیه در کل دشت با استفاده از این روش معادل ۲۸۸/۵۱ میلیون مترمکعب حاصل گردید. هانگ وو و مرکل [5] میزان تغذیه شهر هانوی در ویتنام را با روشهای مختلفی بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که روش نوسان سطح آب نتایج منطقی ارائه می‌دهد و برای منطقه هانوی مناسب بوده است. در این منطقه دو آبخوان با سن هولوسن و پلیستوسن قرار دارد. متوسط میزان تغذیه آبخوان هولوسن از ۱۸۸ میلی‌متر در سال تا حدود ۶۰۰ میلی‌متر در سال متغیر بود و متوسط تغذیه آبخوان پلیستوسن از ۱۷۸ تا ۵۲۵ میلی‌متر بر سال تغییر می‌کرد. در مطالعه دیگری که توسط آدجی[6] انجام شده است، از روش نوسانات سطح ایستابی برای ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی در شیب جنوبی آتشفشان مراپی اندونزی استفاده شد. شیب جنوبی این آتشفشان نقش مهمی در تغذیه آب زیرزمینی این منطقه دارد. نتایج به دست آمده نشان دادند که یکی از عوامل مهم کنترل‌کننده تغذیه در این ناحیه واحدهای ژئومورفولوژیکی است که آبخوان در آن قرار دارد. شعبان و همکاران[7] از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای بررسی پتانسیل تغذیه لبنان غربی استفاده کردند. فاکتورهای مورد بررسی برای پتانسیل تغذیه خطواره، تراکم زهکشی، لیتولوژی، میزان کارستی شدن و کاربری اراضی بود. نتایج به دست آمده نشان دادند که بهترین مناطق مناسب تغذیه در ارتفاعات مکانهایی هستند که گسترش کارست در آنها مشاهده می‌شود. همچنین نقشه‌های نهایی گویای آن بودند که ۵۷٪ منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل تغذیه‌ای بالا تا بسیار بالا است. گیتینجی و همکاران[8] پتانسیل تغذیه دو منطقه از کنیا را با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش فازی- تحلیل سلسله مراتبی بررسی کردند. فاکتورهای مورد بررسی در این پژوهش شامل کاربری اراضی، شیب، تراکم زهکشی، ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، تراکم خطواره‌ها و بافت خاک بودند. نقشه‌های به دست آمده نشان دادند که بیشترین میزان تغذیه در آبرفت، دشت سیلابی و مناطقی با تراکم خطواره بالا به وقوع می‌پیوندد. در نهایت نتایج به دست آمده با استفاده از میزان هدایت الکتریکی صحت‌سنجی شدند. در این نوع صحت‌سنجی فرض بر آن بوده که در نقاطی که تغذیه رخ می‌دهد میزان هدایت الکتریکی به

علت اختلاط با آب وارد شده و ماندگاری کمتر آب در زیر زمین کمتر است.

با توجه به اینکه دشت گرمسار در ناحیه گرم و خشک قرار دارد و آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت مردم این منطقه به شمار می‌آید، بررسی تغذیه آب زیرزمینی دشت گرمسار به منظور مدیریت پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، هدف از این پژوهش، ارزیابی پتانسیل تغذیه و همچنین برآورد مقادیر تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت گرمسار می‌باشد. به این منظور، در این مطالعه ابتدا پتانسیل تغذیه آبخوان دشت گرمسار بر اساس شش فاکتور شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، ژئومورفولوژی، تراکم زهکشی و تراکم خطواره بررسی شده و سپس به منظور صحت‌سنجی و برآورد میزان تغذیه، از روش پیسکوپو [9] و روش نوسانات سطح آب زیرزمینی (Water Table Fluctuations) استفاده شده است که مبتنی بر معادله بیلان آب می‌باشد.

مواد و روشها

منطقه مورد پژوهش. آبخوان دشت گرمسار در محدوده مطالعاتی گرمسار جزئی از حوضه آبریز درجه دو کویر مرکزی و حوضه آبریز اصلی فلات مرکزی است. محدوده مطالعاتی گرمسار در استان سمنان و در مسیر جاده تهران به سمنان واقع شده است. این محدوده در شمال حوضه آبریز اصلی فلات مرکزی، بین طولهای جغرافیایی'۷ °۵۲ تا '٤ °۵۳ شرقی و عرضهای جغرافیایی '۵۲ °۳٤ تا '٤٦ °۳۵ شمالی گسترده شده است (شکل ۱). وسعت این محدوده در حدود ۵۵۳۲ کیلومتر مربع و وسعت دشت و ارتفاعات آن به ترتیب برابر با ۲۳۲۲ و ۳۲۱۰ کیلومتر مربع می‌باشد. از لحاظ جغرافیایی این منطقه در قسمت جنوبی کوه‌های البرز و قسمت شمالی کویر مرکزی واقع شده است. این منطقه دارای آب و هوای خشک کویری است به طوری که حداقل و حداکثر مقدار متوسط دمای سالانه آن به ترتیب ٤ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد است و مقادیر حداقل و حداکثر مقدار متوسط دما برای ارتفاعات و دشت به ترتیب ۱۲/۹ و ۱۹/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (درجه حرارت سالانه حوضه ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد است). با توجه به مطالعات انجام شده در دوره شاخص آماری ٤۵ ساله ٤٦-۱۳٤۵ تا ۹۰-۱۳۸۹، میانگین بارندگی سالیانه در ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر با ۲۰۰/۹ و ۸۱/٤ میلیمتر برآورد شده است. پارامتر تبخیر، در دوره شاخص ۳۰ ساله ۹۰-۱۳٦۰ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. تبخیر از سطح آزاد آب سالانه در دشت و ارتفاعات محدوده مطالعاتی به ترتیب ۱۹۷۰ و ۱۳٦٤/۵ میلیمتر می‌باشد. اختلاف دمای تابستان و زمستان در این منطقه زیاد بوده و این دشت از نظر پوشش گیاهی فقیر است.



شکل ۱ موقعیت آبخوان منطقه مورد مطالعه

در محدوده مطالعاتی گرمسار رودخانه‌های متعددی قرار دارند که از آن جمله می‌توان به حبله رود، دالی چای، دره چهار طاق، دره خوش آب رود اشاره کرد. حبله رود زه‌کش اصلی محدوده است که از کوه‌های شمالی فیروزکوه سرچشمه می‌گیرد و عمده جریانات منطقه مورد مطالعه را دریافت کرده و در نهایت وارد محدوده مطالعاتی گرمسار می‌شود. بر اساس آمار اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای، مصرف آب در این محدوده مطالعاتی شامل ۱۴۰/۸۷ میلیون مترمکعب در سال از آبهای زیرزمینی و ۸۴/۸۸ میلیون مترمکعب از جریان‌های سطحی است. از مقدار آب استحصال شده از منابع آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی گرمسار ۸۹٪/۵ در بخش کشاورزی، ٦/٦٪ در بخش شرب و ۳/۹٪ در بخش صنعت مصرف می‌گردد [10].

از نظر زمین‌شناسی، آبخوان محدوده مطالعاتی دشت گرمسار از شرق به تراسهای آبرفتی و از شمال شرق به کنگلومرای کهریزک و سازند قرمز فوقانی محدود می‌گردد. شمال و شمال غرب این دشت را سازند قرمز زیرین با واحدهای گچ، نمک و رس و حاشیه جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی دشت را نهشته‌های کواترنری در بر گرفته است [11]. بر اساس آمار کسب شده از سازمان آب منطقه‌ای، آبخوان اصلی دشت درون مخروط افکنه گرمسار تشکیل شده است. مخروط افکنه گرمسار حاصل تجمع نهشته‌های رسوبی رودخانه حبله رود بر روی سنگ کف غیرقابل نفوذ مارنی و شیلی می‌باشد. رودخانه حبله رود عامل اصلی تغذیه دشت و آبخوان است. آبخوان آبرفتی دشت گرمسار ۷۸۵ کیلومتر مربع وسعت دارد و میانگین ضخامت آبرفت حدود ۱۴۰ متر است. در بخش قابل توجهی از سطح دشت آبخوان آزاد گسترده است. به دلیل وجود تناوبی از ذرات نفوذ ناپذیر تا کم نفوذ، در انتهای دشت و حاشیه کویر شرایطی از آبخوان نیمه محبوس تا محبوس ایجاد شده و متوسط ضخامت لایه اشباع حدود ۳۵ متر است.

جدول ۱ رتبه‌ها و وزنهای اختصاص داده شده به هر پارامتر

پارامتر	کلاس	رتبه	وزن
شیب	شیب کم ۰ تا ۵ درجه شیب متوسط ۵ تا ۲۰ درجه شیب زیاد بیش از ۲۰ درجه	۳ ۲ ۱	۰/۱
کاربری اراضی	زمینهای زراعی و مراتع زمینهای باغی زمین بایر و تأسیسات انسانی	۳ ۲ ۱	۰/۱۵
ژئومورفولوژی	لندفرمهای با نفوذپذیری بسیار بالا (بستر رودخانه و دشت آبرفتی) لندفرمهای با نفوذپذیری بالا (مخروط افکنه) لندفرمهای با نفوذپذیری متوسط (دامنه‌های کارستی) لندفرمهای با نفوذپذیری کم (دامنه‌های نامنظم، تیغه‌های فرسایشی، پرتگاه‌های گسلی)	٤ ۳ ۲ ۱	۰/۲۵
لیتولوژی	سازندهای منفصل با نفوذپذیری بالا سازندهای سخت با نفوذپذیری متوسط سازندهای با نفوذپذیری کم	٤ ۲ ۱	۰/۲
تراکم زهکشی	تراکم کم (۱/۵ – ۰ کیلومتر بر کیلومتر مربع) تراکم متوسط (۳ – ۱/۵ کیلومتر بر کیلومتر مربع) تراکم بالا (۵/۳ – ۳ کیلومتر بر کیلومتر مربع)	۳ ۲ ۱	۰/۲
تراکم خطواره	تراکم کم (۰/۳۷ – ۰ کیلومتر بر کیلومتر مربع) تراکم متوسط(۱/۰۸ – ۰/۳۷کیلومتر بر کیلومتر مربع) تراکم بالا(۲/۹٦ –۱/۰۸کیلومتر بر کیلومتر مربع)	۱ ۲ ۳	۰/۱

روش انجام پژوهش

بررسی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی. تغذیه آب زیرزمینی به عوامل متعدد زمین‌شناسی بستگی دارد. با توجه به اینکه عوامل تأثیرگذار بر تغذیه گسترده هستند و بررسی میدانی آنها نیاز به صرف هزینه و زمان بسیار دارد، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی ابزاری مناسب جهت بررسی پتانسیل تغذیه به شمار می‌آید. در این پژوهش از شش فاکتور شیب، کاربری اراضی، ژئومورفولوژی، لیتولوژی، تراکم زهکشی و تراکم خطواره جهت بررسی پتانسیل تغذیه استفاده شده است. هر یک از این پارامترها باتوجه به جدول (۱) امتیازدهی و طبق رابطه (۱) تلفیق شده و در نهایت نقشه نهایی به دست می‌آید.

$$RP = (S_r \times S_w) + (D_r \times D_w) + (LU_r \times LU_w) + (L_r \times L_w) + (LDr \times LD_w) + (GM_r \times GM_w) \quad (۱)$$

در رابطه بالا r رتبه اختصاص یافته به هرکدام از کلاسهای پارامترها است که دارای مقادیر بین ۱ تا ٤ می‌باشد و w وزن هر پارامتر است [12].

برآورد مقدار تغذیه

روش نوسانات سطح ایستابی. روش نوسانات سطح ایستابی مبتنی بر معادله بیلان آب است و با تجزیه و تحلیل نوسانات سطح آب زیرزمینی، برآوردی از میزان تغذیه ارائه می‌دهد. روش نوسانات سطح ایستابی بر این فرض استوار است که افزایش سطح آب زیرزمینی در آبخوانهای آزاد به خاطر تغذیه رسیده به سطح ایستابی است. داده‌های مورد نیاز در این روش داده‌های سطح آب زیرزمینی و آبدهی ویژه است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود [13]:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (۲)$$

که در این رابطه R تغذیه آب زیرزمینی $[\frac{L}{T}]$، Δh نوسان سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی تغذیه [L]، Δt طول دوره زمانی تغذیه [T] و S_y آبدهی ویژه (بدون بعد) می‌باشد. در معادله بالا فرض می‌شود که آب رسیده به سطح ایستابی بلافاصله به دخیره آب زیرزمینی تبدیل می‌شود.

روش پیسکوپو. روش دیگری که در این مطالعه برای ارزیابی میزان تغذیه استفاده شده است، روش پیسکوپو می‌باشد. این روش توسط پیسکوپو ارائه شده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۹]:

نفوذپذیری خاک+ میزان بارندگی + درصد شیب = مقدار تغذیه (۳)

در این روش عوامل بالا با یکدیگر جمع شده و طبق جدول (۲) رده‌بندی می‌شوند.

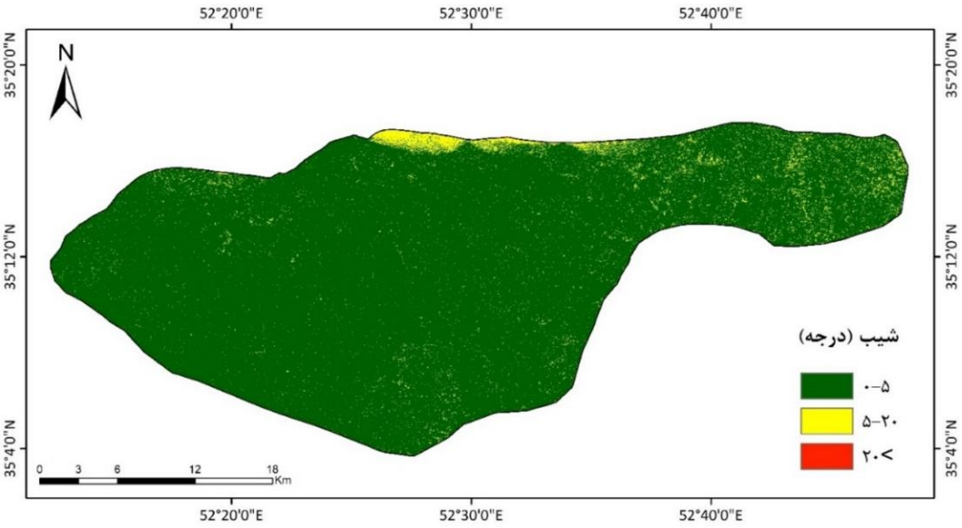
واکاوی یافته‌ها

بررسی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی

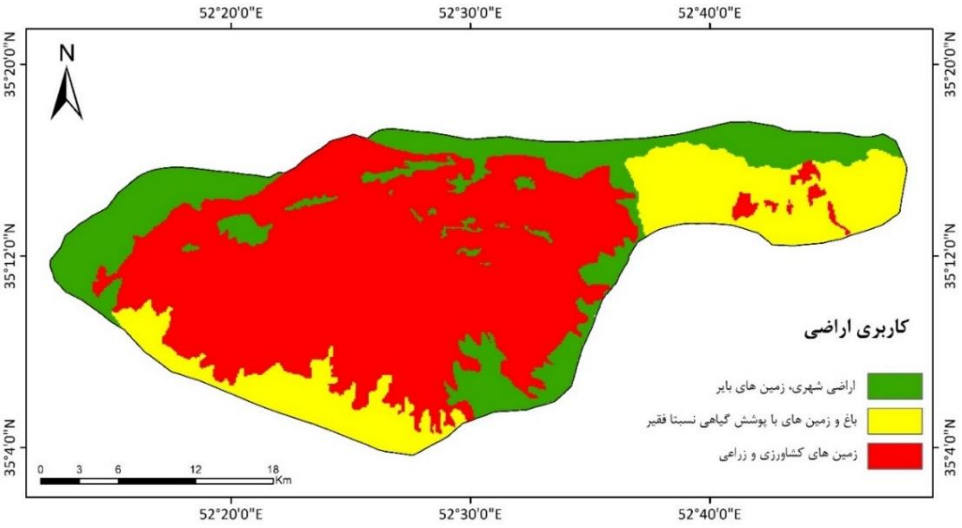
شیب توپوگرافی. شیب توپوگرافی سرعت حرکت آب را کنترل می‌کند. هرچه شیب کمتر باشد میزان نفوذ بالاتر است و بالعکس هرچه شیب بیشتر باشد میزان نفوذ کمتر است. به منظور تهیه نقشه شیب منطقه از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۱۲/۵ متر استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که قسمتهای شمالی واقع در رأس مخروط افکنه شیب بیشتری نسبت به قسمتهای دیگر دارند (شکل ۲).

جدول ۲ رده‌بندی عوامل مؤثر در تغذیه

شیب		بارندگی		نفوذپذیری خاک		میزان تغذیه	
شیب٪	رتبه	بارش (میلیمتر)	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه
>۲	٤	<۸۵۰	٤	زیاد	۵	۱۳-۱۱	۱۰
۱۰-۲	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	متوسط تا زیاد	٤	۱۱-۹	۸
۳۳-۱۰	۲	۷۰۰-۵۰۰	۲	متوسط	۳	۹-۷	۵
<۳۳	۱	>۵۰۰	۱	کم	۲	۷-۵	۳
				خیلی کم	۱	۵-۳	۱



شکل ۲ پهنه‌بندی شیب منطقه مورد پژوهش



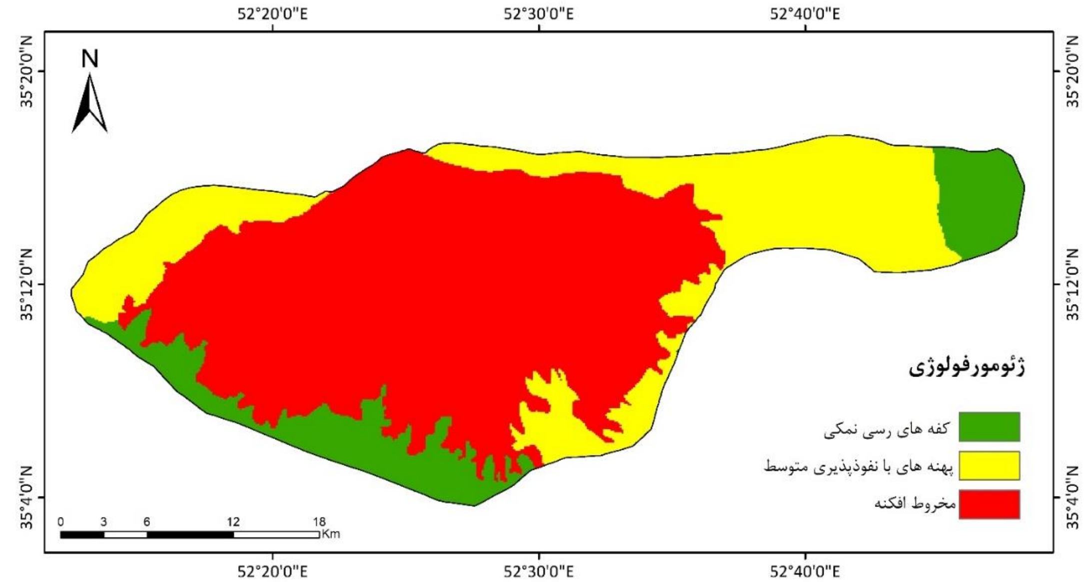
شکل ۳ پهنه‌بندی کاربری اراضی منطقه مورد پژوهش

کاربری اراضی. نوع کاربری اراضی می‌تواند نمودی از مصرف آب برداشت شده از آبخوان، میزان آب برگشتی به آبخوان و پوشش گیاهی باشد. بر همین اساس این پارامتر نقش بسزایی در پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی ایفا می‌کند. شکل (۳) نقشه کاربری اراضی منطقه مورد پژوهش را نشان می‌دهد. بیشترین کاربری اراضی محدوده به خصوص در مخروط افکنه گرمسار فعالیتهای کشاورزی می‌باشد. مناطق اطراف مخروط افکنه را زمینهایی با پوشش گیاهی نسبتاً فقیر و زمینهای بایر تشکیل می‌دهند.

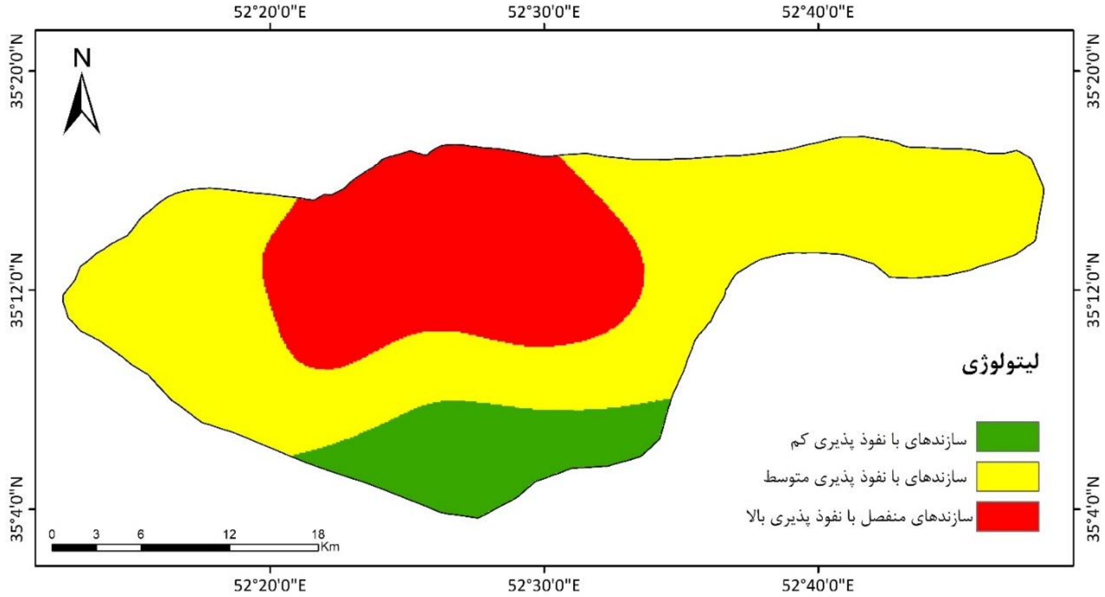
ژئومورفولوژی. از آنجایی که آبخوان اصلی منطقه روی مخروط افکنه گرمسار واقع شده و مناطق حاشیه‌ای نیز شامل دشت گرمسار و پهنه‌های رسی نمکی است، این منطقه از نظر ژئومورفولوژی دارای تنوع محدودی است. مخروط افکنه گرمسار، پهنه‌هایی با نفوذپذیری متوسط و کفه‌های رسی نمکی سه دسته اصلی ژئومورفولوژیکی منطقه مورد پژوهش را تشکیل می‌دهند. پارامترهای ژئومورفولوژی براساس جدول (۱) وزن‌دار شده و لندفرم مخروط افکنه به علت نفوذپذیری زیاد و وجود آبرفتهای ضخیم لایه بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ٤).

لیتولوژی. لیتولوژی نقش بسزایی در میزان نفوذ آب بارندگی به آبخوان دارد. لیتولوژیهای موجود در محیط آبخوان شامل پادگانه آبرفتی جدید، پهنه نمکی، گچی، سیلتی، رسی‌تر و خشک و پهنه

رسی، سیلتی می‌باشد که همگی مربوط به دوران کواترنری هستند. به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی، میزان نفوذپذیری بررسی شده و نقشه نفوذپذیری منطقه براساس هدایت هیدرولیکی و جدول (۱) رتبه‌دهی شد. طبق بررسیهای انجام شده در منطقه، هدایت هیدرولیکی از ٤ متر بر روز در نواحی حاشیه‌ای و جنوبی تا ۷۲ متر بر روز در نواحی شمالی محدوده متغیر است. باتوجه به شکل (۵) قسمتهای شمالی دارای بیشترین میزان نفوذپذیری است و این میزان با حرکت به سمت جنوب و حاشیه محدوده کاهش می‌یابد.



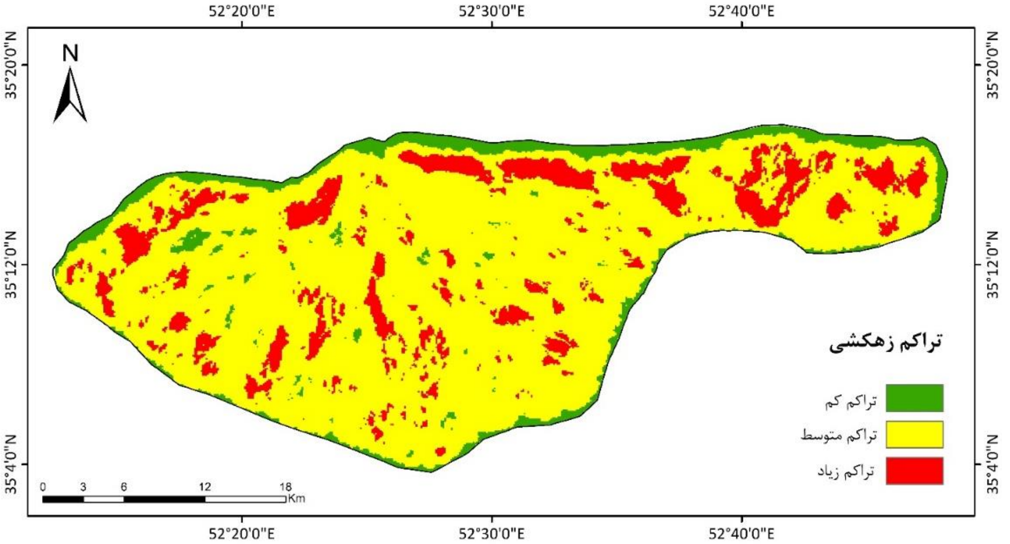
شکل ٤ پهنه‌بندی ژئومورفولوژی منطقه مورد پژوهش



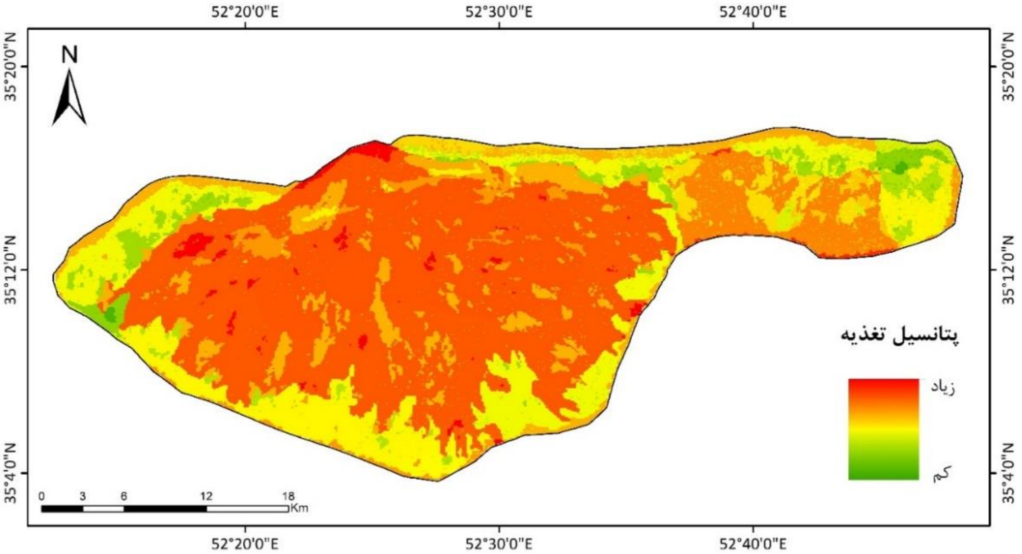
شکل ۵ پهنه‌بندی لیتولوژی منطقه مورد پژوهش

تراکم زهکشی. تراکم زهکشی در هر منطقه وابسته به عواملی چون توپوگرافی، شیب و شرایط زمین‌شناسی است. تراکم زهکشی نشان دهنده میزان رواناب است؛ بنابراین هرچه تراکم زهکشی بالاتر باشد میزان نفوذ آب کمتر است و هرچه تراکم زهکشی در یک منطقه کمتر باشد میزان نفوذ بالاتر خواهد بود [14] به منظور تهیه نقشه تراکم از مدل ارتفاعی رقومی با دقت ۱۲/۵ متر استفاده شده است که پس از استخراج آبراهه‌ها، تراکم آن محاسبه گردیده و سپس طبق جدول (۱) رتبه‌دهی شده‌اند. شکل (٦) نشان دهنده آن است که قسمتهای شمالی دارای تراکم زهکشی کم هستند که میزان نفوذ در آنها بالا است.

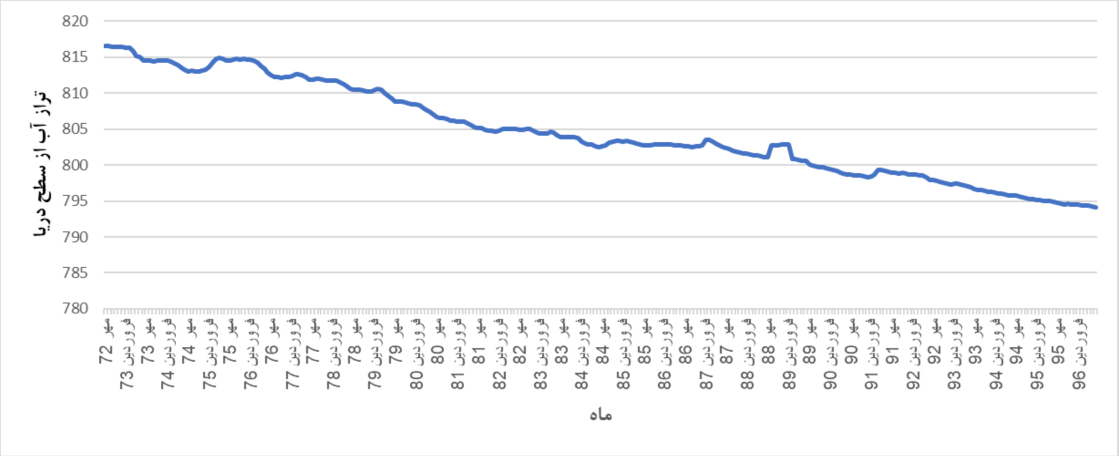
تراکم خطواره. خطواره در ارتباط با شکستگیها به کار می‌رود و به عنوان مجرای حرکت آب در نظر گرفته می‌شود. هر چه میزان تراکم خطواره در یک منطقه بیشتر باشد، میزان نفوذپذیری بالاتر است و هر چه میزان تراکم خطواره کمتر باشد نفوذ نیز کمتر خواهد بود. با توجه به اینکه آبخوان گرمسار در سازندهای کواترنری آبرفتی قرار گرفته است، خطواره در آنها گسترش خاصی ندارد؛ در نتیجه برای تمام منطقه این مقدار یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ٦ پهنه‌بندی تراکم زهکشی منطقه مورد پژوهش



شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی



شکل ۸ آبنمود معرف دشت گرمسار

پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی دشت گرمسار. برای تهیه نقشه نهایی پتانسیل تغذیه، رتبه هر پارامتر در وزن آن ضرب شده و سپس با یکدیگر جمع شدند. نقشه نهایی به دست آمده نشان می‌دهد که قسمت رأس مخروط افکنه به علت نفوذپذیری بالا و تراکم کم آبراهه بالاترین پتانسیل تغذیه را دارا می‌باشد. بعد از آن بیشترین میزان تغذیه به علت نفوذپذیری بالا، فعالیتهای کشاورزی و شیب مناسب مربوط به مخروط افکنه گرمسار است. میزان پتانسل تغذیه در قسمتهای جنوبی و غربی محدوده به علت منتهی شدن به پهنه‌های با نفوذپذیری کم و اراضی بایر کاهش پیدا می‌کند (شکل ۷).

برآورد مقدار تغذیه

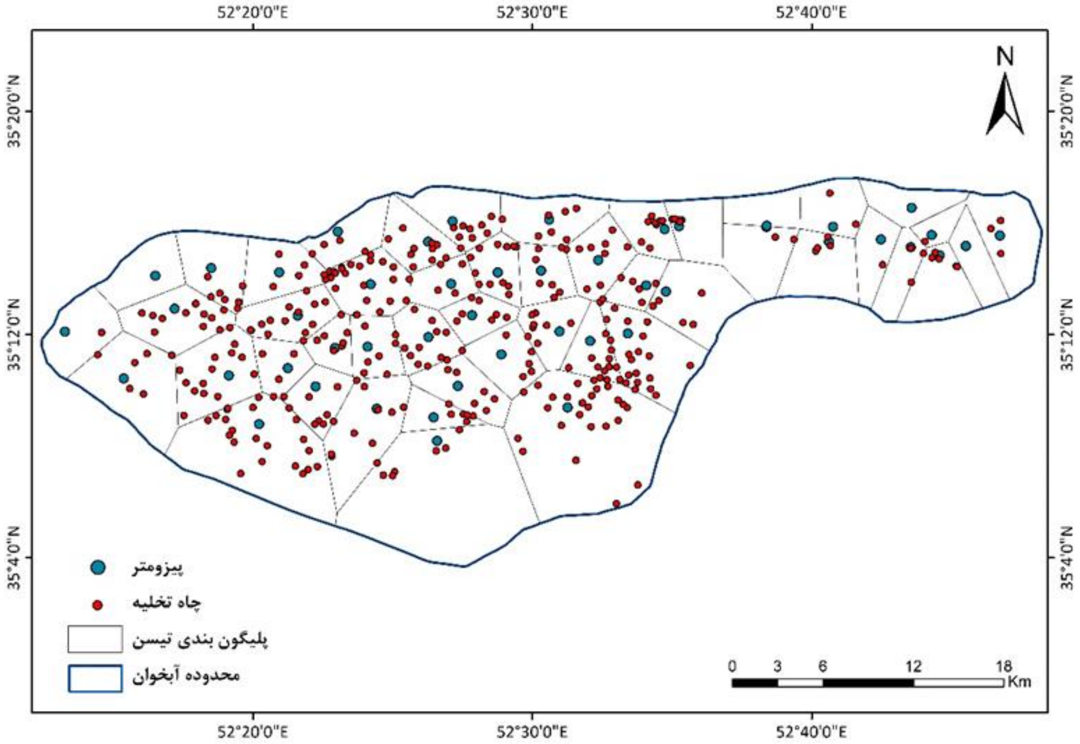
روش نوسانات سطح ایستابی. تغییرات زمانی تراز سطح آب زیرزمینی از جمله مهمترین مشخصات آبخوان می‌باشد که در نواحی مختلف آن متفاوت است. تغییرات سطح ایستابی به مقادیر تغذیه و تخلیه، فاصله از مناطق تغذیه کننده و میزان پمپاژ بستگی دارد و آبنمود معرف نشانگر مناسبی برای تغییرات درازمدت سطح ایستابی می‌باشد. برای رسم آبنمود معرف دشت گرمسار از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای در سالهای آبی ۷۳-۱۳۷۲ تا ۹۶-۱۳۹۵ استفاده شد (شکل ۸). بررسیها نشان داد که متوسط افت دراز مدت در آبخوان دشت گرمسار ۰/۹۳ متر در سال است.

برای محاسبه تغذیه خالص به روش تغییرات سطح ایستابی، داده‌های سطح ایستابی ۴۰ چاه مشاهده‌ای در طول سالهای آبی ۸۹-۱۳۸۸، ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۱-۱۳۹۰ مورد بررسی قرار گرفتند.

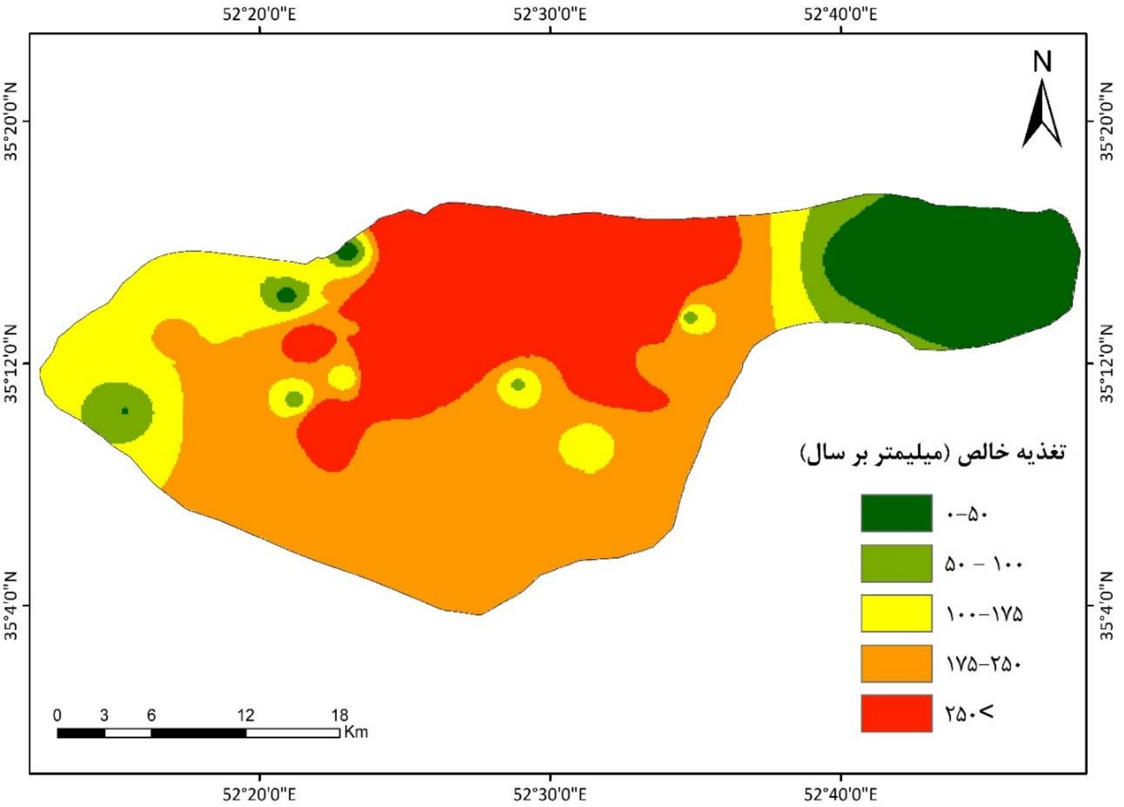
اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای وارد نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی شده و برای هر چاه پلیگون تیسن رسم گردید. سپس میزان حجم آب کاهش یافته یا افزایش یافته در هر پیزومتر از حاصل‌ضرب آبدهی ویژه در مساحت پلیگون در اختلاف سطح پیزومترها طبق رابطه (۲) به دست آمد. از آنجایی که هر ساله مقداری از آب آبخوان از طریق پمپاژ خارج می‌شود، میزان تخلیه نیز در محاسبات لحاظ شد. برای به دست آوردن میزان پمپاژ تخلیه چاه‌های آماربرداری شده واقع در هر پلیگون محاسبه و به صورت زیر به رابطه (۲) اضافه گردید:

$$R=S_y\frac{dh}{dt}=S_y\frac{\Delta h}{\Delta t}+\text{pumping} \qquad (٤)$$

طبق محاسبات انجام شده مقدار Δh آبخوان از ۲- متر تا ۰/۸ متر متغیر است. همچنین باتوجه به اطلاعات به دست آمده از سازمان آب منطقه‌ای، میانگین آبدهی ویژه ۰/۰۵ می‌باشد [10]. با ضرب مقدار تغییرات سطح آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای با مقدار آبدهی ویژه و سپس جمع آن با مقدار تخلیه، نرخ تغذیه در هر چاه مشاهده‌ای به دست می‌آید. پس از آنکه نرخ تغذیه هر چاه مشاهده‌ای که براساس آن پلیگون تیسن رسم شده (شکل ۹) محاسبه گردید، درون‌یابی صورت گرفت و نقشه پهنه‌بندی تغذیه خالص به دست آمد (شکل ۱۰). میزان تغذیه سالانه آبخوان به روش نوسانات سطح ایستابی از ۱/۹۵ میلیمتر در بخشهای جنوبی تا ٤٧٨ میلیمتر در نواحی شمالی تغییر می‌کند.



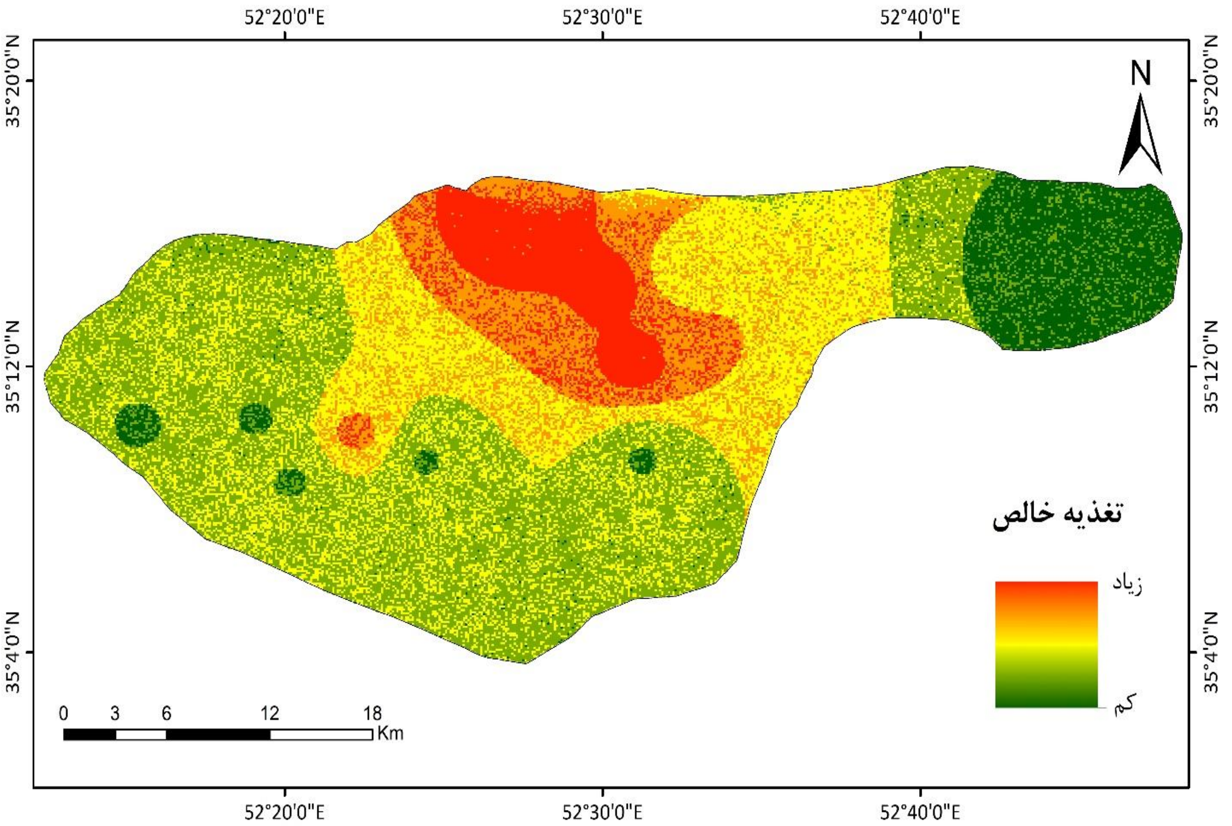
شکل ۹ موقعیت پیزومترها و چاه‌های بهره‌برداری دشت گرمسار



شکل ۱۰ نقشه پهنه‌بندی تغذیه خالص آبخوان دشت گرمسار با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی

روش پیسکوپو. در مرحله بعد برای تهیه نقشه پهنه‌بندی مقادیر تغذیه در آبخوان دشت گرمسار از روش پیسکوپو استفاده شد. در این روش برای محاسبه شیب یک مدل رقومی ارتفاعی از منطقه تهیه و بعد از استخراج شیب طبق معیارهای جدول (۲) رتبه‌بندی شد. مقدار شیب منطقه از ۲ تا ۳۷ درصد متغیر است. میزان بارندگی سالیانه دشت از سامانه هواشناسی و سازمان آب منطقه‌ای سمنان جمع‌آوری شد. اطلاعات نشان می‌دهند که میزان بارندگی محدوده مطالعاتی و دشت گرمسار کمتر از ۵۰۰ میلیمتر است؛ در نتیجه طبق جدول (۲) تمام محدوده آبخوان دارای رتبه یک می‌باشد. برای به دست آوردن میزان نفوذ نیز اطلاعات نفوذپذیری منطقه جمع‌آوری شده و طبق جدول (۲) به پنج دسته تقسیم‌بندی شدند. در نهایت نقشه‌های مربوط به سه عامل شیب، نفوذپذیری و بارندگی با یکدیگر ترکیب شدند. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که میزان تغذیه از شمال به سمت جنوب منطقه کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار تغذیه مربوط به بخشهای شمالی آبخوان که در رأس مخروط افکنه واقع است، می‌باشد.

با توجه به نتایج هر دو روش برآورد مقادیر تغذیه آب زیرزمینی، بیشترین میزان تغذیه در محل مخروط افکنه و ورودی جریان آب زیرزمینی به آبخوان رخ داده که در این مناطق مواد تشکیل‌دهنده دانه درشتتر و دارای نفوذپذیری بالاتر می‌باشند. علاوه بر این، مناطق دارای مقادیر بالای تغذیه بیشتر در زمینهای کشاورزی واقع شده‌اند. در نقشه نهایی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی نیز نواحی دارای بالاترین پتانسیل بر بخشهای شمالی آبخوان منطبق است که با مقادیر تغذیه برآورد شده با هر دو روش همخوانی دارد. اگر چه نتایج حاصل از مقایسه مقادیر تغذیه و پتانسیل تغذیه در برخی قسمتهای منطقه اختلاف کمی با هم دارند.



شکل ۱۱ نقشه پهنه‌بندی تغذیه خالص آبخوان دشت گرمسار با استفاده از روش پیسکوپو

نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش نیاز روزافزون به منابع آب زیرزمینی و اهمیت بالای این منابع، میزان تغذیه و برداشت از آبخوانها موضوع بسیار مهمی است. از آنجایی که آبخوان گرمسار منبع اصلی کشاورزی در منطقه است و کشاورزی در این ناحیه گسترش زیادی دارد، مسئله مدیریت پایدار آب امری ضروری به شمار می‌آید. به همین علت در این پژوهش در ابتدا نقشه‌های پتانسیل تغذیه تهیه گردید. نتایج به دست آمده نشان دادند که میزان پتانسیل تغذیه وابستگی بسیاری به میزان نفوذپذیری و کاربری اراضی دارند و قسمت رأس مخروط افکنه و خود آن پتانسیل بالایی دارند. بعد از آن میزان تغذیه خالص منطقه با دو روش نوسانات سطح ایستابی و روش پیسکوپو ارزیابی شد. نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش نوسانات سطح ایستابی نشان می‌دهد که به صورت کلی میزان تغذیه از سمت شمال به جنوب و شرق منطقه کاهش پیدا می‌کند و قسمتهای ابتدایی مخروط افکنه گرمسار بیشترین مقدار تغذیه خالص را به خود اختصاص داده‌اند. یکی از مهمترین دلایل این امر درشت بودن ذرات در قسمت ابتدایی مخروط افکنه است که میزان نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. در نقشه حاصل از روش پیسکوپو نیز روند کلی نشان‌دهنده آن است که از سمت شمال به سمت جنوب میزان تغذیه آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه آن است که روند به دست آمده از دو روش یکسان است و در تنها در بعضی نقاط با یکدیگر تفاوت دارند و هر دو این روشها نتیجه به دست آمده از نقشه پتانسیل تغذیه را تأیید می‌کنند. بنابراین می‌توان از روش به کار رفته در این پژوهش برای ارزیابی میزان پتانسیل و مقادیر تغذیه استفاده کرد. با این وجود، با توجه به کمبود داده نتایج ممکن است با کمی عدم قطعیت همراه باشد. بنابراین انجام آزمایشهای تکمیلی در منطقه به ویژه در ارتباط با اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] R. W. Healy, B. R. Scanlon, *Estimating Groundwater Recharge*, Cambridge University Press 2010.

[2] B.R. Scanlon, R. W. Healy and P. G. Cook, “Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge,” *Hydrogeology Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 18–39, 2002.

[3] K. Rushton, I. simmers, Eds., *recharge of phreatic aquifers in (semi) arid areas*. London: 1997.

[4] T. Ahmadi, A. N. Ziaei, A. Rasoulzadeh, K. Davary, “Groundwater recharge estimation using water table fluctuations (WTF) method,” *3rd National Conference on Comprehensive Water Resources Management*, Iran, September 10, (2010). (In Persian)

[5] V. Hung Vu, B. J. Merkel, “Estimating groundwater recharge for Hanoi, Vietnam,” *Science of the Total Environment*, ,vol. 651, no. 1, pp. 1047–1057, 2019.

[6] T. N. Adji, “Application of Water Table Fluctuation Method to Quantify Spatial Groundwater Recharge Witidn the Southern Slope of Merapi Volcano, Indonesia,” *Indonesian Journal of Geography*, vol. 39, no. 2, pp. 157–171, 2015.

[7] A. Shaban, M. Khawlie, and C. Abdallah, “Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: The case of Occidental Lebanon,” *Hydrogeology Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 433–443, 2006.

[8] T. W. Githinji, E. W. Dindi, Z. N. Kuria, and D. O. Olago, “Application of analytical hierarchy process and integrated fuzzy-analytical hierarchy process for mapping potential groundwater recharge zone using GIS in the arid areas of Ewaso Ng’iro – Lagh Dera Basin, Kenya,” *HydroResearch*, vol. 5, -pp. 22–34, 2022.

[9] G. Piscopo, *Groundwater vulnerability map explanatory notes Castlereagh Catchment*, Centre for Natural Resources, NSW Department of Land and Water Conservation, 2002.

[10] Asarab Consulting Engineers Company. Water budget updating study in DASHT-E-KAVIR basin, 12017. (In Persian)

[11] M.R. Zabihi, G. Kamali, H. Imani nasab, "Evaluation and zoning the vulnerability of Garmsar aquifer to pollution using DRASTIC index in GIS environment," *The third national conference on crisis management, safety; Health, environment and sustainable development, Iran*, June 25, (2017). (In Persian)

[12] S. P. Rajaveni, K. Brindha, and L. Elango, "Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region," *Applied Water Science*, vol. 7, no. 3, pp. 1377–1389, 2017.

[13] R. W. Healy, and P. G. Cook, "Using groundwater levels to estimate recharge," *Hydrogeology Journal*, vol. 10, no 1, pp. 91–109, 1979.

[14] M. Parvin, S. Negahban, "The effect of geomorphologic and geological characteristic on the recharge of alluvial aquifers (case study: Gilan-e- Gharb alluvial aquifer)," *Researches in earth Sciences*, vol. 9, no. 4, pp. 167–180, 2019. (In Persian)

Journal Ferdowsi Civil Engineering, 36, 1, 2023. (19-34)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Three-Dimensional Numerical Modeling of Interaction of Dip-Slip Fault and Tunnels with Concrete Lining

Research Article

Mohammad Amin Barfehee[1], Mahda Mortazavi Zanjani[2], Abbas Soroush[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.70954.1043

1. Introduction

Before the notorious earthquakes of 1999 in Turkey (Kocaeli and Düzce) and Taiwan (Chi-Chi), causing severe damage to underground structures, it was generally assumed that buried structures are protected from damage by the surrounding soil. However, increased attention has been prompted ever since to buried structures subjected to both strong ground motion of earthquakes and permanent displacement of fault rupture.

Regarding the high seismicity of Iran and distribution of faults all over the country, it seems necessary to consider the impact of faulting on tunnel design. In this paper, the interaction of reverse dip-slip fault and tunnel, perpendicular to fault plane, is modeled numerically with finite-element software, Plaxis 3D. The impacts of such factors as fault dip angle, soil type, and the tunnel's depth are studied and the results are reported as fault rupture path, ground surface displacement and the deformation and forces in the tunnel lining. Moreover, recommendations are made for tunnel design subjected to faulting.

2. Problem description

For the three-dimensional numerical simulation of reverse fault rupture propagation, the soil model dimensions are 20m depth, 80m length (four times its depth) and 40m width (20m modeled due to symmetry), as shown in Figure 1. The ground surface is horizontal and the fault movement, developed in the rigid bedrock, reaches bedrock-soil interface at the base of the model. The reverse fault is applied with two different dip angles, 60 and 90 degrees, and with 0.8m displacement as vertical component. This study deals with the quasi-static dislocation of the faults under the soil.

A circular tunnel of radius 2.12m with concrete lining is located in two positions: a lower position and a deeper position (tunnel axis in 6m and 11m depth, respectively). For the soil type, two typical dry sands, Loose Sand (LS) and Dense Sand (DS), are considered.

3. Numerical modeling

The soil behavior is represented by the elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb constitutive model with non-associated flow rule and the concrete lining behavior with linear elastic plate. The soil-tunnel interface was introduced using Plaxis interface elements by reducing friction and cohesion.

The soil elements are 10-node tetrahedral elements and lining elements are 6-node triangular plates. Figure 2 shows the meshing of the problem and soil and tunnel deformation.

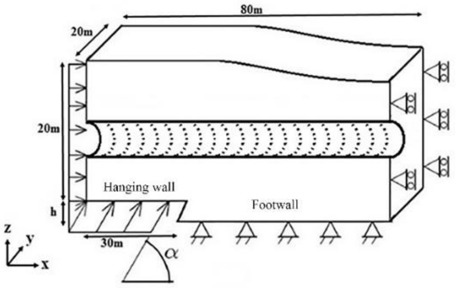


Figure 1. Three-dimensional modeling of tunnel in FEM

4. Conclusion

Based on the numerical simulations, the following conclusions are drawn:

- The impacts of tunnel presence on soil deformation:

- Presence of tunnel gives rise to zones of stain localization in the soil underneath the tunnel and reduces the fault displacement within the soil above the tunnel level;

*Manuscript received: June 15, 2021, Revised, June 1, 2022, Accepted, December 20, 2022.

[1]. MSc in Geotechnical Engineering. Amirkabir University of Technology, Garmsar Campus, Garmsar, Iran

[2]. Corresponding author. Visiting Lecturer, Amirkabir University of Technology, Garmsar Campus, Garmsar, Iran.
Email: mortazavim@aut.ac.ir.

[3]. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran.

- Relative uplift is observed on both sides along the tunnel on the ground. This is of practical engineering importance as it causes non-uniform deformation on ground level, hazardous to structures;
- Ground deformation is more distributed above tunnel compared to free field (soil without tunnel). This will be more pronounced in deeper tunnels.
- Shear band underneath the tunnel is slightly diverted to footwall side, more threatening for footwall zone.

- The impacts of tunnel presence on lining:

- For faults with milder dip angles, higher axial force is developed in lining;
- The impact of faulting on axial force and bending moment in lining is more pronounced in deeper tunnels compared to shallower ones. This should be taken into account in deep tunnel's lining design;

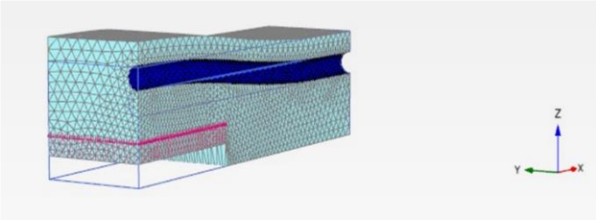


Figure 2. Soil and tunnel deformation after faulting

Axial force, especially in mild fault dip angles, is very sensitive to model length while bending moment can be correctly estimated by typical modeling dimensions (i.e., model length 4-5 times the soil layer height). To reduce the influence of boundaries on axial force, model length is recommended to be 10-15 times its height.

مهندسی عمران فردوسی

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

مدل‌سازی عددی سه‌بعدی اندرکنش گسل شیب‌لغز و تونل با پوشش بتنی*

مقاله پژوهشی

محمدامین برفه‌ئی[۱] مهدا مرتضوی زنجانی[۲] عباس سروش[۳]

DOI :10.22067/jfcei.2022.70954.1043

چکیده در این مقاله تأثیر جابه‌جایی گسل شیب‌لغز معکوس بر تونلی عمود بر خط گسل در پلان با نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس سه‌بعدی مطالعه شده و اثر زاویه گسل، نوع خاک منطقه و عمق قرارگیری تونل بر «مسیر انتشار گسلش»، «نمودارهای جابه‌جایی سطح خاک» و «تغییر شکل و نیروهای وارد بر پوشش تونل» ارائه شده‌اند. نتایج تحلیلها نشان می‌دهد که تونل باعث ایجاد نواحی تمرکز کرنش در خاک زیر خود و تا حد زیادی مانع از رسیدن جابه‌جایی گسلش به لایه‌های خاک بالا سر خود (در محور تونل) شده، حال آنکه موجب بالازدگی نسبی خاک در دو طرف آن در سطح زمین می شود. علاوه بر آن در تونل عمیقتر، نیروی وارده بر پوشش تونل (نیروی محوری و لنگر خمشی) در اثر جابه‌جایی گسل بیشتر است. همچنین با آنالیز حساسیت برای کاهش اثر مرز، نسبت ابعادی مناسب برای مدل‌سازی اندرکنش تونل و گسل پیشنهاد شده است. بررسیها نشان می‌دهد که نیروی محوری به خصوص در زوایای گسل ملایم به طول مدل حساس است حال آنکه لنگر خمشی در مدل سازی با ابعاد متعارف (۵-۴ برابر عمق لایه خاک) به طور مناسب قابل ارزیابی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی انتشار گسلش، مدل‌سازی عددی اجزای محدود، تحلیل سه‌بعدی، تونل، پوشش بتنی.

Three-Dimensional Numerical Modeling of Interaction of Dip-Slip Fault and Tunnels with Concrete Lining

Mohammad Amin Barfehee Mahda Mortazavi Zanjani Abbas Soroush

Abstract *In this paper, the effect of reverse dip-slip fault movement on a tunnel, being perpendicular to the fault plane in plan view, is modeled numerically with finite-element software, Plaxis 3D and the effect of factors such as fault dip angle, soil type and tunnel's depth on "fault rupture path", "ground surface displacements" and "deformation and forces in the tunnel lining" is presented. The results indicate that the presence of tunnel gives rise to zones of stain localization in the soil underneath the tunnel and somewhat prevents the rupture zone to reach the ground surface on its top (centerline of the tunnel) whereas it causes relative uplift on the ground surface on both sides. Moreover, in deeper tunnels, the impact of faulting on lining forces is more pronounced. Furthermore, to reduce the influence of the outer boundaries, performing sensitive analysis, appropriate dimensions are recommended for modeling the interaction of fault and tunnel. It is shown that axial force, especially in mild fault dip angles, is very sensitive to model length while bending moment can be correctly estimated by typical modeling dimensions (i.e., model length 4-5 times the soil layer height).*

Keywords Fault Rupture Propagation, Finite Element Numerical Modeling, Three-Dimensional Analysis, Tunnel, Concrete Lining.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۳/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۹ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، واحد دانشگاهی گرمسار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر .

(۲) نویسنده مسئول: استاد مدعو، واحد دانشگاهی گرمسار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Email:mortazavim@aut.ac.ir

مقدمه

تا پیش از زمین‌لرزه‌های سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان (کوجایلی، دوزکه و چی‌چی) که موجب خرابیهای بسیار سازه‌های زیرزمینی گردید، باور عموم جامعه مهندسی بر این بود که سازه‌های زیرزمینی به دلیل محصور بودن در میان خاک از آسیبهای ناشی از لرزه در امانند. ولی بعد از این وقایع تحقیقات جدی و گسترده در مورد اثرات لرزش زمین و همچنین جابه‌جایی ماندگار ناشی از گسلش بر این سازه‌ها شدت گرفت.

پدیده انتشار گسلش در لایه خاک در سال ۱۹۹٤ توسط بری و همکاران [1] با روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. آنها به تأثیرپذیری مسیر گسلش از زاویه صفحه گسل، انواع حرکت گسل، میزان جابه‌جایی گسل، عمق لایه خاک و نوع خاک محل پرداختند. در بررسیهای میدانی تأثیر نوع خاک بر گسلش، دریافتند که در خاکهای سخت‌تر گسلش در جابه‌جایی پایه کمتری به سطح زمین می‌رسد. بعد از آن، بررسیهای متعدد آزمایشگاهی مانند یوهانسون و کاناگایی ، آناستوپولوس و همکاران [2,3] و مدل‌سازیهای عددی مانند لین و همکاران، لاکیدیس و همکاران [4,5] تأثیر پارامترهای مختلف را بر پدیده گسلش در لایه خاک مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه با مدل‌سازی عددی گسل معکوس در ماسه دولایه و چندلایه، وقوع انکسار در مسیر گسلش و شکل‌گیری الگوهای مختلف مسیر گسلش در خاک چند لایه نشان داده‌شد [6,7]. همچنین پدیده انتشار گسلش با روشهای عددی دیگر مانند روش المان مجزا [8-11] مدل‌سازی شد. بررسی رفتار سدهای خاکی تحت اثر گسلش [12,13] و تأثیر عمق دفن در اندرکنش گسل و فونداسیون [14] ابعاد بیشتری از پدیده گسلش را روشن کرد.

در سالهای اخیر بررسی اندرکنش گسل و سازه‌های مدفون مانند لوله و تونل با روشهای آزمایشگاهی انجام شده است. بازیار و همکاران [15] با بررسی اندرکنش گسل شیب‌لغز معکوس و تونل با کمک آزمایش سانتریفیوژ دریافتند سازه‌های زیرزمینی نظیر تونلها می‌توانند بر مسیر گسلش تأثیر بگذارند که با افزایش صلبیت تونل و افزایش عمق قرارگیری آن فشار ناشی از گسلش بر تونل بیشتر می‌گردد. در پژوهش آنها راستای طولی تونل موازی خط گسل در پلان قرار داشت.

رجحانی و همکاران (۲۰۱۲) [16] با بررسی نتایج چهار آزمایش سانتریفیوژ با تمرکز بر رفتار لوله‌های فولادی پیوسته مدفون تحت اثر گسلش معکوس، نشان دادند با تغییرات قطر و عمق دفن لوله‌ها، مکانیزم تغییر شکل لوله و نوع خرابی به طور اساسی تغییر می‌کند. کیانی و همکاران [17] با انجام آزمایشهای سانتریفیوژ، تأثیر انتشار گسلش نرمال را بر روی تونل با پوشش قطعه‌ای بررسی کردند.

بررسی پدیده گسلش در اندرکنش با تونلها با روشهای عددی هم صورت گرفته است. جوشی و همکاران [18] با روش اجزای محدود و فرض ساده المان تیر برای لوله، تأثیر زاویه قرارگیری خط لوله نسبت به خط گسل را بررسی کردند و همچنین به راهکارهای کاهش خطر گسلش همچون کاهش عمق دفن در محل گسل و استفاده از خاکریزی با مصالح سست اشاره کردند. هاشم‌زاده و سروش [19] با مدل‌سازی سه‌بعدی لوله مدفون تحت گسل امتدادلغز نشان دادند کرنش طولی خط لوله در ماسه‌های سخت‌تر افزایش می‌یابد و کمانش موضعی لوله در جابه‌جایی گسل کمتری به وقوع می‌پیوندد.

رنجبرنیا و همکاران [20] با تحلیل تفاضل محدود سه‌بعدی، تونلهای بتنی کم‌عمق را تحت اثر گسلش شیب‌لغز معکوس و نرمال مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش عمق، جابه‌جایی بیشتری در هر دو نوع گسل به تونل وارد می‌شود.

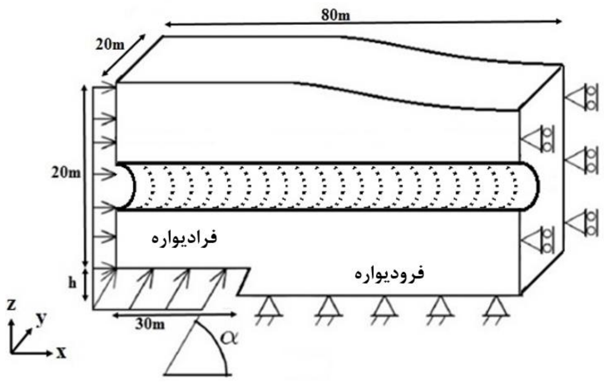
در مقاله حاضر به کمک مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس سه‌بعدی [21] به تحلیل سه‌بعدی گسل شیب‌لغز معکوس با راستای عمود بر محور طولی تونل پرداخته شده و در آن اثر زاویه گسل، نوع خاک و عمق قرارگیری تونل بر مسیر انتشار گسلش، جابه‌جایی سطح زمین، تغییر شکل پوشش تونل و نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل بررسی شده است. لازم به ذکر است که منظور از نیروی محوری و لنگر خمشی در اینجا، نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل (lining) می‌باشد. همچنین در این مقاله تلاش شده است یافته‌های عددی به نتایج کاربردی منجر شود و توصیه‌هایی برای طراحی ایمن تونل در برابر گسلش ارائه شده است.

معرفی کلی مسئله

برای مدل‌سازی عددی سه بعدی انتشار گسلش شیب لغز معکوس، حجمی از خاک به عمق ۲۰ متر و به طول چهار برابر عمق لایه خاک (۸۰ متر)، به منظور کاهش اثر مرزها، و نیز عرض

۴۰ متر در نظر گرفته شد که به جهت تقارن عرضی مسئله نیمی از عرض به اندازه ۲۰ متر مدل شده است. سطح خاک افقی در نظر گرفته شده و حرکت گسل که از اعماق سنگ بستر صلب شروع شده با زاویه α به فصل مشترک سنگ بستر-خاک می‌رسد. برای مدل‌سازی حرکت گسل، قسمت سمت راست مدل (فرودیواره) ثابت و جابه‌جایی به سطح پایین سمت چپ و قسمت عمودی سمت چپ (فرادیواره) مدل وارد می‌گردد (شکل ۱). فاصله گسل از سطح قائم سمت فرادیواره ۳۰ متر و زاویه گسل با افق به دو صورت ۶۰ درجه و قائم در نظر گرفته شده است. میزان جابه‌جایی سنگ بستر ۰،۸ متر در راستای قائم فرض شده است که مؤلفه افقی جابه‌جایی با توجه به زاویه گسل مشخص خواهد شد. جابه‌جایی به صورت استاتیکی بر بدنه خاک اعمال می‌شود و از آثار دینامیکی حرکت زمین صرف نظر می‌گردد.

تونلی بتنی به شعاع ۲/۱۲ متر در دو موقعیت سطحیتر و عمیقتر (عمق قرارگیری محور تونل از سطح خاک به ترتیب ۶ متر و ۱۱ متر) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ هندسه سه بعدی مدل‌سازی اجزای محدود

لایه خاک در نظر گرفته شده در این مسئله از نوع ماسه خشک بوده و دو نوع ماسه متراکم (DS) و سست (LS) برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. مشخصات دو نوع خاک در جدول (۱) آمده است. مشخصات تونل و مصالح آن نیز به شرح جدول (۲) می‌باشد.

بدین ترتیب حالتهای مختلف در نظر گرفته شده در این تحقیق با تغییر موارد زیر مشتمل بر ۱۲ حالت می‌باشد: نوع خاک (ماسه متراکم و سست) (جدول ۱)، زاویه گسل (۶۰ درجه و قائم)، شرایط میدان آزاد (عدم حضور تونل) و قرارگیری تونل در دو موقعیت سطحیتر و عمیقتر (عمق قرارگیری محور تونل از سطح خاک به ترتیب ۶ متر و ۱۱ متر) (جدول ۲)

جدول ۱ مشخصات خاک

نوع خاک	$\gamma_{unsat}(kN/m^3)$	$E'(MPa)$	ν'	$\psi'(°)$	$\varphi'(°)$
ماسه متراکم	۱۸	۲۰	۰/۳	۸	۳۸
ماسه سست	۱۶	۱۰	۰/۳	۰	۳۰

جدول ۲ مشخصات بتن پوشش تونل

شعاع میانی (m)	ضخامت (m)	$\gamma(KN/m^3)$	$E(GPa)$	ν	نوع رفتار
۲/۱۲	۰/۲۴	۲۳/۵	۲۵	۰/۲	الاستیک

مدل‌سازی عددی. مدل موهر-کولمب مدل مناسبی برای بررسی رفتار خاک است و در کارهای گذشته بررسی گسلش هم از این مدل استفاده شده است. در اینجا برای معرفی رفتار خاک، مدل رفتاری موهر-کولمب الاستیک-کاملاً پلاستیک با قانون جریان غیرهمبسته (Nonassociated flow rule) در نظر گرفته شد. همچنین در مورد پوشش بتنی تونل فرض شده است که رفتار الاستیک داشته باشد.

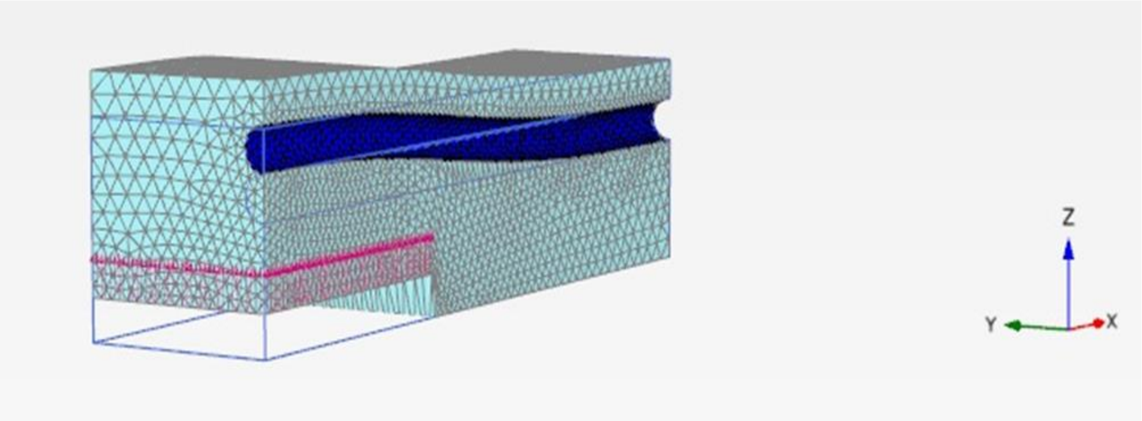
برای مدل‌سازی فصل مشترک خاک و بتن از المانهای رابط (interface) دارای اصطکاک و چسبندگی استفاده می‌شود. روابط زیر برای محاسبه مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی آنها ارائه شده است.

$$\tan\varphi_{inter} = R_{inter}\tan\varphi_{soil} \qquad (۱)$$

$$C_{inter} = R_{inter}C_{soil} \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه بالا و φ_{inter} پیشنهادی بازیار و همکاران ($\varphi_{inter} = 22°$) مقدار $R_{inter} = 0.517$ به دست می‌آید.

نوع المان مورد استفاده برای خاک، المان چهاروجهی ده گرهی و المان مورد استفاده برای پوشش تونل المان plate مثلثی شش گرهی است.



شکل ۲ نمایش مش‌بندی و تغییر شکل زمین و تونل بعد از وقوع گسلش

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، آزمایش سانتریفیوژ بازیار و همکاران [15] به صورت عددی مدل‌سازی شد و جابه‌جایی گسل شیب‌لغز معکوس با زاویه گسل ٦٠ درجه با سه اندازه جابه‌جایی قائم مختلف سنگ بستر در شرایط بدون حضور تونل و با حضور تونل اعمال شد، مقایسه نتایج تغییر شکل سطح زمین در آزمایش سانتریفیوژ با مدل‌سازی عددی انطباق خوبی را نشان می‌دهد. شرایط مش‌بندی و تغییر شکل مسئله در حالت گسل با زاویه قائم و تونل سطحی‌تر در شکل (۲) نشان داده شده است.

بررسی نتایج

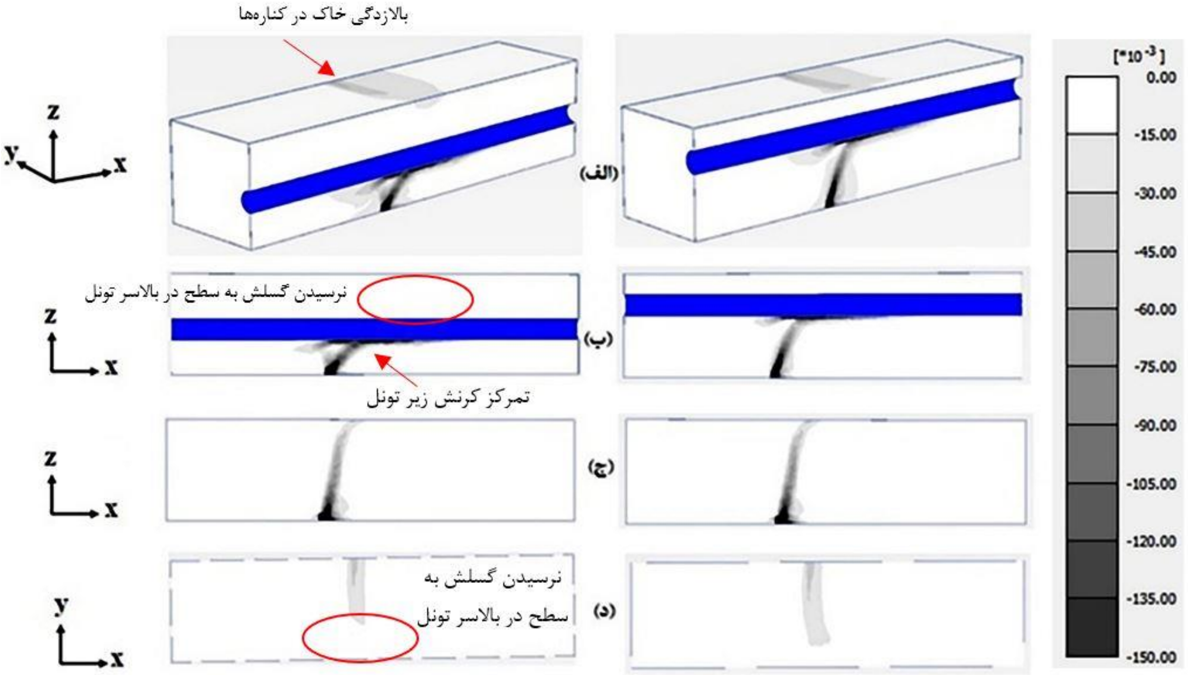
مسیر انتشار گسلش (جابه‌جایی زمین و تونل). عملکرد گسلها عموماً موجب به‌وجود آمدن جابه‌جایی‌های برشی مهمی در سطح زمین و همچنین سازه‌های سطحی و مدفون می‌شود. این جابه‌جاییهای اضافی تحمیل شده بر سازه، عملاً در طراحیهای اولیه در نظر گرفته نمی‌شود و ممکن است پایداری سازه‌ها را برهم بزند؛ لذا بررسی این آثار بر روی سازه‌ها بسیار با اهمیت می‌باشد.

در این پژوهش مسیر انتشار گسلش، که کرنش برشی بیشینه معرف آن است، در حالتهای مختلف مسئله و برای دو زاویه مختلف گسل (زاویه ٦٠ و ٩٠ درجه)، دو نوع خاک (خاک ماسه‌ای متراکم و یا سست) و تونل سطحیتر و عمیقتر بررسی شده و به نحوه اثر تونل بر این پدیده پرداخته شده است. شکل (۳) نمونه‌ای از مسیر انتشار گسلش را در دو حالت تونل سطحیتر (سمت راست) و تونل عمیقتر (سمت چپ)، با فرض خاک سست و گسل با زاویه ٦٠ درجه در مدل سه بعدی نشان می‌دهد. در این شکل وضعیت توزیع کرنش در مقاطع مختلف نشان داده شده است.

شکل (۳-الف) برشی سه بعدی از وسط تونل و خاک است. صفحه قائم میانی که تونل در آن قرار دارد شکل (۳-ب) و صفحه قائم کناری (شکل ۳-ج) و سطح زمین (شکل ۳-د) تصویر مناسبی از تغییرشکلها ارائه می‌دهند. در این شکل مشخص است که مسیر گسلش در محدوده تونل با کناره‌ها متفاوت است (شکل ۳-ب در مقایسه با شکل ۳-ج) . این تفاوت در رخنمون گسلش در سطح زمین در بالای محور تونل و کناره‌ها هم مشهود است (شکل ۳-د).

بررسی این شکل نشان می‌دهد که تونل باعث ایجاد نواحی تمرکز کرنش در خاک زیر خود و تا حد زیادی مانع از رسیدن جابه‌جایی گسلش به لایه‌های خاک بالاسر خود شده است (شکل ۳-الف و ب). در حالی که با فاصله گرفتن از تونل در جهت عرضی (در جهت محور y) تأثیر حضور تونل نیز تقریباً از بین رفته است (شکل ۳-د) و در صفحات کناری (شکل ۳-ج) مسیر گسلش مطابق شکل زمین آزاد (free field) شکل می‌گیرد.

به بیان ساده‌تر حضور تونل باعث ایجاد بالازدگی نسبی در خاک دو طرف می‌شود. توجه به این تغییرشکل غیریکنواخت، به لحاظ مهند سی اهمیت دارد زیرا سازه‌های سطحی را تحت تغییر شکل غیریکنواخت قرار می‌دهد و به خصوص در بالا سر سازه‌های مدفون دارای صلبیت زیاد (مانند تونلهای شهری یا لوله‌های قطور) خطرساز خواهد شد.



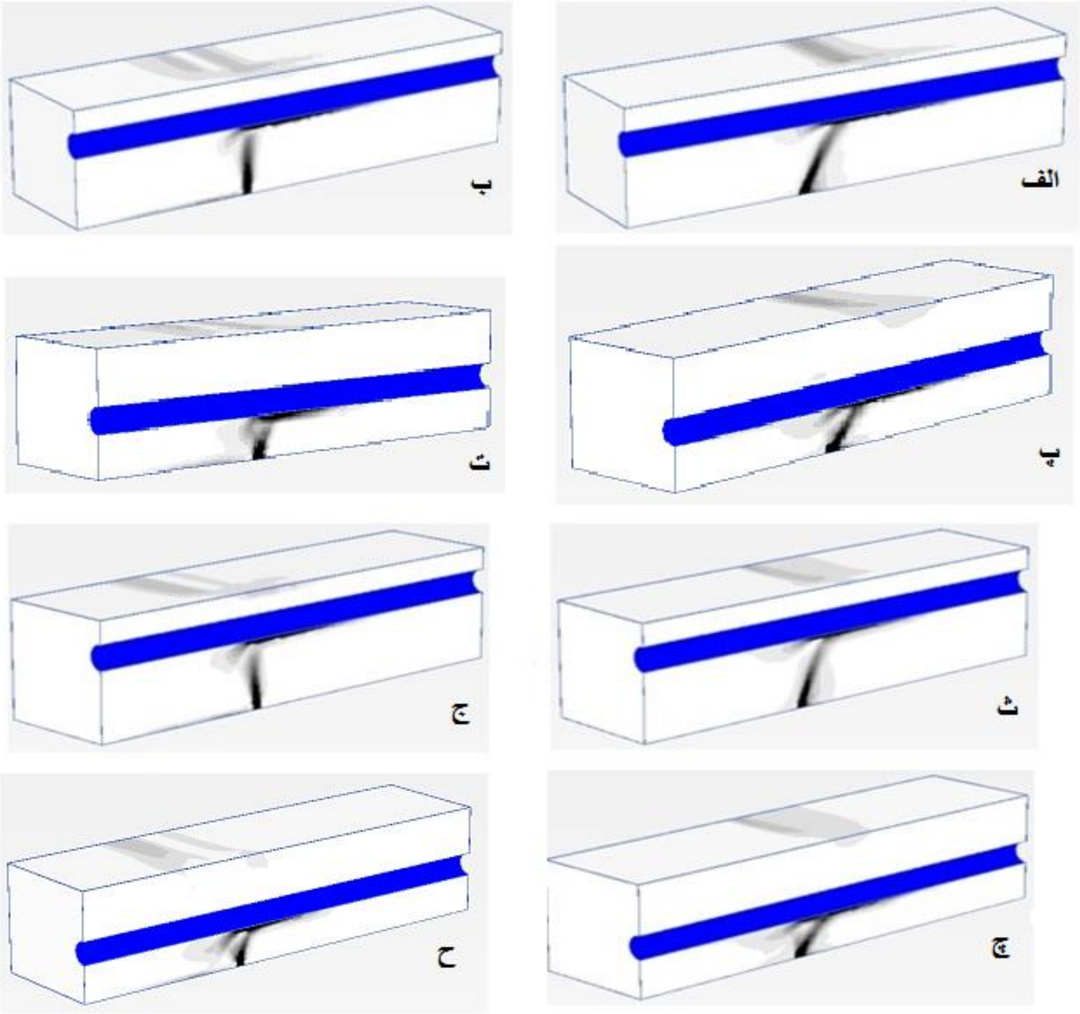
شکل ۳ بررسی نحوه انتشار گسلش (کانتورهای کرنش برشی بیشینه) در دو حالت تونل سطحیتر (سمت راست) و تونل عمیقتر (سمت چپ)، با فرض خاک سست و گسل با زاویه ٦۰ درجه: الف) تصویر سه بعدی، ب) برش از محور تونل، صفحه y=0، ج) تصویر در صفحه کناری، y=20، د) تصویر در سطح زمین

اثر سه عامل مهم یعنی جنس خاک، زاویه گسل و عمق قرارگیری تونل در خاک بر تغییرشکلهای ناشی از انتشار گسلش، به صورت نواحی کرنش برشی بیشینه، در شکل (٤) نشان داده شده است. مقایسه کرنشها در تونل عمیق و کم‌عمق برای خاک یکسان (مثلاً شکل ٤-الف و پ برای خاک متراکم) نشان می‌دهد که هنگامی که تونل عمیقتر باشد، بیشتر جابه‌جایی ناشی از گسلش را در خود جذب می‌کند و تمرکز کرنش کمتری در سطح زمین بالاسر تونل و کناره‌ها مشاهده می‌شود. از سوی دیگر هنگامی که عمق تونل بیشتر باشد، در زیر تونل و پوشش آن کرنشهای بیشتری توسعه می‌یابد که منجر به تنشهای بیشتر خواهد شد. این مطلب در ادامه در بررسی نیروی محوری و لنگر خمشی در تونل کم عمق و عمیق (شکل ۱۱ و ۱۲) خواهد آمد.

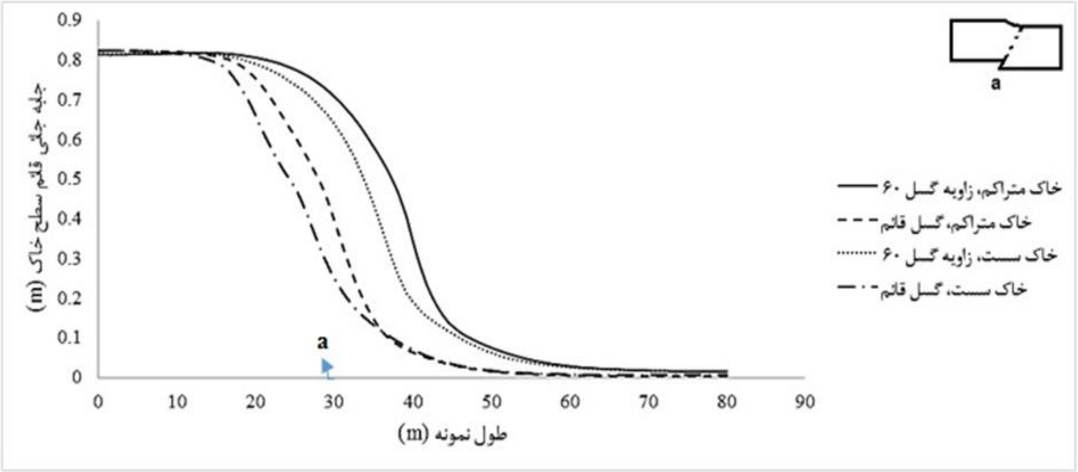
در خاک متراکم نسبت به خاک سست با عمق تونل یکسان (مثلاً مقایسه شکل ٤-الف و ث) تمرکز کرنش بیشتری در زیر تونل و سطح خاک مشاهده می‌شود. این مطلب با یافته‌های پیشین در مورد تمرکز بیشتر کرنش در خاکهای متراکم، که به معنی محدوده باریکتر گسلش است، سازگار است [22].

تحقیقات پیشین انتشار گسلش در بررسی جابه‌جاییهای سطح زمین در شرایط لایه خاک-بدون حضور تونل (Free Field) نشان داده است که افزایش تراکم خاک و کمتر شدن زاویه گسل (α) هر دو باعث انتقال جابه‌جاییها به سمت فرودیواره می‌گردند (مرتضوی و همکاران، ۲۰۱۲) [23]. این مطلب در پژوهش حاضر هم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج (شکل ۵) یافته‌های قبلی را تأیید کرد.

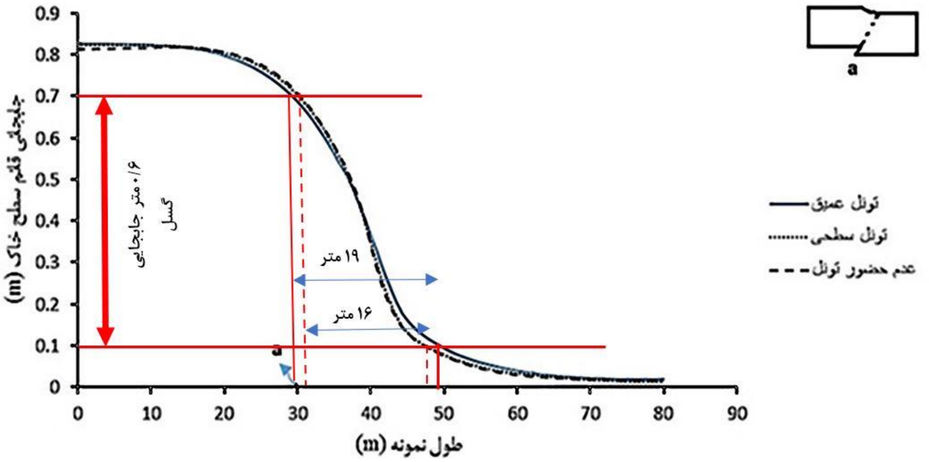
شکل (٦) تغییر شکل سطح زمین را در خاک متراکم و زاویه گسل ٦۰ درجه در دو حالت تونل عمیقتر و تونل سطحیتر در مقایسه با حالت زمین آزاد (عدم حضور تونل) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حضور تونل باعث می‌شود تغییر شکل سطح زمین در بالاسر آن توزیع ملایمتری (شیب ملایمتر) داشته باشد که در تونل عمیق این تأثیر نیز بیشتر می‌شود. در واقع حضور تونل و هر چه عمیقتر بودن آن، موجب تمرکز کرنش در زیر خود و کاهش تمرکز کرنش در لایه‌های بالاسر خاک (محور تونل) می‌شود. چنان چه در این شکل مشاهده می‌شود در سطح زمین جابه‌جایی ۰/٦ متر از گسل، در شرایط عدم حضور گسل در عرض ۱٦ متر و در شرایط حضور تونل عمیق در ۱۹ متر پخش شده است. این امر در ترکیب با بالازدگی خاک در دو طرف تونل (شکل ۳) وضعیت غیریکنواختی از نظر توزیع عرضی تغییرشکلها در سطح زمین ایجاد می‌کند.



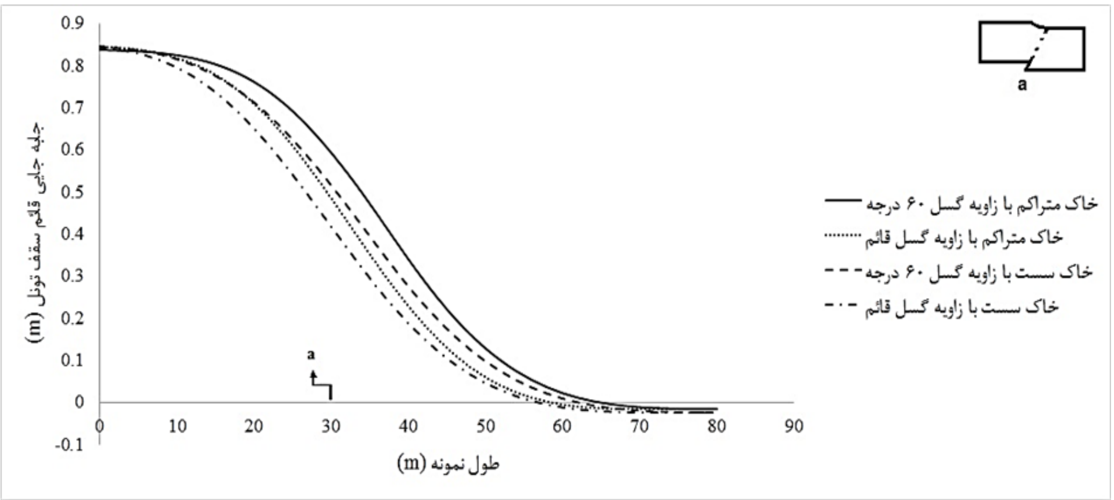
شکل ٤ کانتورهای کرنش برشی بیشینه در اثر گسلش در لایه خاک: الف) خاک متراکم، زاویه ٦۰ درجه و تونل سطحیتر، ب) خاک متراکم، زاویه ۹۰ درجه و تونل سطحیتر، پ) خاک متراکم، زاویه ٦۰ درجه و تونل عمیقتر، ت) خاک متراکم، زاویه ۹۰ درجه و تونل عمیقتر، ث) خاک سست، زاویه ٦۰ درجه و تونل سطحیتر، ج) خاک سست، زاویه ۹۰ درجه و تونل سطحیتر، چ) خاک سست، زاویه ٦۰ درجه و تونل عمیقتر، ح) خاک سست، زاویه ۹۰ درجه و تونل عمیقتر



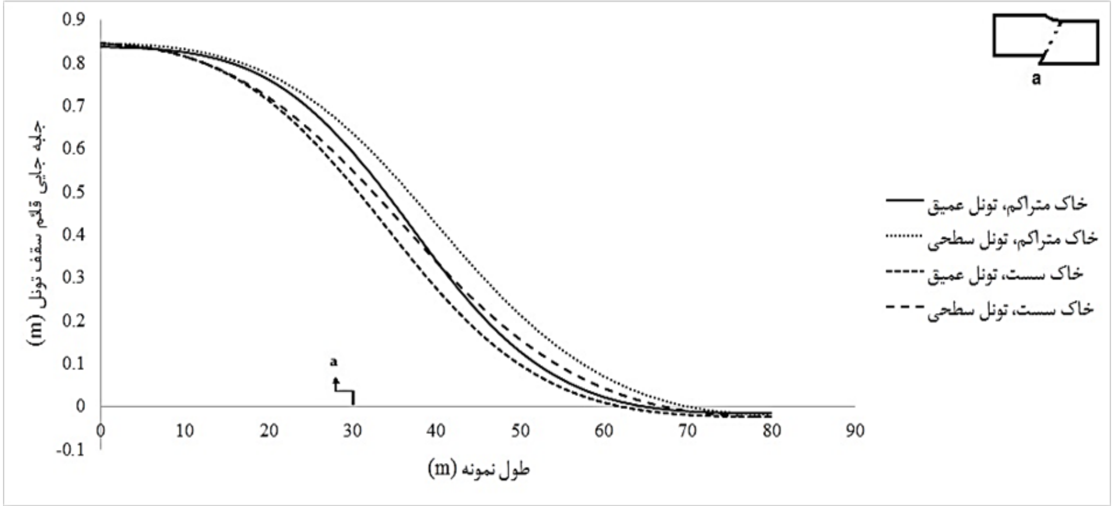
شکل ۵ نمودار تغییر شکل سطح زمین بعد از گسلش در حالت میدان آزاد (عدم حضور تونل) با تغییر نوع خاک و زاویه گسل



شکل ٦ تغییر شکل سطح زمین در خاک متراکم و زاویه گسل ٦۰ درجه (توزیع ملایمتر شیب زمین در حالت بدون تونل)



شکل ۷ تأثیر جنس خاک بر میزان جابه‌جایی قائم ایجاد شده در سقف پوشش تونل (تونل عمیقتر) در دو زاویه قائم و ٦۰ درجه



شکل ۸ تأثیر عمق تونل بر جابه‌جایی قائم سقف پوشش تونل در زاویه گسل ٦۰ درجه در دو نوع خاک متراکم و سست

شکل (۷) میزان جابه‌جایی قائم ایجاد شده در سقف پوشش تونل بر اثر گسلش در دو نوع خاک متراکم و سست و دو زاویه قائم و ۶۰ درجه در حالت حضور تونل عمیقتر را نشان می‌دهد. شکل (۸) جابه‌جایی قائم سقف پوشش تونل در دو نوع خاک متراکم و سست در زاویه گسل ۶۰ درجه را برای عمقهای مختلف تونل نشان می‌دهد. از این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که تراکم بیشتر خاک و ملایمتر شدن زاویه صفحه گسل هر دو، باعث انتقال جابه‌جایی‌های ایجاد شده در پوشش تونل به سمت فرودیواره می‌شوند. شیب ملایمتر جابه‌جایی در شرایط تونل عمیق در این شکل هم دیده می‌شود.

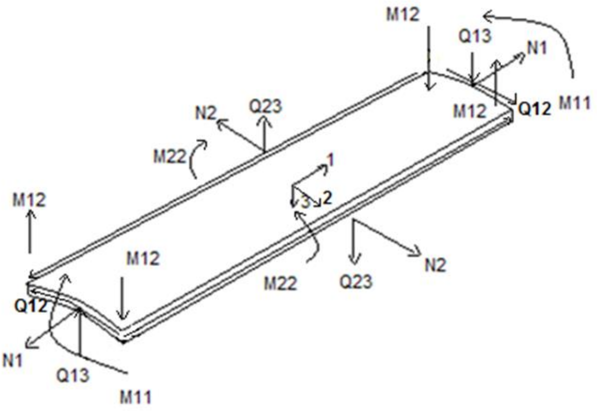
نیروهای وارد بر پوشش تونل. در اثر جابه‌جایی گسل، پوشش تونل تحت نیرو و لنگر در جهتهای مختلف قرار می‌گیرد. در نرم‌افزار پلکسیس سه‌بعدی، داده‌های خروجی برای یک صفحه (Plate) شامل تغییرشکلها و نیروها مطابق شکل (۹) می‌باشد. پدیده گسلش به طور عمده باعث به وجود آمدن خمش در راستای طولی تونل (M11) و نیروهای کششی (فشاری) N1 در طول محور تونل می‌شود. طبق قرارداد در پلکسیس نیروی محوری در کشش مثبت (+) و در فشار منفی (-) در نظر گرفته می‌شود. علامت ممانهای خمشی و نیروهای برشی نیز به سیستم مختصات محلی صفحه بستگی دارد.

بررسی نیروی محوری ایجاد شده در ناحیه سقف پوشش تونل در طول محور آن در گسلهای با زاویه ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه برای خاک متراکم و تونل سطحی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که با ملایمتر شدن زاویه گسل، نیروی محوری فشاری ایجاد شده در پوشش تونل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در اینجا زوایای گسل ۴۵ و ۷۵ درجه برای بررسی کاملتر به تحلیلها اضافه شده‌است.

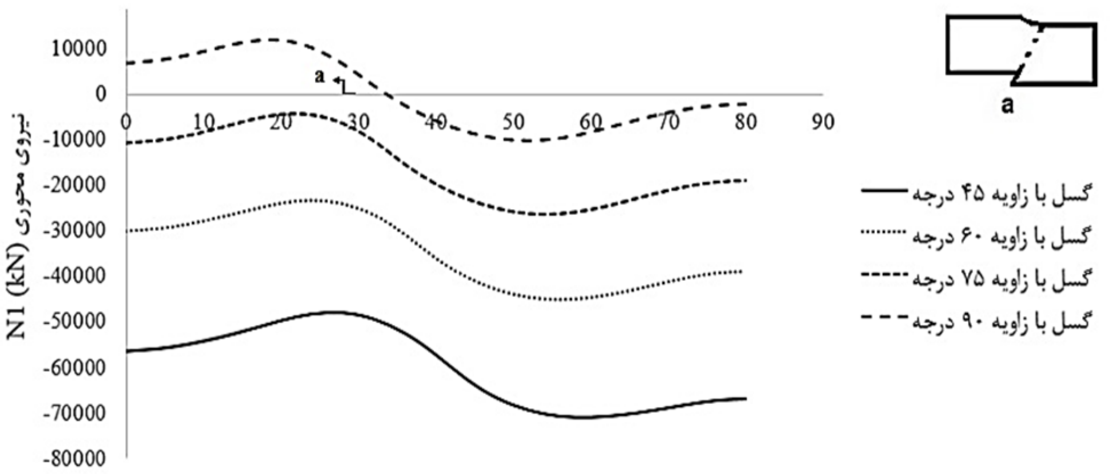
علاوه بر این، شکل (۱۰) نشان می‌دهد که در گسل قائم بخشی از سقف تونل به کشش می‌افتد ولی در گسلهای با زاویه ۴۵ تا ۷۵ درجه سقف تونل تماماً تحت فشار قرار می‌گیرد.

همچنین از بررسی تأثیر عمق تونل در زاویه‌های گسل قائم و ۶۰ درجه در حالت خاک متراکم (شکل ۱۱) به نظر می‌رسد که در تونل سطحیتر، محدوده تغییرات نیروی محوری کمتر است (به عنوان مثال در زاویه ۹۰ درجه، تفاضل ماکزیمم تا مینیمم نیروی محوری در تونل سطحیتر ۲۱۰۰ کیلونیوتون و در تونل عمیقتر ۳۰۰۰ کیلونیوتون است). این بدان معنی است که در تنشهای محدود کننده بیشتر (که در عمق بیشتر اتفاق می‌افتد) نیروی محوری بیشتری در اثر گسلش در تونل شکل می‌گیرد که در طراحی باید مورد توجه قرار گیرد.

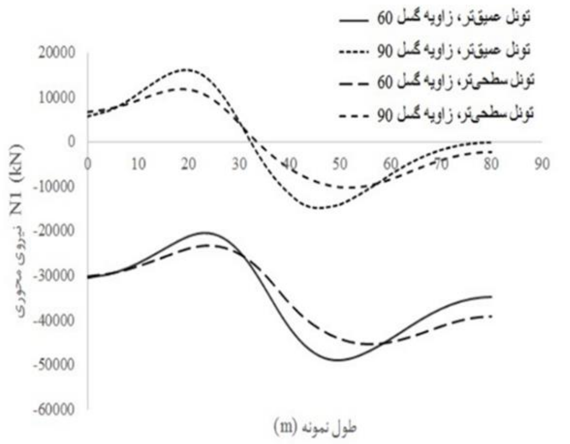
شکل (۱۲) نمودار لنگر خمشی را در حالت خاک متراکم در دو زاویه ۶۰ درجه و ۹۰ درجه و در دو حالت تونل سطحیتر و تونل عمیقتر نشان می‌دهد. براساس این نتایج در گسل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به گسل قائم، نمودار لنگر خمشی ایجاد شده در سقف تونل به سمت فرودیواره جابه‌جا شده‌است و در تونل عمیقتر مقادیر لنگر خمشی بیشتر از تونل سطحیتر (در زاویه گسل مشابه) می‌باشد. این مسئله بار دیگر اهمیت طراحی پوشش تونل در تونلهای عمیق را نشان می‌دهد.



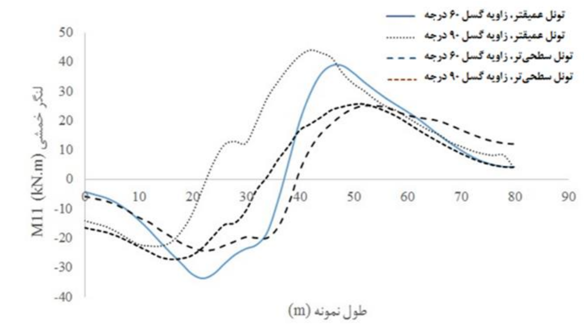
شکل ۹ معرفی نیروها و لنگرها در پوشش تونل



شکل ۱۰ نیروی محوری سقف تونل در طول محور تونل در گسلهای با زاویه ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه در خاک متراکم و تونل سطحی (مقادیر مثبت کشش و منفی فشار)



شکل ۱۱ تأثیر عمق تونل بر نیروی محوری در طول مدل در زاویه‌های گسل قائم و ۶۰ درجه در خاک متراکم



شکل ۱۲ : نمودار لنگر خمشی در حالت خاک متراکم در دو زاویه ۶۰ درجه و ۹۰ درجه و در دو حالت تونل سطحیتر و تونل عمیقتر

بررسی اثر مرز

در مدل‌سازی سازه‌های طویل همچون تونل، افزایش طول مدل به افزایش تلاش محا سباتی منجر می شود. لذا لازم ا ست طول بهینه برای مدل‌سازی سازه انتخاب شود. معیار این انتخاب، حصول اطمینان از صحت نتایج است.

در مدل‌سازی اولیه با توجه به توصیه مراجع برای لایه خاک، طول مدل ۸۰ متر (٤ برابر عمق لایه خاک) انتخاب شد. به منظور بررسی اثرات مرزبندی، با افزایش طول مدل از ۸۰ متر به دو طول ۱۸۰ متر (اضافه کردن ۵۰ متر به ابتدا و انتهای مدل) و ۲۸۰ متر (اضافه کردن ۱۰۰ متر به ابتدا و انتهای مدل)، مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که به عنوان معیار بررسی از بین نتایج متنوع، می‌توان پارامترهای هدف متعددی را، مانند تغییر شکل سطح زمین، جابه‌جایی و کرنش در سقف و کف تونل، و نیروها در پوشش تونل، مد نظر قرار داد. از این بین، تنشها (نیروها) در پوشش تونل می‌توانند نماینده مناسبی برای سایر پارامترها باشند زیرا به دلیل رفتار الاستیک بتن، تنشها و کرنشها به صورت خطی با یکدیگر تناسب دارند. از سوی دیگر بررسی مقادیر نیروها و لنگرها، امکان انجام طراحی سازه‌ای را هم فراهم می‌کند. لذا در این مقاله برای مقایسه اثر مرز در مدلهای با طول ۸۰، ۱۸۰،۲۸۰ از نمودارهای نیروی محوری (N1) و لنگر خمشی (M11) استفاده شده است.

محل اعمال گ سل در تمامی مدلها بر روی مبدأ مخت صات قرار دارد. در شکل (۱۳) نمودار نیروی محوری (N1) وارد بر

پوشـــش تونل در طول مدل، در مدلهای با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متری و برای زاویه‌های گســل ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه رســم شده است. در این شکل نتایج مدلهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متری، از تفاوت در طول آنها قابل تشخیص می‌باشند.

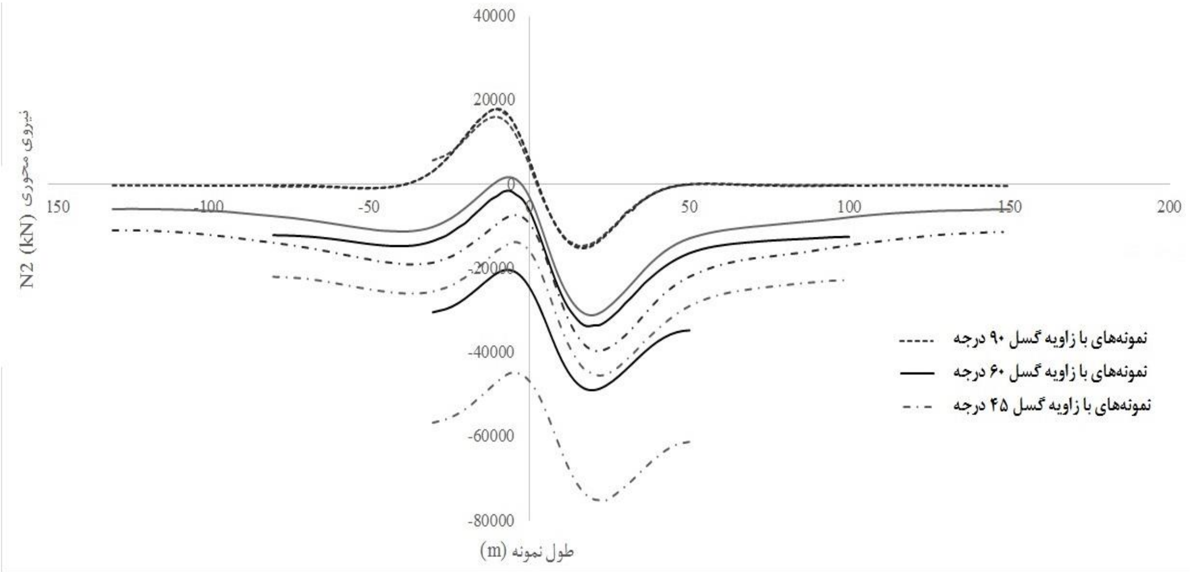
با توجه به شــکل (۱۳) در زاویه گســل کمتر (گســل ٤٥ درجه در مقایسه با گسل ۹۰ درجه)، حساسیت نیروی محوری به طول مدل انتخابی زیاد است. به طوری که برای زاویه گسل ٤٥ درجه، با افزایش طول مدل از ۸۰ متر به ۲۸۰ متر (واقعیتر شدن مدل‌سازی)، نیروی محوری فشاری وارد بر پوشش تونل کاهش قابل توجهی می‌یابد. این در حالی است که در گسل با زاویه قائم با افزایش طول مدل، تغییر چندانی در نیروی فشاری وارد بر پوشش تونل (N1) ایجاد نمی‌شود.

بنابراین در مدل‌ســازی انتشــار گســلش در زوایای گســل ملایمتر، جهــت حــذف اثرات نــامطلوب مرز، انتخــاب طول بیشــتری برای مدل توصــیه می‌شــود. چنان چه در مدل‌ســازی عددی، ابعاد متداول در ادبیات (طول حدود ٤-٥ برابر عمق لایه خاک) استفاده شده باشد، تفسیر نتایج نمودارهای نیروی محوری، نیاز به اصلاح در زوایای گسل کمتر (به خصوص ٤٥ درجه و ٦٠ درجه) و کاهش مقدار نیروی محوری دارد (مانند شکلهای ۱۱ و ۱۲ این مقاله).

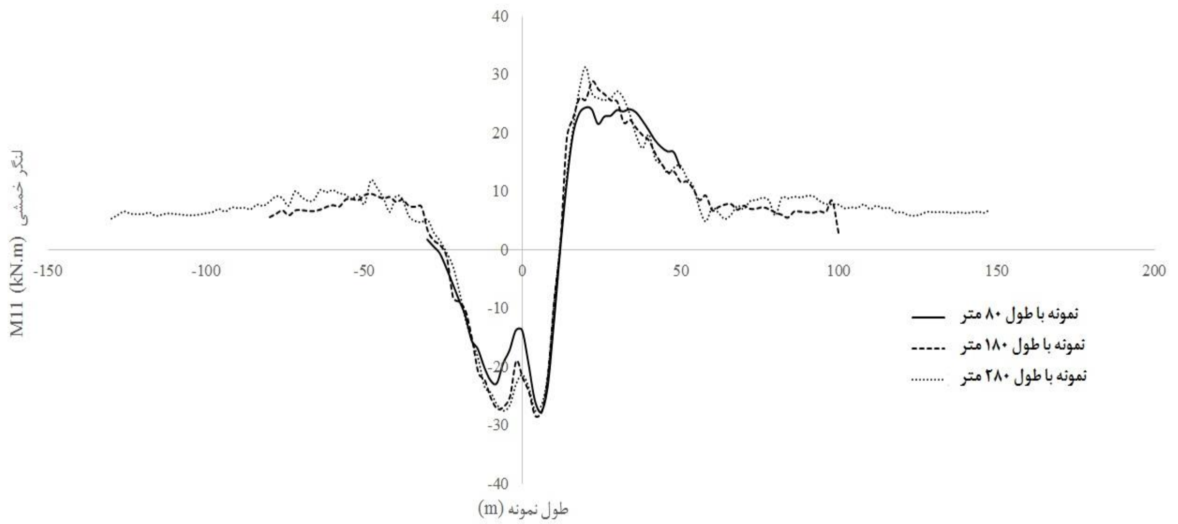
در شکل (١٤) نمودار لنگر خمشی (M11) وارد بر پوشش تونل در طول مدل، در مدل با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متری و برای زاویه‌های گســل ٤٥ درجه رســم شــده‌اند. همان طور که مشاهده می شود، افزایش طول مدل تغییر محسوسی در لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل ایجاد نمی‌کند.

بررسیها نشان می‌دهد که در زوایای گسل کمتر، که نسبت مؤلفه افقی جابه‌جایی به مؤلفه قائم آن بیشتر است، توجه به اثر مرزها در مدل سازی (فاصله مرزها از محل گسلش یا نسبت طول به عمق مدل) برای برآورد صــحیح نیروی افقی وارد بر پوشــش تونل، و در نتیجه تغییرشــکلها و کرنشــهای محوری، ضرورت دارد.

بـدین ترتیـب در تخمین نیروی محوری واقعی وارد بر پوشش تونل در مسئله انتشار گسلش برای زوایای گسل کمتر، جهت حذف اثرات نامطلوب مرز، مدل طویلتر (نسبت طول به عمق ۱۰-۱۵).



شکل ۱۳ نمودار نیروی محوری وارد بر پوشش تونل (N1) در طول مدل، در مدلهای با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متر و برای سه زاویه ٤٥، ٦٠ و ۹۰ درجه در شرایط خاک متراکم و تونل عمیقتر (مقادیر مثبت کشش و منفی فشار)



شکل ۱۴ نمودار لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل (M11) در طول مدل، در مدلهای با زاویه گسل ۴۵ درجه و با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متر در شرایط خاک متراکم و تونل عمیقتر

پیشنهاد می‌شود در حالی که برای زوایای نزدیک به قائم نسبت طول به عمق ٤ کفایت می‌کند. همچنین برای تخمین لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل، و تغییرشکلها و کرنشهای خمشی، در تمام زوایای گسل نسبت طول به عمق ٤–٥ مناسب می‌باشد.

طراحی سازه‌ای پوشش بتن در مقابل گسلش

بررسی عملکرد سازه بتنی در برابر نیروهای وارده برمبنای آیین‌نامه بتن ایران (مبحث نهم مقررات ملی ساختمان) [24]. برای یک مقطع از سازه بتنی با طول واحد و با نیروهای خروجی مدل‌سازی عددی انجام می‌شود. ابعاد مقطع یک مستطیل به طول واحد یعنی ۱۰۰۰ میلیمتر و عرض ۲٤۰ میلیمتر، که ضخامت بتن سازه بتنی می‌باشد، در نظر گرفته شده و فاصله آرماتورها مطابق استانداردهای اجرایی برابر ۷۵ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۵) هندسه مقطع رسم شده است.

در اینجا پوشش تونل تحت اثر توام نیروی محوری و خمش قرار گرفته است. لذا لازم است اندرکنش نیروی محوری و خمش مطابق روشهای مرسوم طراحی برای آن در نظر گرفته شود، اما به دلیلی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، ابتدا ماکزیمم ظرفیت خمشی خالص (بدون حضور نیروی محوری) و ماکزیمم نیروی محوری (بدون حضور لنگر خمشی) مقطع فوق را به دست می‌آوریم.

$$\begin{cases} b = 1000\ \text{mm} \\ d = 240 - 75 = 175\ \text{mm} \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} f'_c = 30\ \text{MPa} \\ f_y = 420\ \text{MPa} \end{cases} \quad (۲)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c = 0.805 > 0.67 \\ \beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c = 0.9 > 0.67 \end{cases} \quad (۳)$$

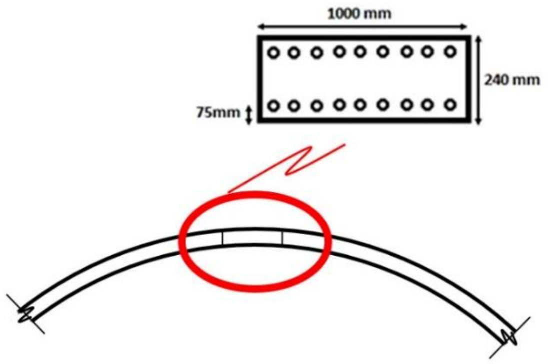
$$\begin{cases} f_{cd} = 0.6 f'_c \\ f_{yd} = 0.85 f_y \end{cases} \quad (٤)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (۵)$$

$$\rho_{max} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{700}{700 + f_y} = 0.0228 \quad (٦)$$

$$M_r = \rho b d^2 f_{yd} \left(1 - \rho \frac{f_{yd}}{2\alpha_1 f_{cd}}\right) \quad (۷)$$

$$\rho_{max} \rightarrow M_r = 179\ kN.m \quad (۸)$$



شکل ۱۵ هندسه عرض واحد از پوشش بتنی تونل

بنابراین حداکثر ظرفیت خمشی پوشش تونل ۱۷۹ کیلونیوتون-متر می‌باشد که از ماکزیمم مقادیر لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل (۳۰ کیلونیوتون مطابق شکل ۱۴) بیشتر است.

در ادامه حداکثر ظرفیت فشاری و کششی مقطع بتنی را به دست می‌آوریم.

تحمل کششی این مقطع (دو ردیف آرماتور بالا و پایین):

$$T = 2(\rho bd).f_{yd} = 2850\ kN \quad (۹)$$

تحمل فشار این مقطع:

$$C = bh \times 0.6f_c' = 4320\ kN \quad (۱۰)$$

همان طور که دیده می‌شود با توجه به مقادیر نیروی محوری در شکل (۱۳) (ماکزیمم فشار و کشش ۲۰۰۰۰ کیلونیوتون در گسل ۹۰ درجه و ماکزیمم فشار ۳۸۰۰۰ کیلونیوتون در گسل ٤٥ درجه)، مقطع بتنی فوق، علی رغم ظرفیت تحمل خمش، قادر به تحمل چنین نیروی محوری (حتی بدون حضور لنگر خمشی) نمی‌باشد. از این رو راهکارهای جایگزین کاهش خطر گسلش مانند استفاده از اتصالات منعطف پیشنهاد می‌گردد [24].

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای مختلف شامل نوع خاک، زاویه گسل و عمق تونل بر مسیر انتشار گسلش، نمودارهای جابه‌جایی سطح خاک و همچنین تغییر شکل و نیروهای وارد بر پوشش تونل بررسی شد و ظرفیت خمشی و محوری پوشش تونل برای تحمل مقادیر حاصل بررسی شد. این نتایج را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

الف) تأثیر تونل در تغییر شکل خاک:

- تونل باعث ایجاد نواحی تمرکز کرنش در خاک زیر خود و تا حد زیادی مانع از رسیدن جابه‌جایی گسلش به لایه‌های خاک بالاسر خود می‌شود.
- حضور تونل باعث ایجاد بالازدگی نسبی در خاک دو طرف می‌شود. توجه به تفاوت تغییر شکل سطح زمین در بالاسر تونل و کناره‌ها، به لحاظ مهندسی اهمیت دارد زیرا سازه‌های سطحی را تحت تغییر شکل غیر یکنواخت قرار می‌دهد.
- حضور تونل موجب توزیع ملایمتر جابه‌جاییها در سطح زمین (کاهش گرادیان حداکثر تغییر شکل سطح زمین) در بالاسر خود می‌شود که با افزایش عمق تونل این تأثیرگذاری بیشتر است.
- ناحیه برشی تمرکز یافته در زیر تونل به سمت فرودیواره توسعه می‌یابد. لذا نسبت به شرایط زمین آزاد، مناطق فرودیواره مورد تهدید بیشتری هستند.

ب) نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل تحت اثر گسلش:

- در گسلهای با زاویه ملایمتر نیروی محوری وارد بر پوشش تونل بیشتر می‌باشد. در گسل نزدیک به قائم بخشی از سقف تونل به کشش می‌افتد ولی در گسلهای با زاویه کمتر سقف تونل تماماً تحت فشار قرار می‌گیرد.
- در تونل عمیقتر نسبت به تونل سطحیتر، نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل افزایش می‌یابد. این مطلب اهمیت زیادی در طراحی پوشش تونلهای عمیقتر دارد که باید مورد توجه طراحان قرار گیرد.
- در مدل‌سازی اندرکنش گسل و تونل در زوایای گسل نزدیک به قائم، انتخاب طول ٤-٥ برابر عمق لایه خاک برای مدل کفایت می‌کند. اما در زوایای گسل ملایمتر، جهت حذف اثرات نامطلوب مرز، طول مدل ۱۰-۱۵ برابر عمق لایه خاک پیشنهاد می‌شود. چنان چه ابعاد مدل کمتر انتخاب شود، مقادیر نیروی محوری بیشتر از مقدار واقعی برآورد خواهد شد (بین ۱/۵ تا ۲ برابر) و طراحی بر اساس آن مقرون به صرفه نخواهد بود. شایان ذکر است که انتخاب طول مدل کمتر (٥-٤ برابر عمق لایه خاک)، مشکلی در برآورد مقادیر لنگر خمشی ایجاد نخواهد کرد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] J.D. Bray, R.B. Seed, H.B. Seed, "Analysis of Earthquake Fault Rupture Propagation through Cohesive Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 3, pp. 562-580, 1994.

[2] J. Johansson, K. Konagai, "Fault Induced Permanent Ground Deformations-An Experimental Comparison of Wet and Dry Soil and Implications for Buried Structure", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, pp. 45-53, 2006.

[3] I. Anastasopoulos, G. Gazetas, M.F. Bransby, M.C.R. Davies, A. El Nahas, "Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, pp. 943-958, .2007.

[4] M.L. Lin, C.F. Chung, F.S. Jeng, "Deformation of Overburden Soil Induced by Thrust Fault Slip", *Engineering Geology*, vol. 88, pp. 70-89, 2007.

[5] D. Loukidis, G.D. Bouckovalas, A.G. Papadimitriou, "Analysis of Fault Rupture Propagation through Uniform Soil Cover", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 29, pp. 1389-1404, 2009.

[6] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Numerical Modeling of Fault Rupture Propagation through Two-Layered Sands", *Scientia Iranica*; vol. 21, no. 1, pp.19-29, 2013.

[7] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Numerical Modelling of Fault Rupture Propagation through Layered Sands", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 23, no. 9, 1139-1155, 2019.

[8] M. Hazeghian, A. Soroush, "DEM Simulation of Reverse Faulting through Sands with the aid of GPU Computing", *Computers and Geotechnics*, vol. 66, pp. 253-263, 2015.

[9] M. Hazeghian, A. Soroush, "DEM-Aided Study of Shear Band Formation in Dip-Slip Faulting through Granular Soils", *Computers and Geotechnics*, vol. 71, pp. 221-236, 2016.

[10] M. Hazeghian, A. Soroush, "Numerical Modeling of Dip-Slip Faulting through Granular Soils using DEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 97, pp. 155-171, 2017.

[11] M. Hazeghian, A. Soroush, "DEM Simulation to Study the Effect of the Ground Surface Geometry on Dip-Slip Faulting through Granular Soils", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 24, no.7, pp. 861-879 2020.

[12] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Numerical Modeling of Reverse Fault Rupture Propagation through Clayey Embankments", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 122-132, 2013.

[13] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, M. Khoshini, "Two-Dimensional Numerical Modeling of Fault Rupture Propagation through Earth Dams under Steady State Seepage", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 88, pp. 60-71, 2016.

[14] M. Naeij, A. Soroush, Y. Javanmardi, "Numerical Investigation of the Effects of Embedment on the Reverse Fault-Foundation Interaction", *Computers and Geotechnics*, vol. 113, 2019.

[15] M.H. Baziar, A. Nabizadeh, C.J. Lee, W.Y. Hung, "Centrifuge Modeling of Interaction between Reverse Faulting and Tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 65, pp. 151-164., 2014.

[16] M. Rojhani, M. Moradi, A. Ghalandarzadeh, S.Takada, "Centrifuge Modeling of Buried Continuous Pipelines Subjected to Reverse Faulting", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 49, pp. 659-670, 2012.

[17] M. Kiani, T. Akhlaghi, A. Ghalandarzadeh, "Experimental Modeling of Segmental Shallow Tunnels in Alluvial Affected by Normal Faults", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 51, pp. 108-119, 2016.

[18] S. Joshi, A. Prashany, A. Deb, "Analysis of Buried Pipelines Subjected to Reverse Fault Motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 930-940, 2011.

[19] M. Hashemzadeh, A. Soroush, Z. Saffarzadeh Kermani, "Numerical Analysis of Behavior of Buried Steel Pipes Subjected to Dip Slip Faults", *8th National Congress on Civil Engineering, Iran (Islamic Republic of)*, May 7-8, (2014).

[20] M. Ranjbarnia, M. Zaheri, D. Dias, "Three-Dimensional Finite Difference Analysis of Shallow Sprayed Concrete Tunnels Crossing a Reverse Fault or a Normal Fault: A Parametric Study", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 14, pp. 998-1011, 2020.

[21] Plaxis, Inc. Plaxis Version 2017.01 user's manual, 2017.

[22] J.D. Bray, R.B. Seed, L.S. Clu, H.B. Seed, "Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 3, pp. 543-561, 1994.

[23] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, R. Solhmirzaei, "Effect of Mechanical Soil Properties on Fault Rupture Propagation through Granular Soils", *15th World Conference on Earthquake engineering*, Lisbon, Portugal, (2012).

[24] A. Fazli, M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Investigating Mitigation Measures for Fault Rupture Hazard of Strike-Slip Faulting on Buried Pipelines by Numerical Modeling", *13th International Congress on Civil Engineering*, Iran, October 17-19, (2023), (In Persian)

Journal Ferdowsi Civil Engineering, 36, 1, 2023. (35-50)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Forecasting Travel Demand using Self-Correlated Moving Average Time Series Methods (Case Study: Qom-Tehran Freeway)

Research Article

Hassan Khaksar[1], Seyed Ahmad Almasi,[2] Mohammad Mehdi Khabiri[3], Amir Golro[4], Hossein Bahmani[5]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.77217.1157

1. Introduction

Transportation, as one of the most important parts of the infrastructure of any country, is of great importance in mobility and dynamism of any society in order to achieve the goals of economic and social development programs. One of the main factors that can play a guiding role in the policy making and grand plans of every country's senior managers in order to achieve the above goals is travel demand forecasting. In order to plan and manage the national macro in the coming years, it is necessary to forecast the volume of travel demand. If the current travel demand is available, it is possible to predict the travel demand for the future. Tehran-Qom freeway is the main corridor of the north-south freeway, which hugely contributes to the transfer of goods (about 600 million tons annually) and passengers from the north to the south of the Iran. A high volume of vehicles pass through this freeway continuously and on all days of the year, especially on religious occasions. Therefore, forecasting travel demand for this freeway seems essential. Therefore, in order to correctly predict the amount of travel demand in different origins and destinations, in order to ensure the need to build different routes in the future, it is necessary to use more accurate methods in the forecasting process.

2. Literature review

In previous studies, the use of traditional transportation demand modeling based on separate trips has created many challenges and caused changes and transformations in such models. Most researchers have developed forecasting models with sample values without calibration, but the input parameters of these models can affect many of the extracted results, especially the traffic flow pattern prediction. Therefore, among the available forecasting methods, time series methods are widely used in forecasts when problem data is available sequentially. This method can provide accurate results. Forecasting travel demand is very important for national strategy planning. Therefore, it is necessary to choose the right method for forecasting. The methods that have been used before for modeling and forecasting travel demand are mainly based on four-step methods. Therefore, predictions are often made with regression and neural network methods, based on the results of origin-destination studies, and using parameters such as population-income-cost per capita car ownership to predict travel between origins and destinations.

3. Method

The identification process based on linear models such as ARMA is known as the Box-Jenkins method, which includes 4 steps. In the current research, the data of the traffic counter (plate reader) of the Qom-Tehran highway were used in a 10-year period. The type of available data is time series data, and according to this aspect of the nature of the data, their modeling should be done. A time series is a set of quantitative observations that are measured consecutively at time intervals.

There are different techniques for modeling, and parametric method of autocorrelated moving average is one of the time series models; Therefore, in order to predict the travel demand, autoregressive (AR), moving average (MA), autocorrelated moving average (ARMA) methods were used in this research according to Equations 1 to 5, using ITSM software.

$$X_t-\mu=\varphi\left(X_{t-1}-\mu\right)+a_t \qquad (1)$$

We consider the prediction problem in a future time unit, by replacing t with t+1 in Equation 1 and having $X_1,\dots,X_{t-1},X_t$, if we consider the conditional mathematical expectation of both sides of the above equation, the Equation 2 is obtained:

$$\hat{X}_t(1)-\mu=\varphi\left[E\left(X_t|X_t,X_{t-1},\dots,X_1\right)-\mu\right]+E\left(a_{t+1}|X_t,X_{t-1},\dots,X_1\right) \qquad (2)$$

---

*Manuscript received: February 12, 2023, Revised, September 7, 2022, Accepted, June 19, 2022.

[1] Corresponding Author: Faculty of Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch .
Email: h.khaksar@iau-tnb.ac.ir

[2] PHD candidate, transportation engineering, Imam Khomeini University.

[3] Associate Professor, Civil Engineering Department - Geotechnics and Road, Yazd University.

[4] Assistant Professor Department of Civil and Environmental Engineering Geotechnics, Roads and Transportation Specialty.

[5] Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.

To illustrate how to solve the problems that arise in forecasting moving averages or compound patterns, we consider the case of MA (1) with an anti-zero mean:

$$X_t = \mu + a_t - \theta a_{t-1} \quad (3)$$

Again, if we replace t with t+1 and consider the mathematical hopes of both sides, we will have:

$$\hat{X}_t(1) = \mu - \theta E(a_t \mid X_t, X_{t-1}, \ldots, X_1) \quad (4)$$

However, for an invertible pattern, Equation 5 shows that at is a function of ...,$_{-1}$,X_t:

$$E(a_t \mid X_t, X_{t-1}, \ldots, X_1) = a_t \quad (5)$$

4. Case study

The required data were extracted from the traffic counter data (plate reader) on a monthly and daily basis of the Road Organization of the country on the Qom-Tehran route. The degree of correlation between independent variables was measured to reduce the error. After modeling and forecasting, the models were compared based on the degree of correlation and the degree of accuracy in estimating the dependent variable in each model. Table 1 shows the correlation and absolute error of the time series method, which shows that the time series method has an acceptable correlation and error for prediction.

Table 1. Comparison of predicted values by month

Month	Actual values	Predicted values	Absolute error (x 1000)
	Basic data	time series	Standard deviation
April	1163327	1194758	-31.43
May	988187	987241	0.94
June	837682	841487	-3.805
July	1064400	1064157	0.243
August	1071527	1069471	2.056
September	1229574	1236457	-6.882
October	926087	927145	-1.058
November	931638	928471	3.167
December	860209	860845	-0.636
January	783899	782541	1.358
February	866766	859541	7.225
march	743500	758941	-15.440

5. Conclusion

The data obtained from field observations and traffic studies alone cannot represent the future situation, but if traffic data is available in the current situation, it is possible to estimate the volume of travel demand in the future by modeling. The Persian Gulf Freeway is one of the busiest and most vital transportation freeways of Iran, which transports a large volume of goods and passengers every year. The data used in this research is actually the amount of vehicle traffic on a monthly basis taken from the Iran Road Maintenance and Transportation Organization, considering that the nature of the data is the nature of time series, using the self-correlated moving average time model based on the data of the current conditions, a model was developed.

مهندسی عمران فردوسی

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

پیش‌بینی تقاضای سفر با استفاده از روشهای سری زمانی میانگین متحرک خود همبسته (مطالعه موردی: آزادراه قم-تهران)*

مقاله پژوهشی

حسن خاکسار[۱]   سید احمد الماسی[۲]   محمد مهدی خبیری[۳]   امیر گلرو[٤]   حسن بهمنی[٥]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.77217.1157

چکیده *کیفیت جریان ترافیک یکی از مشخصات اصلی شبکه حمل و نقل است که کاربرد فراوانی در مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی شهری، اولویت‌بندی مسیرها، کاهش تراکم ترافیک و زمان سفر دارد؛ بنابراین برآورد میزان حجم ترافیک و پیش‌بینی آن در آینده یکی از مسائل مهم برنامه‌ریزان حوزه حمل و نقل است. مسئله پیش‌بینی، مستلزم مدل‌سازی و تعیین متغیرهای تأثیرگذار روی تغییرات پدیده‌ای خاص است. در این پژوهش به پیش‌بینی تقاضای سفر با استفاده از روشهای سری زمانی پرداخته شده است. داده‌های موردنیاز این تحقیق، از سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای تهیه گردیده است. در این مطالعه به منظور ساخت مدل، از دو فرآیند اتورگرسیو و میانگین متحرک با رویکرد باکس-جنکینز استفاده شده است. با استفاده از روشهای فوق، میزان تقاضا در سالهای آتی تا افق ۱۴۰۴ در آزادراه قم-تهران پیش‌بینی شده است. نتایج مطالعه نشان داد، از بین مدلهای خود همبسته و میانگین متحرک و تلفیق دو مدل یعنی میانگین متحرک-خود همبسته، مدل سوم دقت قابل‌قبولتری دارد. پارامترهای این مدل (٤،٥) ARMA به دست آمد. همچنین صحت‌سنجی مدل ساخته شده، بر اساس مقدار میانگین درصد خطای مطلق، ۰/۰٤۷، مقادیر R و R^2 به ترتیب ۰/۹٤ و ۰/۸۹ محاسبه شد که نشان می‌دهد مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است.*

واژه‌های کلیدی تقاضای سفر، سری زمانی میانگین متحرک خود همبسته، روش باکس-جنکینز، مدل پیش‌بینی.

Forecasting Travel Demand using Self-Correlated Moving Average Time Series Methods (Case Study: Qom-Tehran Freeway)

Hassan Khaksar   Seyed Ahmad Almasi   Mohammad Mehdi Khabiri   Amir Golroo, Hossein Bahmani

Abstract *The quality of traffic flow is one of the main characteristics of the transportation network, which is widely used in issues related to urban planning, route prioritization, reducing traffic congestion and travel time; Therefore, estimating the volume of traffic and predicting it in the future is one of the important issues for transportation planners. The problem of prediction requires modeling and determining the variables affecting changes in a particular phenomenon. In this research, travel demand is predicted using time series methods. The data required for this research have been prepared from the Roads and Transportation Organization. In this study, in order to build a model, two autoregressive processes and moving average have been used. Using the above methods, the amount of demand in the coming years up to the horizon of 1404 on the Qom-Tehran freeway is predicted. The results of the study showed that among the self-correlated and moving average models and the combination of two models, namely the self-correlated moving average, the third model has a more acceptable accuracy. The parameters of this model (4,5) ARMA were obtained. Also, the validity of the constructed model, based on the average value of absolute error percentage, was 0.047, R and R2 values were calculated 0.94 and 0.89, respectively, which shows that the model has acceptable accuracy.*

Keyword travel demand, time series, Box-Jenkins method, Prediction model.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۲۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دکتری حمل‌ونقل، استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

Email: h.khaksar@iau-tnb.ac.ir

(۲) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین.

(۳) دانشیار، انشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

(٤) استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

(٥) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه یزد.

مقدمه

حمل و نقل به عنوان یکی از مهمترین بخشهای زیربنایی هر کشور در تحرک و پویایی جامعه جهت دستیابی به اهداف برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از اصلیترین عواملی که می‌تواند در امر سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزیهای کلان مدیران ارشد کشور به‌منظور تحقق اهداف فوق نقش هدایت‌کننده‌ای را ایفا کند، پیش‌بینی تقاضای سفر است. به منظور برنامه‌ریزیها و مدیریتهای کلان ملی در سالهای آتی، پیش‌بینی میزان حجم تقاضای سفر مورد نیاز است.

اگر میزان تقاضای سفر وضع موجود در دسترس باشد می‌توان برای سالهای آینده میزان تقاضای سفر را پیش‌بینی کرد. آزادراه تهران–قم کریدور اصلی محور شمال به جنوب است که سهم بسیار زیادی در انتقال کالا (سالانه حدود ۶۰۰ میلیون تن) و مسافر از شمال به جنوب کشور را دارا می‌باشد [1]. از این آزادراه به‌طور پیوسته و در تمام روزهای سال خصوصاً در مناسبتهای مذهبی حجم بالای وسایل نقلیه عبور می‌کند؛ بنابراین پیش‌بینی تقاضای سفر برای این محور امری ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو به منظور پیش‌بینی صحیح از میزان تقاضای سفر در مبادی و مقاصد مختلف، جهت حصول اطمینان از نیاز به احداث مسیرهای مختلف در سالهای آتی، لازم است تا از روشهای دقیقتری در فرایند پیشبی‌نی، استفاده گردد. تقاضای سفر در شرایط فعلی به‌وسیله مطالعات ترافیکی و برآورد حجمی قابل برآورد است اما از آنجایی‌که عوامل مؤثری در کاهش یا افزایش میزان تقاضای سفر به‌صورت یکنواخت یا غیر یکنواخت وجود دارد نمی‌توان از میزان تقاضای سفر در شرایط فعلی به طور مستقیم برای برنامه‌ریزی در افقهای بلندمدت استفاده کرد. بدین‌منظور با استفاده از اطلاعات تقاضای سفر فعلی و نیز یافتن عوامل مؤثر و تأثیرگذار در میزان رشد این سفرها و همچنین استفاده از الگوها و مدلهای تحلیلی برای پیش‌بینی تقاضای سفر در سال طرح، می‌توان میزان تقاضای سفر در افقهای بلندمدت را پیش‌بینی نمود در بین روشهای پارامتری روش سریهای زمانی؛ لیکن فرایندی بسیار عمومی و در عین حال پیچیده‌اند [2]. زیرا به دلیل وجود همبستگیهای شدید بین پارامترهایش می‌تواند برای پیش‌بینی پدیده‌ها در آینده بر اساس مقادیر اولیه رویکرد مناسبی ارائه دهد [3]. در این مطالعه از روش سری زمانی اتورگرسیو، میانگین متحرک، میانگین متحرک خود همبسته به منظور پیش‌بینی تقاضای سفر استفاده گردیده است.

پیشینه موضوعی

موضوع تقاضای سفر برای برنامه‌ریزی در شرایط فعلی و کوتاه‌مدت (برنامه‌ریزی برای همان سال) و افقهای بلندمدت از اهمیت زیادی برخوردار است. محققان زیادی در این زمینه تحقیقاتی انجام داده‌اند [1; 2, 4-9]

در مطالعات پیشین استفاده از مدل‌سازی سنتی تقاضای حمل و نقل بر اساس سفرهای مجزا، چالشهای فراوانی را ایجاد کرده و باعث تغییر و تحول در این‌گونه مدلها شده است. اکثر محققان مدلهای پیش‌بینی را با مقادیر نمونه‌ای و بدون کالیبراسیون توسعه داده‌اند، لیکن پارامترهای ورودی این مدلها بر بسیاری از نتایجِ استخراج شده، به ویژه پیش‌بینی الگوی جریان ترافیک، می‌تواند تأثیرگذار باشد. در مطالعه‌ای به پیش‌بینی تقاضای سفر هوایی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده در سفرهای برون ایالتی مربوط به فرودگاه‌های مختلف ایالات متحده پرداخته شده است در این مطالعه، پیش‌بینی تعداد کل مسافران با استفاده از متغیرهای کلان اقتصادی انجام شده است. نتایج مطالعه نشان داد که روشهای استفاده شده به‌طور مؤثر از همبستگی بین پارامترهای سفرهای هوایی، در فرودگاه‌های مختلف استفاده می‌کنند [4].

در پژوهش دیگر به‌منظور پیش‌بینی تقاضای سفر از مدلهای خود همبسته و مدل خطی اتورگر سیو در سری زمانی ا ستفاده شده ا ست. در این مطالعه اطلاعات ماهیانه ترکیه و ک شورهای اتحادیه اروپا طی بازه ۱۹۹۷ الی ۲۰۱۶ مورد برر سی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل غیر خطی نمی‌تواند پیش‌بینی مدل غیرخطی را بهبود بخشد [5]. در مطالعه دیگری، یک مدل چندمنظوره سری زمانی بر مبنای تئوری همگام سازی برای تحلیل ارتباط مسافر و پرواز در فرودگاه‌های آلمان بین سالهای ۲۰۱۶–۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفته است. این مطالعه رویکردهای مدل سری زمانی و مدل چهار مرحله‌ای را توصیف می‌کند و مزایا و معایب هر دو رویکرد مدل کلاسیک و جدید را مورد بحث قرار داده و پیشنهادهایی در ارتباط با این موضوع ارائه کرده است [10]. وجود همبستگیهای شدید بین پارامترهای سری زمانی می‌تواند برای پیش‌بینی تقاضای آینده بر اساس

مقادیر اولیه رویکرد مناسبی ارائه دهد [11]. در مطالعه‌ای در ایالات متحده از روش پیش‌بینی جدیدی استفاده شده است که همبستگی ذاتی بین پارامترهای مؤثر در تقاضای اولیه و پایانی را بررسی کرده است. سپس اعتبار سنجی داده‌ها با استفاده از قسمتی از داده‌های اصلی و مقایسه آن با نتایج مدلهای پیشنهادی انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است همبستگی بین پارامترهای سری زمانی می‌تواند به طور چشمگیری دقت پیش‌بینی دقیق تقاضای آینده را بهبود بخشد [3].

بنابراین از بین روشهای پیش‌بینی موجود، روشهای سری زمانی کاربرد زیادی در پیش‌بینیهایی دارد که داده‌های مسئله به صورت دنباله‌ای در دسترس است. این روش می‌تواند نتایج دقیقی را ارائه کند [11]. به‌عنوان مثال در پژوهشی به کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی سریهای زمانی و مقایسه آن با مدل ARIMA پرداخته شده است. مقایسه مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی در این مطالعه نشان داده است مدل شبکه عصبی نسب به مدل ARIMA دقت بالاتری دارد[12]. ارزیابی مقایسه‌ای دقت مدلهای سری زمانی، اتورگرسیو (AR)، میانگین متحرک (MA)، میانگین متحرک خود هم بسته (ARMA) در پیش‌بینی با استفاده از داده‌های روزانه و ماهانه نشان داد که مدل ARIMA دارای بالاترین دقت در بین مدلهای سری زمانی جهت داده‌های نا ایستا می‌باشد (13;14). بنابراین از آنجایی که اطلاعات تردد وسایل نقلیه از نوع سری زمانی نا ایستا می‌باشند بنابراین می‌توان با استفاده از ARIMA پیش‌بینی قابل قبولی ارائه نمود. در مطالعه دیگری به ارزیابی مدلهای تک متغیره، چند متغیره و تلفیقی سری زمانی در پیش‌بینی و برآورد متوسط بار رسوب سالانه برای ٤٢ ماه متوالی پرداخته شده است. در این مطالعه از روشهای سری زمانی ARIMA، مدل چند متغیره ARMA و مدل تلفیقی از این دو پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل چند متغیره تلفیقی از دقت بالاتری نسبت به سایر مدلها برخوردار است [15, 16]. از این مدلها در زمینه پیش‌بینی کوتاه مدت تعداد مسافر هم استفاده شده است و عملکرد آن در مقایسه با مدل کلاسیک خود توزیع تجمعی میانگین متحرک، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه پیش‌بینی مدلهای مذکور، با استفاده از آزمون آماری و محاسبه دقت پیش‌بینی، نشانگر عملکرد بهتر روش برنامه‌ریزی چند جمله‌ای است [17]. در پژوهش دیگری تقاضای مسافر با استفاده از روش سری زمانی پیش‌بینی شده است. در مطالعه فوق برای ارزیابی عملکرد مدلها از درصد میانگین خطای مطلق و میانگین ریشه مربعات خطا استفاده شده است [18]. مدل کلاسیک خود توزیع تجمعی میانگین متحرک (ARMA) جهت پیش‌بینی مقادیر آتی متغیرها با استفاده از مقادیر متغیر در دوره‌های گذشته به کار می‌رود. مطالعات انجام شده در این زمینه نیز در بیشتر موارد حاکی از برتری روشهای نوین می‌باشد [19, 20]. در مطالعه‌ای از مدلهای سری زمانی برای پیش‌بینی تقاضای سفر در محور خراسان به روش باکس-جنکینز استفاده شده است. در این مطالعه دلایل متعددی برای انتخاب این روش عنوان شده است که عمده‌ترین آنها وابسته یا همبسته بودن تقاضای سفر در فصلها و ماههای مختلف سال و همچنین تکرار رفتاری منظم در دوره‌های زمانی با طول ثابت می‌باشد. مدل برازش شده نهایی، از الگوی فصلی ARIMA یا به‌طور خلاصه (SARIMA) تبعیت کرده و حداقل ٪۹۵ دقت در پیش‌بینی را دارا می‌باشد [21,16].

همان گونه که ملاحظه شد، پیش‌بینی تقاضای سفر به منظور برنامه‌ریزیهای استراتژی ملی بسیار حائز اهمیت است. بنابراین انتخاب روش مناسب برای پیش‌بینی نیز ضروری است. رو شهایی که پیش از این برای مدل سازی و پیش‌بینی تقا ضای سفر استفاده شده است عمدتاً بر مبنای روشهای چهار مرحله‌ای بوده‌اند. بنابراین پیش‌بینیها غالباً با روش رگرسیون و روش شبکه عصبی، بر اساس نتایج مطالعات مبدأ- مقصد انجام‌گرفته است و با استفاده از پارامترهایی چون جمعیت-درآمد-هزینه-سرانه مالکیت خودرو بین مبادی و مقاصد به پیش‌بینی سفر پرداخته شده است. باید توجه داشت که در مسیرهای برون‌شهری خصوصاً مسیر کریدورهای اصلی کشور، میزان تردد وسایل نقلیه وابسته به سفرهای عبوری بوده که مبدأ-مقصد آنها لزوماً شهرهای ابتدا و انتهای مسیر نیستند. بنابراین مدلهای رگرسیون و شبکه عصبی ممکن است نتوانند برآورد عددی قابل قبولی برای آینده ارائه دهند. همچنین باید در نظر داشت مدلهای سری زمانی از دقت بالاتر و وابستگی کمتری بین متغیرها برخوردار است. به همین منظور در این پژوهش از مدلهای سری زمانی که وابسته به میزان تردد عبوری در مسیرها می‌باشد استفاده شده است. محور مورد مطالعه در این پژوهش قسمتی از آزادراه شماره ۷ راههای ملی کشور ایران در مسیر قم-تهران (آزادراه خلیج فارس) می‌باشد.

داده‌ها و روش تحقیق

مفاهیم. در این بخش مفاهیم اصلی الگوهای سریهای زمانی اتورگرسیو- میانگین متحرک (ARMA) که در الگوسازی وضعیت‌های دنیای واقعی، از اهمیت زیادی برخوردار است مورد بحث قرار می‌گیرد.

- اتورگرسیو- میانگین متحرک(ARMA)

- فرایندهای اتورگرسیو:(AR)

یک سری زمانی مجموعه‌ای از مشاهدات xt است که هر کدام در زمان خاص t جمع‌آوری شده‌اند. در فرایندهای اتورگرسیو همان‌طور که از اسم آنها مشخص است رگرسیون روی داده‌های زمانی قبلی انجام می‌شود. فرایند اتورگرسیو مرتبه p ام Xt در معادله زیر صدق می‌کند و آن را با نماد AR(p)نمایش می‌دهند.

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} - \varphi_2 X_{t-2} - \text{L} - \varphi_p X_{t-p} + a_t \quad (۱)$$

X_t را سری زمانی مشاهده شده فرض کرده و a_t را یک سری اغتشاش خالص یعنی دنباله متغیرهای تصادفی مستقل و هم توزیع با میانگین صفر در نظر می‌گیرند. یک فرایند خطی کلی را می‌توان به‌صورت ترکیب خطی وزن‌دار از جملات حال و گذشته فرایند اغتشاش خالص نشان داد. $\emptyset$ هم به‌عنوان ضریب در نظر گرفته‌شده است.

X_t را سری زمانی مشاهده شده فرض کرده و a_t یک سری اغتشاش خالص یعنی دنباله متغیرهای تصادفی مستقل و هم توزیع با میانگین صفر در نظر می‌گیرند. یک فرایند خطی کلی را می‌توان به‌صورت ترکیب خطی وزن‌دار از جملات حال و گذشته فرایند اغتشاش خالص نشان داد. Φ هم به‌عنوان ضریب در نظر گرفته‌شده است.

- فرایند میانگین متحرک: (MA)

فرمول تابع خودهمبستگی فرایند $MA_{(q)}$ کلی به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$\rho_K \begin{cases} \dfrac{-\theta k + \theta 1 \theta k+1 + \text{L} + \theta q - k\theta q}{1+\theta 1^2 + \theta 2^2 + \text{L} + \theta q\, 2} & k = 1, 2, \ldots q \\ 0 & k \geq q \end{cases}$$

(۲)

اگر قسمتی از سری AR و بخشی MA فرض شود، در این صورت یک الگوی ARMA به دست می‌آید. گوییم Xt یک فرایند مرکب اتورگرسیو–میانگین متحرک از مرتبه p*q است و با نماد ARMA(p,q) نمایش داده می‌شود هرگاه

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} - \varphi_2 X_{t-2} - \text{L} - \varphi_p X_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \text{L} - \theta_q a_t - q$$

(۳)

در این رابطه θ ها ضرایب میانگین متحرک هستند. مدلهای ARIMA از انعطاف‌پذیری بالایی در امر پیش‌بینی برخوردار بوده و در زمینه سریهای زمانی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک مدل ARIMA از سه فرایند تشکیل‌شده است: بخش خود همبسته (AR)، بخش تفاضل‌گیر برای حذف روند و تضمین ایستایی سری (I)، بخش میانگین متحرک (MA)، هر یک از این فرایندها خواص جداگانه مربوط به خود را در توزیعهای تصادفی دارند.

یک فرایند تصادفی زمانی پایا تلقی می‌شود که میانگین و واریانس آن در طول زمان ثابت بوده و مقدار کوواریانس بین دو دوره زمانی فقط به فاصله بین دو دوره بستگی داشته باشد، یک سری زمانی ناپایا است که هیچ یک از شرایط پایایی را نداشته باشد. مدل گام تصادفی را می‌توان مثال ساده از سری زمانی ناپایا دانست.

سری زمانی که میانگین آن تابعی از زمان باشد را پایا در میانگین گویند به عبارتی دیگر این سری زمانی باید شامل روند قطعی یا تصادفی یا هر دو روند باشد. به‌طور کلی اگر یک سری زمانی I(d) باشد پس از d بار تفاضل گیری سری I(0) به دست می‌آید؛ اما اگر یک سری زمانی پس از d بار تفاضل گیری پایا شود و با استفاده از فرایند ARMA مدل سازی شود، در این صورت سریهای زمانی به سری زمانی ARIMA(p, d, q) تبدیل می‌شود که p تعداد جملات خود رگرسیون، d نشانگر تعداد دفعات تفاضل‌گیری برای پایا شدن و q نیز تعداد جملات میانگین متحرک می‌باشد.

مدلهای ARIMA از انعطاف‌پذیری بالایی در امر پیش‌بینی برخوردار بوده و در زمینه سریهای زمانی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک مدل ARIMA از سه فرایند تشکیل شده است: بخش خود همبسته (AR)، بخش تفاضل‌گیر برای حذف روند و تضمین ایستایی سری (I)، بخش میانگین متحرک

(MA)، هر یک از این فرایندها خواص جداگانه مربوط به خود را در توزیعهای تصادفی دارند.

یک فرایند تصادفی زمانی پایا تلقی می‌شود که میانگین و واریانس آن در طول زمان ثابت بوده و مقدار کوواریانس بین دو دوره زمانی فقط به فاصله بین دو دوره بستگی داشته باشد، یک سری زمانی ناپایا است که هیچ یک از شرایط پایایی را نداشته باشد. مدل گام تصادفی را می‌توان مثال ساده از سری زمانی ناپایا دانست.

روش تحقیق

فرایند شناسایی بر اساس مدلهای خطی از قبیلARMA به روش باکس-جنکینز معروف بوده که شامل ٤ مرحله است. در پژوهش حاضر از از اطلاعات تردد شمار (پلاک‌خوان) محور قم-تهران در یک بازه ١٠ ساله استفاده گردیده است. جنس داده‌های موجود از جنس داده‌های سری زمانی است و با توجه به این وجه از ماهیت داده‌ها باید به مدلسازی آنها پرداخته شود. سری زمانی به مجموعه‌ای از مشاهدات کمی گفته می‌شود که در فواصل زمانی و به صورت متوالی اندازه‌گیری می‌شود. تکنیکهای مختلفی برای مدلسازی وجود دارد که از میان آنها روش پارامتری میانگین متحرک خود همبسته از جنس مدلهای سری زمانی است؛ بنابراین در این پژوهش به منظور پیش‌بینی تقاضای سفر از روش اتورگرسیو(AR) ، میانگین متحرک(MA)، میانگین متحرک خود همبسته (ARMA) مطابق روابط (٥) الی(٩) با استفاده از نرم‌افزار (ITSM) استفاده شده است.

الگوی اتورگرسیو. یک سری زمانی مجموعه‌ای از مشاهدات x_tاست که هر کدام در زمان خاص t جمع‌آوری شده‌اند. در ابتدا فرایند AR(1) با میانگین مخالف صفر در نظر گرفته می‌شود:

$$X_t - \mu = \varphi\left(X_{t-1} - \mu\right) + a_t \qquad (٥)$$

مسئله پیش‌بینی را در یک واحد زمانی آینده در نظر می‌گیریم، با تعویض t با t+1 در معادله (٥) و با داشتن $X_1,\ldots,X_{t-1},X_t$، اگر امید ریاضی شرطی دو طرف معادله بالا را در نظر بگیریم رابطه (٦) به دست می‌آید:

$$\hat{X}_l(1) - \mu = \varphi\left[E\left(X_t | X_t, X_{t-1},\ldots,X_1\right) - \mu\right] + E\left(a_{t+1} | X_t, X_{t-1},\ldots,X_1\right) \qquad (٦)$$

الگوی میانگین متحرک. برای تشریح چگونگی حل مسائلی که در پیش‌بینی میانگین متحرک یا الگوهای مرکب پیش می‌آیند، حالت MA(1) با میانگین مخالف صفر را در نظر می‌گیریم:

$$X_t = \mu + a_t - \theta a_{t-1} \qquad (٧)$$

مجدداً اگر t را با t+1 عوض کرده و امیدهای ریاضی دو طرف را در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\hat{X}_t(1) = \mu - \theta E(a_t \mid X_t, X_{t-1},\ldots,X_1) \qquad (٨)$$

با وجود این برای یک الگوی وارون‌پذیر معادله (٩)، نشان می‌دهد که a_t تابعی از $X_t, X_{t-1},\ldots$ است. بنابراین خواهیم داشت:

$$E(a_t \mid X_t, X_{t-1},\ldots,X_1) = a_t \qquad (٩)$$

اگر قسمتی از سری را AR و بخشی را MA فرض کنیم در این صورت یک الگوی ARMA به دست می‌آید {Xt}. یک فرایند مرکب اتورگرسیو- میانگین متحرک از مرتبه p*q است و با نماد ARMA(p,q) نمایش داده می شود. بنابراین با استفاده از موارد گفته شده می‌توان با دقت قابل قبولی با روش ARMA مقدار تقاضای سفر برای سالهای آینده در مسیر قم-تهران را پیش‌بینی نمود. برای این کار داده‌های تردد شمار (پلاک خوان) ١٠ سال محور مطالعاتی قم-تهران استخراج شده است و سپس برای سالهای آتی تا ١٤٠٤ پیش‌بینی انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج روشهای معرفی شده سه معیار مختلف ضریب همبستگی(r)، ضریب تعیین (2R) و میانگین قدر مطلق درصد خطا Mean Absolute Percentage Error (MAPE) برای ارزیابی جوابهای حاصله به کار گرفته شدند. گام‌بندی انجام پژوهش به طور کلی در ادامه آمده است.

١. داده‌های مورد نیاز از اطلاعات تردد شمار (پلاک خوان) به صورت ماهانه و روزانه سازمان راهداری کشور در مسیر قم-تهران استخراج گردیده است.

۲. میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل به منظور کاهش خطا اندازه‌گیری شده است.

۳. پس از مدل‌سازی و پیش‌بینی بر اساس میزان همبستگی و میزان دقت در برآورد متغیر وابسته در هر مدل به مقایسه مدلها پرداخته شده است.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی، قسمتی از آزادراه شماره ۷ کشور است این آزادراه از بزرگراه آزادگان تهران آغاز می‌شود و در انتهای مسیر با آزادراه ذوب‌آهن اصفهان یکی می‌گردد. این آزادراه، تهران را به شهرهای قم، کاشان، نطنز، اصفهان، نجف‌آباد و فولادشهر متصل می‌کند. قسمت ابتدایی این آزادراه یعنی فاصله بین استان تهران تا استان قم را آزادراه خلیج فارس می‌نامند. قسمت بعدی این آزادراه قم–کاشان نام دارد، قسمت سوم، آزادراه اصفهان–کاشان نام دارد و در تقاطع با جاده ٦۵، با آزادراه کمربندی غرب اصفهان یکی می‌گردد. در انتها این آزادراه در تقاطع با آزادراه ذوب‌آهن اصفهان به پایان می‌رسد.

مدل‌سازی و تحلیل نتایج

آمار و اطلاعات ارائه‌شده در این قسمت بر گرفته از آمار جمع‌آوری شده توسط سازمان راهداری کشور می‌باشد. نمونه داده‌ها در جدول (۱)، تعداد سفرهای عبوری از آزادراه خلیج فارس را نشان می‌دهد. به منظور یکسان‌سازی اطلاعات ۱۰ ساله در این محور، از اطلاعات دستگاه موجود در ایستگاه نعلبندان به عنوان اطلاعات پایه استفاده گردیده و با استفاده از سایر ایستگاهها فرایندهای پیش پردازش داده‌ها مانند حذف داده‌های پرت، شناسایی مقادیر خالی و گم شده بر روی آنها انجام شده است. لازم به ذکر است داده‌های پرت در دستگاههای پلاک خوان عموماً به دلیل خرابی دستگاه و عدم همخوانی با اطلاعات روزهای مشابه در هفته، ماه و سال بوده است. همچنین با بررسیهای به عمل آمده از اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای مشخص گردید بعضی از دستگاهها در مدتی از سال خاموش یا خراب بوده است (داده‌های از دست‌رفته). ثبت اطلاعات بعد از ترمیم دستگاه یک فاصله عددی زیاد با اعداد قبلی ثبت شده ایجاد خواهد کرد بنابراین در بعضی از موارد به ناچار این داده‌ها حذف و یا به روش درون‌یابی داده‌های مابین شناسایی شده است.

به‌منظور یکپارچه‌سازی نوع وسایل نقلیه از وسیله نقلیه معادل سواری استفاده گردیده است. تبدیل وسایل نقلیه سنگین به معادل سواری بر اساس نشریه ٤۱۵ وزارت راه و شهرسازی بر اساس شیب و نوع منطقه تعیین گردیده است. با استفاده از اطلاعات جدول (۲) حجم کامیونها و درصد شیب‌محور، ضریب همسنگ سواری برای وسایل نقلیه سنگین ۱/۵ در نظر گرفته‌شده است. جدول (۳) میزان وسایل نقلیه عبوری به صورت ماهانه در نظر گرفته شده از سازمان راهداری و تبدیل شده به معادل سواری را نشان می‌دهد. در شکل (۱) بازه تغییرات فصلی در مقایسه با فراوانی داده‌های تردد نشان داده شده است که نشان دهنده نمونه ای از نحوه حذف روند و مؤلفه‌های فصلی و به دست آوردن ثبات تقریبی در سطح و تغییرات زمان است. در جدول (٤) اطلاعات لازم برای مدل‌سازی به روش سری زمانی دسته‌بندی شده است. همان‌گونه که در روش تحقیق ذکر شد تغییرات روی داده‌ها به‌منظور ایستا کردن داده‌های سری زمانی به کار می‌روند. به‌ویژه آنها برای حذف روند و مؤلفه‌های فصلی و به دست آوردن ثبات تقریبی در سطح و تغییرات زمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۲) روند اصلاح شده داده‌ها به‌منظور مدل‌سازی را نشان می‌دهد. در شکل (۳) نمودار هیستوگرام باقی‌مانده‌ها ترسیم شده است و شکل (٤) آزمون نرمال کولموگروف–اسمیرنوف باقی‌مانده‌ها را نشان می‌دهد. جدول (۵) و شکل (۵) نتایج پیش‌بینی مدل ARMA (٤،۵) را برای مسیر رفت نشان می‌دهد. برای مسیر برگشت از تهران به قم با استفاده از مدل در نظر گرفته شده به همین شیوه قابل برآورد است.

علاوه بر موارد ذکر شده در ارتباط با دقت مدلها به‌منظور صحت‌سنجی تعداد ۲۰ درصد از داده‌ها را برای هر یک از مدلها به عنوان تست در نظر گرفته شده است و سپس با ارزیابی مقادیر خطا به معرفی بهترین مدل برای پیش‌بینی این محور پرداخته می‌شود..

جدول ۱ تعداد سفرهای عبوری از آزادراه خلیج فارس (هزار سفر) از ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶

مبدأ– مقصد	تهران	شمال کشور	سایر محورها	کل محورها	درصد عبوری از آزادراه نسبت به سایر ترددهای استان	درصد عبوری نسبت به کل ترددهای آزادراه خلیج فارس
اصفهان	۲۱۶۲٤	۹۸۸	۱٤۹۸۷۲	۱۷۲۸٥٤	۱۱/۳۱	۲۱/۷۸
ایلام	٤٥۰۹	۲۹۸	۲۰۰۳	۲٤۸٥۷	۱۹/۳۸	٤/٦۳
بوشهر	۱۳۷۳	٥	۳٤۸۰	۳٦۱۷۹	۳/۸۱	۱/۳۳
یاسوج	۱٤٥٦	۱۷	٦۳۳۸۸	٦۷۸۱۲	۲/۱۸	۱/٤۲
بیرجند	۱۰۲۰	٤٦۲	۲۰۳۸۰	۲۱۸٥۲	٦/۷٤	۱/٤۲
اهواز	۳٥۹۹	۱۹	۱۱٥٤٥٥	۱۱۹۰۷	٦/۰٤	۳/٤۸
زاهدان	۲۳٥۱	٤	۷۰۳۳٦	۷٦۹۲۳	۳/۲٤	۲/۲۷
شیراز	٦۱۳۳	۱۸۲	۱٤۹۱٤٥	۱٥٥۸٤۷	٤/۰٦	٦/۰۸
کرمان	۱٦۸۰	۱۰	٦۲۱۸٤	٦۳۸۱۸	۲/٦٥	۱/٦۳
کرمانشاه	۸۱۸۲	۲٥٦	۸۷٦٤٤	۹٦۰۸۲	۸/۷۸	۸/۱۳
شهرکرد	٦۲۹	۱	۱٥٤۳٥	۱٦۰٦٤	۳/۹۲	۰۰/٦۱
خرم‌آباد	۱۰۲٤۳	۱٤	٥۰۳٤۹	٦۰٦۰٦	۱٦/۹۲	۹/۹۸
اراک	۱٤٥۷۷	۱۰۷	۲۷۸۹۲	٤۲٥۸۷	۳٤/٤۹	۱٤/۱٤
بندرعباس	۷۷٤	۱	۱٥٥۷٦	۱٦۳٥۱	٤/۷٤	۰/۷٥
همدان	۱۳۲۳۹	۸۸	۷۲٤۳٥	۸٥۷٤۲	۱٥/٥٥	۱۲/۸٤
یزد	۱٦٤۳	۱٤	۱٥۳۹٦	۱۷۰۲٦	۰۹/۷۳	۱/٦۰
قم	۸۰٦۹	۲۷٤	۱۷٥۲٥	۲٥۸٦۸	۳۲/۲٥	۸/۰٤
جمع	۱۰۱۱۰۳	۲۷۳۰	۱۰۹٤٤۲٥٦	۹۹۰٦٥۷	۱۰۰	۱۰۰

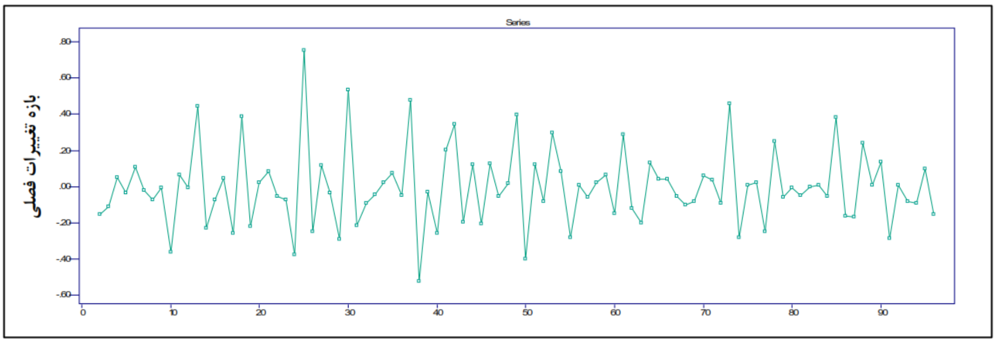
جدول ۲ ضریب معادل سواری وسایل نقلیه سنگین

شیب(٪)	طول(کیلومتر)	ET			
		درصد وسایل نقلیه سنگین			
		٥	۱۰	۱٥	۲۰
<٤	-	۱,٥	۱,٥	۱,٥	۱,٥
٤-٥	<٦,٤	۱,٥	۱,٥	۱,٥	۱,٥
٤-٥	>٦,٤	۲	۲	۲	۱,٥
>٥-٦	<٦,٤	۱,٥	۱,٥	۱,٥	۱,٥
>٥-٦	>٦,٤	٥,٥	٤	٤	۳
>٦	<٦,٤	۱,٥	۱,٥	۱,٥	۱,٥
>٦	>٦,٤	۷,٥	٦	٥,٥	٤,٥

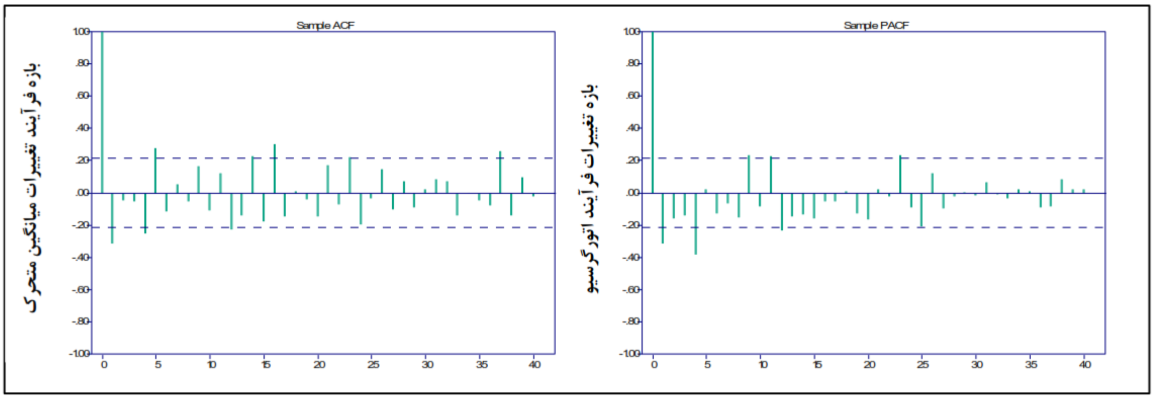
جدول ۳ اطلاعات به دست آمده تردد سفر در آزادراه، مسیر قم-تهران

(هزار سفر- خروجی نرم‌افزارهای ثبت داده‌های سفر سازمان راهداری وحمل ونقل جاده‌ای)

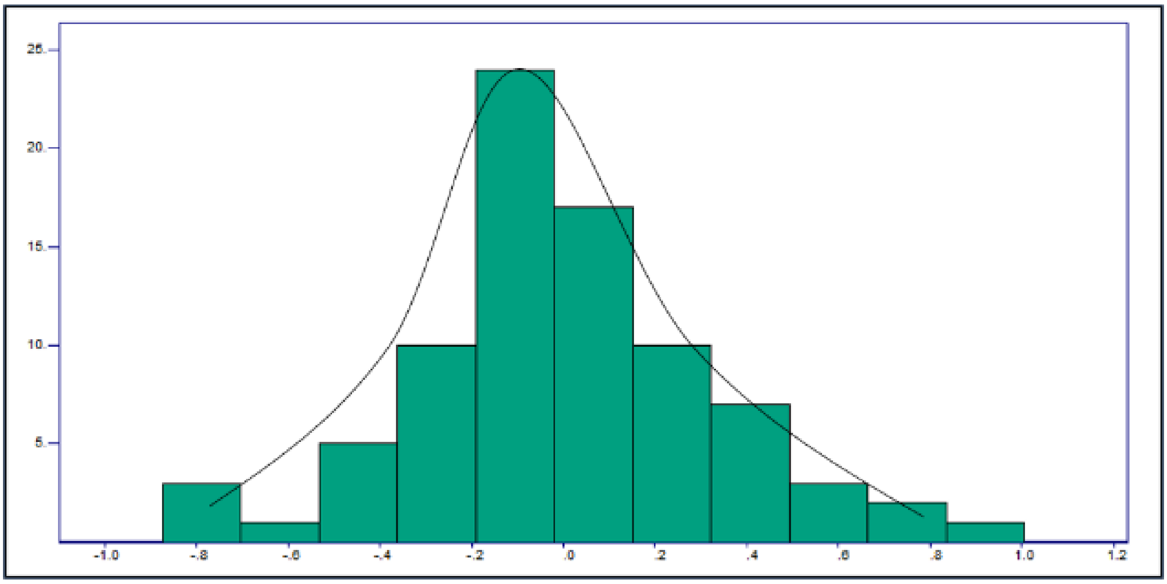
١٣٨٧		١٣٨٩		١٣٩١		١٣٩٣		١٣٩٥	
فروردین	٢٦٤٥٣٥	فروردین	١٠١٦٢٥٣	فروردین	٩٢٧٩٠٦	فروردین	۱۱۳۷۸۲۹	فروردین	۱۱۹۲۱۳۰
اردیبهشت	۲۱۰۸۲۷	اردیبهشت	۸۷۲۲۲۵	اردیبهشت	۷۲۴۳۵۰	اردیبهشت	۷۶۲۷۵۲	اردیبهشت	۸۹۹۸۹۸
خرداد	۲۳۱۵۷۴	خرداد	۷۸۰۳۸۴	خرداد	۸۱۲۶۷۲	خرداد	۸۶۳۱۲۷	خرداد	۹۰۷۲۱۸
تیر	۳۱۱۰۶۲	تیر	۸۲۰۴۵۹	تیر	۷۸۳۸۶۶	تیر	۷۹۵۲۱۷	تیر	۹۲۸۰۲۶
مرداد	۳۴۱۴۴۷	مرداد	۷۹۱۹۲۰	مرداد	۵۸۶۳۲۱	مرداد	۱۰۷۰۱۰۲	مرداد	۷۲۲۹۰۱
شهریور	۳۵۰۹۹۳	شهریور	۸۸۳۶۸۱	شهریور	۹۹۹۶۴۰/۵	شهریور	۱۱۶۲۲۸۴	شهریور	۹۲۹۴۹۲
مهر	۳۳۹۱۰۸	مهر	۸۶۴۰۷۵	مهر	۸۰۸۲۷۱/۵	مهر	۸۷۶۷۸۵	مهر	۸۷۶۳۷۰
آبان	۳۴۷۶۲۹	آبان	۸۰۴۷۲۴	آبان	۷۳۸۸۰۶/۵	آبان	۸۸۴۰۹۸	آبان	۸۶۹۷۲۶
آذر	۳۵۰۱۱۱	آذر	۸۰۱۲۶۱	آذر	۷۰۸۶۶۲/۵	آذر	۸۳۵۶۳۴	آذر	۸۲۷۲۱۶
دی	۵۲۶۳۵۰	دی	۵۵۹۱۹۸	دی	۷۲۵۲۳۶/۵	دی	۸۵۴۸۰۲	دی	۸۲۶۸۹۰
بهمن	۶۲۶۲۸۶	بهمن	۵۹۵۶۷۵	بهمن	۷۸۱۸۱۴	بهمن	۹۱۴۳۹۹	بهمن	۸۳۴۸۴۸
اسفند	۸۵۲۶۳۹	اسفند	۵۹۱۰۵۸	اسفند	۷۴۴۳۴۱	اسفند	۷۸۹۵۰۰	اسفند	۹۷۹۱۵۵۴
١٣٨٨		١٣٩٠		١٣٩٢		١٣٩٤		١٣٩٦	
فروردین	۸۲۲۷۵۹	فروردین	۹۲۰۹۶۷	فروردین	۱۲۰۰۲۹۱	فروردین	۱۰۵۲۵۲۸	فروردین	۱۱۶۳۳۲۷
اردیبهشت	۷۸۰۷۷۵	اردیبهشت	۷۳۲۲۱۶	اردیبهشت	۷۱۲۶۸۲	اردیبهشت	۹۳۵۱۳۲	اردیبهشت	۹۸۸۱۸۷
خرداد	۶۹۴۵۸۶	خرداد	۶۸۰۲۵۴	خرداد	۶۹۰۶۹۶	خرداد	۷۶۴۰۵۳	خرداد	۸۳۷۶۸۲
تیر	۶۷۴۸۷۴	تیر	۷۱۰۸۷۷	تیر	۵۳۵۲۶۴	تیر	۸۷۲۵۹۶	تیر	۱۰۶۴۴۰۰
مرداد	۶۹۴۲۴۷	مرداد	۵۴۸۸۷۵	مرداد	۶۵۴۹۵۴	مرداد	۹۰۸۹۰۲	مرداد	۱۰۷۱۵۲۷
شهریور	۷۹۴۵۷۲	شهریور	۸۱۰۴۱۵	شهریور	۹۲۶۱۳۲	شهریور	۹۴۷۷۴۶	شهریور	۱۲۲۹۵۷۴
مهر	۶۷۲۲۱۱	مهر	۶۵۱۷۳۰	مهر	۷۶۱۵۰۶	مهر	۸۹۷۰۴۲	مهر	۹۲۶۰۸۷
آبان	۶۴۲۱۱۰	آبان	۶۶۶۹۷۹	آبان	۸۶۰۱۶۸	آبان	۸۱۰۴۵۲	آبان	۹۳۱۶۳۸
آذر	۶۷۲۱۸۰	آذر	۷۲۳۸۹۱	آذر	۷۰۱۸۲۳	آذر	۷۴۸۵۱۰	آذر	۸۶۰۲۰۹
دی	۶۱۲۱۴۱	دی	۶۸۵۵۴۴	دی	۷۹۵۱۹۲	دی	۷۹۷۰۳۹	دی	۷۸۳۸۹۹
بهمن	۶۷۲۷۸۰	بهمن	۶۳۸۵۲۶	بهمن	۷۵۳۰۲۵	بهمن	۸۲۵۴۶۸	بهمن	۸۶۶۷۶۶
اسفند	۷۴۹۷۷۴	اسفند	۴۳۷۷۳۴	اسفند	۷۶۵۶۹۳	اسفند	۷۵۱۹۷۵	اسفند	۷۴۳۵۰۰



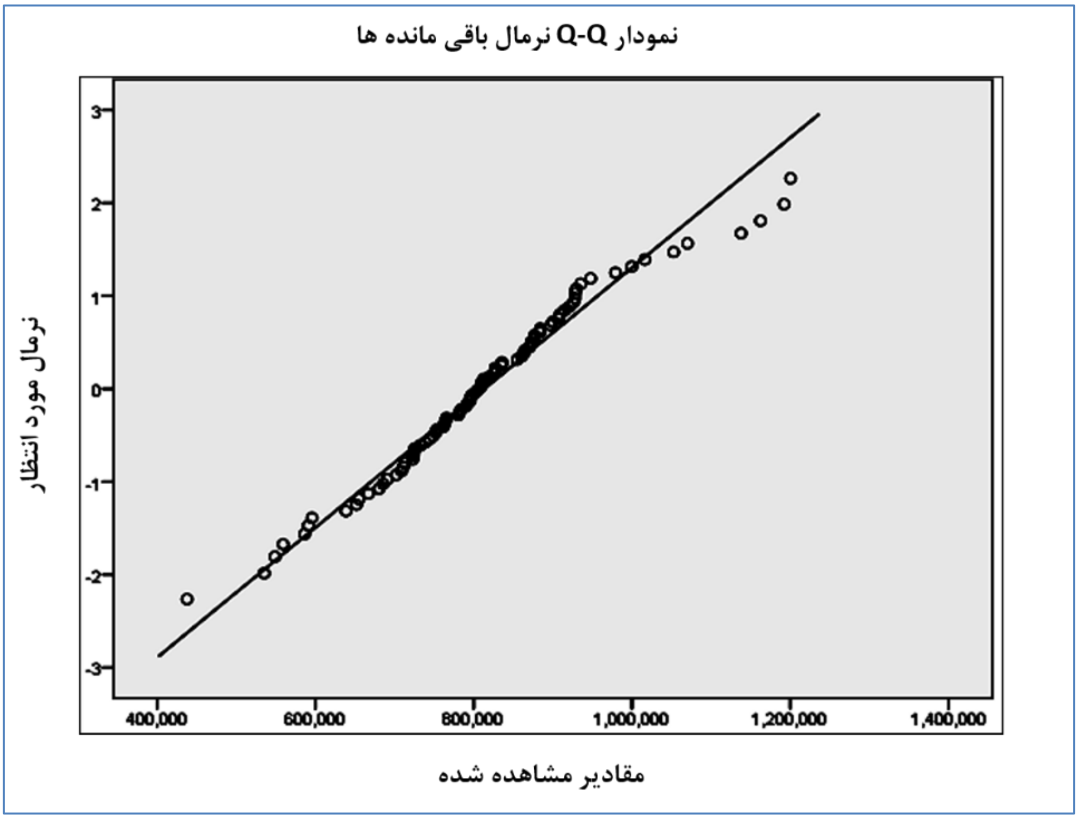
شکل ۱ حذف روند و مؤلفه‌های فصلی و به دست آوردن ثبات تقریبی در سطح و تغییرات زمان



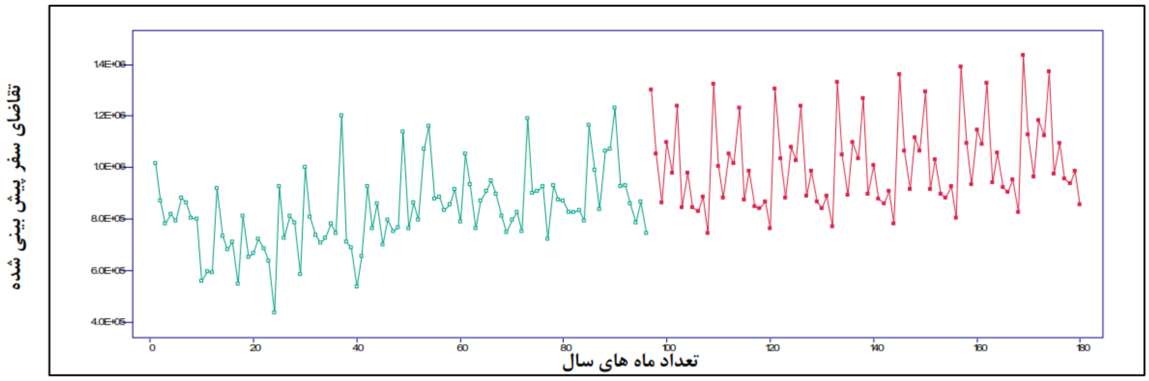
شکل ۲ نمودار توابع ACF و PACF



شکل ۳ نمودار هیستوگرام باقی‌مانده‌ها



شکل ۴ نمودار آزمون نرمال کولموگروف–اسمیرنوف باقی‌مانده‌ها



شکل ۵ نتایج پیش برای افق تا ۱۴۰۴ با استفاده از مدل‌سازی ARMA

جدول ٤ نتایج آزمون نرمال بودن باقی‌مانده مدل ساخته شده

Model	Model Results
Ljung - Box statistic	= 26.117 Chi-Square = 20 p-value =0.06
McLeod - Li statistic	= 24.079 Chi-Square = 30 p-value = 0.061
Turning points	= 57.000 ~AN(54,sd = 3.79) p-value = 0.002
Diff sign points	= 39.00 ~AN(41,sd = 2.64) p-value = 0.04
Rank test statistic	= 0.16460E+04~AN(0.170E+04,sd = 0.127E+03), p-value = 0.0045

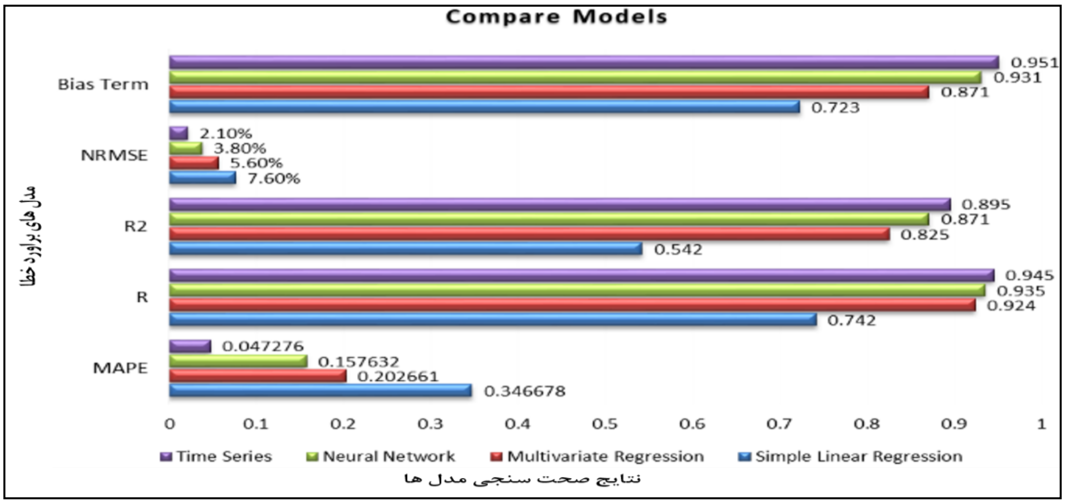
جدول ٥ نتایج پیش‌بینی مدل ARMA (خروجی نرم‌افزار پیش بینی از تعداد سفر)

۱۳۹۷		۱۳۹۹		۱۴۰۱		۱۴۰۳	
فروردین	۱۲۸۸۴۰۰	فروردین	۱۴۲۱۶۰۰	فروردین	۱۵۰۵۶۰۰	فروردین	۱۷۷۴۳۰۰
اردیبهشت	۱۰۳۲۹۰۰	اردیبهشت	۱۰۷۰۷۰۰	اردیبهشت	۱۲۵۱۷۰۰	اردیبهشت	۱۳۷۲۲۰۰
خرداد	۸۸۳۴۴۰	خرداد	۱۰۲۴۷۰۰	خرداد	۱۰۸۳۴۰۰	خرداد	۱۲۵۳۳۰۰
تیر	۱۱۲۰۲۰۰	تیر	۱۱۳۶۹۰۰	تیر	۱۳۱۳۳۰۰	تیر	۱۴۸۴۹۰۰
مرداد	۱۰۷۰۸۰۰	مرداد	۱۲۴۲۷۰۰	مرداد	۱۳۵۳۸۰۰	مرداد	۱۵۱۸۲۰۰
شهریور	۱۳۰۸۷۰۰	شهریور	۱۳۶۷۲۰۰	شهریور	۱۵۲۳۱۰۰	شهریور	۱۷۷۸۶۰۰
مهر	۹۱۹۴۶۰	مهر	۱۰۲۳۲۰۰	مهر	۱۱۶۳۵۰۰	مهر	۱۲۷۷۵۰۰
آبان	۱۰۰۰۶۰۰	آبان	۱۱۰۲۰۰۰	آبان	۱۱۸۴۹۰۰	آبان	۱۴۰۱۸۰۰
آذر	۸۶۴۱۴۰	آذر	۹۱۵۰۰۰	آذر	۱۰۷۰۶۰۰	آذر	۱۱۷۹۹۰۰
دی	۸۳۹۳۷۰	دی	۹۶۵۴۰۰	دی	۱۰۲۷۷۰۰	دی	۱۲۰۰۳۰۰
بهمن	۸۹۴۲۵۰	بهمن	۹۲۳۱۹۰	بهمن	۱۰۷۶۱۰۰	بهمن	۱۲۱۷۲۰۰
اسفند	۷۶۳۹۲۰	اسفند	۸۸۸۴۴۰	اسفند	۹۶۸۰۱۰	اسفند	۱۰۹۹۷۰۰
۱۳۹۸		۱۴۰۰		۱۴۰۲		۱۴۰۴	
فروردین	۱۳۷۹۹۰۰	فروردین	۱۴۴۲۲۰۰	فروردین	۱۶۲۸۸۰۰	فروردین	۱۹۰۰۴۰۰
اردیبهشت	۱۰۲۳۹۰۰	اردیبهشت	۱۱۵۹۳۰۰	اردیبهشت	۱۳۱۵۴۰۰	اردیبهشت	۱۴۶۱۳۰۰
خرداد	۹۶۵۸۸۰	خرداد	۱۰۵۵۰۰۰	خرداد	۱۱۵۰۰۰۰	خرداد	۱۳۶۴۲۰۰
تیر	۱۱۱۷۰۰۰	تیر	۱۲۰۶۱۰۰	تیر	۱۴۱۱۱۰۰	تیر	۱۵۶۵۱۰۰
مرداد	۱۱۴۵۰۰۰	مرداد	۱۳۱۲۹۰۰	مرداد	۱۴۱۱۲۰۰	مرداد	۱۶۶۲۵۰۰
شهریور	۱۳۵۶۹۰۰	شهریور	۱۴۱۵۸۰۰	شهریور	۱۶۵۹۸۰۰	شهریور	۱۸۷۹۴۰۰
مهر	۹۴۵۰۹۰	مهر	۱۱۰۵۳۰۰	مهر	۱۲۰۷۷۰۰	مهر	۱۳۸۹۱۰۰
آبان	۱۰۷۳۶۰۰	آبان	۱۱۲۵۸۰۰	آبان	۱۲۸۷۴۰۰	آبان	۱۵۰۱۳۰۰
آذر	۸۶۸۶۴۰	آذر	۹۹۴۲۵۰	آذر	۱۱۲۵۵۰۰	آذر	۱۲۶۴۹۰۰
دی	۹۰۹۵۲۰	دی	۹۹۲۷۲۰	دی	۱۰۹۸۲۰۰	دی	۱۳۰۵۹۰۰
بهمن	۹۰۲۲۸۰	بهمن	۹۸۸۳۹۰	بهمن	۱۱۵۴۹۰۰	بهمن	۱۲۹۰۴۰۰
اسفند	۸۱۸۶۷۰	اسفند	۹۳۵۶۸۰	اسفند	۱۰۱۶۳۰۰	اسفند	۱۲۰۶۱۰۰

جدول (٦) مقادیر تست مدها و ارزیابی خطا را نشان می‌دهد. همچنین صحت‌سنجی مدل سری زمانی با استفاده از داده‌های سال ١٣٩٦ انجام گرفته است. در جدول (٦) میزان همبستگی و خطای مطلق روش سری زمانی نمایش داده شده است که نشان می‌دهد روش سری زمانی از همبستگی و خطای قابل قبولی برای پیش‌بینی برخوردار است. شکل (٧) مقایسه مدل‌سازی سری زمانی با سایر مدلها که در مطالعات گذشته انجام گرفته است نشان می‌دهد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد مدل سری زمانی از دقت بیشتر و خطای کمتری نسبت به سایر مدلها برخوردار است.

جدول ٦ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده برحسب ماه (تعداد سفر)

١٣٩٦	مقادیر واقعی اطلاعات اولیه	مقادیر پیش‌بینی سری زمانی	خطای مطلق($\times 10^3$) انحراف از مقادیر واقعی
فروردین	1163327	1194758	-31.43
اردیبهشت	988187	987241	0.94
خرداد	837682	841487	-3.805
تیر	1064400	1064157	0.243
مرداد	1071527	1069471	2.056
شهریور	1229574	1236457	-6.882
مهر	926087	927145	-1.058
آبان	931638	928471	3.167
آذر	860209	860845	-0.636
دی	783899	782541	1.358
بهمن	866766	859541	7.225
اسفند	743500	758941	-15.440
MAPE	1	0.047276	-
R	1	0.998	-
R^2	1	0.995	-
NRMSE	1	2.1%	-
Bias Term	1	0.951	-
T-Test	-1.225		-



شکل ٦ مقایسه پارامترهای صحت‌سنجی مدل سری زمانی با سایر مطالعات مشابه

نتیجه‌گیری

داده‌هایی که از برداشتهای میدانی و مطالعات ترافیکی به دست می‌آیند نمی‌توانند به تنهایی بیانگر وضعیت آینده باشند اما در صورتی که اطلاعات ترافیکی در شرایط فعلی در دسترس باشد می‌توان با مدل‌سازی میزان حجم تقاضای سفر در آینده را تخمین زد. آزادراه خلیج فارس یکی از پرترددترین و حیاتیترین محورهای موصلاتی کشور است که سالانه حجم بسیاری زیادی از کالا و مسافر را انتقال می‌دهد. داده‌های استفاده شده در این پژوهش در واقع میزان تردد وسایل نقلیه به صورت ماهانه گرفته شده از سازمان راهداری کشور است با توجه به اینکه ماهیت داده‌ها ماهیت سری زمانی می‌باشد با استفاده از مدل زمانی میانگین متحرک خود همبسته بر اساس داده‌های شرایط فعلی، مدلی توسعه یافت که بر اساس آن مقادیر تقاضای سفر برای سالهای آتی تا افق ۱۴۰۴ تخمین زده شد. با توجه به اهمیت مسئله، پیش‌بینی صحیح از میزان تقاضای سفر جهت حصول اطمینان از نیاز به احداث مسیرهای مختلف لازم است تا از روشهای دقیق برای فرایند پیش‌بینی استفاده شود. از بین مدلهای اتورگرسیو (AR) و میانگین متحرک (MA) و تلفیق دو مدل یعنی اتورگرسیو-میانگین متحرک (ARMA)، مدل سوم دقت قابل قبولتری دارد. پارامترهای این مدل ARMA(4,5) به دست آمده و صحت‌سنجی مدل بر اساس مقدار خطای مطلق، همبستگی، توانایی مدل در پیش‌بینی انجام گرفت. مقادیر صحت‌سنجی بر اساس معیارهای MAPE،R ،R2 ،NRMSE ،Bias Term به ترتیب ۰/۰۴۷ و ۰/۹۴۵ و ۰/۸۹۵ و ۲/۱ و ۰/۹۵۱ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است.

سپاسگزاری

مراجع

[1] Sh. Afandizadeh, A. Momenpour, “Analysis of demand for travel analysis with approach to neural network model and regression method, case study (Khalkhal-Ardabil)”, *14th International Conference on Transport and Traffic Engineering*, 14 p. (in Persian), 2014.

[2] S. E. Kimes, “Transportation revenue management: could it work”, *Journal of Revenue and Pricing Management*, Vol. 4, No. 1, pp. 95-97, 2005.

[3] L. Misuk, “Modeling and forecasting hotel room demand based on advance booking information”, Tourism Management, Volume 66, pp. 62-71, 2017.

[4] M. Tiago, F. Dantas, C. Luiz, H. Oliveira, V. R. Miguel, “Air transportation demand forecast through Bagging Holt Winters methods”, *Journal of Air Transport Management* ,Vol. 59, pp. 116-123, 2017.

[5] M. Usman, T. Umer, S. Güven, “Forecasting performance of smooth transition autoregressive (STAR) model on travel and leisure stock index”, *The Journal of Finance and Data Science*, Vol. 4, Issue 2, pp. 90-100, 2018.

[6] G. Guo, T. Zhang, “A residual spatio-temporal architecture for travel demand forecasting”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies ,115: 102639, 2020.

[7] T. F. Rossi, “Travel Demand Forecasting: Where are we and What are the Emerging Issues”, 2021.

[8] J. Liang, et al, “On region-level travel demand forecasting using multi-task adaptive graph attention network”, Information Sciences, 2022.

[9] K. Hamad, L. Obaid, “Tour-based travel demand forecasting model for a university campus”, *Transport Policy*, 117, pp. 118-137, 2022.

[10] C. Marc, P. B. Gelhausen, W. Dieter, “A new direct demand model of long-term forecasting air passengers and air transport movements at German airports”, *Journal of Air Transport Management*, Available online 12 April, p. 16 2018.

[11] F. Chyon, et al, “Time series analysis and predicting COVID-19 affected patients by ARIMA model using machine learning.”, *Journal of Virological Methods*, 301: 114433, 2022.

[12] A. Ghasemi, “Application of Neural Networks in Time Series Forecasting and Comparison with ARIMA Model”, *Commercial Journal*, pp. 88 to 110 (in Persian), 2001.

[13] A. Sarlak, “Comparative evaluation of AR, MA, ARMA, ARIMA time series models in predicting the stock index of Tehran Stock Exchange”, New research in management and accounting, second year, No. 3, pp. 130-145 (in Persian), 2017.

[14] A. Gupta, A. Kumar, “Two-step daily reservoir inflow prediction using ARIMA-machine learning and ensemble models”, *Journal of Hydro-environment Research* 45: 39-52, 2022.

[15] M. Nazeri Tohridi, “Evaluation of univariate, multivariate and time series compilations in predicting and estimating the average annual sediment load (Case study: Sistan River),” *Environmental Erosion Research*, pp. 52-70 (in Persian), 2016.

[16] D. Chakraborty, S. K. Sanyal, “Time-series data optimized AR/ARMA model for frugal spectrum estimation in Cognitive Radio.”, *Physical Communication*, 44: 101252, 2021.

[17] M. R. Sahbald, “Performance Comparison Genetic Planning and Time Series Pattern In the short-term forecast of passenger demand for Iranian Railways”, the Railway Research and Training Center No. 287, 6 p (in Persian), 2015.

[18] Sh. Afandizadeh, “Formulation of a Methodology for Assessing Parameters Effective on the Demand of Air Travel in Iran”, *International Journal of Engineering Sciences of Iran University of Science and Technology*, Vol. 19, p. 89-97(in Persian), 2008.

[19] M. Pourkazemi, M. Asadi, “Dynamic prediction of crude oil prices using artificial neural networks and with the use”, Master's thesis, faculty, Petroleum Systems of the Economic and Political Sciences of the Shahid Beheshti University, p. 73(in Persian), 2009.

[20] J. P. Karmy and S. Maldonado, “Hierarchical time series forecasting via support vector regression in the European travel retail industry”, Expert Systems with Applications 137: 59-73, 2019.

[21] A. Taymouri, “Designing the Mathematical Model for predicting demand for travel by train using time series of case studies: Khorasan axis”, *Eighth Railway Transportation Conference*, 15 p, 2006. (in Persian)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Investigating the Potential of Designing Net-Zero Energy Buildings Considering Photovoltaic Installation and Urban Planning Requirements

Research Article

Seyed Sajad Rezaeinasab[1], Abbasali Tayefi Nasrabadi[2], Somayeh Asadi[3], Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia[4]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79510.1190

1. Introduction

Population growth, human activities, and immense consumption of energy resources have caused some challenges, including climate changes, lack of resources, and environmental problems. The emergence and increasing development of new technologies have made it possible to save energy and realize net-zero energy buildings (NZEBs) almost anywhere in the world. The main focus of NZEB is to first decrease energy consumption and then use renewable energy sources (RES) to meet the remaining energy consumption during the year. Among RES, photovoltaic (PV) is of the most promising and acceptable photoelectric generators in the design of NZEBs.

The implementation of PV follows the benefit of being a pro-ecological energy source and has been addressed in previous research. However, this emerging technology has some challenges and negative aspects, such as relatively expensive, high initial investment, life cycle operational cost, and productivity dependency on location and climatic conditions. The above-mentioned facts resulted in the feasibility of PV installation, which has received increasing attention among researchers worldwide. Typically, PV modules are used as building-integrated photovoltaic components (BIPV) in the building's design stage and cover part of or the total energy demand of the building. PV modules can be installed on roofs (roof-top PV panels), facades, glazing areas of windows, and even on overhangs to generate electricity.

From a geometrical point of view, there are two parameters that exert significant influence on the productivity of PV installation: tilt angle and azimuth. Generally, previous research confirm that to maximize PV generation, the optimum tilt angle is nearly equal to the latitude of the location, and the PV module should face the equator. However, PV installation should be placed where the shading effect by surrounding objects is the minimum as shading causes a significant drop in PV's efficiency.

On the other hand, considering climatic and location issues, one cannot turn a blind eye to the fact that the amount of solar irradiation is a critical factor for the feasibility of PV installation in a specific location. Since the PV system and its components cannot convert 100% of the absorbed light into electricity, some of this energy is lost in the form of heat, raises the cell's temperature, and drops the power output significantly. The detailed review of previous research indicates that there have been extensive efforts in PV installation in designing NZEBs and relevant challenges associated with it have been scrutinized. PV sizing depends not only on climatic conditions but also on architectural and urban planning regulations. For example, shading effects of surroundings that is related to crossing width, roof type (in terms of flat or pitched), pitched roof‘s slope, as well as window-to-wall area ratio (WWR) directly affects the thermal and lighting demand.

Considering all these issues, a systematic study was performed to evaluate the utilization of PV systems in achieving an NZEB in the northern Iran climate region. First, a sensitivity analysis was performed to indicate the most influential variables that affect building energy demand and cost. Next, an optimization process was conducted to concurrently minimize the building energy consumption and capital cost. Besides, a different configuration for PV panel installation was used for quantifying the possibility of achieving NZEB. The results show that in a residential 3-story building the optimized configuration of building envelope and systems can reduce electricity consumption by 20%. The rooftop PV account for 87.2%, and PV installation on the southern façade contributed to 12.8% of total electricity generation. PV installation on the south façade and roof covers 88.2% of the building's electricity demand.

2. Building model

A typical 3-story residential building was presumed as a case study. The length and width of the building are 12 and

*Manuscript received: November 9, 2022, Revised, January 2, 2023, Accepted, February 19, 2023.

[1]. Ph.D. Candidate in Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran.

[2]. Corresponding Author: Assistant Professor of Civil and Architectural Engineering, Fereshtegaan International Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **Email**: abbasali.tayefi@iau.ac.ir.

[3]. Associate Professor in Department of Architectural Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA.

[4]. Assistant Professor in Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran.

8 meters, respectively. The height of each floor is 3 meters. Another building with exactly the same dimensions is located on the opposite side with a distance of 8 meters. In the base case model, building characteristics are in accordance with minimum energy requirements based on the National Building Code of Iran - Chapter 19. A clear double-glazing with 3 mm thickness and 13 mm air space was used for windows structure. Figure 1 shows a schematic of the building.

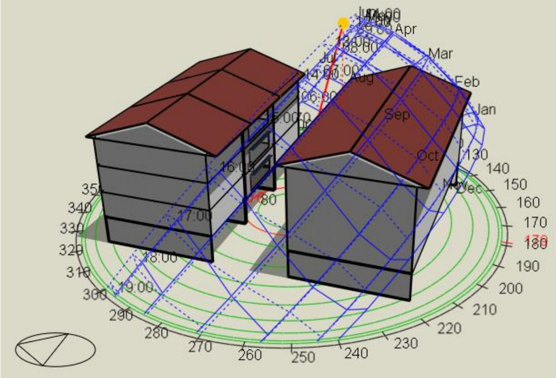


Figure 1. Schematic view of the building

3. Sensitivity analysis

In order to perform sensitivity analysis, the regression method was used. Sensitivity analysis shows that external wall construction, glazing types, and WWR, as well as an overhang on the south window, are the most influential variables that affect both building energy consumption and capital cost.

4. Optimization

Based on sensitivity analysis results, non-influential variables were removed from the optimization analysis. In this study, the objectives are capital cost and total electricity consumption. What we are trying to find is the optimum trade-off between the objectives which typically conflict. Energy consumption will decrease by high-performance and more costly solutions. The genetic algorithm intelligently selects the solutions which best match the design objectives and chooses the strongest balance of solutions to carry forward into subsequent batches or generations for analysis. In the optimization model the wall's u-value, WWR in north and south facades, south overhang, and glazing type set to 0.4, 20%, 45%, 50 cm, and double Lo-E Clear 6mm air, respectively, which had the lowest cost in the optimization trade-off.

Optimization reveals that by choosing optimum values for the configuration of building envelop and systems, the electricity consumption drops by 20%.

5. Design of PV System

Using PV installation on the south façade and roof satisfies 88.2% of the building's electricity demand. In this regard, the roof-top PV contribution is the highest (87.2%), while the PV installation on the southern façade is the least (overall 12.8 %). Table 1 shows the combination of different energy-generating parts to achieve a building with net zero energy and related electricity generation and consumption.

Table 1. The combination of different energy-generating parts to achieve a building with net zero energy

	Facade (BIPV) (kWh)	Rooftop (South) (kWh)	Rooftop (North) (kWh)	Total Generation (kWh)	Consumption (kWh)
1st Floor	718.7			17570.7	6656
2nd Floor	962	9745	7107	17814	7517
3rd Floor	808			17660	7750
sum	2489			19341	21923

6. Conclusion

Taking all the existing considerations and following all legal and technical requirements into account, this study investigated the possibility of designing an NZEB located in the southern region of the Caspian Sea. At first, different building configurations to minimize building electricity loads, including design variables such as insulation, glazing, and shading devices, were analyzed. Before optimization, a sensitivity analysis was performed to decrease the number of variables and, consequently, the optimization time. Once the building's shape and system were selected, photovoltaic panels were installed on the southern façade to generate as much electricity as possible. Finally, rooftop PV panels installed on the roof of the building would meet the remaining energy loads to achieve an NZEB. Optimization reveals that by choosing optimum values for the configuration of building envelop and systems, the electricity consumption drops by 20%. Using PV installation on the south façade and roof satisfies 88.2% of the building's electricity demand. In this regard, the roof-top PV contribution is the highest (87.2%), while the PV installation on the southern façade is the least (overall 12.8 %.) This means that the application of vertically-mounted BIPV on the façade will not be cost-effective due to shading effects and vertical tilt angle. Thus, achieving an NZE for a 3-story building is not possible to realize in the examined location but considering just one floor, covering annual demand with appropriate PV panels on the roof is feasible. The results of this study revealed the potential of realizing an NZEB regarding PV functionality, architectural configuration, and urban planning restrictions in the studied location. Iran has a rich diversity regarding climate conditions and solar irradiation. Hence, similar research can be proposed for future studies. Moreover, since the life cycle cost and economic issues associated with the utilization of PV in the construction and the operational stage are gaining importance, a more detailed and realistic simulation enables designers to attain reliable achievements.

مهندسی عمران فردوسی،۳۶، ۱، ۱۴۰۲. (۶۸-۵۱)

مهندسی عمران فردوسی

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

بررسی امکان دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با استفاده از سیستمهای فتوولتاییک و در نظر گرفتن الزامات طرحهای توسعه شهری*

مقاله پژوهشی

سیدسجاد رضائی نسب(۱)   عباسعلی طایفی نصرآبادی(۲)   سمیه اسدی(۳)   سیدعلی حاج سید تقیا(۴)

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79510.1190

چکیده با توجه به پیشرفت تکنولوژیکی و توسعه سیستمهای فتوولتائیک، استفاده از این فناوری برای ساختمانهای با انرژی خالص صفر امیدوارکننده است. با این حال، برای دستیابی به نتایج قابل اطمینانتر، تجزیه و تحلیل دقیق انرژی در ساختمان با در نظرگرفتن محدودیتهای شهری، شرایط آب و هوایی و منابع انرژی تجدیدپذیر ضروری است. هدف از این مطالعه تعیین پیکربندی مناسب اجزای ساختمان و تأسیسات فتوولتاییک برای دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با در نظر گرفتن شرایط محیطی و محدودیتهای طرحهای شهری می‌باشد. ابتدا به کمک تحلیل حساسیت متغیرهای تأثیرگذار مؤثر بر توابع هدف (مصرف انرژی در ساختمان و هزینه) شناسایی شدند. سپس برای کمینه کردن توابع هدف از فرایند بهینه‌سازی استفاده شد. ترکیبات مختلفی از سیستمهای فتوولتاییک برای تأمین الکتریسیته موردنیاز ساختمان به‌منظور دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی در یک ساختمان مسکونی سه‌طبقه واقع در شهر رشت نشان می‌دهد بهینه‌سازی انرژی در ساختمان، مصرف انرژی را تا ۲۰٪ کاهش می‌دهد. سولهای خورشیدی نصب‌شده روی پشت بام ۸۷/۲٪ کل انرژی الکتریسیته تولید شده و سولهای خورشیدی نصب‌شده در نمای جنوبی ۱۲/۸٪ کل انرژی تولید شده سیستم فتولتاییک را تشکیل می‌دهد. همچنین با نصب سلولهای خورشیدی روی سقف و نمای جنوبی ساختمان می‌توان تا ۸۸/۲٪ انرژی موردنیاز یک ساختمان سه‌طبقه را در محل مورد مطالعه تأمین کرد.

واژه‌های کلیدی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر، فتوولتاییک، الزامات طرح‌های شهری، تحلیل حساسیت، بهینه‌سازی.

Investigating the Potential of Designing Net-Zero Energy Buildings using Photovoltaic Installation with Considering Urban Development Plans Requirements

Seyed Sajad Rezaeinasab   Abbasali Tayefi Nasrabadi   Somayeh Asadi   Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia

Abstract *Due to technological improvement and development of photovoltaic (PV) systems, the application of PV installation for net-zero energy buildings (NZEBs) is promising. However, to achieve more reliable results, precise energy analysis is necessary to take into consideration both the urban plans restrictions and the climatic conditions of renewable energy resources and building energy consumption* **.***This study aims to define the most favorable configuration of building components and PV installation to meet NZEB requirements, considering urban development plans limits. First, a sensitivity analysis was performed to indicate the most influential variables that affect building energy demand and cost. Next, an optimization process was conducted to concurrently minimize the building energy consumption and capital cost. Besides, a different configuration for PV panel installation was used for quantifying the possibility of achieving NZEB. The results show that in a residential 3-story building the optimized configuration of building envelope and systems can reduce electricity consumption by 20%. The rooftop PV account for 87.2%, and PV installation on the southern façade contributed to 12.8% of total electricity generation*. *PV installation on the south façade and roof covers 88.2% of the building's electricity demand.*

Keywords Net-zero energy buildings, photovoltaic, urban planning requirements, sensitivity analysis, optimization

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۳۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مدیریت ساخت گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

(۲) نویسنده مسئول؛ استادیار گروه مهندسی عمران و معماری، واحد بین المللی فرشتگان، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Email: abbasali.tayefi@iau.ac.ir

(۳) دانشیار گروه مهندسی معماری، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا، یونیورسیتی پارک، پنسیلوانیا، آمریکا.

(۴) استادیار گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

مقدمه

رشد جمعیت، فعالیتهای انسانی و مصرف بی‌رویه منابع انرژی باعث ایجاد برخی چالشها ازجمله تغییرات آب و هوایی، کمبود منابع و مشکلات زیست‌محیطی شده است. ظهور و توسعه روزافزون فناوریهای جدید امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و تحقق دستیابی به ساختمانهای با انرژی خالص صفر را تقریباً در هر نقطه از جهان ممکن کرده است. تمرکز اصلی در این‌گونه ساختمانها اولاً کاهش مصرف انرژی و سپس استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین مصرف انرژی مورد نیاز در طول سال است [1]. در بین انرژیهای تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی یکی از امیدوارکننده‌ترین و قابل قبولترین مولدهای فوتوالکتریک در طراحی ساختمان با مصرف انرژی صفر است[2].

سیستمهای فتوولتاییک (Photovoltaic Systems) جزو منابع انرژی سازگار با محیط زیست هستند و در تحقیقات زیادی به استفاده از آنها در طراحی ساختمانها پرداخته شده است [3-10]. بااین‌حال، این فناوری نوظهور دارای برخی چالشها و جنبه‌های منفی نیز می‌باشد مانند گران بودن و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه زیاد، هزینه‌های قابل توجه بهره‌برداری در طول چرخه عمر، و وابستگی شدید آن به موقعیت مکانی و شرایط آب و هوایی [11]. حقایق فوق الذکر منجر به نیاز به بررسی امکان‌سنجی استفاده این فنّاوری شده است و توجه روزافزونی را در بین محققان سراسر جهان به خود جلب کرده است. ماژولهای خورشیدی (Photovoltaic modules) به عنوان اجزای سیستم فتوولتاییک در مرحله طراحی ساختمان در نظر گرفته می‌شوند و بخشی از یا کل انرژی مورد نیاز ساختمان را پوشش می‌دهند [12]. به‌منظور تولید برق می‌توان ماژولهای خورشیدی را روی سقفها (پانلهای خورشیدی نصب‌شده روی پشت‌بام)، نماها، شیشه پنجره‌ها و حتی بر روی سایبانها، نصب کرد.

از نقطه‌نظر هندسی، دو پارامتر وجود دارد که تأثیر قابل توجهی بر راندمان تأسیسات فتوولتاییک دارند: زاویه شیب (Tilt angle) و آزیموت (Azimuth) [13, 14] به طور کلی، در تحقیقات پیشین تأکید شده است که برای به حداکثر رساندن تولید برق، زاویه شیب بهینه تقریباً برابر با عرض جغرافیایی محل است و ماژولهای فتوولتاییک باید رو به استوا باشند [15]. با این حال، ماژولهای فتوولتاییک باید در جایی نصب شوند که اثر سایه‌اندازی توسط اجسام اطراف حداقل باشد زیرا سایه‌اندازی باعث کاهش قابل توجه راندمان می‌شود[16-18]. عبور هر چیزی که بر روی ماژولهای فتوولتاییک سایه می‌اندازد باعث کاهش خروجی جریان الکتریسیته می‌شود و از آنجایی که جریان مستقیماً با توان متناسب است، بر توان خروجی تأثیر می‌گذارد.

از طرف دیگر، با توجه به ملاحظات اقلیمی و موقعیت مکانی، نمی‌توان چشم خود را بر این واقعیت که میزان تابش خورشیدی عاملی حیاتی برای امکان‌سنجی نصب فتوولتاییک در یک مکان خاص است، بست. در یک روز روشن و آفتابی در هر نقطه از جهان (به‌استثنای قطبها) توان تابش خورشیدی حدود ۱۰۰۰ وات بر مترمربع می‌باشد، در حالی که انرژی خورشیدی که بر روی یک سطح در طی یک دوره زمانی مشخص می‌تابد، وابسته به مکان می‌باشد. علاوه بر این، تابش خورشیدی شامل تابش پراکنده و مستقیم است. در روزهای ابری، تشعشعات توسط ابرها منعکس‌شده و توان تابش تا ۱۰۰ وات بر مترمربع کاهش می‌یابد. علاوه بر این، دمای محیط نصب فتوولتاییک به شدت بر خروجی یک سلول خورشیدی تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که سیستم فتوولتاییک و اجزای آن نمی‌توانند ۱۰۰ درصد نور جذب شده را به الکتریسیته تبدیل کنند، مقداری از این انرژی به صورت گرما از بین می‌رود و دمای سلول را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه توان خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد[19]. عملکرد سلولهای خورشیدی مختلف در منطقه گرمسیری سنگاپور توسط صابر و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [20]. آنها دریافتند که جهت نصب ماژولهای فتوولتاییک در پشت‌بامهای کم شیب، تأثیر کمی بر تولید برق سالانه دارد، اما نمای شرقی و شیب پانل ۳۰ تا۴۰ درجه به ترتیب مطلوب‌ترین مکان و شیب هستند. لئو و همکاران [15] کاربرد فتوولتاییک را برای ساختمانها در مناطق مختلف آب و هوایی در چین مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که جنوب غربی چین بهترین پتانسیل را برای دستیابی به ساختمانهای با انرژی صفر دارد.

بررسی دقیق تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تلاش‌های گسترده‌ای در پیاده‌سازی فتوولتاییک در طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر صورت گرفته و چالشهای مرتبط با آن به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برخی از محققان تنها بر روی حداکثر توان ممکن تولیدشده توسط فتوولتاییک در یک مکان خاص تمرکز کرده‌اند، در حالی که برخی دیگر به بررسی پارامترهای مختلف و اثرات آنها بر روند مصرف انرژی ساختمان

متمرکز شده‌اند. هوفیرکا و همکاران روشی برای ارزیابی پتانسیل فتوولتاییک در مناطق شهری ارائه کردند[21]. آنها دریافتند که تکنولوژی فتوولتاییک می‌تواند دو سوم مصرف برق را در یک شهر کوچک در اسلواکی تأمین کند. ارزیابی سیستم فتوولتاییک در محل از طریق یک ابزار تخمین مبتنی بر وب در[22] توسعه داده شد. نویسندگان دریافتند که نصب تأسیسات فتوولتاییک می‌تواند به طور قابل توجهی به مجموع انرژیهای تجدیدپذیر مورد استفاده در اتحادیه اروپا در حال و آینده کمک کند. کاربرد سیستمهای فتوولتاییک برای ساختمانهای با انرژی صفر در مناطق مختلف آب و هوایی چین توسط لئو و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [15]. آنها دریافتند که اگر راندمان سیستم فتوولتاییک بالاتر از ۲۰٪ باشد می‌توان در ساختمانهای مسکونی کم ارتفاع به ساختمان با مصرف انرژی صفر را دست یافت. نمونه دیگری از چنین مطالعه‌ای توسط هونگ و همکاران در منطقه گانگنام در سئول، کره جنوبی ارائه گردید[23]. آنها روشی را برای تخمین پتانسیل خورشیدی در پشت بام از طریق روش تجزیه و تحلیل هیلشید(Hillshade) با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی، جغرافیایی و فنی توسعه دادند.

طراحی سیستمهای فتوولتاییک نه تنها به شرایط آب و هوایی بلکه به مقررات معماری و شهرسازی نیز بستگی دارد. به عنوان مثال، اثرات سایه‌اندازی محیط پیرامون که به عرض معبر، نوع سقف (از نظر مسطح یا شیب‌دار)، شیب سقف شیب‌دار و همچنین نسبت سطح پنجره به دیوار مرتبط است، مستقیماً بر حرارت و روشنایی فضای داخل ساختمان تأثیر می‌گذارد. تأثیر نصب تأسیسات فتوولتاییک و نسبت سطح نورگذر به دیوار (Window to Wall Ratio)WWR)) بر مشخصات انرژی یک ساختمان مهد کودک توسط مارکوینسکی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [11]. آنها دریافتند که نسبت WWR کم (۲۵٪)، مصرف انرژی برای گرمایش فضا و آب گرم خانگی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد گر چه بیشترین فضا برای نصب سلولهای خورشیدی (۹۹٪/۵) فراهم خواهد شد.

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد مطالعات زیادی در خصوص استفاده از سیستمهای انرژی خورشیدی در طراحی ساختمانها با مصرف انرژی خالص صفر انجام شده است لکن درخصوص تاثیرات الزامات طرحهای مدیریت شهری و شهرسازی خصوصاً پارمترهای عرض معبر و ارتفاع ساختمان و همچنین اثر سایه اندازی ساختمانهای مجاور بر کاهش راندمان سیستمهای فتوولتاییک تحقیقات زیادی موجود نیست. با در نظر گرفتن همه این مسائل، یک مطالعه سامانمند برای ارزیابی استفاده از سیستمهای فتوولتاییک در دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در اقلیم شمال ایران انجام شد. هدف این مطالعه ارزیابی به‌کارگیری، امکان‌سنجی و کاربرد ماژولهای فتوولتاییک در اقلیم معتدل و مرطوب شمال ایران است. برای این منظور اصول اساسی معماری، فرم، سیستمها و ضوابط در نظر گرفته شده برای ساخت و ساز در شرایط مختلف آب و هوایی و همچنین نیازهای انرژی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۴] در نظر گرفته شده است.

مهمترین ا هداف و نوآوری های پژوهش حاضر برای پرکردن خلأ تحقیقاتی موجود در تو سعه مسائل مرتبط با انرژی در ایران به شرح زیر است:

- تحلیل حساسیت و تعیین تأثیرگذارترین متغیرها برای مدل بهینه‌سازی ساده‌سازی شده.
- در نظر گرفتن اثرات سایه‌اندازی ساختمانهای اطراف بر روی پانلهای فتوولتاییک و ا ستفاده از معماری و ضع موجود سقفهای ساختمان برای نصب سلولهای خورشیدی برای تولید برق.
- در نظر گرفتن شرایط اقلیمی جنوب دریای خزر برای یک ساختمان سه‌طبقه مسکونی شهری.

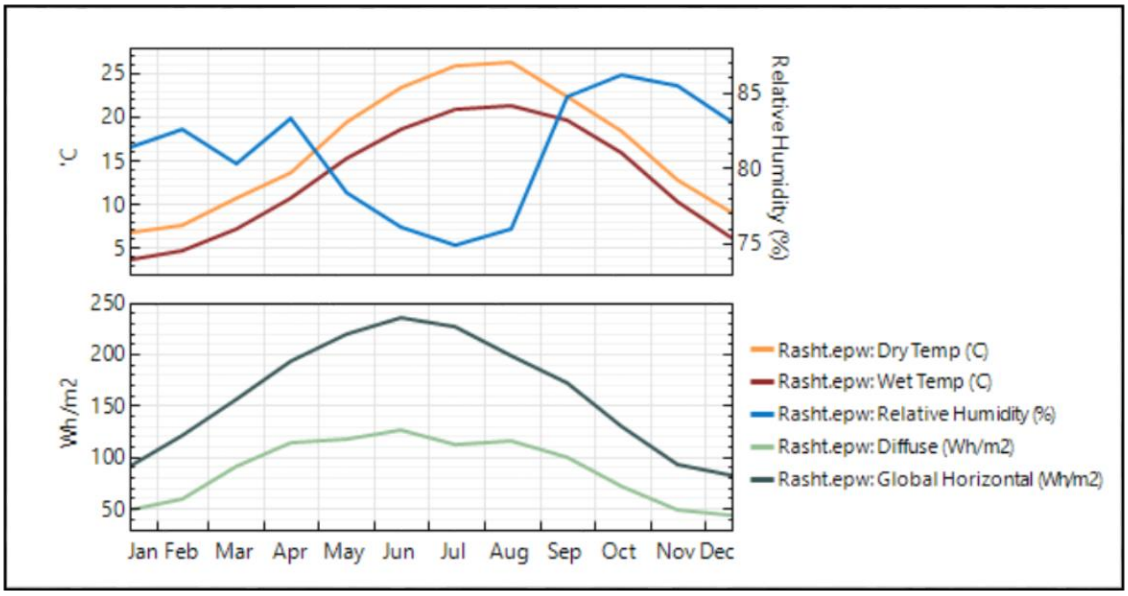
روش تحقیق

سواحل دریای خزر در شمال ایران دارای آب و هوای معتدل و بارندگی فراوان است. دمای هوا در روزهای تابستان بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و در روزهای زمستان معمولاً بالای صفر است. از ویژگیهای اصلی این اقلیم رطوبت بالا با میزان بارندگی قابل توجه است. آسمان اغلب ابری است که نور مستقیم خورشید را پراکنده می‌کند و راندمان ماژولهای فتوولتاییک را تحت تأثیر قرار داده و به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای ارزیابی پتانسیل دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در این اقلیم، یک ساختمان مسکونی سه‌طبقه در شهر رشت، برای این مطالعه انتخاب شده است.

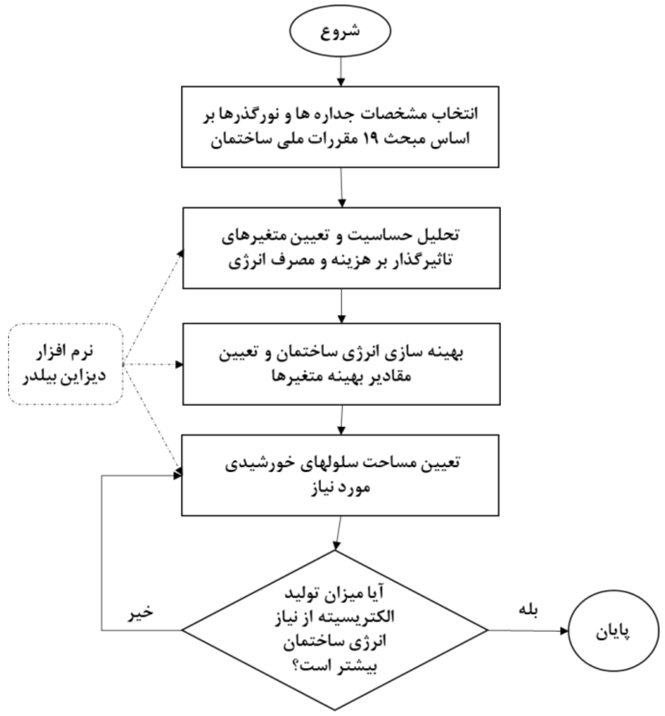
شرایط اقلیمی منطقه از جمله رطوبت زیاد و نزدیکی دمای خشک و مرطوب باعث شده است که استفاده از راهکارهای غیرفعال(Passive solutions) برای کاهش انرژی مورد نیاز ساختمان چندان مؤثر نباشد. علاوه بر این، بسیاری از راه‌حلهای غیرفعال برای ساختمانهای شهری امکان‌پذیر نیستند، زیرا طراحی معماری آنها تابع قوانین و مقررات خاص شهری مانند جهت و عرض معابر شهری و همچنین محدودیتهای سایه‌اندازی ساختمانهای مجاور است. دمای خشک و مرطوب و رطوبت نسبی در ماههای مختلف سال برای شهر رشت در شکل (۱) نشان داده شده است. موقعیت جغرافیایی رشت ۳۷/۲۷۱۳ درجه شمالی و ۴۹/۵۹۲۱ درجه شرقی است. در این شهر طرح تفصیلی بر تمامی ساخت و سازهای شهری نظارت دارد. برای ساختمانهایی که در معابر با عرض‌های مختلف و در جهات مختلف (شمال–جنوب یا شرقی–غربی) قرار دارند، قوانین خاصی در مورد تعداد طبقات و قرارگیری در ملک وجود دارد.

روش کلی این مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن مراحل دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر به طور خلاصه قابل مشاهده است.

در این مطالعه ابتدا با استفاده از فرایند بهینه‌سازی، راه‌حلهای بهینه که کمترین هزینه را دارند، شناسایی می‌شوند. مدل بهینه‌سازی با هدف به حداقل رساندن مصرف برق و هزینه، دارای متغیرهای طراحی شامل اجزای جداره‌ها (دیوار و پنجره‌ها)، سایبان و روشنایی می‌باشد. ماتریس متغیرهای طراحی در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات جداره‌ها و سیستم تأسیسات در مدل پایه مطابق با حداقل‌های ذکر شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان است. پیکربندی لایه‌های مختلف جداره‌ها به عملکرد حرارتی مورد نظر بستگی دارد و می‌توان با تغییر ضخامت عایق، هدایت حرارتی یا مقاومت حرارتی دیوارها و سقف را تغییر داد. علاوه بر این، جذب انرژی خورشیدی توسط خارجی‌ترین لایه در دیوارها باید در نظر گرفته شود. در دیوارها ضریب انتقال حرارت (U-value) به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ دمای خشک و مرطوب و همچنین رطوبت نسبی در ماه‌های مختلف سال در شهر رشت



شکل ۲ چهارچوب کلی مطالعه

جدول ۱ ماتریس متغیرهای طراحی

دیوار	U-values (w/m2k)	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸ (مبحث ۱۹)
پنجره (دوجداره کم گسیل)	WWR North (%)	۲۰	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	۸۰
	WWR South (%)	۲۰	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	۸۰
	Glazing template	شیشه ۳ میل با فاصله ٦ میل پرشده با هوا	شیشه ٦ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با هوا	شیشه ۳ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با آرگون	شیشه ٦ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با آرگون			
سایبان	Overhang North (cm)	بدون سایبان	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	
	Overhang South (cm)	بدون سایبان	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	
سیستم روشنایی	Lighting template	CFL(مهتابی)	T5(تنگستن)	LED				

در خصوص جداره‌های نورگذر نیز بایستی مقدار ضریب هدایت حرارتی، ضریب جذب گرمای خورشیدی (Solar Heat Gain Coefficient) و قابلیت عبور نور (Visible Transmittance) مد نظر قرار گیرد. در این مطالعه فقط مقادیر ضریب هدایت حرارتی در نظر گرفته شده است و سایر پارامترها بر اساس فصل ۱۹ و به میزان حداقل مقادیر قابل قبول در نظر گرفته شده است. نسبت سطح نورگذر به دیوار (WWR) نیز متغیر دیگری است که در این مطالعه در نظر گرفته شده است. جدا از مسائل مربوط به زیبایی‌شناختی در طراحی، پنجره‌ها در مقایسه با دیوارهای معمولی پرهزینه‌تر هستند، اما از نظر تأمین روشنایی در روز اثرگذار بوده و نیاز به برق جهت تأمین نور مصنوعی را کاهش می‌دهند. سایبانهای افقی باعث کاهش تابش خورشید به داخل فضا و جذب نور خورشید می‌شوند و در روزهای تابستان می‌توان از آن برای کاهش جذب گرمای تابشی خورشید استفاده کرد. در سراسر این تحقیق متغیرها با نمادهای زیر به کار رفته است:

مقاومت حرارتی جداره‌ها (Wall construction)، مشخصات پنجره‌ها (Glazing Type)، سیستمهای روشنایی (Lighting template)، نسبت نورگذر به سطح دیوار در نمای شمالی (WWR North)، نسبت نورگذر به سطح دیوار در نمای جنوبی (WWR South)، طول پیش‌آمدگی سایبان شمالی (Overhang-North) و طول پیش‌آمدگی سایبان جنوبی

(Overhang-South).

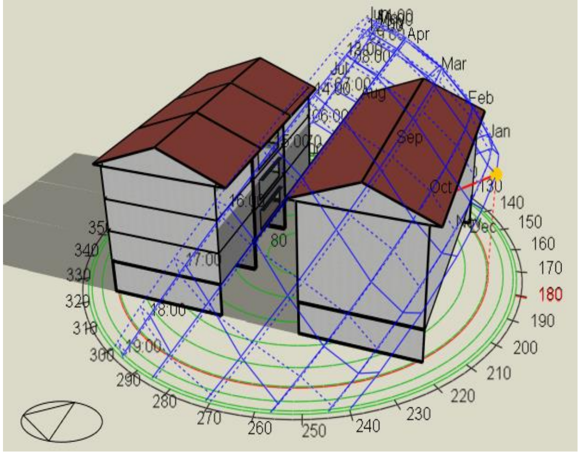
از آنجایی که گزینه‌های زیادی برای سیستمهای گرمایش و سرمایش برای ساختمانهای مسکونی در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد، برای سرمایش و گرمایش فضا در مطالعه حاضر از یک کولر گازی با راندمان مشخص استفاده می‌شود.

از آنجایی که فرایند بهینه‌سازی زمان‌بر است، برای ساده‌سازی و سرعت بخشیدن به فرایند بهینه‌سازی از تحلیل حساسیت برای تعیین تأثیرگذارترین پارامترهای طراحی استفاده شد. تحلیل حساسیت تأثیر عدم قطعیتهای متغیرهای ورودی را بر متغیرهای خروجی شناسایی می‌کند. همچنین مشخص می‌کند که کدام متغیرهای درگیر در شبیه‌سازی تأثیر قابل توجهی بر اهداف بهینه‌سازی دارند و کدام متغیرها را می‌توان از فرایند بهینه‌سازی حذف کرد. پس از تحلیل حساسیت، متغیرها بر اساس درجه اهمیتی که هر متغیر بر هدف دارد، رتبه‌بندی شده و به سه دسته اهمیت زیاد، اهمیت متوسط و کم‌اهمیت طبقه‌بندی می‌شوند. متغیرهایی که دارای اهمیت بالا یا متوسط برای هر دو هدف هستند در فرایند بهینه‌سازی باقی می‌مانند اما اگر اهمیت کمی برای هر هدف داشته باشند، می‌توان آنها را حذف کرد. در صورتی که متغیری برای یک هدف دارای اهمیت متوسط و برای هدف دیگر اهمیت بالایی داشته باشد، حفظ یا حذف متغیر از فرایند بهینه‌سازی ساده‌سازی شده، اختیاری است.

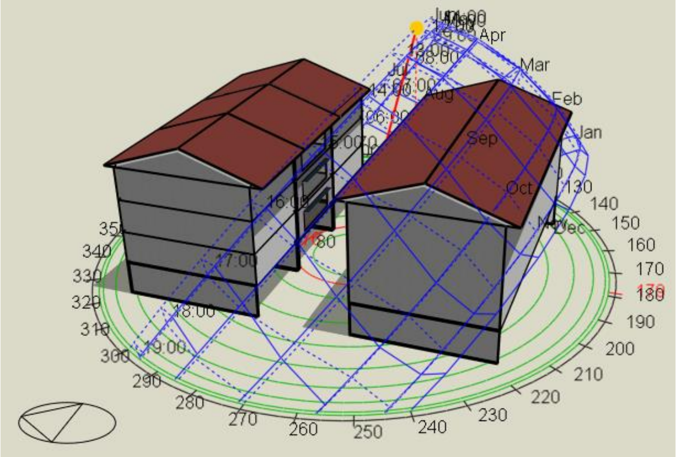
در مسئله بهینه‌سازی ساده‌سازی شده، متغیرهای شناسایی‌شده در تحلیل حساسیت حفظ شده و نتایج بهینه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی انرژی در مدل پایه مقایسه می‌شود. در مدل پایه، مشخصات جداره‌ها و سیستمهای تأسیسات و روشنایی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته می‌شود. بعد از بهینه‌سازی مشخصات و سیستمهای اصلی ساختمان، برای پاسخگویی به نیاز باقی‌مانده و دستیابی به هدف تحقیق که طراحی یک ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر می‌باشد، سیستمهای فتوولتاییک در ساختمان اعمال خواهند شد. برای این منظور ابتدا دیوار جنوبی توسط ماژولهای فتوولتاییک پوشانده می‌شود و سپس برای پاسخگویی به تقاضای باقی‌مانده، پانل‌های فتوولتاییک بر روی سقف نصب خواهند شد.

در این مطالعه از نرم‌افزار دیزاین بیلدر برای ارزیابی کارایی انرژی ساختمان و طراحی سیستمهای فتوولتاییک استفاده شده است. دیزاین بیلدر یک نرم‌افزار رابط کاربری گرافیکی بر پایه موتور انرژی پلاس است که خود یکی از قویترین و گسترده‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان در جهان است و توسط وزارت انرژی ایالات متحده در اوایل سال ۱۹۹۶ طراحی و به طور مداوم بهبود یافته است [۲۵]. از دیزاین بیلدر می‌توان برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف مرتبط با انرژی در یک ساختمان، از جمله فیزیک ساختمان، معماری، روشنایی، سیستمهای گرمایش و سرمایش و غیره استفاده کرد. علاوه بر تمام مزایایی که این نرم‌افزار در شبیه‌سازی انرژی ساختمان دارد، می‌توان از آن برای انجام تحلیل حساسیت، بهینه سازی و مدل‌سازی فتوولتاییک نیز استفاده کرد. در پژوهش حاضر از این قابلیتها به‌خوبی استفاده شده است.

به منظور بررسی مدل پیشنهادی و تعیین پیکربندی مناسب اجزای ساختمان و تأسیسات فتوولتاییک برای دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با در نظر گرفتن شرایط محیطی و محدودیتهای طرحهای شهری یک ساختمان ۳ طبقه مسکونی در شهر رشت به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. تعداد طبقات ساختمان بر اساس طرحهای مصوب شهری رشت و عرض معبر شهری تعریف شده در طرح تفصیلی و مطابق وضع موجود انتخاب شده است و با اهداف تحقیق که مطالعه اثر سایه‌اندازی ساختمانهای مجاور و کاهش راندمان سیستم فتوولتاییک می‌باشد، مطابقت دارد. شکل (۳) نمای شماتیک ساختمان را نشان می‌دهد: (۳-الف) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ دسامبر که خورشید در کمترین ارتفاع خود قرار دارد و (۳-ب) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ جولای که خورشید در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد. طول و عرض ساختمان به ترتیب ۱۲ و ۸ متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر است. به منظور مطالعه اثر سایه‌اندازی فرض شده است ساختمان دیگری دقیقاً با همین ابعاد در سمت مقابل با فاصله ۸ متر (برابر با عرض معبر طبق طرح تفصیلی) قرار دارد (همان طور که پیشتر ذکر شد تعداد طبقات و فاصله ساختمانها بر اساس طرح تفصیلی شهر رشت می‌باشد). در مدل پایه، مشخصات ساختمان مطابق با حداقلهای مورد نیاز بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته شده است (جدول ۱). پنجره‌ها دوجداره می‌باشند با شیشه ساده با ضخامت هر شیشه ۳ میلی‌متر و فاصله ۱۳ میلی‌متری که از هوا پرشده است.



(الف) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ دسامبر که خورشید در کمترین ارتفاع خود قرار دارد



(ب) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ جولای که خورشید در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد

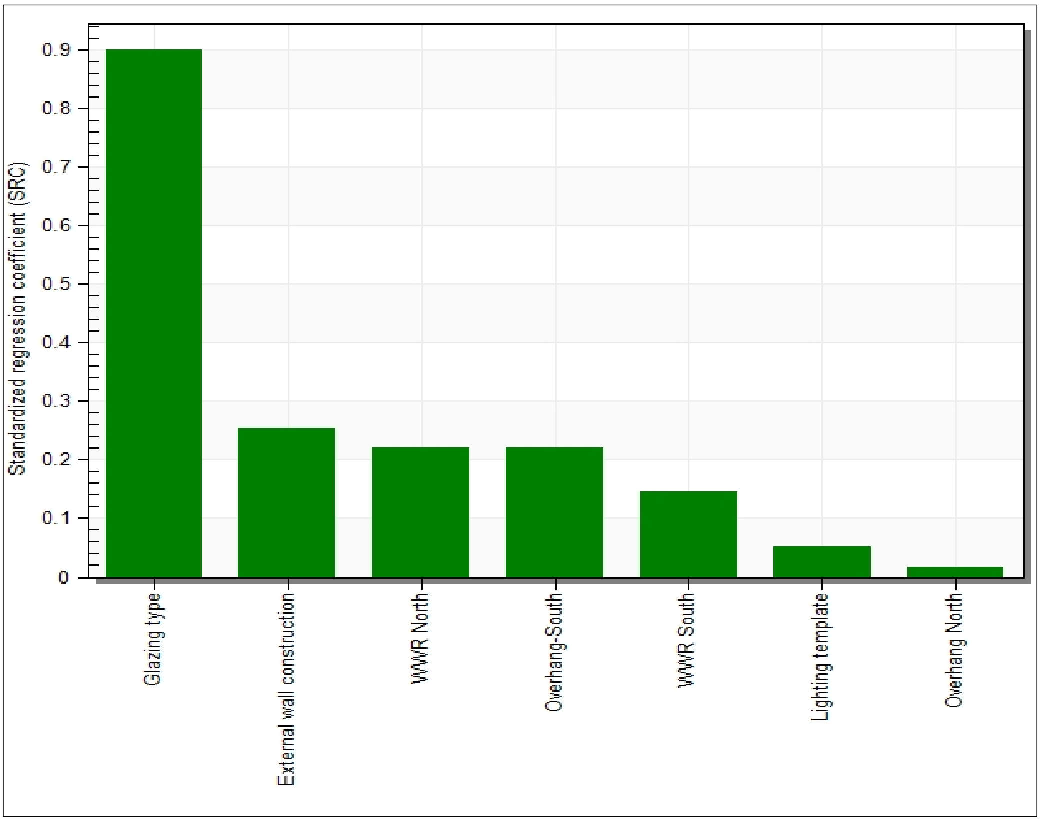
شکل ۳ نمای شماتیک ساختمان مورد مطالعه

به‌منظور تأمین گرمایش و سرمایش فضا از کولر گازی با ضریب عملکرد ((COP(Coefficient of Performance به ترتیب ۲ و ۱۲/۵ ستفاده شده است. شاخص آسایش حرارتی ((PMV(Predicted Mean Vote بین ۰/۵ تا ۰/۵− در نظر گرفته شد. PMV شاخصی برای اندازه‌گیری آسایش حرارتی بر اساس مدل Fanger است [26]. از لامپهای LED برای تأمین نور مصنوعی استفاده شد. همچنین از دو حسگر کنترل‌کننده نور روز استفاده شد که در آستانه ۵۰۰ لوکس فعال می‌شوند. در این مطالعه از برنامه زمان‌بندی پیشنهاد شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، برای سیستمهای روشنایی، گرمایشی و سرمایشی استفاده شده است.

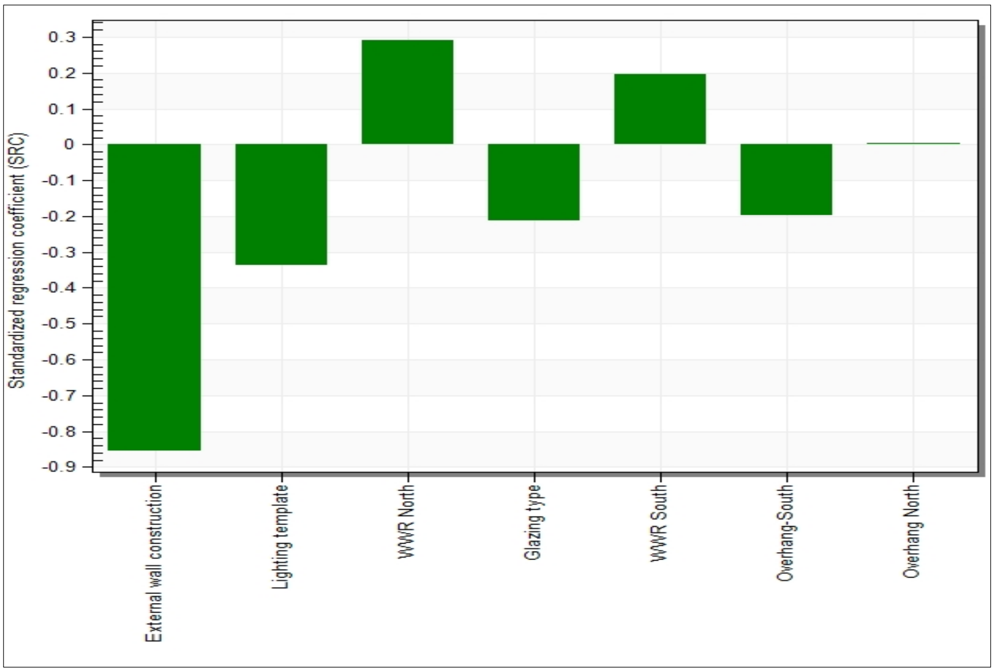
نتایج و بحث

تحلیل حساسیت. برای انجام تحلیل حساسیت از روش رگرسیون استفاده شده است که یک روش آماری است که رابطه بین متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که با تغییر هر یک از متغیرهای ورودی، خروجی چگونه تغییر خواهد کرد [27]. ضریب رگرسیون استاندارد شده ((SRC(Standardized Regression Coefficient حساسیت هر کدام از متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد و مهمترین و کم‌اهمیت‌ترین متغیرها را به ترتیب مشخص می‌نماید. سایر خروجیهای تحلیل حساسیت از جمله R-squared و p-value به ترتیب سطح اعتماد مدل(level of confidence) و قابلیت اطمینان(reliability) نتایج را مشخص می‌کنند.

با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، مقدار R-squared و p-value در این تحلیل به ترتیب ۰/۹۰٤ و صفر به دست آمد. تابع هدف هزینه (Cost) به شدت تحت تأثیر متغیر (Glazing) است (شکل ٤). ورودی و خروجی ارتباط مستقیم دارند. افزایش هزینه متغیر Glazing منجر به افزایش هزینه ساخت می‌شود. هزینه‌های ساخت به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر متغیر (Wall construction) نیز می‌باشند. اثر متغیرهای (WWR North)، (Overhang-South) و (WWR South) بر روی تابع هزینه متوسط است. متغیرهای (Lighting template) و (-Overhang North) تأثیر قابل توجهی بر تابع هزینه ندارند؛ بنابراین، این ورودیها را می‌توان برای این مدل بهینه‌سازی نادیده گرفت.



شکل ٤ نتایج تحلیل حساسیت برای تابع هدف Cost



شکل ٥ نتایج تحلیل حساسیت برای تابع هدف Electricity

تابع هدف مصرف الکتریسیته (Electricity) به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر متغیر Wall construction است؛ اما با آن رابطه معکوس دارد به طوری که افزایش مقدار U-value در متغیر Wall construction منجر به کاهش مصرف الکتریسیته می‌شود (شکل ۵). تابع هدف Electricity همچنین به طور قابل‌توجهی تحت تأثیر متغیرهای (Lighting template) و (WWR North) قرار دارد.

اثر متغیرهای Glazing Type، Overhang-South و WWR South روی تابع هدف مصرف الکتریسیته متوسط است. متغیر Overhang-North تأثیر قابل توجهی بر مصرف الکتریسیته ندارد؛ بنابراین، این متغیر را از فرایند بهینه‌سازی حذف کرد. مقادیر R-squared و p-value در این تحلیل به ترتیب ۰/۹۲۹۵ و صفر به دست آمد.

همان گونه که مشاهده می‌شود که برخی از متغیرها اهمیت بیشتری نسبت به سایرین دارند. در جدول (۲)، ضریب رگرسیون استاندارد شده (SRC) برای توابع هدف Cost و Electricity نشان داده شده است. حساسیت نسبی متغیرهای ورودی به خروجی را می‌توان از مقدار SRC به دست آورد. متغیرهای ورودی به ترتیب حساسیت و اهمیت رتبه‌بندی می‌شوند و علائم مثبت و منفی نشان دهنده رابطه مستقیم یا معکوس بین آنهاست. همچنین متغیر با اهمیت زیاد با رنگ سبز، متغیر با اهمیت متوسط با رنگ زرد و متغیر با رنگ قرمز نشان داده شده است. اگر متغیر طراحی برای هر دو تابع هدف اهمیت بالا یا متوسطی داشته باشد، در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس روش تشریح شده در بخش ۲ و جدول (۲)، متغیرهای طراحی که برای فرایند بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند عبارتند از (Glazing Type)، (Wall construction)، (WWR South)، (WWR North) و (Overhang-South). بدین ترتیب متغیرهای (Lighting template) و (Overhang-North) به دلیل کم‌اهمیت بودن از فرایند بهینه‌سازی حذف شدند.

جدول ۲ ضریب رگرسیون استاندارد شده (SRC) برای توابع هدف

	تابع هدف Cost	مقدار SRC	تابع هدف Electricity	مقدار SRC
نام متغیرهای طراحی	Glazing type	۰/۹۰۰۵	External wall construction	−۰/۸۵٤۸
	External wall construction	۰/۲۵۵۲	Lighting template	−۰/۳۳۷٤
	WWR North	۰/۲۲۱۱	WWR North	۰/۲۹۱۳
	Overhang-South	۰/۲۲۰٦	Glazing type	−۰/۲۱۲۵
	WWR South	۰/۱٤٦۱	WWR South	۰/۱۹۷٦
	Lighting template	۰/۰۵۲۲	Overhang-South	−۰/۱۹٦۵
	Overhang North	۰/۰۱٦۱	Overhang North	۰/۰۰۲۵

جدول ۳ مقدار متغیرها در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی و مقایسه آنها با مدل پایه

متغیر طراحی	مدل پایه	مدل بهینه
U-values (w/m2k)	۰/۸	۰/٤
WWR North (%)	٤۰	۲۰
WWR South (%)	٤۰	٤۵
Glazing template	شیشه ۳ میل با فاصله ٦ میل پرشده با هوا	شیشه ٦ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با هوا
Overhang North (cm)	بدون سایبان	بدون سایبان
Overhang South (cm)	بدون سایبان	۵۰

بهینه‌سازی. همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، متغیرهای غیر تأثیرگذار از تحلیل بهینه‌سازی حذف شدند. پارامترهایی که برای مدل پایه و مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند در جدول (۳) ارائه شده است. بهینه سازی یک مفهوم پرکاربرد در مدل‌سازی انرژی ساختمان است. همان طور که قبلاً توضیح داده شد دیزاین بیلدر یک نرم‌افزار پیشرفته و کارامد درزمینه بهینه‌سازی است و قادر است با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی خودکار ترکیبی از گزینه‌های طراحی که به بهترین نحو توابع هدف را برآورده می‌کنند، مورد استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق، هزینه و مصرف الکتریسیته به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. آنچه ما در تلاش برای یافتن آن هستیم، توازن بهینه بین اهدافی است که معمولاً در تضاد هستند به عنوان مثال مصرف انرژی با افزایش راندمان تجهیزات و مقاومت حرارتی مصالح کاهش می‌یابد اما ممکن است استفاده از این راهکارها پرهزینه باشد. الگوریتم ژنتیک به طور هوشمند راه‌حلهایی را انتخاب می‌کند که به بهترین وجه با اهداف طراحی مطابقت دارند و قویترین موازنه را بین راه‌حلهای ممکن فراهم می‌آورد.

نتایج بهینه‌سازی در جدول (۳) نشان داده شده و با مدل موردی پایه مقایسه شده است. در مدل بهینه‌سازی U-value دیوار، WWR در نماهای شمالی و جنوبی، سایبان جنوبی و نوع پنجره به ترتیب ۰/۴، ۲۰٪، ۴۵، ۵۰ سانتی‌متر و پنجره دوجداره با شیشه ساده ۳ میلی‌متری به فاصله ۶ میلی‌متر پرشده با هوا در نظر گرفته شده است؛ ترکیبی که کمترین هزینه و مصرف را برای ساختمان مورد نظر دارد.

جدول (٤) مصرف انرژی در طبقات مختلف ساختمان را در حالت پایه و مدل بهینه نشان می‌دهد. همان طور که در جدول مشخص است میزان مصرف انرژی در طبقات مختلف متفاوت است. طبقه اول بیشترین مصرف انرژی را دارد که می‌توان آن را به اثر سایه‌اندازی ساختمان مقابل و جریان هوای آزاد از زیر همکف نسبت داد. طبقه سوم نیز کمترین مصرف را دارد که دلیل آن می‌توان به وجود سقف شیب‌دار به عنوان فضای کنترل نشده قلمداد کرد. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که اعمال برخی تغییرات در مشخصات ساختمان می‌تواند مصرف در هر طبقه را تا حدود ۱۹٪ کاهش دهد.

جدول ٤ میزان مصرف انرژی در مدل بهینه و مقایسه آن با مدل پایه (کیلووات ساعت در سال)

	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	مجموع
مدل پایه (کیلووات ساعت)	۹٤۸٤	۹۳۷۰	۸۲۷۰	۲۷۱۲٤
مدل بهینه (کیلووات ساعت)	۷۷۵۰	۷۵۱۷	٦٦٥٦	۲۱۹۲۳
درصد کاهش	۱۸٪	۲۰٪	۲۰٪	۱۹٪

طراحی سیستم فتوولتاییک. برای تأمین نیاز الکتریسیته ساختمان و رسیدن به هدف اصلی که طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر است، پانل‌های فتوولتاییک در نمای جنوبی ساختمان و روی سقف شیب‌دار نصب شدند. بر اساس نتایج فرایند بهینه‌سازی، WWR روی ٤۵٪ تنظیم گردید و سطح باقی‌مانده دیوار تو سط پنلهای خور شیدی پو شانده شده و در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی شد. مشخصات پانل فتوولتاییک مطابق جدول (۵) است.

جدول ۵ مشخصات پانل‌های فتوولتاییک

نوع ماژول	TBM72-325P
ابعاد ماژول (میلی‌متر)	٤۰X ۹۹۲ X۱۹۵٦
حداکثر توان (وات)	۳۲۵
حداکثر ولتاژ (ولت)	۳۷
حداکثر جریان (آمپر)	۸/۷۸
ولتاژ مدار باز (ولت)	٤۵/۹
جریان مدارکوتاه (آمپر)	۹/۱٦
بازده ماژول (٪)	۱٦/۷۵

در این تحقیق سیستم فتوولتاییک به صورت متصل به شبکه در نظر گرفته شده است و ظرفیت باتری به گونه‌ای انتخاب شده است تا بتواند در دور روز متوالی بدون حضور الکتریسیته خورشیدی، نیاز ساختمان را تأمین کند. ظرفیت کل باتریها ۲۸ کیلووات ساعت و توان ماکزیمم تخلیه و شارژ به ترتیب ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول (٦) میزان برق تولید شده توسط پنلهای خورشیدی نصب شده در نمای هر طبقه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، اثر سایه‌اندازی کاملاً مشهود است. در طبقه اول اثر سایه‌اندازی ساختمان مقابل باعث کاهش تولید برق شده است و در طبقه سوم اگرچه ساختمان مقابل بر نما سایه نمی‌اندازد، اما اثر سایه سقف شیب‌دار ساختمان (دامنه سقف) در ماههای گرم سال که زاویه تابش خورشید زیاد است (به شکل ٦ رجوع شود)، باعث ایجاد سایه‌اندازی روی پانلهای نصب‌شده در نما و کاهش تولید برق شده است. تولید الکتریسیته در حالتی که هیچ گونه سایه‌اندازی روی پانلهای خورشیدی وجود ندارد نیز در این جدول ارائه شده است. می‌توان دریافت که نصب سلولهای خورشیدی با مشخصات فوق در این منطقه در حالت عمودی می‌تواند حداکثر ۱۱٤/۷ کیلووات ساعت بر مترمربع سطح سلول خورشیدی، برق تولید کند.

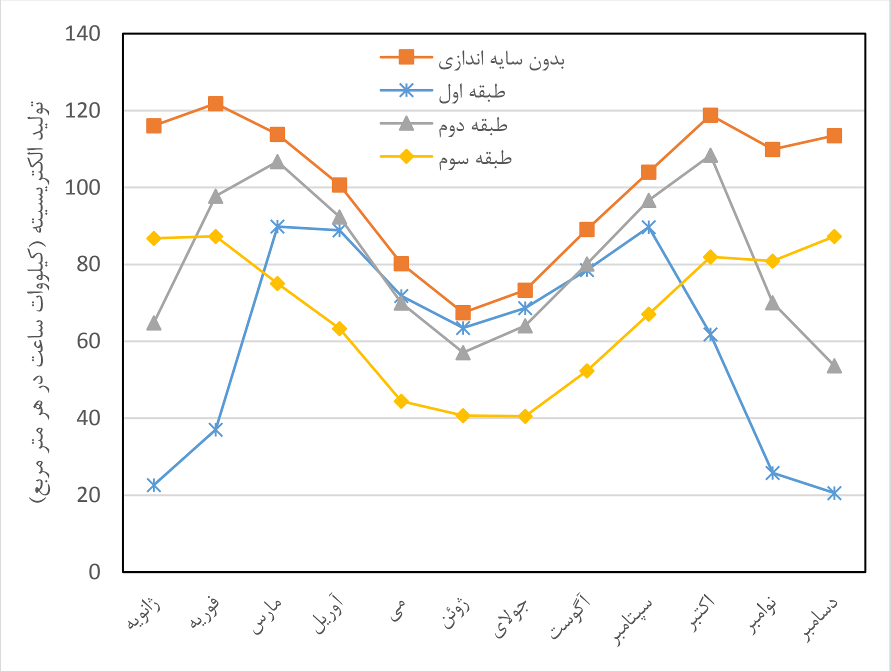
شکل (٦) مقدار برق خورشیدی تولید شده توسط سلولهای خورشیدی نصب شده در نمای طبقات را در طول ماههای مختلف سال نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، اثر سایه‌اندازی ساختمان مقابل در طبقه اول، راندمان تولید سلولهای خورشیدی را به‌شدت کاهش داده است. در طبقه سوم، اثر سایه‌زنی سقف شیب‌دار باعث کاهش تولید برق شده است. این کاهش راندمان از ماه می تا سپتامبر که زاویه ارتفاع خورشید بیشتر است مشهودتر است (شکل ۳). میزان تولید الکتریسیته برای حالتی‌که هیچ سایه‌اندازی روی سطوح وجود ندارد نیز در شکل (٦) نمایش داده شده است.

پس از بررسی نتایج ناشی از نصب پانلهای خورشیدی روی نمای جنوبی ساختمان، نصب پانلها بر روی سقف ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل بارندگی و برف زیاد منطقه، سقف ساختمانها به صورت شیب‌دار با شیب بین ۲۰ تا ٤۰ درجه به سمت جنوب و شمال اجرا می‌شود. میزان تولید برق توسط سلولهای خورشیدی نصب شده برای سقفهای شیب‌دار رو به جنوب و شمال با شیبهای مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حداکثر توان خروجی در پانلهای رو به جنوب در زاویه ۳۵ درجه اتفاق افتاده است که نزدیک به عرض جغرافیایی محل بوده و نتایج تحقیقات گذشته را تأیید می‌کند[28]. لکن برای کل سیستم، حداکثر توان خروجی در شیب ۲۰ درجه رخ داده است. چرا که افزایش شیب پانلهای خورشیدی نصب شده به سمت شمال توان خروجی آنها را کاهش می‌دهد، لذا در مجموع حداکثر توان تولید شده در پشت بام در زاویه ۲۰ درجه رخ خواهد داد.

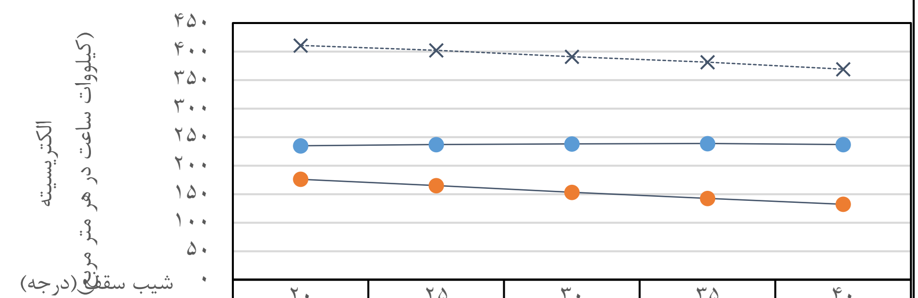
در جدول (۷) تولید برق سیستم خورشیدی نصب شده در پشت بام و نمای ساختمان نشان داده شده است. همان طور که از جدول مشخص است، سلولهای خورشیدی نصب شده در سقف شیب‌دار رو به جنوب بیشترین توان (۹۷٤۵ کیلووات ساعت) و سلولهای نصب شده در نمای طبقه اول کمترین توان را تولید کردند (۷۱۸/۷ کیلووات ساعت).

جدول ٦ میزان تولید الکتریسیته فتوولتاییک در نمای ساختمان

	نمای طبقه اول	نمای طبقه دوم	نمای طبقه سوم	بدون سایه‌اندازی
تولید الکتریسیته (کیلووات ساعت)	۷۱۸/۷	۹٦۲	۸۰۸	۱۲۳۹
تولید الکتریسیته (کیلووات ساعت در واحد سطح)	٦٦/٥	۸۹/۱	۷٤/۸	۱۱٤/۷



شکل ٦ برق تولید شده در نمای ساختمان در واحد سطح در ماه‌های مختلف سال



شیب سقف (درجه)	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
سقف رو به جنوب	۲۳۴,۷۷	۲۳۷,۱۶	۲۳۷,۸۷	۲۳۸,۷۴	۲۳۶,۹۵
سقف رو به شمال	۱۷۵,۹۴	۱۶۴,۹	۱۵۳,۰۹	۱۴۲,۵۵	۱۳۲,۱۲
مجموع	۴۱۰,۷۱	۴۰۲,۰۶	۳۹۰,۹۶	۳۸۱,۲۹	۳۶۹,۰۷

سقف رو به جنوب — سقف رو به شمال — مجموع

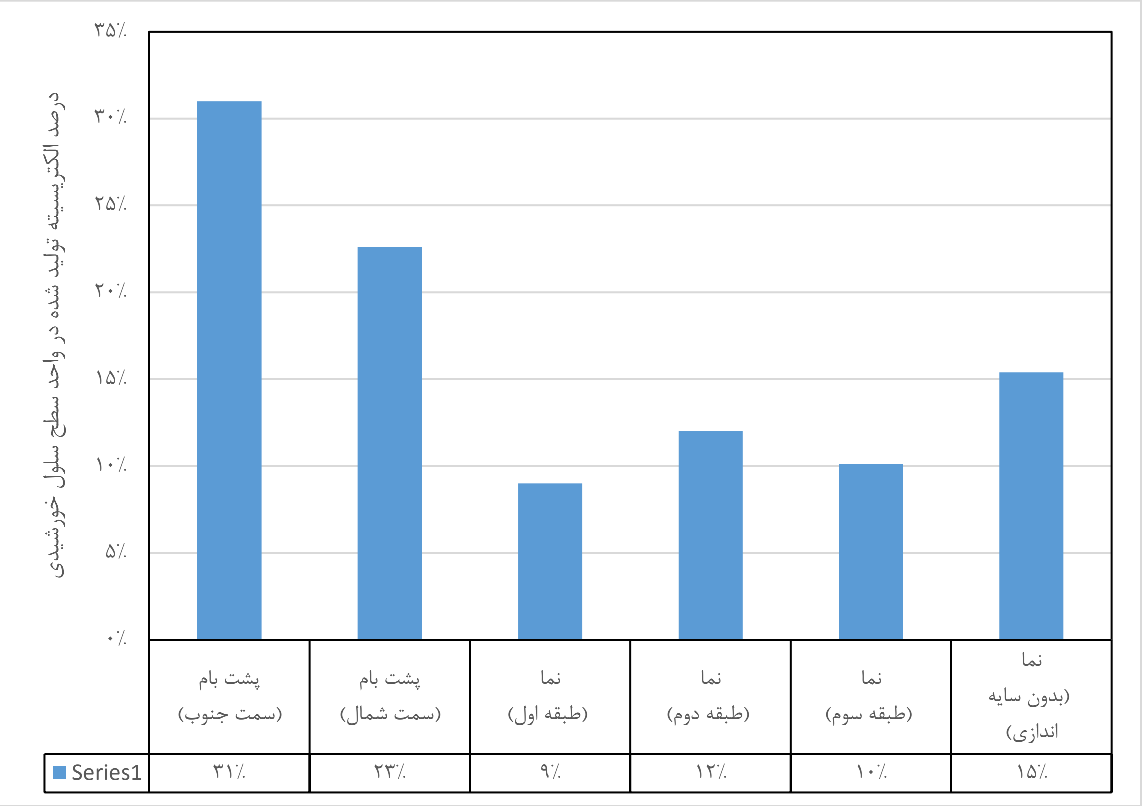
شکل ۷ برق تولید شده توسط سلولهای خورشیدی نصب شده در سقف شیب‌دار در واحد سطح

جدول ۷ سهم هر کدام از بخشهای مختلف تولید الکتریسیته خورشیدی

محل نصب سیستم فتوولتاییک	الکتریسیته تولیدشده (کیلووات ساعت در سال)
سقف شیب‌دار رو به جنوب	۹٧٤٥
سقف شیب‌دار رو به جنوب	٧١٠٧
نمای طبقه اول	٧١٨/٧
نمای طبقه دوم	٩٦٢
نمای طبقه سوم	٨٠٨
بدون سایه‌اندازی	١٢٣٩

در شکل (۸) سهم هر یک از سیستمهای خور شیدی در واحد سطح نصب شده در ساختمان نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشاهده می‌شود، نصب سلولهای خورشیدی بر روی پشـــت بام بیشـــترین راندمان و در نمای طبقه اول کمترین راندمان را خواهد داشت.

در جدول (۸) ترکیب مولدها فتوولتاییک مختلف برای دستیابی به ساختمانی با انرژی خالص صفر مشاهده می‌شود. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود کل مصرف ساختمان در سه طبقه برابر با ۲۱۹۲۳ کیلووات ساعت در سال و میزان تولید برق برابر با ۱۹۳٤۱ کیلووات ساعت در سال می‌باشد. در نتیجه، دستیابی به ساختمانی با انرژی خالص صفر عملاً برای کل ساختمان غیر ممکن است لکن برای هر یک از طبقات به طور جداگانه با ترکیب سلولهای خورشیدی در پشت بام و نما می‌توان انرژی مورد نیاز ساختمان را با نصب سیستمهای خورشیدی تأمین کرد.



شکل ۸ سهم هرکدام از بخشهای مختلف تولید الکتریسیته خورشیدی در واحد سطح

جدول ۸ ترکیب بخشهای مختلف تولید کننده الکتریسیته خورشیدی برای دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی صفر

	نمای ساختمان (کیلووات ساعت)	سقف شیب‌دار رو به جنوب (کیلووات ساعت)	سقف شیب‌دار رو به شمال (کیلووات ساعت)	کل تولید الکتریسیته (کیلووات ساعت)	کل مصرف الکتریسیته (کیلووات ساعت)
طبقه اول	۷۱۸/۷	۹۷٤۵	۷۱۰۷	۱۷۵۷۰/۷	٦٦٥٦
طبقه دوم	۹٦۲			۱۷۸۱٤	۷۵۱۷
طبقه سوم	۸۰۸			۱۷٦٦۰	۷۷۵۰
مجموع	۲٤۸۹			۱۹۳٤۱	۲۱۹۲۳

نتیجه‌گیری

در این مقاله با رعایت تمامی ملاحظات موجود و رعایت تمامی الزامات قانونی و فنی، امکان طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در منطقه جنوب دریای خزر مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، پیکربندیهای مختلف ساختمان برای به حداقل رساندن نیاز الکتریسیته ساختمان برای متغیرهای طراحی مانند دیوارها، پنجره‌ها، سایبان و سیستم روشنایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. قبل از بهینه‌سازی، برای کاهش تعداد متغیرها و در نتیجه کاهش زمان بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت متغیرها انجام شد. پس از انتخاب مشخصات و سیستم ساختمان، پانلهای خورشیدی در نمای جنوبی نصب شد تا حداکثر برق ممکن تولید شود. در نهایت، با نصب پانلهای خورشیدی در پشت بام ساختمان، سعی شد تا نیاز انرژی باقی‌مانده ساختمان برای رسیدن به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر تأمین شود.

- نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که دیوارهای خارجی، پنجره، نسبت سطح نورگذر به دیوار و سایبان جنوبی تأثیرگذارترین متغیرها هستند که هم بر مصرف انرژی ساختمان و هم هزینه سرمایه‌گذاری تأثیر می‌گذارند.
- نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با انتخاب مقادیر بهینه متغیرها، مصرف برق تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با استفاده از پانلهای خورشیدی نصب شده در نما و پشت بام ۸۸/۲٪ از نیاز برق ساختمان تأمین خواهد شد. در این راستا، سهم پانل خورشیدی سقف بیشترین (۸۷/۲٪) و پانل خورشیدی نمای جنوبی کمترین (۱۲/۸٪) است.
- با وجود کاهش قابل توجه نیاز به برق شبکه، دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر برای یک ساختمان ۳ طبقه در مکان مورد بررسی امکان‌پذیر نیست، اما با در نظر گرفتن تنها یک طبقه، تأمین نیاز سالانه با نصب پانلهای خورشیدی مناسب در پشت بام امکان‌پذیر است.

نتایج این مطالعه، پتانسیل دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر را با در نظر گرفتن راندمان سیستم فتوولتاییک، پیکربندی ساختمان و محدودیتهای برنامه‌ریزی شهری در مکان مورد مطالعه نشان داد. ایران از نظر شرایط اقلیمی و تابش خورشید دارای تنوع غنی است. از این رو، تحقیقات مشابهی را می‌توان برای مطالعات آتی پیشنهاد کرد. همچنین، از آنجایی که هزینه چرخه عمر و مسائل اقتصادی مرتبط به استفاده از سیستمهای فتوولتاییک در مرحله ساخت و ساز و بهره‌برداری اهمیت زیادی دارند، شبیه‌سازی دقیقتر و واقعیتر طراحان را قادر می‌سازد تا به دستاوردهای قابل اعتمادی دست یابند.

سپاسگزاری

مراجع

[1] S. S. Rezaeinasab, A.Taefi nasrabadi, S. Asadi, and S. A. Haj seiyed taghia, “Investigating the probability of designing net-zero energy buildings with consideration of electric vehicles and renewable energy,” *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, pp. 4061-4087, 2021.

[2] W. Wu and H. M. Skye, “Residential net-zero energy buildings: Review and perspective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 142, pp. 110859, 2021.

[3] L. Wells, B. Rismanchi, and L. Aye, “A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context,” *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 616-628, 2018.

[4] G. Tiwari, R. Mishra, and S. Solanki, “Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modelling,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2287-2304, 2011.

[5] K. Sudhakar, M. Winderla, P. Maximilian, and S. S. Sudhakar, “Net-zero building designs in hot and humid climates: A state-of-art,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol.13, pp. 100400, 2019.

[6] A. Scognamiglio and H. R. Røstvik, "Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design," *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, vol. 21, no. 6, pp. 1319-1336, 2013.

[7] Y. Lu, S. Wang, and K. Shan, "Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings," *Applied Energy*, vol. 155, pp. 463-477, 2015.

[8] C. Good, I. Andresen, and A. G. Hestnes, "Solar energy for net zero energy buildings–A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic–thermal (PV/T) systems," *Solar Energy*, vol. 122, pp. 986-996, 2015.

[9] A. Chel and G. Kaushik, "Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 2, pp. 655-669, 2018.

[10] D. Aelenei, L. E. Aelenei, E. Musall, and E. Cubi, "Design strategies for non-residential zero-energy buildings: lessons learned from Task40/Annex 52: towards net zero-energy solar buildings," in CLIMA 2013-11th REHVA *World Congress & 8th International Conference on IAQVEC* (Pregue, Czech Republic), 2013.

[11] J. Marchwiński and K. Kurtz-Orecka, "Effect of photovoltaic installation power and façade glazing ratio on the energy performance of a nursery building," *Engineering, Construction* and *Architectural Management*, Vol. 30, pp. 1463-1480, 2022.

[12] S. Asadi, M. Nazari-Heris, S. S. Rezaeinasab, H.Torabi, M. Sharifironizi,"An updated review on net-zero energy and water buildings: Design and operation," Food-Energy-Water Nexus Resilience and Sustainable Development: Decision-Making Methods, Planning, and Trade-Off Analysis: Springer, pp. 267-290, 2020. [E-book] Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40052-1_12.

[13] A. K. Yadav and S. Chandel, "Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 23, pp. 503-513, 2013.

[14] A. Shariah, M. A. Al-Akhras, and I. Al-Omari, "Optimizing the tilt angle of solar collectors," *Renewable Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 587-598, 2002.

[15] C. Liu, W. Xu, A. Li, and D. Sun, "Energy balance evaluation and optimization of photovoltaic systems for zero energy residential buildings in different climate zones of China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, pp. 1202-1215, 2019.

[16] Y. J. Wang and P. C. Hsu, "An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3069-3078, 2011.

[17] R. K. Pachauri, I. Kansal, T. S. Babu, and H. H. Alhelou, "Power losses reduction of solar PV systems under partial shading conditions using re-allocation of PV module-fixed electrical connections," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 94789-94812, 2021.

[18] D. Fares, M. Fathi, I. Shams, and S. Mekhilef, "A novel global MPPT technique based on squirrel search algorithm for PV module under partial shading conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 230, pp. 113773, 2021.

[19] J. Fan, L. Wu, F. Zhang, H. Cai, X. Ma, and H.Bai, "Evaluation and development of empirical models for estimating daily and monthly mean daily diffuse horizontal solar radiation for different climatic regions of China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 168-186, 2019.

[20] E. M. Saber, S. E. Lee, S. Manthapuri, W. Yi, and C. Deb, “PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings,” *Energy*, vol. 71, pp. 588-595, 2014.

[21] J. Hofierka and J. Kaňuk, “Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools,” *Renewable energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2206-2214, 2009.

[22] M. Šúri, T. A. Huld, E. D. Dunlop, and H. A. Ossenbrink, “Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries,” *Solar energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1295-1305, 2007.

[23] T. Hong, M. Lee, C. Koo, K. Jeong, and J. Kim, “Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis,” *Applied Energy*, vol. 194, pp. 320-332, 2017.

[24] “Iranian National Code, chapter 19: Energy Conservation,” 2020; Available: https://www.bhrc.ac.ir/nbri/. [Accessed Oct.12, 2022]. (In Persian)

[25] B. S. Pawar and G. Kanade, “Energy optimization of building using design builder software,” *International Journal of New Technology and Research*, vol. 4, pp. 263152, 2018.

[26] F. R. d'Ambrosio Alfano, B. W. Olesen, B. I. Palella, and D. Pepe, “Fifty years of PMV model: Reliability, implementation and design of software for its calculation,” *Atmosphere*, vol. 11, no. 1, pp. 49, 2020.

[27] B. Iooss, and P. Lemaître, “A review on global sensitivity analysis methods,” *Uncertainty management in simulation-optimization of complex* systems: Springer, vol. 59, pp. 101-122, 2015. [E-book] Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8_5.

[28] Z. Elhassan, M. Zain, and K. Sopian, “Output energy of photovoltaic module directed at optimum slope angle in Kuala Lumpur, Malaysia,” *Applied science*, vol. 6, no. 2, pp. 104-9, 2011.

Journal Ferdowsi Civil Engineering, 36, 1, 2023. (69-84)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Remediation of a Clay Soil Contaminated with Dimethyl Phthalate using Electrokinetic Method

Research Article

Hesam Fathali[1], Ali Raeesi Estabragh[2], Keramatollah. Rezaei Tireh Shabankareh[3], Abdolhossein Hoorfar[4]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79475.1188

1. Introduction

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are organic contaminants that are formed of carbon and hydrogen that are composed of multiple aromatic rings. They are nonpolar and insoluble in water, persistent in soil and many of them are recognized as carcinogenic. The source of them is usually oil production and petrochemical complex industry. Dimethyl phthalate (DMP) is a chemical matter from PAHs group that is commonly found in soil through industrial activities and causes contamination of soil. Electrokinetic method is among the methods used for remediation of contaminated soil. It comprises of four major processes namely electrophoresis, electroosmosis, electromigration, and electrolysis. Electrophoresis describes the transport of large colloidal or other charged material through soil mass. Electroosmosis is the main mechanism of water flow through fine-grained porous media under the influence of an electric field. Electro-migration explains the movement of ionic species in pore fluid toward oppositely charged electrodes.

Electrokinetic is a low cost process for remediation of contaminated soil but suffers from several disadvantages such as generation of gases and acid at the anode that reduce the efficiency of the process. Some studies reported that the electrokinetic technique can successfully remove heavy metals and organic matters from contaminated soil. The removal of PAHs from contaminated soil is rather complex because of their low solubility and their tendency to remain attached to soil particles and organic matters in soil. Several methods have been proposed for remediation of soil contaminated with this kind of organic contaminant. Electrokinetic technique has been suggested for the removal of PAHs from soil. Due to the low water solubility of most organic contaminants and the neutrality of their molecules, it is not possible to remove hydrophobic organics from the soil by electrokinetic technique. In order to overcome these limitations, the degree of solubility of organics can be increased by the use of surfactants as flushing solution in anode and/or cathode. Reviewing the literature shows that investigation on the removal of DMP from a contaminated soil is relatively rare. Therefore, the aim of this work is to investigate the applicability of electrokinetic in soil flushing with NaOH solution and non-ionic surfactant (Tween 80) to remove DMP from a clay contaminated soil. The tests were conducted with voltage of 50 at times of 7 days. The results were analyzed and compared with a reference test and with each other.

2. Materials and methods

The soil used in this experimental work was a clay. It was composed of 2% sand, 45% silt, and 53% clay. It had a liquid limit of 43.0% and plastic limit of 25.0 %. The maximum dry unit weight and optimum water content of the soil were determined from standard compaction test as 17.71 kN/m^3 and 17.9%, respectively. The specific gravity of solids (G_s) was 2.70. According to the Unified Soil Classification System (USCS), the soil can be classified as clay with low plasticity (CL).

DMP is a chemical substance from PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons) group with chemical formula $C_{10}H_{10}O_4$ and molecular weight and density equal to 194.18 g/mol and 4000 mg/L, respectively. The major application of DMP is in production of dyes, plastics, and pesticides.

Tween 80 was selected as non-ionic surfactant in this work with chemical formula $C_{64}H_{124}O_{26}$ and average molecular weight of 1310 g/mol. The solution of 0.1 M NaOH and the above surfactant were used to increase the efficiency of remediation of contaminated soil.

For preparing samples of soil contaminated with Dimethyl phthalate, the ratio of 0.04 mg (DMP)/g (soil) was considered, the amount of 360 mg DMP was mixed with 1800 ml distilled water then this mixture was mixed as spray with 9 kg soil. Then the water of this mixture was increased until it reached to the liquid limit and it was kept in a seal container for five days for uniform distribution of moisture. The prepared soil was then poured into the main cell of apparatus in several layers and each layer was tamped in the cell so that the entrapped air could go out. After the soil was placed in the main cell, the apparatus was assembled and other accessories were connected to it. The anode and cathode reservoirs were then filled with

*Manuscript received: November 6, 2022, Revised, January 23, 2023, Accepted, February 28, 2023.

[1]. PhD Candidate in Hydraulic Structures, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran.

[2]. Corresponding author. Professor in Geotechnical Enginering, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran.
Email: raeesi@ut.ac.ir

[3]. Professor, Food science Department, University of Tehran.

[4]. Professor, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran.

desired solution so that the level of fluid in the reservoirs was the same as the level of soil in the main cell. Three tests were designed to perform. Test 1 was considered as the reference test in which the anode and cathode reservoir were filled with distilled water. For the rest tests the anode reservoir was filled with solution of 0.1 N NaOH or 3% solution of Tween 80. During conducting each tests, the pH and EC of anode and cathode reservoirs and out-flow of fluid from cathode reservoir were measured. At the end of each test, soil samples were extracted at certain distance from anode (4, 12, 19 and 26cm) for measuring pH, EC and the remediation of it. For determining the remediation, the procedure of preparing sample was done according to EPA-3540 standard. The liquid that was extracted according to this standard was injected to the GC (Gas Chromatography) apparatus for determining the percent remediation of the soil.

3. Results and discussion

Figure 1 shows the cumulative outflow of fluid from the cathode reservoir for different tests. For the test with anode reservoir filled with NaOH solution was nearly 20% more than the solution of Tween 80 and distilled water. The difference in the volume of fluid discharge for the cases of distilled water or Tween 80 as anode fluid can be explained through the interaction of the NaOH with soil particles. This interaction leads to the modification of the soil structure and zeta potential that is an important factor for the outflow of fluid from cathode.

Figure 2 shows the results of remediation soil at different distances (4, 12, 19, and 26 cm) from anode. As seen in this figure, the percentage of remediation for all tests is reduced by increasing the distance from anode. It can be seen in this figure that the percentage of emediation for Tween 80 around the anode and cathode are 53.88% and 16.5%, respectively but for NaOH solution they are 50.82% and 23.36%. The results indicated that the removal of DMP from the soil depends on the volume of fluid discharge from sample and solubility of contaminated with the used solutions. As Figure 1 shows, with NaOH solution the volume of outflow fluid is increased in comparison with distilled water and solution of Tween 80. Therefore, NaOH solution can be an acceptable candidate for the remediation of soil from DMP.

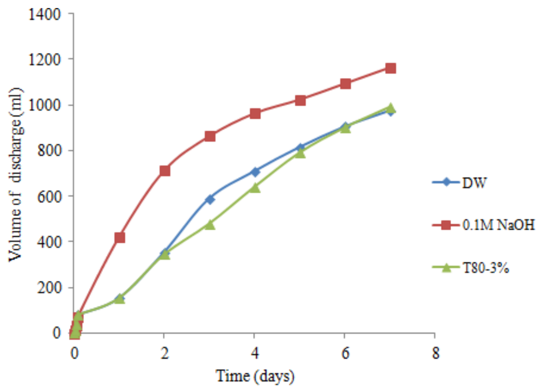


Figure 1.Volume of fluid discharge

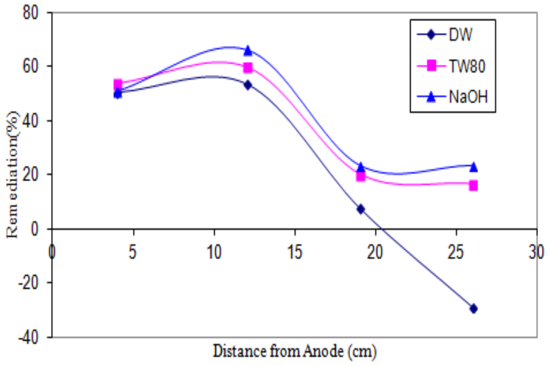


Figure 2. Percentage of remediation

4. Conclusion

The remediation of DMP from a clay soil was studied through experimental tests using distilled water or NaOH solution and Tween 80 as anode reservoir fluid. The tests were conducted under constant voltage and time. The results showed that the distilled water is not effective for removing DMP from contaminated soil. The addition of the NaOH solution increases the outflow of fluid from cathode. By using NaOH solution the rate of remediation of contaminated soil increases. The percentage of removing DMP from the soil decreases when the distance from anode increases. However, NaOH solution and Tween 80 improve the contaminant DMP removal efficiency.

مهندسی عمران فردوسی
https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

پاکسازی یک خاک رسی آلوده به ماده دی متیل فتالات با استفاده از روش الکتروکینتیک

مقاله پژوهشی

حسام فتحعلی[۱] علی رئیسی استبرق[۲] کرامت الله رضایی تیره شبانکاره[۳] عبدالحسین هورفر[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79475.1188

چکیده در این کار تحقیقاتی پاکسازی یک خاک رسی آلوده به ماده به ماده آلاینده دی متیل فتالات از روش الکتروکنتیک مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا میزان حداکثر جذب این ماده به وسیله خاک مورد نظر تعیین گردید. پس از آن خاک آلوده با نسبت ۰/۰۴ mg /g تهیه و به دستگاه الکتروکنتیک انتقال یافت. برای افزایش راندمان پاکسازی از محلولهای NaOH و Tween80 در مخزن آند استفاده گردید. علاوه بر آن یک آزمایش با آب مقطر به عنوان آزمایش مرجع هم انجام شد. مقادیر pH و EC مخازن آند و کاتد و حجم آب خروجی از خاک در طول آزمایش اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که در انتهای آزمایش pH در مخزن آند برابر با ۴/۸، ۳/۲۷ و ۲/۶ برای محلولهای NaOH و Tween80 و آب مقطر می‌باشد و حجم مایع خروجی برای NaOH ۱۱۶۵ میلی‌لیتر بود که برای سایر محلولها ۲۰ درصد کمتر از آن بود. مقاومت خاک هم با افزایش فاصله از آند افزایش یافته و مقدار آن در اطراف کاتد ۱۴ کیلوپاسکال برای NaOH حاصل گردید که نسبت به محلولهای آب مقطر و Tween80 به میزان ۵۰ و ۵۷ درصد بیشتر بود. نتایج پاکسازی نشان داد که درصد پاکسازی در کاتد کمتر از آند است. پاکسازی برای Tween80 در اطراف آند و کاتد به ترتیب ۵۳/۸۸ و ۱۶/۶۵ درصد می‌باشد. لیکن برای محلول NaOH این مقادیر به ۵۰/۸۲ و ۲۳/۲۶ درصد می‌رسد. از طرفی برای آب مقطر انباشته شدن آلاینده به میزان ۲۸/۸۵ درصد در کاتد مشاهده می‌گردد. نتایج مشخص نمودند اثر پاکسازی NaOH بیشتر از سایر محلولها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی الکتروکینتیک، خاک رسی، دی متیل فتالات، پاکسازی.

Remediation of A Clay Soil Contaminated With Dimethyl Phthalate By Using Electrokinetic Method

Hesam Fathali Ali Raeesi Estabragh Keramatollah.Rezaei Tireh Shabankareh Abdolhossein Hoorfar

Abstract *In this research work, the remediation of a clay soil contaminated with dimethyl phthalate was studied by using electrokinetic method. Contaminated soil was made with the ratio of 0.04 mg/g. Non-ionic (Tween 80) surfactant and solution of 0.1 M NaOH were used as anolyte. A reference test was also considered with distilled water as anolyte and catholyte. pH and EC and volume of flow out fluid were measured during the tests in both electrode reservoirs. At the end of each test the shear strength, pH, EC and degree of remediation of soil was measured at different distance from anode. The removal of contaminated was measure by a GC (Gas Chromatography) apparatus. The results showed that the amount of flow out fluid for NaOH was nearly 20% more than the solution of Tween 80 and distilled water. The results also indicated that the strength of soil for different solution is increased by increasing the distance from anode. The value of it around the cathode for solution of NaOH was 14 kPa that was about 50 and 57% more than the distilled water and Tween 80. It was found that the degree of remediation at cathode is less than anode. The percentage of remediation for Tween 80 solution around the anode and cathode were 53.88 and 16.5% respectively but for NaOH they changed to 50.82 and 23.26 near anode and cathode reservoir. It was resulted that the effectiveness of NaOH solution in remediation of soil was more than the other used solutions.*

Keyword Electrokinetic, Clay soil, Dimethyl phthalate, Remediation

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۵و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۲/۹می‌باشد

(۱) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

Email: raeesi@ut.ac.ir

(۳) استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۴) استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

مقدمه

منشا آلودگیهای زیست‌محیطی، معمولاً آلی یا غیر آلی می‌باشند. آلودگیهای با منشا آلی معمولاً از فعالیتهای صنایع نفت و مجتمعهای پتروشیمی تولید می‌گردند. در طول زمان بهره‌برداری از این صنایع، ترکیبات آلاینده آلی متنوع شامل هیدروکربنهای آلیفاتیک و پلی آروماتیک (PAHs) که دارای ترکیبات سمی می‌باشند وارد محیط و از جمله خاک می‌گردند که موجب آلودگی و خطرات زیست‌محیطی برای انسان و سایر موجودات می‌شوند. بنابراین آنها منشأ خطر بسیار بزرگی جهت آلودگی آبهای زیرزمینی و اکوسیستم محسوب می‌شوند [1]. تاکنون روشهای مختلفی به منظور پاکسازی خاکهای آلوده به مواد آلی و غیرآلی پیشنهاد شده است مانند روش حرارتی، زیست‌محیطی، تثبیت و جامدسازی و الکتروکینتیک. در بین آنها روش الکتروکینتیک دارای راندمان بیشتری به خصوص در پاکسازی خاکهای رسی آلوده با نفوذپذیری کم می‌باشد [2]. در این روش با نصب الکترود در خاکهای آلوده و اعمال جریان مستقیم الکتریسیته موجب جابه‌جایی و انتقال مواد آلاینده در فضای بین ذرات خاک و انتقال آنها به سمت الکترودها و خارج نمودن از محیط می‌شود. این روش تاکنون برای پاکسازی خاکهای آلوده با نفوذپذیری کم به مواد آلاینده آلی همچون هیدروکربنهای نفتی و غیر آلی مانند فلزات سنگین صورت پذیرفته است. حداقل الکترودهای مورد استفاده در این روش دو عدد می‌باشد که یک عدد آن در آند و دیگری در کاتد می‌باشد به طوری که آند دارای بار مثبت و جاذب آلاینده با بار منفی و کاتد دارای بار منفی و جذب کننده آلاینده با بار مثبت می‌باشد. مکانیزمهای اصلی پاکسازی خاکهای آلوده به روش الکتروکینتیک شامل الکترواسمز، الکترومیگریشن، الکتروفورز و الکترولیز می‌باشند [3]. الکترواسمز موجب انتقال آب یا مایع از آند به کاتد می‌شود. در فرایند الکترومیگریشن یونهای موجود در محیط به سمت الکترودهای با بار مخالف به حرکت درمی‌آیند. معمولاً این جابه‌جایی تابعی از غلظت، ظرفیت و قدرت تحرک‌پذیری آنها می‌باشد [4]. در مرحله الکتروفورز، کلوئیدهای باردار به سمت الکترود مشابه حالت الکترومیگریشن حرکت می‌کنند. لیکن این پدیده در خاکهای تراکم یافته اهمیتی ندارد. زیرا از نظر فیزیکی فضاهای تراکم یافته خاک مانع از جابه‌جایی آنها می‌گردد [5]. الکترولیز نیز از جمله فرایندی است که در هنگام اعمال جریان الکتریسیته به وقوع می‌پیوندد به طوری که در آند یون H^+ و گاز اکسیژن و در کاتد یون OH^- و گاز هیدروژن تولید می‌شود. این فرایند سبب تشکیل یک جبهه اسیدی در نزدیکی آند و یک جبهه بازی در نزدیکی کاتد می‌گردد. به طوری که فرایند مذکور به شرح ذیل می‌باشد [3]:

$$2H_2O \longrightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^- \quad (۱)$$

$$2H_2O + e^- \longrightarrow 2OH^- + H_2 \quad (۲)$$

که e^- در آن نماد الکترون می‌باشد. ذرات خاکهای رسی حاوی بار منفی می‌باشند. زمانی که آب به خاک اضافه می‌گردد، در اطراف آنها لایه‌ای از آب که حاوی مجموعه‌ای از آنیونها و کاتیونها است تشکیل می‌شوند که لایه مضاعف نامیده می‌شود. با اعمال جریان الکتریسیته در طول پاکسازی خاک، انتقال آب از آند به کاتد صورت می‌پذیرد. حرکت آب در لایه مضاعف تحت این فرایند تحت تأثیر پتانسیل زتا می‌باشد. پتانسیل زتا معمولاً بین بخش ثابت و متحرک این لایه پدید می‌آید [3]. مقدار پتانسیل زتا برای خاکهای رسی اشباع معمولاً منفی می‌باشد و اگر مقدار آن مثبت شود، جهت جریان مایع برعکس می‌شود و از کاتد به آند خواهد بود [6].

اولین کاربرد این روش را می‌توان در خصوص انتقال املاح و همچنین مواد قلیایی از خاک و پاکسازی آن از این مواد نام برد [7]. کاربرد این روش برای پاکسازی خاک آلوده به فلزات سنگین به اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی برمی‌گردد [8]. محققانی همچون سگال و همکاران [9] و لاگمن و همکاران [10] با انجام آزمایشهای مختلف به این نتیجه دست یافتند که این روش پتانسیل پاکسازی خاکهای آلوده به آلاینده‌های آلی از جمله هیدروکربنهای آروماتیک را هم داراست. پس از آن تحقیقات گسترده‌ای به وسیله محققانی همچون بروئل و همکاران [11]، پاماکو و وایت [12] و آکار و همکاران [2] در خصوص پاکسازی خاک آلوده به مواد آلاینده مختلفی انجام گردید. آنها نتیجه‌گیری کردند که فرایند پاکسازی به وسیله این روش مطلوب و قابل قبول می‌باشد. اخیراً به منظور افزایش درجه پاکسازی خاک از مواد آلی آلاینده غیرقطبی استفاده از محلولهای پاک کننده جهت افزایش میزان مایع خروجی از محیط آلوده پیشنهاد شده است [13]. محققان دیگری مانند آکار و الشاویکه [14] و لانسلوت و همکاران [15]، استفاده از سورفکتنتها را برای افزایش پاکسازی آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربنهای نفتی و هگزاکلروبوتادین پیشنهاد کرده‌اند. سایچک و ردی [16]، آلکانترا و همکاران [17] و هان و

همکاران [18] پاکسازی یک خاک رسی آلوده به فنانترن را با استفاده از روش الکتروکنتیک و با مواد حلال کمکی انجام دادند و نتایج قابل قبولی گزارش کردند. محققان دیگری همچون ما و همکاران [19]، استبرق و همکاران [20]، وی و همکاران [21] و استبرق و همکاران [22] با انجام آزمایشهای مختلف نتیجه-گیری کردند که برای افزایش کارایی روش الکتروکینتیک استفاده از سورفکتنتها ضروری می‌باشد. محققانی مانند لی و جیانگ [23]، فردین و همکاران [24]، بیابانکی و همکاران [25] و جیدودو و همکاران [26] با استفاده از روش الکتروکنتیک اقدام به پاکسازی خاک آلوده به نفت و گازوئیل نمودند و دریافتند که این روش در پاکسازی مواد آلاینده آلی بسیار مؤثر است.

هدف تحقیق

دی متیل فتالات از مواد شیمیایی آلی می‌باشد که در صنایع مختلفی مانند تولید رنگ، پلاستیک، سموم کشاورزی و... کاربرد فراوان دارد. بر اساس گستردگی کاربرد آن، آلودگی زیست‌محیطی را تولید می‌نماید که برای سلامت انسان بسیار مضر است. سازمانهای ملی و بین‌المللی این ماده را از گروه مواد آلاینده پرخطر برای محیط زیست و سلامت انسان اعلام نموده‌اند [27]. یانگ و همکاران [28] گزارش نمودند که این آلاینده در اکثر رسوبات موجود در سرتاسر جهان یافت می‌شود. مصطفی‌لو و همکاران [29] نیز گزارشهایی مبنی بر وجود دی متیل فتالات در رسوبات تالاب انزلی ارائه کردند. بنابراین برای حفاظت از محیط زیست و منابع آب و در نهایت چرخه زندگی انسان پاکسازی خاکهای آلوده به این ماده امری ضروری به نظر می‌رسد. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقاتی در خصوص پاکسازی خاکهای رسی آلوده به آن از روش الکتروکینتیک انجام نگرفته است. در این کار تحقیقاتی در ابتدا میزان جذب این ماده به وسیله یک خاک رسی تعیین گردید. سپس با توجه به نتایج جذب، پاکسازی آن به روش الکتروکنتیک در حالت معمولی (مخازن آند و کاتد پرشده از آب مقطر)، شرایط افزودن محلول ۰/۱ مولار سدیم هیدروکسید (NaOH) و محلول ۳ درصد سورفکتنت توین ۸۰ (Tween80) در مخزن آند مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده در حالات مختلف در خصوص میزان پاکسازی و تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مقایسه قرار گرفت و در مورد آنها بحث کافی صورت پذیرفت.

مواد و روشها

مواد مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از خاک، دی متیل فتالات، آب، سدیم هیدرکسید و توین ۸۰ که در مورد خصوصیات و خواص هر کدام از آنها به طور مختصر به شرح زیر توضیح داده می‌شود.

خاک مورد استفاده. در این پژوهش از یک خاک رسی که تحت عنوان کائولینیت تلقی می‌گردید، استفاده شد. این خاک مشابه خاکهایی است که قبلاً در تحقیقات به روش الکتروکنتیک مورد استفاده محققان دیگر قرار گرفته است [6]. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مطابق استاندارد ASTM تعیین شدند. نتایج حدود آتربرگ نشان داد که حدود روانی و خمیری این خاک معادل ۴۸ و ۲۵ درصد می‌باشند. بر اساس نتیجه دانه‌بندی مشخص شد که این خاک متشکل از ۲ درصد ماسه، ۴۵ درصد سیلت و ۵۳ درصد رس است. مقدار Gs آن نیز معادل ۲/۷۴ تعیین گردید. مطابق سامانه طبقه‌بندی یونیفاید این خاک از نوع رسی با پلاستیسیته کم (CL) طبقه‌بندی شد. آزمایش تراکم استاندارد هم نشان داد که رطوبت بهینه (W_{opt}) و وزن واحد حجم ماکزیمم (γd_{max}) آن برابر با ۱۷/۹ درصد و KN/m^3 ۱۷/۷۱ است. جدول (۱) نیز خواص شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ پارامترهای شیمیایی خاک مورد بررسی

PH	۸
EC (ms/cm)	۰/۰۱۰۷
Ca^{2+} (meq/L)	۲۴
K^{+} (meq/L)	۰/۳۳
Cl^{-} (meq/L)	۶۰
SO_4^{2-} (meq/L)	۸۳
CO_3^{2-} (meq/L)	۰/۶
$CaCO_3$ (%)	۱۰/۲
Mg^{2+} (meq/L)	۱۰
OC* (%)	۰/۱۱

*Organic Content

آلاینده مورد بررسی. آلاینده دی متیل فتالات با فرمول شیمیایی $C_{10}H_{10}O_4$ که از گروه استرهای فتالاتی بوده مورد

بررسی در این پژوهش می‌باشد. استرهای فتالات (PAEs) نام رایج دی الکیل یا دی آلکیل اریل استر فتالیک اسید است که در تهیه موادی مانند چسبها، رنگها، لوازم بازی کودکان، واکسها، صنایع کاغذ و مقواسازی، ترکیبات دارویی، حشره‌کشها و دفع آفات به کار می‌روند. همچنین از این ماده به عنوان نرم‌کننده در لوازم پلاستیکی استفاده می‌شود. این ماده از شرکت مرک آلمان تهیه گردید و بر اساس اطلاعات اخذ شده از تولید کننده این ماده آلی به صورت مایعی بی رنگ به جرم مولکولی ۱۹٤/۱۸ گرم بر مول و دانسیته ۱/۱۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. نقطه ذوب و جوش و میزان حلالیت آن در آب به ترتیب برابر با ۲ و ۲۸٤ سانتی‌گراد و ٤۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است.

آب مورد استفاده. آب مورد استفاده در این پژوهش جهت پاکسازی خاک آلوده، آب مقطر انتخاب گردید و pH آن ۷ و میزان EC آن برابر با ۰/۰۰٦۷ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. علت استفاده از آب مقطر به این علت بود که اثر وجود یونهای طبیعی در کارایی آزمایش الکتروکنتیک به حداقل برسد و نتایج حاصل شده مستقل از اثر یونهای موجود در آن باشد.

سدیم هیدروکسید (NaOH). سدیم هیدروکسید ماده جامد سفید رنگ با فرمول شیمیایی NaOH، یک باز قوی می‌باشد و از شرکت نوترون شیمی تهیه گشته است. این ماده به راحتی در آب قابل حل می‌باشد و پس از ترکیب با آب گرمای قابل توجهی تولید می کند. همان طور که قبلاً بیان گردید، در مخزن آند به علت تولید یون H^+، محیط اسیدی می‌شود. اسیدی شدن محیط سبب کاهش پتانسیل زتا (از لحاظ جبری) و در نتیجه کاهش سرعت جریان الکترواسمزی می‌شود. به همین علت پژوهشگران بسیاری حین فرایند الکتروکنتیک از یک ماده کنترل‌کننده pH استفاده می‌کنند. در این پژوهش نیز از محلول سدیم هیدروکسید ۰/۱ مولار مشابه پژوهش جئون و همکاران استفاده گردید [30].

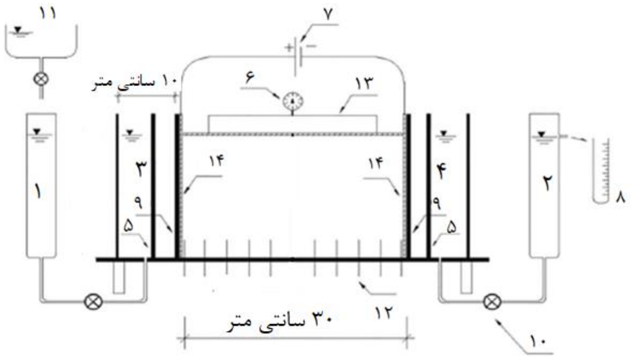
Tween80. توبین ۸۰ (Tween80) یک سورفکتنت شیمیایی غیر یونی با فرمول $C_{64}H_{124}O_{26}$ می‌باشد که از شرکت مرک آلمان تهیه گردید. سورفکتنتهای غیر یونی و آنیونی به علت کارایی بالاتر و جذب کمتر توسط خاک توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از محلول ۳ درصد Tween80 به علت تجزیه‌پذیری در محیط زیست و درجه سمیت کم ماده در مخزن آند استفاده گردید [31]. تعدادی از محققان از جمله فردین و همکاران به منظور افزایش کارایی روش الکتروکینتیک از آن استفاده کردند [24].

دستگاه مورد استفاده. دستگاه الکتروکنتیک موجود در آزمایشگاه برای انجام این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و مقطعی از آن در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد این دستگاه متشکل از یک محفظه اصلی مکعب مستطیلی شکل به ابعاد ۱۰*۳۰*۳۰ سانتی‌متر ساخته شده از پلکسی به ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد که به محفظه اصلی موسوم است. در دو طرف آن دو مخزن که تحت عنوان مخازن آند و کاتد نامیده می‌شود تعبیه شده است. درون این مخازن صفحات فولادی مشبکی که آند و کاتد می‌باشد، قرار دارند. جنس این صفحات از فولاد ضد زنگ می‌باشد. همچنین با استفاده از متعلقات جانبی دیگر سطح مایع در داخل این دو مخزن قابل کنترل است. در قسمت بالای محفظه اصلی دستگاه یک صفحه فلزی قرار دارد. از طریق این صفحه بار لازم به خاک موجود در محفظه اصلی دستگاه اعمال می‌گردد. بالای این صفحه یک گیج قرار دارد. تغییر شکل خاک در زمانهای مختلف به وسیله قرائت گیج امکان‌پذیر است. در کف محفظه اصلی این دستگاه تعدادی پروب از جنس مس که یک رسانای قوی است نصب شده است. این پروبهای مسی اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی در طول نمونه خاک در حین انجام آزمایش را امکان‌پذیر می‌کنند.

روش انجام آزمایش

آزمایشهای مورد نظر در این کار به دو گروه الف) آزمایش جذب و ب) آزمایشهای اصلی تقسیم می‌شوند که در ادامه توضیح داده می‌شوند:

الف) آزمایش جذب. بر اساس پیشنهاد هانتر و همکاران در سال ۲۰۰۰، محلول کلسیم کلرید ۰/۰۰۵ مولار برای تعیین مقدار جذب مورد استفاده قرار گرفت [32]. محلولهایی با حجم حلال ۱۲۰ میلی‌لیتر و با غلظتهای مختلف از آلاینده ساخته شد و با ۵ گرم خاک خشک (با نسبت محلول۲٤/خاک۱) به مدت ٤۸ ساعت با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه توسط همزن برقی مخلوط گردید.



شکل ۱ دستگاه مورد استفاده در آزمایش الکتروکینتیک

که در آن به ترتیب :

۱) مخزن تغذیه	۲) مخزن تخلیه	۳) مخزن آند
٤) مخزن کاتد	۵) الکترودها	٦) گیج اندازه‌گیری نشست
۷) منبع تغذیه	۸) مخزن مدرج اندازه‌گیری جریان خروجی	۹) صفحه متخلخل
۱۰) شیر	۱۱) مخزن ورودی	۱۲) پروبهای اندازه‌گیری ولتاژ
۱۳) صفحه بارگذاری شده	۱٤) ژئوتکستایل	

پس از آن مخلوط در محل ثابت قرار داده شد و پس از ته‌نشین شدن ذرات جامد از قسمت فوقانی آن اقدام به اخذ نمونه به حجم ۱۰ میلی‌لیتر گردید. نمونه برداشت شده با ۱۰ میلی‌لیتر هگزان نرمال مخلوط و به مدت ۳ دقیقه در دستگاه لرزه قرار داده شد. سپس نمونه‌ها به دستگاه کروماتوگرام گازی (GC) تزریق گشت و با استفاده از رابطه (۳) میزان جذب آلاینده به وسیله خاک تعیین گردید [3].

$$q = \frac{(C_i - C_e)V}{M} \quad (۳)$$

که در آن q میزان جذب آلاینده به وسیله خاک (mg/g)، C_i میزان غلظت اولیه آلاینده در محلول (mg/l)، C_e میزان غلظت باقی مانده آلاینده در محلول (mg/l)، V و M به ترتیب حجم حلال مورد استفاده (l) و جرم خاک (g) می‌باشد. بنابراین آزمایشهای متعددی با غلظتهای مختلف محلول صورت پذیرفت و اقدام به محاسبه میزان جذب با استفاده از رابطه (۳) گردید. در نتیجه حداکثر جذب دی متیل فتالات توسط خاک رسی موجود برابر با ۰/۰۸۷ mg/g تعیین شد و بر همین اساس میزان ۰/۰٤ mg/g به عنوان غلظت آلاینده در آزمایش الکتروکنتیک مورد استفاده قرار گرفت.

ب) آزمایش‌های اصلی . برای انجام آزمایشهای اصلی نیز مراحل زیر صورت پذیرفت:

تهیه نمونه خاک. به منظور تهیه نمونه خاک آلوده، ابتدا ۳٦۰ میلی‌گرم دی متیل فتالات با ۱۸۰۰ میلی‌لیتر آب مخلوط گردید و با درپوش به مدت یک روز در محل بی حرکت قرار داده شد تا مکانیزم حل به صورت کامل صورت پذیرد. سپس این مجموعه با ۹ کیلوگرم خاک خشک رسی به طور اسپری مخلوط گردید. این مخلوط به مدت ۳٦ ساعت در یک ظرف دارای درب نگهداری شد تا واکنشهای شیمیایی لازم بین آلاینده و خاک رخ دهد و نیز توزیع یکنواخت آلاینده صورت بپذیرد. سپس این مخلوط با استفاده از ۳۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به رطوبت بیشتر از رطوبت حد روانی رسید و به طور کامل مخلوط شد. سپس به مدت پنج روز مخلوط آب و خاک و آلاینده در ظرف فلزی پوشیده شده با درپوش نگهداری شد تا توزیع یکنواخت رطوبت صورت پذیرد. سپس مخلوط مذکور به بخش اصلی دستگاه الکتروکنتیک انتقال پیدا کرد. تعداد آزمایشهای مورد نظر در جدول (٤) آورده شده است. در آزمایش نخست، مخازن آند و کاتد دو طرف خاک با آب مقطر پر گردیدند. همچنین سطح آب در دو طرف خاک تنظیم شد تا از پدید آمدن جریان ناشی از بار هیدرولیکی جلوگیری به عمل آید. سپس بر روی نمونه داخل محفظه سرباری به میزان ۱ کیلوپاسکال قرار داده شد تا به خاک اعمال گردد و متعاقب آن

نشست خاک شروع گردید [22]. این روند تا هفت روز به طول انجامید و مقدار نشست خاک روزانه توسط گیج اندازه‌گیری و ثبت گردید. این آزمایش در دو تکرار دیگر با تغییر مایع درون مخرن آند هم انجام شد. در آزمایش شماره (۲) در مخزن آند محلول ۰/۱ مولار سدیم هیدروکسید و در آزمایش شماره (۳) مخزن آند توسط محلول ۳ درصد تویین ۸۰ مطابق جدول (۲) پر گردید. در تمامی آزمایشها مخزن کاتد از آب مقطر پر گردید. سپس در ادامه جریان الکتریسیته مستقیم به شدت ۵۰ ولت مطابق پیشنهاد میچل و سوگا توسط منبع تغذیه به مخازن آنولیت و کاتولیت اعمال گردید [33].

جدول ۲ لیست آزمایشهای انجام شده

شماره آزمایش	آنولیت	کاتولیت
۱	آب مقطر	آب مقطر
۲	محلول ۰/۱ مولارNaOH	آب مقطر
۳	محلول ۳٪ توپین ۸۰	آب مقطر

در مراحل اولیه پس از اعمال جریان الکتریسیته در زمانهـای ۰، ۰/۵ ساعت، ۱ ساعت و ۲ ساعت میـزان شـدت جریـان در نزدیک آند و اختلاف پتانسیل در پروبهای مسی موجود در کف محفظـه اصلی دستگاه، میـزان نشسـت و میـزان حجـم مـایع خروجـی انـدازه‌گیـری شـد و مقـادیر pH و EC (هـدایت الکتریکی) مخازن آنولیت و کاتولیت ثبت شد. این عمل تا پایان هر آزمایش که هفت روز بود، ادامه یافت.

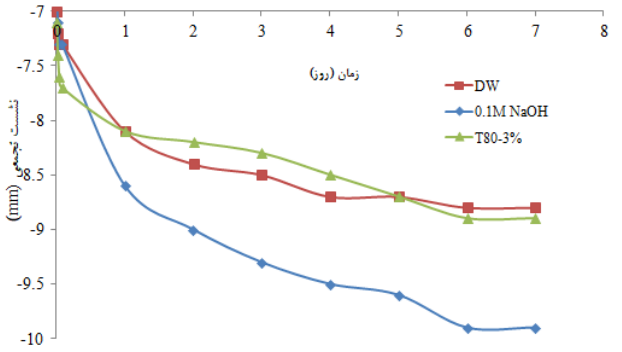
آزمایش آبشویی. پس از انجام آزمایش، اتصالات مربوط از دستگاه اصلی جدا گردید. بخش بالای سطح خاک حذف شد. به طوری که از لایه وسط از فواصل ٤، ١٢، ١٩ و ٢٦ سانتی‌متری از آند اقدام به برداشت نمونه گردید. نمونه‌ها در هوای آزاد خشک شدند و سپس نرم و از الک نمره ۱۰ عبور داده شدند. مراحل تهیه نمونه لازم جهت تزریق به دستگاه GC مطابق استاندارد EPA8061-A (1996) انجام گردید به طوری که از خاک الک شده ۱۰ گرم انتخاب و با ۱۵ میلی‌لیتر هگزان و ۱۵ میلی‌لیتر استون (نسبت 1:1) اختلاط یافت [34]. مخلوط مذکور به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه لرزه قرار گرفت و سپس در دستگاه اولتراسونیک تحت ماکزیمم قدرت خود قرار داده شد.

پس از آن به طور مجدد به دستگاه لرزش انتقال یافت که طول مدت آن نیز ۱۰ دقیقه بود. پس از آن ۱۰ میلی‌لیتر از بالای هر نمونه توسط پیپت برداشت گردید و به این مجموعه ۲ گرم نمک سولفات سدیم افزوده شد. علت افزودن نمک سولفات سدیم آن بود که تمامی آب و رطوبت باقی مانده در محلول حذف شود؛ زیرا ورود آب به دستگاه GC سبب آسیب رساندن به آن می‌گردید. سپس ترکیب فوق را به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۳۵۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ و سپس به ویالهایی مخصوص جهت تزریق به دستگاه GC منتقل گردید. به منظور تعیین غلظت نیز چند نمونه دی متیل فتالات با غلظت‌های مشخص به دستگاه تزریق گردید تا بر اساس آن بتوان رابطه بین غلظت و سطح زیر پیک در نمونه‌های خاک پاکسازی شده تعیین گردد.

آزمایشهای فیزیکی و مکانیکی. بعد از انجام آزمایش و برداشت و حذف لایه بالایی روی خاک در داخل محفظه، در لایه وسط از نقاط مختلف با فواصل مشخص از آند اقدام به تعیین مقاومت برشی خاک با استفاده از دستگاه برش پره شد و سپس از همان فواصل از آند اقدام به اخذ نمونه جهت تعیین pH و EC خاک گردید. آزمایشهای مذکور بر اساس استانداردهای ASTM صورت پذیرفت. در ادامه به ترتیب نتایج حاصل شده از میزان نشست، pH و EC مخازن آند و کاتد، حجم آب خروجی روزانه، ضریب الکترواسمزی، شدت جریان در آند و مقاومت برشی در پایان هر آزمایش ارائه شده است. همچنین pH و EC خاک و درصد آلاینده باقی مانده در فواصل مشخص آند آورده شده است و در رابطه با آنها بحث کافی صورت می‌پذیرد.

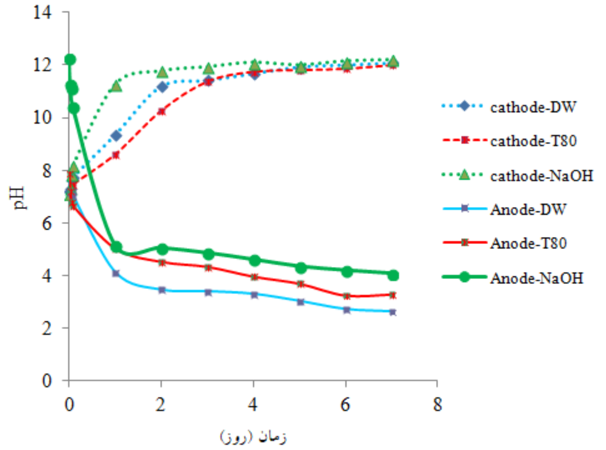
نشست. شکل شماره (۲) تغییرات نشست را با زمان برای ۳ آزمایش نشان می‌دهد. پس از نشست ناشی از سربار (بدون اعمال جریان الکتریسیته)، این شکل نشست تحت اثر اعمال جریان الکتریسیته را نشان می‌دهد. از این شکل نتیجه‌گیری می‌شود که سرعت افزایش نشست در زمان اولیه انجام آزمایشها برای هر سه محلول زیاد است. پس از آن از شدت این تغییرات مخصوصاً برای Tween80 و آب مقطر کاسته می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد به طور کلی نشست ناشی از محلول NaOH به

اندازه ۱۱/۲۳ و ۱۲/۵ درصد بیشتر از Tween80 و آب مقطر است. علت این امر را می‌توان اینگونه بیان نمود که وجود Na^{+} در محلول NaOH پس از ورود به خاک، سبب فولوکوله شدن ساختار خاک شده و در نتیجه باعث می‌شود میزان نشست خاک نسبت به دو آزمایش دیگر بیشتر باشد.



شکل ۲ نشست ناشی از جریان الکتریسیته در آزمایشهای مختلف (DW = آب مقطر و T80 = توین ۸۰)

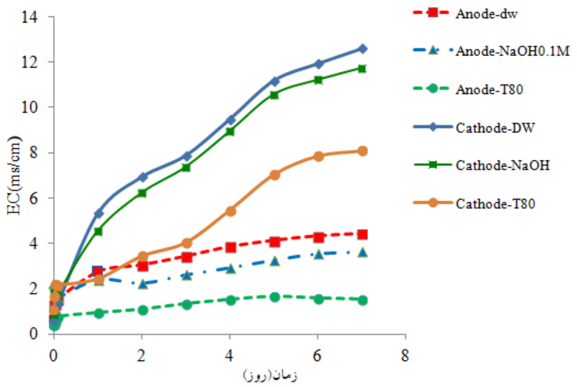
تغییرات pH مقادیر pH اندازه‌گیری شده در طول اجرای هر آزمایش در مخازن آند و کاتد برای محلولهای مختلف مورد استفاده در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد مقادیر pH در آند دارای روند کاهشی نسبت به مقدار اولیه خود هستند و موجب اسیدی شدن محیط و تولید جبهه اسیدی در اطراف آند می‌شوند. مقادیر آن در انتهای آزمایش در مخزن آند برابر با ٤/۰۸، ۳/۲۷ و ۲/٦۸ برای محلولهای NaOH، Tween80 و آب مقطر می‌باشد، به طوری که میزان کاهش در مقدار pH نسبت به NaOH، برای Tween80 و آب مقطر معادل ۱۹/۸۵و ۳۵/۸ درصد می‌باشد. این داده‌ها نشان دهنده آن است که آب مقطر در ایجاد جبهه اسیدی اثر بیشتری نسبت به محلولهای دیگر دارد. این شکل تغییرات مقدار pH در کاتد جهت زمانهای مختلف برای محلولهای مختلف را نیز نشان می‌دهد. همان طوری که ملاحظه می‌گردد مقادیر pH برای محلولهای مورد استفاده روند افزایش را نسبت به مقادیر اولیه خود دارند. سرعت این تغییرات افزایش در روزهای اولیه آزمایش (معمولاً ۲ روز اولیه) برای محلولهای مختلف مخصوصاً NaOH زیاد است. پس از آن این تغییرات با سرعت کمتری برخوردار است. در انتهای آزمایشها مقادیر pH معادل ۱۲/۰۹، ۱۲ و ۱۲/۲ برای آب مقطر، Tween80 و NaOH اندازه‌گیری شده است. این نتایج بیانگر آن است که محلول NaOH در ایجاد جبهه قلیایی از سرعت بیشتری نسبت به محلولهای دیگر برخوردار است. این نتایج با پژوهشهای محققان بسیاری از جمله استبرق و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد [31].



شکل ۳ تغییرات pH در مخازن آند و کاتددر آزمایشهای مختلف

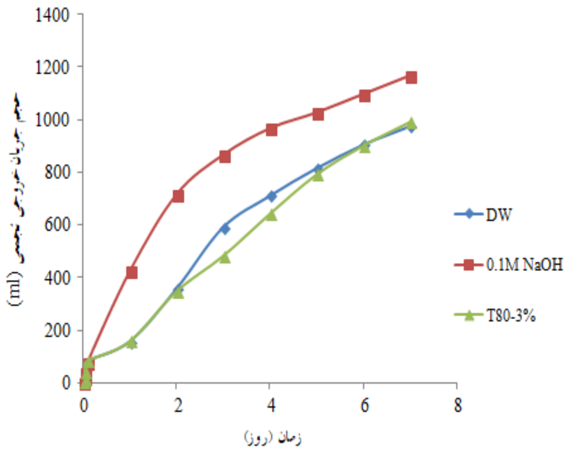
تغییرات EC شکل (٤) تغییرات EC اندازه‌گیری شده در مخازن آند و کاتد برای محلولهای مورد استفاده را در زمانهای مختلف نشان می‌دهد. همان طوری که در این شکل ملاحظه می‌گردد مقدار EC با گذشت زمان در مخزن آند برای محلولهای مختلف نسبت به مقدار اولیه آن افزایش می‌یابد. لیکن این افزایش برای محلولهای مختلف یکسان نمی‌باشد. در انتهای آزمایش مقدار آن برای آب مقطر ٤/٤۲ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و برای NaOH و Tween80 مقدار آن معادل ۱۸/۱ و ٦٥ درصد نسبت به آب مقطر کاهش می‌یابد. این اطلاعات نشان می‌دهد که مقدار EC برای Tween80 کمتر از سایر محلولهای مورد استفاده می‌باشد. بنابراین تغییرات مقدار EC به نوع محلول مورد استفاده بستگی دارد. شکل شماره (٤) تغییرات مقدار EC را در کاتد نیز نشان می‌دهد، به طوری که روند تغییرات آن مشابه تغییرات در آند است. لیکن سرعت تغییرات نسبت به آند بسیار زیاد است. به طوری که دسته منحنیهای مربوط به تغییرات آن در کاتد در قسمت بالای دسته منحنیهای مربوط به آند قرار دارند. همان طوری که ملاحظه می‌گردد مقادیر EC در کاتد برای آب مقطر در انتهای آزمایش ۱۲/٦۱ و برای NaOH و Tween80 معادل ۱۱/۷٥ و ۸/۱ میلی-زیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. به عبارتی کاهش آنها ٦/۸۲ و ۳٥/۷٦ درصد نسبت به آب مقطر است. به هر حال نتایج نشان

می‌دهد که مقادیر EC برای یک محلول مشخص در کاتد بیشتر از آند است. همان طوری که بیان گردید، اثر Tween80 در کاهش EC در مخزن کاتد نسبت به محلولهای دیگر بسیار زیاد است. می‌توان گفت که Tween80 یک ماده غیر یونی است و موجب واکنش خاصی نمی‌شود اما امکان دارد تعدادی از یونهای آزاد شده را در شبکه خود نگهداری کند که در کاهش EC مؤثر است. کاهش EC با استفاده از محلول NaOH هم مشاهده می‌گردد که علت آن ناشی از آن می‌باشد که یونهای OH^- تولید شده با سایر یونهای آزاد در محیط ممکن است تولید نمک کند که در کاهش تعداد یونها و نیز EC مؤثر است. در کاتد مقدار EC مربوط به آب مقطر بیشتر از سایر آزمایشها است زیرا بسیاری از یونهای آزاد در فضای بین ذرات و همین طور یونهای ناشی از نمکهای موجود در خاک به سمت کاتد مهاجرت نموده و باعث افزایش EC نسبت به آزمایشهای دیگر می‌شود.



شکل ٤ تغییرات EC در مخازن آند و کاتد در آزمایشهای مختلف

تغییرات حجم مایع خروجی. تغییرات حجم مایع خروجی از توده خاک آلوده برای محلولهای مختلف مورد استفاده در شکل شماره (٥) نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌گردد حجم مایع خروجی برای هر سه محلول مورد استفاده در روزهای اولیه آزمایش زیاد می‌باشد. لیکن با گذشت زمان در مقدار آن کاهش روی می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که حجم مایع خروجی برای محلول NaOH معادل ١١٦٥ میلی‌لیتر و برای محلول Tween80 و آب مقطر برابر با ٩٩٠ و ٩٧٥ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شده است که کاهشی حدود ٢٠درصد نسبت به NaOH را نشان می‌دهد. علت افزایش حجم مایع خروجی با استفاده از محلول NaOH ناشی از آن است که یون Na^+ تولید شده ممکن است ساختار خاک را تغییر دهد و به حالت فولوکوله با فضاهای نسبتاً بزرگی تبدیل نماید که در نتیجه خروج مایع از فضای بین ذرات به آسانی صورت می‌پذیرد و در مورد سایر آزمایشها شاید تغییرات قابل توجهی بر روی ساختار خاک روی ندهد و حجم مایع خروجی نسبت به محلول NaOH کمتر است.



شکل ٥ حجم جریان خروجی در آزمایشهای مختلف

تغییرات ضریب الکترواسمز (K_0). با توجه به اطلاعات ثبت شده، میزان ضریب الکترواسمزی توده خاک در زمانهای مختلف با استفاده از رابطه (٤) محاسبه گردید [33]:

$$K_0 = \frac{A \Delta V_e}{QL} \qquad (٤)$$

که در آن

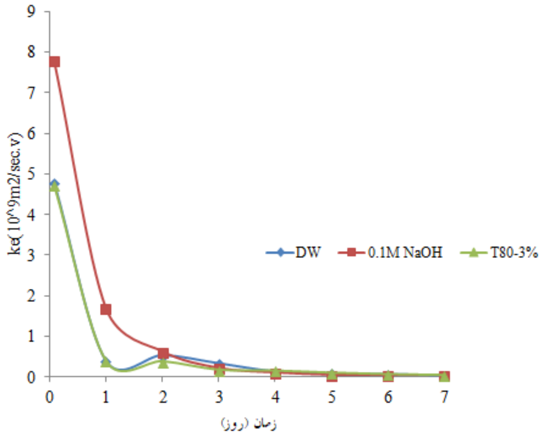
K_0 ضریب الکترواسمزی خاک بر حسب $m^2/sec.v$، A سطح مقطع عبوری جریان بر حسب مترمربع (m^2)، L طول نمونه خاک برحسب متر (m) و Q دبی عبوری جریان برحسب m^3/sec می‌باشد. ΔV_e اختلاف پتانسیل الکتریکی مؤثر بوده که مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌شود [35]:

$$\Delta V_e = \Delta V - (\Delta V_C + \Delta V_A) \qquad (٥)$$

که در آن

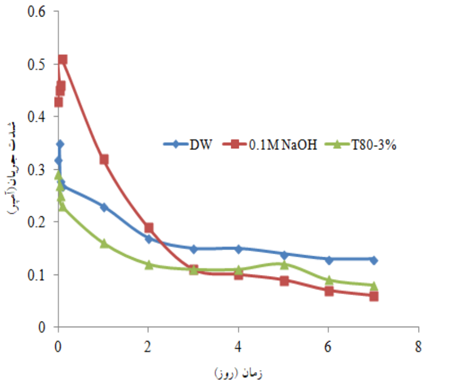
ΔV اختلاف پتانسیل اعمال شده بر حسب ولت، ΔV_C پتانسیل ایجاد شده در مجاورت کاتد و ΔV_A پتانسیل ایجاد شده در مجاورت آند می‌باشد. مقادیر آنها توسط پروبهای موجود در کف دستگاه اندازه‌گیری شدند. همان طور که بیان شد K_0

ضریب الکترواسمز می‌باشد که میزان مایع خروجی از نمونه را نشان می‌دهد و مانند ضریب هدایت هیدرولیکی برای ارزیابی مقدار عبوری جریان آب در داخل توده خاک استفاده می‌شود. همان طوری که در شکل شماره (٦) مشاهده می‌گردد، مقادیر اولیه K_0 برای محلولهای NaOH و Tween80 و آب مقطر معادل $m^2/sec.v$ $10^{-9}\times$ ۷/۸، ٤/۷۳ و ٤/۷۹ می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که مقدار K_0 اولیه برای NaOH بسیار بیشتر از دو محلول دیگر است. با گذشت زمان یک افت شدید در مقادیر آنها مشاهده می‌شود. به طوری که پس از گذشت زمان یک روز از زمان آزمایش مقادیر آنها برای NaOH، Tween80 و آب مقطر معادل $m^2/sec.v$ $10^{-9}\times$ ۱/٦۸، ۰/٤۱ و ۰/۳۹ می‌گردد. نتیجه‌گیری می‌گردد که مقدار K_0 مربوط به NaOH مقدار بیشتری نسبت به دو محلول دیگر دارد. لیکن با گذشت زمان از تغییرات آنها کاسته می‌شود و به ترتیب به مقدار $m^2/sec.v$ $^{-9}$ ۱۰× ۰/۰٤۲، ۰/۰۵۰ و ۰/۰٤۱ برای محلولهای مذکور می‌رسد. در زمان و ولتاژ ثابت حجم مایع خروجی از نمونه بستگی به K_0 دارد. همان طور که از شکل شماره (٦) مشخص است، K_0 برای دو آزمایش آب مقطر و Tween80 تقریباً یکسان است.



شکل ٦ ضریب الکترواسمزی در آزمایشهای مختلف

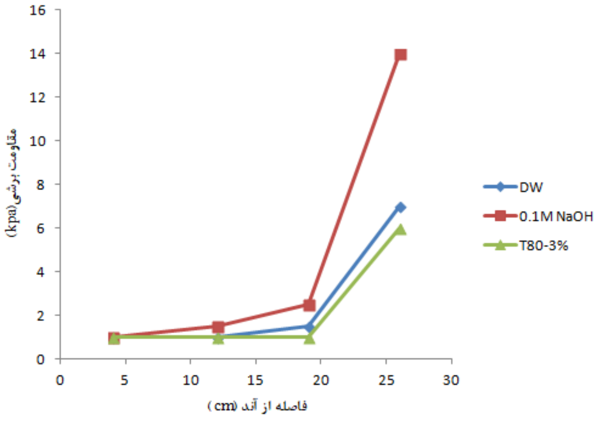
تغییرات شدت جریان. هنگام اجرای آزمایشهای اصلی شدت جریان الکتریکی اعمال شده در دستگاه نیز اندازه‌گیری گردید و نتایج آن در شکل شماره (۷) نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود شدت جریان اولیه دارای مقدار حداکثری معادل ۰/۵۱، ۰/۳۵ و ۰/۲۹ آمپر برای محلولهای NaOH، آب مقطر و Tween80 می‌باشد. با گذشت زمان اولیه افت شدیدی در مقادیر اولیه آنها دیده می‌شود. پس از آن با افزایش زمان مقدار افت در مقادیر آنها روند کاهشی دارد. به طوری که برای آب مقطر و Tween80 بعد از سپری شدن سه روز از زمان آزمایش مقادیر آنها به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد. لیکن برای محلول NaOH در طول این مدت افت کمی در شدت جریان مشاهده می‌شود. علت آن است که NaOH به Na^+ و OH^- تجزیه می‌شوند. همان طور که بیان شد OH^- تعدادی از یونهای H^+ را خنثی می‌کند و Na^+ تحت فرایند الکترومیگریشن به سمت کاتد حرکت می‌کند و موجب افزایش جریان نسبت به دو آزمایش دیگر می‌شود. همان طور که مشهود است، Tween80 دارای شدت جریان کمتری نسبت به آزمایش با آب مقطر به علت غیریونی بودن می‌باشد. در انتها کاهش شدت جریان برای Tween80 و NaOH بیشتر از آب مقطر است. زیرا یونهای مهاجرت کرده به کاتد ممکن است تولید نمک و یا ترکیبات شیمیایی خاصی نمایند که سبب ایجاد مقاومت در برابر عبور جریان می‌شود.



شکل ۷ شدت جریان در آند در آزمایشهای مختلف

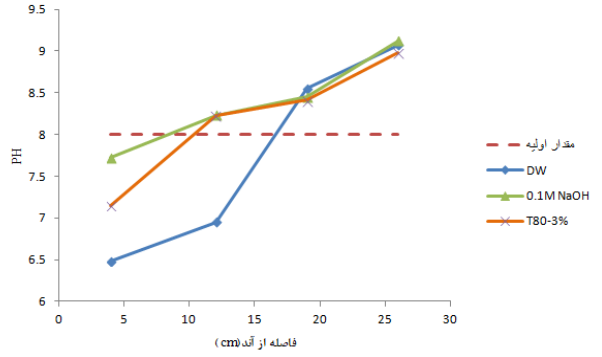
مقاومت برشی زهکشی نشده. پس از انجام هر آزمایش مقاومت برشی خاک در فواصل ٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متر در طول نمونه از آند مطابق استاندارد ASTM اندازه‌گیری گردید. شکل (۸) نتایج آن را برای محلولهای مختلف نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از آند مقاومت خاک برای محلولهای مختلف افزایش می‌یابد. مقاومت برای آنها در فاصله ۲٦ سانتی‌متری از آند یا در مجاورت کاتد به حداکثر خود می‌رسد. برای محلول NaOH مقاومت در فواصل ٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متری معادل ۱، ۱/۵، ۲/۵ و ۱٤ کیلوپاسکال است. مشابه این روند تغییرات برای سایر محلولها

مشاهده می‌شود. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده مقاومت برای محلول NaOH در مجاورت کاتد ١٤ کیلوپاسکال است که نسبت به محلولهای آب مقطر و Tween80 دارای افزایش معادل ٥٠ و ٥٧ درصد می‌باشد. محققانی همچون ریتیرونگ و همکاران [35] و استبرق و همکاران [36] نتایجی مشابه نتایج به دست آمده برای مقاومت برشی ارائه دادند. آنها علت افزایش مقاومت در مجاورت کاتد را ناشی از مهاجرت یک سری از یونهای تولید شده از آند به سمت کاتد ذکر کرده‌اند که در حوالی کاتد به علت جبهه قلیایی با سایر یونها و املاح واکنش شیمیایی انجام می‌دهند و تولید مواد سیمانته کننده می‌نمایند که در چسباندن ذرات به یکدیگر و افزایش مقاومت تأثیرگذار هستند.



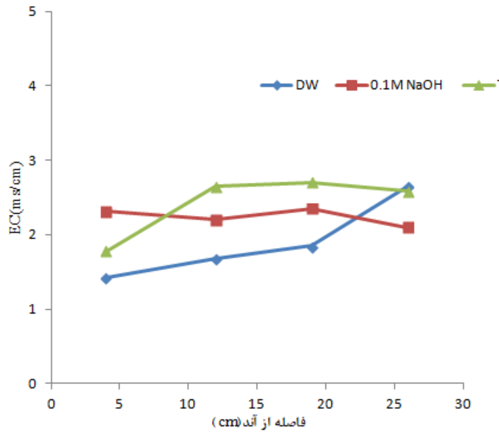
شکل ۸ مقاومت برشی در پایان آزمایشهای مختلف

pH خاک. پس از اندازه‌گیری مقاومت برشی از نقاط مذکور خاک پاکسازی شده اقدام به اخذ نمونه گردید و نمونه‌ها در محیط طبیعی به مدت ١٠ روز جهت خشک شدن در هوای آزاد نگهداری و پس از آن نرم شدند. ١٠ گرم خاک رد شده از الک نمره ١٠ با ١٠ میلی‌لیتر آب مخلوط گردید و به مدت ٣ ساعت نگهداری شدند تا به تعادل برسند. سپس مقادیر pH برای نمونه‌ها در فواصل ٤، ١٢، ١٩ و ٢٦ سانتی‌متری از آند در طول نمونه خاک تعیین گردید. شکل شماره (٩) تغییرات pH را در طول نمونه خاک برای محلولهای مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد در ابتدای نمونه خاک (مجاورت آند) جبهه اسیدی حاکم است. لیکن شدت و درجه آن بستگی به نوع محلول مورد استفاده دارد. در فاصله ٤ سانتی‌متری از آند، مقادیر آن برای آب مقطر، محلول NaOH و Tween80 معادل ٦/٤٨، ٧/١٥ و ٧/٧٢ است. با افزایش فاصله از آند از شدت جبهه اسیدی کاسته شده و به تدریج جبهه قلیایی پدیدار می‌گردد. همان طور که ملاحظه می‌شود (شکل شماره ٩) ایجاد جبهه قلیایی برای آب مقطر در حدود فاصله ١٦ سانتی‌متری و برای سایر محلولها در فاصله ١٠ سانتی‌متری از آند رخ می‌دهد که نشان دهنده تغییرات و کاهش جبهه اسیدی در مقایسه با آب مقطر است. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط بیابانکی و همکاران مطابقت دارد [25].

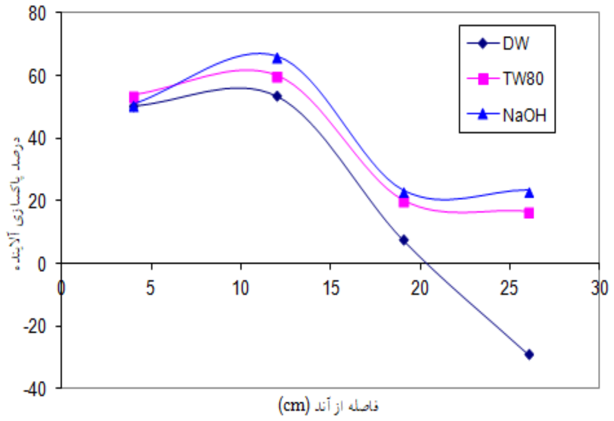


شکل ۹ pH خاک در پایان آزمایشهای مختلف

EC خاک. شکل شماره (١٠) مقادیر EC اندازه‌گیری شده خاک را در مجاورت نقاط اندازه‌گیری pH (٤، ١٢، ١٩ و ٢٦ سانتی‌متر از آند) نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات EC در طول نمونه خاک برای محلولهای مختلف از روند مشابه و یکسانی پیروی نمی‌کند. بلکه بستگی به نوع محلول مورد استفاده دارد. مقدار EC برای آب مقطر در فاصله ٤ سانتی‌متر از آند برابر با ١/٤٣ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و در فاصله ٢٦ سانتی‌متری ٢/٦٥ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که EC دارای روند افزایشی است. نتایج نشان می‌دهد که این تغییرات در این فواصل مختلف از طول نمونه خاک برای محلول NaOH ناچیز است. اما برای Tween80 در فاصله ٤ تا ١٢ سانتی‌متری تغییرات صعودی است و بعد از آن از مقدار ثابتی برخوردار است. نتایج حاصل شده در مطالعه حاضر با نتایج لی و جیانگ در سال ٢٠٢١ همخوانی داشته است [23].



شکل ۱۰ EC خاک در پایان آزمایشهای مختلف



شکل ۱۱ درصد آلاینده پاکسازی شده در پایان آزمایشهای مختلف

درصد آلاینده باقی‌مانده در خاک. از نتایج به دست آمده از دستگاه GC میزان درصد آلاینده باقی‌مانده یا پاکسازی شده از خاک را در فواصل مختلف از طول نمونه (٤، ١٢، ١٩ و ٢٦ سانتی‌متر از آند) تعیین گردید. نتایج حاصل از پاکسازی خاک رسی در شکل شماره (١١) نشان داده شده است. نتایج مربوط به محلولهای مختلف نشان می‌دهد که بیشترین درصد پاکسازی در اطراف آند رخ داده است و نیز با افزایش فاصله از آن مقدار آن کاسته می‌شود. برای محلول Tween80 در مجاورت آند درصد پاکسازی ٥٣/٨٨ درصد اما در مجاورت کاتد ١٦/٦٥ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج محلول Tween80 و NaOH و آب مقطر نشان می‌دهد که درصد پاکسازی در نقاط مشخص از خاک برای آنها یکسان نمی‌باشد، به طوری که درصد پاکسازی در مجاورت کاتد معادل ٢٣/٣٦ درصد و ١٦/٦٥ درصد برای محلولهای NaOH و Tween80 می‌باشد، اما برای آب مقطر افزایش آلاینده در کاتد مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر فاصله از آند، نوع محلول مورد استفاده هم در پاکسازی نقش مهمی دارند. همان طوری که ملاحظه گردید هنگام استفاده از آب مقطر در اطراف کاتد پاکسازی صورت نپذیرفته است. سایچک و ردی [16] و استبرق و همکاران [22] نتایج مشابهی در خصوص پاکسازی یک خاک رسی آلوده به فنانترن و آنترسن گزارش کردند.

نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی پاکسازی و خواص مکانیکی یک خاک رسی آلوده به دی متیل فتالات با انجام آزمایشهای آزمایشگاهی و نیز کاربرد آب مقطر، محلول ۰/۱ مولار NaOH و محلول ۳ درصد Tween80 مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشها تحت ولتاژ و زمان ثابت انجام گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل خلاصه می‌گردد:

تغییرات PH و EC در مخازن آند و کاتد و نیز حجم مایع خروجی بستگی به محلول مورد استفاده در مخزن آند دارد. مقدار نهایی pH در آند برای محلولهای Tween80 و آب مقطر نسبت به محلول NaOH دارای کاهشی معادل ١٩/٨٥ و ٣٥/٨ درصد می‌باشد. مقدار EC هم در آند برای محلولهای Tween80 و NaOH کاهشی معادل ١٩/٨٥ و ١٨/١ درصد نسبت به آب مقطر دارا می‌باشد. حجم مایع خروجی برای محلول NaOH در حدود ٢٠ درصد بیشتر از سایر محلولها می‌باشد.

مقاومت برشی با افزایش فاصله از آند افزایش می‌یابد و مقدار آن در کاتد برای محلول NaOH در حدود ٥٠ و ٥٧ درصد بیشتر از محلولهای آب مقطر و Tween80 می‌باشد.

درصد پاکسازی خاک برای محلولهای مختلف یکسان نمی‌باشد و نیز درصد پاکسازی در کاتد نسبت به آند کاهش می‌یابد. برای محلولهای Tween80 و NaOH مقادیر آن در آند معادل ٥٣/٨٨ و ٥٠/٨ درصد است اما در مجاورت کاتد مقدار آن برای محلولهای مذکور ١٦/٦٥ و ٢٣/٣٦ درصد می‌باشد.

مراجع

[1] D. Reed, Structural adjustment, *the environment and sustainable development*. Routledge, 2013.

[2] Y. B. Acar, R. J. Gale, A. N. Alshawabkeh, R. E. Marks, S. Puppala, M. Bricka, and R. Parker, "Electrokinetic remediation: basics and technology status," *Journal of hazardous materials*, vol. 40, no. 2, pp. 117-137, 1995.

[3] H. D. Sharma, K. R. Reddy, *Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*, John Wiley & Sons, 2004.

[4] A. Altaee, R. Smith, and S. Mikhalovsky, "The feasibility of decontamination of reduced saline sediments from copper using the electrokinetic process," *Journal of environmental management*, vol. 88, no. 4, pp. 1611-1618, 2008.

[5] S. Pamukcu, J. K. Wittle, "Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil," *Environmental Progress*, vol. 11, no. 3, pp. 241-50, 1992.

[6] K. R. Reddy, R. E. Saichek, "Enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from clay soil by periodic electric potential application," *Journal of Environmental Science and Health*, Part A, vol. 39, no. 5, pp. 1189-1212, 2004.

[7] H. S. Gibbs, "Soils and their utilization in the Wellington district," *InProc. NZ Soc, Soil Sci*, vol. 4, pp. 4-12, 1960.

[8] R. Hammett, *A study of the process involved in electroreclamation of contaminated soils*, MSc thesis, The University of Manchester, Manchester, UK, 1980.

[9] B. A. Segall, "Practical considerations in the use of electro-kinetics. InProceed- 746 ings of the Workshop Electro-kinetic Treat. Its Appl," *Environ.-Geotech. Engrg*, vol. 747, pp. 1-9, 1986.

[10] R. Lageman, W.Pool and G.Seffinga, "Electro-reclamation: theory and practice," *Chemistry and Industry*, vol. 18, pp. 585-590, 1989.

[11] C. J. Bruell, B. A. Segall, and M. T. Walsh, "Electroosomotic removal of gasoline hydrocarbons and TCE from clay," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 118, no. 1, pp. 68-83, 1992.

[12] S. Pamukcu, J. K. Wittle, D. L. Wise, And D. J. Trantolo, "Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils," pp. 245-298, 1994.

[13] A. P. Shapiro, R . F. Probstein, "Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis," *Environmental Science & Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 283-91, 1993.

[14] Y. B. Acar, A. N. Alshawabkeh, "Principles of electrokinetic remediation," *Environmental science & technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2638-47, 1993.

[15] F. Lancelot, H. Londiche, and G. De Marsily, "Experimental results on the influence of electric fields on the migration of oil, ionic species and water in porous media," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 67-74, 1990.

[16] R. E. Saichek, and K. R. Reddy, "Electrokinetically enhanced remediation of hydropHobic organic compounds in soils: a review," *Critical reviews in environmental science and technology*, vol. 35, no. 2, pp. 115-192, 2005.

[17] T. Alcántara, M. Pazos, S. Gouveia, C. Cameselle, and M. A. Sanromán, "Remediation of phenanthrene from contaminated kaolinite by electroremediation-Fenton technology," *Journal of Environmental Science and Health*,

part A, vol. 43, no. 8, pp. 901-906, 2008.

[18] H. Han, Y. J. Lee, S. H. Kim, and J. W. Yang, "Electrokinetic remediation of soil contaminated with diesel oil using EDTA–Cosolvent solutions," *Separation Science and Technology*, vol. 44, no. 10, pp. 2437-2454, 2009.

[19] F. Ma, B. Wu, Q. Zhang, D. Cui, Q. Liu, C. Peng, F. Li And Q. Gu, "An innovative method for the solidification/stabilization of PAHs-contaminated soil using sulfonated oil," *Journal of hazardous materials*, vol. 344, pp.742-748, 2018.

[20] A. R. Estabragh, A. T, Bordbar, F. Ghaziani, and A.A. Javadi, "Removal of MTBE from a clay soil using electrokinetic technique," *Environmental Technology*, vol. 37, no. 14, pp. 1745-1756, 2016.

[21] W. Du, H. Zou, Y. C. Sun, R. Zhu, and G. S. Zhang, "Surfactant-enhanced electrokinetic remediation of chromium and phenanthrene cross-polluted soils," *Environmental Engineering Science*, vol. 34, no. 12, pp. 908-916, 2017.

[22] A. R. Estabragh, M. Lahoori, A. A. Javadi, and J. Abdollahi, "Effect of a surfactant on enhancing efficiency of the electrokinetic method in removing anthracene from a clay soil," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 5, 2019.

[23] Y. Li, L. Jiang, "Comparison of the crude oil removal effects of different surfactants in electrokinetic remediation of low-permeability soil," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 105190, 2021.

[24] A. B. Fardin, A. J. Zanjani, and A. K. Darban, "Application of enhanced electrokinetic remediation by coupling surfactants for kerosene-contaminated soils: Effect of ionic and nonionic surfactants," *Journal of Environmental Management*, vol. 277, no. 1, pp. 111422, 2021.

[25] F.Biabanaki, J. Neshati, and M. Ehteshami, "Using the electrokinetic remediation (EKR) technique for the soil remediation from the contaminants," *Geosystem Engineering*, pp. 1-9, 2022.

[26] B. Gidudu, E. M. Chirwa, "The Role of pH, Electrodes, Surfactants, and Electrolytes in Electrokinetic Remediation of Contaminated Soil," *Molecules*, vol. 27, no. 21, pp. 7381, 2022.

[27] P. Ventrice, D. Ventrice, E. Russo, and G. De Sarro, "Phthalates: European regulation, chemistry, pharmacokinetic and related toxicity," *Environmental toxicology and pharmacology*, vol. 36, no. 1, pp. 88-96, 2013.

[28] J. Yang, Y. Li, Y. Wang, J. Ruan, J. Zhang, and C. Sun, "Recent advances in analysis of phthalate esters in foods," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 72, pp. 10-26, 2015.

[29] M. Mostafa Lu, F. Shariati, and S. Shariati, "Investigation of phthalates in Anzali lagoon sediments, Iran," *Wetland Ecobiology Journal*, vol. 10, no. 37, pp. 37-47, 2017. (in persian).

[30] C.S. Jeon, J. S. Yang, K. J. Kim, and K. Baek, "Electrokinetic removal of petroleum hydrocarbon from residual clayey soil following a washing process," *CLEAN–Soil, Air, Water*, vol. 38, no. 2, pp.189-193, 2010.

[31] A. R. Estabragh, A. T. Bordbar, And A. A. Javadi, "Effect of Quality Electrolyte Fluid on Removing MTBE from a Clay Soil Using Electrokinetic Technique," *American Society of Civil Engineers*, vol. 144, 2018.

[32] J. G. Hunter, CG. Uchrin, "Adsorption of pHthalate esters on soil at near saturation conditions," *Journal of Environmental Science & Health*, Part A, vol. 35, no. 9, pp. 1503-1515, 2000.

[33] J. K. Mitchell, K. Soga, *Fundamentals of soil behavior*, New York: John Wiley & Sons, pp. 280-304, 2005.

[34] EPA (U.S. Environmental Protection Agency), *Phthalate Esters By Gas Chromatography With Electron Capture*

Detection (GC/ECD), Washington, D.C, 1996.

[35] A. Rittirong, R. S. Douglas, J. Q. Shang, and E. C. Lee, "Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains," *Geosynthetics International*, vol. 15, no. 5, pp. 369-81, 2008.

[36] A. R. Estabragh, M. Naseh, and A. A. Javadi, "Improvement of clay soil by electro-osmosis technique," *Applied Clay Science*, vol. 95, pp. 32-36, 2014.

Journal Ferdowsi Civil Engineering, 36, 1, 2023. (85-96)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Laboratory Investigating into the Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles

Research Article

Niloofar Pishvaei[1], Morteza Jiryaei Sharahi[2], Masoud Amelsakhi[3]

1. Introduction

Soil stabilization is an important soil improvement method in geotechnical engineering. Many researchers have investigated the properties of traditional stabilizers such as cement, lime, fly ash, etc. and have shown that adding these materials to the soil increases the strength and durability of clay soils and reduces their swelling potential. However, their use has been restricted in recent years due to the environmental problems. For example, these substances increase the PH of soil and underground water. Stabilizing the soil with these materials mechanically causes the soil to exhibit a brittle behavior that can be dangerous under dynamic conditions. In the production process of these stabilizers, in addition to high energy consumption, large amounts of greenhouse gases are released into the atmosphere, which causes significant environmental damage. To solve these problems, it is necessary to use alternative stabilizers. Recently, the chemical substance calcium lignosulfonate (LS) has played a good role in stabilizing problematic soils. Calcium lignosulfonate is a polymer compound that is a waste material of the wood and paper industry. LS is compatible with the environment and does not cause environmental problems of soil and water. Moreover, using this material reduces costs and prevents this material from being dumped in a large volume.

The main purpose of this research is to investigate the impact of wetting and drying cycles on the strength and durability of samples stabilized with LS. The experimental results show that due to the hydrophilicity of LS, the stabilization does not have the necessary durability against the repetition of wet and dry cycles. The solution proposed in this research is the use of reinforcements such as polyethylene (PE) fiber. LS increases the resistance and improves soil behavior and reduces the need for fibers to a large amount. On the other hand, reinforcements such as PE fibers increase the durability against repeated wetting and drying.

2. Method

2.1. Materials. The soil used in this laboratory investigation was sampled from the north of Qom province at a depth of 50 cm. The results of soil identification tests including grains gradation test (ASTM C136), standard compaction test (ASTM D698), and Atterberg limits test (ASTM D4318) are summarized in Table 1.

Table 1. Physical properties of the soil used in this study

Properties of soil	Content
Classification (ASTM D2487)	CL
LL	25.1%
PL	15.3%
PI	9.8%

LS is used as a by-product of the wood and paper industry, which is obtained during the industrial process after the removal of wood chips. The size and shape of LS powder is very similar to cement and its grain size is about 10 to 25 microns.

PE is a polymer material that can reinforce soil samples as a fiber and increase their strength and durability. The amount of PE used was 4% of the dry weight of the soil. Used PE has density=0.95 g/cm^3, module=30 g/denier, strength=4.5-8 g/denier, and failure strain=10-20%.

2.2. Laboratory tests. In this experiment, LS was added to the samples at the rate of 1 % of the dry weight of the soil and mixed well. Moreover, for mixing method, LS and soil are mixed first, and then water is added to the mixture. Optimum moisture percentage and maximum dry weight obtained from Proctor's compaction test were considered for preparing the samples. The impact of wetting and drying cycles on the samples was investigated using ASTM D559. According to ASTM D559, each cycle has 5 hours of exposure in water at 23±2°C and then 42 hours

*Manuscript received: January 10, 2022, Revised, November 16, 2022, Accepted, April 15, 2023.

[1]. MSc Student in Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

[2]. Corresponding author. Assistant Professor in Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

Email: jiryaei@qut.ac.ir.

[3]. Assistant Professor in Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

of exposure in an oven at 71±2°C. Moreover, unconfined compressive strength tests were conducted on samples without and with LS and PE based on ASTM D2166.

3. Results and discussion

The results obtained from the unconfined compressive tests for the samples stabilized with 1% LS for different curing duration of 7, 14, 21, 28, and 35 days show that the optimum time for curing samples is 21 days. It seems that the reason for the decrease in strength of samples of 28 and 35 days is the hydrophilicity of LS. Results show that in all of the samples, strength decreases after each wetting and drying cycle. Stabilized samples without LS as well as with 1% LS survived only 2 wetting and drying cycles and completely lost their strength in the third cycle. Because the samples stabilized with LS lasted only 2 cycles of wetting and drying, the samples were reinforced with 4% polyethylene fibers to increase the durability of stabilized samples. The results unconfined compressive tests show that PE fibers, due to their tensile strength, make the soil more resistant. It also makes the soil durable against 12 wetting and drying cycles. Unconfined compressive strengths were measured to be 623, 523, 490, 449, 429, and 408 kPa after 2nd, 4th, 6th, 8th, 10th, and 12th cycles, respectively.

The results of laboratory tests for investigating the impacts of wetting and drying cycles, according to ASTM D559, show that the samples without and with 1% LS survived only 2 cycles. The samples lost about 14% of their mass after the first cycle and about 20% after the second cycle. The reason for this, as mentioned before, is the hydrophilic nature of the mixture. The fact is that many additives, such as calcium lignosulfonate, which are used in stabilization, are hydrophilic, and therefore wetting and drying cycles create a serious problem. Fibers such as PE may be the solution to use these industrial waste materials. The samples that were only stabilized with calcium lignosulfonate lost 20% of their mass after 2 cycles of wetting and drying, while as shown in Figure 1, the samples stabilized with lignosulfonate and

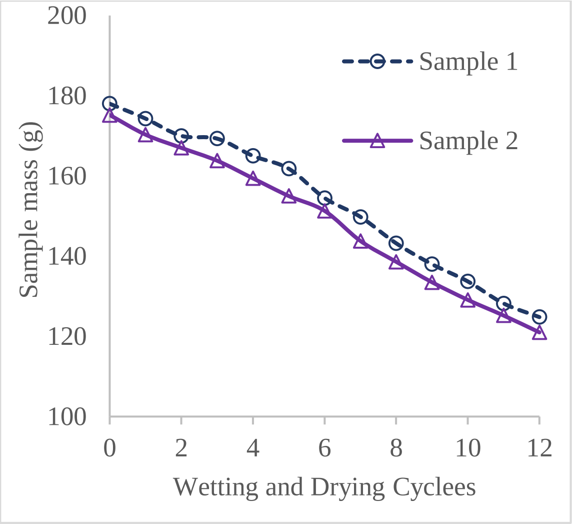


Figure 1. Weight of samples stabilized with LS and PE after different wetting and drying cycles

Reinforced with polyethylene fibers After 2 cycles of wetting and drying, only 5% of their mass has been lost, and after 4 cycles, 6 cycles, 8 cycles, 10 cycles, and 12 cycles, 7%, 13%, 20%, 25%, and 30% of their mass has been reduced, respectively. It is concluded that polyethylene fibers keep soil particles together and reduce soil mass reduction due to wetting and drying cycles. Adding PE fibers to the soil as a reinforcement that has tensile strength probably increases tensile strength, and also increases the compressive strength of the samples by a small amount. Polyethylene fibers prevent the sample from crumbling when it breaks and keep the soil particles together.

مهندسی عمران فردوسی،۳۶، ۱، ۱۴۰۲. (۹۶-۸۵)

مهندسی عمران فردوسی

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

مطالعه آزمایشگاهی رفتار خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن*

مقاله پژوهشی

نیلوفر پیشوایی[۱] مرتضی جیریایی شراهی[۲] مسعود عامل سخی[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.74674.1112

چکیده *هنگام مواجهه با خاکهای نامرغوب، به علت ایجاد مشکلات فنی و اقتصادی می‌توان خصوصیات خاک را در محل بهسازی نمود. یکی از روشهای متداول بهسازی، افزودن مواد تثبیت‌کننده به خاک است. در این پژوهش تثبیت‌کننده لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن مورد مطالعه قرار گرفته تا امکان افزایش مقاومت فشاری و دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن خاکهای رسی بررسی شوند. در تحقیق حاضر آزمایشهای حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و مقاومت تک محوری انجام شد. همچنین مدت زمان عمل آوری بهینه برای خاک تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم به دست آمد. آزمایش تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر وزن و مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنوسولفونات به خاک رس تغییری در دوام خاک در برابر تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن ایجاد نمی‌کند، اما افزودن ٤٪ الیاف پلی‌اتیلن به خاک، دوام نمونه‌ها را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن افزایش می‌دهد (به میزان ٦۰۰ ٪). منظور از دوام عدم کاهش وزن و در نتیجه مقاومت به میزان قابل توجه در اثر تکرار تر و خشک شدن است. همچنین افزودن الیاف پلی اتیلن به عنوان مسلح کننده به خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم، موجب کاهش از دست دادن جرم خاک در چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود (به میزان ۷۰ ٪).*

واژه‌های کلیدی تثبیت خاک، لیگنوسولفونات کلسیم، الیاف پلی اتیلن، چرخه تر و خشک شدن.

Laboratory Investigation on Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under wetting and drying cycles

Niloofar Pishvaei Morteza Jiryaei Sharahi Masoud Amelsakhi

Abstract *Stabilizing materials can be used as a soil improvement technique when dealing with inappropriate soils. This study investigates the effects of wetting and drying cycles on the clayey soil stabilized with Calcium Lignosulfonate and also polyethylene fibers. For this purpose, unconfined compression strength and durability of the prepared samples under wetting and drying cycles are investigated. Atterberg limit tests, standard compaction tests and unconfined compression tests have been performed on the prepared samples. Also, the optimum curing duration for soil stabilized with lignosulfonate is investigated. The results show that lignosulfonate-stabilized clay was not sufficiently durable against wet and dry cycles. Based on this result, the stabilization of clay with lignosulfonate stabilizer has a great weakness that is the main drawback to the use of this stabilizer. Addition of 4% polyethylene fibers increases the durability of stabilized samples up to 600% against wet and dry cycles. Also, adding polyethylene fibers to stabilized clay soil with lignosulfonate reduces the weight loss of the materials (70%).*

Keywords Soil stabilization, Calcium lignosulfonate, Polyethylene Fibers, Wetting and drying cycle.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲٦می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، ایران.

Email: jiryaei@qut.ac.ir

مقدمه

گاهی خاک موجود در محل احداث پروژه‌ها از دیدگاه مهندسی برای فعالیتهای عمرانی، ایدئال و کاملاً مطلوب نیست. مروری بر تاریخچه ساخت و سازهای بشری و سیر تحولات آنها نشان می‌دهد که از دیرباز تا کنون، روشهای مقاوم‌سازی خاک و بستر شالوده‌ها و لایه زیر اساس روسازی راهها، یکی از مشکلات اساسی در فعالیتهای عمرانی است. با توجه به افزایش جمعیت و نیاز بشر به ایجاد سازه‌های مقاوم و مستحکم و همچنین مشاهده خسارات ناشی از زلزله، تغییرات اقلیمی و سایر بلایای طبیعی، روشهای مختلف تقویت و بهسازی خاک به طور روز افزون گسترش یافته است [1,3].

خاک رس یکی از خاکهایی است که به وفور در طبیعت یافت می‌شود و در صورت وجود در بستر و لایه‌های روسازی مشکلاتی را ایجاد می‌کند. خاکهای رسی به ویژه خاکهای رسی نرم دارای خواص خمیری بالایی هستند و افزایش رطوبت موجب کاهش مقاومت برشی، مقاومت فشاری و تغییر حجم آنها می‌گردد[4]. پس تثبیت خاکهای رسی قبل از شروع انجام پروژه، بسیار حائز اهمیت است. عملیات تثبیت خاک عبارت است از بهبود مشخصات فنی خاک و افزایش مقاومت آن برای قابل استفاده کردن در یک کاربرد معین که انواع آن عبارت است از تثبیت مکانیکی، بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی. یکی از روشهای رایج برای تثبیت خاک نیز، استفاده از مواد افزودنی می‌باشد[5].

افزودنیهای شیمیایی مانند سیمان، آهک و خاکستر بادی جنبه‌های مناسبی از پایدارسازی خاکهای نرم و ناپایدار را از خود نشان داده‌اند. پژوهشهای صورت گرفته نشان می‌دهد که افزایش میزان سیمان موجب افزایش مقاومت برشی بیشینه، چسبندگی و سختی برشی می‌شود. در حالی که مقاومت پسماند و نهایی در اثر فرایند سیمانی شدن تغییری نمی‌کند[7-6].

با این وجود معمولاً تثبیت‌کننده‌های سنتی شیمیایی به دلیل مسائل زیست‌محیطی به آسانی قابل پذیرش نیستند. این افزودنیها همچنین با تغییر در PH خاک موجب کاهش ظرفیت خاک و نگهداری آب و انتقال مواد مغذی می‌شوند که در نتیجه پوشش گیاهی محدود می‌گردد و کیفیت آبهای زیرزمینی کاهش می‌یابد [۸]. از سوی دیگر خاکهای تثبیت شده با افزودنیهای سنتی رفتار شکننده‌ای از خود، به ویژه تحت بارهای دوره‌ای نشان می‌دهند [۹]. برای حل این مشکلات لازم است از یک تثبیت‌کننده جایگزین استفاده شود، به طوری که بتواند استحکام و دوام خاک را بدون آسیب زدن به محیط زیست بالا ببرد. به تازگی ماده شیمیایی مبتنی بر لیگنین، لیگنوسولفونات کلسیم (LS) در پایدار-سازی خاکهای مسئله‌دار به خوبی ایفای نقش کرده است[10-9]. لیگنوسولفونات کلسیم یک ترکیب پلیمری است که از عصاره چوب حاصل می‌شود و از مواد دور ریز صنعت چوب و کاغذ است. لیگنوسولفونات کلسیم شامل اجزای هیدروفیلی است که شامل سولفونات، هیدروکسیل فنیل و هیدروکسیل الکل می‌شود و محصول جانبی صنایع چوبی و کاغذی می‌باشد و به صورت مایع خام یا با استفاده از سایر افزودنیها در خاک استفاده می-شود[9]. سالانه ۵۰ میلیون تن از این ماده دور ریخته می‌شود، لیگنوسولفونات کلسیم با محیط زیست سازگار بوده و برای سلامت انسان خطرآفرین نمی‌باشد. همچنین استفاده از این ماده باعث کاهش هزینه‌ها و پیدایش راهکاری برای جلوگیری از دورریز این ماده در حجم وسیع می‌باشد. از آنجایی که لیگنوسولفونات به عنوان تثبیت‌کننده شیمیایی غیرخورنده و غیر سمی شناخته می‌شود، افزودن این تثبیت‌کننده به خاک سبب ایجاد مشکلات زیست‌محیطی آب و خاک نمی‌گردد. در مقایسه با افزودنیهای شیمیایی سنتی، لیگنوسولفونات ارزانتر، دوستدار محیط زیست و بی خطرتر می‌باشد و به طور کامل در آب انحلال‌پذیر است. یکی از ویژگیهای قابل توجه این تثبیت‌کننده، افزایش مقاومت نمونه بدون تغییر در PH و شکل‌پذیری خاک است[13-11].

پژوهشهای صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش مقدار لیگنوسولفونات مقاومت بیشینه، مقاومت نهایی و سختی برشی افزایش یافته است. همچنین افزایش میزان مقاومت بیشینه و نهایی به صورت خطی می‌باشد و طبق پژوهشهای انجام گرفته، به منظور رسیدن به مقاومت مورد نظر در برابر فرسایش، مقدار کمتری از لیگنوسولفونات نسبت به سیمان مورد نیاز است [٦، ٧ و ١٤].

وینود و همکاران [6] در سال ۲۰۱۱ دریافتند که افزودنی لیگنوسولفونات به طور قابل توجهی مقاومت خاک رسی با خاصیت خمیری کم را بهبود بخشیده است. همچنین با استفاده از دستگاهی به منظور شبیه‌سازی فرایند فرسایش در ترکهای داخلی در خاکهای تثبیت شده با لیگنوسولفونات انجام داده‌اند و

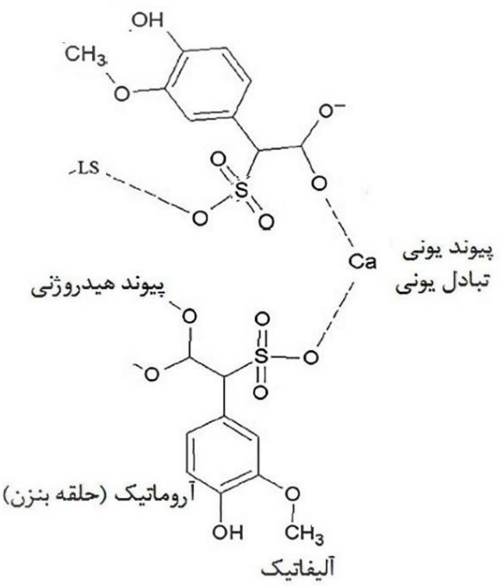
گزارش داده‌اند که به مقدار کمتری از لیگنوسولفونات نسبت به سیمان برای افزایش مقاومت در برابر فرسایش نیاز است.

ایندراراتنا و همکاران[۷] در سال ۲۰۱۵ دریافتند که لیگنوسولفونات تأثیر به سزایی بر روی مقاومت برشی و کرنش حجمی در خاکهای ماسه سیلت‌دار دارد که با افزایش میزان لیگنوسولفونات تنش‌برشی افزایش و کرنش‌برشی رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهد.

ایلیس و همکاران [15] در سال ۲۰۱۷ با پژوهش روی تثبیت خاک رس با سیمان و الیاف پلی اتیلن دریافتند که مقدار بهینه پلی اتیلن (PE) برای تثبیت خاک رس، ٤٪ می‌باشد. این مقدار فیبر بیشترین چسبندگی و بالاترین مقاومت را در خاک ایجاد میکند.

تانگبدی و نورزاد[16] در سال ۲۰۱۷ دریافتند که لیگنوسولفونات کلسیم باعث کاهش حد روانی خاک نیز می‌شود، ولی حد خمیری را تغییری نمی‌دهد پس باعث کاهش شاخص خمیری خاک نیز می‌شود و رفتار مهندسی آن را بهبود می‌بخشد. همچنین در اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم به خاک رس، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

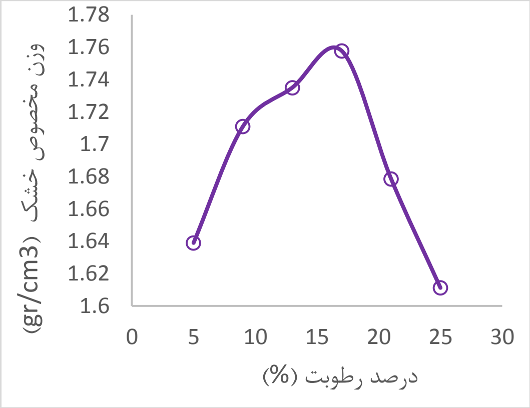
گیاهی و جیریایی [17] در سال ۱٤۰۰روی تثبیت خاک رس با LS پژوهشی انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه افزودنی LS برای خاک CL، در حدود ۱ ٪ است. لازم به ذکر است مقدار بهینه از افزودنی برای هر خاک منحصر به فرد است و به ترکیب شیمیایی خاک پایه بستگی دارد. بررسی تغییرات مورفولوژی خاک با استفاده از نتایج تست میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان می‌دهد که در اثر افزودن لیگنوسولفونات‌کلسیم، مرزهای بین ذرات رس از بین رفته و خاک با ایجاد پیوندهای هیدروژنی و کووالانسی به صورت توده‌ای از ذرات خاک به هم پیوسته تشکیل شده است. در اثر تشکیل این پیوندها تعداد حفرات موجود در خاک کمتر شده و ذرات رس بزرگتر شده‌اند. این تغییرات در مورفولوژی خاک باعث بهبود خواص مکانیکی خاک تثبیت‌شده نسبت به خاک پایه شده است. ساختار شیمیایی لیگنوسولفونات کلسیم در شکل (۱) نشان داده شده است. هدف اصلی از این پژوهش که در ادامه پژوهش گیاهی و همکاران انجام شده است بررسی تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم بر جرم و مقاومت تثبیت است یا به عبارت دیگر دوام تبیت با لیگنوسولفونات کلسیم در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن. منظور از دوام عدم کاهش وزن یا مقاومت قابل توجه در اثر تکرار چرخه‌های تر و خشک شدن است به نحوی که تثبیت بتواند مقاومت و سختی مورد نظر را داشته باشد. همچنین نتیجه آزمایش به صورت تعداد چرخه (سیکل) و کاهش میزان وزن ثبت می‌شود. فرض این تحقیق بر این است که به علت آب‌دوست بودن لیگنوسولفونات کلسیم تثبیت دوام لازم در برابر تکرار چرخه‌های تر و خشک شدن را نداشته باشد که در این صورت نیاز است که راهکاری برای این مشکل پیشنهاد کرد. راهکاری که در این تحقیق با توجه به مطالعات پیشین پیشنهاد شده است [18] استفاده از مسلح‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی مانند فیبر پلی اتیلن است زیرا از یک طرف لیگنوسولفونات باعث افزایش مقاومت و بهبود رفتار خاک می‌شود و نیاز به فیبرها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد (اقتصادی است) و از طرف دیگر مسلح‌کننده‌ها مانند فیبرها دوام تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم در برابر تکرار چرخه‌های تر و خشک شدن را به میزان قابل توجه افزایش می‌دهند. بنابراین در این پژوهش تثبیت‌کننده لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن به عنوان مسلح‌کننده مورد مطالعه قرار گرفته تا امکان افزایش مقاومت فشاری و دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن خاکهای رسی بررسی شود. در تحقیق حاضر آزمایشهای حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و مقاومت تک محوری انجام شده است. همچنین مدت زمان عمل آوری بهینه برای خاک تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم به دست آمد. آزمایش تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر تغییر وزن و مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنوسولفونات به خاک رس تغییری در دوام خاک تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن ایجاد نمی‌کند. اما افزودن ٤٪ الیاف پلی اتیلن به خاک، دوام را افزایش می‌دهد (٦۰۰٪). همچنین افزودن الیاف پلی اتیلن به خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم، موجب کاهش از دست دادن جرم خاک در چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود (۷۰٪).



شکل ۱ ساختار شیمیایی لیگنوسولفونات کلسیم

مواد و مصالح

خاک رس. خاک مورد استفاده در این پژوهش از قسمت شمال شهر قم و عمق نیم متری زمین برداشت شده است. با استفاده از نتایج آزمایشـــهای دانه‌بندی (ASTM C136)، تراکم اســـتاندارد (ASTM D4718) و حدود اتربرگ (ASTM D427) و بر اساس طبقه‌بندی متحد، خاک از نوع رس با شـــاخص خمیری پایین است. مشخصات خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین نمودار تراکم در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ نمودار تراکم خاک رس (درصد رطوبت بهینه ۱۷ درصد)

جدول ۱ ویژگیها و خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در این پژوهش

نام / مقدار	ویژگی / خصوصیت خاک
CL	نام‌گذاری طبق سیستم متحد
۲/۷۵	چگالی جامد (Gs)
٪۳/۵	رطوبت طبیعی خاک
٪۲۵/۱	حد روانی (LL)
٪۱۵/۳	حد خمیری (PL)
٪۹/۸	شاخص خمیری (PI)
٪۱۷	رطوبت بهینه
۱۷۵۷۰	بیشینه وزن مخصوص خشک (N/m^3)

لیگنو سولفونات کلسیم (LS). لیگنوسـولفونات کلسـیم مورد استفاده، دورریز و پسماند صنعت کاغذ و تمبر سازی است که طی فرایند صـنعتی پس از جداسـازی تکه‌های چوب به دسـت می‌آید. اندازه و شـکل ظاهری پودر لیگنوسـولفونات کلسـیم شباهت زیادی به سیمان دارد و اندازه دانه‌های آن در حدود ۱۰ الی ۲۵ میکرون است [۱۷]. نمونه‌ای از لیگنو سولفونات کلسیم که در این تحقیق استفاده شده است در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳ پودر لیگنوسولفونات کلسیم مورد استفاده در این تحقیق

الیاف پلی اتیلن (PE). پلی اتیلن شامل ساختار بسیار ساده‌ای است، به طوری که ساده‌تر از تمام پلیمرهای تجاری است. یک مولکول پلی‌اتیلن زنجیر بلندی از اتمهای کربن اســـت که به هر اتم کربن دو اتم هیدروژن چسبیده است.

پلی اتیلن یک ماده پلیمری است که از واحدهای منفرد اتیلن تشکیل شده است. اتیلنها به صورت زنجیره‌ای به دنبال هم آرایش یافته‌اند و مولکول بزرگ پلیمری را تشکیل داده‌اند. ماده اولیه پلی‌اتیلنها از نفت خام به دست می‌آید. مشخصات فیزیکی الیاف پلی اتیلن در جدول (۲) که توسط کارخانه سازنده گزارش شده است، نشان داده شده است. همچنین نمونه‌ای از الیاف پلی اتیلن در شکل (٤) نشان داده شده است.

برنامه آزمونهای آزمایشگاهی

گیاهی وجیریایی در تحقیقی در دانشـــگاه صـــنعتی قم که روی درصـــد بهینه لیگنوســـولفونات در اختلاط با خاک رس CL و روشهای اختلاط کار کردند.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی الیاف پلی‌اتیلن

نام الیاف	الیاف پلی اتیلن
دانسیته پلی اتیلن (gr/cm^3)	۰/۹۵
استحکام (gr/denier*)	۸ – ٤/۵
مدول (gr/denier)	۳۰
کرنش شکست(٪)	۲۰-۱۰

* دنیر معادل گرم در ۹۰۰۰ متر از فیبر

شکل ٤ الیاف پلی اتیلن

آنها نشان دادند که مقدار بهینه لیگنوسولفونات برای ساخت نمونه‌ها، ۱٪ است. همچنین آنها نتیجه گرفتند که بهترین روش برای اختلاط، اضافه کردن لیگنوسولفونات به خاک و مخلوط کردن آنها با هم و سپس اضافه کردن آب است که درصد رطوبت بهینه در این حالت ١٦/٥١ ٪ گزارش شده است[17]. در این تحقیق که ادامه کار تحقیق مذکور است و اینکه نمونه خاک مورد آزمایش در این پژوهش هم همان CL است، مقدار بهینه لیگنوسولفونات برای ساخت نمونه‌ها، ۱٪ و رطوبت بهینه ١٦/٥١ ٪ در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای اختلاط ابتدا لیگنوسولفونات به خاک اضافه و مخلوط می‌شود و سپس آب اضافه می‌شود. برای آماده سازی نمونه‌های تثبیت شده از قالبی با قطر ۳۸ و ارتفاع ۷٦ میلی‌متر استفاده شد. با استفاده از وزن مخصوص حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم و حجم قالب، وزنِ مخلوطِ خاک، آب و لیگنو که باید پس از اختلاط در قالب کوبیِده شوند به دست می‌آید. آب مورد نیاز با توجه به رطوبت بهینه و مقدار لیگنوسولفونات کلسیم با توجه به میزان ۱ ٪ وزنی به راحتی محاسبه می‌شود. ضمناً وزن خاک که باید در قالب کوبیده شود تا تراکم به حداکثر وزن مخصوص برسد محاسبه می‌شود. سپس از اختلاط خاک با لیگنوسولفونات کلسیم و آب، نمونه در حداکثر وزن مخصوص خاک که از آزمایش تراکم به دست آمده بود، ساخته شد. در همین راستا خاک در ۵ لایه یکسان ریخته شد و به صورت استاتیکی (کوبش استاتیکی به تعداد ۲۵ ضربه برای هر لایه) متراکم گردید. وزن واحد حجم خشک نمونه‌های تک محوری نیز مطابق با حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل از آزمایش تراکم استاندارد است. نیرو یا فشار استاتیکی بهترین روش تراکم خاکهای چسبنده (سیلت و رس) است. لازم به ذکر است پس از کوبیدن هر لایه سطح آن به اندازه ۳ میلی‌متر خراشیده شد تا لایه‌ها از هم جدا نباشند و نمونه‌ای همگن به دست بیاید. پس از خارج سازی نمونه‌ها از قالب تک محوری، با پلاستیک دو لایه محصور شده و در اتاقی با دمای کنترل شده به مدت ۷ و ١٤ و ۲۱ و ۲۸ و ۳۵ روز عمل آوری شدند. از هر آزمونه با شرایط یکسان ۳ تست تکرار انجام شده است و میانگین آنها ثبت شده است. در این مرحله ۱۵ نمونه خاک تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات برای ۵ حاالت مدت عمل آوری ساخته شد. سرعت بارگذاری آزمایش تک محوری نیم میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. همچنین ٦ نمونه تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات برای پس از چرخه اول و چرخه دوم تر و خشک شدن ساخته شد. ۲۱ نمونه تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات و ٤ ٪ فیبر پلی اتیلن هم برای پس از چرخه صفر، دوم، چهارم، ششم، هشتم، دهم و دوازدهم ساخته شد.

بررسی دوام تثبیت تحت چرخه‌های تر و خشک‌شدن. نمونه‌ها با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم ساخته سپس عمل آوری شده و وزن و حجم آنها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به ترتیب در چرخه‌های تر و خشک قرار گرفتند. طبق ASTM D 559 هر چرخه شامل ۵ ساعت قرار گرفتن در آب ۲±۲۳ درجه سانتی- گراد و سپس ٤۲ ساعت قرار گرفتن در گرمخانه ۲±۷۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در این مرحله ١٦ نمونه برای برای بررسی دوام تثبیت در برابر

تعداد متفاوت از چرخه تر و خشک شدن ساخته شد که نتایج ۹ نمونه از آنها شامل صفر، یک و دو چرخه تر و خشک شدن در بخش ٤ این مقاله نشان داده خواهد شد. نمونه‌ها برای سه و بیشتر چرخه تر و خشک شدن گسیخته شدند.

شکل ۵ نمونه‌های تثبیت شده تحت اثر چرخه تر و خشک

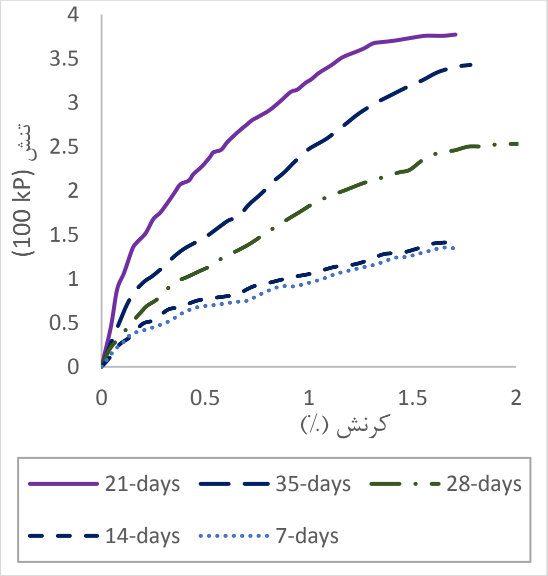
بررسی دوام تثبیت با لیگنوسولفونات‌کلسیم و الیاف پلی‌اتیلن. در این مرحله نمونه‌ها با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم و٤٪ فیبر پلی اتیلن ساخته و عمل آوری شد. سپس وزن و طول آنها اندازه‌گیری شده و حجم آنها به دست آمد. پس از آن نمونه‌ها طبق ASTM D 559 تحت چرخه‌های تر و خ شک شدن قرار گرفتند. در این مرحله ۲٦ نمونه برای تعداد چرخه های تر و خشک شدن ۰ تا ۱۲ ساخته شد.

نتایج و تحلیل

مدت زمان عمل آوری بهینه تثبیت. نمودار تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش تک محوری برای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم طی تعداد روزهای عمل آوری مختلف در شکل (٦) نشان داده شده است. با توجه به نمودار تنش-کرنش، با افزایش مدت عمل آوری، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. اما نمونه ۲۱ روز عمل آوری شده مقاومت بیشتری نسبت به نمونه ۲۸ روزه و نمونه ۳۵ روزه دارد (مقاومت نمونه ۲۱روزه حدود ۱۱٪ بیشتر از مقاومت نمونه ۳۵ روزه است). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدت زمان بهینه برای عمل‌آوری خاک رس با ۱ ٪ لیگنوسولفونات کلسیم ۲۱ روز است. به نظر می‌رسد علت کاهش مقاومت در مدت عمل آوری ۲۸ و ۳۵ روز، آب دوست بودن تثبیت لیگنوسولفونات کلسیم است به عبارت دیگر در مدت تا ۲۱ روز نمونه‌ها در حال تثبیت و افزاش مقاومت هستند اما پس از آن وجود رطوبت برای عمل آوری باعث حل شدن بخشی از لیگنوسولفونات در همین رطوبت می‌شود و مقاومت کاهش می‌یابد.

دوام تثبیت تحت تأثیر تکرار چرخه‌های تر و خشک. پس از قرار دادن نمونه‌ها در آب در چرخه اول، مشاهده شد که آب به سرعت رنگ گرفته و به نظر می‌رسد که مقداری از لیگنوسولفونات نمونه‌ها، همان ابتدا به سرعت در آب حل می‌شود، به عبارت دیگر لیگنوسولفونات کلسیم آب دوست است.

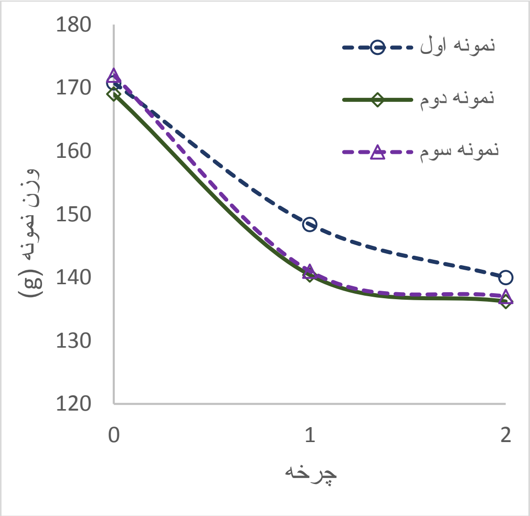
ابتدای چرخه سوم و زمانی که نمونه ها در آب بودند، نمونه‌ها به صورت تکه‌های کوچکتر در آب پخش شدند یا به عبارت دیگر گسیخته شدند.



شکل ٦ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بهسازی شده با LS در روزهای عمل آوری متفاوت

در واقع نمونه‌های تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات ، ۲ چرخه تر و خشک شدن دوام آوردند. شکل (۷) وزن نمونه‌های تثبیت شده با LS را پس از هر چرخه تر و خشک شدن نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که نمونه‌ها پس از چرخه اول حدود ١٤ ٪ و پس از چرخه دوم حدود ۲۰ ٪ جرم خود را از دست داده‌اند. علت این امر همان طور که قبلاً مطرح شد آب‌دوست بودن اختلاط است. شکل (۸) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با LS پس از یک و دو چرخه تر و خشک شدن می‌باشد. از نمودار نتیجه‌گیری می‌شود که مقاومت نمونه تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم پس از هر چرخه تر و خشک

شدن کاهش پیدا کرده است. یکی از دلایل کاهش مقاومت نمونه‌ها، به نظر می رسد تخریب واکنشهای پوزولانی در طول چرخه‌های تر و خشک شدن و همچنین کاهش جرم نمونه‌ها پس از هر چرخه در اثر آب‌دوست بودن تثبیت با لیگنوسولفونات است.

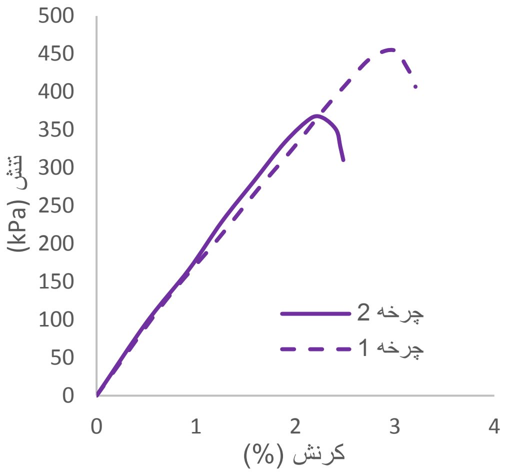


شکل ۷ نمودار کاهش وزن نمونه‌های تثبیت شده با LS در چرخه‌های اول و دوم تر و خشک شدن

همچنین امکان دارد که شکسته شدن ذرات خاک به علت تغییر فشار هوای حبس شده داخل حفرات خاک هنگام تر و خشک شدن با شد که باعث تسریع در کاهش مقاومت شود. تغییر فشار هوای حبس شده در اثر تغییر مکش، که برابر تفاضل فشار هوا از فشار آب حفره‌ای است، رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که مکش در اثر افزایش رطوبت کاهش می‌یابد.

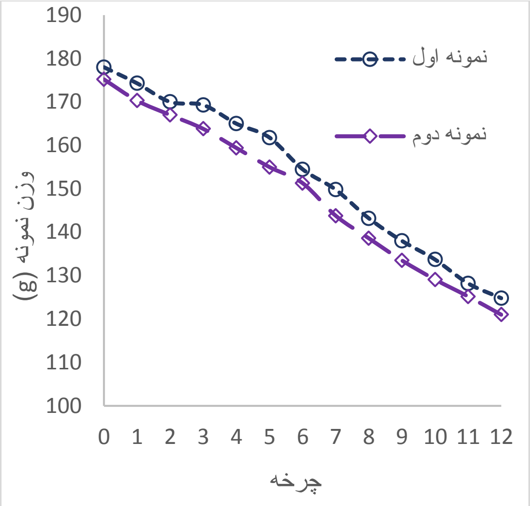
نتایج دوام تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی – اتیلن. به دلیل اینکه نمونه‌های تثبیت‌شده با لیگنوسولفونات فقط ۲ چرخه تر و خشک شدن را دوام آوردند، نمونه‌ها را با الیاف پلی اتیلن مسلح کرده تا دوام تثبیت تحت اثر مسلح سازی بررسی شود. به دلیل خاصیت کششی الیاف، ممکن است در بالا بردن دوام مؤثر واقع شوند.

واقعیت این است که بسیاری از مواد افزودنی مانند همین لیگنو سولفونات کلسیم که در تثبیت به کار می‌روند آب‌دوست هستند و بنابراین تناوب تر و خشک شدن مشکل جدی ایجاد می‌کند به نحوی که کاربرد این مواد افزودنی را زیر سوال می‌برد. تسلیح ممکن است چاره کار باشد تا بتوان از این مواد دور زیر استفاده کرد.



شکل ۸ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با LS در چرخه‌های اول و دوم تر و خشک شدن

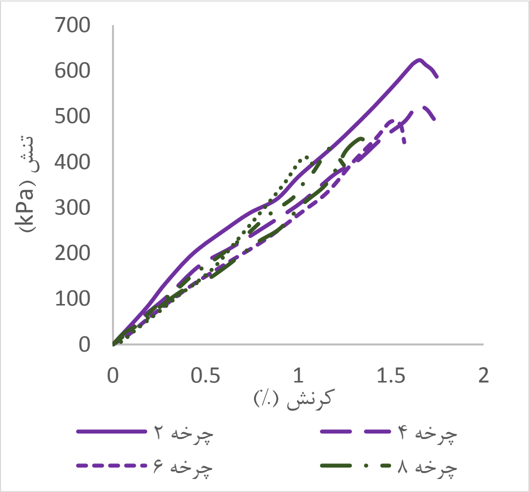
در این مرحله ۲۶ نمونه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های تثبیت‌شده با لیگنوسولفونات و مسلح شده با الیاف پلی اتیلن ۱۲چرخه تر و خشک‌شدن و بیشتر دوام آوردند. وزن و مقاومت آنها بعد از هر چرخه اندازه‌گیری شد. شکل ۹ وزن نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن پس از هر چرخه تر و خشک شدن آمده است. نمونه‌ها پس از گذشت ۱۲ چرخه تر و خشک شدن، ۳۰٪ کاهش جرم داشته-اند. از مقایسه شکلهای (۷) و (۹) می‌توان دریافت که نمونه‌هایی که فقط با لیگنوسولفونات کلسیم تثبیت شده بودند پس از گذشت ۲چرخه تر و خشک شدن ۲۰٪ جرم خود را از دست داده‌اند، در حالی که نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات و تسلیح شده با الیاف پلی اتیلن پس از گذشت ۲ چرخه تر و خشک شدن تنها ۵٪ جرم خود را از دست داده‌اند و پس از گذشت ۱۲ چرخه، ۳۰٪ از جرمشان کاسته شده است. نتیجه می‌شود که الیاف پلی اتیلن موجب کنار هم نگه داشتن ذرات خاک شده و کاهش جرم خاک در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن را کم می‌کند.



شکل ۹ وزن نمونه‌های تثبیت شده با LS و PE پس از چرخه‌های متفاوت تر وخشک شدن

در شکل (۱۰) نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌ها مشاهده می‌شود. همان طور که در نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، پس از پایان هر چرخه تر وخشک شدن مقاومت نمونه کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقایسه دو نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با LS و نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با LS و مسلح شده با PE نشان می‌دهد که الیاف PE به دلیل دارا بودن مقاومت کششی باعث می‌شوند تا خاک در مرز گسیختگی خود مقاومت بیشتری داشته باشد و در نتیجه مقاومت فشاری بالا می‌رود. همچنین باعث دوام خاک در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود. زیرا در نمونه‌های تثبیت شده با LS و PE نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با LS درصد تثبیت کننده بیشتر می‌باشد و در مقایسه با ذرات ریز دانه فاقد چسبندگی خاک، خصوصیات مقاومتی خاک را بهبود می‌بخشد. این طور به نظر می‌رسد که الیاف با توجه به پیوندی که بین ذرات برقرار می‌کنند به صورت غیر مستقیم باعث افزایش چسبندگی می‌شوند.

شکلهای (۱۲) و (۱۱) مقایسه دو نمونه بهسازی شده با LS و نمونه بهسازی شده با LS و PE بعد از گسیختگی می‌باشد. مشاهده می‌شود که الیاف پلی‌اتیلن با توجه به پیوندی که بین ذرات برقرار می‌کنند از خردشدن نمونه هنگام گسیختگی جلوگیری می‌کنند و ذرات خاک را کنار یکدیگر نگه می‌دارند.



شکل ۱۰ نمودار تنش کرنش نمونه‌های بهسازی شده با LS و PE در چرخه‌های (زوج) تر و خشک‌شدن

شکل (۱۳) دوام نهایی نمونه‌های تثبیت نشده، نمونه‌های تثبیت شده با LS و نمونه‌های تثبیت شده با LS و PE را در چرخه های تر و خشک شدن نشان می‌دهد. منظور از دوام نهایی تعداد چرخه‌ای است که پس از آن نمونه نابود می‌شود و مقاومت به صفر می‌رسد. لازم به ذکر است تعداد چرخه ۱۲ متناظر با دوام نهایی نمونه‌های مسلح شده با فیبرهای PE نیست بلکه دوام نهایی نمونه بیشتر از ۱۲ هست.

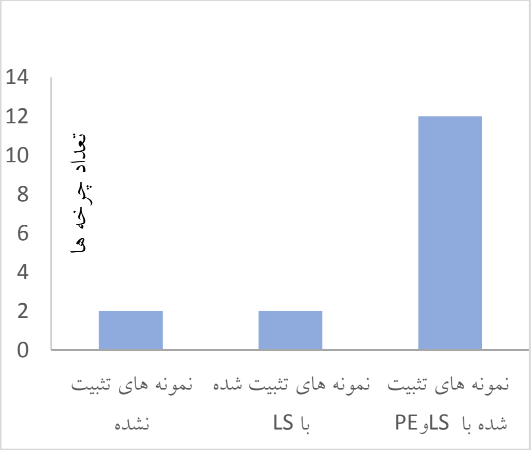
نتیجه گیری

مدت زمان عمل آوری بهینه برای خاک رس با خاصیت خمیری پایین (CL) تثبیت شده با ۱ ٪ لیگنو سولفونات کلسیم، ۲۱ روز به دست آمد.

شکل ۱۱ گسیختگی نمونه بهسازی شده با LS پس از چرخه دوم

شکل ۱۲ نمونه بهسازی شده با LS و PE پس از چرخه دوازدهم گسیختگی

– نمونه‌های تثبیت شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم،۲ چرخه تر و خشک شدن دوام آوردند. در حالی که خاک تثبیت نشده مورد استفاده در پژوهش نیز ۲ چرخه تر و خشک شدن دوام آورد. پس لیگنوسولفونات کلسیم به



شکل ۱۳ دوام ترکیبهای متفاوت در برابر چرخه تر و خشک شدن

تنهایی افزایشی در دوام خاک در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن ایجاد نمی‌کند.

– یکی از روشهای اصلاح برای دوام خاکها یا نمونه‌های تثبیت شده که در برابر دوره‌های تر و خشک شدن ضعیف هستند، استفاده از مسلح‌کننده‌های با مقاومت کششی می‌باشد. بنابراین الیاف پلی‌اتیلن به خاک افزوده شد که می‌توان سایر الیاف را هم مورد پژوهش قرار داد. خاک تثبیت شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم و ٤٪ الیاف پلی اتیلن ۱۲ چرخه و بیشتر دوام آوردند. افزودن الیاف پلی اتیلن به خاک، دوام آن را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن، ٦۰۰٪ افزایش می‌دهد و کاهش جرم خاک را ۷۰٪ کم می‌کند.

– اضافه کردن الیاف PE به خاک به عنوان یک تسلیح که مقاومت کششی دارد و به همین دلیل احتمالاً مقداری مقاومت کشی را افزایش می‌دهد، مقاومت فشاری نمونه‌ها را نیز مقدار کمی افزایش می‌دهد. همچنین الیاف پلی اتیلن از خرد شدن نمونه هنگام گسیختگی جلوگیری می‌کند و ذرات خاک را کنار یکدیگر نگه می‌دارد.

– با توجه به چهار فصل بودن کشورمان، بررسی اثرات پی در پی جوی بر خاکهای تثبیت شده ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این اثرات، تکرار تر و خشک شدن است که در صورتی که باعث از بین رفتن مقاومت یا سختی شود مسائلی از قبیل نشست، ترک خوردگی یا حتی ناپایداری را می‌تواند ایجاد کند. لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن هر دو سازگار با محیط زیست هستند و ارزش آنها فراوانی و ارزانی آنها است. ترکیب نهایی ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم و٤٪ الیاف پلی اتیلن برای بهسازی خاک CL هم مقاومت و هم دوام آن را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن افزایش می‌دهد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] S. S. Kutanaei and A. J. Choobbasti, “Effects of Nanosilica Particles and Randomly Distributed Fibers on the Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Cemented Sand,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 04016230, 2017.

[2] S. S. Kutanaei and A. J. Choobbasti, “Experimental Study of Combined Effects of Fibers and Nanosilica on Mechanical Properties of Cemented Sand,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 06016001, 2016.

[3] Kutanaei, S.S. and A.J. Choobbasti, "Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand," *Journal of adhesion science and Technology*, vol. 30, no. 6, pp. 579-593, 2016.

[4] R. Ebne Jalal and M.Shafiei Bajestan, *Theoretical and practical principles of soil mechanics.* 1st Ed., Ahwaz: Shahid Chamran University, 1992 (in Persian).

[5] H. Tahekhani and H. Salami, "Comparison of Lime, Cement and CBR PLUS Additives for Stabilizing Clay Soil," *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 263-274, 2013 (in Persian).

[6] J. S. Vinod and B. Indraratna, "A conceptual model for lignosulfonate treated soils," *13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Australia, pp.296-300, May 9-13, (2011).

[7] B. Indraratna, R. Athukorala, and J. S. Vinod, "Shear behaviour of a lignosulfonate treated silty sand," *12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: The Changing Face of the Earth – Geomechanics & Human Influence*, New Zealand, pp. 1-8, February 22-25, (2015).

[8] Q. Chen and B. Indraratna, "Shear behaviour of sandy silt treated with lignosulfonate," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 8, pp. 1180-1185, 2015.

[9] B. Indraratna, M. Mahamud, and J. S. Vinod, "Chemical and mineralogical behaviour of lignosulfonate treated soils," *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, USA California, pp. 1146-1155, March 25-29, (2012).

[10] K. Q. Tran, T. Satomi, and H. Takahashi, "Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 204-210, 2018.

[11] A. Sezer, A. Boz, and N. Tanrinian, "An investigation into strength and permittivity of compacted sand-clay mixtures by partial replacement of water with lignosulfonate," *Acta Physica Polonica A*, Vol.130, No.1, pp.23-27, (2016).

[12] Q. Chen, B. Indraratna, J. Carter, and C. Rujikiatkamjorn, "A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt," *Computers and Geotechnics*, vol. 61, pp. 316-327, 2014.

[13] Q. Chen and B. Indraratna, "Deformation behavior of lignosulfonate-treated sandy silt under cyclic loading," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.141, no. 1, pp. 06014015, 2015.

[14] B. Indraratna, R. Athukorala, and J. Vinod, "Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 701-714, 2013.

[15] N. M. Ilieş, A. P. Circo, and A. C. Nagy, "Comparative study on soil stabilization with polyethylene waste materials and binders," *Procedia Engineering*, vol. 181, pp. 444-451, 2017.

[16] B. Ta'negonbadi and R. Noorzad, "Stabilization of clayey soil using lignosulfonate," *Transportation Geotechnics*, vol. 12, pp. 45-55, 2017.

[17] A. Giahi, M. Jiryaei Sharahi, and B. Mohammadnezhad, "Evaluation of a by-product and enviromental-friendly chemical additives for clay soils with different mixing and curing methods," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 659-674, 2021 (in prsian).

[18] K. Roshan, A. J. Choobbasti, and S. S. Kutanaei, "Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition," *Transportation Geotechnics*, vol. 23, pp. 100359, 2020.

CONTENTS

Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods	Elham Fijani - Sahar Meysami Morteza Mozafari	1
Three-Dimensional Numerical Modeling of Interaction of Dip-Slip Fault and Tunnels with Concrete Lining	Mohammad Amin Barfehee Mahda Mortazavi Zanjani Abbas Soroush	19
Forecasting Travel Demand using Self-Correlated Moving Average Time Series Methods (Case Study: Qom-Tehran Freeway)	Hassan Khaksar - Seyed Ahmad Almasi Mohammad Mehdi Khabiri - Amir Golroo Hossein Bahmani	35
Investigating the Potential of Designing Net-Zero Energy Buildings using Photovoltaic Installation with Considering Urban Development Plans Requirements	Seyed Sajad Rezaeinasab Abbasali Tayefi Nasrabadi - Somayeh Asadi Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia	51
Remediation of A Clay Soil Contaminated With Dimethyl Phthalate By Using Electrokinetic Method	Hesam Fathali - Ali Raeesi Estabragh Keramatollah.Rezaei Tireh Shabankareh Abdolhossein Hoorfar	69
Laboratory Investigation on Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under wetting and drying cycles	Niloofar Pishvaei - Morteza Jiryaei Sharahi Masoud Amelsakhi	85

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 Hosseininia	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

ISSN 2783-2805

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods 1
Elham Fijani - Sahar Meysami - Morteza Mozafari

Three-Dimensional Numerical Modeling of Interaction of Dip-Slip Fault and Tunnels with Concrete Lining 19
Mohammad Amin Barfehee - Mahda Mortazavi Zanjani
Abbas Soroush

Forecasting Travel Demand using Self-Correlated Moving Average Time Series Methods (Case Study: Qom-Tehran Freeway) 35
Hassan Khaksar - Seyed Ahmad Almasi
Mohammad Mehdi Khabiri
Amir Golroo Hossein Bahmani

Investigating the Potential of Designing Net-Zero Energy Buildings using Photovoltaic Installation with Considering Urban Development Plans Requirements 51
Seyed Sajad Rezaeinasab
Abbasali Tayefi Nasrabadi - Somayeh Asadi
Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia

Remediation of A Clay Soil Contaminated With Dimethyl Phthalate By Using Electrokinetic Method 69
Hesam Fathali - Ali Raeesi Estabragh
Keramatollah.Rezaei Tireh Shabankareh
Abdolhossein Hoorfar

Laboratory Investigation on Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles 85
Niloofar Pishvaei - Morteza Jiryaei Sharahi
Masoud Amelsakhi

Serial No. 41

Vol. 36, No. 1
Spring, 2023