



نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۴۸

۱ ارزیابی هندسه و بررسی تغییرات حجم اشباع و غیر اشباع
آبخوان مشهد - چناران
حسین محمدزاده - راهله شهریار - ناصر حافظی مقدس
اعظم قزی

۱۹ مدل‌های رفتاری با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر موانع
پیاده‌روی در سفرهای شغلی (مطالعه موردی: شهر قزوین)
حمید میرزاحسین - سهیل رضاشعار - فرزاد مرادی

۳۵ تکامل هیدروژنوشیمیایی آبخوان دشت ایرانشهر
رضا جهانشاهی - معصومه نوردی - ناصر اسدی - محمدرضا میربلوچ زهی

۴۹ ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی بتنی طرح شده به روش
طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان
سعید عبدی - حر خسروی - امیرحسین جعفریه

۶۹ ارزیابی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف،
مطالعه موردی: شهر مشهد
محسن کدخدایی - علی عباسی

۸۷ بررسی قابلیت سنسور مدت پرواز گوشی‌های هوشمند در
داده‌برداری فضای داخلی ساختمان
محمد عموشاهی - اصغر میلان - سعید صادقیان - علیرضا قراگوزلو

سر دبیر: محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید حسین محمدزاده	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی 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
دکتر سید محسن کرابی	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر حسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر مجتبی مغربی	دانشیار، 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، دانشگاه متروپولیتن تورنتو

مسئول دفتر نشریه: تکتّم هوشمند

ویراستار ادبی: الهام دهقان

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

<http://www.srlst.com>

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

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

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

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

- ۱ ارزیابی هندسه و بررسی تغییرات حجم اشباع و غیر اشباع آبخوان مشهد - چناران
حسین محمدزاده - راهله شهریاری - ناصر حافظی مقدس - اعظم قزی
- ۱۹ مدل‌های رفتاری با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر موانع پیاده‌روی در سفرهای
شغلی (مطالعه موردی: شهر قزوین)
حمید میرزاحسین - سهیل رضاشعار - فرزاد مرادی
- ۳۵ تکامل هیدروژن‌نوشیمیایی آبخوان دشت ایرانشهر
رضا جهانشاهی - معصومه نوردی - ناصر اسدی - محمدرضا میربلوچ زهی
- ۴۹ ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی بتنی طرح شده به روش طراحی مستقیم بر اساس
تغییر مکان
سعید عبدی - حر خسروی - امیرحسین جعفریه
- ۶۹ ارزیابی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف، مطالعه موردی: شهر مشهد
محسن کدخدایی - علی عباسی
- ۸۷ بررسی قابلیت سنسور مدت پرواز گوشی‌های هوشمند در داده‌برداری فضای
داخلی ساختمان
محمد عموشاهی - اصغر میلان - سعید صادقیان - علیرضا قراگوزلو



Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer*

Research Article

Hossein Mohammadzadeh¹, Raheleh Shahriari², Naser Hafezi Moghaddas³, Azam Ghazi⁴

DOI: [10.22067/jfcej.2024.87150.1287](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.87150.1287)

1. Introduction

Alluvial aquifers are among the primary sources of water supply worldwide. Therefore, evaluating the geometry of an aquifer is crucial not only for identifying the thickness of the alluvium, estimating aquifer storage, and predicting extractable groundwater, but also for investigating changes in the geometry and volume (total, saturated, and unsaturated) of the aquifer over time. Such evaluations are necessary to optimize groundwater resource usage and properly manage aquifers.

Currently, the rate of water withdrawal from aquifers significantly exceeds the rate of groundwater recharge, causing a sharp decline in groundwater levels, particularly in the Mashhad-Chenaran aquifer (MCA). This article aims to:

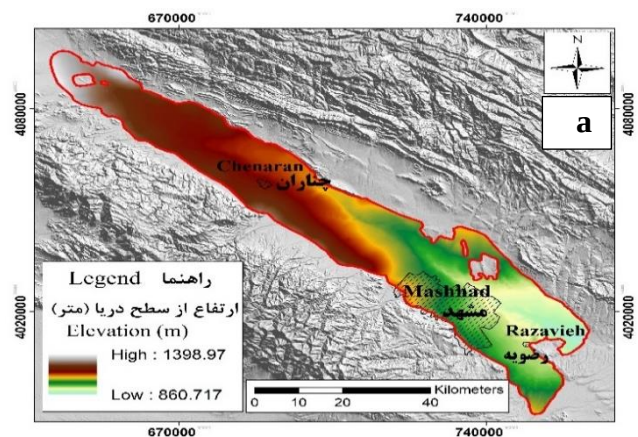
1. Evaluate the geometry of the MCA,
2. Estimate the alluvium thickness of the MCA,
3. Investigate changes in the volume of the saturated part of the MCA over a 30-year period, and
4. Identify areas of the MCA that have experienced a significant drop in water levels.

2. Materials and Methods

To determine the geometry of the aquifer, zoning maps of various levels of the MCA aquifer were prepared, including the ground surface digital elevation map (DEM), the bedrock digital elevation map (BDEM), and the water table digital elevation map (WDEM) (Figure 1). Subsequently, to calculate the volume of the MCA aquifer, several zoning maps were created, including the aquifer thickness map (ATM), the saturated thickness map (STM),

and the unsaturated thickness map (USTM). Using the total surface area of the MCA (2528 km²), the volumes of different aquifer sections (total, saturated, and unsaturated) were determined.

To assess changes in the MCA volume over time, WDEMs were prepared for the years 1991, 2001, 2011, and 2021, based on water level monitoring data from 74 piezometers across the MCA over a 30-year period (from August 1991 to August 2021). Finally, by subtracting the WDEMs of different years from the BDEM of the aquifer and utilizing raster computing capabilities in a GIS environment, saturated and unsaturated thickness zoning maps were generated for each year.



*Manuscript received March 6, 2024, Revised September 16, 2024, Accepted October 6, 2024.

¹ Corresponding author. Professor, Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: mohammadzadeh@um.ac.ir

² Hydrogeologist, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

⁴ Engineering Geologist, Zamin Physic Pouya Consulting Company.

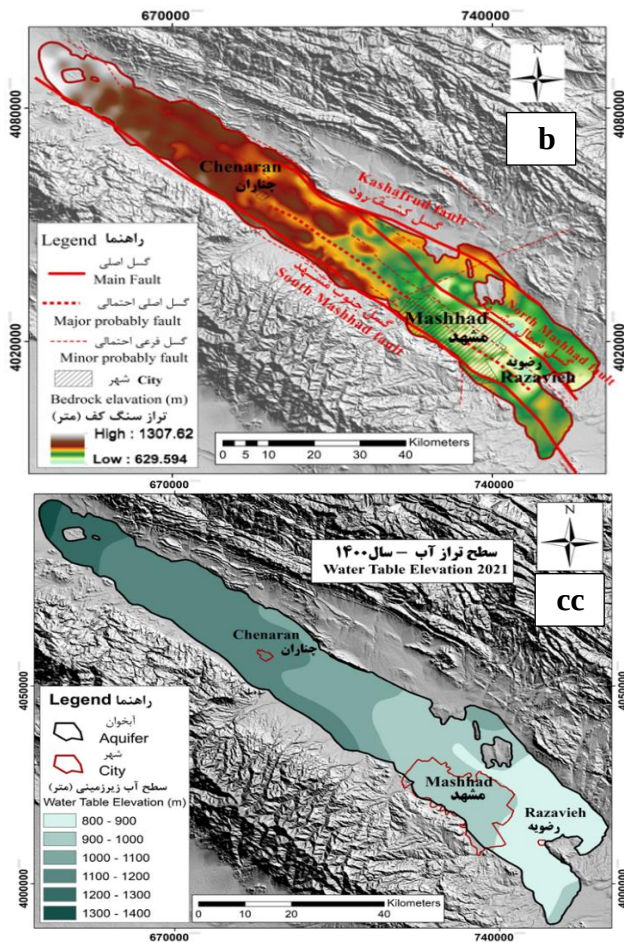


Figure 1 a) Digital Elevation Map (DEM), b) Bedrock Digital Elevation Map (BDEM), and c) Water Table Digital Elevation Map (WDEM) of Mashhad – Chenaran aquifer

3- Results and Discussion

Based on the obtained BDEM, the bedrock morphology was found to be uneven mainly in central part of the Mashhad Plain, between Mashhad and Chenaran. This unevenness is subject to various factors including geology and tectonics events and it can be affected by the north and south fault of Mashhad. So that, the thickness of the alluvium in some places is 300 meters, while in some other places it is near the ground level. The deep part of the MCA is located in the central part of the plain, in the distance between Chenaran and Razavieh (where the city of Mashhad is located). The most of Mashhad's drinking water supply deep wells are located in this area as well. The longitudinal and cross-sections of the aquifer shows that the alluvial MCA is an unconfined aquifer with a single layer, and the groundwater flow from west and northwest to east and southeast direction, which can be confirmed by the prepared water table digital elevation map (WDEM). The prepared maps of changes in saturated and unsaturated thickness of the aquifer (STM and USTM) shows that the thickness of the saturated part of the aquifer has decreased during 1991 to 2021 (Figure 2).

So that, with dropping in the water level, the volume of the saturated part of the aquifer has decreased about 42

billion cubic meters (BCM) over 30 years. The greatest decrease in volume of saturation thickness (about 23 BCM) were made between August 2001 and August 2011, when high number of wells with extensive aquifer exploitation were seen. A comparison of the volume of the saturated part of the aquifer in 2001s and in 2010s shows that during 2011 to 2021, the aquifer was in a better condition than the previous years and it lost less water (about 5 BCM). Although this misleading to the minor positive effect of the previous aquifer balancing projects, but the aquifer may have faced with a decrease in efficiency and withdrawal capacity due to the water table dropping. In other words, it is not possible to the aquifer, which has suffered a continuous and irreversible decline, was able to collect water as before. Also, the examination of the STM shows rising in water level compared to the nearby points in the central part of the aquifer, in the distance between Razavieh and Mashhad, between 2011 and 2021. Although as a result of urban effluents and sewage infiltration to the aquifer and eliminating a number of wells due to the supplied water from beyond MCA catchment area (e.g., from the Doosti Dam), a slight decrease in the rate of water level drop can be seen, however, in general due to the compaction and in turn reduction of specific yield of the aquifer materials, the useful volume and the efficiency of the MCA aquifer was reduced.

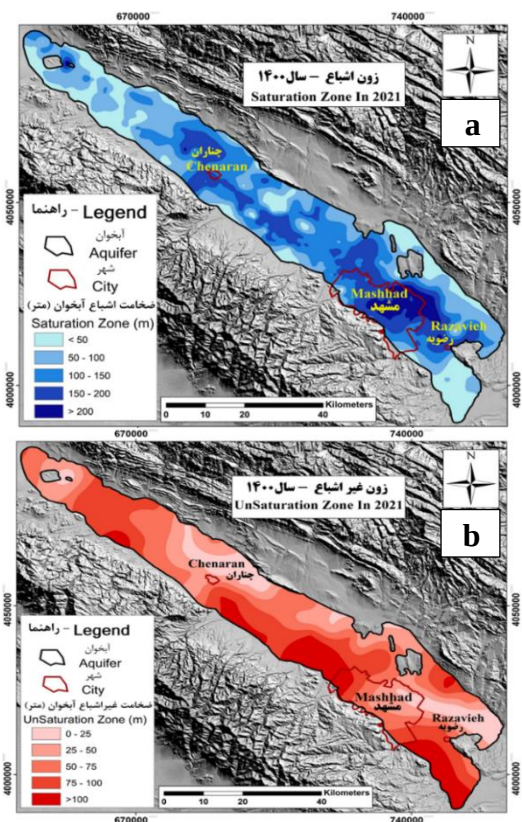


Figure 2 The variation maps of saturated (a) and unsaturated (b) thicknesses (STM and USTM) of Mashhad – Chenaran aquifer

Tabel 1 Changes in thicknesses and volume (total, saturated and unsaturated zones) of Mashhad - Chanaran aquifer during 30 years

	2021	2011	2001	1991
	Unsaturation Zone			
Thickness (m)	65	62	55	49
Volume (BCM)	165	160	137	123
	Saturation Zone			
Thickness (m)	105	107	116	122
Volume (BCM)	265	270	293	307
	Total Aquifer			
Thickness (m)				172
Volume (BCM)				430

4- Conclusions

The results of this investigations show that the total volume of the MCA is about 430 BCM, and the saturated thickness of the MCA has been decreasing over time (Table 1). The volume of the saturated part of the aquifer was decreased from 307 to 265 BCM (about 42 BCM) over the past 30 years (from 1991 to 2021). The largest volume of MCA aquifer withdrawing (about 23 BCM) was occurred during 2001 and 2011 (2.3 BCM yearly in average). Also, the comparison of the changes in the unit hydrograph of the MCA unit, show almost the same decreasing in the volume of the saturated part of the aquifer (40.5 BCM).



ارزیابی هندسه و بررسی تغییرات حجم اشباع و غیر اشباع آبخوان مشهد - چناران*

مقاله پژوهشی

اعظم قزی^(۴)

ناصر حافظی مقدس^(۳)

راهله شهریار^(۲)

حسین محمدزاده^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.87150.1287

چکیده ارزیابی هندسه آبخوان برای تعیین ضخامت آبرفت، تخمین ذخیره آبخوان، پیش‌بینی آب زیرزمینی قابل استحصال و همچنین استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و مدیریت بهتر آبخوان‌ها ضروری است. در این مقاله، هندسه و تغییرات حجم بخش‌های اشباع و غیر اشباع این آبخوان مشهد - چناران در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۴۰۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تعیین هندسه آبخوان، نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سطوح مختلف (سطح آبخوان، ایستابی و سنگ کف آبخوان) تهیه و تغییرات ضخامت آبخوان و حجم آن برآورد شد. نتایج نشان داد، کاهش حجم بخش اشباع در بازه زمانی ۳۰ ساله، ۴۲۰ هزار میلیون مترمکعب است، که روند کاهش هیدروگراف معرف آبخوان آن را تأیید می‌کند. بیشترین کاهش حجم بخش اشباع در دهه ۸۰ به دلیل برداشت زیاد از آبخوان صورت گرفته است، اما در دهه ۹۰ آبخوان وضعیت بهتری نشان می‌دهد. هر چند در نتیجه نفوذ پساب و فاضلاب شهری به آبخوان و همچنین انتقال آب از سد دوستی، در برخی نقاط کاهش جزئی در سرعت افت سطح ایستابی دیده می‌شود، اما به دلیل فشردگی و کاهش آبدهی ویژه مواد سفره، آبدهی آبخوان کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی هندسه آبخوان، ضخامت آبرفت، حجم اشباع، مشهد - چناران.

Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer

Hossein Mohammadzadeh

Raheleh Shahriari

Naser Hafezi Moghaddas

Azam Ghazi

Abstract The assessment of aquifer geometry is crucial to determine the thickness of the alluvium, to estimate the aquifer storage, to predict extractable groundwater, to optimize groundwater resource usage and to better manage aquifer. In this article, the geometry of the Mashhad – Chenaran aquifer and the changes in the volume of its saturated and unsaturated parts were investigated over a period of 30 years (1991-2021). To determine the geometry of the aquifer, digital zoning maps of different surfaces (including the aquifer surface, water table level, and bedrock surface) were prepared, and the aquifer thickness and the volume of the aquifer were estimated. According to the results, the volume reduction in the saturated part is about 42 BCMs over 30 years, as confirmed by decreasing trend of the aquifer unit-hydrograph. The maximum decrease in saturated volume accrued in the 2001 due to large withdrawals. However, in the 2011, the aquifer's condition was improved. Although there was a slight reduction in the water level drop rate in some parts of the aquifer due to the infiltration of urban effluents and sewage, as well as the water from the Doost dam, the aquifer yield decreased due to compaction, which in turn reduced the specific yield of the aquifer materials.

Key words Aquifer Geometry, Alluvium Thickness, Saturated volume, Mashhad- Chenaran.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۲/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استاد، گروه پژوهشی تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

Email: mohammadzadeh@um.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌های زیرزمینی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۳) استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۴) دکتری زمین‌شناس مهندسی، شرکت مهندسان مشاور زمین فیزیک پویا، مشهد.

مقدمه

آبخوان‌های آبرفتی یکی از منابع اصلی تأمین آب در اکثر نقاط دنیا است. از این رو، شناخت، ارزیابی و هندسه آبخوان، نه تنها برای شناسایی ضخامت آبرفت، برآورد ذخیره آبخوان، و پیش‌بینی آب‌های زیرزمینی قابل استحصال، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1]، بلکه بررسی روند تغییرات هندسه و حجم (کل، اشباع و غیراشباع) آبخوان در طی زمان نیز در راستای استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح و سامان‌دهی به وضع موجود آبخوان‌ها، بسیار ضروری است. منابع آب زیرزمینی ذخایر استراتژیک ارزشمندی هستند که شکل‌گیری آنها طی سالیان طولانی صورت می‌پذیرد و باید برای آن برنامه‌ریزی بلندمدت انجام شود. امروزه برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، بیش از میزان آب تجدیدپذیر، نه تنها منجر به افت شدید سطح ایستابی آبخوان‌ها، که به نوبه خود منجر به کاهش آبدهی چاه‌ها، افزایش هزینه‌های پمپاژ و استحصال آب، کاهش کیفیت آب، خشک شدن تالاب‌ها، فرونشست زمین و دیگر اثرات منفی بر روی محیط زیست شده است [2,3]، بلکه نگرانی‌هایی را در مدیریت منابع آب زیرزمینی به وجود آورده است و آن را به یکی از چالش‌های مهم کشور تبدیل کرده است. بیلان آب کشور نیز نشان می‌دهد که مقدار تغذیه آب‌های زیرزمینی کمتر از حجم برداشت از آبخوان‌ها بوده و این امر باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های کشور به خصوص در آبخوان دشت مشهد - چناران شده است [4,5].

لذا بررسی روند تغییرات ذخایر آب زیرزمینی، معیاری ضروری برای مقایسه میزان باقی مانده منابع آب، توسعه پایدار و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی است [6]. آگاهی از روند تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و روند تغییرات هندسه و حجم آبخوان، سبب درک و شناخت بهتر مدیران از وضعیت کنونی و گذشته آبخوان به منظور مدیریت صحیح حال و آینده آن خواهد شد [7]. نظارت بر آب موجود باقی مانده در سفره زیرزمینی به درک کامل تاریخچه آن بستگی دارد تا مبنایی مناسب برای پیش‌بینی‌های آینده فراهم کند. به منظور اهداف مدیریتی آبخوان‌ها، مطالعاتی در دنیا [8,9,10,11] و ایران [12] در رابطه با تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی [13]، حجم مخزن و میزان بهره‌برداری از دشت‌ها صورت گرفته است. اما هدف از این مقاله، ارزیابی هندسه آبخوان مشهد - چناران، جهت شناسایی

ضخامت آبرفت و برآورد حجم ذخیره آبخوان و همچنین بررسی تغییرات ضخامت و حجم بخش اشباع آبخوان در یک بازه زمانی ۳۰ ساله، جهت پیش‌بینی وضع آینده در قسمت‌های مختلف آبخوان است، که نوآوری این مقاله محسوب می‌گردد. همچنین در این مطالعه، مناطقی از آبخوان که افت سطح آب بیشتری را تجربه کرده‌اند و تشدید کننده بحران برای آینده هستند، شناسایی شده که همراه تغییرات برآورد حجم باقی مانده بخش اشباع آبخوان می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده آبخوان مفید باشد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز آبخوان دشت مشهد - چناران، با مساحت ۹۹۵۷ کیلومتر مربع و با موقعیت جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی، دارای سازندهای زمین‌شناسی متنوع (آذرین، دگرگونی، رسوبی کربناته - رسوبی غیرکربناته و آبرفت‌ها) است که بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار هستند [18]. دشت مشهد بخشی از پهنه فرونشست مشهد - قوچان است که در شمال شرق آن رشته‌کوه‌های کپه داغ و در جنوب غرب آن کوه‌های بینالود واقع شده است (شکل ۱ - الف). مرز شمال شرقی این فرونشست، گسل و رودخانه کشف رود و مرز جنوب غربی آن گسل جنوب مشهد است [14]. در اثر عملکرد گسل‌های مزبور و فرونشست دشت، ضخامت قابل توجهی از رسوبات آبرفتی در سطح آن انباشته شده و آبخوان گسترده‌ای را تشکیل داده است [15]. رسوبات آبرفتی دشت مشهد تحت تأثیر دو حوضه رسوب‌گذاری سازندهای سخت رسوبی (کپه داغ) و فیلیت‌های مشهد (بینالود) قرار دارد [16]. بخش زیادی از سطح دشت مشهد را رسوبات ژوراسیک و کرتاسه به خود اختصاص داده‌اند. واحدهای سنگی این دوران در ارتفاعات بینالود و در غرب شهر مشهد عمدتاً آذرین و دگرگونی بوده و در بخش‌های شمالی و شرقی (حوضه رسوبی کپه داغ) سنگ‌های رسوبی است. گسل‌های شمال غرب - جنوب شرق منطقه (گسل شمال و جنوب مشهد، گسل شان‌دیز - سنگ بست)، به عنوان اصلی‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی، در جهت جریان آب زیرزمینی و گاهی بر کمیت و کیفیت آب آبخوان تأثیرگذار است. عامل اصلی کنترل‌کننده رفتار منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت مشهد پیچیده، متنوع و درک رفتار آن در بخش‌های مختلف

[20].

جدول ۱ منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی مشهد - چناران
(۱۳۹۹-۱۴۰۰)

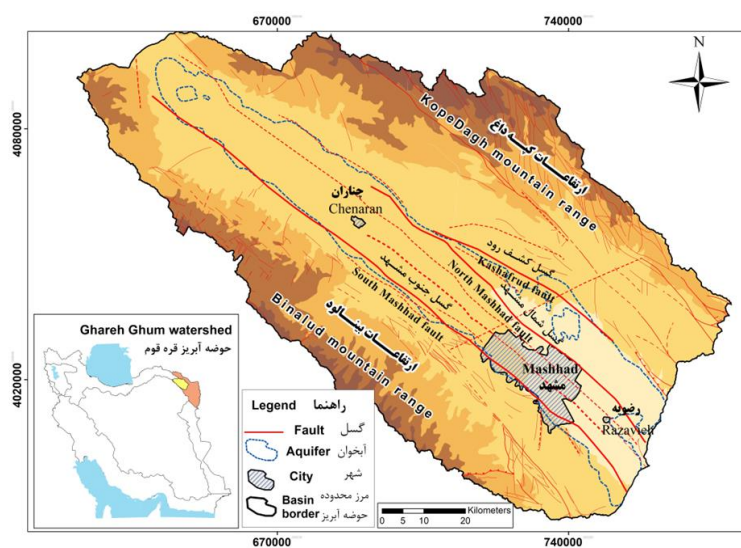
نوع منبع آبی	چاه	قنات	چشمه	جمع
تعداد	۵۷۹۷	۱۰۰۸	۶۶۸	۷۴۷۳
برداشت در سال	۶۰۲/۶	۵۹/۱	۳۳/۳	۶۹۵

*: اعداد تخلیه از منابع برحسب میلیون مترمکعب است.

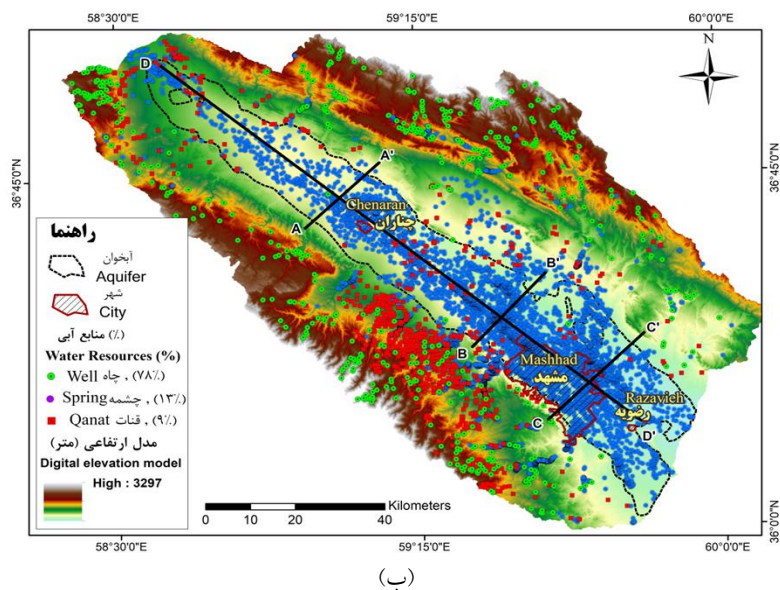
آبخوان مشهد - چناران، با وسعت حدود ۲۵۲۸ کیلومترمربع، مهم‌ترین آبخوان استان خراسان رضوی از لحاظ وسعت و میزان بهره‌برداری است [21]، که متأسفانه به علت برداشت زیاد در طی سالیان متمادی، گاهی با بیش از هزار میلیون مترمکعب برداشت سالانه [20]، با افت شدید سطح ایستابی روبه‌رو شده است. هر چند که اولین آگهی ممنوعیت دشت مشهد - چناران در سال ۱۳۴۸ ابلاغ شد، اما به دلیل روند رو به رشد حفاری چاه‌ها و بهره‌برداری از منابع آب موجود هیدروگراف معرف آبخوان مشهد روند نزولی سطح آب را نشان می‌دهد (شکل ۲). مجموع افت سطح آب زیرزمینی طی ۳۰ سال آمار حاصل از شبکه رفتارسنجی دشت مشهد - چناران، حدوداً ۱۶/۲ متر و متوسط افت سالانه برابر ۰/۵۴ متر هست. همان‌طور که هیدروگراف نیز نشان می‌دهد بیشترین کاهش حجم آبخوان و کسری مخزن در سال‌های بین ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ به علت توسعه کشاورزی و افزایش سطوح زیر کشت رخ داده است.

دشوار است. مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده هیدرولیک آبخوان دشت مشهد شامل ساختارهای زمین‌شناسی، موانع زیرزمینی، عارضه‌نگاری سنگ کف، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و منابع تغذیه‌کننده آبخوان می‌باشد [17].

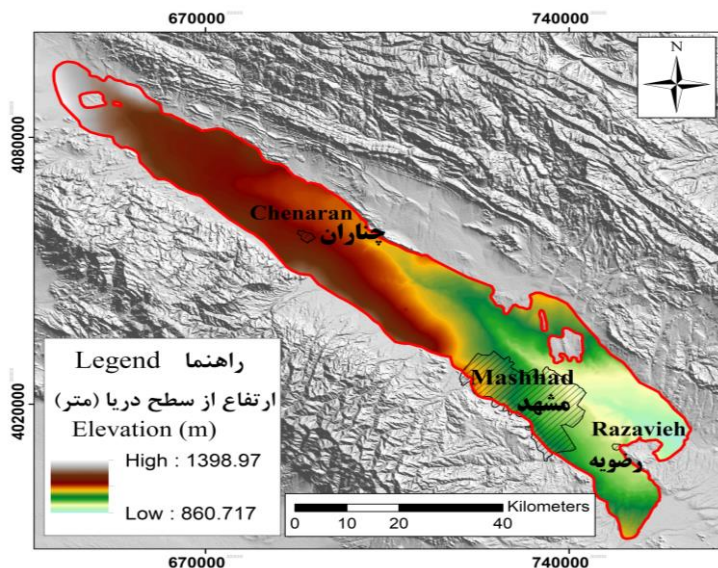
ریخت‌شناسی سطحی حوضه آبریز آبخوان دشت مشهد - چناران (شکل ۱ - ب)، نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین ارتفاع حوضه آبریز، ۳۲۹۷ و ۸۵۸ متر از سطح دریا است. ریخت‌شناسی و شکل ناهمواری‌های سطح زمین یکی از عوامل تعیین‌کننده هندسه آبخوان هست که می‌توان آن را در غالب مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Map (DEM) نشان داد که این نقشه رقومی رستری، حاوی تمامی اطلاعات ارتفاعی تمامی نقاط یک محدوده است. نقشه پهنه‌بندی مدل رقومی ارتفاع سطح آبخوان مشهد، تهیه شده از روی نقشه‌های عارضه‌نگاری ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری [1]، نشان می‌دهد که ریخت‌شناسی سطح آبخوان مشهد - چناران (شکل ۱ - ج) حدود ۵۴۰ متر اختلاف ارتفاع دارد. قسمت شمال غربی چناران با ارتفاعی حدود ۱۴۰۰ متر از سطح دریا، مرتفع‌ترین بخش آبخوان و قسمت جنوب شرقی با ارتفاع ۸۶۰ متر از سطح دریا پست‌ترین بخش آبخوان را تشکیل می‌دهد. ریخت‌شناسی سنگ کف آبخوان بسیار ناهموار است به گونه‌ای که در برخی مناطق سنگ کف نزدیک سطح زمین بوده در برخی مناطق ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد [19]. (جدول ۱) و (شکل ۱ - ب) منابع آب زیرزمینی دشت مشهد - چناران را نشان می‌دهد



(الف)

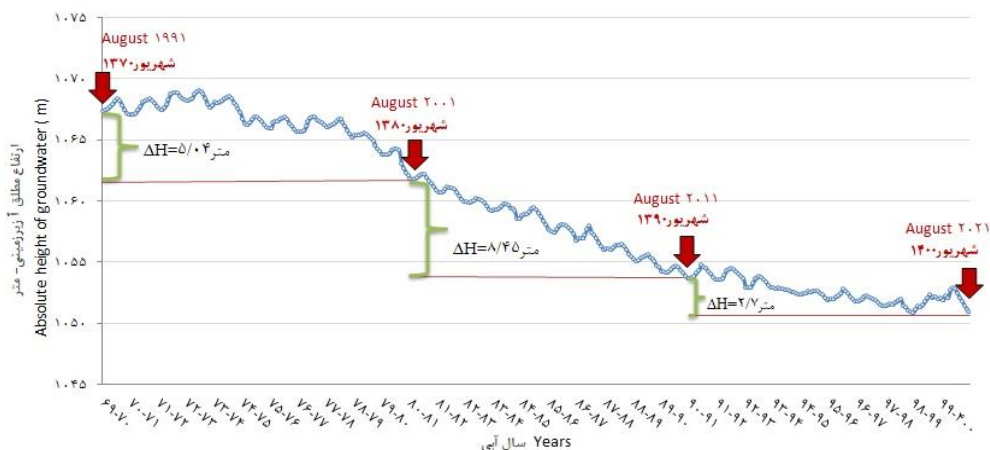


(ب)



(ج)

شکل ۱ الف) موقعیت حوزه آبریز مشهد - چناران، ب) ریخت‌شناسی و موقعیت منابع آب حوزه آبریز و ج) مدل رقومی ارتفاع (DEM) سطح آبخوان مشهد - چناران



شکل ۲ هیدروگراف معرف آبخوان مشهد - چناران از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰

مواد و روش

به منظور تعیین هندسه آبخوان، نقشه‌های پهنه‌بندی سطوح مختلف آبخوان شامل نقشه رقومی ارتفاع سطح آبخوان (Ground Surface Digital Elevation Map (GDEM))، نقشه تراز سنگ کف یا نقشه رقومی ارتفاع سنگ کف آبخوان (Bedrock Digital Elevation Map (BDEM))، نقشه تراز ایستابی/ سطح آب زیرزمینی آبخوان (WDEM⁴) (مطابق 1) تهیه شد. سپس برای تعیین حجم (کل، اشباع و غیر اشباع) آبخوان، ابتدا نقشه‌های پهنه‌بندی (ضخامت آبخوان (ATM⁵))، ضخامت اشباع آبخوان (STM⁶) و ضخامت غیر اشباع آبخوان (USTM⁷) تهیه و در نهایت با استفاده از سطح کل آبخوان مشهد (۲۵۲۸ کیلومتر مربع)، و ضریب ذخیره محاسبه شده برای آبخوان (هنوز منتشر نشده است)، حجم بخش‌های مختلف آبخوان (کل، اشباع و غیر اشباع) محاسبه شد.

برای تهیه نقشه رقومی ارتفاع سنگ کف (BDEM) آبخوان، از اطلاعات زیرسطحی موجود شامل پروفیل‌های ژئوالکتریک [22] برداشت شده طی سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۹، چاه‌های تأمین آب شرب و کشاورزی و لاگ گمانه‌های اکتشافی استفاده شد. مطالعات ژئوالکتریک با هدف شناسایی آبخوان طی سال‌های متمادی در دشت مشهد صورت گرفته و محدوده آبخوان را به خوبی پوشش داده است. همچنین از اطلاعات لاگ گمانه‌ها و چاه‌های حفاری شده در سطح آبخوان مشهد (تعداد ۶۰۰۰ چاه بهره‌برداری کشاورزی و گمانه‌های اکتشافی) و از اطلاعات حفاری چاه بهره‌برداری تأمین آب شرب موجود در دشت مشهد، که ۴۵۳ حلقه چاه آن به سنگ کف برخورد کرده است [23]، برای تعیین عمق سنگ کف استفاده شد. با توجه به تمرکز چاه‌های عمیق حفر شده در مرکز آبخوان و پراکندگی نامتوازن در کل آبخوان، به روش زیر عمل شد. در مناطقی که چاه‌ها تا سنگ کف حفر شده‌اند، عمق چاه به عنوان ضخامت آبخوان و در سایر نقاط از نتایج تفسیر ژئوفیزیکی، حداقل ضخامت آبخوان محاسبه گردید و بر این اساس نقشه تراز سنگ کف (BDEM) با مرجعیت نقشه رقومی ارتفاعی سطح زمین (DEM) تهیه شد. در مرحله بعد از تفاضل بین نقشه رقومی سطح زمین و نقشه تراز سنگ کف و با استفاده از روش‌های درون‌یابی در (GIS⁸) نقشه پهنه‌بندی ضخامت آبرفت (ATM) تهیه و حجم کل آبخوان با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد.

$$(1) \text{ حجم کل آبخوان } (V_t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (L_{sij} - L_{bij}) * a$$

که در آن V_t حجم کل آبخوان، L_{sij} (تراز سطح زمین در لایه ستون از لایه ردیف لایه (متر))، L_{bij} (تراز سنگ کف در لایه ستون از لایه ردیف لایه (متر)) است و a مساحت سلول (مترمربع) است.

برای تهیه حجم بخش اشباع آبخوان و بررسی تغییرات حجم آن در طی زمان، ابتدا داده‌های پایش کمی سطح آب زیرزمینی در ۷۴ پیزومتر موجود در گستره آبخوان مشهد - چناران، در بازه زمانی ۳۰ ساله (هر ۱۰ سال (شهریور ۱۳۷۰، شهریور ۱۳۸۰، شهریور ۱۳۹۰ و شهریور ۱۴۰۰)) جمع‌آوری و با استفاده از این داده‌ها، نقشه‌های رقومی تراز سطح ایستابی (WDEM) برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ تهیه شد. سپس با کم کردن نقشه رقومی ارتفاع سنگ کف (BDEM) آبخوان از نقشه‌های رقومی تراز سطح ایستابی (WDEM) طی سال‌های مختلف، با استفاده از قابلیت محاسباتی رستر ۹ در محیط GIS، نقشه پهنه‌بندی ضخامت اشباع برای هر یک از سال‌ها، تهیه و حجم بخش اشباع آبخوان با استفاده از رابطه (۲) به دست آمد.

$$(2) \text{ حجم بخش اشباع آبخوان } (V_s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (L_{wij} - L_{bij}) * a$$

که در آن V_s حجم کل بخش اشباع آبخوان، L_{wij} (تراز آب زیرزمینی در لایه ستون از لایه ردیف لایه (متر)) و L_{bij} (تراز سنگ کف در لایه ستون از لایه ردیف لایه (متر)) و a مساحت سلول (مترمربع) است.

به روش مشابه با کم کردن نقشه‌های رقومی تراز سطح ایستابی (WDEM) از نقشه رقومی ارتفاعی سطح زمین (DEM)، نقشه پهنه‌بندی ضخامت غیر اشباع برای سال‌های مختلف تهیه و حجم بخش غیر اشباع آبخوان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد. لازم به ذکر است که بنا به دلایلی مانند افت سطح آب زیرزمینی و خشک شدن، در تعداد شش چاه اکتشافی، پایش رفتارسنجی آبخوان در سال ۱۴۰۰ صورت نگرفته است.

$$(3) \text{ حجم بخش غیر اشباع آبخوان } (V_{us}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (L_{sij} - L_{wij}) * a$$

که V_{us} حجم کل بخش غیر اشباع آبخوان، L_{wij} (تراز آب زیرزمینی در لایه ستون از لایه ردیف لایه (متر)) و L_{sij} (تراز سطح زمین در لایه ستون از لایه ردیف لایه (متر)) است. a مساحت سلول (مترمربع) است.

نتایج و بحث

در بررسی تغییرات حجم آب باید در مرحله اول هندسه آبخوان شناسایی می‌شد که بتوان در مراحل تغییرات حجم بخش اشباع آبخوان را محاسبه کرد. نتایج به دست آمده در سه بخش ارائه شده است.

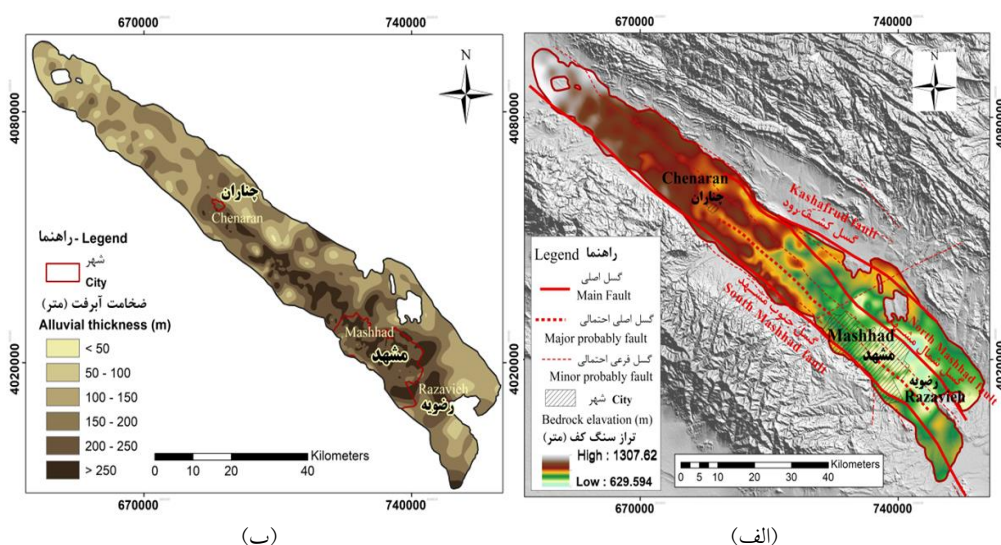
تغییرات ریخت‌شناسی تراز سنگ کف (BDEM) و

ضخامت آبرفت آبخوان مشهد - چناران

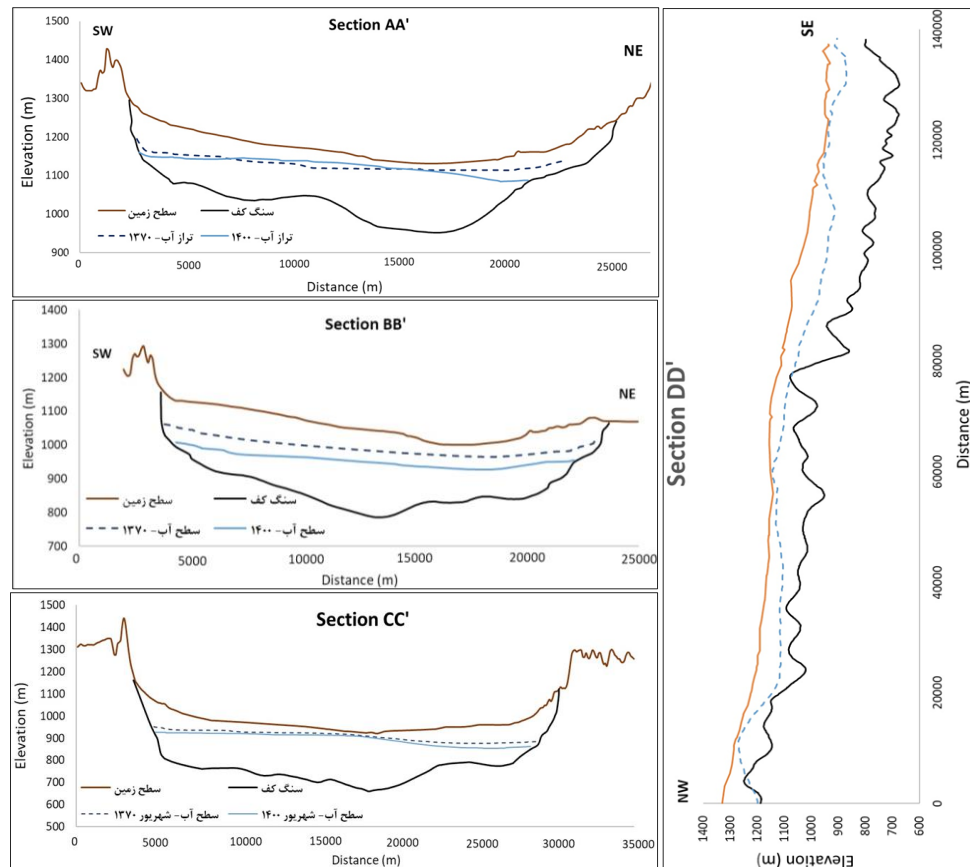
نقشه تراز سنگ کف به دست آمده (BDEM) و تغییرات ضخامت آبرفت آبخوان در (شکل ۳) نشان داده شده است. ریخت‌شناسی سنگ کف آبخوان بسیار ناهموار بوده و تابع عوامل مختلفی از جمله زمین‌شناسی و زمین‌ساخت هست. این ناهمواری‌ها عمدتاً در مرکز دشت مشهد در فاصله بین مشهد تا چناران دیده می‌شود که می‌تواند متأثر از گسلش شمال و جنوب مشهد باشد. در برخی نقاط، سنگ بستر نزدیک سطح زمین و در برخی نقاط ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد. بررسی ضخامت آبرفت در آبخوان نشان می‌دهد بیشتر آبخوان مشهد ضخامتی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر دارد و ضخامت آبرفت در دو سمت شمال شرق و جنوب غرب با نزدیک شدن به واحدهای سنگی ارتفاعات کپه داغ و بینالود کاسته می‌شود. قسمت عمیق آبخوان مشهد در قسمت مرکزی دشت و در فاصله بین چناران و رضویه (که شهر مشهد نیز بر روی همین قسمت عمیق آبخوان قرار دارد) واقع شده است و بیشتر چاه‌های عمیق تأمین آب شرب شهر مشهد نیز در این ناحیه متمرکزند و برداشت از آبخوان بیشتر در این نواحی صورت می‌گیرد. این مسئله می‌تواند متأثر از گسل‌های

موجود در جنوب دشت مشهد باشد که باعث فرونشست بیشتر دشت و افزایش ضخامت آبرفت شده است.

تغییرات ضخامت آبرفت آبخوان، در مقطع طولی و چند مقطع عرضی در شکل (۴) دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. سطح آب زیرزمینی در مقطع AA' واقع در فاصله بین چناران تا ابتدای آبخوان و با ضخامت میانگین آبرفت ۱۵۰ متر در فاصله کمتری از سطح زمین است و در مقایسه تراز آب بین سال ۱۳۷۰ و ۱۴۰۰ افت کمتری را نشان می‌دهد؛ اما سطح آب زیرزمینی (آخرین آمار موجود) در مقطع BB' واقع در قسمت مرکزی آبخوان با ضخامت بین ۲۰۰-۳۰۰ متر، در عمق بیشتری واقع شده است و به علت برداشت‌های بیشتر در این قسمت بیشترین افت سطح آب ۳۰ ساله در این منطقه دیده می‌شود. قسمت مرکزی آبخوان، با توجه به گسترش و کشیدگی شهر مشهد به سمت مرکز آبخوان و قرار داشتن صنعت و کشاورزی شهر مشهد در این قسمت، به علت وجود چاه‌های بیشتر و اضافه برداشت در این منطقه بحرانی‌ترین بخش آبخوان به نظر می‌رسد. در مقطع CC' که از مرکز شهر مشهد عبور و در قسمت عمیق آبخوان واقع شده است، سطح آب زیرزمینی درست است که به طور کلی نسب به سال ۱۳۷۰ افت کمی نشان می‌دهد اما در مقایسه ده ساله سطح آب در سال ۱۴۰۰ در مقایسه با سال ۱۳۹۰ (شکل ۷) در برخی قسمت‌ها نسبت به اطراف کمی بالاآمدگی نشان می‌دهد که همان طور که در مطالعات قبلی بیان شده، دلیل آن می‌تواند نفوذ پساب‌ها و فاضلاب شهری و یا آب انتقالی از سد دوستی باشد [24,25].



شکل ۳ الف) نقشه تراز سنگ کف (BDEM) و ب) نقشه ضخامت آبخوان مشهد - چناران



شکل ۴ تغییرات ارتفاع سطح زمین، سطح ایستابی و سنگ‌بستر آبخوان مشهد - چناران در مقطع طولی و سه مقطع عرضی (سال ۱۳۷۰ و ۱۴۰۰)
(راستای مقاطع در شکل ۱ - ب نشان داده شده است)

برای آبخوان مشهد - چناران (شکل ۵) نشان می‌دهد، در ابتدای آبخوان و در قسمت شمال غربی آبخوان، آب در سطح تراز بالاتری نسبت به انتهای آن قرار دارد و جهت جریان آب از ابتدای آبخوان (شمال غربی) به سمت انتهای آن (جنوب شرقی) است. تراز آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ در قسمت مرکزی آبخوان تغییرات بیشتری را تجربه کرده است که با توجه به اینکه بیشترین تخلیه و چاه‌های بهره‌برداری از سطح آبخوان در این منطقه قرار دارند، پدیده‌ای دور از انتظار نیست. شکل مقطع BB' (شکل ۴) هم تأییدی بر این مطلب می‌باشد.

بررسی آمارهای بهره‌برداری از منابع آبی آبخوان مشهد و مقایسه آن با افت سطح آب زیرزمینی (شکل ۶) نیز نشان می‌دهد که بیشترین بهره‌برداری از ذخایر زیرزمینی آبخوان مشهد - چناران در بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ صورت گرفته است. که به دلیل نگرش ویژه کشور به توسعه کشاورزی به‌منظور تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به ازدیاد بوده است [28] که در نتیجه آن که با کاهش زیاد حجم بخش اشباع آبخوان نیز

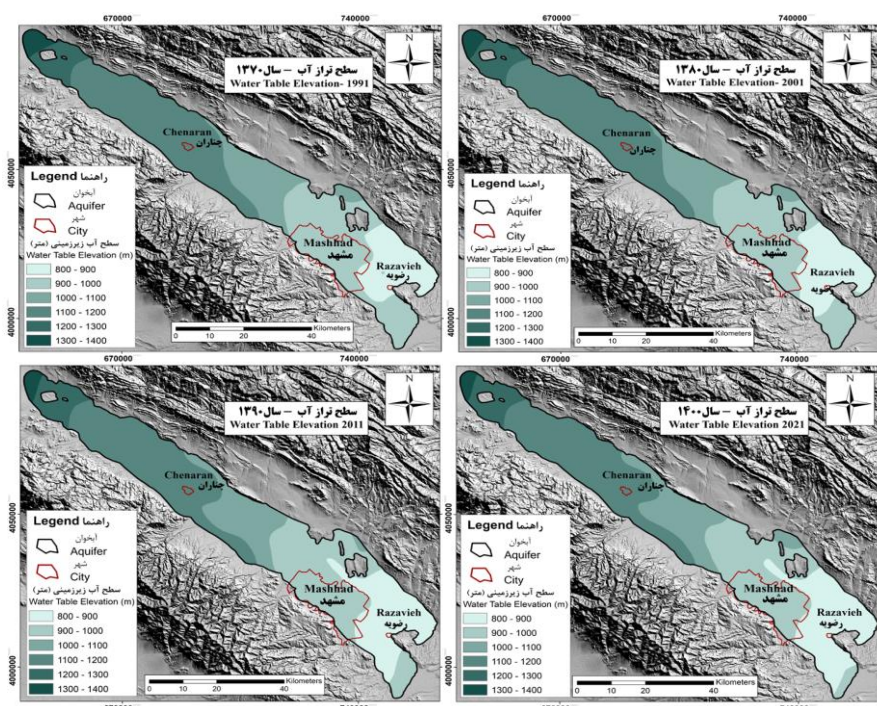
مقطع DD' که بیانگر ابتدا تا انتهای آبخوان است، تغییرات سطح آب زیرزمینی و ناهمواری سنگ کف در مقطع طولی آبخوان را به خوبی نشان می‌دهد به طوری که بالاآمدگی و افت سطح آب زیرزمینی نسبت به سنگ کف در سراسر آبخوان مشخص است (نمایش تغییرات شدیدتر سنگ بستر در مقطع طولی DD' نسبت به مقاطع عرضی AA', BB' و CC' به دلیل اختلاف در مقیاس افقی هست). بررسی مقاطع ضخامت آبرفت و ضخامت اشباع آبخوان نشان می‌دهد که آبخوان آبرفتی مشهد از نوع آزاد و به صورت تک لایه است و جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان از غرب و شمال غرب به سمت شرق و جنوب شرق است و تأییدی بر مطالعات گذشته می‌باشد [26,27].

تغییرات تراز سطح ایستابی مشهد - چناران در طی ۳۰ سال گذشته (۱۳۷۰ - ۱۴۰۰)

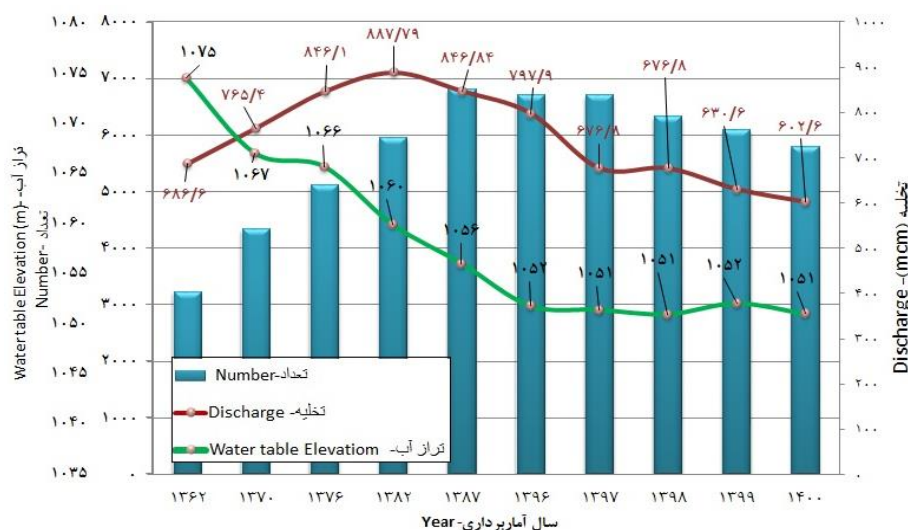
نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سطح ایستابی (WDEM) تهیه شده

تعداد ۱۷۲۸ حلقه در سال ۱۴۰۰ رسیده است. میزان تخلیه و بهره‌برداری از آبخوان مشهد روند کاهشی داشته است (شکل ۶)، که به دلیل کاهش دبی و بازدهی چاه‌ها است. این مسئله می‌تواند به آن معنی باشد که منابع آب زیرزمینی آبخوان به خاطر فشرده‌گی مواد سفره و کاهش حجم مفید آبخوان با کاهش آبدی مواجه شده‌اند، هر چند که طرح‌های تعادل بخشی آبخوان به میزان جزئی منجر به کاهش سرعت افت سطح ایستابی شده باشند.

منطبق است. حجم بالای تخلیه آب در سال ۱۳۸۲ در مقایسه با ۱۳۸۷، علی‌رغم افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۳۸۷، به دلیل در نظر نگرفتن تعداد قابل توجهی از چاه‌ها در آمار سال ۱۳۸۲ بوده است. که افزایش آمار تعداد چاه‌ها از سال ۱۳۸۷ به بعد ناشی از تصویب قانون تعیین تکلیف چاه‌های غیر مجاز و صدور پروانه بهره‌برداری برای آن‌ها است [20]. آمارهای ۵ سال منتهی به سال ۱۴۰۰ نیز نشان می‌دهد تعداد چاه‌های غیر مجاز در سطح دشت مشهد از ۲۵۲۵ حلقه چاه در سال ۱۳۹۶ به



شکل ۵ نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سطح ایستابی (WDEM) آبخوان مشهد - چناران برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۰۰



شکل ۶ روند بهره‌برداری در مقابل افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری و کاهش تراز سطح ایستابی آبخوان مشهد - چناران

تغییرات ضخامت اشباع و غیر اشباع آبخوان

با در اختیار داشتن نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سنگ کف (BDEM) و پهنه‌بندی تراز سطح ایستابی (WDEM)، نقشه‌های پهنه‌بندی ضخامت اشباع آبخوان مشهد در سال‌های (۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰) تهیه شد (شکل ۷). بررسی تغییرات ضخامت و حجم اشباع و غیر اشباع (جدول ۲)، نشان می‌دهد که ضخامت و حجم بخش اشباع آبخوان طبق انتظار در طی این سال‌ها روند کاهشی داشته است. به طوری که با افت تراز آب زیرزمینی در سطح آبخوان، حجم بخش اشباع آبخوان در طی ۳۰ سال، حدود ۴۲ میلیارد متر مکعب کاهش داشته است. بیشترین کاهش ضخامت اشباع در اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بین شهریور ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۰، به میزان ۲۳ میلیارد مترمکعب بوده است که در طی این سال‌ها چاه‌ها و میزان بهره‌برداری از آبخوان بیشتر بوده است. از آنجایی که آبخوان شکل هندسی منظم ندارد و به صورت یک استوانه نیست؛ بدیهی است که تغییرات ضخامت غیر اشباع با تغییرات ضخامت اشباع برابر نیست. اما کاهش حجم بخش اشباع برابر با افزایش بخش غیر اشباع است و دلیل این افزایش برداشت‌ها توسعه کشاورزی و افزایش سطح زیر کشت در طی این سال‌ها بنا به دلایلی که در بالا عنوان شد می‌باشد.

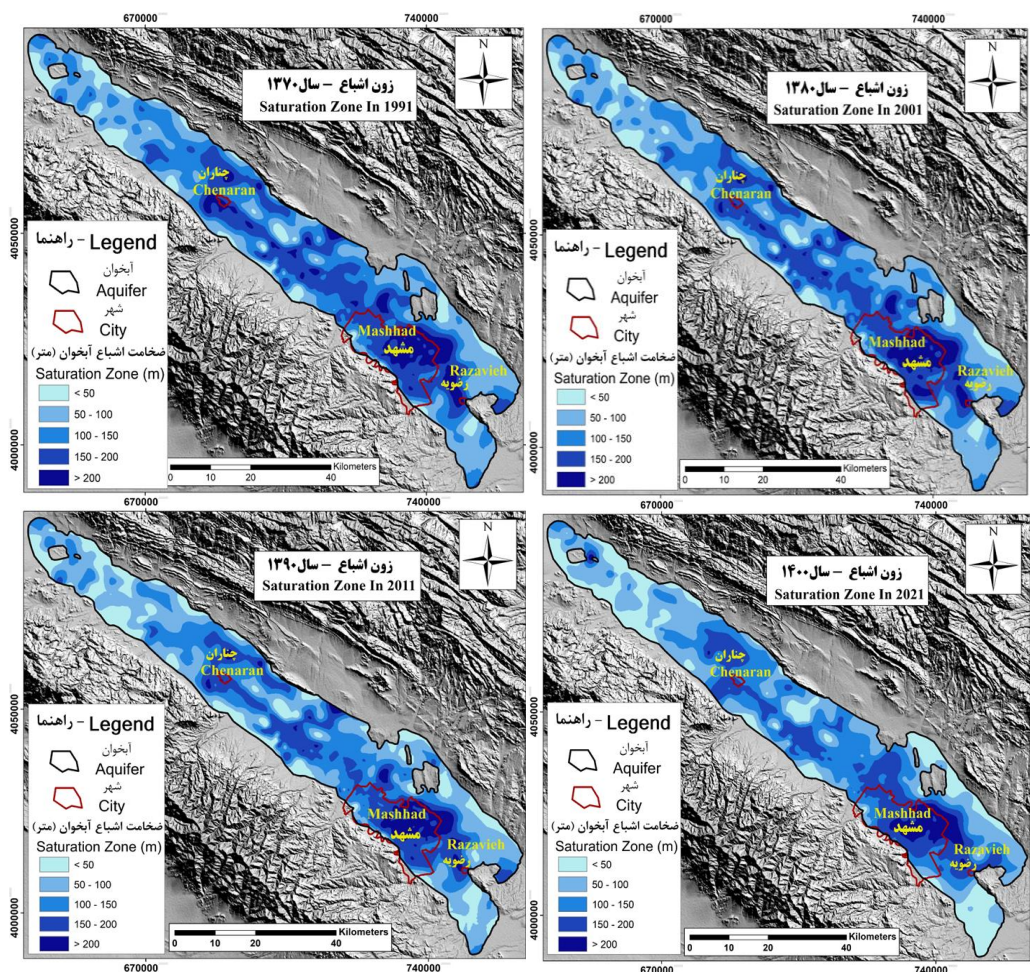
در مقایسه حجم قسمت اشباع آبخوان در دو دهه ۸۰ و ۹۰،

از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ آبخوان در وضعیت بهتری نسبت به گذشته قرار داشته است و حجم کمتری آب (حدود ۵۰۰۰ میلیون مترمکعب) از دست داده است. یکی از دلایل آن می‌تواند توجه بیشتر به مسئله حفاظت و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی با رویکرد توسعه پایدار در برنامه پنجم توسعه کشور (۱۳۹۰ - ۱۳۹۴) و همچنین تصویب قانون اجرای طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور با هدف متعادل کردن میزان برداشت آب در سال ۱۳۹۳ باشد. اما علی‌رغم تلاش‌های وزارت نیرو طی ۵ سال اخیر در چارچوب طرح احیا و تعادل بخشی، روند تراز آب‌های زیرزمینی همچنان نزولی است [29]. که ممکن است آبخوان با کاهش بازدهی مواجه شده باشد. کاهش شیب نمودار افت تراز سطح ایستابی اگر چه می‌تواند گویای نزدیک شدن به شرایط تعادل آبخوان (برابری برداشت خالص با تغذیه خالص) باشد، اما با افت تراز سطح ایستابی، به تدریج توان برداشت از آبخوان نیز کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر نمی‌توان از آبخوانی که دچار افت مستمر و برگشت‌ناپذیر شده است مانند قبل آب برداشت نمود. بنابراین با عدم اجرای برنامه تعادل بخشی نیز بعد از مدتی کاهش شیب افت تراز آبخوان را خواهیم داشت. افزایش افت سطح ایستابی در آبخوان با وجود کنترل برداشت‌های غیر مجاز، نشان از کاهش توان برداشت چاه‌های بهره‌برداری مجاز است.

جدول ۲ تغییرات حجم (کل، اشباع و غیر اشباع) آبخوان مشهد - چناران در طی ۳۰ سال

شهریور ۱۴۰۰ August 2021	شهریور ۱۳۹۰ August 2011	شهریور ۱۳۸۰ August 2001	شهریور ۱۳۷۰ August 1991		
۶۵	۶۲	۵۵	۴۹	متوسط ضخامت (متر) Medium thickness (m)	بخش غیر اشباع Un saturation Zone
۱۶۵	۱۶۰	۱۳۷	۱۲۳	حجم Volume (هزار میلیون مترمکعب)	
۱۰۵	۱۰۷	۱۱۶	۱۲۲	متوسط ضخامت (متر) Medium thickness (m)	بخش اشباع Saturation Zone
۲۶۵	۲۷۰	۲۹۳	۳۰۷	حجم Volume (هزار میلیون مترمکعب)	
			۱۷۲	متوسط ضخامت (متر) Medium thickness (m)	کل آبخوان * Aquifer
			۴۳۰	حجم Volume (هزار میلیون مترمکعب)	

*: ضخامت کل آبخوان ثابت در نظر گرفته شده است و بنابراین حجم محاسبه شده ثابت است. اما با توجه به اینکه آبخوان مشهد در دهه‌های گذشته دچار فرونشست شده است، می‌توان تغییرات حجم را با توجه به میزان نشست در هر سال محاسبه کرد، که نیاز به بررسی و مطالعه بیشتری دارد.

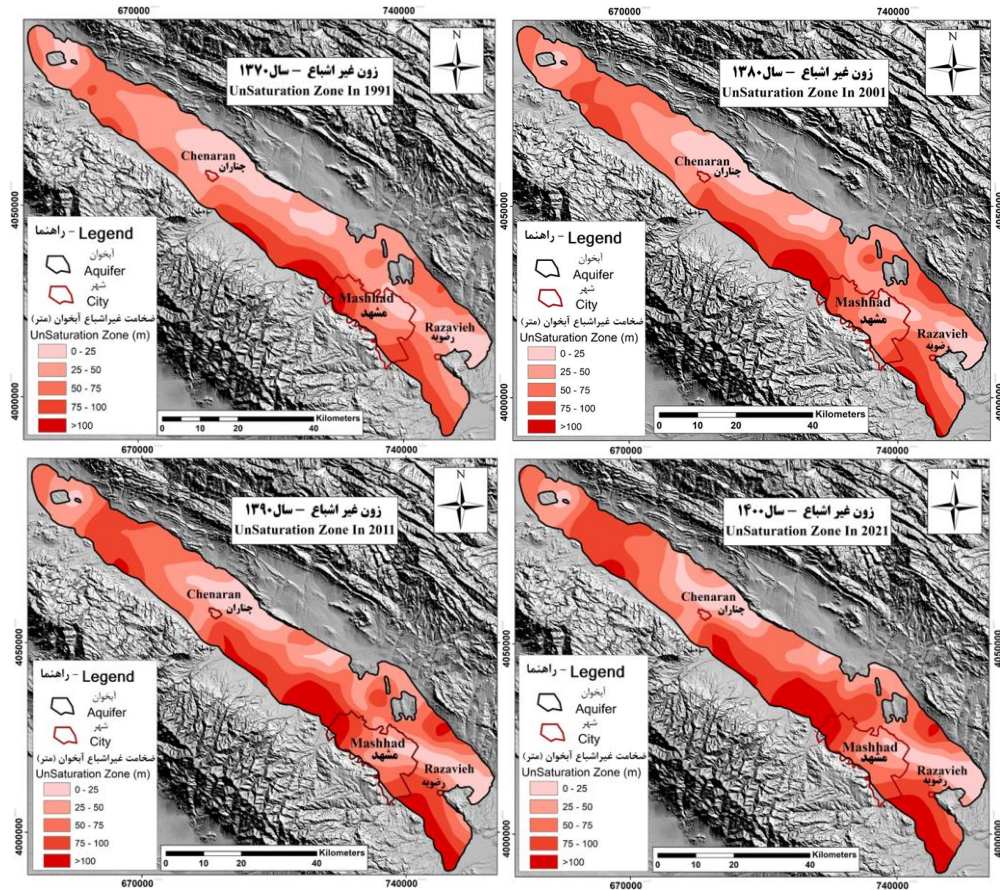


شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی تغییرات ضخامت اشباع آبخوان مشهد - چناران برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۰۰

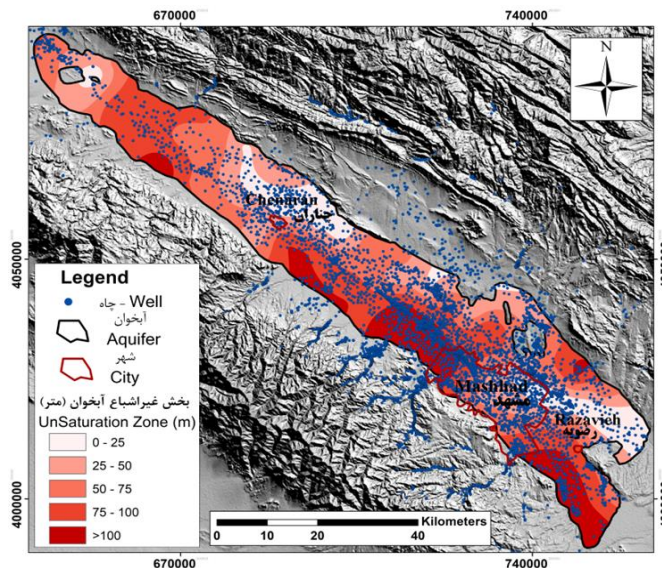
همچنین افزایش هزینه‌های پمپاژ از اعماق بیشتر، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی، و تراکم بخش غیر اشباع آبخوان (نشست) در ر سوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته آبرفتی، که سبب آسیب به سازه‌ها، تأسیسات و خطوط انتقال گاز و نفت در دشت‌ها می‌شود، را در پی دارد. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی ضخامت غیر اشباع آبخوان مشهد - چناران (شکل ۸ و جدول ۲) نشان از گسترش بخش غیر اشباع آبخوان مشهد - چناران در طی ۳۰ سال گذشته را دارد، به طوری که این گسترش بر تمرکز چاه‌های موجود در سطح آبخوان نیز منطبق است. حجم زیاد برداشت‌ها در مقابل عدم تغذیه در این بخش‌ها، افت سطح آب زیرزمینی و افزایش ضخامت بخش غیر اشباع را شدت بخشیده است (شکل ۹).

بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی ضخامت اشباع نشان از بالآمدگی سطح آب در هسته مرکزی آبخوان در فاصله بین رضویه و تا مشهد در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ است. داده‌های اندازه‌گیری شده در پیزومترهای آبخوان نشان می‌دهد با توجه به اینکه بقیه قسمت‌های آبخوان در طی این سال‌ها افت را تجربه کرده‌اند، بخش عمیق آبخوان در بعضی قسمت‌ها نسبت به سال ۱۳۹۰ دچار افزایش ضخامت شده، که دلیل آن می‌تواند نفوذ پساب و فاضلاب شهری به آبخوان و یا بستن تعدادی از چاه‌ها به خاطر انتقال آب از سد دوستی باشد [24,25].

پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و افت سطح آب در آبخوان و در پی آن گسترش قسمت غیر اشباع آن، پیامدهای منفی و مشکلات زیادی از جمله کاهش بازدهی چاه‌ها، افزایش هزینه‌های اقتصادی جهت کف‌شکنی و حفاری مجدد و



شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی تغییرات ضخامت غیر اشباع در آبخوان مشهد - چناران برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۰۰



شکل ۹ تطابق محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری با محل افزایش ضخامت بخش غیر اشباع در سال ۱۴۰۰

نتیجه‌گیری

چناران حدود ۴۳۰ میلیارد مترمکعب است و با گذشت زمان، ضخامت بخش اشباع کاهش یافته است. تغییرات حجم بخش اشباع آبخوان مشهد - چناران در طی بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۴۰۰)

نتایج بررسی روند تغییرات هندسه و حجم آبخوان آبرفتی مشهد در سه دهه گذشته، نشان می‌دهد که حجم کل آبخوان مشهد -

۵۰۰۰ میلیون مترمکعب) از دست داده است. هر چند به طور قطع نمی‌توان گفت تأثیر مثبت طرح‌های تعادل‌بخشی آبخوان باشد، بلکه ممکن است در نتیجه کاهش بازدهی آبخوان باشد. با تعیین دقیق ضریب آبدهی ویژه در پهنه آبخوان و اعمال آن در حجم بخش اشباع می‌توان تغییرات حجم ذخیره آب موجود آبخوان از گذشته تا کنون را بررسی نمود که در برنامه‌ریزی و مدیریت آبخوان اهمیت دارد.

سیاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی و از شرکت آب و فاضلاب مشهد، به خاطر در اختیار گذاردن اطلاعات و داده‌های موردنیاز سیاسگزاری می‌شود.

۱۴۰۰) از ۳۰۷ میلیارد مترمکعب به ۲۶۵ میلیارد مترمکعب رسیده است که حدود ۴۲ هزار میلیون مترمکعب کاهش را نشان می‌دهد. بیشترین تخلیه آبخوان در طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ (با توجه به بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی در طی این سال‌ها) به میزان ۲۳ میلیارد مترمکعب صورت گرفته است، به طور متوسط در این بازه زمانی، آبخوان هر سال ۲/۳ میلیارد مترمکعب کاهش حجم داشته است. همچنین بررسی و مقایسه روند تغییرات کاهشی هیدروگراف معرف آبخوان مشهد - چناران، نیز نشان می‌دهد که حدود ۴۰/۵ میلیارد مترمکعب حجم بخش اشباع آبخوان کاهش یافته است که با داده‌های به دست آمده تطابق دارد. مقایسه حجم قسمت اشباع آبخوان در دو دهه ۸۰ و ۹۰ نشان می‌دهد، از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ آبخوان در وضعیت بهتری نسبت به سال‌های قبل قرار داشته است و حجم کمتری آب (حدود

مراجع

- [1] H. Mohammdzadeh, R. Shahriari, N. Hafezi moghaddas, A. GhaziI, "Investigating the geometry of Mashhad alluvial aquifer based on subsurface studies," *Paper presented at the 7th Symposium of Sedimentological Society of Iran, Iran- Isfahan*. [Online]. Available: <https://www.en.symposia.ir/SGSI07> [Accessed Augst.5, 2022].
- [2] E. K. White, T. J. Peterson, J. Costelloe, A. W. Western, E. Carrara, "Can we manage groundwater? A method to determine the quantitative testability of groundwater management plans," *Water Resources Research*, vol. 52, no. 6, pp. 4863-4882, 2016. Available: doi.org/10.1002/2015WR018474
- [3] E. V. De Souza, M. A. C. da Silva, "Management system for improving the efficiency of use water systems water supply," *Procedia Engineering*, vol. 70, pp. 458-466, 2014. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.051>
- [4] Z. Kayhomayoon, F. Babaeian, S., Ghordoyee Milan, N. Arya Azar, R. Berndtsson, "A Combination of Metaheuristic Optimization Algorithms and Machine Learning Methods Improves the Prediction of Groundwater Level," *Water*, vol. 14, no. 5, p. 751, 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/w14050751>
- [5] F. Salehi Moteahad, N. Hafezi Moghaddas, Gh. Lashkaripour, M. Dehghani, "Geological parameters affected land subsidence in Mashhad plain, north-east of Iran," *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, no. 14, pp. 1-12, 2019. Available: doi.org/10.1007/s12665-019-8413-y
- [6] A. M. Cheraghi, B. Nagafi, S. Shajari, M. Javan, "The Trend of Changes in Groundwater Quantity and Quality in the Sarvestan Plain of Fars Province," *Watershed Management Research*, vol. 33, no. 2, pp. 82-96, 2020. [abstract]. Available: <https://doi.org/10.22092/wmej.2019.128069.1283>
- [7] K. Roushangar, V. Nourani, M. Dolatshahi, "Investigation and trend identification of groundwater level variations using discrete wavelet transform and non parametric tests (case study: Azarshahr plain)," *Iran-Water Resources Research*, vol. 16, no. 1, pp. 102-115, 2020. [abstract]. Available: [10.1001/1.17352347.1399.16.1.8.2](https://doi.org/10.1001/1.17352347.1399.16.1.8.2)
- [8] J. J. Butler, R. L. Stotler, D. O. Whittemore, E. C. Reboulet, "Interpretation of water-level changes in the High Plains

- Aquifer in western Kansas,” *GroundWater*, vol. 51, no. 2, pp. 180–190, 2013. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00988x>
- [9] E. M. K. Haacker, A. D. Kendall, D. W. Hyndman, “Water level declines in the High Plains Aquifer: *Predevelopment to resource senescence*,” *Groundwater*, vol. 54, no. 2, pp. 231-242, 2016. Available: <https://doi.org/10.1111/gwat.12350>.
- [10] D. M. Ciruzzi, C. S. Lowry, C, “Impact of complex aquifer geometry on groundwater storage in high-elevation meadows of the Sierra Nevada Mountains, CA,” *Hydrological Processes*, vol. 31, no. 10, pp. 1863-1875, 2017. Available: <https://doi.org/10.1002/hyp.11147>
- [11] M. Hamdi, M. F. Zagarni, N. Djamaï, H. Jerbi, K. Goita, J. Tarhouni, “3D geological modeling for complex aquifer system conception and groundwater storage assessment: Case of Sisseb El Alem Nadhour Saouaf basin, northeastern Tunisia,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 143, pp. 178-186, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.017>
- [12] N. Zinati, A. Esmaeily, “Calculating of the alluvial aquifer volume at Kerman plain using geographic information systems (GIS),” Paper presented at the The First International Conference on Plant, Water, Soil & Weather Modeling, International Center for Science, High Technology & Environmental Sciences Shahid Bahonar University of Kerman .(In Persian) (2010).
- [13] E. Fijani, S. Meysami, M. Mozafari, “Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods,” *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 1-18, 2022. [abstract]. Available: <https://doi.org/10.22067/JFCEI.2022.77818.1169>
- [14] M. Berberian, M. Qorashi, M. J. Shoja-Taheri, M. Talebian, M, “Seismotectonics and Earthquake-Fault Hazard Investigations in the Mashhad-Neyshabur Quadrangle Area (Contribution to the Seismotectonics of Iran, part VIII; 233p. In First (Ed), Vol. 72, 2000.
- [15] N. Hafezi Moghaddas, C. Leo, B. Rahimi, B., A. Azadi, “Morpho-tectonics and Geoelectrical method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain Northeast of Iran,” *Geopersia*, vol. 8, no. 1, pp. 13-26, 2018. Available: <https://doi.org/10.22059/GEOPE.2017.230489.648312>
- [16] A. Kangi, A. M. R. Arjmand, “The Role of Chahshak Fault on Quality of Drinking Water Wells Northwest of Mashhad Plain,” *Iranian Journal of Environmental Geology*, vol. 12, no. 45, pp. 29-37, 2019. [abstract]. Available: <https://www.magiran.com/p2063718>
- [17] M. R. Arjmand, A. Kangi, N. Hafezi Moghaddas, “The effect of Tous fault on groundwater resources in northern parts of Mashhad plain,” *Iranian Journal of Earth Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 205-214, 2019. Available: <https://doi.org/10.30495/ijes.2019.667380>
- [18] H. Mohammadzadeh, J. Hussainzaheh, S. Samani, “Evaluation of characteristics and hydrogeochemical evolution of Mashhad-Chenaran aquifer by inverse geochemical modeling in Phreeqc,” *Iranian Journal of Soil and Water Research*, vol. 53, no. 4, pp. 777-793, 2022. [abstract]. Available: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339569.669218>.

- [19] Water Resources Basic Studies Office, *Prohibition Extension Report of Mashhad-Chenaran study area waterresources*, Khorasan Razavi Regional Water Company, 2018. (In Persian)
- [20] Water Resources Basic Studies Office, *Water status of the study area of Mashhad Report*, Khorasan Razavi Regional Water Company, . 2022. (In Persian).
- [21] M. Arjmand Sharif, H. Jafari, "Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method," *Journal of Water and Soil*, vol. 35, no. 4, pp. 489-504, 2021. [abstract.]. Available: <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.70672.1058>
- [22] N. Hafezi moghaddas, A. Azadi, "Mashhad plain geophysical studies final report," *Geological Survey and Mineral Exploration of Iran*, 2015. (In Persian)
- [23] M. Harami, A. Mahbobi, M. Khanebad, Final report "The feasibility of locating and drilling wells for drinking water in order to exploit deep aquifers in the northwest of Mashhad watershed. Ferdowsi University of Mashhad," *Mashhad Water and Waste Water Company*, 2019. (In Persian)
- [24] H. Shamszadeh, R. Barati, A. Noshahri., M. Fakhari, "Study of Groundwater Response to Water Transfer from Outside Basin (Case Study: Water Transfer from Doosti Dam to Holy City of Mashhad), *Journal Aquifer and Qanat*, vol. 3, no. 4, pp. 41-52, 2022. Available: <https://doi.org/10.22077/jaaq.2018.1553.1005>
- [25] V. Nickpeyman, H. Mohammadzadeh, "Investigating of water level rising In Mashhad due to water transfer from Doosti Dam," *Paper presented at the 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment papers*, 2013.
- [26] Gh. Lashkaripour, M Ghafari, Z. Soveyzi, Z. Peyvandi, *The drop of underground water level and land subsidence in Mashhad plain. Paper presented at the 9th Symposium of Geological Society of Iran, Tehran, 2005. (In Persian).*
- [27] M. Akbari, M. R. Jarge, H. Madani Sadat, "Assessment of decreasing of groundwater-table using geographic information system (GIS)(case study: Mashhad plain aquifer)," *Journal of water and soil conservation*, vol. 16, no. 4, pp. 63-78, 2009. [abstract]. Available: 20.1001.1.23222069.1388.16.4.4.0
- [28] H. Afrakhteh, M. Hajipour, M. Gourzin, B. Nejati, "The situation of sustainable agricultural development in Iran development plans case: Five-year plans after the revolution," *Quarterly Journal of the Macro and Strategic Policies*, vol. 1, no. 1, pp. 43-62, 2013. Available: <https://www.magiran.com/p1180025>
- [29] S. Samani, "Providing Sustainable Global Groundwater Resources Management Models to Improve the Sustainability Plan in Iran," *Iran-Water Resources Research*, vol. 16, no. 2, pp. 271-291, 2020. [abstract.]. Available: 20.1001.1.17352347.1399.16.2.19.5



Ferdowsi Civil Engineering

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



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of Iran**

Behavioral models to identify factors affecting walking barriers in work trips (Case study: Qazvin city)*

Research Article

Hamid Mirzahosseini¹ , Soheil Rezashoar² and Farzad Moradi³

DOI: [10.22067/jfcei.2024.87996.1308](https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.87996.1308)

1. Introduction

Walking is one of the active urban transportation methods, but its share among chosen travel methods has decreased in recent decades due to the increased use of motor vehicles and private car ownership. Various barriers make walking challenging for citizens. To promote walking, it is essential to identify and address these barriers. A review of previous studies identified several obstacles, including:

1. Laziness or the desire to sleep in,
2. Physical disorders,
3. Lack of interest in walking,
4. The need for a neat appearance in the workplace, and
5. Reluctance to be seen in public.

Additionally, three categories of factors influence walking behavior:

1. Socio-economic characteristics,
2. Travel-related factors, and
3. Environmental conditions.

This study presents a case analysis of Qazvin city, focusing on work and daily trips while considering all the factors mentioned above. Using ordinal logit models, the research identifies the key factors contributing to the reluctance to walk.

2. Research Methodology

Logit models are widely used due to their strong theoretical foundation, simple mathematical structure, and ease of application. Given the discrete and ordinal nature of the dependent variable, this study employed the ordinal logit model. The importance of walking barriers was measured using a five-point Likert scale, ranging from "very low" to "very high."

After extensive research to determine the parameters and barriers affecting citizens' willingness to walk, Qazvin city was selected as the study area. Data collection took place in January 2024 (Dey 1402) on the main roads in Region

3 of the city. This area was chosen because it hosts several critical administrative and urban activities, such as:

- Imam Khomeini International University,
- The Broadcasting Organization of Qazvin Province,
- The General Directorate of Intellectual Education for Children and Adolescents, and,
- The General Directorate of Deeds and Real Estate Registration.

Participants were limited to citizens over 18 years old who lived and worked in Qazvin city. From the completed questionnaires, 60 valid responses were included in the final database, excluding incomplete or defective entries.

3. Results

The study sample predominantly consisted of male citizens aged 30 to 39, married, and possessing a university education. The average family size was four members, with two employed individuals per family.

An analysis of the percentage distribution of barrier importance levels (on a scale of one to five) revealed that the highest percentage (35%) was associated with the response "a lot" for the variable "neat appearance in the work environment." This variable reflects concerns about personal appearance and grooming issues, such as sweating, which can discourage walking.

The interpretation of the models is as follows:

Barrier model of laziness or the desire to wake up late:

Citizens with less than one year of work experience are less familiar with their work situation and can combine their work activities with other daily activities that are more difficult than others. Therefore, it is expected that less than others can allocate time to walk to their work environment by waking up early. Citizens who find walking on the way to work and returning home effective in increasing their performance and efficiency, with a higher percentage than others, consider

*Manuscript received July 2, 2024, Revised August 18, 2024, Accepted October 26, 2024.

¹ Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil-Transportation Planning, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, 34149, Iran. **Email:** mirzahosseini@eng.ikiu.ac.ir

² Ph.D. Candidate, Department of Civil-Transportation Planning, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, 34149, Iran.

³ Ph.D. Candidate, Department of Civil-Transportation Planning, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, 34149, Iran.

laziness or the desire to wake up late as a barrier. The sign of the walkability index was negative in the residential area; that is, the larger the value of this index, the more desirable the environment around the citizen's residence is for walking.

Barrier model of physical disorders: The negative sign of having a job with a fixed schedule indicates that citizens who have a regular schedule in their lives and consider themselves obliged to do work at the designated time consider physical disorders barriers less effective than others. It seems that citizens with physical disabilities are more active in part-time jobs due to their limitations. The sign of a work experience of more than five years is positive; citizens with a work experience of more than five years, who are more likely to be older than young people, may have more physical problems, which is considered a barrier for them. The positive sign for making trips with motorcycle and bicycle vehicles is that these citizens usually get on at the origin and get off at the destination, which makes them get used to this way of travel, and therefore, the level of their desire to walk decreases. The positive sign of the total time spent on work trips shows that as the duration of the trip increases, travel fatigue and physical problems increase. As a result, citizens' willingness to walk further decreases.

Barrier model of lack of interest in walking more: The positive sign of making work trips during peak morning traffic hours shows citizens' less interest in walking. The presence of traffic jams in the morning may cause problems such as vehicles encroaching on the rights of pedestrians while walking; the positive sign for the total time spent on work trips means that the willingness to walk decreases when the travel time increases, followed by boredom. When the walkability index in the residential area has a negative sign, it indicates that the larger the value of this index, the more suitable the environment around the residence is for walking.

Barrier model of neat appearance in the work environment: Citizens with experience walking the entire route, more than others, imagine the neat appearance in the work environment as a barrier to walking. The positive sign of the total travel time spent on work trips indicates that as the travel time increases, the feeling of fatigue increases. This causes citizens to look less neat and less inclined to walk. The negative sign of the walkability index in the residential area can indicate that with the decrease of this index, the environment around the residence is less suitable for walking, and accordingly, the citizens' concern about their appearance increases.

Barrier model of reluctance to be seen on the street: Citizens who consider walking to work and back home as an opportunity to support the environment have a favorable view. They felt less uncomfortable than others when they were seen on the street. The negative sign indicates that the desire to support the environment is less important than being seen on the street. The total travel time spent on work trips is significant with a positive sign, that is, as the travel time increases, not feeling good about being seen on the street is more considered as a barrier because the amount of hours citizens spend on the street increases, in As a result, the unpleasant feeling is also increased and the desire to walk decreases.

4. Conclusions

In this paper, five ordinal logit models were presented to investigate the role of five barriers in the work trips of Qazvin citizens in Dey 1402 in three categories of characteristics, including socioeconomic, travel, and environmental characteristics. The results showed that with the decrease in the walkability index, the surrounding area of the residence is less suitable for walking, and accordingly, the citizens' concern about the lack of appearance due to things such as sweating increases. Therefore, by improving the infrastructure and facilities, it is possible to increase walking in the desired areas. With the increased travel time in the streets, the feeling of more tiredness leads to a decrease in appearance, and, as a result, the desire to walk decreases. The walking limit in terms of time can be critical in different city areas so that citizens want to walk. Urban decision-makers should pay attention to this issue and distribute the arrangement of office uses in different parts of the city so that people can access it in the least amount of time and on foot.



مدل‌های رفتاری با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر موانع پیاده‌روی در سفرهای شغلی (مطالعه موردی: شهر قزوین)*

مقاله پژوهشی

حمید میرزاحسین^(۱)  سهیل رضاشعار^(۲) فرزاد مرادی^(۳)

DOI: 10.22067/jfpei.2024.87996.1308

چکیده یکی از شیوه‌های حمل و نقل پایدار که می‌تواند به کاهش ترافیک و آلودگی هوا کمک کند، پیاده‌روی است. با این حال، موانع مختلفی وجود دارد که پیاده‌روی را به‌ویژه در سفرهای شغلی دشوار می‌سازد. این پژوهش به بررسی عوامل مؤثر بر عدم تمایل به پیاده‌روی در بین شهروندان قزوین پرداخته و پنج مانع اصلی شامل تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن، اختلالات جسمی، عدم علاقه به پیاده‌روی، نگرانی از حفظ آراستگی ظاهر در محیط کار، و بی‌میلی به دیده شدن در خیابان را با استفاده از مدل‌های لجیستیک ترتیبی بررسی کرده است. این موانع در سه دسته خصوصیات اجتماعی-اقتصادی، سفر و محیطی تحلیل شدند. نتایج بررسی ۶۰ پرسشنامه نشان داد که خصوصیات اجتماعی-اقتصادی با داشتن شش متغیر معنادار، بیشترین تأثیر را داشته‌اند. همچنین، شاخص قابلیت پیاده‌روی با علامت منفی در ضرایب مدل‌های تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن، عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر و نگرانی از آراستگی ظاهر در محیط کار، و عامل کل زمان صرف شده با علامت مثبت در ضرایب مدل‌های اختلالات جسمی، عدم علاقه به پیاده‌روی، نگرانی از آراستگی ظاهر و بی‌میلی به دیده شدن در خیابان، به عنوان مهم‌ترین متغیرها شناسایی شدند. نتایج نشان می‌دهد که کاهش شاخص قابلیت پیاده‌روی، محیط اطراف محل سکونت را برای پیاده‌روی نامناسب‌تر کرده و نگرانی از آراستگی ظاهری را افزایش می‌دهد. بنابراین، با بهبود زیرساخت‌ها و کاهش زمان سفر، می‌توان انگیزه پیاده‌روی را افزایش داد و این مسئله باید در تصمیم‌گیری‌های شهری مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی پیاده‌روی، مدل لجیستیک ترتیبی، موانع مرتبط با شهروندان، شهر قزوین.

Behavioral Models to Identify Factors Affecting Walking Barriers in Work Trips (Case Study: Qazvin City)

Hamid Mirzahassein

Soheil Rezashoar

Farzad Moradi

Abstract Walking is a sustainable transportation method that can alleviate traffic congestion and reduce air pollution. However, various barriers still hinder walking, especially during business trips. This study investigates the factors contributing to the reluctance to walk among citizens in Qazvin city, focusing on five specific barriers: laziness or the desire to wake up late, physical disorders, lack of interest in walking, concerns about maintaining a neat appearance at work, and reluctance to be seen on the street. Using ordered logit models, these barriers were analyzed across three categories: socio-economic, travel, and environmental characteristics. The analysis, based on 60 questionnaires, revealed that socio-economic characteristics had the highest number of significant variables, with six being particularly influential. Notably, the walkability index negatively correlated with laziness or the desire to wake up late, lack of interest in walking, and concerns about appearance, while the total time spent had a positive correlation with physical disorders, lack of interest, neat appearance, and reluctance to be seen on the street. The findings suggest that lower walkability in residential areas increases concerns about appearance due to factors like sweating, which discourages walking. Improving infrastructure and reducing travel time could enhance walkability and encourage more walking. Urban planners should consider these factors when designing city layouts to ensure that workplaces and amenities are accessible by foot, thereby promoting walking as a viable mode of transportation.

Key words Walking, Ordered logit model, Barriers related to citizens, Qazvin city.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۵ می‌باشد.

(۱) دانشیار گروه عمران- برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(۲) دانشجوی دکتری، گروه عمران- برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(۳) دانشجوی دکتری، گروه عمران- برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

مقدمه

تشدید مشکلات ترافیکی از قبیل ازدحام، آلودگی و کمبود منابع توسعه زیرساخت‌های حمل و نقلی به خصوص در کشورهای در حال توسعه از یک سو و کاهش شاخص‌های فعالیت بدنی از سوی دیگر سبب شده، پیاده‌روی به عنوان یک شیوه حمل و نقل غیرموتوری و پاک مورد توجه تصمیم‌گیران قرار بگیرد. پیاده‌روی یکی از محبوب‌ترین شکل‌های فعالیت بدنی است که توسط سازمان‌های مرتبط به ارتقای سلامت توصیه می‌شود [1]. پیاده‌روی به عنوان یکی از روش‌های سفر، تنها توسط ۳۶٪ از شهروندان کانادایی برای رسیدن به مقصد، به شکل منظم استفاده می‌شود [2]. این سهم کم همراه با مزایای بسیاری که بر محیط‌زیست و سلامت انسان دارد، به کانون توجهی برای محققان تبدیل شده است [3,4]. پیاده‌روی دارای مزایایی مانند ارزان‌ترین شیوه حمل و نقل، عدم استفاده از منابع انرژی تجدیدنپذیر، کمترین میزان اشغال در فضای شهر، سلامتی و نشاط است [5].

پنج موضوع به طور قابل توجه با پیاده‌روی مرتبط هستند: محیط ساخته شده، محیط اجتماعی، هواشناسی، ایمنی و توپوگرافی. پژوهش براونسون و همکاران [6]، چهار معیار از محیط ساخته شده را شناسایی کرد: تراکم جمعیت، ترکیب کاربری زمین، اتصال خیابان و در دسترس بودن پیاده‌رو. شاخص قابلیت پیاده‌روی، توسط فرانک و همکاران ارائه شد [7] که تراکم جمعیت، ترکیب کاربری زمین، اتصال خیابان و نسبت مساحت زیربنای جزئی را در یک شاخص واحد ترکیب می‌کند [7-10]. شرایط آب و هوایی نیز تأثیر دارد [11-14]. دمای شدید، وزش بادهای و بارندگی‌های زیاد، شهروندان را از پیاده‌روی منصرف می‌کند. ایمنی در محله، عامل دیگری است که بر پیاده‌روی تأثیر می‌گذارد [15-18] زیرا محله‌های خطرناک و با میزان زیاد وقوع جرم و جنایت، شهروندان را از پیاده‌روی منصرف می‌کند. سکونت و زندگی در محله‌ای دارای تپه یا خیابانی با شیب تند، باعث کاهش پیاده‌روی می‌شود [15,18,20]. چنانچه توپوگرافی یک محله، پیاده‌روی را بیش از حد دشوار کند، شهروندان از پیاده‌روی اجتناب خواهند کرد. موانع مرتبط به شهروند، سفر و آب و هوا از دیگر دلایل مهم شناخته

شده‌اند [21-23]. محققان موانع درک شده برای پیاده‌روی را مورد بررسی قرار داده‌اند [24-26]، که در درجه اول بر فعالیت بدنی تمرکز دارد. موانع، به عوامل محیطی و شهروندی اطلاق می‌شود که مانع از فعالیت بدنی هستند. از مفهوم موانع برای تعیین اینکه چه چیزی مانع از شرکت در فعالیت‌های بدنی مانند انجام پیاده‌روی توسط گروه‌های فرعی خاصی از جمعیت می‌شود، استفاده کرده‌اند. اسپینی و میلوارد [26]، متغیرهای میزان درآمد و کمبود زمان را به عنوان موانعی برای مشارکت منظم در فعالیت‌های بدنی با شدت متوسط یا شدید در بین شهروندان بزرگسال در کشور کانادا بررسی کردند. کمبود عامل زمان نسبت به میزان درآمد، مهم‌تر شناسایی شد. داوسون و همکاران [25]، عوامل جمعیت شناختی مرتبط با موانع پیاده‌روی بزرگسالان میانسال و مسن کشور بریتانیا را بررسی کردند. یافته‌های آنان نشان داد که ذکر بیش از یک مانع محیطی، میزان پیاده‌روی را کاهش می‌دهد. همچنین دریافتند که مشکلات سلامت بدنی، بیشتر از موانع درک شده بر پیاده‌روی تأثیر می‌گذارد. آداجی - مجیا و همکاران [24]، موانع درونی درک شده برای فعالیت بدنی را در میان مادران در مناطق روستایی شناسایی کردند، که فقدان انضباط شهروندی، کمبود زمان و عدم علاقه از جمله مهم‌ترین موانع درک شده برای مشارکت در فعالیت بدنی هستند. کلارک و اسکات [21]، موانع درک شده برای شهروندان را به نه گروه مرتبط شامل دسترسی، نگرانی‌های ظاهری (احساس خوب نداشتن از ظاهر شدن در خیابان‌ها و عدم آراستگی ظاهری به واسطه عرق کردن)، فعالیت کافی در روز، اختلالات جسمی و حرکتی، پایین بودن امنیت محله، کیفیت نامناسب محل پیاده‌روی، کمبود زمان، عدم تمایل به پیاده‌روی و ایمنی کم در ترافیک طبقه‌بندی کردند. در این میان، موانع شهروندان شامل تنبلی، نگرانی‌های ظاهری (احساس خوب نداشتن از ظاهر شدن در خیابان‌ها و عدم آراستگی ظاهری به واسطه عرق کردن)، اختلالات جسمی و حرکتی و عدم تمایل به انجام پیاده‌روی، پراهمیت تشخیص داده شدند. در پژوهش الیاس [27]، عامل تنبلی، مهم شناخته شد. پژوهش کلارک و اسکات [21]، به بررسی موانع درک شده مرتبط با پیاده‌روی بر روی ۱۷۹ شهروندان بزرگسال که به

احساس امنیت در شب، عدم رعایت سرعت مجاز توسط رانندگان، گرمای هوا، عرق کردن، عدم تمایل به قرارگیری در نور آفتاب، دور بودن از مقصدها و کسل‌کننده بودن مسیرها است [21]. وجود نگرانی‌ها در مورد پیاده‌روی در شب به دلیل روشنایی نامناسب و سایر نگرانی‌های امنیتی از جمله علل مشترک برای بانوان است [15-17] و [20]. صدمات جسمانی، منع از انجام هر گونه فعالیت‌های فیزیکی توسط پزشک، وجود برخی اختلالات جسمی، مشکلات قلبی - عروقی و انجام جراحی‌ها به عنوان موانع پیاده‌روی ذکر شد [23]. ویژگی‌های کمبود زمان، میزان درآمد و مالکیت وسیله نقلیه، به عنوان موانعی در بیشتر شهروندان دیده شده‌اند [22]. در مطالعه کاش و مک‌دونالد [22]، عامل کمبود زمان یا پر مشغله بودن شهروندان مهم یافت شد. فلاح زواره و همکاران [32]، به این نتیجه رسیدند که در خانواده‌هایی با میزان درآمد بالا، احتمال پیاده‌روی برای کودکان به مدرسه کاهش می‌یابد. فلاح زواره و همکاران [32]، از مقایسه موانع پیاده‌روی کودکان در رفت و آمد روزانه به مدارس در کشورهای ایران و چین دریافتند که در ایران، در حالی که مالکیت اتومبیل وجود داشته باشد، احتمال پیاده‌روی کودکان به مدرسه کاهش می‌یابد. عوامل نظری، پندار و دیدگاه شهروندان هستند. پندار، حالت پیچیده‌ای از احساسات، امیال، عقاید، تعصبات و تمایلاتی است که می‌تواند در تصمیمات شهروندان اثرگذار باشد. همچنین عوامل فرهنگی مانند عدم توجه به قشرهای آسیب‌پذیر جامعه (کودکان، بانوان، سالمندان، معلولان، بانوان باردار و نابینایان)، نبودن فرهنگ پیاده‌مداری، عدم راحتی بانوان و رعایت نکردن حق تقدم از مسائل عنوان شده در پژوهش یوسفی‌نژادی و سوری می‌باشد [23].

گروه دوم، شامل ویژگی‌های سفر است. مهم‌ترین عوامل، طول مسافت سفر و مدت زمان سفر شناخته شده است. رالف و همکاران [33]، در پژوهشی در ایالت نیوجرسی کشور آمریکا دریافتند، شهروندانی که زمان و مسافت سفر را طولانی‌تر تخمین می‌زنند، تمایل کمتری به پیاده‌روی دارند. پژوهشی با تمرکز بر شهروندان کشور آمریکا، نشان داد که بیشترین مسافت پیاده‌روی طی شده پس از سفرهای تفریحی، متعلق به سفرهای

شکل تصادفی از سنین ۱۸ تا ۹۲ سال در شهر همپلتون کشور کانادا جمع‌آوری شده، پرداخته است. نتایج نشان داد شهروندانی که شاخص توده بدنی بالاتری دارند، بیشتر دچار بیماری‌هایی مانند آسم، دیابت نوع دوم و قلبی می‌شوند. در پژوهش وودکاکس و ریچاردز [28]، بر روی بزرگسالان کشور آمریکا، موانع سلامتی شهروندی، به عنوان مشکل در پیاده‌روی اعلام گردید. عدم تمایل به پیاده‌روی بیشتر، مهم بودن آراستگی ظاهر در محیط کاری و احساس خوب نداشتن از دیده شدن در خیابان مورد بحث قرار گرفته است [21, 27, 29]. بعضی از شهروندان تمایلی به پیاده‌روی ندارند که در [21] مورد توجه قرار گرفت. گروهی از شهروندان، نداشتن آراستگی ظاهری در مقصد به علت پیاده‌روی را که غالباً به دلیل عرق کردن است به عنوان یک مانع بیان می‌کنند [29].

در ادامه سه گروه از عوامل اثرگذار بر موانع مرتبط با شهروندان در پیاده‌روی معرفی می‌گردد: (۱) اجتماعی - اقتصادی، (۲) سفر و (۳) محیطی [22, 23, 30].

گروه اول، شامل ویژگی‌های مرتبط به شهروند و اجتماعی - اقتصادی می‌شود. از عوامل مهم می‌توان به سن، جنسیت، سلامت جسمانی، کمبود زمان، میزان درآمد شخص، مالکیت وسیله نقلیه، متغیرهای فرهنگی و نظری اشاره داشت. متغیرهای سن و جنسیت شهروندان، از ویژگی‌هایی هستند که در پژوهش‌های مختلف، نتایج قابل توجهی را ارائه دادند. در پژوهش کلارک و اسکات، ذکر شد که شهروندان جوان‌تر در مقایسه با شهروندان میانسال با دو علت، خیلی دور در نظر گرفتن مقاصد و کافی بودن مدت زمان پیاده‌روی رو به رو هستند. آن‌ها نشان دادند که شهروندان سالخورده با پنج مانع مانند خیابان‌های دارای روشنایی نامناسب در شب، ازدحامات ترافیکی، گذرگاه‌های غیرامن و خطرناک، تنها بودن و عدم تمایل به پیاده‌روی روبه‌رو می‌باشند [21]. در پژوهش رزاقی و همکاران [31]، مشکلات مربوط به عابران پیاده سالمند بررسی شد. یافته‌های آن‌ها نشان دادند که شرایط محیطی مانند چراغ‌های راهنمایی، پل‌های عابر پیاده و خیابان‌ها، احترامات اجتماعی و سلامت جسمانی پراهمیت هستند. هفت مانع برای پیاده‌روی بانوان مانند روشنایی نامناسب خیابان‌ها و عدم

خصوصیات، شامل: ۱) ویژگی‌های اجتماعی - اقتصادی، ۲) سفر و ۳) محیطی.

۲. ارائه یک مطالعه موردی با هدف بررسی شهروندان شهر قزوین در سفرهای شغلی و روزانه.

۳. ارائه مدل‌های رفتاری، شناسایی و تفسیر عوامل اثرگذار در عدم تمایل به پیاده‌روی توسط الگوریتم لجستیک ترتیبی.

روش‌شناسی تحقیق

روش‌هایی مانند رگرسیون لجستیک می‌تواند برای تحلیل انتخاب‌های گسسته استفاده شود. مدل‌های انتخاب گسسته از لحاظ تئوری یا تجربی، انتخاب‌های شهروندان را در میان یک مجموعه محدود از گزینه‌ها ایجاد می‌کند. این مدل‌ها برای بررسی، مثلاً نوع وسیله نقلیه (خودرو، اتوبوس و دوچرخه) استفاده می‌شوند [45].

کلیات الگوریتم رگرسیون لجستیک

مدل‌های لجستیک به علت داشتن تئوری منطقی، جامع، فراگیر، سادگی فرم ریاضی و کاربرد آسان از کاربرد فراوان‌تری برخوردار هستند. با توجه به ماهیت گسسته و ترتیبی متغیر وابسته، مدل لجستیک ترتیبی در این مطالعه مورد توجه قرار گرفت. به عبارت دیگر، علت انتخاب مدل لجستیک ترتیبی به این دلیل می‌باشد که اهمیت موانع در پیاده‌روی در مقیاس لیکرت پنج تایی از طیف خیلی کم تا خیلی زیاد اندازه‌گیری شده است. از سوی دیگر، سهولت و استفاده متداول از این مدل در مطالعات مشابه، دلیل دیگری در به کارگیری آن می‌باشد.

رگرسیون لجستیک، یک روش رگرسیون است که برای در نظر گرفتن سیستم تصادفی مناسب است. رگرسیون لجستیک، مدل لجستیک نیز نامیده می‌شود. تکنیک‌های رگرسیون لجستیک برای مدل‌سازی سیستم‌های احتمالی برای پیش‌بینی وقایع آینده استفاده می‌شوند. این مدل‌ها، مدل‌های احتمالی مستقیم هستند که نیازی به توزیع متغیرهای مستقل ندارند [46]. اگر p احتمال اینکه یک متغیر پاسخ که متغیر ورودی X باشد، برای $Y = 1$ تابع به شکل رابطه (۱) است:

$$p = P(X = x) = \frac{e^{\alpha + X\beta}}{1 + e^{\alpha + X\beta}} \quad (1)$$

شغلی، تحصیلی، خرید و نیز سفر برای صرف وعده‌های غذایی است [34].

گروه سوم، شامل ویژگی‌های محیطی است. براونسون و همکاران، دریافتند که چهار ویژگی محیطی با پیاده‌روی مرتبط است، تراکم جمعیت، تنوع کاربری زمین، اتصال خیابان و وجود پیاده‌رو [6]. در مطالعات، محیط ساخته‌شده توسط شاخص قابلیت پیاده‌روی اندازه‌گیری می‌شود. این شاخص توسط فرانک و همکاران [7] پیشنهاد گردید، که ترکیبی از تراکم جمعیت، اختلاط کاربری زمین، اتصال خیابان‌ها و نسبت مساحت زیربنای جزئی است [7-10]، و نشان می‌دهد که محله‌های شهر چگونه می‌توانند بر انجام پیاده‌روی تأثیرگذار باشند [35]. اشغال پیاده‌روها، کف‌سازی‌های نامناسب، ناهمواری و اختلاف سطوح در مسیرها و شیب نامناسب، عبور موتورسیکلت‌ها از پیاده‌روها، زیبایی‌شناسی یک محله و فاصله تا مقصد به عنوان موانع پیاده‌روی شناخته‌شده‌اند [23, 33, 36-38]. تجاوز به حقوق عابران پیاده در پیاده‌روها و رفت و آمد وسایل نقلیه در مناطق مسکونی از مواردی هستند که عابران پیاده را تهدید می‌کند [23, 39-43]. از موارد امنیتی می‌توان به عدم روشنایی کافی معابر، عدم امنیت در زیرگذرها و وجود مناطق تاریک و خلوت اشاره کرد [22, 23, 33, 39, 44].

با توجه به توضیحات فوق، به منظور تلاش برای افزایش پیاده‌روی، لازم است موانع پیاده‌روی آنچنان که شهروندان با آن مواجه هستند شناسایی و مرتفع گردد، شناسایی صحیح این موانع، موجب ارائه راهکارهای مناسب برای ارتقای کیفیت پیاده‌روی و افزایش استفاده از سیستم حمل و نقل پیاده می‌شود. بنابراین، مسئله مقاله حاضر عدم آگاهی از اهمیت و میزان تأثیرگذاری متغیرهایی است که منجر به شکل‌گیری موانع پیاده‌روی می‌گردد.

در ادامه، نوآوری‌های کلیدی تحقیق حاضر بیان می‌شود:

۱. شناسایی و گروه‌بندی متغیرهای مرتبط به پنج مانع پیاده‌روی شهروندان شامل: ۱) تبلی یا میل به دیر بیدار شدن، ۲) اختلالات جسمی، ۳) عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر، ۴) مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی و ۵) عدم بی‌میلی در دیده شدن در خیابان و در سه دسته

مقادیر قابل مشاهده است. سپس روش لجیت ترتیبی از مشاهدات در y استفاده می‌کند، که شکلی از داده‌های سانسور شده در y^* است، تا پارامتر با بردار β متناسب باشد.

معرفی منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

بعد از مطالعات گسترده برای تعیین پارامترها و موانع نسبت به میزان تمایل پیاده‌روی شهروندان در سفرهای شغلی، شهر قزوین به عنوان محدوده آمارگیری انتخاب شد. استان قزوین یکی از ۳۱ استان ایران است و در بخش شمال غربی این کشور واقع شده است. این استان با دارا بودن تنها ۱٪ از مساحت کشور، نزدیک به ۱۰٪ در اقتصاد و تولیدات ایران نقش دارد. مساحت این استان حدود ۱۵,۸۲۰ کیلومتر مربع است و با استان‌های مازندران، گیلان، همدان، زنجان، مرکزی و البرز همسایه است. جمعیت استان قزوین بر پایه آمار سال ۱۳۹۵ برابر ۱,۳ میلیون نفر است که از این شمار ۶۰۰,۰۰۰ نفر ساکن شهرستان قزوین هستند.

جهت مصاحبه معابر اصلی شهر قزوین (شکل ۱) در منطقه ۳ در دی ماه سال ۱۴۰۲ انتخاب شدند. از جمله دلایل برای ملاک قرار دادن معابر اصلی شهری این بوده که فعالیت‌های دارای عملکردهای شهری مانند دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، سازمان صدا و سیما مرکز استان قزوین، اداره کل کانون پرورش فکری کودکان و نوجوانان استان قزوین و اداره کل ثبت اسناد و املاک به عنوان مهم‌ترین کاربری‌های اداری عمدتاً در این منطقه مستقر شده‌اند.

تنها شهروندان بالای ۱۸ سال که محل سکونت و شغل آن‌ها داخل شهر قزوین بوده، امکان پاسخگویی به پرسشنامه‌ها را داشتند. کلیه سؤالات با مثال‌های مشابه به شهروندان توضیح داده شده و پاسخ‌ها ثبت و تکمیل شدند. از بین پرسشنامه‌های تکمیل شده، پرسشنامه‌های معیوب خارج و موارد باقی‌مانده شامل ۶۰ پرسشنامه به عنوان پایگاه داده نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. بعد از تشخیص متغیرهای مستقل که در سطح اهمیت ۱۰٪ معنادار بودند، از آن‌ها در فرایند مدل‌سازی‌ها استفاده شد.

فرایند انجام تحقیق را با توجه به روش بیان شده، می‌توان در شکل (۲) اظهار داشت:

احتمال فوق مقداری بین ۰ و ۱ می‌گیرد و این تابع یک منحنی به شکل S و غیرخطی است. در اینجا، β ضریب پیش‌بینی‌کننده یا متغیر ورودی X است که در معادله رگرسیون استفاده می‌شود.

یک نسخه ساده از این تابع می‌تواند برای متغیرهای ورودی چندگانه و خطی باشد [47]:

$$p = P(X = x_1 \dots x_p) = \frac{e^{\alpha + x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_p\beta_p}}{1 + e^{\alpha + x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_p\beta_p}} \quad (2)$$

این معادله احتمال متغیر پاسخ را با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل چندگانه محاسبه می‌کند. این مدل هنوز غیرخطی است و با استفاده از تابع پاسخ لجیت به حالت خطی تبدیل می‌شود. پس از آن معادله تابع پاسخ لجستیک به دست می‌آید:

$$\frac{p}{1-p} = e^{\alpha + x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_p\beta_p} \quad (3)$$

بخش $\frac{p}{1-p}$ رابطه (۳) به عنوان نسبت شانس نامیده می‌شود. با استفاده از لگاریتم طبیعی در هر دو طرف:

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \log(e^{\alpha + x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_p\beta_p}) \quad (4)$$

رگرسیون لجستیک ترتیبی، یک مدل رگرسیون ترتیبی یعنی یک مدل رگرسیون برای متغیرهای وابسته دارای مرتبه است. متغیر پاسخ می‌تواند بیش از دو سطح ترتیبی داشته باشد. ممکن است که احتمال پاسخگویی یکی از این سطوح باشد. هنگامی که سه یا چند دسته ترتیبی از متغیر پاسخ وجود دارد، از روش رگرسیون لجستیک ترتیبی استفاده می‌شود [47]:

$$y^* = X^T\beta + \varepsilon \quad (5)$$

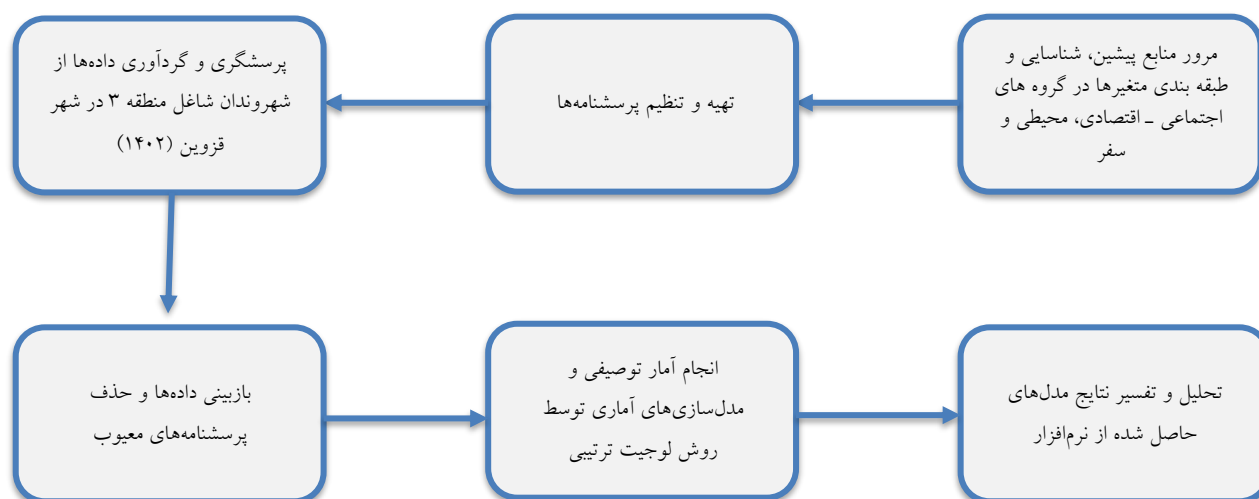
در رابطه (۵) y^* متغیر وابسته ولی غیر قابل مشاهده است یا متغیر پنهان نامیده می‌شود. X بردار متغیرهای مستقل، β بردار ضرایب رگرسیون و ε ترم خطا بوده که لازم است برآورد شود. علاوه بر این، فرض کنید در حالی که y^* قابل مشاهده نیست، فقط می‌توان دسته‌های پاسخ را مشاهده کرد:

$$y = \{0 \text{ if } y_i^* \leq u_0, 1 \text{ if } u_0 \leq y_i^* \leq u_1, 2 \text{ if } u_1 \leq y_i^* \leq u_2, \dots m \text{ if } y_i^* \geq u_{m-1}\} \quad (6)$$

در رابطه (۶) پارامترها، u_i نقطه‌های انتهایی اعمال شده از



شکل ۱ محدوده مطالعاتی در شهر قزوین



شکل ۲ روند انجام تحقیق حاضر

موانع مرتبط با شهروندان بر رفتار پیاده‌روی، می‌تواند یکی از سیاست‌های برنامه‌ریزان حمل و نقل شهری باشد، که در این رابطه، تنها بخش اندکی از مطالعات به بررسی موانع و مشکلات اثرگذار بر پیاده‌روی پرداخته‌اند.

آمار توصیفی داده‌ها در مطالعه موردی

در جدول (۱) مهم‌ترین خصوصیات اجتماعی - اقتصادی در تعداد کل شهروندان مورد بررسی گزارش شده است. در نمونه مورد مطالعه، بیشترین شهروندان دارای جنسیت مرد، بین سنین ۳۰ تا ۳۹، متأهل، دارای تحصیلات دانشگاهی، تعداد اعضای خانوار چهار نفر و تعداد شاغلان در خانوار دو نفر هستند. جدول (۲) درصد توزیع سطح‌های اهمیت (یک الی پنج)

نتایج و یافته‌های تحقیق

با پدید آمدن چالش‌های زیست محیطی منطقه‌ای و جهانی، پرداختن به برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار در دهه‌های اخیر ضرورت پیدا کرده و پیرو آن، حمل و نقل پایدار شکل گرفته است. یکی از رویکردهای حمل و نقل پایدار، تشویق به استفاده شهروندان از شیوه‌های حمل و نقل غیرموتوری مانند پیاده‌روی است. انجام سفرها به شیوه پیاده‌روی، باعث افزایش میزان فعالیت جسمانی می‌شود که برای سلامتی افراد توصیه می‌شود. علاوه بر آن، گسترش استفاده از شیوه سفر پیاده‌روی در سفرهای شغلی می‌تواند به طور محسوسی در کاهش تراکم ترافیک و آلودگی‌های زیست محیطی مانند آلودگی هوا و آلودگی صوتی اثرگذار باشد. از این رو، تلاش برای شناسایی

موانع مرتبط به پیاده‌روی توسط پرسشگری از شهروندان را نشان داده است. مشاهده می‌شود که بیشترین درصد (۳۵٪) مربوط به گزینه «زیاد» و متغیر «مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی» می‌باشد. این متغیر بیانگر نگرانی‌های

ظاهری و عدم آراستگی مانند عرق کردن را بیان می‌کند که به عنوان یک مانع مهم در بخش مقدمه به دفعات ذکر شد.

جدول ۱ آمار توصیفی داده‌ها در مطالعه موردی

متغیرها	توضیحات	درصد نمونه در مطالعه موردی
جنسیت	مرد	۶۵
	زن	۳۵
سن	۱۸-۲۹	۲۲
	۳۰-۳۹	۴۳
	۴۰-۴۹	۲۰
	۵۰-۵۹	۱۰
	بیشتر از ۶۰	۵
وضعیت تأهل	مجرد	۳۵
	متاهل	۶۵
وضعیت تحصیلات	غیردانشگاهی شامل دیپلم و کمتر	۳۰
	دانشگاهی شامل فوق دیپلم و بیشتر	۷۰
تعداد اعضای خانوار	۲ یا کمتر	۸
	۳	۲۸
	۴	۳۹
	۵	۱۷
	۶	۸
تعداد شاغلان در خانوار	۱	۳۵
	۲	۴۵
	۳	۲۰

جدول ۲ سطح اهمیت (درصد) هر یک از موانع پیاده‌روی در مطالعه موردی

متغیرهای وابسته	درصد				
	۱ = خیلی کم	۲ = کم	۳ = معمولی	۴ = زیاد	۵ = خیلی زیاد
تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن	۱۵	۲۳	۱۹	۲۷	۱۶
اختلالات جسمی	۲۹	۲۰	۱۹	۱۷	۱۵
عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر	۱۷	۱۶	۲۱	۲۵	۲۱
مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی	۱۳	۹	۱۵	۳۵	۲۸
عدم بی‌میلی در دیده شدن در خیابان	۲۳	۲۹	۲۳	۱۹	۶

جدول ۳ جزئیات متغیرهای مستقل معنادار شده در مدل‌های لوجیت ترتیبی

متغیرهای وابسته	تعداد متغیرهای معنادار شده	متغیرهای معنادار شده	گروه مربوطه	کدبندی متغیرها
تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن	۳	سابقه شغل کمتر از یک سال	اجتماعی - اقتصادی	۱ = بله ۰ = خیر
		تأثیرگذار بودن پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل شغل و بازگشت به منزل در افزایش عملکرد و کارایی	اجتماعی - اقتصادی	۱ = کاملاً مخالف هستم، ۲ = مخالف هستم، ۳ = نظری ندارم، ۴ = موافق هستم و ۵ = کاملاً موافق هستم
		شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت	محیطی	عددی
اختلالات جسمی	۴	داشتن شغل با زمان‌بندی ثابت	اجتماعی - اقتصادی	۱ = بله ۰ = خیر
		سابقه شغل بیشتر از پنج سال	اجتماعی - اقتصادی	۱ = بله ۰ = خیر
		شیوه انجام سفرها با وسایل نقلیه‌ای مانند موتورسیکلت و دوچرخه	سفر	۱ = بله ۰ = خیر
		کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی	سفر	عددی
عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر	۳	انجام سفرهای شغلی در ساعات اوج ترافیک صبح	سفر	۱ = بله ۰ = خیر
		کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی	سفر	عددی
		شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت	محیطی	عددی
مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی	۳	تجربه پیاده‌روی کل مسیر	اجتماعی - اقتصادی	۱ = بله ۰ = خیر
		کل زمان سفر صرف شده در سفرهای شغلی	سفر	عددی
		شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت	محیطی	عددی
عدم بی‌میلی در دیده شدن در خیابان	۲	پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل کار و بازگشت به منزل برای فرصت حمایت از محیط زیست	اجتماعی - اقتصادی	۱ = کاملاً مخالف هستم، ۲ = مخالف هستم، ۳ = نظری ندارم، ۴ = موافق هستم و ۵ = کاملاً موافق هستم
		کل زمان سفر صرف شده در سفرهای شغلی	سفر	عددی

تفسیر ضرایب و علامت متغیرهای معنادار شده

می‌شوند.

با توجه به وزن و علامت هر متغیر از خروجی‌های نرم‌افزار، که همان ضریب تخمین‌زده شده هستند، تفسیر مدل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

مدل شماره ۱ (مانع تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن): شهروندان با سابقه شغلی کمتر از یک سال آشنایی کمتری نسبت به وضعیت کاری خود دارند و سخت‌تر از دیگران می‌توانند فعالیت‌های شغلی خود را با دیگر فعالیت‌های روزانه ترکیب کنند. همچنین تغییرات برنامه شغلی غیر قابل کنترل برای آن‌ها محتمل‌تر است. از این رو انتظار می‌رود کمتر از دیگران بتوانند با زود بیدار شدن از خواب زمانی را برای پیاده‌روی تا محل کار خود تخصیص دهند. شهروندانی که پیاده‌روی را در مسیر رفتن به محل شغل و بازگشت به منزل را

انواع متغیرهای مستقل معنادار شده در جدول (۳) و گروه مربوط به خود گزارش شده است.

انجام آزمون والد روی ضرایب به دست آمده حکایت از برقراری فرضیه برازش موازی و کفایت مدل‌های لوجیت ترتیبی داشته است. باید ذکر کرد که به طور قطع در انجام هر مطالعه‌ای محدودیت‌هایی وجود دارد، که مطالعه حاضر از این قاعده مستثنی نیست. جهت بهبود نتایج ارائه شده، ابتدا پیشنهاد می‌شود تا برای اعتبارسنجی به این مطالعه، مدل‌های ارائه شده برای دیگر استان‌ها نیز استفاده شود. پیشنهاد بعدی، استفاده از تعداد داده‌های بیشتر، جهت حصول به نتایج با درجه اطمینان بالاتر است. همچنین با افزایش داده‌ها و امکان استفاده از مدل‌های دیگر، تعداد بیشتری از متغیرهای مستقل معنادار

کم‌حوصلگی افزایش پیدا کند، از میزان تمایل به پیاده‌روی کاسته می‌شود. هنگامی که شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت دارای علامت منفی است، نشان می‌دهد که هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، محیط اطراف محل سکونت، بیشتر برای پیاده‌روی مناسب‌تر است.

مدل شماره ۴ (مانع مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی): شهروندان با تجربه پیاده‌روی کل مسیر، بیشتر از سایرین مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی را به عنوان مانع برای پیاده‌روی تصور می‌کنند. علامت مثبت کل زمان سفر صرف شده در سفرهای شغلی حاکی از این موضوع است با افزایش زمان سفر، احساس خستگی بیشتری به وجود می‌آید. این امر باعث می‌شود تا آراستگی ظاهری شهروندان کمتر و بر این اساس تمایل آن‌ها جهت پیاده‌روی کمتر شود. علامت منفی شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که با کاهش این شاخص، محیط اطراف محل سکونت برای پیاده‌روی، مناسب‌تر و بر این اساس نگرانی شهروندان از بابت عدم آراستگی ظاهرشان به دلیل مواردی مانند عرق کردن زیاد افزایش می‌یابد.

مدل شماره ۵ (مانع عدم بی‌میلی در دیده شدن در خیابان): شهروندانی که پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل شغل و بازگشت به منزل را فرصتی برای حمایت از محیط زیست می‌پندارند، دیدگاه مثبتی دارند. آن‌ها کمتر از دیگران احساس ناخوشایندی از دیده شدن در خیابان دارند و در راستای ترویج تفکر خود، تمایل بیشتری به دیده شدن دارند. علامت منفی نشان می‌دهد که اهمیت تمایل به حمایت از محیط زیست در کم‌اهمیت، مانع دیده شدن در خیابان است. کل زمان سفر صرف شده در سفرهای شغلی با علامت مثبت معنادار شده است، یعنی هر چه زمان سفر افزایش می‌یابد، عدم احساس خوب از دیده شدن در خیابان، بیشتر به عنوان مانعی برای پیاده‌روی محسوب می‌شود، چون میزان ساعات حضور شهروندان در خیابان بیشتر می‌شود، در نتیجه حس نامطلوب نیز از دیده شدن بیشتر شده و تمایل به پیاده‌روی کاهش می‌یابد.

در جدول (۴)، مشاهده می‌شود که بیشترین متغیرهای معنادار شده (۶ عامل) در گروه خصوصیات اجتماعی - اقتصادی قرار دارند.

در افزایش عملکرد و کارایی خود مؤثر تشخیص می‌دهند، با درصد احتمال بیشتری نسبت به دیگران تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن از خواب را به عنوان مانع تصور می‌کنند. علامت شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت منفی به دست آمد، یعنی هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، محیط اطراف محل سکونت شهروند دارای مطلوبیت بیشتری برای پیاده‌روی می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که شهروندان ساکن در این محله‌ها، با احتمال کمتری، تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن از خواب را به عنوان مانع در نظر بگیرند.

مدل شماره ۲ (مانع اختلالات جسمی): علامت منفی برای داشتن شغل با زمان‌بندی ثابت نشان دهنده این است که شهروندانی که در زندگی خود دارای برنامه‌ریزی کاری و منظم هستند و خود را ملزم به انجام کار در ساعت تعیین شده می‌دانند، کمتر از دیگران مانع اختلالات جسمی را مؤثر می‌دانند. به نظر می‌رسد شهروندان با اختلالات جسمی با توجه به محدودیت‌هایشان در شغل‌های پاره‌وقت بیشتر مشغول به کار هستند. علامت سابقه شغل بیشتر از پنج سال مثبت است، یعنی شهروندان با سابقه شغلی بیشتر از پنج سال که به احتمال زیاد از نظر سن و سال نسبت به جوانان بیشتر هستند، ممکن است دارای مشکلات جسمی بیشتری باشند، که برای آن‌ها یک مانع جدی محسوب می‌شود. علامت مثبت برای شیوه انجام سفرها با وسایل نقلیه‌ای مانند موتورسیکلت و دوچرخه نشان می‌دهد که معمولاً این شهروندان در مبدأ سوار و در مقصد نیز پیاده می‌شوند، که باعث می‌شود تا به این شیوه سفر عادت کنند و بنابراین میزان تمایل به پیاده‌روی در آن‌ها کاهش می‌یابد. علامت مثبت کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی نشان می‌دهد که هر چه مدت زمان سفر افزایش یابد، خستگی ناشی از سفر و به تبع مشکلات جسمی بیشتر خودشان را نشان می‌دهند و در نتیجه از تمایل شهروندان به پیاده‌روی بیشتر کاسته می‌شود.

مدل شماره ۳ (مانع عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر): علامت مثبت انجام سفرهای شغلی در ساعات اوج ترافیک صبح، علاقه کمتر شهروندان به پیاده‌روی در طول این ساعات را نشان می‌دهد. چرا که وجود ازدحامات ترافیکی زیاد در بازه زمانی صبح ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی مانند تجاوز وسایل نقلیه به حقوق عابران پیاده در هنگام عبور از پیاده‌روها شود. علامت مثبت برای کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی به این معنی است، هنگامی که زمان سفر و به دنبال آن،

جدول ۴ خروجی تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار

متغیرهای وابسته					####
تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن	اختلالات جسمی	عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر	مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی	عدم بی‌میلی در دیده شدن در خیابان	
-	-	-	0/804	3/815	ثابت مدل‌ها
خصوصیات اجتماعی - اقتصادی					
-	-3/451***	-	-	-	داشتن شغل با زمان‌بندی ثابت
-	0/520***	-	-	-	سابقه شغل کمتر از یک سال
-	0/278*	-	-	-	سابقه شغل بیشتر از پنج سال
-	-	-	-	-0/381***	پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل کار و بازگشت به منزل برای فرصت حمایت از محیط‌زیست
0/256**	-	-	-	-	تأثیرگذار بودن پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل شغل و بازگشت به منزل در افزایش عملکرد و کارایی
-	-	-	-	-	تجربه پیاده‌روی کل مسیر
خصوصیات سفر					
-	0/328*	-	-	-	شیوه انجام سفرها با وسایل نقلیه‌ای مانند موتورسیکلت و دوچرخه
-	-	0/431*	-	-	انجام سفرهای شغلی در ساعات اوج ترافیک صبح
-	0/012***	0/090***	0/080***	0/080***	کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی
خصوصیات محیطی					
-0/079*	-	-0/212***	-0/010**	-	شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت
-712/54	-702/34	-742/22	-762/12	-752/96	مقدار لگاریتم تابع درست نمایی
18/60	50/12	31/64	34/50	29/41	مقدار مربع کای
0/017	0/063	0/041	0/134	0/100	مقدار ρ^2

نتیجه‌گیری و پیشنهادات آینده

پیاده‌روی به عنوان یک شیوه سفر مقرون به صرفه و دارای مزایای فراوان در حوزه سلامت و ترافیک جایگاه ویژه‌ای در برنامه‌ریزی شهری دارد. در این راستا، ارزیابی تمایل به پیاده‌روی بیشتر و افزایش این تمایل در بین شهروندان همواره یکی از دغدغه‌های برنامه‌ریزان شهری بوده است.

در مقاله حاضر به ارائه پنج مدل لوجیت ترتیبی با هدف بررسی نقش پنج مانع در سفرهای شغلی شهروندان قزوین در بازه زمانی دی ماه سال ۱۴۰۲، در سه دسته خصوصیات، شامل: ویژگی‌های اجتماعی - اقتصادی، سفر و محیطی پرداخته شد.

در مدل تنبلی یا میل به دیر بیدار شدن، سابقه شغل کمتر از یک سال، تأثیرگذار بودن پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل شغل و بازگشت به منزل در افزایش عملکرد و کارایی و شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت، در مدل اختلالات جسمی، داشتن شغل با زمان‌بندی ثابت، سابقه شغل بیشتر از پنج سال، شیوه انجام سفرها با وسایل نقلیه‌ای مانند موتورسیکلت و دوچرخه و کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی، در مدل عدم علاقه به پیاده‌روی بیشتر، انجام سفرهای شغلی در ساعات اوج ترافیک صبح، کل زمان صرف شده در سفرهای شغلی و شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل

به علت تغییرات مکرر در الگوی سفرهای شهروندان به مرور زمان، پیشنهاد می‌گردد، این روش پیشنهادی با جمع‌آوری اطلاعات جدیدتر و نمونه‌های بزرگ‌تری از شهروندان مد نظر قرار بگیرد تا اثرات اصلی این متغیرها نیز استخراج شود. به‌کارگیری این روش در سایر شهرها توصیه می‌شود تا بیش عمیق‌تری نسبت به اهمیت و نقش متغیرهای مختلف حاصل شود. با توجه به ماهیت ترتیبی بودن متغیر وابسته، می‌توان مدل‌های پیچیده‌تر مانند پروبیت ترتیبی را مورد استفاده قرار داد.

واژه‌نامه

Brownson	براونسون
Frank	فرانک
Spinney and Millward	اسپینی و میلوارد
Dawson	داوسون
Adachi-Mejia	آداجی - مجیا
Clark and Scott	کلارک و اسکات
Aliyas	الیاس
Woodcox and Richards	وودکاکس و ریچاردز
Razzaghi	رزاقی
Kash and McDoland	کاش و مک دونالد
Fallah Zavareh	فلاح زواره
Yousefinezhadi and Soori	یوسفی نژادی و سوری
Ralph	رالف

سپاسگزاری

سکونت، در مدل مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی، تجربه پیاده‌روی کل مسیر، کل زمان سفر صرف شده در سفرهای شغلی و شاخص قابلیت پیاده‌روی در ناحیه محل سکونت و در مدل عدم بی‌میلی در دیده شدن در خیابان، پیاده‌روی در مسیر رفتن به محل کار و بازگشت به منزل برای فرصت حمایت از محیط زیست و کل زمان سفر صرف شده در سفرهای شغلی متغیرهای معنادار تشخیص داده شدند. در تحلیل نتایج می‌توان این طور گفت که با کاهش شاخص قابلیت پیاده‌روی، محیط اطراف محل سکونت برای پیاده‌روی، مناسب‌تری داشته و بر این اساس نگرانی شهروندان از بابت عدم آراستگی ظاهری به دلیل مواردی مانند عرق کردن، افزایش می‌یابد. لذا با بهبود زیرساخت‌ها و تسهیلات، می‌توان میزان پیاده‌روی را در مناطق مورد نظر افزایش داد. همچنین با افزایش زمان سفر در خیابان‌ها و به دنبال آن، احساس خستگی بیشتر، منجر به کاهش آراستگی ظاهری و به تبع از میزان تمایل به پیاده‌روی کاسته می‌شود. در واقع حد پیاده‌روی از نظر زمانی می‌تواند در نواحی مختلف یک شهر حائز اهمیت باشد تا شهروندان تمایل به پیاده‌روی داشته باشند. این موضوع یکی از مواردی است که تصمیم‌گیران شهری باید به آن توجه کنند و چیدمان کاربری‌های اداری در نقاط مختلف شهر را به گونه‌ای توزیع کنند تا افراد با کمترین زمان و به صورت پیاده به آن دسترسی داشته باشند.

درصد توزیع سطح‌های اهمیت موانع توسط پرسشگری از شهروندان نشان داد که بیشترین درصد (۳۵٪) مربوط به‌گزینه «زیاد» و متغیر «مناسب بودن سر و وضع ظاهر شدن در محیط شغلی» است.

مراجع

- [1] M.S. Tremblay, D.E. Warburton, I. Janssen, D.H. Paterson, A.E. Latimer, R.E. Rhodes, M.E. Kho, A. Hicks, A.G. Leblanc, L. Zehr, K. Murumets, and M. Duggan, New Canadian physical activity guidelines, *Appl Physiol Nutr Metab*, 36(1): Pp. 36-46; 47-58, (2011).
- [2] S. Cragg, C. Cameron, and C. Craig, National transportation survey. Ottawa, ON: Canadian Fitness and Lifestyle Research Institute, (2006).

- [3] J. Pucher and L. Dijkstra, Promoting safe walking and cycling to improve public health: lessons from the Netherlands and Germany, *American journal of public health*, 93(9): Pp. 1509-1516, (2003).
- [4] B.E. Saelens, J.F. Sallis, J.B. Black, and D. Chen, Neighborhood-based differences in physical activity: an environment scale evaluation, *American journal of public health*, 93(9): Pp. 1552-1558, (2003).
- [5] J.M. Rippe, A. Ward, J.P. Porcari, and P.S. Freedson, Walking for health and fitness, *Jama*, 259(18): Pp. 2720-4, (1988).
- [6] R.C. Brownson, C.M. Hoehner, K. Day, A. Forsyth, and J.F. Sallis, Measuring the built environment for physical activity: state of the science, *American journal of preventive medicine*, 36(4): Pp. S99-S123. e12, (2009).
- [7] L.D. Frank, J.F. Sallis, B.E. Saelens, L. Leary, K. Cain, T.L. Conway, and P.M. Hess, The development of a walkability index: application to the Neighborhood Quality of Life Study. *British journal of sports medicine*, 44(13): Pp. 924-933, (2010).
- [8] L.D. Frank and P. Engelke, Multiple impacts of the built environment on public health: walkable places and the exposure to air pollution. *International regional science review*, 28(2): Pp. 193-216, (2005).
- [9] L.D. Frank, J.F. Sallis, T.L. Conway, J.E. Chapman, B.E. Saelens, and W. Bachman, Many pathways from land use to health: associations between neighborhood walkability and active transportation, body mass index, and air quality, *Journal of the American planning Association*, 72(1): Pp. 75-87, (2006).
- [10] L. Herbert, V. Owen, L. Pascarella, and R. Streisand, Text message interventions for children and adolescents with type 1 diabetes: a systematic review, *Diabetes technology & therapeutics*, 15(5): Pp. 362-370, (2013).
- [11] N.H. Brodersen, A. Steptoe, S. Williamson, and J. Wardle, Sociodemographic, developmental, environmental, and psychological correlates of physical activity and sedentary behavior at age 11 to 12. *Annals of Behavioral Medicine*, 29(1): Pp. 2-11, (2005).
- [12] R. Cervero and M. Duncan, Walking, bicycling, and urban landscapes: evidence from the San Francisco Bay Area. *American journal of public health*, 93(9): Pp. 1478-1483, (2003).
- [13] A.F. Clark, D.M. Scott, and N. Yiannakoulis, Examining the relationship between active travel, weather, and the built environment: a multilevel approach using a GPS-enhanced dataset. *Transportation*, 41: Pp. 325-338, (2014).
- [14] R.B. Copperman and C.R. Bhat, An analysis of the determinants of children's weekend physical activity participation. *Transportation*, 34: Pp. 67-87, (2007).
- [15] R.C. Brownson, E.A. Baker, R.A. Housemann, L.K. Brennan, and S.J. Bacak, Environmental and policy determinants of physical activity in the United States. *American journal of public health*, 91(12): Pp. 1995-2003, (2001).
- [16] J.E. Gómez, B.A. Johnson, M. Selva, and J.F. Sallis, Violent crime and outdoor physical activity among inner-city youth. *Preventive medicine*, 39(5): Pp. 876-881, (2004).
- [17] T.E. McMillan, The relative influence of urban form on a child's travel mode to school. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(1): Pp. 69-79, (2007).
- [18] P.J. Troped, R.P. Saunders, R.R. Pate, B. Reininger, J.R. Ureda, and S.J. Thompson, Associations between self-reported and objective physical environmental factors and use of a community rail-trail. *Preventive medicine*, 32(2): Pp. 191-200, (2001).

- [19] A.C. King, C. Castro, S. Wilcox, A.A. Eyler, J.F. Sallis, and R.C. Brownson, Personal and environmental factors associated with physical inactivity among different racial-ethnic groups of US middle-aged and older-aged women. *Health psychology*, 19(4): Pp. 354, (2000).
- [20] A. Timperio, K. Ball, J. Salmon, R. Roberts, B. Giles-Corti, D. Simmons, L.A. Baur, and D. Crawford, Personal, family, social, and environmental correlates of active commuting to school, *American journal of preventive medicine*. 30(1): Pp. 45-51, (2006).
- [21] A.F. Clark and D.M. Scott, Barriers to Walking: An Investigation of Adults in Hamilton (Ontario, Canada). *Int J Environ Res Public Health*, 13(2): Pp. 179, (2016).
- [22] G. Kash and N. McDonald, Travel Behavior and Perceived Barriers to Walking More Frequently: An Analysis of the Relationship Between Mode Choice and Attitudes in California, (2012).
- [23] T. Yousefinezhadi and H. Soori, Study of obstacles and restrictions of pedestrians for commuting on foot in the city of Tehran: a qualitative study, *Safety promotion and injury prevention (Tehran)*. 5(4): Pp. 185-192, (2018). (In Persian).
- [24] A.M. Adachi-Mejia, K.M. Drake, T.A. MacKenzie, L. Titus-Ernstoff, M.R. Longacre, K.M. Hendricks, M.L. Beach, and M.A. Dalton, Perceived intrinsic barriers to physical activity among rural mothers, *J Womens Health (Larchmt)*. 19(12): Pp. 2197-202, (2010).
- [25] J. Dawson, M. Hillsdon, I. Boller, and C. Foster, Perceived barriers to walking in the neighborhood environment: a survey of middle-aged and older adults. *Journal of Aging and Physical Activity*, 15(3): Pp. 318-335, (2007).
- [26] J. Spinney and H. Millward, Time and money: a new look at poverty and the barriers to physical activity in Canada, *Social Indicators Research*. 99: Pp. 341-356, (2010).
- [27] Z. Aliyas, Fear of Crime and Individual Factors as Barriers to Leisure Walking in Neighborhoods, *Iran University of Science & Technology*. 29: Pp. 269-275, (2019).
- [28] E.A. Richards and S. Woodcox, Barriers and Motivators to Physical Activity Prior to Starting a Community-Based Walking Program, *Int J Environ Res Public Health*. 18(20), (2021).
- [29] G.F. Dunton and M. Schneider, Perceived barriers to walking for physical activity, *Prev Chronic Dis*. 3(4): Pp. A116, (2006).
- [30] A. Tajik and P. Partovi, Walkability Conceptual Model and Analytical Framework with the Emphasis on New Urbanism Approach (case study: 4th phase of Mehrshahr), *Journal of Urban Studies*, 3(9): Pp. 81-96, (2014). (In Persian).
- [31] A. Razzaghi, A. Pourrajabi, and S. Daneshi, Obstacles and problems related to elderly pedestrians: a qualitative study. *Safety promotion and injury prevention (Tehran)*, 5(2): Pp. 73-78, (2017). (In Persian).
- [32] M. Fallah Z, V. Abolhasannejad, A.R. Mamdoohi, and T. Nordfjærn, Barriers to children's walking to school in Iranian and Chinese samples, *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour*, In press, (2020).
- [33] K. Ralph, M. Smart, R. Noland, S. Wang, and L. Cintron, Is it really too far? Overestimating walk time and distance reduces walking. *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour*, 74: Pp. 522-535, (2020).
- [34] Y. Yang and A.V. Diez-Roux, Walking distance by trip purpose and population subgroups, *Am J Prev Med*. 43(1): Pp. 11-9, (2012).
- [35] M. Habibian and A. Hosseinzadeh, Walkability index across trip purposes. *Sustainable Cities and Society*, 42: Pp. 216-

- 225, (2018).
- [36] K. Al-Hagla, Evaluating new urbanism's walkability performance: A comprehensive approach to assessment in Saifi Village, Beirut, Lebanon. *Urban Design International*, 14: Pp. 139-151, (2009).
- [37] K. Ball, A. Bauman, E. Leslie, and N. Owen, Perceived environmental aesthetics and convenience and company are associated with walking for exercise among Australian adults, *Prev Med*. 33(5): Pp. 434-40, (2001).
- [38] A. Sharbati, Analysis of Factors Affecting the Reluctance of Citizens to Use Pedestrian Bridges (Case study: Gorgan). *Journal of Research and Urban Planning*, 7(27): Pp. 147-162, (2017). (In Persian).
- [39] N.A. Gallagher, K.A. Gretebeck, J.C. Robinson, E.R. Torres, S.L. Murphy, and K.K. Martyn, Neighborhood factors relevant for walking in older, urban, African American adults, *J Aging Phys Act*. 18(1): Pp. 99-115, (2010).
- [40] M. Ahadi, M. Hassanpour, P. Bashiri, and P. Bashiri, Strategies to promote safety to prevent pedestrian in the city of Qazvin. *Safety promotion and injury prevention (Tehran)*, 4(3): Pp. 143-150, (2016). (In Persian).
- [41] D. Lockett, A. Willis, and N. Edwards, Through seniors' eyes: an exploratory qualitative study to identify environmental barriers to and facilitators of walking. *Can J Nurs Res*, 37(3): Pp. 48-65, (2005).
- [42] A. Osama and T. Sayed, Evaluating the impact of connectivity, continuity, and topography of sidewalk network on pedestrian safety. *Accident; analysis and prevention*, 107: Pp. 117-125, (2017).
- [43] S. Strath, R. Isaacs, and M.J. Greenwald, Operationalizing environmental indicators for physical activity in older adults. *Journal of aging and physical activity*, 15(4): Pp. 412-424, (2007).
- [44] R. Mitra, H. Siva, and M. Kehler, Walk-friendly suburbs for older adults? Exploring the enablers and barriers to walking in a large suburban municipality in Canada. *J Aging Stud*, 35: Pp. 10-9, (2015).
- [45] K. Train and C. Winston, Vehicle Choice Behavior and the Declining Market Share of U.S. Automakers. *International Economic Review*, 48: Pp. 1469-1496, (2007).
- [46] F. Harrell, *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis*, Springer International Publishing, (2015).
- [47] S. Chatterjee and A.S. Hadi, *Regression Analysis by Example*. John Wiley & Sons, (2013).



Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain

Research Article

Reza Jahanshahi,¹ Masoomeh Navardi², Naser Asadi³, Mohammad Reza Mirbalouchzahi⁴

DOI: [10.22067/jfcei.2024.89496.1318](https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.89496.1318)

1. Introduction

Considering the global limitation of water resources, studying water quality is essential to identify and utilize these resources as efficiently as possible. The chemical composition of groundwater is influenced by numerous factors, including the chemical properties of rainwater and surface water, the geological and mineralogical structures of the aquifer and watershed, subsurface geochemical processes within the aquifer, and the groundwater retention time.

The Iranshahr Plain, covering an area of 9,436.6 km², is situated in the hot and arid region of southeastern Iran in Sistan and Baluchestan Province. Due to the fine-grained texture of the Iranshahr Plain, groundwater flow is reduced, leading to an increase in groundwater retention time. This extended retention allows for chemical reactions and the dissolution of soluble deposits in the groundwater.

In terms of agricultural activity, the Iranshahr region includes approximately 30,000 hectares of agricultural land. The primary fertilizers used in the area are urea and superphosphate. Therefore, studying the chemical evolution of the region's water resources—considering the expansion of agricultural lands and the indiscriminate extraction of groundwater—along with the reduction in precipitation in the Iranshahr area, is crucial. Such research can help determine the optimal physical and chemical quality of water for various uses and assess the degree of quality degradation.

2. Method

In the Iranshahr Plain, qualitative data were collected from 27 groundwater sampling sites (wells and qanats), time series data from 50 observation wells on water table levels, and data on pumping durations and groundwater extraction

rates from the aquifer. These data were obtained from the Sistan and Baluchestan Regional Water Company.

This study utilized average quantitative and qualitative data to evaluate and discuss the region's groundwater conditions. The research focused on analyzing flow direction maps, topography, ion dispersion, groundwater types, EC (electrical conductivity) and pH levels, aquifer withdrawal rates, Piper mineral saturation index charts, changes in water levels, and results from factor and cluster analyses.

3. Results

The lag time between rainfall and changes in the water table has increased around Iranshahr and Bampur cities, as well as in observation wells farther from the river. Groundwater withdrawal is higher in downstream areas compared to upstream regions. Three groundwater types—Na-Cl, Na-HCO₃, and Na-SO₄—are observed in the plain. Electrical conductivity (EC) values increase from approximately 649 to 7,047 $\mu\text{S}/\text{cm}$ from the eastern to the western parts of the region, while pH levels decrease in the same direction. As groundwater withdrawal intensifies, water table levels decline, leading to a simultaneous increase in electrical conductivity and a reduction in groundwater quality (Fig. 1).

Most groundwater samples in the region are supersaturated with respect to calcite and dolomite, which tend to precipitate. However, the groundwater remains undersaturated with respect to anhydrite, gypsum, and halite, indicating a tendency to dissolve these minerals.

*Manuscript received August 20, 2024, Revised September 1, 2024, Accepted November 12, 2024.

¹ Associate Professor of Hydrogeology, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: rezajahanshahi@ut.ac.ir ,

² M. Sc Student of Hydrogeology, Geology Department, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

³ Assistant Professor of Hydrogeology, Geology Department, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

⁴ Ph.D of Chemistry, Sistan and Baluchestan Water and Wastewater Co., Iran.

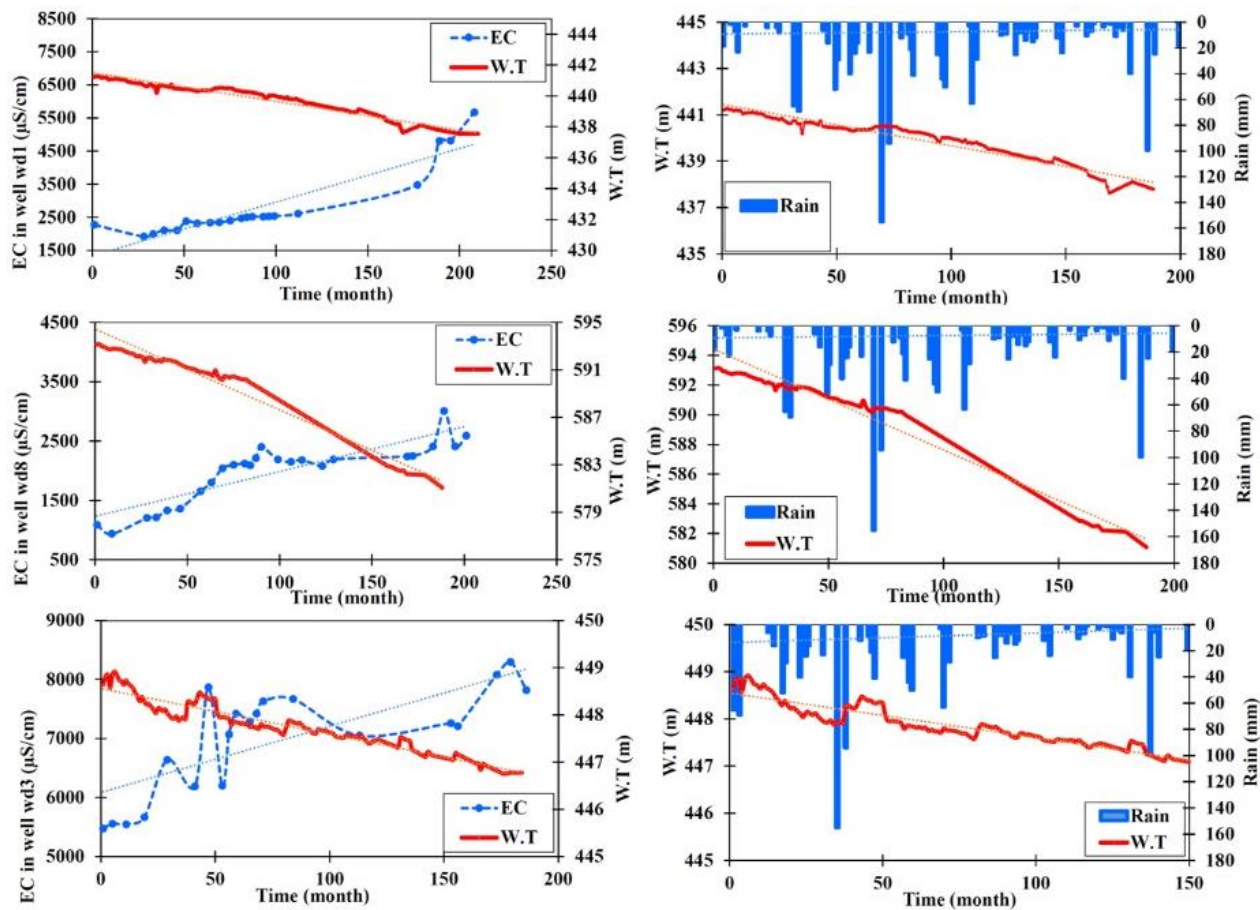


Figure 1. Time variation of EC, rainfall and water table in the study area.

4. Conclusion

In the study area, the iso-potential map and the direction of the groundwater flow showed that a large part of the groundwater from the carbonate unit rocks in the east of the plain entered the aquifer and moved to the west of the area, and during this movement, the quality of the groundwater in the area decreased. The hydrochemical evolution of the groundwater showed that the incoming groundwater type was carbonated in the east of the region and eventually became the dominant type of Na-Cl. The location of exploitation wells with a higher pumping rate and high electrical conductivity in the center and west side of the aquifer has caused a drop in the water table and a decrease in the quality of groundwater. Based on the lag time values between precipitation and its effect on the groundwater, it can be said that the direction of the groundwater flow mainly follows the topography of the region and in urban areas due to the reduction of permeability and high harvesting and in the downstream of the aquifer due to finer particles. Finally, it can be said that natural geological factors and groundwater harvesting are the factors influencing the quality of the ground water in the aquifer.



تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت ایرانشهر*

مقاله پژوهشی

رضا جهانشاهی^(۱)  معصومه نوردی^(۲) ناصر اسدی^(۳) محمدرضا میربلوچ زهی^(۴)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.89496.1318

چکیده در این تحقیق به بررسی هیدروشیمی و کیفیت منابع آب زیرزمینی در ۲۷ محل از چاه‌های عمیق، نیمه‌عمیق و قنات در دشت ایرانشهر، استان سیستان و بلوچستان، پرداخته شده است. طبق نتایج و یافته‌های این تحقیق ارتفاع دشت از شرق به غرب کاهش یافته و جهت حرکت آب زیرزمینی از شرق به سمت غرب و تقریباً موازی مسیر رودخانه فصلی منطقه می‌باشد. تأخیر تأخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی نشان می‌دهد در محدوده شهر ایرانشهر و بم‌پور و همچنین در چاه‌های مشاهده‌ای دورتر از رودخانه این تأخیر تأخیر زمانی افزایش یافته است. میزان برداشت از آبخوان در مناطق پایین دست بیشتر از بالادست می‌باشد. در آب زیرزمینی دشت سه نوع تیپ آب کلروسدیک، بی‌کربنات سدیک و سولفات سدیک مشاهده می‌شود. میزان EC از حدود ۶۴۹ تا ۷۰۴۷ میکروموس بر سانتی‌متر از سمت شرق به غرب منطقه افزایش می‌یابد، در حالی که میزان pH از شرق به غرب کاهش پیدا می‌کند. هم‌زمان با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از آبخوان، روند افزایش هدایت الکتریکی و کاهش کیفیت در آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع هستند و این کانی‌ها تمایل به ته‌نشست دارند اما نسبت به انیدریت، ژپس و هالیت تحت اشباع هستند و آب زیرزمینی تمایل به حل کردن این کانی‌ها دارد. به طور کلی می‌توان گفت که فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی واحدهای زمین‌شناسی و برداشت از آبخوان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی آب زیرزمینی، اندیس اشباع کانی، تأخیر زمانی، هیدروشیمی.

Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain

Reza Jahanshahi,

Masoomah Navardi,

Naser Asadi,

Mohammad Reza Mirbalouchzahi

Abstract This research investigated the hydrochemistry and quality of the groundwater resources in the Iranshahr plain, Sistan and Baluchestan Province, South East of Iran. Major ions, electrical conductivity and pH of groundwater have been studied in 27 points of deep, semi-deep wells and qanats in the study area. According to the results, the topographic elevation of the plain decreased from east to west and the direction of ground water flow was from east to west too (almost parallel to direction of the seasonal river in the study area). The lag time between rainfall and water table showed that around of Iranshahr and Bampur cities and observation wells far from river were increased. In the of plain groundwater extraction amount in the downstream of plain was more than upstream. There were three types of Na-Cl, Na-HCO₃, and Na-SO₄ in the groundwater of study area. The amount of EC increased from about 649 to 7047 $\mu\text{S}/\text{cm}$ from east to west of plain, while the pH decreases in this direction. Simultaneously with the decrease in the level of water table due to extraction from the aquifer, the process of increasing the electrical conductivity and decreasing the quality of the groundwater had happened. Most of the groundwater samples in the study area were supersaturated with respect to calcite and dolomite (tend to precipitate), while they were undersaturated with respect to anhydrite, gypsum, and halite (tend to dissolution). Generally, geology setting and groundwater are factors effecting the quality groundwater.

Key words Groundwater, Hydrochemistry, Lag time, Mineral saturation index.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۵/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۲۲ می‌باشد.

Email: rezajahanshahi@ut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۳) استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۴) دکتری شیمی، شرکت آب و فاضلاب استان سیستان و بلوچستان.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. با توجه به محدودیت منابع آب در کل دنیا، مطالعه کیفیت آب در جهت شناسایی و استفاده هر چه بهتر آن کمک می‌کند. ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی توسط فاکتورهای زیادی کنترل می‌شود که شامل ترکیب شیمیایی باران و آب‌های سطحی، ساختارهای زمین‌شناسی و کانیایی آبخوان و حوضه آبریز و فرایندهای ژئوشیمیایی زیرسطحی در آبخوان و زمان ماندگاری آب می‌باشد. تغییرات زمانی در منشأ و ترکیبات آب تغذیه کننده، فاکتورهای انسانی و هیدرولوژیکی می‌تواند باعث تغییرات پریودیک در کیفیت آب زیرزمینی شود. افزایش اطلاعات از تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در مناطق خشک، منجر به شناخت بیشتر سیستم هیدرووشیمیایی و مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی می‌شود [1] و [2]. در خصوص بررسی آب‌زمین‌شیمی، تکامل هیدروژئوشیمیایی و عوامل مؤثر بر کیفیت منابع آب پژوهش‌های زیادی در سطح دنیا انجام شده است. بر مبنای پژوهش انجام شده در دشت سمنان، در این دشت ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی به وسیله نفوذ آب شور رودخانه آبگرم، انحلال نمک‌ها، زمان ماندگاری، هوازددگی سیلیکات‌ها، تبادل کاتیونی، تبخیر و آب برگشت کشاورزی کنترل می‌شود [2]. مطالعه‌ای با هدف بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و طبقه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی دشت هرزندات انجام شده است [3]. نتایج حاکی از آن بود که اغلب آب‌های کیفیت پایین از نظر شرب، کشاورزی و صنعت در بخش‌های مرکزی و شمالی دشت قرار دارند و از لحاظ مصارف صنعتی برخی از منابع آب دارای خاصیت رسوب‌گذاری و بخشی نیز خورنده هستند. بر اساس ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه معدنی اردستان، استان اصفهان [4] کیفیت آب زیرزمینی در بیشتر این منطقه برای کشاورزی و آشامیدن مناسب است؛ اما، با توجه به پتانسیل تولید زهاب اسیدی در اثر اکسایش کانی‌هایی همانند پیریت در هنگام استخراج ماده معدنی در آینده، ممکن است کیفیت منابع آب اردستان تحت تأثیر قرار گیرد. در خصوص تکامل هیدرووشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود [5]

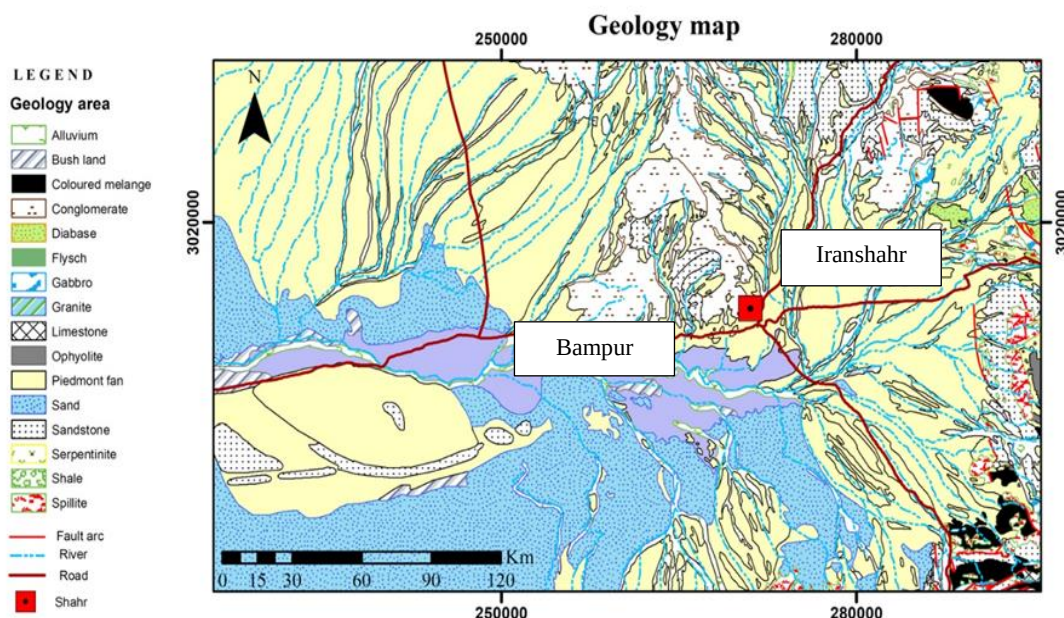
واکنش آب - سنگ، تبخیر و نفوذ آب شور دریای خزر از مهم‌ترین عوامل کنترل کننده شیمی آب رودخانه تشخیص داده شده است. در تحقیقی دیگر در آبخوان حسن آباد شهرستان نیریز [6] احتمال داده می‌شود با توجه به کاهش بارندگی و زمان ماندگاری بالای آب‌های زیرزمینی در اعماق زیاد، افزایش هدایت الکتریکی و کاهش کیفیت آب منطقه به خصوص در چاه‌های شمال و شمال غربی ایجاد شده است. بر اساس پژوهش انجام شده در خصوص فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی بر خصوصیات هیدرووشیمیایی آب زیرزمینی در دشت گرمسار فرایندهای اصلی دخیل در شیمی آب‌های زیرزمینی عبارت بودند از انحلال در طول مسیر جریان، تبخیر، برهمکنش آب سنگ، تبادل یونی و فرایندهای اختلاط [7]. ویژگی‌های هیدرووشیمیایی آبخوانی کم‌عمق در منطقه‌ای نیمه‌خشک واقع در شمال غربی الجزایر و شناسایی عوامل اصلی حاکم بر کیفیت آب زیرزمینی بررسی شده است و مشخص شد که هوازددگی سنگ‌های کربناته و سیلیکات‌ها، انحلال و تبخیر هالیت و تبخیر و تبادل کاتیونی عوامل طبیعی تأثیرگذار بر شیمی آب منطقه هستند [8].

دشت ایرانشهر با وسعت ۹۴۳۶/۶ کیلومتر مربع در ناحیه گرم و خشک جنوب شرق ایران در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. به علت ریزدانه بودن بافت دشت ایرانشهر سرعت حرکت آب‌های زیرزمینی کاهش پیدا کرده و منجر به افزایش زمان ماندگاری آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین فرصت زیادی برای انجام واکنش‌های شیمیایی و انحلال نهشته‌های قابل انحلال در آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. منطقه ایرانشهر از لحاظ فعالیت‌های کشاورزی دارای حدود سی هزار هکتار اراضی کشاورزی است و کود مصرفی در کشاورزی منطقه عمدتاً اوره و سوپرفسفات‌تریپل است. بنابراین بررسی تکامل شیمیایی منابع آب منطقه با توجه به گسترش اراضی کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی منطقه با توجه به کاهش نزولات جوی در محدوده شهر ایرانشهر، می‌تواند در تعیین کیفیت مطلوب فیزیکی و شیمیایی آب در راستای نوع استفاده و ارزیابی میزان کاهش کیفیت منابع زیرزمینی، اطلاعات مفیدی در اختیار قرار دهد.

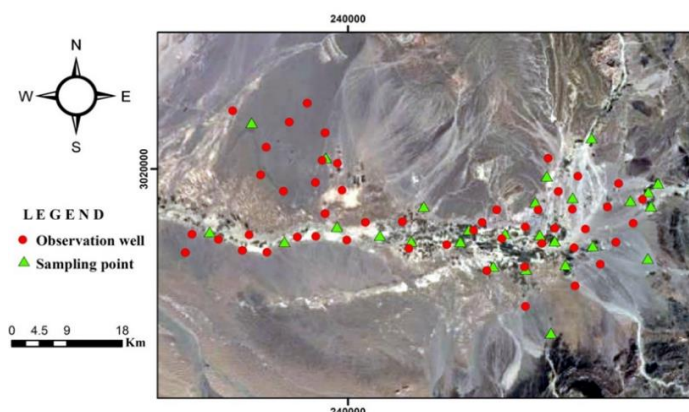
منطقه مورد مطالعه

دشت ایرانشهر، بخشی از حوزه آبریز هامون - جازموریان می باشد که در شرق این حوزه قرار گرفته است. در واقع این محدوده شامل یک دشت می باشد که از شمال شرق به کارواندر و ایرندگان، و از غرب و شمال غرب به بزمان - سردگال، از جنوب غرب به اسپکه - مسکوتان، از جنوب به قصرقند و راسک - سرباز و از شرق به زابلی محدود می شود. حداقل و حداکثر ارتفاع در دشت به ترتیب ۴۱۹ و ۱۰۱۳ متر و در ارتفاعات ۴۹۷ و ۲۲۲۲ متر می باشد [9]. متوسط بارندگی سالانه در دشت ایرانشهر - بمپور ۱۰۱/۳۳ میلی متر بر اساس ایستگاه باران سنجی دامن ثبت شده است. در محدوده مطالعاتی ایرانشهر رودخانه های کنارو، بمپور و دامن جریان دارند. در منطقه ایرانشهر از نظر زمین شناسی می توان سری سنگ های رسوبی اواخر دوران دوم تا عهد حاضر و همچنین بیرون زدگی هایی از سنگ های آذرین بیرونی و درونی را در منطقه مشاهده نمود (شکل ۱). سنگ های آهکی تیره کرتاسه شامل یکسری سنگ های آهکی تیره رنگ می باشد که فرسودگی نسبتاً زیادی را تحمل کرده اند، که گسترش آنها بیشتر در قسمت جنوب شرقی

منطقه در ارتفاعات جاده ایرانشهر به سرباز می باشد. سنگ های فلیش ائوسن با تناوبی از شیل و مارن و ماسه سنگ، مهم ترین گسترش های واحد فلیش در شمال ایرانشهر به حساب می آید. واحد رسوبی الیگوسن تناوبی از آهک دولومیتی و مارن، همراه لایه های ضخیم کنگلومرای می باشد، در شمال غربی و همچنین در شمال ایرانشهر در غرب ارتفاعات دامن دیده می شود. رسوبات میوسن در این ناحیه دارای مورفولوژی مشخصی هستند و همانند سری رسوبات میوسن ایران مرکزی آثاری از رخساره تبخیری (گچ و نمک) در تناوب رسوب گذاری دیده می شود. رسوبات آبرفتی که اکثراً شامل ماسه، قلوه سنگ و رس می باشند و بسیار نفوذپذیر بوده و کلیه حواشی دشت به صورت مخروط افکنه های به هم پیوسته قابل رؤیت هستند و پهنه وسیعی در منطقه از لحاظ مناطق تغذیه ای سفره آبدار منطقه را شامل می شوند. آبخوان اصلی دشت ایرانشهر که حاصل فرسایش ارتفاعات بوده و از نوع آبخوان آزاد می باشد، در حال حاضر با ترکیبی از قلوه سنگ، شن، ماسه، سیلت و رس تشکیل یافته است. منابع آب زیرزمینی منطقه چاه و قنات می باشند.



شکل ۱ نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲ نقشه پراکندگی نقاط نمونه برداری کیفی و اندازه گیری سطح ایستابی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

روش کار

در دشت ایرانشهر داده های کیفی مربوط به ۲۷ محل نمونه برداری (چاه و قنات) از آب زیرزمینی (شکل ۲)، داده های زمانی تغییرات سطح ایستابی در ۵۰ حلقه چاه مشاهده ای (شکل ۲) و میزان زمان پمپاژ و برداشت آب زیرزمینی از آبخوان از شرکت آب منطقه ای سیستان و بلوچستان اخذ شده است. در این تحقیق از میانگین داده های کمی و کیفی سال آبی ۱۴۰۰ برای ارزیابی و بحث پیرامون منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. مبنای پژوهش بررسی نقشه جهت جریان، توپوگرافی، پراکندگی یون ها، تیپ آب زیرزمینی، میزان EC و pH، میزان برداشت از آبخوان، نمودار اندیس اشباع کانی ها، پایپر، تغییرات سطح ایستابی، تحلیل عاملی و خوشه ای می باشد.

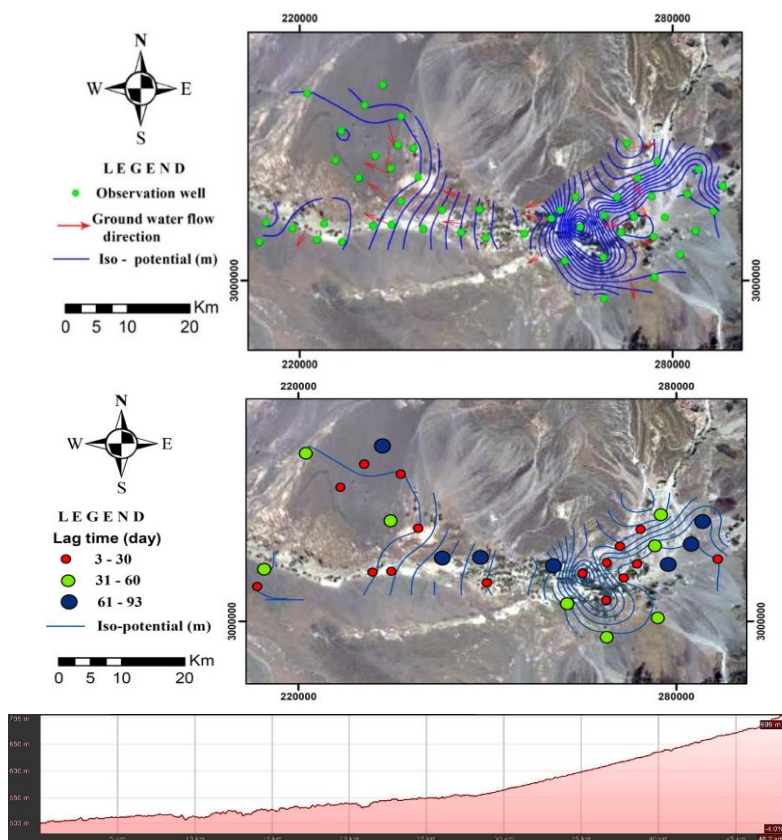
یافته ها و تجزیه و تحلیل

سطح ایستابی و جریان آب زیرزمینی

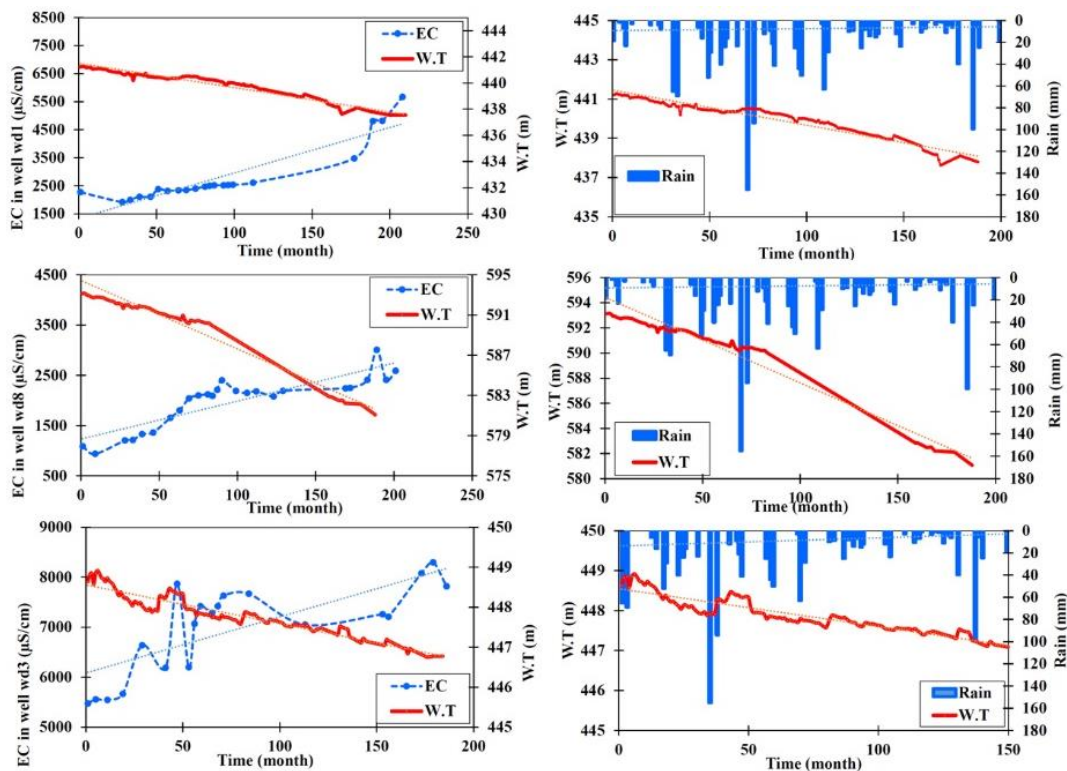
بر اساس نقشه هم ارزش تراز سطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ایرانشهر (شکل ۳) مشاهده می شود آب زیرزمینی به طور کلی از سمت شرق به طرف غرب جریان دارد که تقریباً موازی مسیر رودخانه فصلی (رودخانه بمپور) منطقه می باشد. علاوه بر آن دیده می شود در محدوده دو شهر ایرانشهر و بمپور مخروط افت بزرگی (خطوط بسته) در سطح ایستابی ایجاد شده است که نشان از برداشت آب زیرزمینی توسط چاه های بهره برداری بوده که یک نوع چاه میدانی را ایجاد نموده است. همچنین مشاهده می شود شیب هیدرولیکی سطح ایستابی از شرق دشت به سمت غرب کاهش می یابد؛ که می تواند به تغییرات توپوگرافی سطح زمین، تغییرات اندازه و جنس ذرات

آبخوان و تأثیر تغییرات مکانی، زمانی میزان برداشت از آب زیرزمینی و یا عواملی مانند تغذیه در بالادست [11,10] مربوط باشد. سطح مقطع ترسیم شده از توپوگرافی سطح زمین در (شکل ۳) نشان می دهد توپوگرافی نیز از شرق به سمت غرب کاهش می یابد و لذا کاهش شیب هیدرولیکی در این جهت امری طبیعی خواهد بود. به منظور بررسی واکنش آب زیرزمینی در دشت ایرانشهر به تغییرات بارش، اقدام به محاسبه تأخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی شده است. در شکل (۳) پراکندگی تأخیر زمانی نشان می دهد در محدوده شهر ایرانشهر و بمپور به دلیل کاهش نفوذپذیری سطح زمین در اثر توسعه شهرنشینی (مناطق با پوشش سیمان، آسفالت و ایزوگام) تأخیر زمانی بین نفوذ بارش و اثر آن در افزایش تراز سطح ایستابی، افزایش یافته است. همچنین در چاه های مشاهده ای دورتر از رودخانه این تأخیر زمانی نیز افزایش یافته است.

نمودار تغییرات زمانی سطح ایستابی تعدادی از چاه های مشاهده ای، بارش و هدایت الکتریکی آب زیرزمینی مربوط به چاه های بهره برداری منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰ در شکل (۴) نشان داده شده است. در میزان تغییرات زمانی بارش روند فصلی مشاهده می شود اما روند کاهشی یا افزایش طی این سال دیده نمی شود. در حالی که روند کاهشی سطح ایستابی در دشت ایرانشهر مشاهده می شود. همچنین در این شکل دیده می شود هم زمان با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از آبخوان، روند افزایش هدایت الکتریکی (افزایش شوری) و یا کاهش کیفیت آب زیرزمینی (احتمالاً در اثر استخراج آب زیرزمینی در اعماق بیشتر با زمان ماندگاری طولانی تر) نیز اتفاق افتاده است.



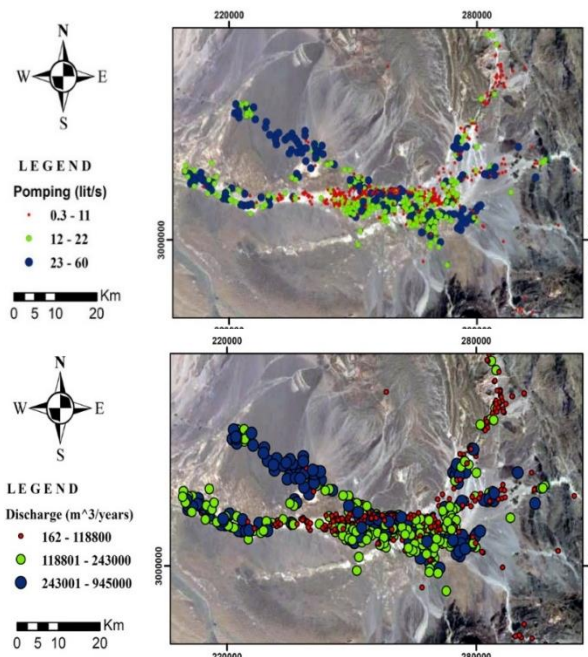
شکل ۳ خطوط هم تراز سطح ایستابی و جریان آب زیرزمینی در سال ۱۴۰۰، سطح مقطع توپوگرافی و نقشه پراکندگی تأخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴ نمودار تغییرات زمانی هدایت الکتریکی، بارش و سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه

خصوصیات برداشت از آبخوان

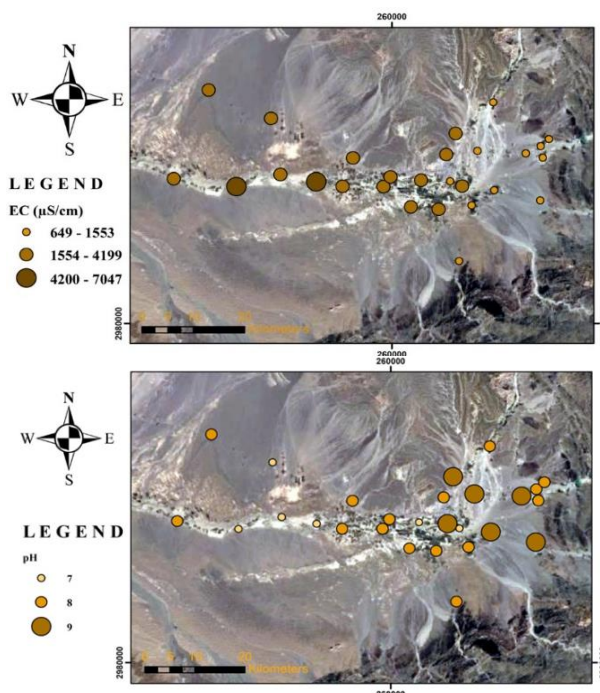
نقشه پراکندگی مقدار نرخ پمپاژ و تخلیه سالیانه در شکل (۵) ارائه شده است و مشاهده می‌شود که در مناطق پایین دست میزان برداشت از آبخوان افزایش یافته است. به عبارت دیگر از شرق به غرب دشت، حجم استخراج آب زیرزمینی بیشتر می‌شود.



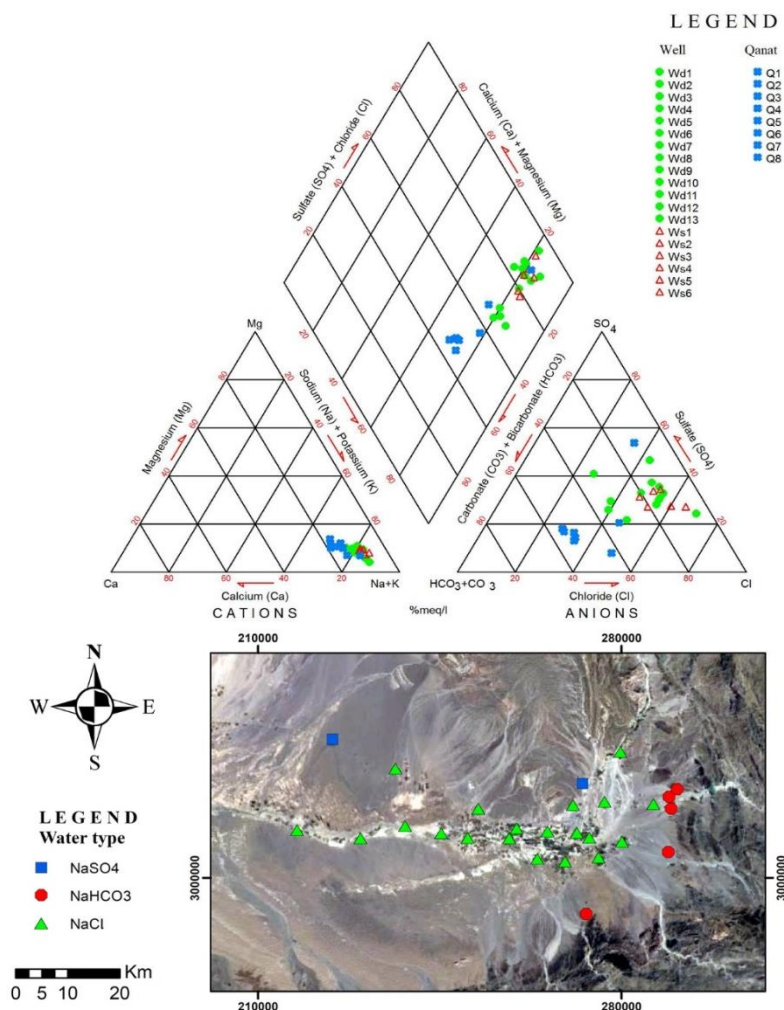
شکل ۵ نقشه پراکندگی نرخ پمپاژ و تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه

آب‌زمین‌شیمی

بر اساس داده‌های کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، میزان هدایت الکتریکی در منابع آب زیرزمینی بین ۶۴۹ تا ۷۰۴۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. نقشه توزیع پراکندگی هدایت الکتریکی (شکل ۶) نشان می‌دهد که در قسمت شرق منطقه میزان هدایت الکتریکی کم است و در نواحی مرکزی و غرب منطقه میزان هدایت الکتریکی افزایش پیدا کرده است که تقریباً با جهت جریان آب زیرزمینی منطبق می‌باشد. میزان pH در آب‌های زیرزمینی منطقه بین ۷/۲ تا ۸/۱ متغیر است و بیشترین میزان آن در قسمت شرق منطقه دیده می‌شود و به سمت غرب منطقه مورد مطالعه مقدار آن کاهش پیدا یافته است که احتمالاً به دلیل دور شدن از واحدهای کربناته سمت شرق منطقه باشد (شکل ۶). بر اساس نمودار پایپر (شکل ۷) سه نوع تیپ آب کلروسدیک، بی‌کربنات‌سدیک و سولفات‌سدیک در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. موقعیت سه نوع آب بر روی منطقه مورد مطالعه (شکل ۷) بیشتر نمونه‌ها از نوع کلروسدیک می‌باشد. نمونه آب بی‌کربنات‌سدیک در آب قنات خارج شده از مخروط افکنه‌ها و در غرب (بالادست) و جنوب منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. نوع آب سولفات‌سدیک فقط در دو محل مشاهده می‌شود لذا در منطقه مورد مطالعه گسترش چندانی ندارد.



شکل ۶ نقشه پراکندگی EC و pH در منابع آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه



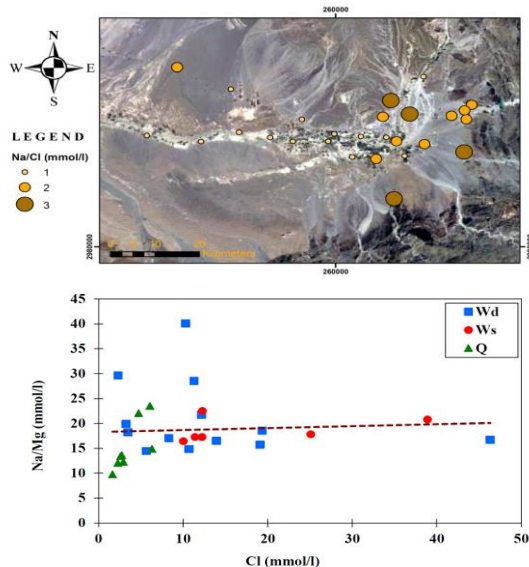
شکل ۷ نمودار پایپر منابع آب زیرزمینی و نقشه پراکندگی نوع آب در منطقه مطالعاتی

بالا است و یک روند کاهشی از شرق به غرب منطقه دیده می‌شود. در واقع در جهت جریان آب زیرزمینی این نسبت کاهش می‌یابد و دلیل احتمالی آن می‌تواند هوازگی کانی‌های رسی، فاضلاب‌های صنعتی و یا فعالیت‌های کشاورزی در شرق منطقه باشد. همچنین جهت تشخیص اثر کاتیونی، نسبت سدیم به کلسیم و سدیم به منیزیم (شکل ۸) ترسیم شد و مشاهده می‌شود این نسبت‌ها نیز افزایش یافته است. بنابراین تبادل کاتیونی در کاهش نسبت سدیم در جهت جریان آب زیرزمینی نقش چندانی نداشته است؛ بنابراین فقط انحلال هالیت و پلاژیوکلازها کنترل‌کننده میزان سدیم در آب زیرزمینی منطقه هستند. همچنین در بالادست منطقه مورد مطالعه کانی‌های پلاژیوکلاز سدیم‌دار نقش بیشتری در ورود سدیم به آب زیرزمینی دارند.

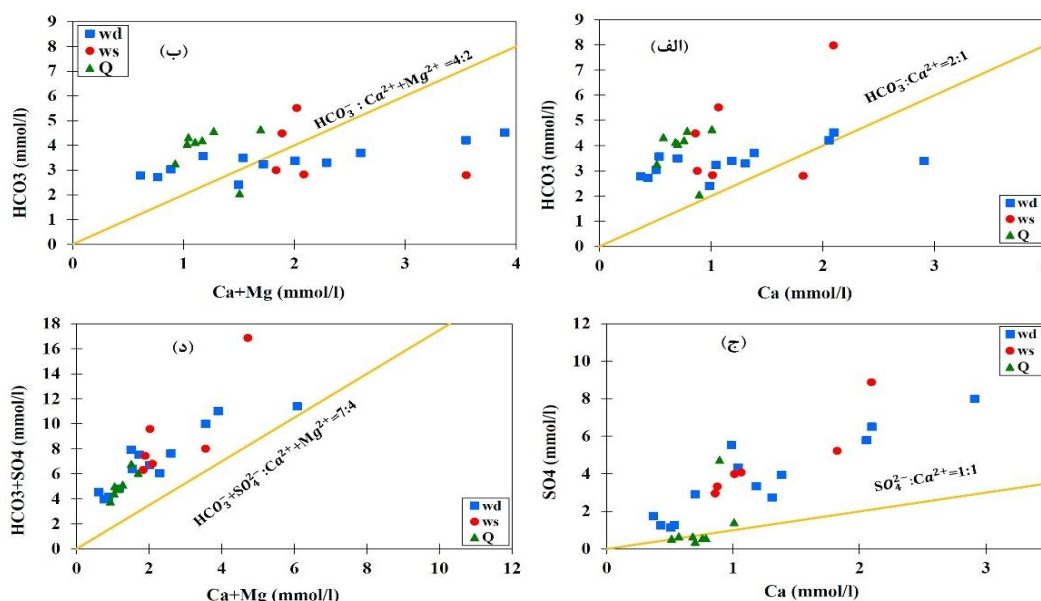
با توجه به رابطه مولی بیکربنات و کلسیم در شکل (۹)

با توجه به نسبت‌های یونی می‌توان فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی را مشخص کرد. از نسبت مولی کلراید/سدیم می‌توان برای تعیین منشأ سدیم در آب‌های زیرزمینی استفاده کرد. در صورتی که نسبت مولی سدیم به کلراید بیشتر از یک باشد، سدیم از هوازگی‌های سیلیکات نیز منشأ گرفته است و در صورتی که این نسبت کمتر از یک و یا نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده انحلال نمک طعام است و معمولاً در آب‌های شور دیده می‌شود. با توجه به شکل (۸) و رسم نمودار کلراید/سدیم در مقابل کلراید مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌ها در بالای خط ۱ قرار گرفته‌اند؛ لذا علاوه بر انحلال کانی هالیت، ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی تحت تأثیر هوازگی سیلیکات و تبادل کاتیونی نیز می‌باشد. با توجه به نقشه پراکندگی نسبت کلراید/سدیم در منطقه (شکل ۸) مشاهده می‌شود که این نسبت در شرق منطقه

انحلال کانی کلسیت یا دولومیت نیز می‌تواند حاصل شده باشد. در نمونه‌های بالای خط نسبت ۱:۱ غلظت سولفات بیشتر از کلسیم بوده و کلسیم به احتمال زیاد بر اثر تبادل کاتیونی از محیط خارج شده است. نسبت مولی $\text{Ca} + \text{Mg}$ و $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ (شکل ۹) نشان داد تمامی نمونه‌ها در بالای خط نسبت ۷:۴ قرار دارند و بیان‌کننده هوازگی سیلیکات‌ها می‌باشند. تمام نمونه‌ها در بالای خط ۷:۴ قرار دارند که نشان‌دهنده انحلال کانی‌های کلسیت و دولومیت و در نتیجه افزایش یون‌های کلسیم و منیزیم می‌باشد.

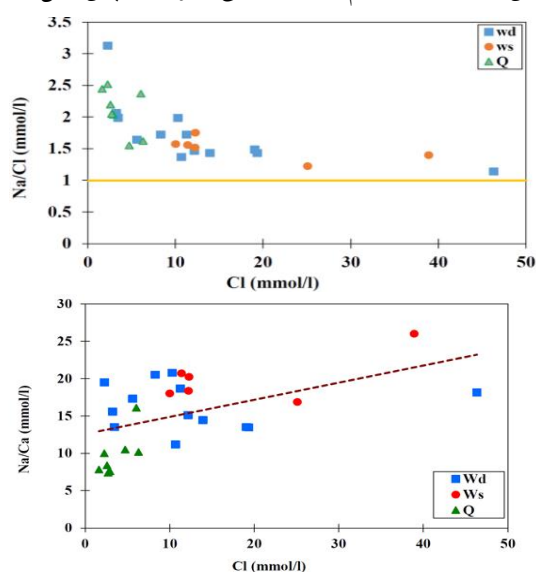


شکل ۸ نمودار نسبت مولی کلراید/سدیم در مقابل کلراید، نقشه پراکندگی این نسبت و نمودار نسبت منیزیم/سدیم و کلسیم/سدیم در مقابل کلراید نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه



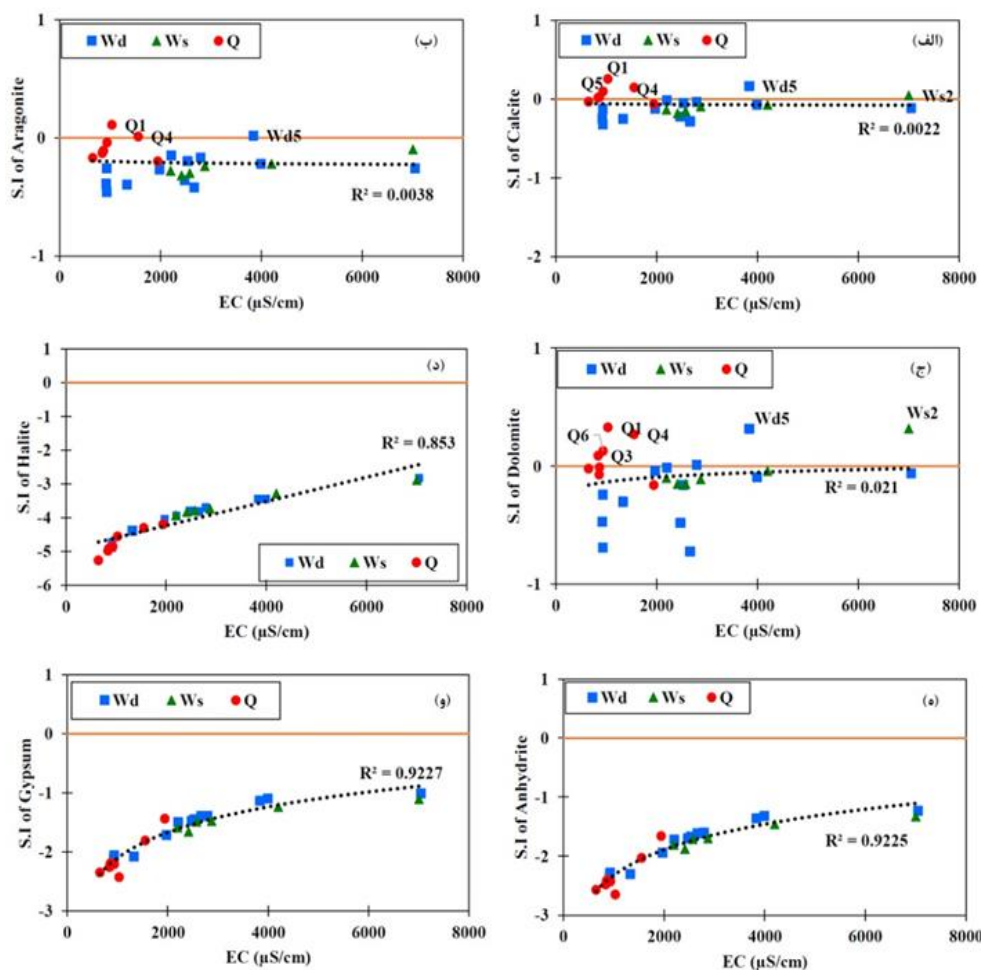
شکل ۹ نمودار نسبت‌های یونی مختلف نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

می‌توان مشاهده کرد که اکثر نمونه‌ها در بالای خط ۲:۱ قرار دارند. لذا کانی‌های کربنات‌دار دیگری همانند دولومیت در آب زیرزمینی انحلال یافته است. نسبت مولی $\text{Ca} + \text{Mg}$ در برابر HCO_3 (شکل ۹) نشان می‌دهد بخشی از کربنات آب زیرزمینی از انحلال دولومیت حاصل شده است. با رسم نسبت مولی کلسیم در برابر سولفات (شکل ۹) مشاهده می‌شود بعضی از نمونه‌ها روی خط نسبت ۱:۱ قرار دارند؛ یعنی مقدار کلسیم با سولفات برابر و نسبت ۱:۱ دارند و نشان‌دهنده انحلال ژئپس است. در نمونه‌هایی که در پایین خط نسبت قرار دارند نشان‌دهنده این است که کلسیم از منشأهایی غیر از ژئپس مثل



در شکل (۱۰) اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت، انیدریت، هالیت، دولومیت و ژپس در مقابل هدایت الکتریکی ترسیم شده است. با توجه به اندیس اشباع کلسیت، مشاهده می‌شود که نمونه‌های چاه Wd5, Ws2, Q1, Q4, Q5 به صورت فوق اشباع، و بقیه نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند. افزایش یون کلسیم در نمونه‌های فوق اشباع از منشأهایی غیر از انحلال کلسیت مانند نقش کانی‌های رسی در تبادل کاتیونی و انحلال پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار، باعث فوق اشباع شدن آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. در نمودار اندیس اشباع آراگونیت مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند و فقط Q1 به صورت فوق اشباع، و Wd5 و Q4 به صورت اشباع می‌باشند که کانی آراگونیت در این دو نقطه اشباع تمایل به انحلال و رسوب‌گذاری دارد. همان‌طور که در نمودار اندیس اشباع دولومیت نشان داده شده است، نمونه‌های Q1, Q3, Q4،

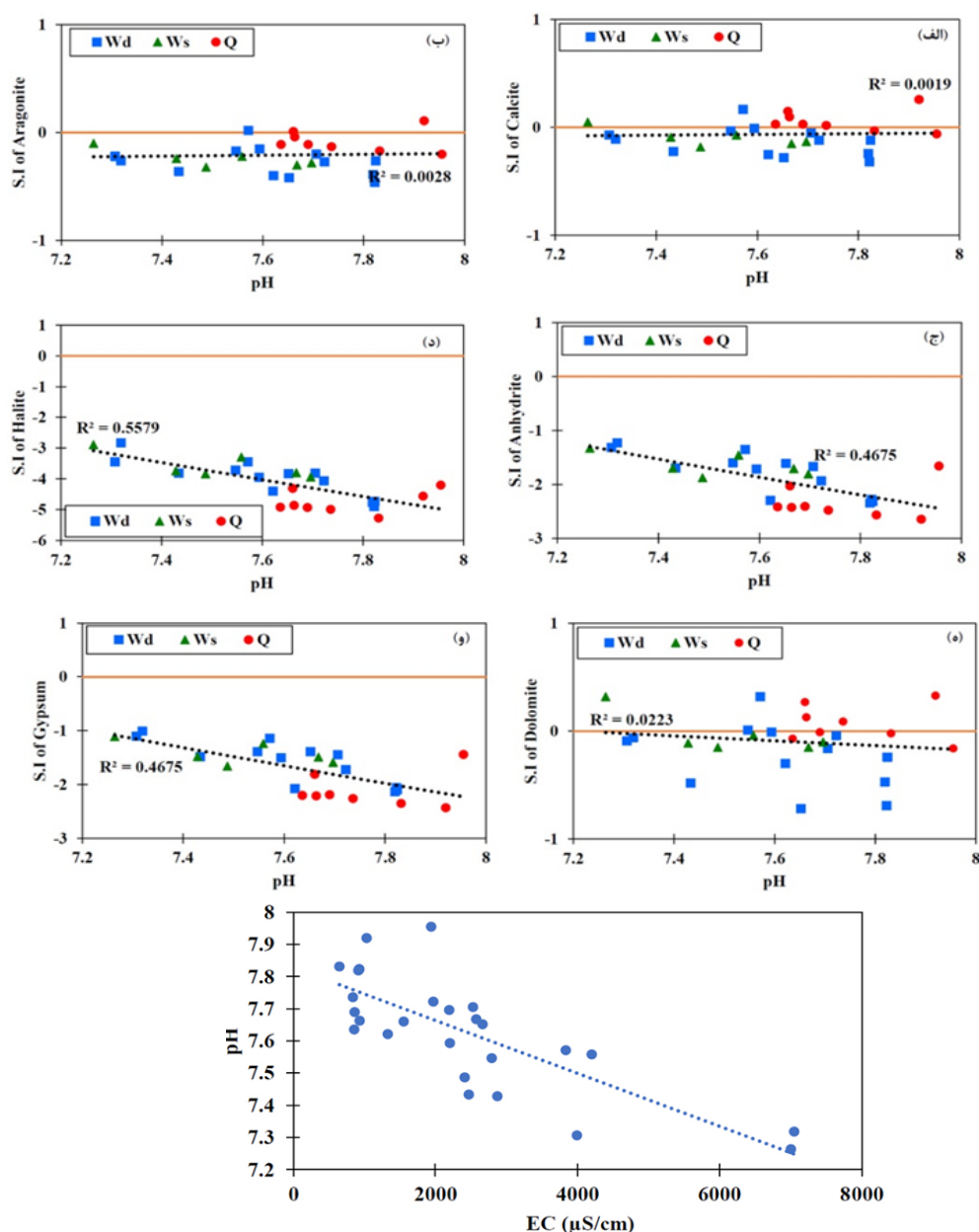
در شکل (۱۰) اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت، انیدریت، هالیت، دولومیت و ژپس در مقابل هدایت الکتریکی ترسیم شده است. با توجه به اندیس اشباع کلسیت، مشاهده می‌شود که نمونه‌های چاه Wd5, Ws2, Q1, Q4, Q5 به صورت فوق اشباع، و بقیه نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند. افزایش یون کلسیم در نمونه‌های فوق اشباع از منشأهایی غیر از انحلال کلسیت مانند نقش کانی‌های رسی در تبادل کاتیونی و انحلال پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار، باعث فوق اشباع شدن آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. در نمودار اندیس اشباع آراگونیت مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند و فقط Q1 به صورت فوق اشباع، و Wd5 و Q4 به صورت اشباع می‌باشند که کانی آراگونیت در این دو نقطه اشباع تمایل به انحلال و رسوب‌گذاری دارد. همان‌طور که در نمودار اندیس اشباع دولومیت نشان داده شده است، نمونه‌های Q1, Q3, Q4،



شکل ۱۰ اندیس اشباع محاسبه شده کانی‌های مختلف در مقابل هدایت الکتریکی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

سانتی متر افزایش یابد. لذا احتمالا دلیل این رفتار هم‌زمانی افزایش EC و کاهش pH در جهت جریان آب زیرزمینی باشد. همان طور که در نقشه زمین‌شناسی و منابع آب دیده می‌شود در بالادست منابع قنات تحت تأثیر واحدهای کربناته بوده و pH کمی قلیایی دارند و چاه‌های پایین‌دست در آبرفت، pH خنثی دارند. از طرفی دیگر به طور معمول در جهت جریان آب زیرزمینی در مسیر هیدروژئولوژیکی مقادیر TDS و EC افزایش می‌یابد و این سبب شده که pH و EC به ظاهر رابطه منفی خوبی داشته باشند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت و دولومیت چندان تحت تأثیر pH آب نبوده است (شکل ۱۱)؛ در حالی که اندیس اشباع کانی‌های هالیت، انیدریت و ژپس با افزایش pH کاهش یافته است و از آنجایی که انحلال این کانی‌ها چندان وابسته به مقدار pH نیست، رخداد چنین حالتی معمول نمی‌باشد. جهت توجیه آن، مقادیر pH با EC هم در شکل (۱۱) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود بین این دو پارامتر همبستگی منفی خوبی دیده می‌شود. از طرفی دیگر طیف pH خنثی تا قلیایی (۸) است و چندان سبب نمی‌شود که EC از حدود ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر



شکل ۱۱ رابطه اندیس اشباع و EC با pH در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

می‌شود در نتیجه این رخداد، یون کلسیم رسوب می‌کند. نمونه‌های Wd3, Wd5, Wd7, Ws3 در بالای خط تعادلی قرار گرفته‌اند و این نشان دهنده فوق اشباع بودن منابع آب در این چاه‌ها نسبت به یون کلسیم است.

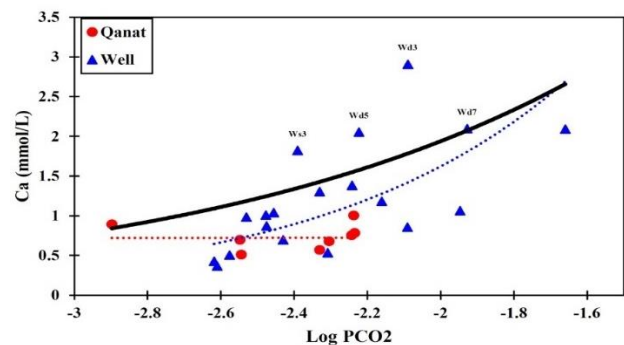
نتیجه‌گیری

در منطقه مورد مطالعه نقشه هم پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی نشان داد بخشی زیادی از آب زیرزمینی از واحدهای کربناته در شرق دشت وارد آبخوان شده و به سمت غرب منطقه حرکت می‌کند و طی این حرکت، کیفیت آب زیرزمینی منطقه کاهش پیدا کرده است. تکامل هیدروشیمیایی آب زیرزمینی نشان داد که تیپ آب زیرزمینی ورودی در شرق منطقه کربناته بوده، در نهایت به تیپ غالب کلورسودیک تبدیل شده است. قرارگیری چاه‌های بهره‌برداری با نرخ پمپاژ بالاتر و هدایت الکتریکی زیاد در مرکز و سمت غرب آبخوان باعث افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است. بر اساس مقادیر تأخیر زمانی بین بارش و اثر آن در آب زیرزمینی می‌توان گفت جهت جریان آب زیرزمینی عمدتاً از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند و در مناطق شهری به دلیل کاهش نفوذپذیری و برداشت زیاد (ایجاد مخروط افت) و در پایین دست آبخوان به دلیل ذرات دانه ریزتر، این زمان تأخیر افزایش یافته است. در نهایت می‌توان گفت عوامل طبیعی زمین‌شناسی و برداشت از آب زیرزمینی هم‌زمان فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌باشند.

سپاسگزاری

از شرکت سهامی آب منطقه ای استان سیستان و بلوچستان سپاسگزاری می‌شود.

به منظور بررسی اثر دی اکسید کربن در مقادیر کلسیم نمونه‌های آب با توجه به نحوه استخراج آب زیرزمینی (قنات و چاه)، منحنی رابطه بین فشار دی اکسید کربن (محاسبه شده) و غلظت کلسیم بر اساس معادله (۱) [12] در شکل (۱۲) ترسیم شده است.



شکل ۱۲ رابطه فشار دی اکسید کربن محاسبه شده در برابر غلظت کلسیم در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

$$m_{ca} = \sqrt[3]{10^{-6} [P_{CO_2}]/4} \quad (1)$$

خط تعادلی تئوری است در فشار ۱ اتمسفر، دما ۲۵ درجه و pH، ۷ نیز ترسیم شده است. از آنجایی که در شرایط واقعی میزان فشار، دما و pH در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه متفاوت است؛ مشاهده می‌شود که اکثر نمونه‌ها در پایین خط تعادلی فشار دی اکسید کربن قرار گرفته‌اند و در یک فشار دی اکسید کربن ثابت، میزان کلسیم در آب زیرزمینی منطقه کمتر از حالت تعادلی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود میزان فشار دی اکسید کربن در قنات‌های منطقه نسبت به چاه‌ها بسیار کمتر است. به نظر می‌رسد علت آن مکانیسم متفاوت استخراج آب زیرزمینی از قنات و چاه باشد. در چاه‌ها آب زیرزمینی از مسیر با فاصله کوتاهی تری پمپاژ می‌شود. در حالی که در قنات، آب از مسیر طولانی کوره قنات خارج می‌شود؛ بنابراین در طول این مسیر، گاز دی اکسید کربن از آب خارج شده و میزان آن کم

مراجع

- [1] N. Aghazadeh, A. A. Mogaddam, "Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 176, no. 1-4, pp. 183-195, 2011.
- [2] S. Karimi, Z. Mohammadi, N. Samani, "Evaluation of Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Salinity Evolution in Semnan Plain," *Hydrogeology*, vol. 2, no. 1, pp. 1-19, 2017. (In Persian).

- [3] J. Rozrokh, A. Asghari Moghaddam, A. A. Nadiri, "Investigation of hydrogeochemical characteristics and qualitative classification of Harzandat plain groundwater resources for various purposes, using hydrochemical methods," *Scientific and Research Journals Management System*, vol. 19, no. 5, pp. 77-92, 2017. (In Persian).
- [4] S. Ahmadi, R. Jahanshahi, V. Moeini, S. Mali, "Assessment of hydrochemistry and heavy metals pollution in the groundwater of Ardestan mineral exploration area, Iran," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, n. 212, pp. 1-13, 2018.
- [5] M. G. Mahmoodlu, N. Jandaghi, M. Sayadi, "Hydrochemical Evaluation and Qualitative Deterioration Assessment of Gorganrud River," *Iranian Journal of Geology*, vol. 14, no. 55, pp. 129-145, 2020. (In Persian).
- [6] M. S. Hosseini, R. Jahanshahi, N. Asadi, M. A. Nasiri, "Qualitative study of groundwater resources in the Hassanabad-Dehchah, Northeast of Neyriz, Fars province," *Hydology*, vol. 5, no. 1, pp. 150-165, 2020.
- [7] E. Fijani, S. Meysami, "Assessment of hydrochemical characteristics and groundwater suitability for drinking and irrigation purposes in Garmsar Plain, Iran," *Geopersia*, vol. 13, no.1, pp. 83-102, 2023.
- [8] L. Benadela, B. Bekkoussa, L. Gaidi, "Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria," *Journal of Groundwater Science and Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 233-249, 2022.
- [9] Sistan and Baluchestan Regional Water Authority, *Report of statistics and information of meteorological and hydrometric stations*, 2019.
- [10] E. Fijani, S. Meysami, M. Mozafari, "Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 1-18. 2023.
- [11] M. Mozafari, M. Jamali Dizji, E. Fijani, R. Eskandari, "Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 63-74. 2022.
- [12] C. A. J. Appelo and D. Postama, *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd Reading, CRC press, Amsterdam, 2006.



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>
Iranian
Concrete
InstitutePavement
Engineering
Association of
Iran

Performance Evaluation of RC Shear Walls Designed by Direct Displacement-Based deSign Method *

Research Article

Saeid Abdi¹, Horr Khosravi² , Amir Hossein Jafarih³DOI: [10.22067/jfcei.2024.77873.1172](https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.77873.1172)

1. Introduction

In recent years, performance-based design has undergone significant development. Meanwhile, the direct displacement-based design (DDBD) approach determines the performance criteria of a structure based on its maximum displacement during an earthquake. For this purpose, for a specific performance level, the damage state in structural and non-structural elements is defined based on strain values and inter-story drift ratios, respectively. The displacement corresponding to this level of damage is considered as the target displacement. Therefore, it is expected that structures designed using the DDBD approach will achieve the target displacement, strain values, and inter-story drifts.

Many researchers have studied the seismic behavior of concrete structures, especially reinforced concrete (RC) shear walls. They have proposed various methods for design and modeling. The DDBD approach can be summarized in four main steps:

1. Determining the displacement profile.
2. Converting the multi-degree-of-freedom (MDOF) system into an equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) system.
3. Calculating the design base shear and moments.
4. Determining the flexural and shear reinforcement.

This study aims to investigate the fulfillment of performance objectives in 12 buildings designed using the DDBD procedure.

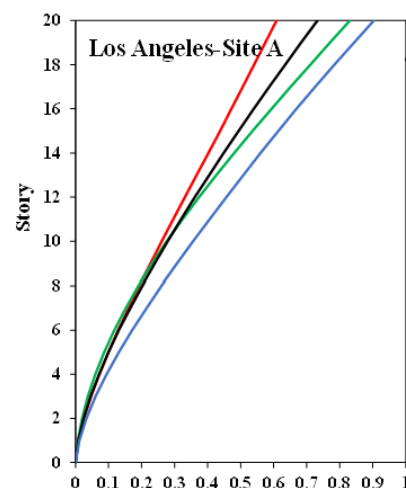
2. Modeling and Research Methods

In this research, three 5-, 10-, and 20-story buildings were designed for two regions with different seismicity levels and two soil type conditions. Thus, 12 shear walls designed using the DDBD procedure were modeled in

OpenSees using nonlinearBeamColumn elements with fiber sections. Each shear wall model was subjected to 45 artificial and 10 natural earthquake records. Subsequently, the lateral displacement profile due to input ground motions and the distribution of curvature and inter-story drift along the wall height were investigated.

3. Results and Discussion

For all models, the maximum displacement of each story was determined under each ground motion record by conducting nonlinear time history analyses. The median value of displacements (μ), the standard deviation (σ), and the median plus standard deviation ($\mu + \sigma$) were also calculated. The results of lateral displacement profiles for the 20-story building located in Los Angeles are shown in Figure 1. Additionally, the design displacement profile, which represents the target displacement obtained from the DDBD design procedure, and the median displacements for the SDOF structure are presented in Figure 1.



* Manuscript received July 25, 2022 , Revised June 10, 2024, Accepted October 23, 2024.

¹ MSc Student of Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor of Structural and Earthquake Engineering, Babol Noshirvai University of Technology, Babol, Iran. Email: khosravi@nit.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

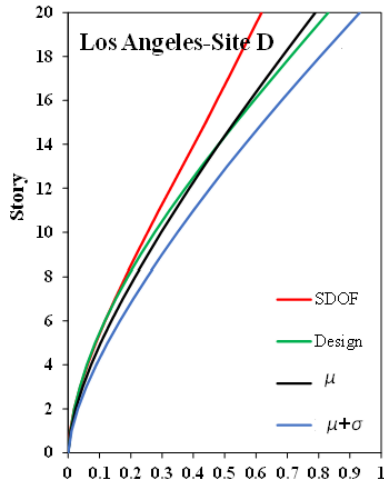


Figure 1 displacement profile in 20 story model

Table 1 displacement and inter-story drift obtained from analyzes

Story	city	soil	$\Delta_D(m)$	$\Delta_{(\mu)}$	$\Delta_{(\mu+\sigma)}$	$\theta_{(\mu)}$	$\theta_{(\mu+\sigma)}$
5	Los Angeles	D	0.18	0.15	0.19	0.017	0.021
	Los Angeles	A	0.18	0.15	0.21	0.019	0.024
	Centralia	D	0.18	0.15	0.20	0.018	0.022
	Centralia	A	0.18	0.14	0.19	0.017	0.022
10	Los Angeles	D	0.32	0.32	0.39	0.020	0.024
	Los Angeles	A	0.32	0.25	0.33	0.016	0.020
	Centralia	D	0.30	0.30	0.35	0.019	0.022
	Centralia	A	0.30	0.27	0.33	0.018	0.021
20	Los Angeles	D	0.54	0.53	0.62	0.018	0.022
	Los Angeles	A	0.54	0.49	0.61	0.017	0.021
	Centralia	D	0.53	0.47	0.57	0.016	0.020
	Centralia	A	0.53	0.51	0.59	0.019	0.022

Figure (2) shows the results of the curvature profile for 20-story building located in Los Angeles. In these graphs, median values (μ) and median plus standard deviation ($\mu+\sigma$) were determined for 45 records. SDOF system curvature profile (SDOF) and yield curvature value (Yield) and design curvature (Design) are also specified for comparison of the results.

In Table (1) $\Delta_{(\mu)}$, $\Delta_{(\mu+\sigma)}$, $\theta_{(\mu)}$, $\theta_{(\mu+\sigma)}$ are the median of maximum displacement, median of maximum displacement plus standard deviation, the median of inter-story drift, and the median of inter-story drift plus standard deviation, respectively.

As mentioned, the non-structural criterion in shear walls is the inter-story drift, which is limited to 2%. Therefore, the performance goal is achieved when the median of inter-story drift is about 2% and the dispersion of the results is not significant. According to Table 1, the

median of inter-story drifts for selected models are between 1.6% and 2%, which indicates the proper and acceptable performance of the structures designed using DDBD. In addition, the maximum standard deviation (σ) is around 20% and $\mu+\sigma$ values for inter-story drift are between 2% and 2.4%.

4. Conclusions

In this study, 12 RC shear walls were designed using DDBD approach and were modeled nonlinearly in OpenSees program using fiber section elements. Each wall was subjected to 45 artificial and 10 real earthquake records. The results obtained from this study showed that the models reach to the predetermined performance objective while they were designed considering DDBD method. It should be mentioned that in most structures, the median of lateral displacement and inter-story drift are almost equal to (and slightly lower than) the target displacement and drift limitations, respectively. Also, the curvature values in the middle height of the walls increases due to higher modes effect as far as wall height increases.

Finally, $\mu+\sigma$ indices for displacement, inter-story drift and curvature showed 20 to 30% dispersion for different earthquake records.

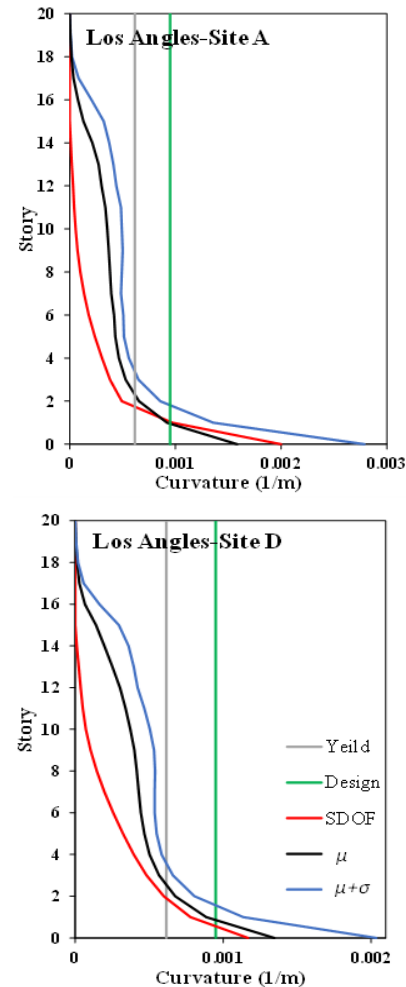


Figure. 2 curvature profile in 20 story model



ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی بتنی طرح شده به روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان*

مقاله پژوهشی

امیرحسین جعفریه^(۳)

حر خسروی^(۲)

سعید عبدی^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2024.77873.1172

چکیده در سال‌های اخیر مفاهیم طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس عملکرد گسترش قابل توجهی یافته است. در این میان روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان، معیار عملکرد سازه را بر اساس مقدار بیشینه تغییر مکان سازه در زلزله تعیین می‌کند. بدین منظور برای یک سطح عملکرد از پیش تعیین شده، سطح خسارت در اعضای سازه‌ای بر اساس مقادیر کرنش و در اعضای غیرسازه‌ای بر اساس تغییر مکان نسبی طبقات تعریف می‌شود. سپس تغییر مکان متناظر با این سطح خسارت محاسبه شده و به عنوان تغییر مکان هدف در نظر گرفته می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که سازه طراحی شده به این روش، تحت زلزله سطح طرح به تغییر مکان هدف و کرنش و تغییر مکان نسبی از پیش تعیین شده برسد. در این تحقیق جهت بررسی برآورده شدن اهداف طراحی، ابتدا ۱۲ ساختمان با سیستم باربر لرزه‌ای دیوار برشی شامل ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای دو سطح خطر زلزله و دو نوع خاک بستر به روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان طرح شد. ساختمان‌های طراحی شده تحت ۴۵ رکورد مصنوعی و ۱۰ رکورد طبیعی زلزله قرار گرفتند و مقادیر تغییر مکان جانبی، انحنای و تغییر مکان نسبی طبقات تعیین گردید. نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد که میانگین تغییر مکان جانبی، تغییر مکان نسبی طبقات و مقادیر انحنای تقریباً برابر با اهداف طراحی و تا حدودی کمتر است. بنابراین، روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان، اهداف عملکردی را به خوبی برآورده می‌نماید.

واژه‌های کلیدی طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان، ارزیابی اهداف عملکردی، دیوار برشی بتنی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

Performance Evaluation of RC Shear Walls Designed by Direct Displacement Based Design

Saeid Abdi

Horr Khosravi

Amir Hossein Jafari

Abstract In recent years, performance-based design has developed significantly. Meanwhile, the direct displacement-based design (DDBD) determines the performance criteria on the basis of the maximum displacement of structure. For this purpose, for a predetermined performance level, the level of damage in structural and non-structural elements is defined based on tensile and compressive strain values and inter-story drift ratio, respectively. Then, the displacement corresponding to this level of damage is calculated and is considered as a target displacement. Using design displacement spectrum, the stiffness and strength of structure is adjusted to achieve the target displacement. Therefore, it is expected that the structures designed based on DDBD approach, reach the predetermined target displacement, strain values and inter-story drifts. In this research, in order to investigate the fulfillment of the design goals, first 12 buildings with shear wall systems were designed. They include 5-, 10- and 20-story buildings designed for two levels of earthquake hazard and two site classes. The designed buildings were subjected to 45 artificial and 10 natural earthquake records and the displacement, curvature, and inter-story drift ratio were determined. The nonlinear dynamic analysis results show that the average value of story displacements, inter-story drifts and curvatures are almost equal to the design goals and somewhat less. Therefore, the DDBD method meets the performance objectives well.

Key words DDBD, Performance objective assessment, RC Shear wall, Nonlinear dynamic analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۵/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. Email: khosravi@nit.ac.ir

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

مقدمه و مرور ادبیات فنی

علی‌رغم اینکه طراحی بر اساس عملکرد در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و تا حدودی در آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای معمول نیز وارد شده است، اما معمولاً ساختمان‌های موجود از ابتدا به طور مستقیم بر اساس یک معیار عملکردی مشخص طراحی نمی‌شوند. بنابراین مشخص نیست که این سازه‌ها در زلزله‌های با سطح خطر مختلف، سطوح عملکردی از پیش تعیین شده را تأمین نمایند. طراحی بر اساس عملکرد با هدف طراحی سازه‌هایی که در سطح خطر مورد نظر به سطح عملکرد مشخصی برسند، ابداع گردید.

در ابتدا، مبانی و مفاهیم عملکردی در فرایند بهسازی سازه‌های موجود مورد توجه قرار گرفت [1,2] که برای دستیابی به این هدف عمدتاً استفاده از تحلیل پوش‌آور و یا تحلیل تاریخچه زمانی پیشنهاد می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی به همراه کنترل معیارهای عملکردی، به آئین‌نامه‌های طراحی اولیه سازه‌ها نیز وارد شد [3]. این روش نیازمند تخمین اولیه اعضا و استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی است که پیچیدگی‌ها و دشواری‌های مختص به خود را دارد. در این میان، استفاده از دو روش طراحی بر اساس عملکرد از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند:

۱. روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد (-Performance Based Plastic Design) [4]

۲. روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان (Direct Displacement-Based Design) [5]

شایان ذکر است که روش‌های طراحی بر اساس تغییر مکان (Displacement-Based Design) از تنوع نسبتاً زیادی برخوردار است که روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان (Direct Displacement-Based Design) یکی از آنها به حساب می‌آید.

سایر این روش‌ها عبارتند از: کنترل تغییر شکل با سختی اولیه (Initial Stiffness Deformation Control) [6]، متناسب‌سازی تکرار شونده با سختی اولیه (Initial Stiffness Iterative Proportioning) [7]، طیف نقطه تسلیم (Yield Point Spectra) [8]، طیف غیر الاستیک (Inelastic Spectra) [9]، طیف ظرفیت (Capacity Spectrum) [10]، روش SEAOC [11] و روش تاریخچه زمانی Time-history Method [12]. سالیوان و همکاران [13] در سال ۲۰۰۳ با بررسی مزایا و معایب هر یک از

این روش‌ها و همچنین میزان توسعه آنها اظهار داشتند که پیشنهاد روشی که کاملاً نسبت به بقیه برتری داشته باشد کار دشواری است. با این وجود این محققان تأکید نمودند که روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان به صورت نسبی نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. این روش از طرفی، مجموعه کاملی از دستورالعمل‌های طراحی برای انواع سازه‌ها ارائه می‌دهد و از طرف دیگر به طراحی سازه‌هایی با سطح عملکرد مورد نظر منجر می‌شود.

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه ارزیابی عملکردی سازه‌های طراحی شده به روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان انجام شده است. شارما و همکاران [14] در پژوهش خود دو روش طراحی بر اساس نیرو (FBD) و روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان (DDBD) را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. آنها با مدل‌سازی و تحلیل سازه‌های دارای سیستم سازه‌ای قاب خمشی بتنی که بر اساس آئین‌نامه هند [15,16] طراحی شده بودند، مشاهده کردند برش پایه طراحی در روش DDBD کمتر از روش FBD به دست آمده و نتایج تحلیل نیز حاکی از برتری عملکردی روش DDBD بوده به طوری که پروفیل تغییر مکان طبقات سازه طراحی شده به این روش، انطباق خوبی با پروفیل طراحی داشته است.

ژان و همکاران [17] در پژوهش خود آئین‌نامه طراحی پل کانادا [18] را مورد ارزیابی قرار دادند. این آئین‌نامه برای طراحی پل دو روش طراحی بر اساس نیرو (FBD) و طراحی بر اساس عملکرد (PBD) ارائه نموده است. آنها یک پل بزرگراهی چهار دهانه بتنی را به دو روش مذکور بر اساس آئین‌نامه کانادا طراحی نموده و مورد ارزیابی قرار دادند. در نهایت مشاهده گردید که روش PBD به شکل چشم‌گیری نسبت به FBD محافظه کارانه‌تر است.

حسینی و کرم‌الدین [19] یک قاب ۶ طبقه دارای مهاربند زیر را به روش‌های مختلف طراحی از جمله روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد طراحی نمودند و مشاهده کردند که این روش منجر به استفاده حداکثری از ظرفیت سازه، سبک‌تر شدن مقاطع و شکل‌پذیری مناسب در مقایسه با سایر روش‌های طراحی می‌شود.

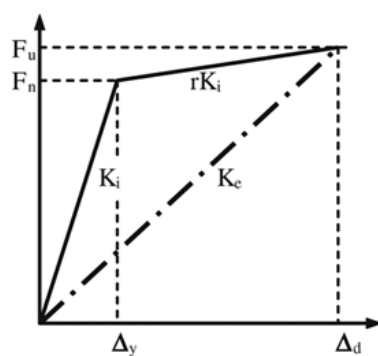
عبدالحمیدی و شاکری [20] سیستم قاب خمشی فولادی ویژه با اتصالات RBS را به دو روش مبتنی بر نیرو (با استفاده از

شایان ذکر است که در سال‌های اخیر، محققان زیادی به مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی، خصوصاً دیوار برشی پرداخته‌اند و روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی آنها ارائه نموده‌اند [22-26]. اما در تحقیق حاضر، تمرکز اصلی بر روی طراحی بر اساس عملکرد سازه‌ها و برآورده شدن اهداف عملکردی است.

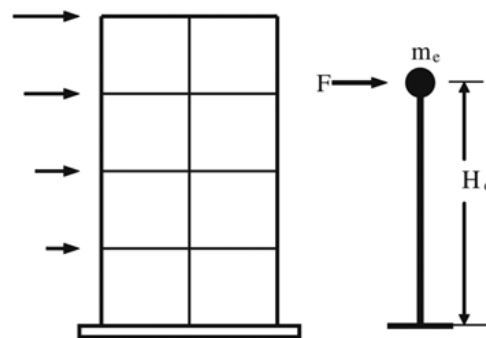
مروری بر طراحی دیوار برشی به روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان

طراحی یک دیوار برشی به روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان را می‌توان در چهار گام اصلی زیر خلاصه نمود. شکل (۱) مراحل کلیدی در طراحی سازه به روش DDBD را به اختصار نشان می‌دهد.

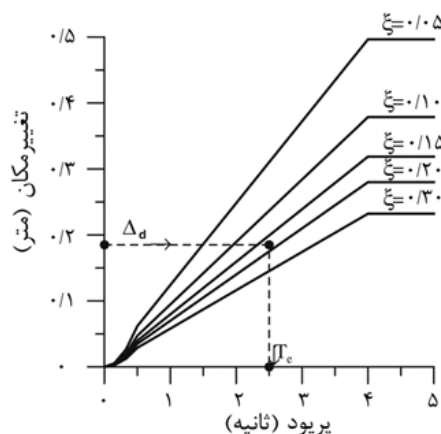
آئین‌نامه ایران) و روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد طراحی و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش طراحی، تحت زلزله سطح طرح، ایمنی جانی را تأمین نموده‌اند و تحت زلزله سطح سرویس، عملکرد مداوم خود را حفظ کرده‌اند. اما تحت زلزله سطح طرح، روش عملکردی مکانیزم تسلیم مطلوب را ارضا نموده، در حالی که در روش نیرویی برخی از مفاصل پلاستیک در ستون‌ها تشکیل شده‌اند. بهار و گذشت [21] در پژوهش خود رفتار لرزه‌ای قاب خمشی فولادی که به دو روش مستقیم مبتنی بر تغییر مکان و روش نیرویی مبتنی بر استاندارد ۲۸۰۰ ایران طراحی شده‌اند را ارزیابی کردند. نتایج گویای این مسئله بود که قاب‌های طراحی شده به روش تغییر مکان به اهداف عملکردی دست یافته‌اند در حالی که سازه‌های طراحی شده به روش نیرویی در عین ارضای شرایط اولیه طراحی اهداف عملکردی خود را تأمین نمی‌کنند.



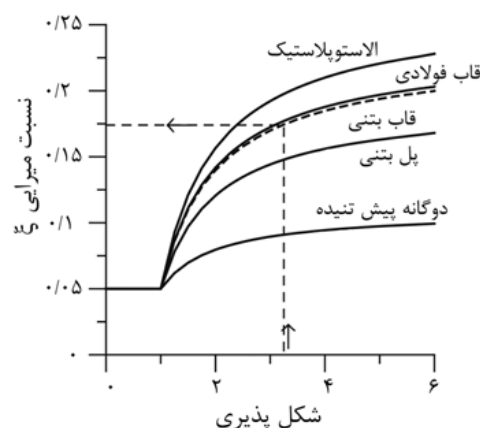
شکل (ب) سختی موثر



شکل (الف) سازه تک درجه آزادی معادل



شکل (د) طیف طرح تغییر مکان



شکل (ج) میرایی معادل-شکل پذیری

شکل ۱. مراحل روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان

$$R_{\xi} = \left(\frac{0.1}{0.05 + \xi_{eq}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$m_e = \frac{\sum(m_i \Delta_i)}{\Delta_d} \quad (3)$$

$$H_e = \frac{\sum(m_i \Delta_i H_i)}{\sum(m_i \Delta_i)} \quad (4)$$

$$V_{Base} = K_e \Delta_d \quad (5)$$

$$M_B = V_{Base} H_e \quad (6)$$

در روابط فوق Δ_d , K_e , H_e , H_i , Δ_i , m_i , μ_d و به ترتیب شکل پذیری، جرم طبقه، جابه جایی جانبی طبقه، ارتفاع طبقه، ارتفاع مؤثر، سختی مؤثر، و تغییر مکان طراحی می باشند.

۳. تعیین فولاد خمشی مقطع: در این گام با تخمین اولیه مقدار آر ماتور طولی دیوار، مقطع دیوار در نرم افزار اپنسیس [27] مدل سازی شده و تحلیل لنگر — انحنا انجام می شود. سپس در یک فرایند سعی و خطا، مقدار آر ماتور طولی به گونه ای تعیین می گردد که در منحنی لنگر — انحنا، وقتی مقدار انحنا به انحنای طراحی می رسد، مقدار لنگر برابر با لنگر طراحی محاسبه شده در گام قبل شود.

مدل های ساختمانی

طراحی اولیه سازه ها

برای انجام این تحقیق ساختمان های ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه در نظر گرفته شدند. شکل (۲) پلان ساختمان های طراحی شده را به صورت شماتیک نشان می دهد. مقدار بارگذاری ثقلی و جرم لرزه ای برای ساختمان مورد نظر 1000 kg/m^2 در نظر گرفته شده است که شامل 600 kg/m^2 وزن دال و کف سازی، 200 kg/m^2 وزن پارتیشن بندی، و 200 kg/m^2 برای بار زنده می باشد. جرم لرزه ای m_i و همین طور بار محوری P_i در هر طبقه به ازای یک دیوار برشی مطابق جدول (۲) می باشد. ارتفاع هر طبقه نیز معادل ۳ متر در نظر گرفته شده است. همچنین مقطع دیوار برشی و مشخصات میلگردگذاری آن ها در ارتفاع سازه ثابت فرض شده است.

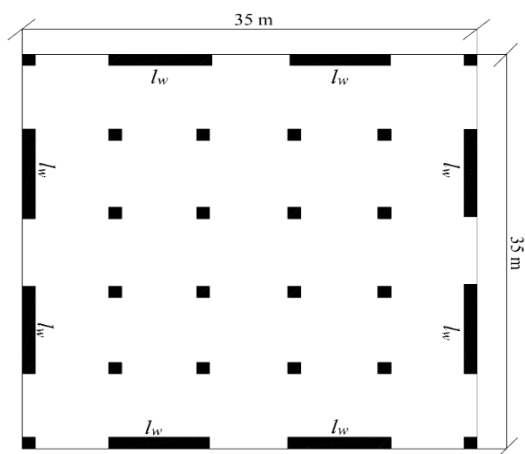
تعیین پروفیل تغییر مکان

پروفیل تغییر مکان طبقات بر اساس معیار سازه ای (کرنش مصالح) و غیرسازه ای (تغییر مکان نسبی بین طبقات) به گونه ای محاسبه می شود که نه مقدار جابه جایی نسبی طبقه بام از حداکثر جابه جایی نسبی مجاز تجاوز نماید و نه کرنش فولاد و بتن در پای دیوار از کرنش حالت حدی بیشتر شود. در این تحقیق، طراحی سازه بر اساس سطح عملکرد کنترل خرابی (Damage Control) انجام شده است. پریستلی و همکاران [5] مقدار حداکثر تغییر مکان نسبی مجاز ناشی از معیار غیرسازه ای را برابر ۰.۰۲ و مقدار انحنای ایجاد شده ناشی از معیار سازه ای را برابر با $0.072/l_w$ پیشنهاد می کنند. بدین ترتیب مقادیر تغییر مکان پلاستیک بر اساس معیار سازه ای و غیرسازه ای محاسبه شده و کمترین مقدار، مبنای محاسبه پروفیل تغییر مکان قرار می گیرد. شایان ذکر است که در این پژوهش در کلیه موارد طراحی، معیار غیرسازه ای کنترل کننده می باشد.

۱. تبدیل سازه چند درجه آزادی به سازه معادل تک درجه آزادی: با استفاده از پروفیل تغییر مکان طبقات که در گام قبل محاسبه گردید، مشخصات سازه تک درجه آزادی معادل شامل تغییر مکان طراحی، شکل پذیری و ارتفاع مؤثر قابل محاسبه می باشد [5].

۲. محاسبه برش پایه و لنگر طراحی: پس از تعیین پروفیل تغییر مکان و سازه تک درجه معادل، به منظور محاسبه برش پایه، ابتدا با استفاده از روابط (۱) و (۲) به ترتیب میرایی ویسکوز معادل (ξ_{eq}) و ضریب اصلاح برای تبدیل طیف تغییر مکان الاستیک به طیف با میرایی معادل (R_{ξ}) محاسبه می گردد. در نهایت با اعمال ضریب محاسبه شده به طیف الاستیک، طیف تغییر مکان غیر خطی ساخته می شود. سپس پریرود سکانتی سازه تک درجه آزادی معادل بر اساس تغییر مکان طراحی و طیف تغییر مکان غیر خطی تعیین می شود. در انتها سختی سکانتی و مقاومت سازه (برش پایه طراحی) محاسبه می گردد. سپس پریرود سکانتی سازه تک درجه آزادی معادل بر اساس تغییر مکان طراحی و طیف تغییر مکان غیر خطی تعیین می شود. در انتها سختی سکانتی و مقاومت سازه (برش پایه طراحی) محاسبه می گردد. لنگر پای دیوار نیز حاصل ضرب برش پایه در ارتفاع مؤثر سازه تک درجه آزادی معادل است. روابط (۳) تا (۶) روابط مورد استفاده برای تعیین جرم مؤثر (m_e)، ارتفاع مؤثر (H_e)، و برش پایه (V_{Base}) و لنگر پای دیوار (M_B) می باشند [5].

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.444 \left(\frac{\mu_d - 1}{\mu_d \pi} \right) \quad (1)$$

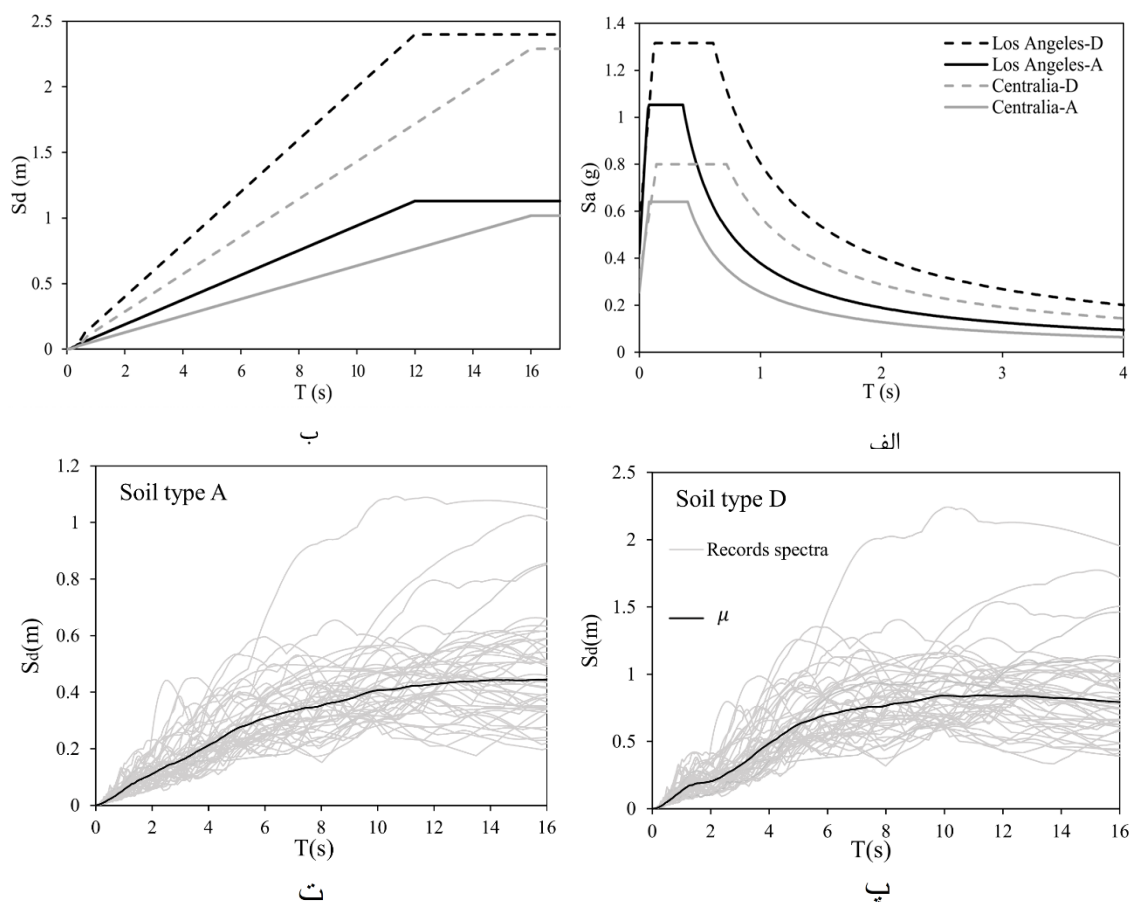


شکل ۲ تصویر شماتیک پلان سازه

جدول ۱ جزئیات طراحی دیوارهای برشی به روش DDBD

Building Models	5-story				10-story				20-story			
	Centralia		Los Angeles		Centralia		Los Angeles		Centralia		Los Angeles	
Δ_d (m)	0.18		0.18		0.06		0.16		0.19		0.54	
Δ_y (m)	0.06		0.06		0.06		0.16		0.19		0.45	
μ	2.85		2.85		1.57		1.94		1.18		1.08	
Soil Type	D		A		D		A		D		A	
m_i (ton)	153.1		612.5		204.2		122.5		153.1		103.0	
K_e (kN/m)	14832		13140		10136		8085		6177		5719	
T_e (s)	1.25		2.65		1.74		2.05		2.59		3.00	
T (s)	0.74		1.57		1.03		1.47		2.06		2.76	
P_i (kN)	200		200		200		341		280		578	
L_w (m)	3.5		3.5		3.5		5.2		4.5		7.5	
t_w (m)	0.55		0.55		0.55		0.55		0.55		0.55	
V_D (kN)	2677		2372		1830		2560		1862		3100	
M_D (kN.m)	30533		26890		20743		56370		41500		137860	
B.E* Bar	24Ø20		24Ø20		24Ø20		28Ø20		28Ø18		30Ø20	
Web Bar	46Ø22		46Ø22		36Ø18		102Ø20		58Ø20		114Ø20	

*Boundary Element



شکل ۳ الف) طیف طرح شتاب، ب) طیف طرح تغییر مکان، پ) طیف تغییر مکان رکوردهای مصنوعی برای خاک نوع D به همراه میانگین، ت) طیف تغییر مکان رکوردهای مصنوعی برای خاک نوع A به همراه میانگین

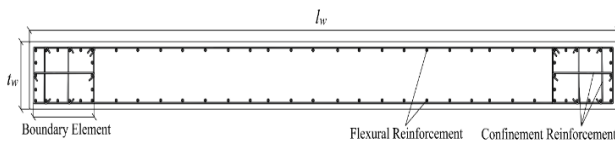
دیوار، برش طراحی، لنگر طراحی می‌باشند.

مدل‌سازی غیرخطی

دیوارهای برشی مورد نظر از مدل‌های ساختمانی، در نرم‌افزار اپنسیس [27] با استفاده از المان‌های nonlinearBeamColumn و به روش فایبر مدل‌سازی شدند. در روش فایبر مقطع دیوار مورد نظر مش‌بندی می‌شود و نیازی به تعریف مفصل پلاستیک مجزا در این نوع مدل‌سازی نمی‌باشد، چرا که با تعریف مشخصات مکانیکی و مقاومتی مصالح در هنگام تحلیل تاریخیچه زمانی پس از رسیدن به تنش تسلیم، مفصل پلاستیک تشکیل می‌گردند. مقطع دیوار برشی بتن مسلح مدل‌سازی شده در این پژوهش شامل چند قسمت می‌باشد. قسمت کاور بتنی که به عنوان بتن غیر محصور مدل‌سازی گردید، قسمت المان مرزی که دارای درصد میلگرد متراکم‌تر و همچنین بتن محصور شده می‌باشد و قسمت جان دیوار که دارای درصد میلگرد کم تراکم‌تر

سازه‌های مذکور در دو منطقه لس‌آنجلس در جنوب غربی و سنترالیا در شمال غربی آمریکا طراحی شدند. لازم به ذکر است که پتانسیل لرزه‌خیزی دو منطقه فوق متفاوت بوده و لس‌آنجلس دارای پتانسیل لرزه‌خیزی بیشتری نسبت به سنترالیا می‌باشد. همچنین سازه‌های مورد نظر در هر یک از مناطق مذکور برای دو نوع خاک A و D طراحی گردیدند. شکل (۳) طیف طرح تغییر مکان و شتاب برای دو منطقه لس‌آنجلس و سنترالیا را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۳) طیف تغییر مکان تمامی رکوردها در خاک نوع A و D نشان داده شده است [32].

در مجموع تعداد ۱۲ سازه برای ارزیابی لرزه‌ای طراحی شد که جزئیات طراحی در جدول (۱) ارائه شده است. در جدول (۱) $M_D, V_D, t_w, I_w, P_i, T, T_e, K_e, m_i, \mu, \Delta_y, \Delta_d$ به ترتیب تغییر مکان طراحی، تغییر مکان تسلیم، شکل‌پذیری، جرم هر طبقه به ازای یک دیوار، سختی مؤثر، پیوند مؤثر، پیوند، نیروی محوری برای هر طبقه به ازای یک دیوار، طول دیوار، ضخامت



شکل ۴ شکل شماتیک مقطع دیوار برشی

نتایج تحلیل‌ها

جهت بررسی پاسخ‌های عملکردی سازه‌های طرح شده دو مجموعه رکورد مصنوعی تولید شده توسط اتکینسون [33] انتخاب شد. رکوردهای مصنوعی تولید شده توسط اتکینسون بر اساس بزرگا و فاصله کانونی و نوع خاک منطبق بر آئین‌نامه کانادا تولید شده‌اند.

هر یک از دو دسته رکورد انتخاب شده دارای دو مجموعه ۴۵ تایی از رکوردهای مصنوعی منطبق بر نوع خاک A و D می‌باشند. بنابراین برای هر ساختمان دو دسته رکورد، یکی منطبق بر نوع خاک A و دیگری منطبق بر نوع خاک D، (یعنی در مجموع ۴ دسته رکورد) به سازه‌های طراحی شده اعمال گردیدند.

لازم به ذکر است کلیه رکوردها به گونه‌ای مقیاس شدند که مقدار دامنه طیف پاسخ شتاب در پیوند سکانتی مدل مورد بررسی با دامنه طیف طراحی شتاب در پیوند مذکور برابر باشد.

از آنجایی که انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای ۱۲ مدل ساختمانی تحت ۴۵ رکورد زلزله به صورت یک به یک زمان‌بر بوده و از طرف دیگر احتمال خطا در پردازش نتایج تحلیل وجود دارد؛ برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب نوشته شد که نرم‌افزار اپنسیس را فراخوانی نموده، ۱۲ مدل دیوار برشی را تحت ۴۵ رکورد مقیاس شده قرار می‌دهد و نتایج تحلیل‌ها را برای هر مدل ساختمانی پردازش و ارائه می‌نماید.

نتایج این تحلیل‌ها که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، عبارتند از: (۱) تغییر مکان طبقات، (۲) تغییر مکان نسبی طبقه بام و پروفیل انحنا در ارتفاع دیوار.

علاوه بر این، برای مشاهده بهتر اثر مودهای بالاتر، ۱۲ مدل دیوار برشی یک درجه آزادی (SDOF) متناظر نیز مدل‌سازی شد و تحت ۴۵ رکورد زلزله قرار گرفت. هر یک از این ۱۲ مدل با حذف جرم‌های طبقات و اعمال یک جرم متمرکز به اندازه جرم مؤثر سازه در ارتفاع مؤثر دیوار ساخته شده است. در ادامه، نتایج مربوط به این مدل، تحت عنوان مدل تک درجه آزادی (SDOF) ارائه شده است.

و بتن محصور شده است. لازم به ذکر است که اثر میلگردهای عرضی و خاموت‌ها در روابط مندر و همکاران [28] جهت محاسبه مشخصات مقاومتی بتن محصور شده در المان مرزی لحاظ گردیده است. برای محاسبه انحنای پای دیوار کرنش مقطع دیوار برشی از نرم‌افزار استخراج می‌شود و با استفاده از تار خنثی و کرنش مقطع مقدار انحنا قابل محاسبه است. جرم لرزه‌ای و بار محوری به صورت جرم و بار متمرکز در تراز هر طبقه اعمال گردید. شکل (۴) مقطع دیوار مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که با فرض مقدار تنش تسلیم میلگردها $f_y = 420 \text{ MPa}$ و مقاومت فشاری مشخصه بتن $f'_c = 30 \text{ MPa}$ طراحی دیوار برشی بر اساس تخمین دست پایی از مقاومت مورد انتظار یعنی $1.1f_y$ و $1.3f'_c$ انجام شد [5].

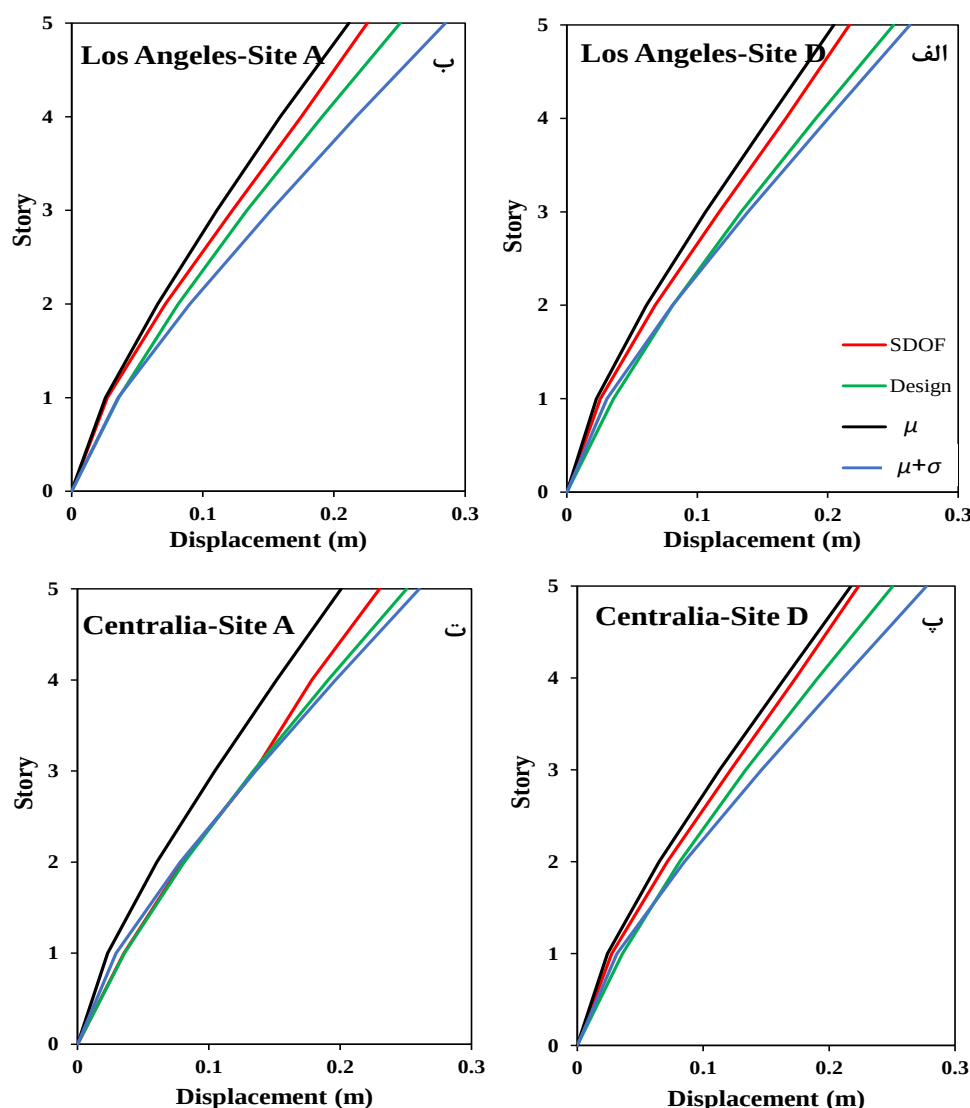
برای در نظر گرفتن رفتار هیسترتیک مصالح، مدل رفتاری Steel02 به مصالح فولاد و Concrete02 به مصالح بتن اختصاص یافت. مقطع دارای بتن محصور شده در قسمت المان مرزی می‌باشد که مشخصات مقاومتی آن با استفاده از روابط مندر و همکاران [5] تعیین گردید.

بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط محققان گذشته، عواملی همچون سختی برشی مقطع، میرایی، و اثر سخت‌شدگی کششی در پاسخ لرزه‌ای دیوارهای برشی تأثیر گذار است. لوو و همکاران [29,30] با بررسی نتایج مدل عددی خود با چند مدل آزمایشگاهی تست شده بر میز لرزه مشاهده نمود که استفاده از سخت‌شدگی کششی در مدل‌سازی عددی منجر به نتایج دست بالا می‌شود و عدم استفاده از سخت‌شدگی کششی در مدل‌سازی عددی انطباق خوبی بین داده‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به دست می‌دهد. به همین جهت لوو و همکاران [24] پیشنهاد کردند که در مدل‌سازی، از اثر سخت‌شدگی کششی صرف نظر گردد. برای لحاظ کردن سختی برشی دیوارها در مقطع فایبر از دستور section aggregator استفاده شد. بدین منظور مطابق دستورالعمل ATC-72 [31] سختی برشی مؤثر برابر با $0.1GA$ در نظر گرفته شد که G مدول برشی و A مساحت مقطع دیوار است. میرایی در تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل‌های دیوار برشی به مقدار ۲٪ میرایی رایلی به دو مود اول نوسان سازه اعمال شده است. عبدی و همکاران [32] جزئیات بیشتری از طراحی و مدل‌سازی غیر خطی این دیوارها ارائه نموده‌اند.

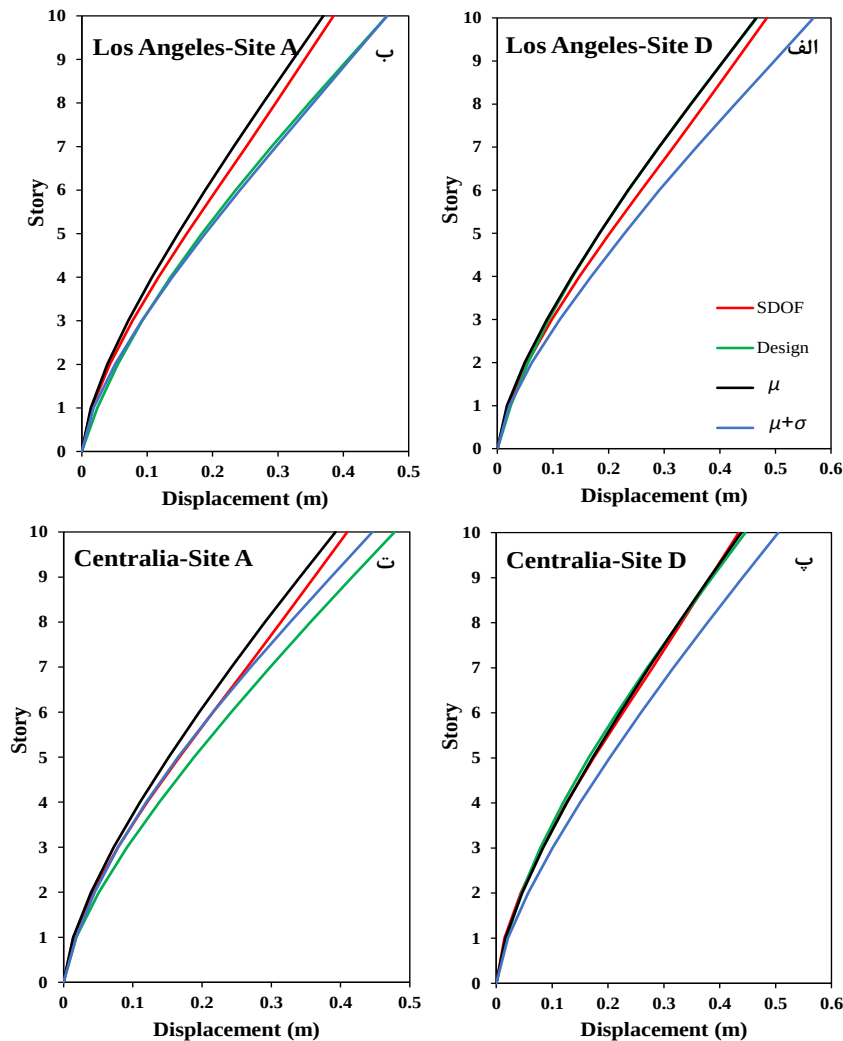
تغییر مکان طبقات

مکان طرح و میانگین تغییر مکان‌ها برای سازه تک درجه آزادی به ترتیب با علامت‌های Design و SDOF نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل‌های (۵) تا (۷) مشاهده می‌شود که در یک نگاه کلی، میانگین تغییر مکان‌ها تحت زلزله در حدود تغییر مکان طراحی و یا کمی کمتر از آن است. این موضوع با توجه به ساده سازی‌های روش طراحی و پیچیدگی‌های حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی قابل توجه بوده و بیانگر قوت روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان ارائه شده توسط پریستلی و همکاران [5] است.

از آنجایی که در این روش اولین معیار برای برآورده شدن اهداف عملکردی، تغییر مکان طبقات تحت زلزله طرح است؛ در ابتدا نتایج تغییر مکانی حاصل از تحلیل‌ها ارائه شده است. بدین منظور ابتدا بیشینه تغییر مکان طبقات به ازای هر رکورد تعیین شد و سپس مقدار میانگین هندسی تغییر مکان‌ها (μ) برای ۴۵ رکورد انتخابی محاسبه گردید. علاوه بر این پراکندگی تغییر مکان‌ها (σ) نیز محاسبه و مقادیر $\mu + \sigma$ برای تغییر مکان طبقات تحت ۴۵ رکورد تعیین شد. در نمودارهای حاصل از تحلیل، پروفیل تغییر



شکل ۵ نتایج پروفیل تغییر مکان برای دیوار برشی ۵ طبقه



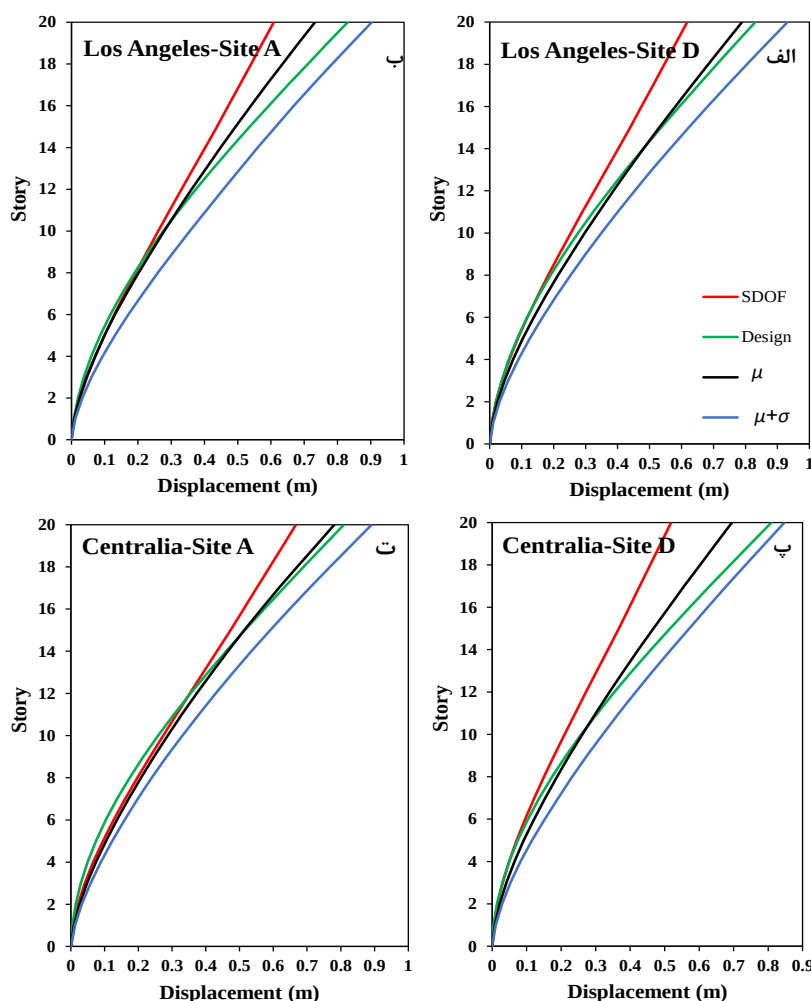
شکل ۶ نتایج پروفیل تغییر مکان برای دیوار برشی ۱۰ طبقه

دست بالا (قوی) طراحی شده‌اند، در حالی که طراحی سازه ۲۰ طبقه مناسب‌تر است.

این موضوع ناشی از افزایش تغییر مکان سازه ۲۰ طبقه در اثر مودهای بالاتر است. چنان که می‌دانیم با افزایش پریود سازه، اثر مودهای بالاتر و تغییر مکان ناشی از آن افزایش می‌یابد. این افزایش تغییر مکان طبقات در صورت مقایسه میانگین پاسخ سازه (خط مشکی) با میانگین پاسخ سازه تک درجه آزادی (خط قرمز) به خوبی مشهود است. چنان که در شکل ۵ برای سازه ۵ طبقه مشاهده می‌شود، تغییر مکان سازه کمی کمتر از تغییر مکان سازه تک درجه آزادی است. در حالی که در نمودار شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقدار تغییر مکان سازه ۲۰ طبقه به مقدار قابل توجهی بیشتر از تغییر مکان سازه تک درجه آزادی است.

بدیهی است که به علت پراکندگی تغییر مکان‌ها در ۴۵ رکورد زلزله، علی‌رغم نزدیک بودن مقادیر میانگین به تغییر مکان طرح، تغییر مکان سازه تحت بعضی از رکوردها کمتر و تحت بعضی دیگر از رکوردها بیشتر از مقادیر تغییر مکان طراحی می‌باشد. بنابراین بررسی نمودارهای $\mu + \sigma$ ، بیانگر مقادیر دست بالای تغییر مکان سازه بوده و در ارزیابی اهداف عملکردی قابل توجه است. بررسی نمودارهای (۵) تا (۷) نشان می‌دهد که این مقادیر دست بالا نیز در حد قابل قبول بوده است.

بررسی جزئیات بیشتر نمودارهای (۵) تا (۷) نشان می‌دهد که در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه، میانگین نتایج تا حدودی کمتر از تغییر مکان طراحی ولی در سازه ۲۰ طبقه، تقریباً برابر با تغییر مکان طراحی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سازه‌های ۵ طبقه و همچنین سازه‌های ۱۰ طبقه در خاک نوع D تا حدودی



شکل ۷ نتایج پروفیل تغییر مکان برای دیوار برشی ۲۰ طبقه

تغییر مکان نسبی طبقه بام و انحنای پای دیوار

چنان که اشاره شد، معیار غیر سازه‌ای در دیوارهای برشی، تغییر مکان نسبی بام می‌باشد که برابر ۲٪ در نظر گرفته شد. بنابراین هدف عملکردی زمانی برآورده می‌گردد که میانگین نتایج مربوط به تغییر مکان نسبی بام حدود ۲٪ بوده و پراکندگی نتایج نیز کم باشد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۲، میانگین تغییر مکان نسبی بام برای سازه‌های مختلف بین ۱/۶٪ تا ۲٪ بوده که بیانگر عملکرد مناسب سازه‌های طراحی شده به این روش است. ضمناً حداکثر پراکندگی نتایج (σ) نیز در حدود ۲۰٪ می‌باشد و مقادیر $\mu + \sigma$ برای تغییر مکان نسبی بام بین ۲٪ تا ۲/۴٪ قرار گرفته است.

در جدول (۲)، $\Delta_{(\mu)}$ ، $\Delta_{(\mu+\sigma)}$ ، $\theta_{(\mu)}$ ، $\theta_{(\mu+\sigma)}$ به ترتیب تغییر مکان جانبی میانگین نتایج، تغییر مکان جانبی میانگین به اضافه انحراف معیار استاندارد، جابه‌جایی نسبی میانگین نتایج، جابه‌جایی نسبی میانگین به اضافه انحراف معیار استاندارد در

به طور خلاصه می‌توان چنین گفت که روش طراحی ارائه شده توسط پریستلی و همکاران [5]، برای سازه‌های کوتاه مناسب و کمی دست بالا بوده و برای سازه‌های بلند کاملاً مناسب بوده و اثرات افزایش تغییر مکان ناشی از مودهای بالاتر را نیز می‌پوشاند.

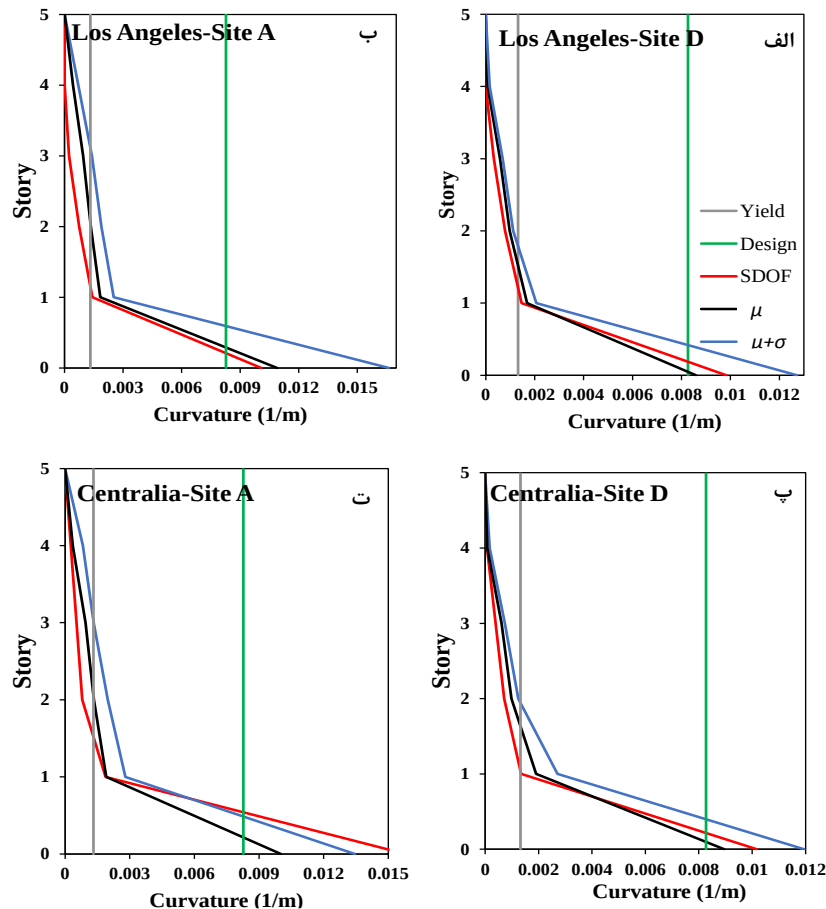
در انتها شایان ذکر است که انتظار می‌رود در سازه‌های کوتاه مانند سازه ۵ طبقه که اثر مودهای بالاتر قابل چشم‌پوشی است، تغییر مکان سازه در حد تغییر مکان سازه تک درجه آزادی باشد؛ در حالی که کمتر از آن شده است. علت این موضوع را می‌توان در پروفیل انحنای پروفیل لنگر در ارتفاع دیوار جستجو کرد. چرا که وجود یک جرم متمرکز در سازه تک درجه آزادی موجب تشکیل پروفیل خطی (مثلثی) لنگر در ارتفاع دیوار شده؛ در حالی که پروفیل لنگر در سازه چند درجه آزادی به علت بار گسترده غیر یک‌نواخت زلزله از درجات بالاتری بوده و تغییر مکان کمتری ایجاد می‌کند.

طبقات برای ۴۵ رکورد تعیین و محاسبه گردید. در نمودارهای مذکور پروفیل انحنای سازه تک درجه آزادی (SDOF) و مقدار انحنای تسلیم (Yield) و انحنای طراحی (Design) نیز برای مقایسه و تفسیر بهتر نتایج مشخص شده‌اند.

تراز بالاترین نقطه دیوار برشی می‌باشند. نمودارهای (۸) تا (۱۰) نتایج پروفیل انحنای سازه‌های طراحی شده نشان می‌دهد. در این نمودارها ابتدا مقادیر میانگین هندسی (μ) و میانگین به اضافه انحراف معیار ($\mu + \sigma$) انحنای

جدول ۲ نتایج تحلیل‌های دینامیکی برای تغییر مکان و تغییر مکان نسبی بام

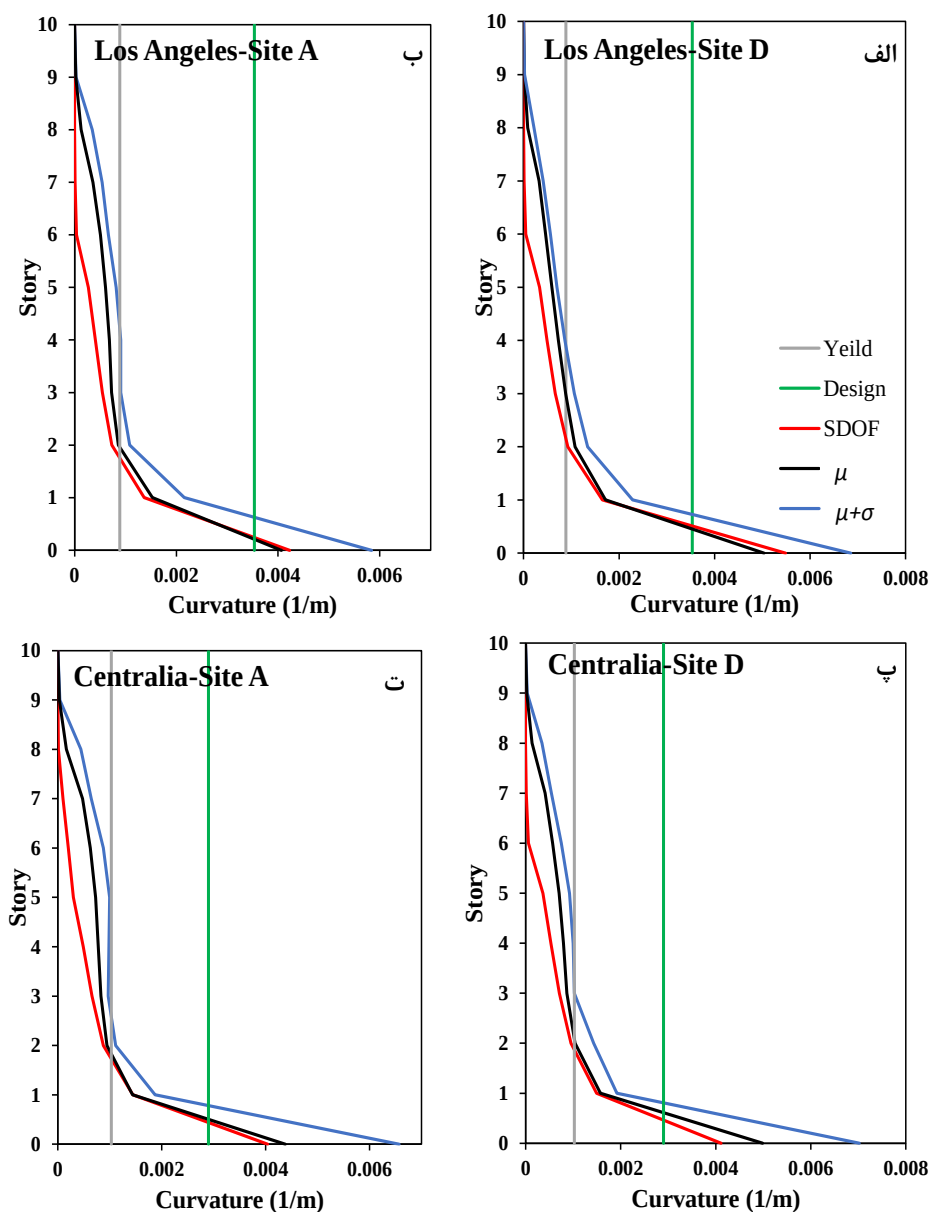
Story	city	soil	Δ_D (m)	$\Delta_{(\mu)}$	$\Delta_{(\mu+\sigma)}$	$\theta_{(\mu)}$	$\theta_{(\mu+\sigma)}$
5	Los Angeles	D	0.18	0.15	0.19	0.017	0.021
		A	0.18	0.15	0.21	0.019	0.024
	Centralia	D	0.18	0.15	0.20	0.018	0.022
		A	0.18	0.14	0.19	0.017	0.022
10	Los Angeles	D	0.32	0.32	0.39	0.020	0.024
		A	0.32	0.25	0.33	0.016	0.020
	Centralia	D	0.30	0.30	0.35	0.019	0.022
		A	0.30	0.27	0.33	0.018	0.021
20	Los Angeles	D	0.54	0.53	0.62	0.018	0.022
		A	0.54	0.49	0.61	0.017	0.021
	Centralia	D	0.53	0.47	0.57	0.016	0.020
		A	0.53	0.51	0.59	0.019	0.022



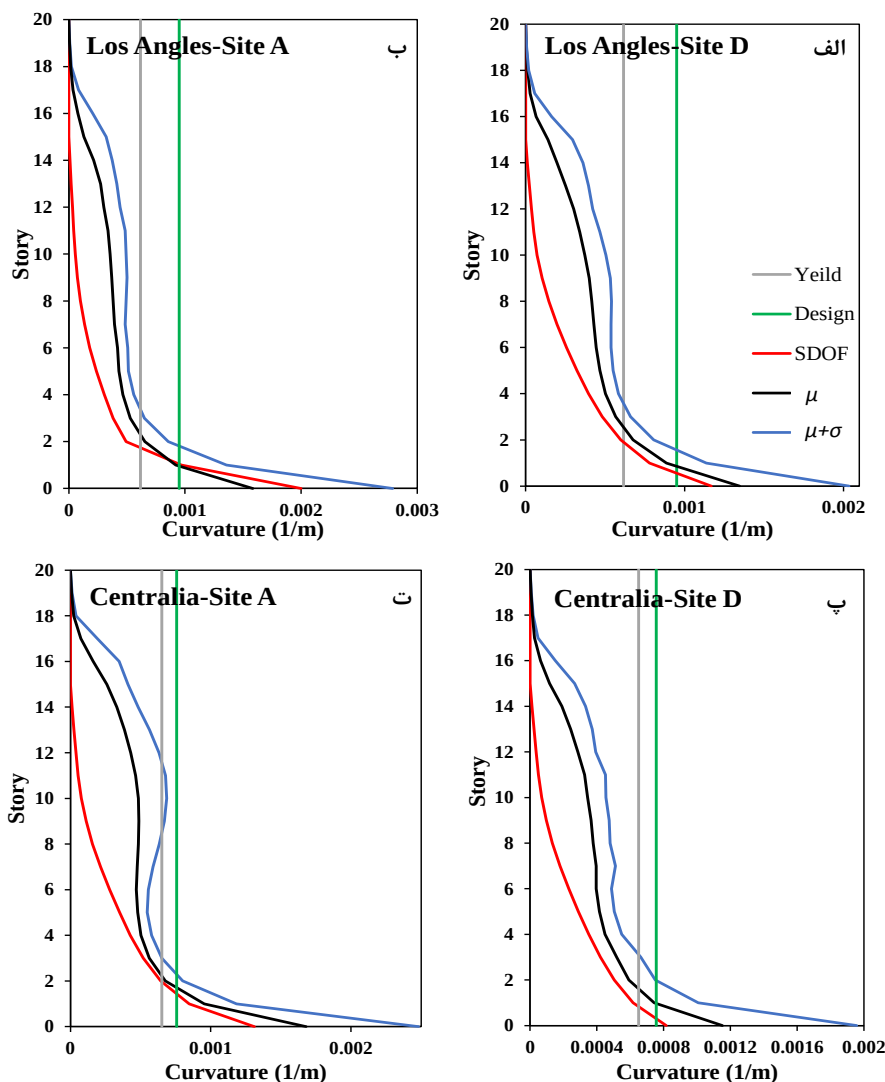
شکل ۸ نتایج پروفیل انحنای دیوار برشی ۵ طبقه

همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود مقدار انحنای پای دیوار تقریباً با انحنای طراحی برابر است. اما شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که اختلاف بین انحنای طراحی و پاسخ انحنای در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه قابل توجه است. این موضوع به دلیل تفاوت نوع مدل‌سازی مفصل پلاستیک در این تحقیق با فرضیات روش DDBD است. چرا که در روش DDBD، مفصل پلاستیک به صورت متمرکز فرض شده است ولی در اینجا دیوار به صورت فایبر مدل‌سازی شده که مفصل پلاستیک در ارتفاع

دیوار گسترده شده است. به طور مثال شکل (۹) نشان می‌دهد که انحنای دیوار تا دو طبقه بیشتر از انحنای تسلیم بوده و به عبارت دیگر تا دو طبقه از دیوار وارد حوزه غیر خطی شده است. با این حساب جهت مقایسه انحنای پای دیوار باید میانگین انحنای در طول ناحیه غیر خطی مدل با مقادیر انحنای طراحی مقایسه شود. بررسی شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که میانگین انحنای در طول ناحیه غیر خطی با تقریب خوبی، نزدیک به انحنای طراحی است.



شکل ۹ نتایج پروفیل انحنای برای دیوار برشی ۱۰ طبقه



شکل ۱۰ نتایج پروفیل انحنا برای دیوار برشی ۲۰ طبقه

شایان ذکر است که در این پژوهش، مقطع دیوار برشی در ارتفاع سازه ثابت فرض شده است. در صورت کاهش مقطع دیوار در ارتفاع که بسیار متداول نیز می‌باشد، احتمال تشکیل مفصل پلاستیک در میانه ارتفاع افزایش می‌یابد. به همین دلیل در بسیاری از آیین‌نامه‌ها و تحقیقات، برای طراحی خمشی، پوش لنگر محافظه‌کارانه‌تری پیشنهاد می‌شود [32].

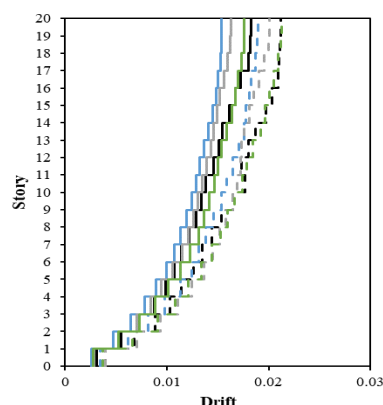
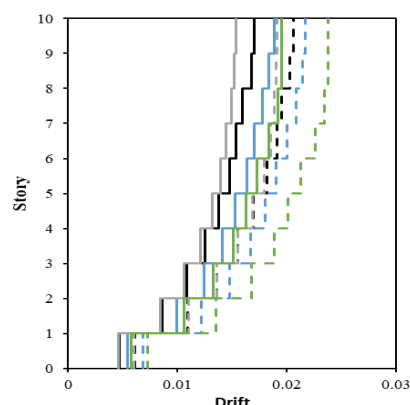
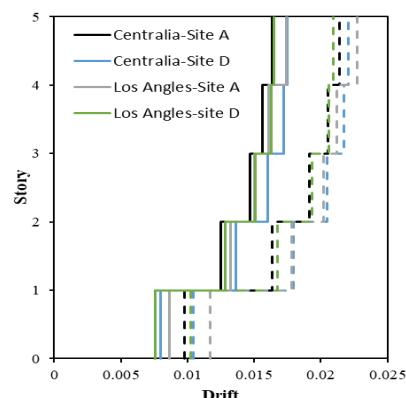
شکل (۱۱) پروفیل جابه‌جایی نسبی طبقات را نشان می‌دهند. این شکل‌ها بیانگر این هستند که جابه‌جایی نسبی طبقات در طبقات برای نتایج میانگین کمتر از ۲ درصد بوده و برای نتایج میانگین به علاوه انحراف معیار در برخی طبقات نیمه بالایی دیوار از ۲ درصد تجاوز می‌کند. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که این روش طراحی تا حد قابل قبولی جابه‌جایی نسبی طبقات را در حد مطلوب کنترل می‌نماید.

نکته جالب توجه دیگر در نمودارهای (۸) تا (۱۰)، روند تغییرات پروفیل انحنا در ارتفاع سازه می‌باشد. در سازه‌های ۵ طبقه، توزیع انحنا در ارتفاع (خط مشکی) تا حد زیادی به مقدار انحنای سازه تک درجه آزاد (خط قرمز) نزدیک است. ولی با افزایش ارتفاع سازه این نمودارها از یکدیگر فاصله می‌گیرد. تا جایی که در شکل (۱۰) افزایش انحنای ناشی از اثر مودهای بالاتر در سازه ۲۰ طبقه کاملاً مشهود است تا جایی که در شکل‌های (۹) - (ت) و (۱۰ - ت) مشاهده می‌شود که امکان تشکیل مفصل پلاستیک در میانه ارتفاع سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه نیز وجود دارد. از آنجایی که تشکیل مفصل در این نواحی مطابق مکانیزم پیش‌بینی شده دیوار برشی نیست، از طرفی رفتار لرزه‌ای سیستم را تحت تأثیر قرار داده و از طرف دیگر به دلیل تأمین نشدن شکل‌پذیری در این نواحی، خسارت‌هایی را در پی خواهد داشت.

رکوردهای طبیعی

به منظور بررسی و مقایسه رکوردهای طبیعی، در این پژوهش ۱۰ رکورد از FEMA P-695 انتخاب شد و بعد از مقیاس شدن به سازه‌های طراحی شده اعمال گردید. جدول (۳) مشخصات رکوردهای طبیعی انتخاب شده را نشان می‌دهد. نمودارهای (۱۲) تا (۱۴) نتایج تحلیل تاریخچه زمانی برای جابه‌جایی نسبی طبقات، انحنای و تغییر مکان جانبی سازه می‌باشد. در این نمودارها، خط توپر نشان دهنده میانگین پاسخ ۱۰ رکورد طبیعی و خط چین نشان دهنده میانگین به اضافه انحراف استاندارد است. در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که مقادیر میانگین تغییر مکان در اکثر موارد کمتر و یا برابر مقادیر طراحی است. تنها در سازه‌های ۲۰ طبقه منطقه Centralia نتایج میانگین کمی از مقادیر طراحی بیشتر شده‌اند. این موضوع بیانگر این است که میانگین نتایج نیازهای تغییر مکانی سازه را به حد قابل قبولی تأمین کرده است. ولی نتایج میانگین به علاوه انحراف معیار اختلاف قابل توجهی با نتایج میانگین دارد.

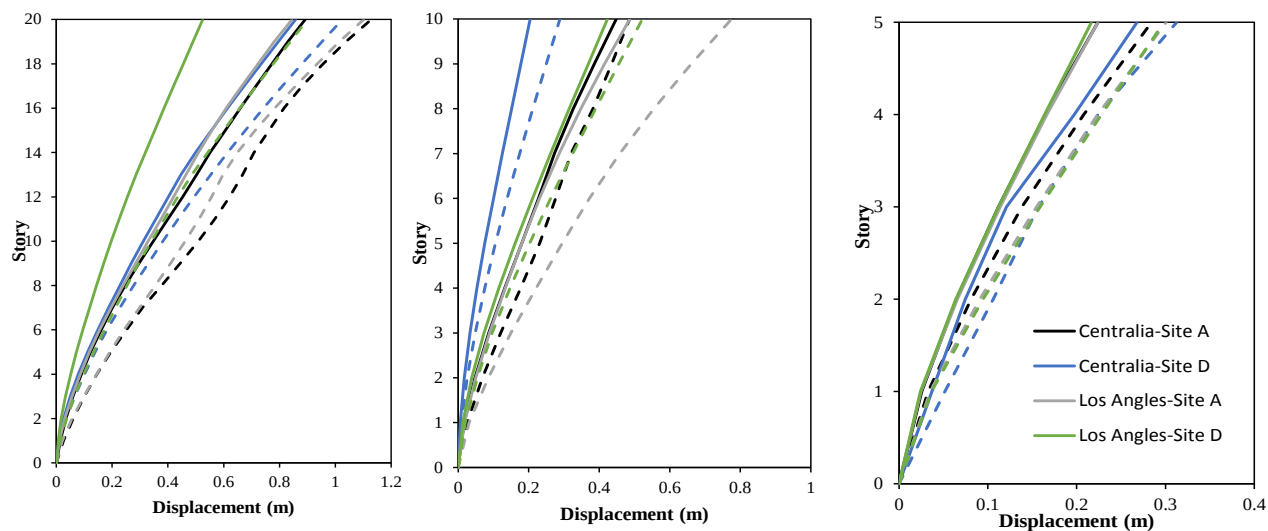
در شکل (۱۳) نتایج انحنای بیانگر این است که در خاک نوع A مقادیر انحنای در پای دیوار و همین‌طور پروفیل ارتفاع نسبت به خاک نوع D قابل توجه می‌باشد. همچنین احتمال تشکیل مفصل پلاستیک در میانه ارتفاع در خاک نوع A بیشتر است. در نمودارهای شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که چنان‌که پیش‌بینی می‌شد، جابه‌جایی نسبی طبقات عمدتاً در طبقه بام به بیشترین مقدار خود می‌رسد که در برخی سازه‌ها به مقدار حداکثر ۲ درصد رسیده است. این نتایج برای مقادیر میانگین به علاوه انحراف معیار، در برخی طبقات تا ۲٫۵ درصد نیز می‌رسد. البته مطابق شکل (۱۴)، در سازه ۲۰ طبقه نحوه توزیع جابه‌جایی نسبی در ارتفاع نسبت به تغییر شکل مود اول سازه تا حدی تغییر کرده که این موضوع به علت اثر مودهای بالاتر می‌باشد.



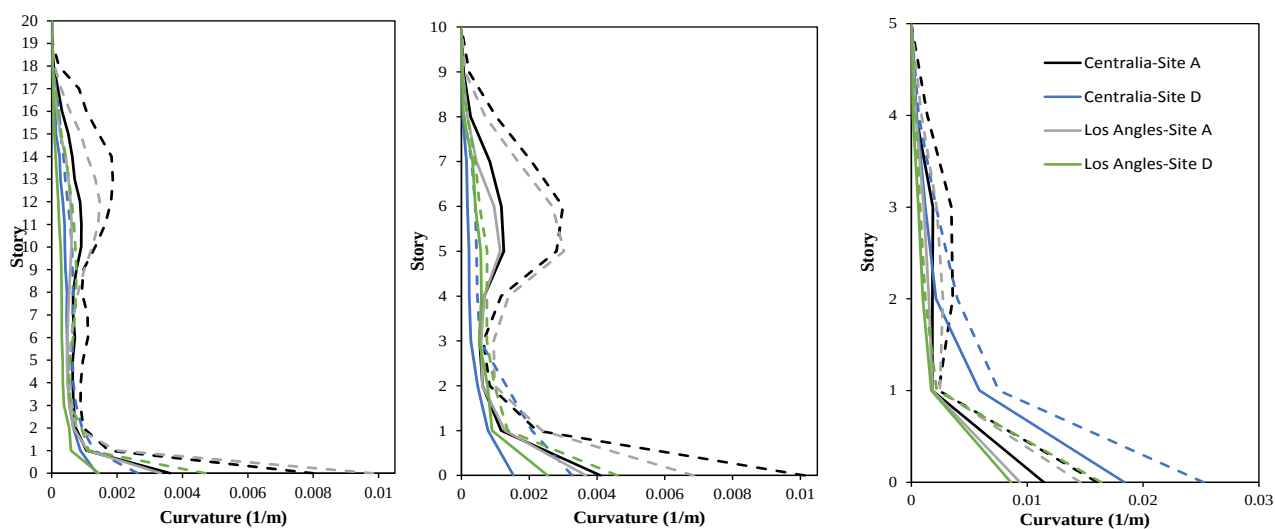
شکل ۱۱ نتایج تغییر مکان نسبی طبقات برای دیوار برشی ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه

جدول ۳ مشخصات رکوردهای طبیعی

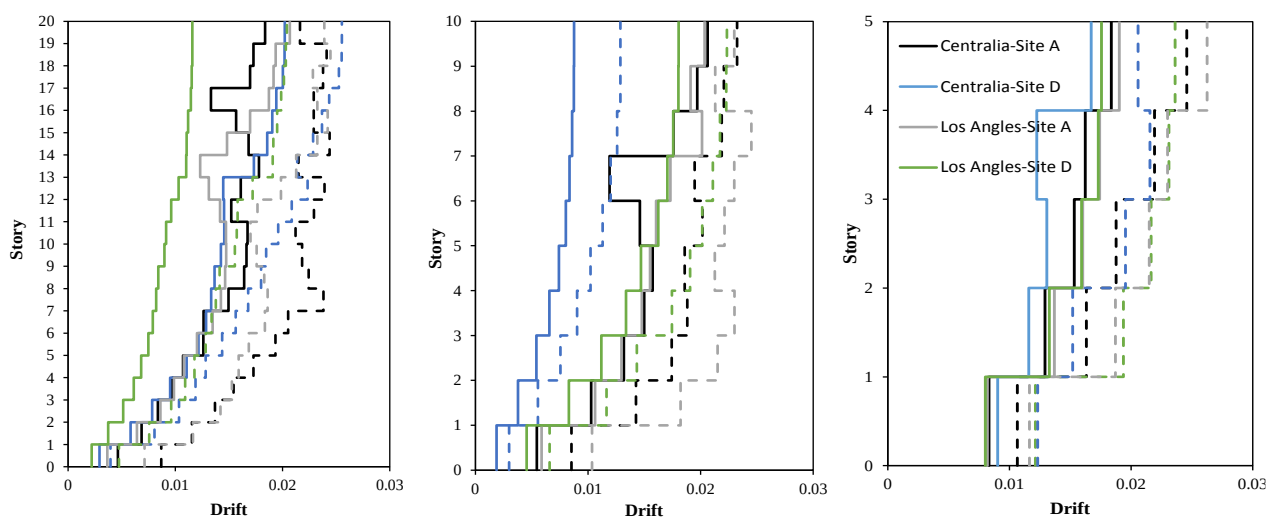
شماره رکورد	نام رکورد	نام ایستگاه	سال	بزرگا	PGA (g)
1	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	1994	6.7	0.42
2	Northridge	Canyon Country-WLC	1994	6.7	0.41
3	Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	0.73
4	Hector Mine	Hector	1999	7.1	0.27
5	Imperial Valley	Delta	1979	6.5	0.24
6	Imperial Valley	El Centro Array #11	1979	6.5	0.36
7	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	1995	6.9	0.51
8	Kobe, Japan	Shin-Osaka	1995	6.9	0.24
9	Kocaeli, Turkey	Duzce	1999	7.5	0.31
10	Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.5	0.22



شکل ۱۲ نتایج تغییر مکان جانبی دیوار برشی ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای رکوردهای طبیعی



شکل ۱۳ نتایج پروفیل انحنا دیوار برشی ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای رکوردهای طبیعی



شکل ۱۴ نتایج تغییر مکان نسبی طبقات در دیوار برشی ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای رکوردهای طبیعی

نتیجه گیری

در این مطالعه ابتدا ۱۲ ساختمان دارای سیستم باربر لرزه‌ای دیوار برشی برای سطح عملکردی کنترل خرابی به روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان طراحی شد. سپس مدل غیرخطی دیوارهای برشی در نرم‌افزار اپنسیس ساخته شده و هر یک از مدل‌ها تحت ۴۵ رکورد مصنوعی و ۱۰ رکورد طبیعی مقیاس شده به طیف طرح قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این مطالعه را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. روش DDBD ارائه شده توسط پریستلی و همکاران [5] به طور مناسبی معیارهای عملکردی را برآورده کرده است. به طوری که در اکثر سازه‌ها، میانگین تغییر مکان جانبی و تغییر مکان نسبی طبقات تقریباً برابر با (و کمی دست پایین‌تر از) تغییر مکان هدف می‌باشد.
۲. میانگین پاسخ‌های تغییر مکانی در ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه تا حدودی نسبت به تغییر مکان هدف دست پایین می‌باشد. به عبارت دیگر طراحی سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه، اندکی دست بالا بوده و می‌توان سازه را کمی ضعیف‌تر طراحی کرد.
۳. با افزایش ارتفاع سازه و در نتیجه افزایش اثر مودهای بالاتر، مقادیر بیشینه تغییر مکان و تغییر مکان نسبی بام در ساختمان ۲۰ طبقه افزایش یافته و به هدف عملکردی نزدیک‌تر می‌شود.
۴. افزایش ارتفاع سازه و افزایش اثر مودهای بالاتر، میزان انحنای در نواحی میانی دیوار به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] FEMA-356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings American Society of Civil Engineers, 2000.
- [2] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings: Applied Technology Council, 1996.
- [3] ASCE/SEI (ASCE/Structural Engineering Institute), Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-16, Reston, VA, 2016. [E-book] Available: ascelibrary.org
- [4] S. C. Goel and S. H. Chao, *Performance-based plastic design: earthquake-resistant steel structures*. International Code Council, 2008.
- [5] M. N. Priestley, G. M. Calvi, and M. J. Kowalsky, "Displacement based seismic design of structures," In Iuss Press, 2007.
- [6] T. B. Panagiotakos and M.N. Fardis, "Deformation-Controlled Earthquake-Resistant Design of RC Buildings," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 3 no. 4, pp. 498-518, 1999.

- [7] J. P. Browning, "Proportioning of Earthquake-Resistant RC Building Structures," *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, vol. 127, no. 2, pp. 145-151, 2001.
- [8] M. A. Aschheim and E. F. Black, "Yield Point Spectra for Seismic Design and Rehabilitation," *Earthquake Spectra*, vol. 16, no. 2, pp. 317-336, 2000.
- [9] A. K. Chopra and R. K. Goel, "Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic vs. Elastic Design Spectra," *Earthquake Spectra*, vol. 17, no. 1, pp. 47-65, 2001.
- [10] S. A. Freeman, "The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design," *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, 1998, pp. 6-11.
- [11] SEAOC, *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, 7th ed, 1999.
- [12] A. J. Kappos and A. Manafpour, "Seismic Design of R/C buildings with the Aid of Advanced Analytical Techniques," *Engineering Structures*, vol. 23, no. 4, pp. 319-332, 2001.
- [13] T. J. Sullivan, G. M. Calvi, M. J. N. Priestley, and M. J. Kowalsky, "The limitations and performances of different displacement-based design methods," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 7, pp. 201-241, 2003.
- [14] A. Sharma, R. K. Tripathi, and G. Bhat, "Comparative performance evaluation of RC frame structures using direct displacement-based design method and force-based design method," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 381-394, 2020.
- [15] Indian Standard (IS), *Criteria for earthquake resistant design of structures, part-1 general provisions and building sixth revision*, 5th ed., New Delhi: Bureau of Indian standards, 2016.
- [16] Indian Standard (IS) 456, "Code of Practice for Plain and Reinforced Concrete", 4th ed., New Delhi: Bureau of Indian standards, 2000.
- [17] Q. Zhang, M. S. Alam, S. Khan, and J. Jiang, "Seismic performance comparison between force-based and performance-based design as per Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) 2014," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 43, no 8, pp. 741-748, 2016.
- [18] Canadian Standards Association (CSA), *Canadian Highway Bridge Design Code S6-14.*, Toronto, Canada, 2014.
- [19] S. M. Hosseini and A. Karamodin, "Design and evaluation of zipper-braced frames using Performance-Based Plastic Design," In Proc. of 12th International Congress on Civil Engineering, Mashhad, Iran, 2021. (In Persian)
- [20] M. S. Abdolmohammadi and K. Shakeri, "Investigation of Performance Based Plastic Design method of steel moment frames with RBS connections," *Journal of Steel and Structures*, vol. 9, no. 18, pp. 15-33, 2016. (In Persian)
- [21] O. Bahar and F. Gozasht, "Seismic evaluation of regular MR steel frames designed by Direct Displacement Based Method," *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, vol. 9, no. 18, pp. 47-62, 2015. (In Persian)
- [22] S. M. Razzaz and H. Shariatmadar, "Evaluation of coupled-shear walls subjected to near-field earthquakes," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 1-16, 2016. (In Persian)
- [23] M. Zeynalian and M. Mokhtari, "Displacement control based analytical description of pinching, sliding and degrading hysteretic system," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 39-56, 2017. (In Persian)
- [24] A. Sadeghizadeh and J. Akbari, "Hybrid force-displacement based seismic design method for eccentrically braced steel frames," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 119-130, 2017. (In Persian)

- [25] P. Esmailtabar Nesheli, J. Vaseghi Amiri, and H. Khosravi, "Comparison of simplified MVLEM model with Fiber model in nonlinear modeling of RC shear wall," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 126-140, 2020. (In Persian)
- [26] M. Hajimohammadi, H. Khosravi, and R. Dezvareh, "The influence of ground motion duration on maximum displacement of elasto-plastic SDOFs," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 75-88, 2022. (In Persian)
- [27] F. McKenna, G. L. Fenves, and M. H. Scott, "Open system for earthquake engineering simulation," University of California, Berkeley, CA, 2000.
- [28] J. B. Mander, M. J. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- [29] H. Luu, I. Ghorbanirenani, P. Leger, and R. Tremblay, "Numerical modeling of slender reinforced concrete shear wall shaking table tests under high-frequency ground motions," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 517-542, 2013.
- [30] H. Luu, P. Léger, and R. Tremblay, "Seismic demand of moderately ductile reinforced concrete shear walls subjected to high-frequency ground motions," *Canadian journal of civil engineering*, vol. 41, pp. 125-135, 2014.
- [31] ATC72-1, Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings: ATC/PEER, 2010.
- [32] S. Abdi, H. Khosravi, and A. H. Jafari, "Seismic force demand on RC shear walls for direct displacement-based design," *Structural Concrete*, vol. 23, no. 3, pp. 1508-1532, 2022.
- [33] G. M. Atkinson, "Earthquake time histories compatible with the 2005 National building code of Canada uniform hazard spectra," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, no. 6, pp. 991-1000, 2009.



Ferdowsi Civil Engineering

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



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of
Iran**

Evaluation of Household Water Consumption to Modify the Consumption Pattern, Case Study: Mashhad City

Research Article

Mohsen Kadkhodaei¹, Ali Abbasi² 

DOI: [10.22067/jfcej.2024.88791.1309](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.88791.1309)

1- Introduction

In recent years, the demand for urban water consumption has dramatically increased due to population growth, improving health, and increasing community welfare. On the other hand, access to sufficient water resources, especially in countries located in arid and semi-arid regions like Iran, faces many limitations. For this reason, the problem of lack of sufficient water in many regions of the world has become one of the most critical challenges of urban management.

Due to limited access to new water sources, managing and controlling water use is preferable to searching for new sources. Domestic water use is the most important among the various urban water uses. On the other hand, the large amount of wastewater produced in the domestic sector indicates excessive water consumption in the domestic sector. Therefore, reducing household water consumption can effectively address the water shortage crisis.

Previous research has shown that one of the main factors of excessive water consumption in domestic use is that people do not use the correct methods of consumption in this category of urban water use. Therefore, teaching the proper behaviors of water consumption in different household uses is very important and necessary to reduce water consumption in the domestic use sector. Based on this, in this article, we seek to prioritize different domestic water uses to improve people's consumption behavior. For this purpose, it is necessary to investigate the existence of differences in the consumption behavior of people in different types of domestic water use. Then, if there is a significant difference between household uses, they can be prioritized to correct the water consumption pattern.

2- Methodology

To investigate and evaluate consumption behaviors and prioritize household uses, six domestic water uses were selected, including car washing, washing machine, dishwashing, bathing, brushing, washing, and toilet. Then,

the consumption behaviors in each of them were scored based on the amount of water consumption, respectively with the numbers 1 (lowest volume of water consumption) to 4 (highest volume of water consumption). Then, questionnaires based on different consumption behaviors in mentioned household uses were randomly distributed among the citizens of Mashhad City.

The confirmatory factor analysis method was applied to examine the similarities or differences in people's consumption behavior in different household uses. For this purpose, a hidden variable such as water consumption behavior was considered as a hidden factor in determining the type of consumption behavior of people. Then, in the confirmatory factor analysis, a structure was considered according to which the consumption behavior of each person in different household uses is a function of the hidden variable (water consumption behavior). If the consumption behaviors of each person are similar in different household uses, such structure and the hidden variable will be recognized as acceptable and valid in the confirmatory factor analysis. Otherwise, each person's consumption behaviors will differ in household uses. In this way, prioritizing household uses becomes essential.

Three criteria were proposed in this study to prioritize domestic water use: average water consumption volume, frequency of repetition of incorrect consumption behaviors, and combined criteria. The combined measure is the product of the average volume of water consumption multiplied by the repetition frequency of incorrect consumption behaviors. The average volume of water consumption based on the measured values for different consumption behaviors in domestic water use in previous studies and the frequency ratio of repetition of wrong consumption behaviors can also be calculated based on the results obtained from statistics.

3- Results

Consumption behavior questionnaires were distributed

* Manuscript received July 6, 2024, Revised July 24, 2024, Accepted October 27, 2024.

¹ Ph.D. student of Water Engineering and Hydraulic structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

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

among 607 residents of Mashhad City, and their consumption behavior in different domestic uses of water was questioned. In addition, their other characteristics, such as age, gender, education level, and number of family members, were also included in the questionnaires. According to the data obtained from the distribution of the questionnaires, 54% of the respondents were female, and 46% were male. Regarding age range, 86% of the respondents were in two age ranges: 21 to 30 and 31 to 40. 58% of the respondents were members of families of 3 or 4 people. 61% of the respondents' educational qualifications were diploma, postgraduate, and bachelor.

After entering the data obtained from the questionnaires into the software and performing confirmatory factor analysis, a hidden variable called water consumption behavior was considered, and the consumption behaviors of people in different household uses were considered to be influenced by this factor (water consumption behavior). Then, the validity of the assumed factor structure was examined. According to the results obtained from the confirmatory factor analysis, the variance error values for all variables (consumption behaviors in different household uses) were less than 1.96, which indicates the non-significance of the mentioned variables in the assumed structure. In addition, the value of the P-value index was less than 0.05, which means the model was poorly fit with the assumed structure. Therefore, it can be concluded that people's consumption behaviors are different in different household uses. Consequently, it is essential to prioritize household consumption to modify the consumption pattern.

In the next step, domestic consumption was compared based on the average monthly water consumption and ranked according to Table 1. According to the obtained results, the largest volume of water consumption was allocated for bathing, washing, and toilet purposes.

Table 1. Prioritization of domestic water use to modify the consumption pattern based on the average water consumption criteria

Domestic use of water	Average monthly water consumption (liters)	Priority
Bathing	2508.17	1
Washroom and toilet	619.03	2
Brushing teeth	360.32	3
Dishwasher	333.74	4
Washing machine	107.95	5
Car wash	19.33	6

In the next step, domestic water consumption was compared only based on the ratio of incorrect consumption behaviors and ranked according to Table 2. Based on the obtained results, the highest proportion of incorrect consumption behaviors and the highest frequency of their repetition among the statistical sample was allocated to bathing, washing machine and brushing teeth.

In the last step, household consumptions were compared based on a consolidated criterion, i.e., the

product of monthly water consumption and the proportion of incorrect consumption behaviors, and were ranked according to Table 3.

As can be seen in Table 3, based on the consolidated criteria, bathing, washing, and toilets were assigned the highest priority for correcting the consumption pattern, and brushing, dishwashing, washing machine, and car washing were placed in the next priority, respectively.

Table 2. Prioritization of domestic water use to modify the consumption pattern based on the frequency of repetition of incorrect consumption behaviors

Domestic use of water	The proportion of incorrect consumption behaviors (%)	Priority
Bathing	66 %	1
Washing machine	60 %	2
Brushing teeth	47 %	3
Washroom and toilet	39 %	4
Dishwasher	35 %	5
Car wash	26 %	6

Table 3. Prioritization of domestic water use to modify the consumption pattern based on the integrated criterion of consumption volume and consumption behavior

Domestic use of water	Average monthly water consumption (liters) × The proportion of incorrect consumption behaviors (%)	Priority
Bathing	1655.39	1
Washroom and toilet	241.42	2
Brushing teeth	169.35	3
Dishwasher	116.81	4
Washing machine	64.77	5
Car wash	5.03	6

4- Conclusion

Based on the research conducted in this article, the following results were obtained:

- There is a significant difference between people's consumption behaviors in different household uses.
- The highest volume of monthly water consumption among domestic water uses is for bathing, washing, and toilet, and the highest frequency of repeating incorrect water consumption behaviors is for bathing, washing machine, and brushing teeth.
- Bathing, washing, and toileting are the highest priorities for improving water consumption behaviors in Mashhad.



ارزیابی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف، مطالعه موردی: شهر مشهد*

مقاله پژوهشی



علی عباسی^(۲)

محسن کدخدایی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.88791.1309

چکیده اصلاح الگوی مصرف آب در مصارف خانگی نقش بسیار پررنگ و مهمی در مدیریت مصرف آب شهری دارد. با ترویج رفتارهای صرفه‌جویانه می‌توان سرانه مصرف آب در بخش خانگی را کاهش داد. هدف از این پژوهش، ارزیابی و اولویت‌بندی انواع مختلف مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف آب در شهر مشهد است. بدین منظور، تشابه رفتارهای مصرفی در مصارف خانگی مختلف آب با استفاده از روش تحلیل عاملی تأییدی مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن، حاکی از عدم تشابه رفتارهای مصرفی افراد در مصارف خانگی مختلف از نظر صحیح یا ناصحیح بودن رفتارهای مصرفی بود. سپس، مصارف آب خانگی مختلف با توجه به معیارهای متوسط حجم مصرف آب و نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح اولویت‌بندی گردیدند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مصارف آب استحمام، دستشویی و توالت به ترتیب بالاترین اولویت‌ها را به خود اختصاص دادند و مصارف مسواک زدن، ظرف‌شویی، ماشین لباس‌شویی و شستن خودرو در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی مصرف آب شهری، سرانه مصرف آب، رفتارهای مصرف آب، رفتارهای صرفه‌جویانه آب، تحلیل عاملی تأییدی (CFA).

Evaluation of Household Water Consumption to Modify the Consumption Pattern, Case Study: Mashhad City

Mohsen Kadkhodaei

Ali Abbasi

Abstract Modifying the pattern of water consumption in households has a prominent and important role in the management of urban water consumption. By promoting frugal behaviors, the per capita water consumption within the domestic sector can be reduced to an acceptable level. The purpose of this study is to evaluate and prioritize different types of household water consumption to improve the consumption pattern in the city of Mashhad. To achieve this goal, the similarity of consumption behaviors across different household water uses were investigated through confirmatory factor analysis. The results indicated the lack of similarity in consumption behaviors of people in different household uses in terms of whether the consumption behaviors are correct or incorrect. Then, the different household water uses were prioritized according to the average criteria of the water consumption volume and the proportion of incorrect behaviors. The outcomes indicated that priority should be given to water usage for bathing and toilet purposes, while brushing teeth, dishwashing, laundry machine operation, and car washing were assigned lower priorities.

Key words Urban water consumption, Water consumption per capita, Water consumption behaviors, Water saving behaviors, Confirmatory Factor Analysis (CFA).

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترا گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

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

مقدمه

[22].

میزان آب خانگی و هدر رفت آن به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع تجهیزات مورد استفاده و رفتار مصرف کننده است [23]. یکی از مهم ترین عوامل عدم استفاده بهینه از آب خانگی در ایران، عدم استفاده از روش های صحیح مصرف آب و عدم آشنایی مردم با این روش ها است [24]؛ بنابراین لازم است راهکارهایی از جمله آموزش روش های صحیح مصرف آب برای تغییر رفتار مصرف کننده و در نتیجه کاهش تقاضای آب مصرفی خانوارها به کار گرفته شوند [25]. مطالعات مختلفی نیز تا کنون در خصوص افزایش آگاهی مصرف کنندگان آب انجام شده است [26-29]. انتخاب روش های اطلاع رسانی مناسب در هر شهر و منطقه، مستلزم تعیین این است که کدام نوع مصرف آب خانگی بالاترین اولویت را برای بهبود رفتار مصرف کننده دارد. با وجود این که اندازه گیری مصرف آب خانگی در مطالعات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است، اما تأثیر اصلاح رفتارهای مصرفی مصرف کنندگان آب چندان مورد توجه قرار نگرفته است [30-32].

چنانچه رفتارهای مصرفی هر فرد از نظر درست و بهینه یا نادرست بودن شیوه مصرف آب در تمام انواع مصارف خانگی یکسان باشد، جهت کاهش مصرف آب ناشی از رفتارهای مصرفی نادرست، تنها کافی است افراد و مشترکانی که رفتارهای مصرفی ناصحیحی دارند شناسایی شده و شیوه های درست مصرف آب در تمامی انواع مختلف مصارف خانگی به آنها آموزش داده شود؛ به عبارت دیگر، در چنین حالتی تمرکز اصلاح الگوی مصرف تنها بر بخش خاص و محدودی از مشترکان آب خانگی متمرکز خواهد شد؛ اما چنانچه هر فرد در تعدادی از انواع مصارف خانگی رفتار مصرفی صحیح و در تعدادی دیگر رفتار مصرفی نادرستی داشته باشد، دیگر نمی توان راهبردهای مبتنی بر اصلاح الگوی مصرف را تنها به بخش خاصی از مشترکان محدود نمود و اصلاح الگوی مصرف آب تمامی مشترکان آب خانگی جهت کاهش و مدیریت مصرف آب شهری ضرورت خواهد داشت. در این صورت، شناسایی مصارف خانگی آب که جهت اصلاح الگوی مصرف اولویت بالاتری دارند بسیار حائز اهمیت خواهد بود. لذا در این تحقیق به دنبال پاسخ به دو سؤال اساسی هستیم:

دسترسی به آب مناسب و کافی جهت مصارف انسانی برای سلامت و رفاه مردم جوامع مختلف بسیار مهم و ضروری است [1]. توسعه روزافزون شهرنشینی در دهه های اخیر منجر به رشد تقاضای مصرف آب شهری شده است [2,3]. علاوه بر این، عوامل دیگری مانند بهبود بهداشت فردی و افزایش رفاه جوامع نیز بر رشد مصرف آب شهری اثرگذار بوده اند [4]. بر همین اساس و با توجه به محدودیت منابع تأمین آب، موضوع دسترسی به آب برای مصارف انسانی به یکی از مهم ترین چالش های جوامع شهری در قرن حاضر تبدیل شده است [5-7]. محدودیت دسترسی به منابع آب در بسیاری از کشورها تهدید بزرگی برای توسعه اقتصادی و اجتماعی آنهاست [8,9]. رشد شهرنشینی در کشورهای در حال توسعه قاره های آفریقا و آسیا مانند ایران نیز در حال شتاب گرفتن است [10-13]. از سوی دیگر، کشورهایی مانند ایران که در مناطق خشک و نیمه خشک جهان قرار دارند، برای دسترسی به منابع آب مناسب و کافی با محدودیت های بیشتری مواجه هستند [14]؛ بنابراین شدت بحران آب در شهرها و کلان شهرهای این کشور مانند شهر مشهد بیشتر احساس می شود.

برای کاهش بحران آب ایجاد شده در نتیجه محدودیت منابع، افزایش بهره وری مصرف آب راهبرد مناسب تری نسبت به جستجوی بی وقفه برای منابع جدید است [15]. بر اساس مطالعات انجام شده حجم فاضلاب شهری بسیار بیشتر از حجم آب مورد نیاز در مصارف شهری است که بیانگر این است که میزان مصرف آب شهری بیشتر از نیاز واقعی است [11]؛ بنابراین می توان استنباط کرد که با اعمال سیاست های مدیریت تقاضای مصرف می توان میزان مصرف آب شهری را تا حد زیادی کاهش داد [16]. بر همین اساس، یکی از مهم ترین چالش های سازمان های مدیریت شهری در کلان شهرهایی مانند مشهد مدیریت، ارزیابی و افزایش بهره وری مصرف آب شهری است [17,18]. مصرف خانگی مهم ترین بخش مصرف آب شهری است؛ بنابراین مدیریت صحیح مصرف آب خانگی منجر به افزایش راندمان مصرف آب شهری می شود [19]. در سال های اخیر، در ایالات متحده و سایر کشورهای توسعه یافته نیز سیاست های مدیریتی مختلفی با تأکید بر برنامه های آموزش عمومی برای کاهش تقاضای آب خانگی اعمال شده است [20-22].

کردند. داده‌های مورد نیاز با توزیع تعداد ۱۰۲۵۱ پرسشنامه در میان مصرف‌کنندگان آب خانگی در ده کشور مختلف شامل کشورهای استرالیا، کانادا، جمهوری چک، فرانسه، ایتالیا، کره جنوبی، مکزیک، هلند، نروژ و سوئد به دست آمدند. بر اساس نتایج، بستن شیر آب هنگام مسواک زدن، دوش گرفتن به جای استحمام، بستن سینک در هنگام شستن ظرف، آبیاری در ساعات خنک‌تر روز و جمع‌آوری آب باران یا بازیافت فاضلاب به ترتیب صرفه‌جویی‌کننده‌ترین رفتارها در مصارف خانگی بوده‌اند. ولترز (Wolters) [42] حجم آب مصرفی خانوارهای ساکن در ایالت اورگان (Oregon state) آمریکا را بر اساس نوع رفتار مصرفی افراد تخمین زد و تأثیر ویژگی‌های جمعیت‌شناختی، نگرانی از کمبود آب و نگرش مبتنی بر صرفه‌جویی در مصرف آب را بر حجم مصرف آب بررسی کرد. بر اساس نتایج این مطالعه، بیشترین رفتارهای مبتنی بر صرفه‌جویی در مصرف آب خانگی در ایالت اورگان به ترتیب عبارت بودند از: استفاده از ماشین لباس‌شویی و ظرف‌شویی با ظرفیت کامل، ترمیم شیرهای دارای نشتی، بستن شیر آب هنگام مسواک زدن، آبیاری کامل و کاهش دفعات آبیاری، آبیاری در اوایل صبح یا اواخر شب، کاهش مدت دوش گرفتن، خرید تجهیزات کاهنده مصرف آب، استفاده از شیرهای هوا، استفاده از گیاهان بومی یا مقاوم به خشکی و جمع‌آوری آب باران.

شان (Shan) و همکاران [29] رفتارهای مصرف آب برای استفاده خانگی در یونان و لهستان را بررسی کردند. داده‌های به دست آمده در این تحقیق نشان داد که بزرگسالان و کودکان پسر نسبت به بزرگسالان زن، مدت زمان دوش گرفتن کوتاه‌تری دارند، در حالی که کودکان کمتر از بزرگسالان در هفته دوش می‌گیرند. اکثر اعضای خانواده در طول شب دوش می‌گیرند و اکثر آنها سعی نکرده‌اند در مدت زمان کوتاه‌تری دوش بگیرند. فراوانی باغبانی در طول تابستان بسیار متفاوت بود و سامانه‌های آبیاری برای باغبانی منحصراً آبیاری دستی بود و تنها تعداد کمی از پاسخ‌دهندگان آب باران را برای باغبانی برداشت می‌کردند. میزان آب مصرفی در هر نوع از مصارف خانگی در این تحقیق بر اساس رفتار مصرفی افراد برآورد شد. مصارف خانگی در این تحقیق بر اساس شدت تکرار رفتارهای مصرف نادرست رتبه‌بندی شدند. بر این اساس، بیشترین هدر رفت آب در مصارف خانگی در یونان و لهستان به ترتیب

سؤال ۱: آیا هر یک از مشترکان و مصرف‌کنندگان آب خانگی در همه انواع مصارف خانگی رفتار مصرفی مشابهی از نظر رفتار درست و بهینه یا رفتار ناصحیح دارند؟

سؤال ۲: در کدام نوع از مصارف خانگی مختلف آب، تغییر رفتار مصرف‌کننده و اصلاح الگوی مصرف آب اولویت بالاتری دارد؟

با توجه به سؤال اول، اگر رفتارهای مصرف‌کننده در مصارف مختلف آب خانگی مشابه یکدیگر باشند، می‌توان این رفتارها را وابسته به ویژگی‌های فردی و متغیری پنهان مانند «نوع رفتار مصرف‌کننده» در نظر گرفت. در سؤال دوم، ما در تلاش هستیم با استفاده از معیاری مناسب، مصارف خانگی مختلف آب را ارزیابی کنیم و جهت اعمال راهبردهای اصلاح الگوی مصرف آب، آنها را اولویت‌بندی نماییم. برای پاسخ به دو سؤال مذکور، رفتارهای مصرفی شهروندان مشهودی در مصارف مختلف خانگی آب با استفاده از روش‌های آماری معتبر نظیر تحلیل عاملی تأییدی (Confirmatory Factor Analysis) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند و معیارهای مؤثر بر اولویت‌بندی مصارف خانگی مختلف آب، جهت اصلاح الگوی مصرف شناسایی شدند. در نهایت، اولویت‌بندی مصارف خانگی جهت اصلاح الگوی مصرف بر اساس معیارهای مذکور انجام پذیرفت.

پیشینه تحقیق

در مطالعات پیشین رفتارهای مصرف آب از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برخی از پژوهش‌ها به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار مصرف آب پرداخته‌اند [33,34]. برخی مطالعات دیگر در سال‌های اخیر به تصمیم‌گیری در مورد انتخاب نوع رفتار مصرف آب پرداخته‌اند [35-38]. با این حال، بیشتر مطالعات پیشین به ارزیابی و اولویت‌بندی رفتارهای مصرف اختصاص یافته‌اند [7,29,39-42]. رتبه‌بندی مصارف خانگی در این مطالعات بر اساس فراوانی تکرار رفتارهای صرفه‌جویانه در مصرف آب [40,42]، فراوانی تکرار رفتارهای اشتباه مصرف آب [29] و حجم مصرف آب انجام شده است [39,41].

گرافتون (Grafton) و همکاران [40] تأثیر عوامل مختلف بر رفتارهای صرفه‌جویی در مصرف آب خانگی را ارزیابی

مصارف آشامیدنی (نوشیدن و آشپزی) نیز به ترتیب در رتبه‌های دوم تا پنجم قرار گرفتند.

همان طور که گفته شد، ارزیابی و رتبه‌بندی انواع مصارف خانگی آب در هر یک از تحقیقات ذکر شده تنها بر اساس یکی از معیارهای حجم مصرف آب یا فراوانی رفتارهای نادرست مصرف آب در میان مشترکان آب خانگی انجام پذیرفته است؛ در حالی که هر دو معیار مذکور در ارزیابی مصارف خانگی آب و اولویت‌بندی آنها جهت اصلاح الگوی مصرف مؤثر هستند. بر همین اساس، در پژوهش حاضر ضمن بررسی وجود تغییری پنهان نظیر «رفتار مصرفی» که بر شیوه‌های مصرف آب در انواع مختلف مصارف خانگی مؤثر باشد، تلاش شده است در اولویت‌بندی مصارف خانگی جهت اصلاح الگوی مصرف، به تمامی معیارهای مؤثر بر ارزیابی آنها توجه شود و بدین‌وسیله، خلأ پژوهشی مطالعات گذشته مرتفع گردد.

روش تحقیق

برای پاسخ به سؤالات تحقیق، در درجه اول نیازمند سنجش رفتارهای مصرفی مشترکان آب شهری در مصارف خانگی و برآورد میزان مصرف آب در رفتارهای مصرفی مختلف افراد در هر یک از انواع مصارف خانگی آب هستیم. بدین منظور، ابتدا مصارف اصلی آب خانگی و روش‌های مصرف رایج مربوطه شناسایی و انتخاب شدند. مصارف اصلی خانوار در شش دسته شامل: شستن خودرو، استفاده از ماشین لباسشویی، ظرف‌شویی، حمام، توالی و دستشویی و مسواک زدن طبقه‌بندی شدند. سپس رفتارهای مصرفی مختلف در هر دسته بر اساس میزان مصرف آب طبق جدول (۱) امتیازدهی شدند.

از آنجایی که استفاده از تجهیزات مصرفی مناسب باعث کاهش مصرف آب خانگی می‌شود، نوع شیرهای آب مورد استفاده در منازل نیز به عنوان یک رفتار مصرفی در نظر گرفته شده است. در مورد استفاده از ماشین لباسشویی، استفاده کمتر به معنای استفاده از ماشین لباسشویی با حداکثر ظرفیت آن است که منجر به کاهش مصرف آب در فرایند شستشو می‌شود؛ بنابراین در محاسبه امتیاز روش‌های استفاده از ماشین لباسشویی، میزان استفاده ماهانه ماشین لباسشویی با توجه به تعداد افراد خانواده ملاک امتیازدهی قرار گرفته است. در محاسبه فواصل زمانی استفاده از ماشین لباسشویی، تعداد افراد

عبارت بودند از باز نگه داشتن شیر آب تا گرم شدن آب، باز نگه داشتن شیر آب هنگام شستن ظروف، باز نگه داشتن شیر آب هنگام مسواک زدن و باز نگه داشتن شیر آب تا زمانی که آب گرم خنک شود.

بتکه (Bethke) و همکاران [39] روند مصرف آب در مصارف خانگی را بررسی کردند. آن‌ها داده‌های کنتور آب هوشمند را از یک خانواده چهار نفره در مرکز ایلینوی به مدت یک سال جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کردند. به این ترتیب روند فصلی، هفتگی و روزانه مصرف آب مشخص شد. آنها مصرف آب خانگی را بر اساس حجم آب مصرفی با استفاده از روش k-means خوشه‌بندی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین مصرف آب خانگی به حمام و پس از آن شیرآلات اختصاص دارد. سایر کاربری‌ها مانند توالی، ماشین لباسشویی، ماشین ظرف‌شویی و... نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

اوکوتان (Okutan) و آکویونلو (Akkoyunlu) [41] مصرف آب و رد پای آب را در بین دانشجویان دانشگاه بغازیچی در ترکیه مورد مطالعه قرار دادند. حجم آب مصرفی با استفاده از توزیع پرسشنامه و بر اساس رفتار مصرفی دانشجویان اندازه‌گیری شد. به این ترتیب سرانه مصرف آب روزانه دانشجویان در هر نوع از مصارف خانگی تعیین و مصارف خانگی مختلف بر اساس حجم آب مصرفی رتبه‌بندی شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین مصرف آب توسط دانشجویان به آشپزخانه و دستشویی اختصاص داشت. استفاده از توالی، حمام، ظرف‌شویی و لباسشویی نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

مویا - فرناندز (Moya-Fernandez) و همکاران [7] مصرف آب خانگی را بر اساس میزان پذیرش مردم برای استفاده از آب بازیافتی رتبه‌بندی کردند. آنها داده‌های مورد نیاز خود را با استفاده از توزیع پرسشنامه میان ۸۴۴ دانشجو در جنوب اسپانیا جمع‌آوری نمودند. بر اساس نتایج به دست آمده، مصارف خارج از منزل (شست‌وشوی خودرو و آبیاری) در رتبه اول قرار گرفت. مصارف نظافت خانگی (شست‌وشوی ظرف، لباسشویی، نظافت منزل)، مصارف شخصی (مسواک زدن، شستن نوزاد، حمام کردن و استخر)، مصرف حیوانات خانگی و

مصارف خانگی مختلف تابع متغیر پنهانی مانند «رفتار مصرفی» می‌باشد یا خیر؟ از روش تحلیل عاملی تأییدی (CFA) مرتبه اول استفاده گردید. مطابق این روش یک یا چند متغیر پنهان به عنوان عامل یا عوامل اثرگذار بر متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده و ساختار مدل مشخص می‌گردد. سپس مقادیر متغیرهای وابسته برای تمامی اعضای نمونه آماری در مدل ساختاری وارد شده و با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه معنی‌داری عامل یا عوامل پنهان و قدرت برازش مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. متغیرهای وابسته در این مطالعه، انواع مصارف خانگی آب هستند که مقدار آنها برابر با امتیازات مشخص شده برای انواع رفتارهای مصرفی در هر یک از این مصارف خانگی آب می‌باشد (مطابق جدول ۱).

حداقل حجم نمونه مورد نیاز در تحلیل عاملی تأییدی بر اساس تعداد عوامل تعیین می‌شود. اگر تعداد عوامل برابر با ۱۰ باشد، حداقل حجم نمونه پیشنهادی تقریباً ۲۰۰ نمونه است [49,50]. از آنجایی که در این پژوهش تنها یک عامل (متغیر پنهان) وجود دارد، حداقل حجم نمونه کمتر از ۲۰۰ نفر است، بنابراین حجم نمونه انتخاب شده در این پژوهش (۶۰۷ نمونه) بیشتر از حداقل حجم نمونه مورد نیاز بوده و کافی است.

خانوار ۴ نفر در نظر گرفته شده است. فواصل زمانی معادل در سایر خانواده‌ها با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$(N_{wm}^e)_i = \left(\frac{4}{n}\right) \times (N_{wm})_i \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $(N_{wm})_i$ میانگین تعداد دفعات استفاده از ماشین لباس‌شویی در نمونه i ، n تعداد اعضای خانواده و $(N_{wm}^e)_i$ تعداد معادل دفعات استفاده از ماشین لباس‌شویی در ماه برای یک خانواده چهار نفره است.

در گام دوم پرسشنامه‌هایی جهت آماربرداری از رفتارهای مصرفی شهروندان و مشترکان آب شهری در مصارف خانگی مطابق با رفتارهای مصرفی مشخص شده در جدول (۱) تنظیم شدند. با توجه به اینکه حداقل اندازه نمونه برای جامعه آماری مشترکان آب خانگی در شهر مشهد، بیشتر توسط کدخدایی و با استفاده از روش کوکران برابر با ۵۴۰ نفر محاسبه گردیده است، تعداد ۶۰۷ پرسشنامه با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده میان شهروندان شهر مشهد و مشترکان آب خانگی در این کلان‌شهر توزیع گردید [48]. بدین ترتیب، رفتارهای مصرفی افراد نمونه آماری انتخاب شده در مصارف مختلف خانگی آب جمع‌آوری گردیدند.

برای پاسخ به این سؤال که آیا رفتارهای مصرفی افراد در

جدول ۱ رفتارهای مصرفی در مصارف مختلف خانگی آب و امتیازات آنها جهت تحلیل عاملی تأییدی

نام متغیر در نرم‌افزار LISREL	امتیازات رفتارهای مصرفی				دسته‌بندی مصارف خانگی
	خیلی زیاد (۴)	زیاد (۳)	متوسط (۲)	کم (۱)	
X1	شستن با شلنگ آب	شستن با یک سطل آب	کارواش	فاقد خودرو	شستن خودرو
X2	کمتر از ۳ روز	بین ۳ تا ۵ روز	بین ۵ تا ۱۰ روز	بیشتر از ۱۰ روز	ماشین لباس‌شویی (فواصل زمانی استفاده)
	بیشتر از ۱۰ مرتبه	۶ تا ۱۰ مرتبه	۳ تا ۶ مرتبه	کمتر از ۳ مرتبه	تعداد معادل استفاده از ماشین لباس‌شویی در ماه برای یک خانواده ۴ نفره
X3	شست‌وشو با شیر آب باز	-	باز کردن شیر آب تنها در هنگام آبکشی	ماشین ظرف‌شویی	ظرف‌شویی
X4	استفاده از وان	شست‌وشو همراه با باز بودن شیر آب	شست‌وشو همراه با باز بودن دوش	بستن شیر آب و دوش در هنگام عدم استفاده	استحمام
X5	شیر آب باز	شیر آب کم‌فشار	شیر آب بسته	با یک لیوان آب	مسواک زدن
X6	شیر پیچی	-	شیر اهرمی	شیر هوشمند	دستشویی و توالت

کمتر از ۰/۰۶ باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل طراحی شده برازش خوبی دارد [47].

یکی از مهم‌ترین معیارهای اولویت‌بندی مصارف خانگی که در مطالعات گذشته نیز مورد استفاده قرار گرفته است، متوسط مصرف آب در آنها می‌باشد [39,41]؛ بنابراین، لازم است متوسط مصرف آب در هر یک از رفتارهای مصرفی اندازه‌گیری و تعیین شود. با توجه به اینکه امکان نصب کنتور برای مصارف خانگی مختلف تک‌تک اعضای نمونه آماری وجود ندارد، می‌توان از مقادیر متوسط مصرف که در مطالعات پیشین و مطابق جدول (۲) برای هر یک از رفتارهای مصرفی در مصارف خانگی آب در نظر گرفته شده‌اند، استفاده نمود [48]. بدین ترتیب، می‌توان متوسط حجم مصرف آب ماهانه برای هر یک از مصارف خانگی شش‌گانه را در نمونه آماری محاسبه و تعیین کرد.

در این پژوهش، تحلیل عاملی تأییدی با استفاده از نرم‌افزار LISREL 8.80 که یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها برای انواع تحلیل عاملی می‌باشد، انجام شده است. نتایج تحلیل عاملی تأییدی با استفاده از آماره‌های Chi-Square و Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) می‌شود. آماره Chi-Square نشان دهنده تفاوت بین مقادیر ماتریس کوواریانس مشاهده شده و ماتریس کوواریانس مورد انتظار و P-value نشان دهنده سطح معنی‌داری است. اگر مقدار P کمتر از ۰/۰۵ باشد، به این معنی است که مدل برازش ضعیفی دارد و بین دو ماتریس کوواریانس مشاهده شده و مورد انتظار تفاوت معناداری وجود دارد؛ اما اگر مقدار Chi-Square در مدل نزدیک به صفر و مقدار P-value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل برازش خوبی دارد. RMSEA بین صفر تا یک متغیر است. هر چه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، برازش مدل بهتر است و اگر مقدار آن

جدول ۲. متوسط حجم مصرف آب برای رفتارهای مصرفی مختلف در مصارف خانگی آب [48]

رفتارهای مصرفی				مصارف خانگی آب
شستن با شلنگ آب	شستن با یک سطل آب	کارواش	فاقد خودرو	شستن خودرو
۳۷۹	۴۸	۲۰	۰	حجم مصرف در هر مرتبه (لیتر)
کمتر از ۳ روز	بین ۳ تا ۵ روز	بین ۵ تا ۱۰ روز	بیشتر از ۱۰ روز	ماشین لباس‌شویی (فواصل استفاده)
بیشتر از ۱۰ مرتبه	۶ تا ۱۰ مرتبه	۳ تا ۶ مرتبه	کمتر از ۳ مرتبه	تعداد معادل استفاده در ماه برای یک خانواده ۴ نفره
m × 60				حجم مصرف ماهانه (لیتر)*
شست‌وشو با شیر آب باز	-	باز کردن شیر آب تنها در هنگام آبکشی	ماشین ظرف‌شویی	ظرف‌شویی
n × 24	-	n × 12	۱۸	حجم مصرف در هر مرتبه (لیتر)**
استفاده از وان	شست‌وشو همراه با باز بودن شیر آب	شست‌وشو همراه با باز بودن دوش	بستن شیر آب و دوش در هنگام عدم استفاده	استحمام
۱۶۵	t × 19	t × 9.5	۴۳	حجم مصرف در هر مرتبه (لیتر)***
شیر آب باز	شیر آب کم‌فشار	شیر آب بسته	با یک لیوان آب	مسواک زدن
۱۲	۶	۴	۰/۲۵	حجم مصرف (لیتر) در هر مرتبه
شیر پیچی	-	شیر اهرمی	شیر هوشمند	دستشویی و توالت
۳۰	-	۱۵	۹	حجم مصرف روزانه (لیتر)

* m: متوسط تعداد استفاده از ماشین لباس‌شویی در ماه

** n: تعداد اعضای خانوار

*** t: مدت زمان استحمام (دقیقه)

مصرفی افراد در مصارف خانگی آب از نظر صحیح و صرفه‌جویانه یا نادرست بودن تحت تأثیر عامل پنهانی نباشد، می‌توان نتیجه گرفت که نادرست بودن رفتار مصرفی یک نفر در یکی از انواع مصارف خانگی آب لزوماً به معنای نادرست بودن رفتار مصرفی وی در سایر انواع مصارف خانگی آب نیست؛ بنابراین در چنین حالتی، در اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف لازم است معیار فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی نادرست نیز مورد توجه قرار گیرد. در این صورت با ضرب مقادیر متوسط مصرف آب برای هر یک از مصارف خانگی در نسبت فراوانی تکرار رفتارهای ناصحیح در آن مصرف خانگی، می‌توان معیار جدیدی برای اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف طراحی نمود که اثر هر دو معیار متوسط مصرف آب و فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی ناصحیح در آن دیده شده باشد.

محدوده مورد مطالعه

در این مقاله، شهر مشهد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و رفتارهای مصرفی شهروندان آن در مصرف آب خانگی مورد بررسی قرار گرفت. مشهد با بیش از سه میلیون نفر جمعیت، دومین کلان‌شهر پرجمعیت ایران است [43,44]. آب مورد نیاز شهروندان مشهدی عمدتاً از طریق سد دوستی و منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود [45]. میانگین بارندگی سالانه در این کلان‌شهر ۲۷۰ میلی‌متر است [46]. مشهد مهم‌ترین شهر زیارتی ایران است و هر ساله به ویژه در فصل تابستان گردشگران زیادی از این شهر دیدن می‌کنند. با توجه به افت منابع آب زیرزمینی در کنار کاهش نزولات جوی در سال‌های اخیر، تأمین آب مورد نیاز شهروندان محدود شده است؛ بنابراین مدیریت تقاضا و کاهش مصرف آب در کاربری‌های شهری به ویژه مصارف خانگی بسیار ضرورت یافته است و باید بیش از پیش در این شهر مورد توجه قرار گیرد.

نتایج

پرسشنامه‌های طراحی شده در خصوص رفتارهای مصرفی مشترکان آب خانگی در شهر مشهد در پاییز سال ۱۳۹۷ در مناطق مختلف شهر مشهد به صورت مصاحبه توزیع گردیدند. پاسخ‌های پاسخ‌دهندگان در مصارف استحمام، مسواک زدن،

علاوه بر معیار متوسط حجم مصرف آب، معیار فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی نامناسب (فراوانی تکرار رفتارهای صرفه‌جویانه) نیز از اهمیت بالایی در اولویت‌بندی مصارف خانگی مختلف جهت اصلاح الگوی مصرف برخوردار است؛ بنابراین از میان رفتارهای مصرفی تعیین شده در جدول (۲)، رفتارهای مصرفی صحیح و صرفه‌جویانه مطابق جدول (۳) تعیین شدند. بدین ترتیب، فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی صحیح و صرفه‌جویانه و فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی نادرست در نمونه آماری قابل محاسبه خواهند بود.

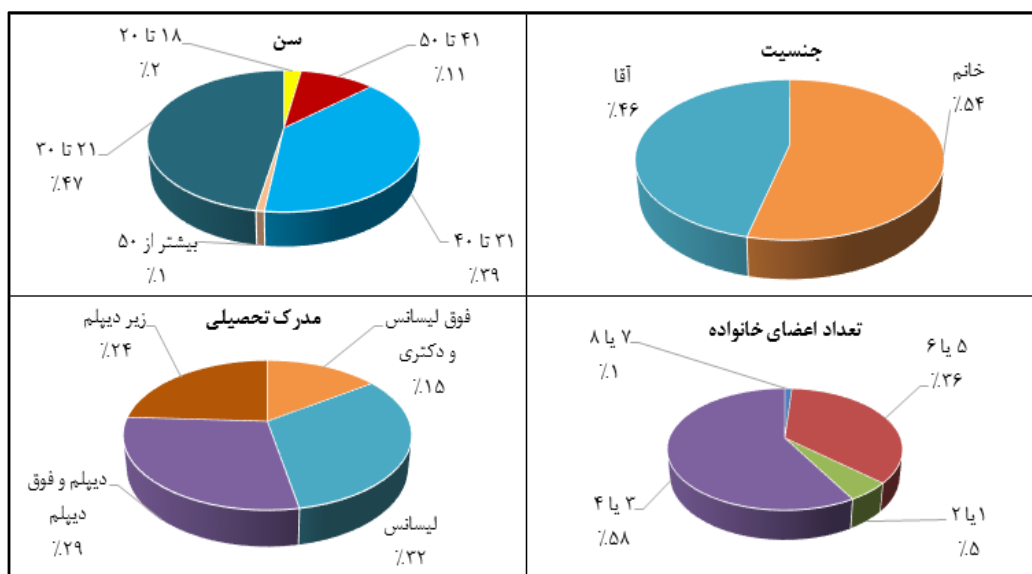
جدول ۳ رفتارهای مصرفی صحیح و صرفه‌جویانه در مصارف خانگی آب

مصارف خانگی آب	رفتارهای مصرفی صحیح و صرفه‌جویانه
شستن خودرو	- فاقد خودرو - کارواش - شستن با یک سطل آب
ماشین لباس‌شویی (فواصل زمانی استفاده)	- بیشتر از ۱۰ روز - بین ۵ تا ۱۰ روز
ظرف‌شویی	- ماشین ظرف‌شویی - باز کردن شیر آب تنها در هنگام آب‌کشی
استحمام	- بستن شیر آب و دوش در هنگام عدم استفاده
مسواک زدن	- با یک لیوان آب - شیر آب بسته
دستشویی و توالت	- شیر هوشمند - شیر اهرمی

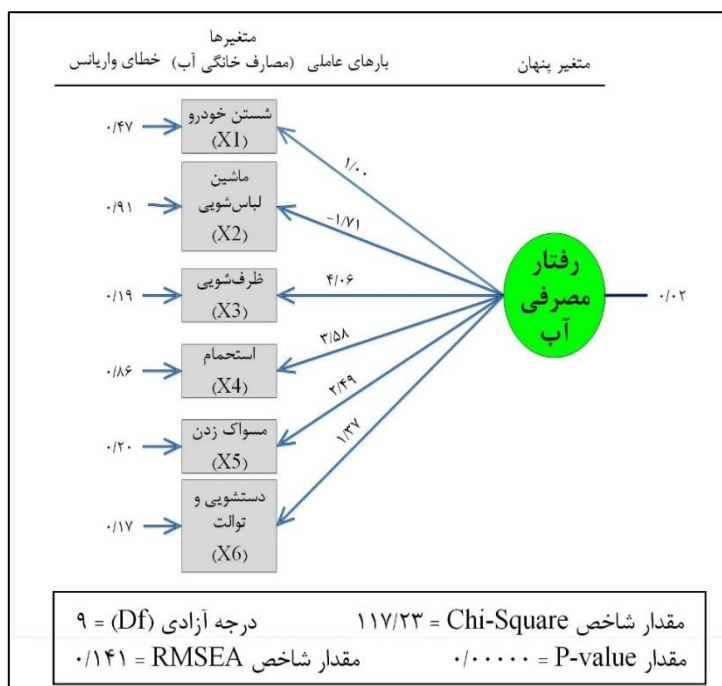
لازم به ذکر است که چنانچه نتایج تحلیل عاملی تأییدی بیان‌گر وجود عامل پنهان مؤثری بر رفتارهای مصرفی افراد باشد، می‌توان نتیجه گرفت که رفتارهای مصرفی هر فرد از نظر صحیح و صرفه‌جویانه بودن در تمام انواع مختلف مصارف خانگی آب یکسان است. در این صورت در اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف تنها از معیار متوسط مصرف آب می‌توان استفاده نمود و در آموزش همگانی و عمومی مشترکان آب شهری جهت اصلاح الگوی مصرف، تنها تمرکز بر مشترکان پرمصرف جهت اصلاح الگوی مصرف در مصارف خانگی آب کافی خواهد بود؛ اما چنانچه رفتارهای

و مدرک تحصیلی نیز در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه به اینکه نسبت‌های این مشخصات در نمونه انتخاب شده با کل جامعه آماری مطابقت داشته می‌توان نتیجه گرفت که نمونه آماری انتخاب شده بر جنسیت، سن یا مدرک تحصیلی خاصی متمرکز نشده است و نتایج آن قابل تعمیم به کل جامعه آماری می‌باشد.

دستشویی و توالت به صورت فردی و در مصارف شستن خودرو، ماشین لباسشویی و ظرف‌شویی به نمایندگی از طرف خانواده بود. لذا تعداد اعضای خانواده نیز مورد پرسش قرار گرفت تا محاسبه متوسط سرانه مصرف آب هر فرد در مصارف مذکور به سهولت قابل انجام باشد. مشخصات دموگرافی پاسخ‌دهندگان به پرسشنامه‌ها شامل جنسیت، سن، اندازه خانوار



شکل ۱ مشخصات دموگرافی پاسخ‌دهندگان به پرسشنامه‌ها شامل جنسیت، سن، اندازه خانوار و مدرک تحصیلی



شکل ۲ نتایج تحلیل عاملی تأییدی (CFA)

دارند که منجر به مصرف بی‌رویه آب می‌شود؛ بنابراین، ضرورت دارد که در اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف، علاوه بر معیار متوسط مصرف آب به معیار فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی ناصحیح و نامناسب نیز توجه شود. همچنین ضرورت دارد در برنامه‌های فرهنگ‌سازی مصرف بهینه و آموزش شیوه‌های صحیح مصرف آب در مصارف خانگی نیز تمامی مشترکان شبکه آب خانگی مورد توجه قرار گیرند (نه صرفاً مشترکان پر مصرف)؛ زیرا ممکن است هر کدام از آنها در یک یا چند نوع از انواع مصارف خانگی آب، رفتارهای مصرفی نادرستی داشته باشند.

لازم به ذکر است که چنانچه هدف از مطالعه دستیابی به مدل ساختاری مصارف خانگی آب و عوامل پنهان مؤثر بر آنها می‌بود، پس از عدم تأیید میزان برازش مدل ساختاری لازم بود تغییراتی در ساختار آن ایجاد کرده و به عنوان مثال، برای هر دسته از مصارف خانگی مشابه، متغیر پنهان جداگانه‌ای تعریف نمود. اما از آنجایی که هدف از استفاده از تحلیل عاملی تأییدی در این مطالعه تنها آزمون فرض اولیه مبنی بر تشابه رفتارهای مصرفی افراد در مصارف خانگی مختلف بوده است، نیازی به دستیابی به مدل ساختاری عوامل مؤثر بر رفتارهای مصرفی افراد در مصارف خانگی نمی‌باشد.

عدم تشابه رفتارهای مصرفی افراد در مصارف خانگی مختلف آب از نظیر صحیح و صرفه‌جویانه بودن یا ناصحیح بودن می‌تواند علت‌های مختلفی داشته باشد. به عنوان نمونه، چنانچه در اقدامات فرهنگ‌سازی پیشین جهت ترویج صرفه‌جویی در مصرف آب صرفاً بر مصارف خانگی خاصی تأکید شده باشد، ممکن است مشترکان آب شهری تنها در همان مصارف رفتار مصرفی غیرصرفه‌جویانه خود را اصلاح کرده باشند. علاوه بر این، بر اثر ایجاد عادات رفتاری خاصی در طول زمان، ممکن است تغییر و اصلاح رفتارهای مصرفی در برخی مصارف خانگی سختی بیشتری نسبت به سایر مصارف خانگی برای افراد داشته باشند. همچنین، تغییر و اصلاح رفتار مصرفی در برخی مصارف خانگی آب، علاوه بر صرفه‌جویی مزایای دیگری برای مشترکان آب خانگی به همراه دارد. به همین دلیل، اصلاح رفتار مصرفی در آن مصارف خانگی مقبولیت و مطلوبیت بیشتری به همراه داشته و بیشتر توسط مشترکان مورد استقبال قرار می‌گیرد. به عنوان نمونه، استفاده از کارواش جهت

همان طور که گفته شد، اولین سؤال مطرح شده در این تحقیق این بود که آیا رفتارهای مصرفی افراد در انواع مصارف آب خانگی از نظر صحیح و صرفه‌جویانه یا نادرست بودن مشابه یکدیگر هستند یا خیر؟ برای پاسخ به این سؤال، فرض اولیه این بود که رفتار مصرفی افراد در تمام مصارف خانگی مشابه یکدیگر باشند. اگر این فرض درست باشد، بر مبنای تحلیل عاملی تأییدی مرتبه اول می‌توان رفتارهای مصرفی افراد در مصارف مختلف خانگی را تحت تأثیر یک عامل مشترک (متغیر پنهان) مانند متغیر رفتار مصرفی آب در نظر گرفت؛ بنابراین، پس از امتیازدهی به رفتارهای مصرفی تمامی افراد نمونه آماری در مصارف خانگی (مطابق امتیازات در نظر گرفته شده در جدول ۱) و وارد کردن این مقادیر در نرم‌افزار LISREL، اعتبار مدل تحلیل ساختاری مفروض مورد بررسی قرار گرفت.

مطابق نتایج تحلیل عاملی تأییدی که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند، بیشترین بارهای عاملی به متغیرهای X_3 ، X_4 و X_5 اختصاص یافته‌اند که بیانگر همبستگی بیشتر مصارف مربوط به این متغیرها یعنی مصارف ظرف‌شویی، استحمام و مسواک زدن با عامل پنهان (رفتار مصرفی آب) می‌باشند. مقدار منفی به دست آمده برای بار عاملی متغیر X_2 نیز نشان می‌دهد که تأثیری که متغیر پنهان بر سایر متغیرها داشته است در متغیر X_2 در جهت معکوس بوده است. البته از آنجایی که خطاهای واریانس برای تمامی متغیرها کمتر از $1/96$ به دست آمده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که هیچ کدام از متغیرهای آشکار در این ساختار معنی‌دار نیستند. علاوه بر این موارد، همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مقدار شاخص Chi-Square برابر با $117/23$ و مقدار P-value نیز کمتر از $0/05$ به دست آمده است که نشان دهنده وجود تفاوت معنی‌دار بین ماتریس‌های کوواریانس مشاهده شده و مورد انتظار و در نتیجه برازش ضعیف مدل است. شاخص RMSEA نیز بیشتر از $0/06$ است که ضعیف بودن مدل را تأیید می‌کند (شکل ۲)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رفتارهای مصرفی افراد در مصارف مختلف خانگی از نظر صحیح و صرفه‌جویانه بودن یا ناصحیح بودن با یکدیگر یکسان نیستند؛ به عبارت دیگر در برخی مصارف خانگی مردم رفتارهای مصرفی مناسبی دارند و در برخی دیگر از مصارف خانگی رفتارهای مصرفی نامناسب و ناصحیحی

مصرف قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه در پژوهش بتکه (Bethke) و همکاران نیز بیشترین مصارف آب خانگی به سرویس‌های بهداشتی و شیرآلات و توالت اختصاص یافته بود، مشاهده می‌شود که یافته‌های پژوهش حاضر، نتایج مطالعات پیشین را نیز تأیید می‌نماید [39]. مصارف مسواک زدن و ظرف‌شویی نیز با حجم مصرفی نزدیک به یکدیگر در رتبه‌های میانی قرار گرفته‌اند و پایین‌ترین اولویت‌ها به مصارف ماشین لباس‌شویی و شستن خودرو اختصاص یافته‌اند.

در گام بعد، رفتارهای مصرفی افراد در نمونه آماری مطابق جدول (۳) به دو دسته شامل رفتارهای مصرفی صحیح و مناسب و رفتارهای مصرفی ناصحیح و نامناسب تقسیم شدند. بدین ترتیب، فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی ناصحیح و نامناسب و نسبت آنها در نمونه آماری محاسبه شده و مصارف خانگی آب مطابق جدول (۵) و بر اساس معیار رفتارهای مصرفی ناصحیح جهت اصلاح الگوی مصرف اولویت‌بندی گردیدند.

جدول ۵ اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف بر اساس معیار فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی ناصحیح

اولویت	نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح	مصارف خانگی آب
۱	۶۶٪	استحمام
۲	۶۰٪	ماشین لباس‌شویی
۳	۴۷٪	مسواک زدن
۴	۳۹٪	دستشویی و توالت
۵	۳۵٪	ظرف‌شویی
۶	۲۶٪	شستن خودرو

مقایسه جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که برخی مصارف نظیر استحمام، مسواک زدن و شستن خودرو در اولویت‌بندی بر اساس هر دو معیار در اولویت یکسانی قرار گرفته‌اند؛ اما اولویت برخی مصارف، اختلاف زیادی در جداول مذکور دارند. به عنوان نمونه، ماشین لباس‌شویی با داشتن متوسط حجم مصرف آب کمتر از برخی مصارف دیگر، بر اساس معیار متوسط حجم مصرف آب در اولویت پنجم قرار گرفته است؛ اما بر اساس نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح، اولویت دوم را به خود اختصاص داده است؛ بنابراین با توجه به اهمیت هر دو

شستن خودرو یا استفاده از ماشین ظرف‌شویی، علاوه بر صرفه‌جویی در مصارف آب، موجب صرفه‌جویی در وقت و زمان نیز می‌شود؛ بنابراین، پیش از برنامه‌ریزی برای انجام اقدامات فرهنگ‌سازی جهت اصلاح الگوی مصرف آب خانگی در هر شهر یا منطقه، ضرورت دارد که با روش‌های آماری نظیر روش تحلیل عاملی تأییدی (CFA)، وجود یا عدم وجود تشابه رفتارهای مصرفی در انواع مختلف مصارف خانگی آب در آن منطقه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

در گام بعدی، با محاسبه متوسط سرانه حجم مصرف آب ماهانه برای هر نفر در رفتارهای مصرفی مختلف بر اساس مقادیر در نظر گرفته شده در جدول (۲)، مصارف خانگی آب مطابق جدول (۴) و بر اساس معیار متوسط مصرف آب اولویت‌بندی گردیدند. نحوه محاسبه متوسط سرانه حجم مصرف آب ماهانه در مصارف استحمام و مسواک زدن بر اساس ضرب تعداد دفعات استفاده در طول ماه در متوسط مصرف آب در هر مرتبه (جدول ۲) بوده است. در مصارف شستن خودرو، ماشین لباس‌شویی و ظرف‌شویی نیز حاصل ضرب مذکور بر تعداد اعضای خانوار تقسیم گردیده است. با توجه به اینکه متوسط مصرف آب در مصارف دستشویی و توالت به صورت روزانه در جدول (۲) ثبت شده است، متوسط سرانه حجم مصرف آب آن با ضرب اعداد مذکور در تعداد روزهای ماه (۳۰ روز) محاسبه گردید.

جدول ۴ اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف بر اساس معیار متوسط مصرف آب

اولویت	متوسط حجم مصرف آب ماهانه (لیتر)	مصارف خانگی آب
۱	۲۵۰۸/۱۷	استحمام
۲	۶۱۹/۰۳	دستشویی و توالت
۳	۳۶۰/۳۲	مسواک زدن
۴	۳۳۳/۷۴	ظرف‌شویی
۵	۱۰۷/۹۵	ماشین لباس‌شویی
۶	۱۹/۳۳	شستن خودرو

همان گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، مصارف استحمام و دستشویی و توالت با اختلاف قابل توجه از سایر مصارف خانگی آب در بالاترین اولویت‌ها جهت اصلاح الگوی

ناصحیح کمی داشته است، اما به دلیل حجم نسبتاً بالای متوسط مصرف آب در نهایت در اولویت دوم قرار گرفت. گزینه ماشین لباسشویی نیز اگر چه که یکی از بیشترین نسبت‌های رفتارهای مصرفی ناصحیح را به خود اختصاص داده است، اما به دلیل کم بودن متوسط حجم مصرف آب در نهایت در اولویت پنجم قرار گرفت. گزینه ظرف‌شویی نیز با کسب اولویت چهارم بر اساس معیار متوسط حجم مصرف آب و کسب اولویت پنجم بر اساس نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح، در نهایت بر اساس معیار تلفیقی حجم مصرف و رفتار مصرفی در اولویت چهارم قرار گرفت.

لازم به تأکید است که معیار تلفیقی از این جهت که تأثیر هر دو عامل متوسط حجم مصرف آب و فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی نادرست را در نظر می‌گیرد از هر دو معیار مذکور کارایی بهتری داشته و اولویت‌بندی مصارف خانگی آب بر اساس این معیار جدید، خلأهای پژوهشی مطالعات پیشین را برطرف می‌نماید. اما اینکه در این مطالعه، نتایج رتبه‌بندی بر اساس معیار تلفیقی مشابه نتایج رتبه‌بندی بر اساس معیار متوسط حجم مصرف آب به دست آمده است، به دلیل ضعف کارایی معیار تلفیقی نیست. بلکه به دلیل تشابه مصارف خانگی با فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی نادرست و متوسط حجم مصرف زیاد بوده است. در حالی که ممکن است در سایر شهرها چنین تشابهی وجود نداشته باشد و در این صورت، تمرکز بر هر یک از دو معیار متوسط حجم مصرف آب یا فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی نادرست به جای معیار تلفیقی موجب عدم دیده شدن تأثیر معیار دیگر در اولویت‌بندی مصارف خانگی جهت اصلاح الگوی مصرف خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتارهای مصرفی در مصارف خانگی آب شامل استحمام، دستشویی و توالت، مسواک زدن، ظرف‌شویی، ماشین لباس‌شویی و شستن خودرو با استفاده از تحلیل عاملی تأییدی (CFA) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از این تحلیل، بیانگر عدم وجود متغیری پنهان به عنوان عامل اثرگذار بر صحیح و صرفه‌جویانه یا ناصحیح بودن رفتارهای مصرفی در مصارف خانگی بود؛ به عبارت دیگر، وجود رفتارهای مصرفی ناصحیح در یک یا چند مورد از مصارف

معیار در اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف، می‌توان نتیجه گرفت که نیاز به معیاری جامع‌تر جهت اولویت‌بندی مصارف خانگی آب وجود دارد. بدین منظور با تلفیق دو معیار متوسط حجم مصرف آب و نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح و ضرب نمودن آنها در یکدیگر، معیار جدید و جامع‌تری به نام «معیار تلفیقی حجم مصرف و رفتار مصرفی» جهت اولویت‌بندی مصارف خانگی آب طراحی گردید. بدین ترتیب، مصارف خانگی آب بر اساس معیار مذکور نیز مطابق جدول (۶) اولویت‌بندی گردیدند.

جدول ۶ اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف بر اساس معیار تلفیقی حجم مصرف و رفتار مصرفی

اولویت	متوسط حجم مصرف آب ماهانه (لیتر) × نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح	مصارف خانگی آب
۱	۱۶۵۵/۳۹	استحمام
۲	۲۴۱/۴۲	دستشویی و توالت
۳	۱۶۹/۳۵	مسواک زدن
۴	۱۱۶/۸۱	ظرف‌شویی
۵	۶۴/۷۷	ماشین لباس‌شویی
۶	۵/۰۳	شستن خودرو

مقایسه جدول (۶) با جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که اولویت‌بندی نهایی بر اساس معیار تلفیقی حجم مصرف و رفتار مصرفی، به اولویت‌بندی اولیه بر اساس معیار متوسط حجم مصرف ماهانه شباهت بیشتری دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اهمیت معیار متوسط حجم مصرف از معیار نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح بیشتر است. البته باید توجه داشت که معیار نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح نیز حائز اهمیت بوده و در نظر گرفتن آن ضرورت دارد.

مطابق جداول (۴) تا (۶)، مصارف استحمام، مسواک زدن و شستن خودرو در هر دو معیار متوسط حجم مصرف آب و نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح به ترتیب در اولویت‌های یکسان اول، سوم و ششم قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب، در اولویت‌بندی نهایی بر اساس معیار تلفیقی حجم مصرف و رفتار مصرفی نیز به همین اولویت‌ها اختصاص یافتند؛ اما مصارف دستشویی و توالت اگر چه که نسبت رفتارهای مصرفی

خانگی آب، به معنی ناصحیح بودن رفتار مصرفی فرد در سایر مصارف خانگی نمی‌باشد؛ بنابراین ضرورت دارد اقدامات آگاهی‌بخشی و آموزشی جهت اصلاح الگوی مصرف آب خانگی دربرگیرنده تمامی جامعه مشترکان آب خانگی باشد و تنها به گروه‌های پرمصرف محدود نگردد. همچنین در اولویت‌بندی مصارف خانگی آب جهت اصلاح الگوی مصرف، لازم است علاوه بر معیار متوسط حجم مصرف آب، به معیار فراوانی تکرار رفتارهای مصرفی ناصحیح و نسبت آن در جامعه آماری نیز توجه شود.

در ادامه پژوهش، به کمک محاسبه متوسط حجم مصرف آب ماهانه و نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح، مصارف خانگی آب بر اساس این دو معیار نیز اولویت‌بندی گردیدند که نتایج آنها حاکی از اختلاف اولویت برخی مصارف خانگی بود؛ بنابراین معیار جدیدی تحت عنوان «معیار تلفیقی حجم مصرف آب و رفتار مصرفی» تعریف و ارائه گردید تا با اولویت‌بندی مصارف خانگی بر اساس این معیار جدید، تأثیر هر دو معیار متوسط حجم مصرف آب و نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح در اولویت‌بندی مصارف خانگی آب در نظر گرفته شود.

مطابق نتایج به دست آمده از اولویت‌بندی مصارف خانگی بر اساس معیار تلفیقی مذکور، مصرف آب استحمام با کسب امتیاز ۱۶۵۵/۳۹ در بالاترین اولویت اصلاح الگوی مصرف قرار دارد؛ زیرا هم متوسط حجم مصرف آب بالایی داشته و هم نسبت رفتارهای مصرفی ناصحیح در آن قابل توجه می‌باشد.

مراجع

- [1] WHO/UNICEF, "Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines," *World Health Organization*, 2017. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/258617> [Accessed: May. 7, 2023].
- [2] D. K. Dash, "22 of India's 32 big cities face water crisis," *Indiatimes.com*, 2013. [Online]. Available: <https://timesofindia.indiatimes.com/india/22-of-indias-32-big-cities-face-water-crisis/articleshow/22426076.cms>, [Accessed 7 May, 2023].
- [3] D. T. Kofinas, A. Spyropoulou, and C. S. Laspidou, "A methodology for synthetic household water consumption data generation," *Environmental Modelling & Software*, vol. 100, pp. 48–66, 2018.
- [4] A. Ojeda de la Cruz, C. R. Alvarez-Chavez, M. A. Ramos-Corella, and F. Soto-Hernandez, "Determinants of domestic water consumption in Hermosillo, Sonora, Mexico," *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 1901–1910, 2017.

- [5] L. Kuski, E. Maia, P. Moura, N. Caetano, and C. Felgueiras, "Development of a decentralized monitoring system of domestic water consumption," *Energy Reports*, vol. 6, No. 1, pp. 856–861, 2020.
- [6] E. Li, J. Endter-Wada, and S. Li, "Characterizing and contextualizing the water challenges of megacities," *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 51, No. 3, pp. 589–613, 2015.
- [7] P. J. Moya-Fernandez, S. Lopez-Ruiz, J. Guardiola, and F. Gonzalez-Gomez, "Determinants of the acceptance of domestic use of recycled water by use type," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 575-586, 2021.
- [8] S. Dehghani, A. R. Massah Bavani, A. Roozbahani, A. Gohari, and R. Berndtsson, "Towards an integrated system modeling of water scarcity with projected changes in climate and socioeconomic conditions," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 33, pp. 543-556, 2022.
- [9] M. M. Mekonnen, and A. Y. Hoekstra, "Four billion people facing severe water scarcity," *Science Advances*, vol. 2, no. 2, e1500323, 2016.
- [10] United Nations, "2014 revision of World Urbanization Prospects, UN Department of Economic and Social Affairs," *Department of Economic and Social Affairs*, 2014. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html>, [Accessed May. 7, 2023].
- [11] United Nations, "World populations prospects: The 2017 Revision - key findings and advanced tables," *UN Department of Economic and Social Affairs*, 2017. [Online]. Available: <https://reliefweb.int/report/world/world-population-prospects-2017-revision-key-findings-and-advance-tables> [Accessed May. 7, 2023]
- [12] S. Lehmann, "Can rapid urbanization ever lead to low carbon cities? The case of Shanghai in comparison to Potsdamer Platz Berlin," *Sustainable Cities and Society*, vol. 3, pp. 1–12, 2012.
- [13] X. Q. Zhang, "The trends, promises, and challenges of urbanization in the world," *Habitat International*, vol. 54, no. 3, pp. 241–252, 2016.
- [14] K. Madani, "Water management in Iran: what is causing the looming crisis?," *Journal of Environmental Studies and Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 315–328, 2014.
- [15] P. Gleick, "Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century," *Science*, vol. 302, no. 5650, pp. 1524–1528, 2003.
- [16] B. Jorgensen, M. Graymore, and K. O'Toole, "Household water use behavior an integrated model," *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 1, pp. 227–236, 2009.
- [17] F. Arbues, M. Á. Garcia-Valinas, and R. Martinez-Espineira, "Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review," *Journal of Socio-Economics*, vol. 32, pp. 82–102, 2003.
- [18] L. Fan, L. Gai, Y. Tong, and R. Li, "Urban water consumption and its influencing factors in China: Evidence from 286 cities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 124–133, 2017.
- [19] A. Maleki-nasab, A. Abrishamchi, and M. Tajrishi, "Assessment of residential water conservation due to using low-flow fixtures," *Water and Wastewater*, vol. 18, no. 2, pp. 2–11, 2007. (In Persian)
- [20] M. J. Barnett, D. Jackson-Smith, J. Endter-Wada, and M. Haeffner, "A multilevel analysis of the drivers of household water consumption in a semi-arid region," *Science of the Total Environment*, vol. 712, p. 136489, 2020.

- [21] Y. Liang, L. K. Henderson, and K. F. Kee, "Running out of water! Developing a message typology and evaluating message effects on attitude toward water conservation," *Environmental Communication*, vol. 12, no. 4, pp. 541–557, 2018.
- [22] M. Suarez-Varela, "Modeling residential water demand: An approach based on household demand systems," *Journal of Environmental Management*, vol. 261, p. 109921, 2020.
- [23] G. D. Gregory, and M. D. Leo, "Repeated behavior and environmental psychology: the role of personal involvement and habit formation in explaining water consumption," *Journal of Applied Social Psychology*, vol. 33, no. 6, pp. 1261–1296, 2003.
- [24] F. Maleki, H. Eftekhari, and S. Gholamrezaei, "Investigation the strategies for institutionalization of optimum and sustainable water consumption culture," Second National Conference on Water Crisis, 2014.
- [25] F. V. Zohouri, A. J. Rugg-Gunn, E. S. Fletcher, A. F. Hackett, P. J. Moynihan, and J. C. Mathers, "Changes in water intake of Northumbrian adolescents 1980 to 2000," *British Dental Journal*, vol. 196, pp. 547–552, 2004.
- [26] S. Russel, and K. Fielding, "Water demand management research: a psychological perspective," *Water Resources Research*, vol. 46, no. 5, pp. 1–12, 2010.
- [27] J. Novak, M. Melenhorst, I. Micheel, C. Pasini, P. Fraternali and A. E. Rizzoli, "Behaviour change and incentive modelling for water saving: First results from the SmartH2O project," In at International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS)-8th International Congress on Environmental Modelling and Software, Toulouse, France, 2016.
- [28] K. Perren, and L. Yang, "Psychosocial and behavioural factors associated with intention to save water around the home: a Greek case study," *Procedia Engineering*, Vol. 119, pp. 1447–1454, 2015.
- [29] Y. Shan, L. Yang, K. Perren, and Y. Zhang, "Household water consumption: Insight from a survey in Greece and Poland," *Procedia Engineering*, vol. 119, pp. 1409–1418, 2015.
- [30] A. Cominola, M. Giuliani, D. Piga, A. Castelletti, and A. E. Rizzoli, "Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review," *Environmental Modelling & Software*, vol. 72, pp. 198–214, 2015.
- [31] B. Guragai, T. Hashimoto, K. Oguma, and S. Takizawa, "Data logger-based measurement of household water consumption and micro-component analysis of an intermittent water supply system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 197, no. 1, pp. 1159–1168, 2018.
- [32] C. Felgueiras, L. Kuski, P. Moura, and N. Caetano, "Water consumption monitoring system for public bathing facilities," *Energy Procedia*, vol. 153, pp. 408–413, 2018.
- [33] A. R. Keshavarzi, M. Sharifzadeh, A. A. Kamgar Haghighi, S. Amin, Sh. Keshtkar, and A. Bamdad, "Rural domestic water consumption behavior: A case study in Ramjerd area, Fars province, I.R. Iran," *Water Research*, vol. 40, no. 6, pp. 1173–1178, 2006.
- [34] J. Straus, H. Chang, and C. Hong, "An exploratory path analysis of attitudes, behaviors and summer water consumption in the Portland Metropolitan Area," *Sustainable Cities & Society*, vol. 23, pp. 68–77, 2016.

- [35] I. B. Addo, M. C. Thoms, and M. Parsons, "The influence of water-conservation messages on reducing household water use," *Applied Water Science*, vol. 9, no. 126, 2019.
- [36] S. A. Shahangian, M. Tabesh, and M. Yazdanpanah, "Psychosocial determinants of household adoption of water-efficiency behaviors in Tehran capital, Iran: Application of the social cognitive theory," *Urban Climate*, vol. 39, p. 100935, 2021.
- [37] S. A. Shahangian, M. Tabesh, M. Yazdanpanah, T. Zobeidi, and M. A. Raoof, "Promoting the adoption of residential water conservation behaviors as a preventive policy to sustainable urban water management," *Journal of Environmental Management*, vol. 313, p. 115005, 2022.
- [38] M. Yang, H. Chen, R. Long, and J. Yang, "The impact of different regulation policies on promoting green consumption behavior based on social network modeling," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 32, pp. 468–478, 2022.
- [39] G. M. Bethke, A. R. Cohen, and A. S. Stillwell, "Emerging investigator series: disaggregating residential sector high-resolution smart water meter data into appliance end-uses with unsupervised machine learning," *Environmental Science: Water Research & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 487–503, 2021.
- [40] R. Q. Grafton, M. B. Ward, H. To, and T. Kompas, "Determinants of residential water consumption: Evidence and analysis from a 10-country household survey," *Water Resources Research*, vol. 47, no. 8, 2011.
- [41] P. Okutan, and A. Akkoyunlu, "Identification of water use behavior and calculation of water footprint: a case study," *Applied Water Science*, vol. 11, no. 127, 2021.
- [42] E. A. Wolters, "Attitude-behavior consistency in household water consumption," *The Social Science Journal*, vol. 51, no. 3, pp. 455–463, 2014.
- [43] Z. Zabihi-Ghelichi, J. Tajik and M. S. Pishvaei, "Novel robust optimization approach for an integrated municipal water distribution system design under uncertainty: A case study of Mashhad," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 110, pp. 13–34, 2018.
- [44] S. Maleki, M. Akhavan, and M. Nafti, "Reconciling a city with its natural identify (the role of water systems in Mashhad city sustainable planning)," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 34, pp. 559–572, 2016.
- [45] M. Atashi, K. Davari, and M. B. Sharifi, "Simulation of the integrated appropriation of surface water and underground drinking water in Mashhad," *Water and Wastewater*, vol. 26, no. 5, pp. 23–34, 2016. (In Persian)
- [46] F. Abbaspoor, M. Jalili-Ghazizadeh, and J. Attari, "Impacts of targeted subsidy act on urban water consumption in city of Mashhad," *Water and Wastewater*, vol. 28, no. 1, pp. 65–73, 2017. (In Persian)
- [47] T. A. Brown, *Confirmatory Factor Analysis for Applied Research*. New York: Guilford Press, 2006.
- [48] M. Kadkhodaei, "Analysis and evaluation of the optimal pattern of urban water consumption in touristic metropolises using regression method and multi-criteria decision-making methods (MCDM)_Case study: Mashhad city," M. S. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 2019.
- [49] R. B. Kline, *Principles and practice of structural equation modeling* (third ed.). New York: Guilford Press, 2010.
- [50] R. Shah, and S. M. Goldstein, "Use of structural equation modeling in operations management research: Looking back and forward," *Journal of Operations Management*, vol. 24, no. 2, pp. 148–169, 2006.



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

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



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Investigating the Capability of the Smartphones Time-Of-Flight Sensor to Data-Capturing Interior Spaces of Building

Research Article

Mohammad Amooshahi¹, Asghar Milan² , Saeid Sadeghian³, Alireza Gharagozlou⁴

DOI: [10.22067/jfcej.2024.88986.1315](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.88986.1315)

1- Introduction

In recent years, Building Information Modeling (BIM) has seen rapid adoption in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industries, driving demand for precise as-built models. The conventional methods for capturing 3D spatial data, such as terrestrial laser scanners and photogrammetry, are effective but come with challenges like high costs and the need for specialized equipment and operators. The advent of LiDAR technology integrated into smartphones, particularly since the release of the iPhone 12 Pro in 2020, has sparked interest in exploring the potential of these devices for surveying applications.

This study examines the effectiveness of the iPhone 12 Pro's LiDAR sensor in capturing 3D spatial data of indoor environments, specifically comparing its accuracy in two scanning conditions: with and without the use of a gimbal stabilizer. The results were benchmarked against more established methods, including photogrammetry and total station measurements, which serve as high-precision baselines for comparison. This research addresses a critical question: Can smartphone-based LiDAR sensors provide reliable data for indoor mapping with sufficient accuracy to replace or complement traditional methods?

2-Methodology

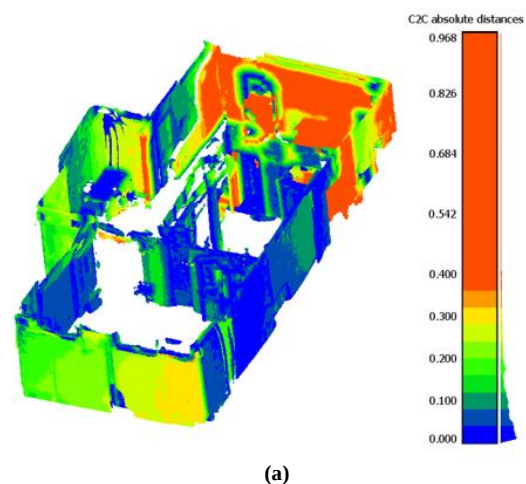
To evaluate the performance of the iPhone's LiDAR sensor, the study utilized a systematic data collection process in a controlled indoor environment. Initially, control points were established using a total station to ensure a reliable reference framework for accuracy assessment. The room was scanned using the iPhone in both gimbal-assisted and unassisted modes. Photogrammetric data was collected using a series of high-resolution images processed with structure-from-motion techniques to create detailed point clouds. The data from

each method were aligned using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm to minimize alignment errors.

The accuracy of the smartphone LiDAR scans was assessed using cloud-to-cloud (C2C) distance analysis and Root Mean Square Error (RMSE) calculations. This included evaluating the geometric consistency and spatial accuracy of the generated 3D models by comparing them against the total station and photogrammetric point clouds.

3-Findings

The results indicate that using a gimbal significantly improves the accuracy of the iPhone LiDAR scans. In the C2C analysis, scans without a gimbal exhibited errors exceeding 35 cm, while with a gimbal, these errors were reduced to below 10 cm in most cases. However, some residual errors between 10-20 cm persisted in certain areas.



(a)

*Manuscript received July 20, 2024, Revised September 22, 2024, Accepted December 18, 2024.

¹ M.Sc. Student of Land Administration Systems, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_milan@sbu.ac.ir

^{3,4} Associate Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

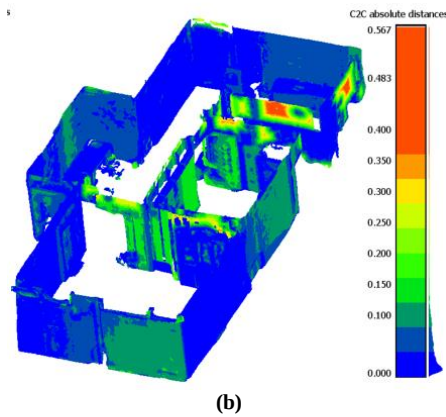


Figure 1, Scanning four rooms with iPhone, without gimbal(a), and with gimbal(b)

The RMSE for smartphone-derived data was between 15-20 cm, compared to 1.5 cm for photogrammetry and 2 mm for total station measurements. This suggests that while smartphone-based LiDAR can be useful for medium-accuracy indoor mapping, it is not suitable for high-precision engineering tasks.

Table 1, Control points and checkpoints error

method	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE (m)
Photogrammetry	0.008	0.011	0.014
iPhone + Gimbal 1	0.113	0.168	0.203
iPhone + Gimbal 2	0.084	0.148	0.171
iPhone + Gimbal 3	0.050	0.145	0.153

The study also found that the iPhone's LiDAR sensor, when stabilized with a gimbal, provided much cleaner point clouds with reduced noise and overlapping scan errors (figure 2,3). Without stabilization, the scans were prone to inaccuracies caused by hand movements, which led to significant deviations in the resulting 3D point clouds.

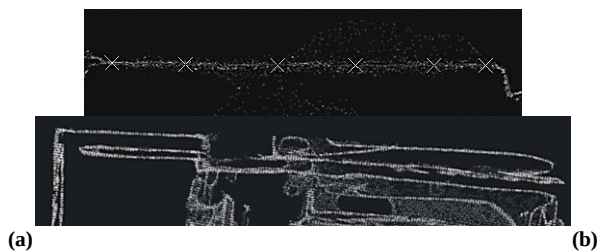


Figure 2, Vertical view of the point cloud obtained from the iPhone scanner with (a) and without gimbal (b)

The use of a gimbal in smartphone-based LiDAR scanning improves data accuracy and noise reduction, enabling effective vectorization of captured point clouds. This enhances data quality, enabling the creation of BIM directly from smartphone-derived scans, making smartphone LiDAR a cost-effective tool for medium-accuracy indoor mapping projects.



Figure 3, Preparing a valid and realistic building information model using a 2D map and 3D point cloud information

4-Discussion

The research highlights both the potential and limitations of smartphone-based LiDAR technology. Although the iPhone's sensor is not yet capable of matching the precision of traditional surveying tools, it offers a cost-effective and accessible alternative for less demanding applications. The improvements observed with the use of a gimbal point to a practical solution for increasing the accuracy of smartphone scans. This could be particularly beneficial in scenarios where quick and on-the-go data acquisition is required, such as initial site inspections, interior renovations, or real estate assessments.

Despite its advantages in terms of portability and affordability, smartphone LiDAR sensors face challenges in larger or more complex indoor spaces where high precision is critical. The current limitations include a maximum effective range of approximately 5 meters, sensitivity to environmental lighting conditions, and noise accumulation over longer distances.

5-Conclusion

The findings of this study confirm that while smartphone LiDAR sensors have potential applications in indoor surveying, they currently fall short of the precision required for detailed engineering projects. However, their ease of use, accessibility, and relatively low cost make them a promising tool for less demanding spatial data collection tasks. With further advancements in sensor technology and stabilization techniques, the accuracy and reliability of these devices could improve, paving the way for broader adoption in the AEC industry.

Future research could explore integrating smartphone-based LiDAR data with other sources, such as drone-based photogrammetry or traditional ground-based surveys, to enhance the overall accuracy of 3D models. Additionally, investigating the use of advanced algorithms to correct the inherent limitations of smartphone sensors could further expand their usability in professional contexts.



بررسی قابلیت سنسور مدت پرواز گوشی‌های هوشمند در داده‌برداری فضای داخلی ساختمان*

مقاله پژوهشی

محمد عموشاهی^(۱) اصغر میلان^(۲) سعید صادقیان^(۳) علیرضا قراگوزلو^(۴)

DOI: 10.22067/jfpei.2024.88986.1315

چکیده با توجه به افزایش چشمگیر در استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و نقش برجسته آن در صنایع معماری، مهندسی و ساخت و ساز (AEC)، دستیابی به یک مدل وضعیت موجود دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در عین حال، ابزارهای کنونی برای تهیه داده‌های سه‌بعدی و بازسازی وضعیت موجود ساختمان‌ها با چالش‌هایی نظیر محدودیت در دقت و هزینه‌های بالا مواجه هستند. از زمان معرفی سنسور لیدار در گوشی‌های آیفون در سال ۲۰۲۰، تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی قابلیت این سنسور در حوزه‌های مختلف به‌ویژه نقشه‌برداری صورت گرفته است. این پژوهش به مقایسه داده‌های اسکن سه‌بعدی آیفون در دو حالت با و بدون استفاده از گیمبال با داده‌های حاصل از فتوگرامتری و توتال استیشن می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گیمبال باعث رفع خطای اسکن چندگانه و افزایش دقت هندسی می‌شود. در تحلیل ابر به ابر (C2C) بدون گیمبال، خطاهای بیش از ۳۵ سانتی‌متر مشاهده شد، در حالی که با استفاده از گیمبال، این خطاها به حداقل رسیده و اکثر اختلافات زیر ۰٫۱۰ سانتی‌متر بودند. با وجود برخی از قسمت‌ها خطا ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر باقی ماند. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برای داده‌های برداری تلفن هوشمند بین ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بوده است. در مقایسه، RMSE توتال استیشن و فتوگرامتری به ترتیب ۲ میلی‌متر و ۱٫۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است؛ بنابراین داده‌های تلفن‌های هوشمند برای نقشه‌برداری داخلی با دقت متوسط مناسب هستند، اما برای پروژه‌های مهندسی دقیق قابل اعتماد نیستند.

واژه‌های کلیدی گوشی هوشمند، اسکنر سه‌بعدی، فتوگرامتری، مدل اطلاعات ساختمان، کاداستر سه‌بعدی.

Investigating the Capability of the Smartphones Time-Of-Flight Sensor to Data-Capturing Interior Spaces of Building

Mohammad Amooshahi

Asghar Milan

Saeid Sadeghian

Alireza Gharagozlou

Abstract Considering the significant increase in the use of Building Information Modeling (BIM) and its prominent role in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industries, achieving an accurate as-built model is critical. However, current tools for acquiring 3D data and reconstructing as-built building conditions face challenges such as limitations in accuracy and high costs. Since introducing the LiDAR sensor in iPhones in 2020, extensive research has been conducted to evaluate the capabilities of this sensor across various fields, especially in surveying. This study compares 3D scan data from the iPhone in two modes— with and without using a gimbal with data obtained from photogrammetry and a total station. The results show that using a gimbal eliminates the errors from multiple scans and enhances geometric accuracy. In the cloud-to-cloud (C2C) analysis without a gimbal, errors exceeding 35 cm were observed, while with the gimbal, these errors were minimised, with most discrepancies being below 0.10 cm. Although some errors ranged from 10 to 20 cm, the root mean square error (RMSE) for smartphone-derived vector data ranged between 15 to 20 cm. In comparison, the RMSE for the total station and photogrammetry was measured at 2 mm and 1.5 cm, respectively. While the accuracy of this data is lower, it is suitable for medium-accuracy indoor building surveys, though it is less reliable for engineering projects requiring very high precision.

Key words Smartphone, 3D scanner, photogrammetry, building information model, 3D cadastre.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۹/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

Email: a_milan@sbu.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول: استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۳) دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۴) دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

مقدمه

در دهه اخیر، داده‌های مکانی سه‌بعدی با کیفیت بالا به‌عنوان ابزاری کلیدی برای توسعه و مدیریت زیرساخت‌های شهری، برنامه‌ریزی زمین، و سیستم‌های کاداستر سه‌بعدی به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. این داده‌ها به دلیل قابلیت ارائه مدل‌های دقیق از محیط‌های شهری، بهینه‌سازی فرایندهای تصمیم‌گیری، و ارتقای کارایی پروژه‌های زیرساختی، نقش حیاتی در حوزه‌های مختلف ایفا می‌کنند. تهیه این داده‌ها از طریق طیف گسترده‌ای از ابزارها و تکنیک‌ها امکان‌پذیر است که بسته به نوع پروژه، سطح دقت مورد نیاز و بودجه قابل دسترس، انتخاب می‌شوند. روش‌های سنتی مانند اندازه‌گیری با متر نواری یا متر لیزری برای پروژه‌های کوچک و نیازمند به‌دقت پایین مناسب هستند، اما با افزایش پیچیدگی و مقیاس پروژه‌ها، تکنیک‌های پیشرفته‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزارهایی همچون توتال استیشن‌ها، اسکنرهای لیزری زمینی و فوتوگرامتری از روش‌های پیشرفته‌ای هستند که امکان تهیه داده‌های سه‌بعدی با دقت بالا را فراهم می‌کنند. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند؛ به عنوان مثال، اسکنرهای لیزری توانایی جمع‌آوری حجم زیادی از داده‌ها را در زمان کوتاه دارند، اما هزینه بالای آنها و پیچیدگی در پردازش داده‌ها ممکن است استفاده از آنها را در برخی پروژه‌ها محدود کند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های

تکنولوژیکی در تلفن‌های هوشمند و تجهیز آنها به سنسورهای Time-of-Flight (ToF)، امکان اسکن سه‌بعدی دقیق را فراهم آورده است. این فناوری نوین قابلیت استفاده گسترده در زمینه‌های مختلف، از جمله مستندسازی ساختمان‌ها، مدیریت دارایی‌های شهری، و حتی کاداستر را دارد. با توجه به هزینه پایین‌تر، قابلیت حمل و دسترسی عمومی این دستگاه‌ها، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک، تلفن‌های هوشمند به عنوان جایگزینی برای ابزارهای سنتی در بسیاری از کاربردهای سه‌بعدی مورد استفاده قرار گیرند. جدول (۱) مقایسه‌ای از مزایا و معایب استفاده از سنسورهای اسکن سه‌بعدی تلفن‌های هوشمند در مقابل تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای مانند اسکنرهای لیزری و سیستم‌های فوتوگرامتری ارائه می‌دهد. این مقایسه شامل معیارهایی همچون دقت اندازه‌گیری، هزینه، قابلیت حمل، و زمان مورد نیاز برای جمع‌آوری داده‌ها است که می‌تواند در انتخاب روش مناسب برای پروژه‌های مختلف راهگشا باشد. این روند نشان می‌دهد که استفاده از تکنولوژی‌های مبتنی بر تلفن هوشمند در حال تبدیل شدن به رویکردی اقتصادی و کارآمد برای دستیابی به داده‌های سه‌بعدی است و می‌تواند آینده جمع‌آوری داده‌ها در حوزه‌های مختلف از جمله نقشه‌برداری و مدیریت شهری را دگرگون کند.

جدول ۱ مقایسه سه روش تهیه داده‌های سه‌بعدی

ابزار	مزایا	معایب
سنسور اسکن سه‌بعدی گوشی هوشمند	اخذ و پردازش داده‌ها با سرعت بالا قیمت مناسب نمایش بلادرنگ حین برداشت مقیاس ۱:۱	محدودیت در دقت وجود نویز و اعوجاجات فراوان برد محدود پنج‌متر افزایش خطا در محیط‌های بزرگ‌تر
اسکنر لیزری زمینی	دقت مناسب حفظ دقت در فواصل طولانی‌تر	قیمت بالا دشواری در جابه‌جایی ایستگاه‌ها
فوتوگرامتری	دقت مناسب قیمت پایین	نیاز به نقاط کنترل زمان بالای اخذ داده و پردازش نیاز به اپراتور متخصص نور محیط و حرکت اجسام می‌تواند مشکل ساز باشد

کاداستر و جنبه‌های قانونی آن در آینده‌ای نه چندان دور دگرگون خواهند شد [1]. استفاده از گوشی هوشمند برای نقشه‌برداری، کارها را آسان‌تر و کارآمدتر کرده است [2]؛ بنابراین با گسترش مفهوم «نقشه‌برداری دیجیتال [3]»، اکنون می‌توان کار میدانی به کمک تلفن هوشمند را به عنوان جایگزینی برای رویکردهای کلاسیک جمع‌آوری داده ارزیابی نمود [4].

تلفن‌های هوشمند به دلیل وجود حسگرهای مختلف از جمله دستگاه سنچس لختی (IMU)، حسگرهای مجاورت، بارومتر و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، قابلیت‌های بالایی در تعیین موقعیت از خود نشان داده‌اند. با این وجود محدودیت‌های آنها باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و مستندسازی شود همچنین باید دقت نمود تا با انتخاب مناسب الگوریتم کاری برای استفاده از قابلیت گوشی‌های هوشمند در کاربردهای نقشه‌برداری دقت‌های مورد نیاز حاصل گردد [1]. پیشرفت حسگرها، افزایش توان محاسباتی و حافظه داخلی در گوشی‌های هوشمند و تبلت‌ها، آنها را به پلتفرم‌های رقومی اساسی برای کارهای مختلف میدانی تبدیل کرده است [4]. با ورود سنسورهای لیدار در سال ۲۰۲۰، قابلیت گوشی‌های هوشمند برای اندازه‌گیری‌های میدانی علوم زمین، نقشه‌برداری، مدل‌سازی اطلاعات ساخت و دیگر کاربردها، دچار تغییر و تحول اساسی گردید.

با ورود سیستم لیدار استفاده از گوشی‌های هوشمند در کاربردهای نقشه‌برداری و عمرانی توسعه یافت [4]. ادغام ویژگی‌های اسکن در دستگاه‌های تلفن همراه، دنیای جدیدی از امکانات را برای نقشه‌برداری سه‌بعدی فراهم کرد. در این سیستم‌ها جمع‌آوری داده‌ها بسیار سریع‌تر از دستگاه اسکن لیزری زمینی (TLS) انجام می‌شود که این امر علاوه بر صرفه‌جویی در زمان ثبت داده‌ها، امکان نمایش بلادرنگ ابر نقطه یا مش به دست آمده در حین جمع‌آوری داده را برای کاربر فراهم نموده است [5-6]. در چند دهه اخیر، فناوری اسکن کاهش قابل توجهی در قیمت و تنوع دستگاه‌ها داشته است. از اسکنرهای لیزری گران قیمت که روی سه‌پایه‌ها نصب می‌شوند، تا سیستم‌های کوله‌پشتی، دستگاه‌های دستی سیار و در نهایت ادغام در تلفن‌های هوشمند. با این وجود هنوز کیفیت

تلفن‌های هوشمند به دلیل در دسترس بودن برای عموم مردم و قابلیت استفاده گسترده توسط شهروندان، می‌توانند به عنوان بستری مناسب برای جمع‌آوری داده‌های سه‌بعدی مردم گستر عمل کنند. این رویکرد، نه تنها به جمع‌آوری داده‌های مکانی دقیق و به روز کمک می‌کند، بلکه امکان مشارکت فعال شهروندان در پروژه‌های مرتبط با مدیریت شهری، برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها، و پایش تغییرات محیطی را نیز فراهم می‌سازد. تلفن‌های همراه در ابتدا صرفاً به عنوان ابزاری برای برقراری ارتباطات صوتی و ارسال پیامک طراحی شده بودند، اما با گذشت زمان و پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری، امکانات جدیدی به آنها افزوده شد. از جمله این امکانات اولیه می‌توان به بازی‌های ساده، ماشین حساب، و چراغ قوه اشاره کرد. با این حال، تحولات تکنولوژیکی در دهه‌های اخیر، تلفن‌های همراه را به دستگاه‌هایی بسیار فراتر از ابزارهای ارتباطی تبدیل کرده است. امروزه، گوشی‌های هوشمند به یکی از ابزارهای کلیدی زندگی روزمره بدل شده‌اند و بسیاری از نیازهای کاربران را به طور یکپارچه برطرف می‌کنند. به عنوان مثال، کاربران می‌توانند از تلفن‌های هوشمند برای انجام امور بانکی، پرداخت قبوض، درخواست تاکسی، سفارش غذا، مسیریابی، تعیین موقعیت جغرافیایی دقیق، و حتی تهیه عکس‌های حرفه‌ای استفاده کنند. این قابلیت‌ها نشان دهنده تحولی بزرگ در نقش تلفن‌های هوشمند از یک ابزار ارتباطی به یک دستگاه چند منظوره است که تقریباً تمامی جنبه‌های زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده است.

با پیشرفت‌های اخیر در فناوری و تجهیز تلفن‌های هوشمند به سنسورهای نظیر ToF و دوربین‌های پیشرفته، این دستگاه‌ها اکنون قادرند داده‌های سه‌بعدی با کیفیت بالا و دقیق از محیط اطراف خود تولید کنند. این قابلیت، پتانسیل زیادی برای کاربردهای گسترده‌تر در آینده دارد. به این ترتیب، تلفن‌های هوشمند می‌توانند در آینده به ابزارهای اصلی تولید داده‌های مکانی با دقت بالا تبدیل شوند و روش‌های سنتی نقشه‌برداری و مستندسازی محیط‌های شهری را به طور مؤثری جایگزین کنند. از سوی دیگر، با توجه به افزایش تقاضا برای اطلاعات به‌روز و آنی در مورد زمین و املاک، برنامه‌های نقشه‌برداری متنوعی در گوشی‌های هوشمند توسعه یافته‌اند. به نظر می‌رسد با ادامه روند پیشرفت تکنولوژی، روش‌های سنتی نقشه‌برداری

[1]. تا به امروز تحقیقات متعددی درباره قابلیت گوشی‌های هوشمند در تعیین مرز قطعات زمین انجام شده است که به موارد زیر می‌توان اشاره نمود.

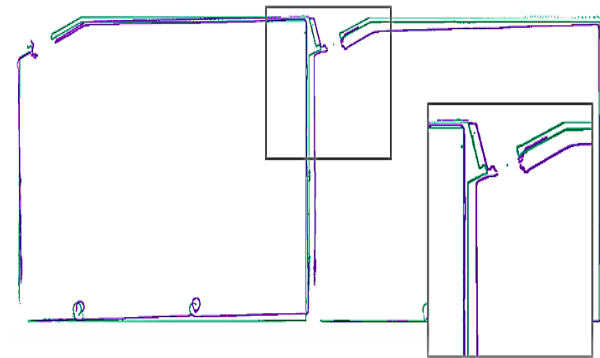
Oluwadare و Salami به بررسی دو دستگاه مختلف برای تعیین مرزهای قطعات زمین پرداختند. در این پژوهش یکبار سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای جهانی (GNSS) تخصصی و بار دیگر گوشی هوشمند مورد ارزیابی قرار گرفت اگر چه نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد گیرنده GNSS دقت بهتری نسبت به گوشی هوشمند ارائه می‌کند. با این حال، قیمت گیرنده GNSS بسیار بالاتر از گوشی هوشمند است و بر اساس نتایج حاصل در بسیاری از موارد استفاده از گوشی هوشمند به جای گیرنده GNSS می‌تواند گزینه مناسبی باشد [1]. در پژوهش دیگر Zangenehjad و Gao پیشرفت‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های آینده مرتبط با موقعیت‌یابی تلفن‌های هوشمند را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج حاصل، استفاده از تلفن‌های هوشمند برای بسیاری از کاربردها مانند نقشه‌برداری کاداستر و ناوبری به دلیل مقرون به صرفه بودن آن در حال افزایش است [24]. محمد عموشاهی و همکاران نیز برای بازسازی معماری داخلی ساختمان‌ها از گوشی‌های هوشمند استفاده نمودند که نتایج حاصل از این تحقیق رضایت‌بخش بوده و دقت دو سانتی‌متر در استفاده از گوشی‌های هوشمند را گزارش کردند [25].

با معرفی حسگر جدید لیدار در iPhone 12 pro و افزایش قابلیت این سیستم، مطالعات متعددی در مورد توانایی و دقت آن انجام شده است [26]. در چندین پژوهش داده‌های اسکنر iPhone در مقایسه با اسکنرهای تخصصی و دقیق نقشه‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [9, 27-28]. در برخی از پژوهش‌ها نیز این داده‌ها با ابرنقاط فتوگرامتری مقایسه شده‌اند [9, 30-31]. همچنین Heinrichs و Yang برای این منظور از اندازه‌گیری‌های دستی با متر به عنوان مبنا استفاده نمودند [32]. لازم به ذکر است که در پژوهش‌های انجام شده تأکید شده است که سنسورهای فعلی در گوشی‌های هوشمند تنها برای فضاهای کوچک و محدود مناسب هستند، مانند پژوهش Díaz و همکاران، مطابق گزارش آنها و با توجه به شکل (۱) ابعاد و زوایای دیوارها در اتاق اول به خوبی حفظ شده است. با این حال، کیفیت داده‌ها در اتاق دوم تحت تأثیر خطاهای بازسازی

داده‌ها به وضوح کمتر از داده‌های اخذ شده توسط حسگرهای تخصصی لیدار می‌باشد [7].

مکانیزم اندازه‌گیری فاصله در سیستم‌های لیدار می‌تواند متفاوت باشد. حالت اول که سیستم‌های مدت پرواز (ToF) نام دارد فاصله را با ثبت زمان انتقال نور بین حسگر لیزری و اشیاء اندازه‌گیری می‌کند، و مورد دوم از اختلاف فاز بین سیگنال‌های منتشر شده و سیگنال‌های بازگشتی برای تعیین فاصله اندازه‌گیری بهره می‌گیرد. البته این مورد را باید در نظر داشت که سیستم‌های مدت پرواز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند؛ اما دقت کمتری نسبت به سیستم اختلاف فاز دارند [8]. اگر چه نوع سنسور iPhone تا کنون به عنوان یک راز تجاری باقی مانده است، اما برخی مطالعات آن را به عنوان یک لیدار مدت پرواز تعریف می‌کنند [7-9]. دستگاه‌های ToF سنسورهای فعالی هستند که می‌توانند در فواصل محدود، عمق و تصویر دو بعدی را با نرخ فریم بالا ارائه کنند. این قرائت‌ها ممکن است نویز و خطاهای زیادی داشته باشند. همچنین در مقایسه با اسکنرهای لیزری، دوربین‌های ToF تصویری با عمق دوبعدی با وضوح پایین‌تر با نرخ فریم بالاتر و با هزینه‌های رقابتی بسیار پایین‌تر ارائه می‌دهند [10]. دوربین‌های ToF با موفقیت در کاربردهای مختلفی همچون نقشه‌برداری و مکان‌یابی هم‌زمان (SLAM) [11-12]، بازسازی سه‌بعدی صحنه‌های ثابت [13-14] استفاده می‌شوند. البته برای استفاده از این دوربین‌ها در بعضی موارد نیاز به اصلاح سیگنال و کاهش نویز آنها وجود دارد. با توجه به توضیحات فوق و قابلیت‌های بالای این سنسور در کنار کاهش چشمگیر هزینه‌ها، دوربین‌های ToF که در دستگاه‌های iOS به عنوان اسکنر لیدار معروف است [15]، به زودی به یک کالای تجاری متداول تبدیل خواهد شد [10]. با مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه مشخص است که بسیاری از مقالات اخیر بر کاربرد دستگاه‌های تلفن همراه در تحقیقات مرتبط با علوم زمین تأکید کرده‌اند [16-21]. همچنین پلتفرم‌های موبایل در حال تبدیل شدن به بخشی ضروری از کار میدانی مرسوم علوم زمین (مانند نقشه‌برداری) هستند [21-23]. بنابراین روش‌هایی که در گذشته برای تعیین مرز قطعات به کار می‌رفتند، دیگر نمی‌توانند نیازهای امروزی که تصمیم‌ها باید به صورت آنی و با بالاترین دقت اتخاذ شوند، برآورده کنند. از این رو عصر، عصر گوشی‌های هوشمند است

قرار گرفته است [7].



شکل ۱ ابرنقاط iPad (بنفش) و ابرنقاط TLS (سبز) [7]

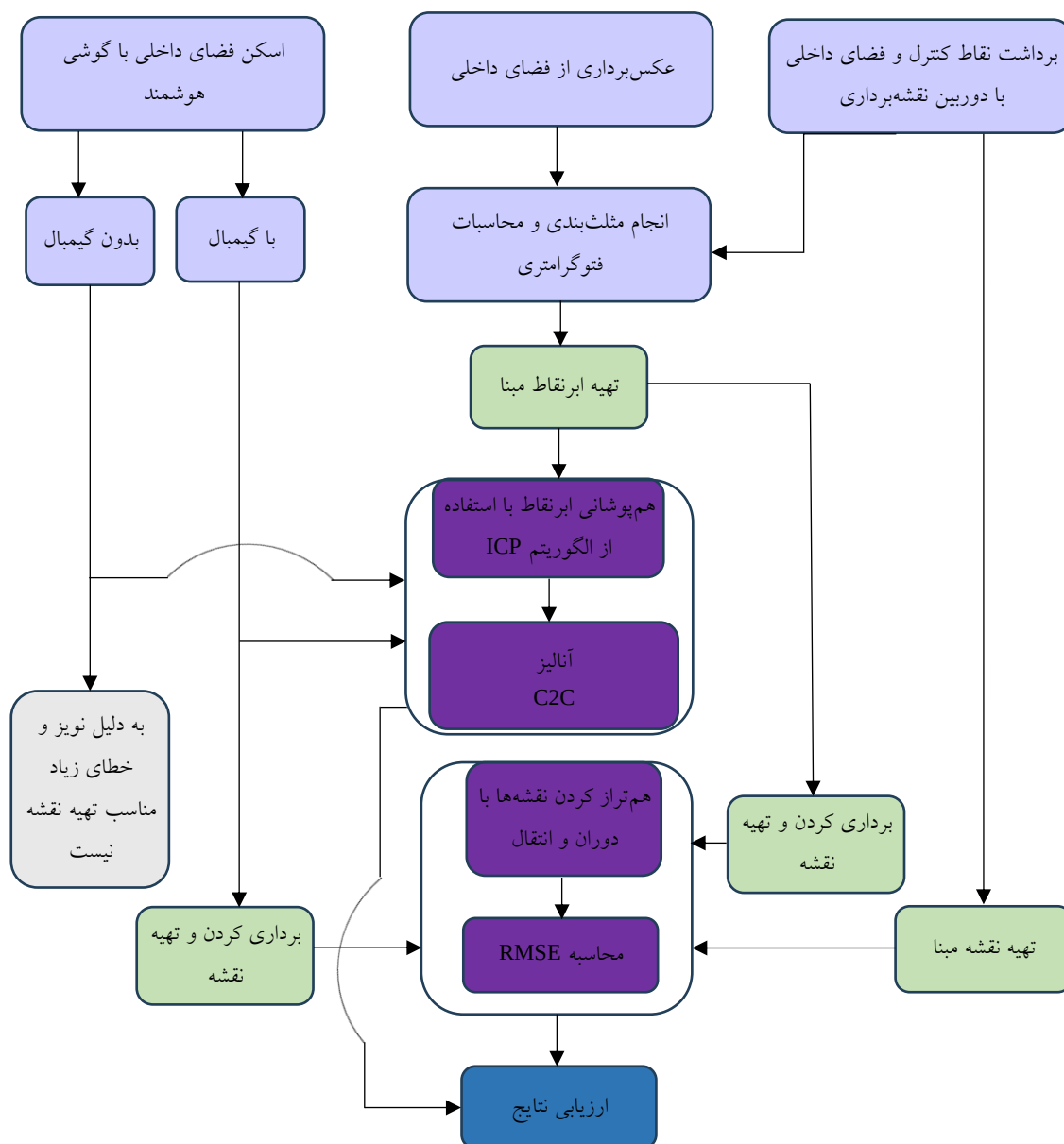
بهبود قابلیت اسکن سه‌بعدی با استفاده از این ابزارها پرداخته‌اند. با توجه به این چالش‌ها، ضروری است که این ابزارها در راستای کاربردهای تخصصی نقشه‌برداری، بر اساس معیارهای استاندارد نقشه‌برداری مورد ارزیابی دقیق قرار گیرند. در این راستا، پژوهش حاضر به منظور ارزیابی عملکرد سنسور ToF در مدل iPhone 12 Pro، تمرکز خود را بر تهیه مدل سه‌بعدی از فضای داخلی ساختمان قرار داده است. در این مطالعه، دقت ابرنقاط حاصل از اسکنر سه‌بعدی iPhone با ابرنقاط به دست آمده از روش فتوگرامتری در چهار اتاق مختلف مقایسه شد. نتایج این بررسی‌ها، همچنین تأثیر استفاده از گیمبال در فرایند اسکن را نیز مورد تحلیل قرار داده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که استفاده از گیمبال تأثیر قابل توجهی بر دقت و کیفیت اسکن انجام شده با iPhone دارد که این امر می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای دقت مدل‌های سه‌بعدی تولید شده را بهبود بخشد.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر به منظور بازسازی مدل اطلاعات ساختمان طبق چارچوب شکل (۲) عمل شده است. در این پژوهش در گام اول به وسیله دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن، نقاط کنترل داخلی طراحی شده همچنین کلیه فضاهای داخلی برداشت و بر اساس آن نقشه مبنای داخلی ساختمان تهیه گردید. سپس بر اساس طراحی صورت گرفته از فضاهای داخلی عکس‌برداری شد و بر اساس عکس‌های حاصل و با استفاده از نقاط کنترل برداشت شده با دوربین توتال استیشن اقدام به انجام مثلث‌بندی و تولید ابرنقاط دقیق و قابل اعتماد با دقتی در حد میلی‌متر با استفاده از روش فتوگرامتری گردید. سپس محیط داخلی خانه در ۶ مرحله با گوشی هوشمند مجهز به سیستم مدت پرواز اسکن شد. سه مرحله بدون گیمبال و سه بار با گیمبال. در نهایت نقشه برداری با استفاده از ابرنقاط و رگرسیون خطی تهیه و خطای ریشه میانگین مربعات برای آن محاسبه و مدل اطلاعات ساختمان از فضاهای داخلی تهیه گردید، و سرانجام محصولات نهایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه مراحل پژوهش، با جزئیات بیشتر شرح داده خواهند شد.

طبق مطالب ارائه شده در تحقیق فوق دیوار بین اتاق یک و اتاق دو، ۱۰ سانتی‌متر ضخامت دارد، در حالی که بر اساس داده‌های اخذ شده توسط iPad Pro ضخامت دیوار بین دو اتاق حدود ۴۰ سانتی‌متر گزارش شده است [7]. علی‌رغم اینکه در این پژوهش چندین تلاش برای گرفتن بیش از دو اتاق متوالی انجام گرفته است، ابرنقاط حاصل برای بیش از دو اتاق به وضوح نادرست بودند. این پژوهش نشان می‌دهد که این دستگاه فقط برای نقشه‌برداری از محیط‌های کوچک مناسب است.

بر اساس تحقیقات انجام شده، قابلیت‌های گوشی‌های هوشمند در زمینه‌های مختلف نقشه‌برداری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بسیاری از پژوهش‌ها به ارزیابی و مستندسازی این قابلیت‌ها پرداخته‌اند، به‌ویژه در زمینه‌هایی مانند اندازه‌گیری و تهیه مدل‌های سه‌بعدی از محیط‌های مختلف. به طور خاص، با معرفی اسکنر لیدار در گوشی‌های هوشمند، تحقیقات بسیاری به بررسی عملکرد این سنسور و ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت داده‌های تولیدی آن پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها معمولاً به ارزیابی دقت داده‌ها در نقاط چک محدود می‌شوند و از این رو، دقت نقشه‌برداری نهایی همچنان به طور کامل مشخص نشده است. در حالی که این تحقیقات، دستاوردهای مهمی در بهبود دقت و کارایی گوشی‌های هوشمند در نقشه‌برداری ارائه داده‌اند، اما پژوهش‌های اندکی به بررسی و



شکل ۲ چارچوب نظری پژوهش

برداشت نقاط کنترل و فضای داخلی با دوربین نقشه‌برداری

یکی از دقیق‌ترین روش‌های تهیه داده‌های مکانی سه‌بعدی، استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن است؛ بنابراین داده‌های حاصل از این ابزار می‌تواند به عنوان مبنای عمل دیگر تکنولوژی‌های جدید مانند فتوگرامتری، لیدار و تلفن هوشمند قرار گیرد. هدف از این مرحله تهیه نقاط کنترل و نقشه مبنای برای استفاده در مراحل بعدی است. نقاط کنترل در فرایند تهیه ابرنقاط مبنای مورد استفاده قرار می‌گیرند و استفاده از نقاط کنترل دقیق، موجب تولید ابرنقاط معتبر و دقیقی می‌شود. در واقع این

نقاط کنترل برای تعریف مبنای و سیستم مختصات محلی در فرایند تولید ابرنقاط سه‌بعدی با استفاده از روش فتوگرامتری، به کار گرفته خواهند شد. علاوه بر آن، از دوربین نقشه‌برداری برای تهیه نقشه مبنای به منظور ارزیابی دقت و مقایسه آن با نقشه تست حاصل از اسکنر آیفون استفاده می‌شود.

عکس‌برداری و تهیه ابرنقاط با استفاده از روش فتوگرامتری

در پروژه‌های فتوگرامتری برد کوتاه، طراحی شبکه اولین و مهم‌ترین گام در انجام پروژه است، چرا که این مرحله تأثیر

نزدیک‌ترین نقطه تکراری (ICP) استفاده خواهد شد. الگوریتم ICP یک شیوه متداول به منظور هم‌تراز نمودن مدل‌ها و ابرنقاط سه‌بعدی است. این الگوریتم برای تطبیق، از هندسه و شکل مدل سه‌بعدی استفاده می‌کند [35]. این الگوریتم ابرنقاط بین دو مجموعه داده را به صورت تکراری به هم نزدیک می‌کند تا به حد مناسبی از تطبیق برسد. پس از آن با استفاده از ابزار cloud to cloud distance فاصله بین ابر نقاط تست و ابرنقاط مبنا محاسبه و نتیجه به صورت ابرنقاط سه‌بعدی با طیف رنگی معنادار نمایش داده می‌شود.

برداری‌سازی ابرنقاط و تهیه نقشه

مدل‌های سه‌بعدی ابرنقاط به دلیل حجم عظیم اطلاعاتی که شامل می‌شوند، فضای زیادی را در سیستم ذخیره‌سازی اشغال کرده و این امر می‌تواند منجر به دشواری‌هایی در پردازش و کار با این داده‌ها، به ویژه در مقیاس‌های بزرگ، شود؛ بنابراین، به منظور تسهیل کار با این داده‌ها، ضروری است که فرایند برداری‌سازی انجام شود تا داده‌های غیر ضروری حذف گردیده و تنها اطلاعات مفید با حجم کمتری ذخیره شوند. این مرحله باعث کاهش حجم داده‌ها و بهبود کارایی سیستم در پردازش مدل‌های سه‌بعدی می‌شود. پس از اعمال برداری‌سازی، ابرنقاط وارد نرم‌افزار Recap می‌شوند، جایی که در محیط نرم‌افزاری Recap فرایند ساختاردهی داده‌ها و سازمان‌دهی اطلاعات انجام می‌گیرد. در این مرحله، داده‌ها به فرمت استاندارد rcp تبدیل می‌شوند که برای استفاده در نرم‌افزار Civil 3D مناسب و سازگار است. در نرم‌افزار Civil 3D نیز پس از بارگذاری داده‌ها، با استفاده از ابزارهای مختلف، مقاطع مناسب تهیه شده و با بهره‌گیری از روش‌هایی مانند رگرسیون خطی، نقشه‌های دوبعدی از مدل سه‌بعدی ایجاد می‌شود. این فرایندها به طور مؤثر به تسهیل تحلیل‌های مهندسی و طراحی‌های دقیق کمک می‌کنند.

محاسبه RMSE

خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) معیاری است که به طور گسترده برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [36]. به منظور بررسی دقت نقشه‌های برداری در این پژوهش نیز ابتدا تمام نقشه‌ها با انتقال و دوران روی نقشه دقیق حاصل

مستقیمی بر دقت نهایی نتایج خواهد داشت. طراحی صحیح و مناسب شبکه تصویربرداری می‌تواند به طور چشمگیری دقت داده‌های مکانی تولید شده را بهبود بخشد. امیر شاهرخ امینی و همکاران در پژوهشی که به بررسی تأثیر پارامترهای رابطه اساسی طراحی شبکه بر دقت نهایی فتوگرامتری برد کوتاه پرداخته‌اند، نشان دادند که یکی از عوامل کلیدی در بهبود دقت نهایی، افزایش تعداد تصاویر اخذ شده از هر ایستگاه تصویربرداری است. علاوه بر این، آنها تأکید کردند که آرایش مناسب ایستگاه‌های تصویربرداری، به طوری که بزرگ‌ترین حجم هرم فضایی را تشکیل دهند، می‌تواند تأثیر زیادی در بهبود دقت نتایج نهایی داشته باشد. به عبارت دیگر، انتخاب موقعیت‌های مناسب برای ایستگاه‌های تصویربرداری و ترکیب مناسب آنها باعث افزایش دقت مدل‌های سه‌بعدی و نقاط شیء می‌شود که در نهایت دقت فتوگرامتری برد کوتاه را بهبود می‌بخشد [33]. مراحل پس از طراحی شبکه شامل، طراحی موقعیت قرار گرفتن تارگت‌ها و تعریف دیتوم، طراحی ایستگاه‌ها و زوایای مناسب عکس‌برداری پیش‌پردازش تصاویر، مثلث‌بندی - سرشکنی - کالیبراسیون، حذف نویز و ترمیم ابرنقاط می‌باشد [25]. که در این پژوهش نیز به منظور تهیه ابرنقاط با استفاده از روش فتوگرامتری بر اساس چارچوب فوق عمل شد.

اسکن محیط با و بدون گیمبال

در پژوهشی که توسط Giuseppina Vacca صورت گرفت، چهار اپلیکیشن اسکن سه‌بعدی شامل Polycam, SiteScape, 3D Scanner app, Scaninverse مقایسه و دقت هر یک در شرایط مختلف با لیزر اسکنر زمینی (TLS) ارزیابی شد که با توجه به نتایج قابل قبول اپلیکیشن Scaninverse، در این پژوهش نیز انتخاب گردید [34]. علاوه بر موارد فوق، رایگان بودن آن و همچنین امکان خروجی گرفتن به انواع فرمت‌های رایج (FBX, OBJ, GLB, USDZ, STL, PLY, LAS) از دیگر مزیت‌های مهم این اپلیکیشن می‌باشد.

در تمام مراحل اسکن باید شرایط یکسان شامل تنظیمات اسکن، ایستگاه‌ها و زوایای اسکن، خنکی دستگاه و... فراهم باشد تا بتوان ارزیابی صحیحی داشت. برای مقایسه ابتدا باید ابرنقاط با یکدیگر هم‌تراز شوند که برای این امر الگوریتم

خطای مختصات X

$$\delta X =$$

$$\sqrt{(1)^2(\delta X_1)^2 + (\sin(G_{12}))^2(\delta L)^2 + (L\cos(G_{12}))^2(\delta G_{12})^2}$$

$$\delta X =$$

$$\sqrt{(1)^2(0.001)^2 + (1)^2(0.002)^2 + (10)^2(0.00001)^2}$$

$$\delta X = \sqrt{0.000001 + 0.000004 + 0.000001} \approx 0.002m \quad (۳)$$

همچنین خطای مختصات Y

$$\delta Y =$$

$$\sqrt{(1)^2(\delta Y_1)^2 + (\sin(G_{12}))^2(\delta L)^2 + (-L\sin(G_{12}))^2(\delta G_{12})^2}$$

$$\delta Y =$$

$$\sqrt{(1)^2(0.001)^2 + (1)^2(0.002)^2 + (10)^2(0.00001)^2}$$

$$\delta Y = \sqrt{0.000001 + 0.000004 + 0.000001} \approx 0.002m \quad (۴)$$

دقت مسطحانی کل:

$$\delta XY = \sqrt{\delta X^2 + \delta Y^2} = \sqrt{0.002^2 + 0.002^2} = 0.002m \quad (۵)$$

بنابراین، خطای موقعیت‌های به دست آمده ۲ میلی‌متر است و می‌توان از این نقاط به عنوان نقاط مبنا یا نقشه مبنا استفاده نمود.

عکس‌برداری و تهیه ابرنقاط با استفاده از روش فتوگرامتری

برای تهیه ابرنقاط مبنا در این پژوهش ابتدا با استفاده از رابطه کلی انتشار خطا (رابطه ۶) محاسبات طراحی شبکه انجام شد:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot S \cdot \sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{f} \cdot \sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot d \cdot \sigma_a \quad (۶)$$

$\bar{\sigma}_c$ متوسط انحراف معیار خطای مختصات XYZ نقاط شی می‌باشد که با توجه به الزامات کاداستر مسکونی در ایران این مقدار نباید از پنج سانتی‌متر بیشتر باشد. البته در این تحقیق به‌منظور دستیابی به دقت بالاتر این مقدار یک سانتی‌متر مد نظر

از دوربین توتال استیشن همتراز می‌شود و سپس مختصات تمام گوشه‌های نقشه‌های مبنا با مختصات تمام گوشه‌های نقشه‌های تست در رابطه (۱) جای‌گذاری خواهد شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۱)$$

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی یک طبقه از ساختمانی دو طبقه که دارای چهار اتاق می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برداشت نقاط کنترل و فضای داخلی با دوربین نقشه‌برداری

در این مرحله، با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن و قرائت مختصات ۱۶۹ نقطه، دیتوم به‌صورت محلی و بادقت بسیار بالا تعیین شد (شکل ۳). دوربین مورد استفاده دارای دقت طولیابی ۲ میلیمتر و دقت زاویه‌ای دو ثانیه است. همچنین دقت توجیه ایستگاه‌ها حداکثر یک میلیمتر بود.



شکل ۳ قرائت نقاط کنترل به‌صورت محلی

با توجه به رابطه انتشار خطا و جای‌گذاری فرمول محاسبه مختصات در آن خطای مختصات قرائت شده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \delta z\right)^2 + \dots}$$

$$X_2 = X_1 + L_{12} \sin(G_{12})$$

$$Y_2 = Y_1 + L_{12} \cos(G_{12}) \quad (۲)$$

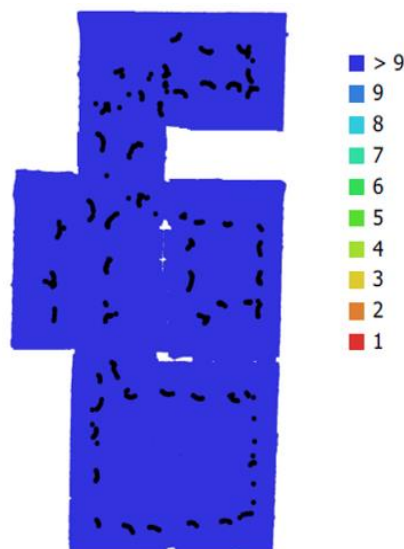
شکل (۴) نحوه قرارگیری ایستگاه‌های عکس‌برداری و میزان هم‌پوشانی تصاویر را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی دقت ابرنقاط حاصل از فتوگرامتری، تعداد ۳۱ نقطه از مجموع ۱۶۹ نقطه به عنوان نقاط چک انتخاب شدند. این نقاط چک به طور سیستماتیک در محیط‌های مختلف توزیع شدند تا دقت مدل‌های سه‌بعدی تولید شده مورد ارزیابی قرار گیرد. توزیع و تراکم نقاط کنترل و نقاط چک در اتاق‌های مختلف به صورت زیر بوده است: در اتاق ۱، ۵۰ نقطه کنترل و ۱۰ نقطه چک؛ در اتاق ۲، ۳۰ نقطه کنترل و ۷ نقطه چک؛ در اتاق ۳، ۳۳ نقطه کنترل و ۷ نقطه چک؛ و در اتاق ۴، ۲۵ نقطه کنترل و ۷ نقطه چک. گزارش نهایی ارائه شده توسط نرم‌افزار نشان می‌دهد که مدل سه‌بعدی تولید شده از فتوگرامتری دارای دقت مناسب و قابل قبولی است و می‌تواند به عنوان مبنای مقایسه با ابرنقاط به دست آمده از اسکنر iPhone مورد استفاده قرار گیرد. جدول (۲) نتایج مقایسه این دو مدل را نشان می‌دهد.

قرار گرفت. q که ضریب استحکام هندسی شبکه است ۰,۷ در نظر گرفته شد، k که نشان دهنده تعداد تصاویر در هر ایستگاه است یک می‌باشد، فاصله کانونی دوربین یا همان f ، $2,4$ میلی‌متر است و σ نیز که نماد خطای متوسط مختصات xy نقاط عکسی است معادل ۸ میکرون می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$0.01 \geq \frac{0.7}{\sqrt{1}} \times \frac{d}{0.0042} \times 8 \times 10^{-6} \rightarrow d \leq 7.5$$

در این تحقیق، تعداد ۵۴۶ تصویر با استفاده از گوشی iPhone 12 Pro ثبت شد. ایستگاه‌های عکس‌برداری به طور منظم در فواصل ۱ تا ۱,۵ متر از یکدیگر قرار گرفتند تا پوشش مکانی مناسبی فراهم شود. در هر ایستگاه، برای اطمینان از هم‌پوشانی بالای ۹۰ درصد بین تصاویر و دستیابی به دقت و وضوح بالاتر در فرایند مدل‌سازی، عکس‌برداری از زوایای مختلف و متنوع انجام شد. این اقدام به ویژه در فتوگرامتری برد کوتاه اهمیت دارد زیرا هم‌پوشانی بالا باعث بهبود دقت نتایج نهایی و کاهش خطاهای هندسی در مدل سه‌بعدی می‌شود.



شکل ۴ موقعیت دوربین‌ها و درجه هم‌پوشانی تصاویر

جدول ۲ خطای نقاط کنترل و نقاط چک

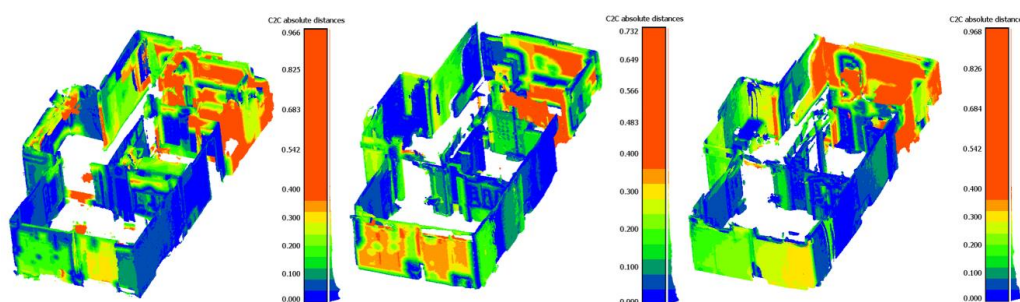
تعداد	خطای x (mm)	خطای y (mm)	خطای z (mm)	خطای مسطحاتی (mm)	خطای کل (mm)
۱۳۸	۱,۱۱	۱,۱۳	۰,۷۹	۱,۵۹	۱,۷۷
۳۱	۱,۱۵	۱,۱۱	۰,۷۱	۱,۶۰	۱,۷۵

اسکن محیط با و بدون گیمبال

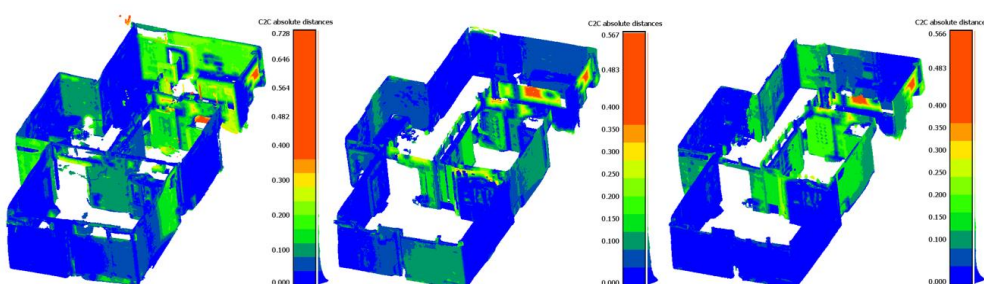
در این مرحله فضای داخلی چهار اتاق با ابعاد کلی 6×12 سه بار به طور معمولی و سه بار با استفاده از گیمبال اسکن شد. تنظیمات اسکن در تمام مراحل کاملاً مشابه اعمال گردید، همچنین نقاط ثابتی روی زمین نشانه‌گذاری شد تا در هر مرحله، از مسیر یکسان اسکن انجام شود. سپس خروجی ابرنقاط با استفاده از فیلتر نویز در نرم‌افزار cloudcompare بهبود داده شد. این الگوریتم ابتدا یک صفحه به صورت محلی (در اطراف هر نقطه از ابرنقاط) فیت می‌کند، سپس نقاطی که از صفحه دور هستند را حذف می‌کند. این فیلتر را می‌توان در اصل یک فیلتر پایین‌گذر در نظر گرفت (CloudCompare User Manual). در نهایت خروجی PLY از هر دو حالت اسکن با ابرنقاط فتوگرامتری مقایسه گردید. به منظور مقایسه ابتدا باید ابرنقاط با یکدیگر هم‌تراز شوند که برای این منظور از الگوریتم ICP استفاده شد. البته باید به این نکته توجه شود که در این فرایند پارامتر مقیاس به منظور حفظ هندسه مدل‌ها اعمال نشده است و تنها انتقال و دوران‌ها در سه محور انجام گردید. پس از آن با استفاده از آنالیز ابر به ابر (C2C) فاصله بین ابرنقاط مبنا و تست محاسبه گردید خطاهای موجود با استفاده از طیف رنگی در شکل (۵) نمایش داده شده است.

در شکل (۵)، نقاط با رنگ آبی دقت بالایی دارند و دارای

خطایی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر هستند. نقاط سبز رنگ نشان دهنده خطایی بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر و نقاط زرد رنگ معرف خطای حدود ۳۰ سانتی‌متر می‌باشند. همچنین، رنگ‌های نارنجی و قرمز به ترتیب خطاهایی حدود ۳۵ سانتی‌متر و بیشتر را نشان می‌دهند. این توزیع متفاوت در خطا به دلیل ویژگی‌های سیستم‌های اسکن لیزری سیار است که از الگوریتم مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان (SLAM) برای اسکن بلادرنج و تخمین دقیق موقعیت دستگاه در محیط‌های پیچیده، مانند فضاهای داخلی، بهره می‌برند. با این حال، سیستم اسکن لیزری سیار (MLS) که در تلفن همراه آیفون به کار رفته است، در معرض چالش‌هایی قرار دارد. این چالش‌ها بیشتر ناشی از اختلال در موقعیت‌یابی دستگاه به دلیل لرزش‌ها و حرکات ناگهانی دست کاربر است که موجب کاهش دقت اسکن می‌شود. افزون بر این، اسکنر و استابلازر موجود در این دستگاه‌ها به طور خاص برای کاربردهای دقیق طراحی نشده‌اند؛ این موضوع باعث ایجاد ناهماهنگی در موقعیت‌یابی و تطابق نقاط اسکن‌شده در برداشت مسافت‌های طولانی می‌شود. به منظور کاهش اثرات ناشی از لرزش و حرکات ناگهانی دست، از یک گیمبال Smooth Q4 استفاده شده است. این اقدام با هدف بهبود دقت اسکن و کاهش مشکلات مربوط به خطای اسکن‌های چندگانه انجام شده است (شکل ۶).



شکل ۵ آنالیز C2C بین ابرنقاط اسکنر آیفون و ابرنقاط فتوگرامتری



شکل ۶ آنالیز C2C بین ابرنقاط اسکنر iPhone با استفاده از گیمبال و ابرنقاط فتوگرامتری

گیمبال برای تثبیت دستگاه ضروری است، زیرا موجب بهبود کیفیت داده‌های اولیه شده و امکان برداری‌سازی و پردازش دقیق‌تر را فراهم می‌کند.

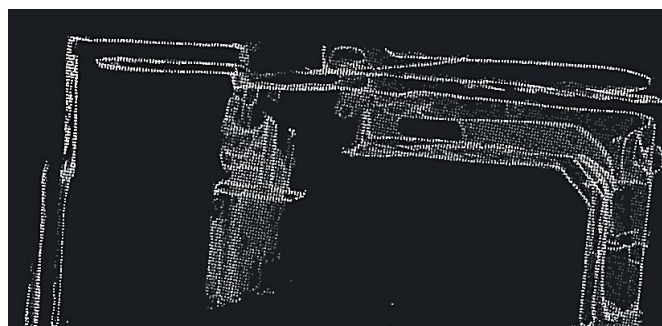
در شکل (۷) مشاهده می‌شود که برخی دیوارها به دلیل اسکن چندگانه و مختصات متفاوت برای شیء یکسان، به درستی ثبت نشده‌اند و فاصله میان این اسکن‌ها مانع از تشخیص دقیق مرزها شده است. به همین دلیل، این ابرنقاط از فرایند برداری‌سازی حذف شدند. در مقابل، تنها ابرنقاطی که با استفاده از گیمبال به دست آمده بودند، انتخاب و از طریق رگرسیون خطی برای برداری‌سازی استفاده شدند که نحوه برداری‌سازی در شکل (۸) نمایش داده شده است.

به منظور ارزیابی دقت داده‌های اسکن شده، از نقشه‌ای که با دستگاه دقیق «توتال استیشن» برداشت شده بود به عنوان نقشه مرجع استفاده گردید. برای این مقایسه، ابتدا نقشه‌های حاصل از اسکن سه‌بعدی به نقشه مرجع هم‌تراز شدند تا امکان تطبیق هندسی فراهم شود. بررسی نتایج پس از این هم‌ترازی نشان داد که هندسه اتاق‌ها به طور نسبی با دقت متوسطی حفظ شده است (شکل ۹). این موضوع بیانگر آن است که داده‌های حاصل از سیستم اسکن سه‌بعدی، اگر چه دقتی هم‌سطح با توتال استیشن نداشتند، اما همچنان توانسته‌اند بخش عمده‌ای از ویژگی‌های هندسی محیط را به درستی ثبت نمایند.

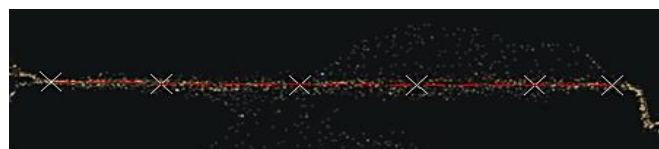
همان طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از استفاده از گیمبال به طور قابل توجهی بهبود یافته است. در این مرحله، بیشتر دیوارها به رنگ آبی دیده می‌شوند که نشان دهنده خطای کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در این نواحی است. همچنین، ابرنقاط قرمز رنگ که نمایانگر خطاهایی بالاتر از ۳۵ سانتی‌متر بودند، تقریباً حذف شده‌اند، که این امر نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در خطاهای اسکن است. با این حال، هنوز در بسیاری از قسمت‌ها ابرنقاط به رنگ سبز مشاهده می‌شود. این نکته حاکی از آن است که علی‌رغم بهبودهای اعمال شده، برخی از چالش‌ها و خطاها همچنان در مقیاس‌های متوسط باقی مانده‌اند. این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از محدودیت‌های فنی دستگاه باشد که نیاز به بهبود بیشتر در پژوهش‌های آینده دارد.

برداری‌سازی ابرنقاط و تهیه نقشه

در فرایند برداری‌سازی ابرنقاط، تنها داده‌های حاصل از اسکن سه‌بعدی با استفاده از گیمبال به کار گرفته شد. داده‌های اسکن شده بدون گیمبال به دلیل کیفیت پایین، فاقد دقت لازم برای تهیه نقشه‌های دقیق بودند (شکل ۷). این مشکل عمدتاً به دلیل لرزش‌ها و حرکات ناگهانی دست در هنگام اسکن رخ داد که منجر به ایجاد خطای اسکن چندگانه و نویز در داده‌ها شد. این ناپایداری‌ها موجب از دست رفتن انسجام ابرنقاط و عدم امکان استخراج دقیق خطوط و سطوح گردید؛ بنابراین، استفاده از



شکل ۷ نمای عمودی از برش ابرنقاط حاصل از اسکنر iPhone بدون گیمبال



شکل ۸ برش عرضی از ابرنقاط و ترسیم نقشه دوبعدی با استفاده از رگرسیون خطی



شکل ۹ هم‌پوشانی نقشه مبنا (زرد) با نقشه حاصل از اسکنر iPhone با استفاده از گیمبال (صورتی)



شکل ۱۰ تهیه مدل اطلاعات ساختمان معتبر و منطبق بر واقعیت با استفاده از نقشه دوبعدی و اطلاعات سه‌بعدی ابرنقاط

بحث

همان طور که از شکل‌های (۵) و (۶) نیز مشخص است، اسکن معمولی با استفاده از لیدار گوشی هوشمند برای تهیه نقشه‌های دقیق و معتبر مناسب نیست. به ویژه در شرایطی که هدف تهیه نقشه برای چهار اتاق مختلف باشد، زیرا ابرنقاط از یک اتاق به اتاق بعدی به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر خطاها و اشتباهات

محاسبه RMSE

در این مطالعه، نقشه‌های حاصل از داده‌های ابرنقاط برای تحلیل و مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقت این نقشه‌ها، تفاوت مختصات ۲۰ نقطه خاص از گوشه‌های خطوط که با استفاده از دستگاه توتال استیشن برداشت شده بودند، با مختصات محاسبه شده در نقشه‌های ابرنقاط مورد بررسی قرار گرفت. برای این مقایسه، از معیار خطای RMSE استفاده شد تا انحراف مختصات به دست آمده از داده‌های ابرنقاط نسبت به نقشه مرجع تعیین شده توسط توتال استیشن ارزیابی شود (جدول ۳).

جدول ۳ خطای RMSE نقشه‌های دوبعدی

RMSE (m)	RMSE Y (m)	RMSE X (m)	
۰,۰۱۴	۰,۰۱۱	۰,۰۰۸	فتوگرامتری
۰,۲۰۳	۰,۱۶۸	۰,۱۱۳	آیفون + گیمبال ۱
۰,۱۷۱	۰,۱۴۸	۰,۰۸۴	آیفون + گیمبال ۲
۰,۱۵۳	۰,۱۴۵	۰,۰۵۰	آیفون + گیمبال ۳

در نهایت، با توجه به پیشرفت‌های ایجاد شده در دقت ابرنقاط (شکل ۶) و امکان تولید نقشه‌های خطی دقیق‌تر، همچنین با استفاده از اسناد و نقشه‌های دوبعدی موجود از ساختمان و اطلاعات حاصل از مشاهدات میدانی به عنوان داده‌های معنایی تکمیلی، می‌توان مدل سه‌بعدی ساختمان را با دقت مکانی قابل قبول و در عین حال با جزئیات دقیق تولید کرد (شکل ۱۰). این فرایند، امکان بازسازی دقیق و جامع مدل‌های سه‌بعدی را فراهم می‌آورد.

لزوم استفاده از تکنولوژی‌های تکمیلی برای بهبود دقت اسکن‌ها تأکید می‌کند. با استفاده از گیمبال و انجام اصلاحات لازم، بهبود قابل توجهی در کیفیت ابرنقاط مشاهده شد که منجر به کاهش خطا و افزایش دقت مدل‌سازی گردید. در نتیجه، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) نقشه‌برداری نهایی به طور میانگین ۱۷٫۶ سانتی‌متر محاسبه شد و مدل سه‌بعدی وضعیت موجود ساختمان با دقتی متوسط تولید شد. این نتایج نشان می‌دهند که علی‌رغم محدودیت‌ها، استفاده از سنسور لیدار گوشی‌های هوشمند در پروژه‌های نقشه‌برداری و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند در آینده تحولی در عملیات میدانی ایجاد کند. با این حال، چالش‌هایی در استفاده از این سنسورها برای کاربردهای دقیق همچنان باقی است. محدودیت‌های دقت اسکن، فواصل محدود اسکن (حداکثر تا ۵ متر) و کاهش دقت در مسافت‌های طولانی‌تر از جمله مشکلات اصلی به شمار می‌روند. این مسائل تأکید می‌کنند که برای دستیابی به دقت بالاتر در نقشه‌برداری‌های میدانی، نیاز به بهبود سنسورها و الگوریتم‌های پردازشی داریم. با این وجود، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و بهبود سنسورهای لیدار در دستگاه‌های آینده می‌تواند امکان تولید داده‌های سه‌بعدی دقیق و معتبر مبتنی بر موبایل را فراهم سازد. چنین داده‌هایی می‌توانند در کاربردهای مختلفی مانند مدیریت شهری، تحلیل‌های سه‌بعدی، بازار املاک، ثبت اسناد و بسیاری دیگر مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، بررسی و ارزیابی روش‌های تلفیقی، عوامل مؤثر در بهبود قابلیت اسکن، کاهش نویز و خطا، و توسعه الگوریتم‌های پیشرفته به منظور بهبود دقت مدل‌سازی می‌تواند به ارتقای این فناوری کمک کند. همچنین، امکان‌سنجی تهیه داده‌های سه‌بعدی شهری به صورت مردم گستر و بادقت بالا، به عنوان یک موضوع مهم، می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده در این حوزه باشد.

واژه‌نامه

مدل اطلاعات ساختمان

BIM (Building Information Modeling)

معماری، مهندسی و ساخت و ساز

AEC (Architecture, Engineering, and Construction)

C2C (Cloud-to-Cloud distance)

فاصله ابر به ابر

قرار می‌گیرند و این خطاها به صورت تجمعی افزایش می‌یابند. در این حالت، ابرنقاط به هیچ وجه دقت هندسی قابل قبولی ندارند و صرفاً برای کاربردهای نمایشی و هنری مناسب خواهند بود. با این حال، پس از استفاده از گیمبال، بسیاری از نویزها و قرائت‌های چندگانه و متفاوت برطرف شدند و در آنالیز C2C، بیشتر قسمت‌ها به رنگ آبی و سبز نمایش داده شدند، در حالی که رنگ زرد و قرمز به حداقل رسید، که نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی بود. بنابراین، علاوه بر اینکه امکان برداری‌سازی ابرنقاط با استفاده از رگرسیون خطی فراهم شد، ابهامات موجود در دقت نقشه‌های برداری نیز برطرف گردید. چرا که فرایند برداری‌سازی ابرنقاط معمولاً با کاهش دقت همراه است. به عنوان مثال، در فتوگرامتری، خطای نقاط چک ۲ میلی‌متر بود که پس از برداری‌سازی، این خطا به ۱٫۵ سانتی‌متر افزایش یافت.

با این‌وجود، باید توجه داشت که در آنالیز C2C، در مقایسه با ابرنقاط حاصل از فتوگرامتری، بسیاری از قسمت‌ها همچنان به رنگ سبز دیده می‌شود. این امر نشان‌دهنده این حقیقت است که حتی با استفاده از گیمبال نیز این دستگاه برای کاربردهای دقیق، همچنان مناسب نمی‌باشد. در نهایت، RMSE‌های محاسبه شده نیز این موضوع را تأیید می‌کند. اگر چه این پژوهش محدود به یک طبقه از ساختمان بود، اما نتایج آن می‌تواند مسیر را برای پژوهش‌های آینده در تمامی طبقات، از جمله قسمت‌های داخلی، خارجی و نمای ساختمان، هموار کند. چالش اصلی در این مسیر، تلفیق ابرنقاط به دست آمده از بخش‌های مختلف ساختمان و هم‌تراز کردن آنها در یک سیستم مختصات واحد است. این موضوع نیازمند توجه دقیق به روش‌های هم‌ترازی و یکپارچه‌سازی داده‌ها در سطوح مختلف است تا نقشه‌ها و مدل‌های دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری تولید شوند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، قابلیت سنسور لیدار گوشی‌های هوشمند در بازسازی فضای داخلی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ابرنقاط حاصل از اسکن تنها با استفاده از گوشی هوشمند، به دلیل محدودیت‌های دقت، برای تولید نقشه‌های دقیق و معتبر مناسب نیستند. این یافته‌ها بر

واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU (Inertial Measurement Unit)	ریشه میانگین مربعات خطا
سامانه موقعیت‌یاب جهانی	RMSE (Root Mean Square Error)
GPS (Global Positioning System)	اسکن لیزری متحرک
اسکنر لیزری زمینی	TLS (Terrestrial Laser Scanning)
زمان پرواز	ToF (Time of Flight)
موقعیت‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
سیستم عامل آیفون	iOS (iPhone Operating System)
سامانه ناوبری ماهواره‌ای جهانی	GNSS (Global Navigation Satellite System)
نزدیک‌ترین نقطه تکرار شونده	ICP (Iterative Closest Point)

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مجموعه نشریه مهندسی عمران فردوسی و سردبیر محترم آن، جناب آقای دکتر محمدرضا اصفهانی، به دلیل کمکهای صبورانه و سخاوتمندانه‌شان در انتشار این مقاله صمیمانه تشکر می‌کنند.

مراجع

- [1] C., Oluwadare and M., Salami, "Comparative Analysis of Smartphones and Survey-Grade GNSS Receivers for Parcel Boundary Determination", *Journal of Geoinformatics & Environmental Research*, 3(01), Pp. 10–22. (2022).
- [2] S.D.G., Arabinda, "Smartphone as a Real-time and Participatory Data Collection Tool for Civil Engineers", *International Journal of Modern Computer Science*. (2014).
- [3] K. J. W., McCaffrey, R. R., Jones, R. E., Holdsworth, R. W., Wilson, P., Clegg, J., Imber, N., Holliman and I., Trinks, "Unlocking the spatial dimension: Digital technologies and the future of geoscience fieldwork", *Journal of the Geological Society*, 162(6), 927–938. <https://doi.org/10.1144/0016-764905-017>, (2005).
- [4] S., Tavani, A., Billi, A., Corradetti, M., Mercuri, A., Bosman, M., Cuffaro, T., Seers and E., Carminati, "Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones", *Earth-Science Reviews*, 227, 103969. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2022.103969>, (2022).
- [5] K., Khoshelham, H., Tran and D., Acharya, "Indoor mapping eyewear: Geometric evaluation of spatial mapping capability of hololens", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2/W13), 805–810. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W13-805-2019>, (2019).
- [6] H., Patrick, S., Landgraf, W., Martin and S., Wursthorn, "Evaluation of the Microsoft HoloLens for the Mapping of Indoor Building Environments", *Conference: Dreiländertagung Der DGPF Der OVG Und Der SGPF At: Wien.*, (2019).
- [7] L., Díaz-Vilariño, H., Tran, E., Frías, J., Balado and K., Khoshelham, "3D MAPPING OF INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENTS USING APPLE SMART DEVICES", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B4-2022), 303–308. (2022). <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B4-2022-303-2022>
- [8] S., Xia, D., Chen, R., Wang, J., Li and X., Zhang, "Geometric Primitives in LiDAR Point Clouds: A Review",

- IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, Pp. 685–707. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2969119>, (2020).
- [9] A., Murtiyoso, P., Grussenmeyer, T., Landes and H., Macher, "First assessments into the use of commercial-grade solid state lidar for low cost heritage documentation", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B2-2021), Pp. 599–604, (2021).
- [10] M., Reynolds, J., Doboš, L., Peel, T., Weyrich and G. J., Brostow, "Capturing Time-of-Flight data with confidence", *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 945–952. (2011). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995550>
- [11] A., Prusak, O., Melnychuk, H., Roth, I., Schiller and R., Koch, "Pose estimation and map building with a Time-Of-Flight-camera for robot navigation", *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 5(3–4), 355–364. (2008). <https://doi.org/10.1504/IJISTA.2008.021298>
- [12] S., May, D., Dröschel, D., Holz, F., Iais, S., Fuchs and A., Nüchter, "Robust 3D-Mapping with Time-of-Flight Cameras", (2009).
- [13] S., Agnes, B., Liu, J., Penne, O., Jesorsky and R., Kompe, "A Comprehensive System for 3D Modeling from Range Images Acquired from a 3D ToF Sensor", *5th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS 2)*. (2007).
- [14] J., Feulner, J., Penne, E., Kollorz and J., Hornegger, "Robust Real-Time 3D Modeling of Static Scenes Using Solely a Time-of-Flight Sensor", *In 6th IEEE Workshop on Object Tracking and Classification Beyond and in the Visible Spectrum*, (2009).
- [15] D., Costantino, G., Voza, M., Pepe and V. S. , Alfio, "Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges", *Applied System Innovation 2022*, Vol. 5, Page 63, 5(4), 63. <https://doi.org/10.3390/ASI5040063>, (2022).
- [16] N., Bursztyn, B., Shelton, A., Walker and J., Pederson, "Increasing undergraduate interest to learn geoscience with GPS-based augmented reality field trips on students' own smartphones", *GSA Today*, 27(6), 4–10. <https://doi.org/10.1130/GSATG304A.1>, (2017).
- [17] D. G., De Paor, "Virtual Rocks", *GSA Today*, 26(8), 4–11. (2016). <https://doi.org/10.1130/GSATG257A.1>
- [18] A. F., Glazner and J., Douglas Walker, "StraboTools: A mobile app for quantifying fabric in geology", *GSA Today*, 30(8), 1–8, (2020). <https://doi.org/10.1130/GSATG454A.1>
- [19] T. L., Pavlis, R., Langford, J., Hurtado and L., Serpa, "Computer-based data acquisition and visualization systems in field geology: Results from 12 years of experimentation and future potential", *Geosphere*, 6(3), 275–294., (2010). <https://doi.org/10.1130/GES00503.1>
- [20] J. D., Walker, B., Tikoff, J., Newman, R., Clark, J., Ash, J., Good, E. G., Bunse, A., Möller, M., Kahn, R. T., Williams, Z., Michels, J. E., Andrew and C., Rufledt, "StraboSpot data system for structural geology," *Geosphere*, 15(2), 533–547. (2019). <https://doi.org/10.1130/GES02039.1>
- [21] S. J., Whitmeyer, E. J., Pyle, T. L., Pavlis, W., Swanger and L., Roberts, Modern approaches to field data collection and mapping: Digital methods, crowdsourcing, and the future of statistical analyses", *Journal of*

- Structural Geology*, 125, 29–40. <https://doi.org/10.1016/J.JSG.2018.06.023>, (2019).
- [22] R. W., Allmendinger, C. R., Siron and C. P., Scott, "Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices", *Journal of Structural Geology*, 102, 98–112. <https://doi.org/10.1016/J.JSG.2017.07.011>, (2017).
- [23] L., Novakova and T. L., Pavlis, "Modern methods in structural geology of twenty-first century: Digital mapping and digital devices for the field geology", *Springer Geology*, 43–54. (2019). https://doi.org/10.1007/978-981-13-2781-0_3/COVER
- [24] F., Zangenehjad and Y., Gao, "GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives", *Satellite Navigation*, 2(1), 1–23. (2021). <https://doi.org/10.1186/S43020-021-00054-Y/TABLES/5>
- [25] M., Amooshahi, A., Milan and Y., jamour, "Feasibility of using smartphones in the reconstruction of the interior architecture of the building without using interior control points", *JGST*, 12(2):9, (2023). (In Persian) <http://jgst.issgeac.ir/article-1-1104-fa.html>
- [26] M. I., Razali, A. N., Idris, M. H., Razali and W. M., Syafuan, "Quality Assessment of 3D Point Clouds on the Different Surface Materials Generated from iPhone LiDAR Sensor", *International Journal of Geoinformatics*, 18(4), 51-59. (2022). <https://doi.org/10.52939/ijg.v18i4.2259>
- [27] P. P. C., Chase, K. H., Clarke, A. J., Hawkes, S., Jabari and J. S., Jakus, "Apple iPhone 13 Pro LiDAR Accuracy Assessment for Engineering Applications", *Transforming Construction with Reality Capture Technologies*. CloudCompare User manual (2.6.1). (n.d.), (2022). <https://doi.org/10.57922/TCRC.645>
- [28] A., Spreafico, F., Chiabrando, L., Teppati Losè and F., Giulio Tonolo, "The Ipad Pro Built-in LIDAR Sensor: 3D Rapid Mapping Tests and Quality Assessment", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2021(B1-2021), 63–69. (2021). <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B1-2021-63-2021>
- [29] J., Zaczek, "Evaluation of the LiDAR in the Apple iPhone 13 Pro for use in Inventory Works", *FIG Congress*, (2022).
- [30] G., Luetzenburg, A., Kroon and A. A., Bjørk, "Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences", *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 1–9. (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
- [31] M., Torkan, M., Janiszewski, L., Uotinen and M., Rinne, "Method to obtain 3D point clouds of tunnels using smartphone LiDAR and comparison to photogrammetry", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1124(1), 012016. (2023). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012016>
- [32] B. E., Heinrichs and M., Yang, "Bias and Repeatability of Measurements from 3D Scans Made Using iOS-Based Lidar", *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 3(5), 2219–2226. (2021). <https://doi.org/10.4271/2021-01-0891>
- [33] A. Sh., Amini, M., Varshusaz, M. S., Sarasht, "Investigating the influence of parameters of the basic relationship of network design on the final accuracy of short-range photogrammetry", *Geomatic Conference and the 4th Conference on Unification of Geographical Names*, <https://civilica.com/doc/37106>, (2008).
- [34] G., Vacca, "3D Survey with Apple LiDAR Sensor—Test and Assessment for Architectural and Cultural

- Heritage", *Heritage* 2023, Vol. 6, Pp. 1476-1501, 6(2), 1476–1501. (2023). <https://doi.org/10.3390/HERITAGE6020080>
- [35] S., Rusinkiewicz and M., Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm", *Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 3DIM, 145–152. (2001). <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423>
- [36] T. O., Hodson, "Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not", *Geosci. Model Dev*, 15, 5481–5487. (2022). <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

CONTENTS

Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer	Hossein Mohammadzadeh Raheleh Shahriari - Naser Hafezi Moghaddas Azam Ghazi	1
Behavioral Models to Identify Factors Affecting Walking Barriers in Work Trips (Case Study: Qazvin City)	Hamid Mirzahosseini - Soheil Rezashoar Farzad Moradi	19
Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain	Reza Jahanshahi - Masoomeh Navardi, Naser Asadi - Mohammad Reza Mirbalouchzahi	35
Performance Evaluation of RC Shear Walls Designed by Direct Displacement Based Design	Saeid Abdi - Horr Khosravi- Amir Hossein Jafarieh	49
Evaluation of Household Water Consumption to Modify the Consumption Pattern, Case Study: Mashhad City	Mohsen Kadkhodaei - Ali Abbasi	69
Investigating the Capability of the Smartphones Time-Of-Flight Sensor to Data-Capturing Interior Spaces of Building	Mohammad Amooshahi - Asghar Milan Saeid Sadeghian - Alireza Gharagozlou	87



**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. H. Mohammadzadeh	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseininia	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
S. M. Karrabi	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
H. Ganji Doost	Professor, Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
M. Maghrebi	Associate 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, Toronto Metropolitan University

Text Editor: M. Dehghan

Administrative Director: T. Hooshmand

Typist: A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering

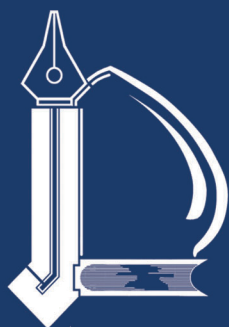
Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

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

Serial No. 48

- | | |
|---|----|
| Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer
Hossein Mohammadzadeh - Raheleh Shahriari - Naser Hafezi Moghaddas
Azam Ghazi | 1 |
| Behavioral Models to Identify Factors Affecting Walking Barriers in Work Trips (Case Study: Qazvin City)
Hamid Mirzahosseini - Soheil Rezashoar
Farzad Moradi | 19 |
| Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain
Reza Jahanshahi - Masoomeh Navardi - Naser Asadi - Mohammad Reza Mirbalouchzahi | 35 |
| Performance Evaluation of RC Shear Walls Designed by Direct Displacement Based Design
Saeid Abdi - Horr Khosravi- Amir Hossein Jafarieh | 49 |
| Evaluation of Household Water Consumption to Modify the Consumption Pattern, Case Study: Mashhad City
Mohsen Kadkhodaei - Ali Abbasi | 69 |
| Investigating the Capability of the Smartphones Time-Of-Flight Sensor to Data-Capturing Interior Spaces of Building
Mohammad Amooshahi - Asghar Milan - Saeid Sadeghian - Alireza Gharagozlou | 87 |

Vol. 37, No. 4
Winter, 2024