ISSN 2783-2805

اثر کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف بر ارتباط مکش با پتانسیل تورمی یک خاک متورم-شونده ۱
سهراب خضریان - علی رئیسی استبرق - محدثه امینی جمال عبدالهی علی بیک

بررسی رابطه خصوصیات هندسی خودروها و تراکم ترافیک ۱۹
حسن خاکسار - حسین بهارزاده - الهام اشرفی

تخمین مهم‌ترین پارامتر ژئومکانیکی خاک‌های غیراشباع با به‌کارگیری روش‌های مختلف هوش مصنوعی ۳۵
هادی فتاحی - فاطمه جیریایی

ارزیابی خطر طغیان شط‌العرب در محدوده شهرستان بصره ۴۹
حسین اعتمادفرد- نعمه الدیراوی - حامد خرقانی

برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان عسلویه با استفاده از روابط تجربی مبتنی بر دانه‌بندی آبرفت ۶۳
مریم جمالی دیزجی - مرتضی مظفری - الهام فیجانی - رویا اسکندری

بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در راه‌های برون‌شهری ۷۵
ایرج برگ‌گل - محمد رحمانی نژاد اصیل - سعید فاطمی - سید امیر سعادتجو

سال۳۵، شماره۲
تابستان ، ۱۴۰۱

دانشگاه فردوسی مشهد

نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۸

نشریه مهندسی عمران فردوسی
سال ۳۵، شماره ۲، ۱۴۰۱
شماره پیاپی ۳۸

نشریه مهندسی عمران فردوسی

ISSN : 2008-7454

سردبیر : محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز : دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه :

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

ویراستار ادبی : دکتر یوسف بینا

مسئول دفتر نشریه : تکتم هوشمند

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

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

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

تلفاکس : ۳۸۸۰۶۰۲۴-۰۵۱ پست الکترونیکی : **ejour@um.ac.ir** وب سایت : **http://civil-ferdowsi.um.ac.ir**

چاپ : چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

بررسی ارتباط بین نتایج آزمایش SEM و پارامتر TSR برای سنجش شاخص حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد ضدعریان‌شدگی	محمود عامری – حمید شاکر امیرحسین عامری – سید امیر سعادتجو سعید فاطمی – سید علی ضیائی	۱
بررسی اثر دمای بستر و اپوکسی در هنگام نصب برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP بااستفاده از دو آزمون جدا کردن با کشش (Pull-off) و با پیچش (Twist-off)	پیمان ایمانی جاجرمی - محمدرضا توکلی‌زاده عباس یوسفی	۱۳
یک مدل ساده‌شده برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی- دیوار برشی	پریسا اسماعیل تبار نشلی - حر خسروی جواد واثقی امیری	۳۱
بررسی اثر میلگرد و خاموت‌های ساخته‌شده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف شیشه‌ای بر رفتار تیرهای بتن‌آرمه	محمد میرزایی فتح کوهی- فرزاد حاتمی برق حمیدرضا ربیعی‌فر	٤٥
بررسی قوس زدگی در سدهای سنگریزه‌ای یک دهه پس از پایان ساخت با نتایج تحلیل عددی و مونیتورینگ بدنهٔ سد (مطالعهٔ موردی سد شهید مدنی تبریز، ایران)	رسول فرج نیا – رامین وفایی پورسرخابی احمد زارعان – روزبه دبیری	۵۹
اثر مدت دوام زلزله بر بیشینه تغییرمکان سازهٔ تک درجه آزادی الاستوپلاستیک	محمدحسین حاجی‌محمدی - حر خسروی رضا دزواره رسنانی	۷۷

The Effect of Different Chemical Quality Pore Fluids on the Relationship between Suction and Swelling Characteristics of an Expansive Soil*

Research Article

Sohrab Khezrian[1] Ali Raeesi Estabragh[2]
Mohadeseh Amini[3] Jamal Abdollahi Ali Beik[4]

1. Introduction

One of the most important behaviors of some clay soils is susceptibility to volume changes that can happen independently of loading due to changes in water content. These volume changes (i.e., swelling or shrinkage) can give rise to a ground movement that may result in damage to the building. Low-rise buildings are particularly vulnerable to such ground movements since they usually do not have enough weight or strength to resist. These soils also represent a problem when they are encountered in road construction, and shrinkage settlement of embankments composed of such clays can lead to cracking and breakup of the roads they support. The potential of volume change of these soils dependents on the initial water content, initial density or voids ratio, type, the amount of clay minerals, and the surcharge pressure. Expansive soils are usually in unsaturated condition and have two components of suction, namely matric suction and osmotic suction. Matric suction can be considered as the negative pore water pressure due to the surface tension effects. Osmotic suction is resulted from dissolved salt concentration in the pore water. Before soaking, the sample is in unsaturated condition. Soaking it, water flows from the reservoir to the sample and initial matric suction begins to reduce to a point in which full saturation is achieved. The osmotic suction is appeared in the sample upon reaching nearly full saturation condition. Total suction is composed of matric and osmotic suctions.

Reviewing related literature shows that the studies on the potential and pressure of swelling soils are nearly rare at different matric suction. Therefore, the main aim of this study was to investigate the effect of different chemical pore fluids on the potential and pressure of swelling at different suctions. Experimental tests were conducted on the samples with different pore fluids (i.e., distilled water and solution of NaCl and $CaCl_2$) that were wetted by distilled water. The potential of swelling and swelling pressure of wetted samples were measured at different water content and then converted to the suction through the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) that was established for each chemical quality of pore fluids. Finally, the results of this study are presented in terms of swelling potential and pressure and matric suction.

2. Materials and methods

A suitable soil for this research work would be highly expansive clay. A number of kaolin-bentonite mixtures with different percentages were selected and tested. Finally, a mixture of 80% kaolin and 20% bentonite was chosen for this work. Hereafter, this mixture will be simply referred to as soil. The physical, mechanical, and chemical of this soil were determined. According to the Unified Soil Classification System (USCS) this soil was classified as clay with high plasticity.

The standard compaction tests were performed on soil with different pore fluid qualities (a. distilled water, b. 250 g/L NaCl solution, and c. 250 g/L $ClCl_2$ solution) and compaction curves were established for each pore fluid. Then for each sample, the required water with 5% less than optimum water content corresponding to the compaction curve was added to a specific weight of dry soil and mixed by hand. The prepared mixture was kept in a plastic bag for 24 hours for uniform distribution of water content. The static compaction technique was used for preparing the samples. Static compaction was conducted on the selected moist soil in a special mould by applying static pressure using a loading machine. The dimensions of the mould were exactly the same as the oedometer ring and were accommodated by detachable collars at both ends.

The matric suction of samples with different pore fluids was measured by using the filter paper method and SWCC was determine for each of them.

A conventional oedometer was used for conducting the tests. The prepared sample was placed in the ring between two porous stones with the load plate resting on the upper stone. Then it was wetted with distilled water. The value of swelling potential and pressure were measured at different time of wetting. At the end of each test, the water content of the sample was also measured. The experiments were repeated three times to ensure the results. The SEM tests were also performed on samples before swelling and after the free swelling test to get data about the microstructure of samples with various pore fluids.

3. Results and discussion

The vertical deformation of the samples was measured during each test and it was expressed as a percentage of the initial height at the beginning of the test (i.e., $\Delta H/H_0 \times 100$). By plotting the percent of deformation against time, the trend of variations in swelling for each pore fluid was seen. The swell-consolidation method (ASTM D4546-08) was

*Manuscript received: 11 August 2021; Revised, 02 January 2022, Accepted, 27 March 2022.
[1]. Corresponding author. MSc Student in Hydraulic Structures, Irrigation and Reclamation Department, Tehran University, Iran.
Email: sohrabkhezry@yahoo.com
[2]. Professor in Geotechnical Engineering, Irrigation and Reclamation Department, Tehran University, Iran.
[3]. PhD Candidate in Hydraulic Structures, Irrigation and Reclamation Department, Tehran University, Iran.
[4]. Lecturer of Civil Engineering, Irrigation and Reclamation Department, Tehran University, Iran.

used for determining the swelling pressure. Once completed, the sample is compressed through a consolidation test. The pressure needed to compress the sample back to its initial void ratio or height is considered the swelling pressure. The values of free swelling for distilled water, NaCl and $CaCl_2$ solution after 226 hours are 26.6, 29.7, and 26.2%, respectively. Their swelling pressures also were determined 600, 617.5, and 583.5 kPa. Moreover, the solution of NaCl causes increasing free swelling and swelling pressure 11.5 and 2.95% in comparison with distilled water as pore fluid. But the $CaCl_2$ causes reduction in the values of free swelling and swelling pressure as 1.5 and 2.75% in comparison with distilled water. It can be said that the physical and chemical behaviors of pore fluid such as pH, temperature, dielectric constant, and kind of ions are effective in swelling behaviors of soil. The calcium ions bind to the soil particles more stronger than sodium ions and result in increasing the degree of pasting particles to each other as shown in SEM results. This condition leads to the reduction of swelling in comparison with NaCl solution. The reasons can be used to explain the effect of distilled water on swelling parameters as well.

The results of SWCC for soil samples with different chemical pore fluids show that for given water content, the sample with NaCl as pore fluid has more suction than the other pore fluids. Changes in the ion concentration affect the changes of suction in soil sample. The ion concentration of NaCl and $CaCl_2$ is more than distilled water. Therefore, the produced suction in samples with other used pore fluid also is greater.

As it was explained the many free swelling and swelling pressure tests for different specific times were conducted on samples with the desired pore fluid. Then the water content of each sample was measured after the test and it was changed to suction by using the corresponding SWCC. Figure 1 shows the variations of percentage of swelling for samples with different pore fluids. It is seen from this figure that for all pore fluids, the potential of swelling is reduced by increasing suction. The results also show that at high suction, the behavior of samples with NaCl and $CaCl_2$ as pore fluid are close to each other. By reducing the suction, the percent of swelling for distilled water and $CaCl_2$ are nearly the same. It is seen from Figure 2 that by increasing the suction, the swelling pressure decreases for all pore fluids. The results also show that at high suction, the swelling pressure of the sample with $CaCl_2$ is more than distilled water but at low suction, the opposite is seen. It can be said that at high suction the calcium and sodium ions make strong bonds between the particles in comparison to distilled water which has resistance against loading as seen in SEM results.

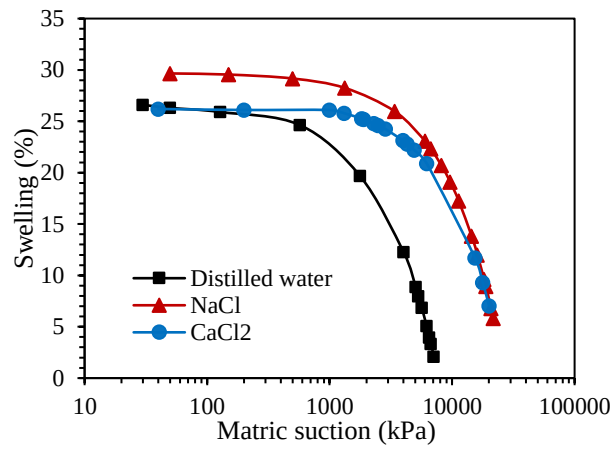


Figure 1. Variations of percentage of swelling with matric suction for samples with different pore fluids

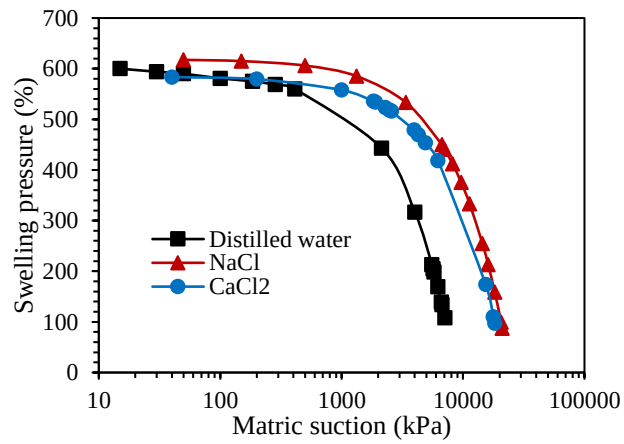


Figure 2. Variations of percentage of swelling pressure with matric suction for samples with different pore fluids

4. Conclusion

The main conclusions drawn from this study are as follows:

- Potential and swelling pressure of an expansive soil are dependent on the chemical quality of pore fluid. These parameters are a function of water content or suction;
- Comparing the results of used pore fluids revealed that at given suction, the amounts of percentage and pressure of swelling for NaCl are more than $CaCl_2$ and distilled water.

These results can be considered as a guide to the economics of their improvement method.

DOI: 10.22067/jfcei.2022.71939.1053 https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

اثر کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف بر ارتباط مکش با پتانسیل تورمی یک خاک متورم‌شونده*

سهراب خضریان[۱] علی رئیسی استبرق[۲] محدثه امینی[۳] جمال عبدالهی علی‌بیک[۴]

چکیده *در این کار تحقیقاتی، ارتباط مکش ماتریک با پتانسیل تورمی و فشار تورمی یک خاک متورم‌شونده تهیه‌شده با مایعات منفذی مختلف (آب مقطر، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) با انجام آزمایش‌های لازم، مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده که حاوی مایع منفذی آب مقطر و محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید با غلظت g/l ۲۵۰ بودند، به‌روش تراکم استاتیکی تهیه شدند و منحنی مشخصه آب و خاک با استفاده از روش فیلتر کاغذی برای هر یک از آن‌ها تعیین شد. با انجام آزمایش‌های مربوط، میزان تورم آزاد و فشار تورمی در رطوبت‌های مختلف برای هر نمونه به‌دست آمد. هم‌چنین با استفاده از منحنی مشخصه هر نمونه برای هر رطوبت، مکش معادل آن به‌دست آمد. سپس منحنی تغییرات مقادیر تورم و فشار تورمی با مکش تعیین گردید. نتایج نشان داد که کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی سبب ایجاد منحنی‌های مشخصه آب و خاک مختلف می‌گردد. از طرفی مقایسه نتایج مشخص نمود که در هر مکش مشخص، پتانسیل تورمی و فشار تورمی نمونه‌های با مایع منفذی سدیم‌کلرید بیشتر از سایر مایعات منفذی می‌باشد. علاوه بر این نتایج SEM نشان داد که ساختار خاک برای مایعات منفذی مختلف یکسان نمی‌باشد و برای یک مایع منفذی مشخص نیز، ساختار خاک در ابتدا و انتهای آزمایش متفاوت است.*

واژه های کلیدی: خاک متورم‌شونده، تورم آزاد، منحنی مشخصه، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید.

مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده از گروه خاک‌های مشکل‌آفرین محسوب می‌گردند و در اکثر نقاط جهان به‌خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک به‌وفور یافت می‌شوند. حجم این خاک‌ها در اثر تغییر رطوبت، تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌کند و این امر موجب بروز خساراتی در رابطه با سازه‌های احداث شده بر روی آن‌ها می‌گردد. بنابراین خسارات ناشی از رفتار آن‌ها که به سازه-های ساخته‌شده وارد شده‌است، بسیار قابل توجه می‌باشد. متوسط خسارات ناشی از این خاک‌ها به جاده‌ها، ساختمان‌ها، کانال‌های آبیاری و... حدود ۹ میلیارد دلار در سال برآورد شده‌است که حدود دو برابر هزینه خسارات ناشی از بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله می‌باشد[1]. پوپالا و سراتو [2] در سال ۲۰۰۹، گزارش کردند که متوسط خسارات ناشی از خاک‌های متورم‌شونده در ایالات متحده آمریکا سالانه حدود ۱۳ میلیارد دلار است که یک-سوم این خسارات در ساختمان‌های مسکونی و تجاری روی می‌دهد. اتحادیه بیمه‌گران انگلستان [3] نیز اعلام کردند که هزینه متوسط ناشی از خسارات رفتار این خاک‌ها در واحدهای ساختمانی از ۴۰۰ میلیون پوند در سال تجاوز می‌کند. هم‌چنین ریچاردز[4] در سال ۱۹۹۰ و مک‌منوس و همکاران [5] در سال ۲۰۰۴، از بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که خسارات ناشی از رفتار این خاک‌ها در ارتباط با ساختمان‌های مسکونی، خطوط لوله و نیز سایر ساختمان‌ها در استرالیا، سالانه حدود میلیاردها دلار می‌باشد. بنابراین شناخت کافی از خواص این خاک‌ها موجب افزایش ضریب اطمینان و ایمنی سازه‌های احداث شده بر روی آن‌ها و در نتیجه استفاده بیشتر از آن‌ها در ساخت پروژه‌های عمرانی می‌شود. عوامل اولیه حاکم بر رفتار این خاک ها شامل نوع کانی‌های خاک رسی، شرایط رطوبتی خاک، میزان فشار سربار و نیز مواد غیرمتورم‌شونده می‌باشد. محققانی مانند چن و همکاران [6] و الیعقوب و همکاران [7] بیان کردند که علاوه بر عوامل یاد شده، عواملی مانند ساختمان خاک، عمل متقابل ذرات خاک با یکدیگر و تاریخچه تنش نیز بر پتانسیل تورمی این خاک‌ها اثرگذار می‌باشد. محققینی مانند صدیقا و

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۵/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱/۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران
Email: sohrabkhezry@yahoo.com
(۲) استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(۳) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(۴) مربی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

همکاران[8]، کاستلانس و همکاران [9] و استبرق و همکاران [10] با انجام آزمایش‌های مختلف به این نتیجه دست یافتند که پتانسیل تورمی این خاک‌ها نه‌تنها به رطوبت، چگالی اولیه و سربار اعمال شده بر آن‌ها بستگی دارد، بلکه کیفیت شیمیایی مایع منفذی و مایع مستغرق‌کننده نیز از عوامل مؤثر می‌باشد. پژوهشگرانی مانند پوش[11]، دی مایو و همکاران [12]، رائو و شیواناندا [13] و صدیقا و همکاران [14] از نتایج آزمایش‌های خود بر روی نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده با کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف (محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) نتیجه گرفتند که کیفیت مایع منفذی بر میزان پتانسیل تورمی آن‌ها، نقش مهمی را ایفا می‌کند.

به‌طور کلی این خاک‌ها با افزایش و کاهش رطوبت، دچار تغییر حجم می‌گردند که معمولاً سازوکار تورم در مورد آن‌ها بسیار پیچیده‌تر از انقباض می‌باشد. لرد [14] بیان کرد که پدیده تورم تحت اثر عواملی مانند تبلور، پخشیدگی لایه مضاعف و وضعیت براونی ذرات نسبت‌به یکدیگر رخ می‌دهد. خاک‌های متورم‌شونده معمولاً در حالت غیراشباع هستند، به‌عبارت دیگر در آن‌ها مکش ماتریک و اسمزی وجود دارد که تغییرات مکش ماتریک در تغییر پتانسیل تورمی و فشار تورمی بسیار مؤثر می‌باشد. مکش ماتریک به تغییرات رطوبت و درجه اشباع خاک بستگی دارد به‌طوری که افزایش آن‌ها موجب کاهش مکش ماتریک و افزایش پتانسیل تورمی و فشار تورمی می‌گردد. بنابراین مکش ماتریک نقش بسیار مهمی در رفتار این خاک‌ها ایفا می‌کند. زمانی که مایع مستغرق‌کننده و مایع منفذی دارای کیفیت یکسانی نباشد، مکش اسمزی عاملی تأثیرگذار در رفتار خاک‌های متورم‌شونده می‌باشد. جانگ و همکاران [15] در سال ۲۰۱۹، آزمایش‌های مختلف تورمی را روی نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده از نوع بنتونیت که با آب مقطر و یا محلول سدیم‌کلرید با غلظت‌های مختلف مستغرق شده بود، انجام دادند. سپس آن‌ها فشار تورمی را برای این نمونه‌ها با استفاده از روش کوئی و همکاران [16]، تورم–حکیم (Swell-Consolidation) و حجم ثابت (Constant Volume) تعیین کردند. آن‌ها از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده اعلام کردند که در روش تورم–حکیم، فشار تورمی به‌دست‌آمده بیشتر از روش‌های دیگر می‌باشد. هی و همکاران [17] نیز در سال ۲۰۲۰ مطالعاتی در خصوص تورم و انقباض بنتونیت با انجام آزمایش‌هایی با استفاده از مایع مستغرق‌کننده آب مقطر و آب حاوی سدیم‌کلرید با غلظت‌های مختلف و نیز در مکش‌های گوناگون در دستگاه تحکیم معمولی انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که درصد تورم با افزایش غلظت سدیم‌کلرید، کاهش می‌یابد و در هنگام انقباض با افزایش مکش، چگالی (دانسیته) نمونه هم افزایش می‌یابد. آن‌ها هم‌چنین از اطلاعات به‌دست‌آمده نتیجه‌گیری کردند که در یک مکش ثابت، درجه اشباع نمونه مستغرق‌شده با محلول سدیم‌کلرید، بیشتر از نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر است. هم‌چنین لیانگ و همکاران [18] در سال ۲۰۲۱، با انجام آزمایش‌های متعدد روی نمونه‌هایی از یک خاک متورم‌شونده با چگالی‌های مختلف، با ایجاد مکش به‌روش اسمزی و تعیین چگونگی توزیع مایع منفذی در نمونه به‌وسیله طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NRM) اعلام کردند که روند افزایش فشار تورمی با کاهش مکش، غیریک‌نواخت می‌باشد. آن‌ها این پدیده را به شرایط توزیع مایع منفذی در توده خاک مرتبط دانستند. سان و همکاران[19] در سال ۲۰۲۲ مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای روی خواص تورمی نمونه‌هایی از یک خاک بنتونیت که قرار بود به‌عنوان پوشش و محافظ زباله‌های هسته‌ای مدفون مورد استفاده قرار گیرد، انجام دادند که در این مطالعه اثر چگالی خشک اولیه، سربار و کیفیت شیمیایی مایع مستغرق‌کننده، مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها فشار تورمی را به‌روش‌های گوناگون، تورم–تحکیم و حجم ثابت نمونه‌ها تعیین نمودند. سپس روابطی تجربی برای تعیین فشار تورمی و هم‌چنین روابط بین سربار و چگالی خشک، ارائه نمودند. فربر و همکاران [20] نیز تغییرات پتانسیل تورمی و فشار تورمی را با تغییرات رطوبت، برای یک خاک متورم‌شونده که با آب معمولی مستغرق گردید را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که مقدار تورم به مقدار رطوبت جذب شده اولیه توسط نمونه بستگی دارد. آن‌ها در کار تحقیقاتی خود از مایعات مستغرق‌کننده مختلف استفاده نمودند، لیکن از منحنی مشخصه آب و خاک (SWCC) استفاده نکردند. بررسی منابع نشان می‌دهد که گرچه در سال‌های اخیر مطالعاتی در مورد خواص تورمی خاک‌های متورم‌شونده صورت گرفته‌است، لیکن تاکنون پژوهشی در زمینه تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی آن‌ها در مکش‌های مختلف صورت نپذیرفته‌است.

ضرورت تحقیق

خاک‌های رسی متورم‌شونده می‌بایست قبل از احداث سازه و ابنیه مورد نظر بر روی آن‌ها و یا استفاده از آن‌ها به‌عنوان مصالح و منابع قرضه (در صورت عدم وجود خاک مناسب) به‌منظور اجرای پروژه‌های عمرانی، به‌سازی شوند تا خسارات ناشی از تغییر حجم ایجاد شده در آن‌ها بر اثر تغییر رطوبت به حداقل برسد. به‌سازی این خاک‌ها باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که اقتصادی بودن و تأمین ایمنی سازه احداث شده بر روی آن‌ها و یا پروژه ساخته شده با استفاده از آن‌ها، تأمین گردد. معمولاً به‌سازی این خاک‌ها بر اساس پتانسیل تورمی و فشار تورمی حداکثر (مکش صفر) صورت می‌پذیرد. لیکن ممکن است در مدت زمان در نظر گرفته‌شده برای عمر مفید پروژه مورد نظر، مکش این خاک‌ها صفر نگردد، به‌عبارت دیگر پتانسیل تورمی حداکثر (مکش صفر) در آن‌ها رخ ندهد. از طرف دیگر، یکی از کاربردهای بسیار مهم این خاک‌ها در محافظت از سرایت یا نشت مواد باطله و زباله‌های صنعتی و شهری در محیط‌زیست می‌باشد. بنابراین کیفیت مایع مستغرق‌کننده و هم‌چنین مایع منفذی نقش مهمی در عملکرد و خواص این خاک‌ها به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست، به‌عهده دارند. بنابراین هدف از این پژوهش، انجام آزمایش‌های تورمی لازم روی نمونه خاک‌های متورم‌شونده با سه کیفیت مایع منفذی (آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم-کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) و تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی آن‌ها در مکش‌های مختلف، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر و ارائه نتایج به‌گونه‌ای است که بر اساس هر مکش بتوان میزان پتانسیل و فشار تورمی مربوطه برای مایع منفذی مورد نظر را به‌دست آورد و بر اساس آن‌ها اقتصادی‌ترین روش به‌سازی را برای آن‌ها توصیه کرد. در این مطالعه ابتدا منحنی مشخصه آب و خاک برای نمونه‌های مختلف که با مایعات مذکور تهیه شده بودند، تعیین گردید. سپس آزمایش‌های اصلی (پتانسیل تورمی و فشار تورمی) بر اساس استاندارد ASTM صورت پذیرفت و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه گردید و در خصوص آن‌ها بحث صورت پذیرفت. هم‌چنین برای بررسی ریز ساختار خاک به‌وجودآمده تحت تأثیر مایع منفذی با کیفیت‌های شیمیایی مختلف، اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های خاک در دو حالت قبل و بعد از انجام آزمایش تورم آزاد شد و سپس نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه و بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک، آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید بوده‌است که در ادامه در مورد هر یک به‌طور خلاصه مطالبی ارائه می‌شود.

خاک. خاک رسی مورد استفاده در این پژوهش از اطراف قزوین تهیه شده که بر اساس طبقه‌بندی مک‌کین [۲۱] نوعی رس با قابلیت تورم‌پذیری متوسط می‌باشد. به‌منظور تهیه خاک متورم-شونده با پتانسیل تورمی زیاد برای انجام آزمایش‌ها، اقدام به تهیه مخلوطی از خاک رس و بنتونیت با نسبت وزنی ۸۰٪ (رس) و ۲۰٪ (بنتونیت) گردید که این مخلوط مطابق با طبقه‌بندی مک-کین، دارای قدرت تورمی زیاد می‌باشد. از این پس به این مخلوط به‌اختصار خاک گفته می‌شود. دلیل استفاده از خاک مصنوعی در این پژوهش این است که نمونه خاک‌هایی که در پروژه‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بایستی یک‌نواخت و تکرارپذیر باشند تا در هم‌گرایی تجزیه و تحلیل نتایج مشکلی به‌وجود نیاید، لیکن این خاصیت در خاک‌های طبیعی معمولاً وجود ندارد. از طرف دیگر، مدت زمان انجام آزمایش از فاکتورهای بسیار مهمی است که در برنامه‌ریزی (اقتصادی) پژوهش‌های آزمایشگاهی نقش مهمی ایفا می‌کند. خاک بنتونیت گرچه دارای پتانسیل تورمی بسیار زیادی است، لیکن زمان رسیدن آن به شرایط تعادل طولانی است. بنابراین با توجه به موارد مذکور، مخلوط بنتونیت و خاک رس موجود (با تورم بسیار کم) انتخاب گردید و مخلوط‌های مختلف با درصدهای گوناگون از آن‌ها تهیه و آزمایش تورم آزاد روی آن‌ها انجام شد. سپس میزان پتانسیل تورمی آن‌ها تعیین گردید و مخلوطی که بیشترین تورم را بر اساس معیار مک‌کین دارا بود، به‌عنوان خاک متورم‌شونده به‌منظور انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید. روش انتخاب خاک متورم‌شونده در این کار مشابه روش به‌کار برده‌شده توسط پژوهشگرانی مانند آلنسو و همکاران [۲۲] و نوآموز و مسروری [۲۳] می‌باشد. از مهم‌ترین کاربردهای خاک مصنوعی می‌توان به ایجاد مأمن و جایگاه مناسب برای انباشتن و دفن زباله‌های صنعتی و شهری اشاره کرد. در واقع این نوع خاک به‌عنوان یک پوشش عایق به‌منظور جلوگیری از نشت مواد آلاینده و حفاظت از محیط‌زیست کاربرد دارد. هم‌چنین یکی از

اقتصادی‌ترین و قابل دسترس‌ترین مصالح برای احداث خاک‌ریز جاده‌ها، سنگ فرش معابر و اجرای سایر سازه‌های مهندسی می‌باشد.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مشخصات خاک	مقدار
وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)	۲/۷۵
سیلت و رس (٪)	۷٤
ماسه (٪)	۲٦
شن (٪)	۰
حد روانی (LL) (٪)	۸۱
حد خمیری (PL) (٪)	۲۷/۵
شاخص خمیری (PI) (٪)	۵۳/۵
حد انقباض (SL) (٪)	۱٤/۵
درصد تورم آزاد (FS) (٪)	۲٦/٦
فشار تورمی (SP) (kPa)	٦۰۰
طبقه‌بندی سیستم متحد	CH
رطوبت بهینه (٪)	۲۲
وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)	۱٦

جدول ۲ ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصه شیمیایی	مقدار
pH	۸/٤
(dS/m) EC	۱۳/۹
(meq/l) SO_4^{2-}	۱۱۲
(meq/l) Cl^-	٤۹
(meq/l)HCO_3^-	۲/٦
(meq/l)CO_3^{2-}	۰
(meq/l)Na^+	۱٤۲
(meq/l)Ca^{2+}	۲۱
(meq/l)Mg^{2+}	٦
(meq/l)K^+	۰/۳٤

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این خاک بر اساس استاندارد ASTM تعیین شده و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده‌است. با توجه به نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ و دانه‌بندی در سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) خاک مورد نظر رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) طبقه‌بندی می‌گردد. هم‌چنین نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد که وزن واحد حجم خشک بیشینه این خاک ۱٦ kN/m^3 و رطوبت بهینه آن ۲۲٪ است. ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز تعیین گردید و نتایج آن در جدول (۲) آورده شده‌است.

آب. در این پژوهش برای انجام تمامی آزمایش‌های اولیه (شناسایی) خاک مورد استفاده، تهیه محلول‌های نمک سدیم‌کلرید (NaCl) و کلسیم‌کلرید ($CaCl_2$)، ساخت نمونه‌های آزمایشی و مستغرق کردن آن‌ها درون دستگاه تحکیم از آب مقطر استفاده گردید. میزان اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) آب مقطر استفاده‌شده به‌ترتیب برابر ۷/٤ و ۰/۰۰۹ dS/m می‌باشد.

جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول‌های نمک مورد استفاده

مشخصه	سدیم‌کلرید	کلسیم‌کلرید
جرم مولی (g/mol)	۵۸/٤٤	۱۱۰/۹۹
pH محلول	۸/۲	۹/۳
(dS/m) EC	۳۹۱	۳۹۱
غلظت کل مواد جامد محلول (g/l)	۲۵۰	۲۵۰
درصد وزنی محلول (٪)	۲۲/۳	۲۲/۳۳
غلظت مولار محلول (mol/l)	٤/۲۸	۲/۲۵
چگالی محلول (mg/m^3)	۱/۱۲۱	۱/۱۲

محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید. در ایران، دریاچه‌های مختلفی با کیفیت‌های شیمیایی گوناگون آب وجود دارد که در فرایند تشکیل خاک نقش دارند؛ به‌عنوان مثال دریاچه ارومیه دارای آبی با شوری بیش از ۳۰۰ گرم بر لیتر می‌باشد[24]. بنابراین خاک رسوب‌یافته در این کیفیت آب، حاوی مایع منفذی با کیفیت غیر از آب طبیعی می‌شود. لذا در این پژوهش، نمونه‌هایی با مایع منفذی محلول سدیم‌کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر انتخاب گردید و برای مقایسه، نمونه‌هایی حاوی مایع منفذی آب مقطر و کلسیم‌کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و اثر آن‌ها بر پتانسیل تورمی، فشار تورمی و منحنی مشخصه

آب و خاک، تعیین گردید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول‌های نمک مورد استفاده در جدول (۳) آورده شده‌است.

تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌هایی از خاک که با مایع منفذی مختلف (آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) تهیه شده بودند، صورت پذیرفت. سپس با استفاده از منحنی‌های تراکمی به‌دست‌آمده، اقدام به ساخت نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های تورمی گردید. ساخت نمونه به این ترتیب بود که روی شاخه خشک منحنی تراکم مربوط به هر مایع منفذی، نقطه‌ای که رطوبت آن ٪۵ کمتر از رطوبت بهینه بود، انتخاب و وزن واحد حجم خشک متناظر با آن از منحنی مذکور تعیین گردید. سپس رطوبت اولیه هر کدام از نمونه‌ها با افزودن مایع مربوطه به رطوبت انتخاب شده از منحنی تراکمی رسانده شد. نمونه‌های حاصله در یک قالب ویژه و به‌وسیله یک دستگاه بارگذاری نشان داده شده در شکل (۱) (مشابه با دستگاه و قالب به‌کار برده شده توسط سلطانی و استبرق[25]) در سه لایه با اعمال بار استاتیکی متراکم گردیدند. مقدار بار وارده به هر لایه از روش سعی و خطا تعیین گردید و سرعت بارگذاری نیز ۱/۵ mm/min انتخاب شد. فشار وارد شده به هر لایه یکسان بود و مقدار آن به‌گونه‌ای تعیین گردید که وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت نمونه ساخته‌شده، معادل مشخصات نقطه انتخابی روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی مربوطه گردد. نمونه‌های تهیه شده از این روش دارای ابعادی معادل قالب دستگاه تحکیم مورد استفاده (ارتفاع ۲ سانتی‌متر و قطر ۷/۵ سانتی‌متر) می‌باشند. علت استفاده از روش تراکم استاتیکی به‌جای تراکم دینامیکی به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمایشی، این است که تراکم استاتیکی تطابق و شباهت بیشتری با شرایط موجود در طبیعت دارد (به‌عنوان مثال پدیده رسوب‌گذاری نوعی تراکم استاتیکی است) و از این رو شرایط واقعی‌تری از پدیده تورم و انقباض را نشان می‌دهد. مطابق با نظر پژوهشگران مختلف از جمله استبرق و همکاران[26] و ویلر و سیواکومار[27]، تراکم استاتیکی سبب ایجاد نمونه‌هایی یک‌نواخت‌تر و تکرارپذیرتر نسبت‌به تراکم دینامیکی می‌گردد.

شکل ۱ الف) قالب و ب) دستگاه بارگذاری به‌منظور ساخت نمونه‌ها

آزمایش‌ها

در این پژوهش آزمایش‌های تورم آزاد، فشار تورمی، تعیین منحنی مشخصه آب و خاک، SEM و تعیین پتانسیل و فشار تورمی نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی متفاوت (آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید) در مکش‌های مختلف، صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش با سه بار تکرار صورت پذیرفت که میانگین نتایج آن‌ها به‌عنوان نتیجه نهایی، گزارش گردید. در ادامه به شرح آزمایش‌های مورد نظر پرداخته می‌شود.

آزمایش تورم آزاد و فشار تورمی

در این پژوهش، آزمایش تورم آزاد با استفاده از دستگاه تحکیم معمولی یا ادومتر و بر اساس استاندارد ASTM-D4546-08 بر روی نمونه‌های خاک با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی صورت پذیرفت. به‌منظور انجام این آزمایش، ابتدا نمونه مطابق با شرایط مورد نظر تهیه گردید. پس از تهیه نمونه و قرار دادن آن در دستگاه تحکیم، بدون اعمال هرگونه سرباری، نمونه با آب مقطر مستغرق و میزان تغییر ارتفاع آن (ΔH) در گام‌های زمانی مختلف با استفاده از اندازه‌گیر قرائت و ثبت گردید. ثبت این تغییرات تا ثابت شدن (تغییرات) ارتفاع نمونه ادامه یافت. سپس بر اساس داده‌های ثبت شده، میزان درصد تورم خاک مورد آزمایش در زمان‌های مختلف بر اساس رابطه زیر تعیین گردید:

$$FS\ (\%) = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق:

FS درصد تورم آزاد، ΔH میزان تغییرشکل یا ارتفاع نمونه در زمان مورد نظر(mm)، H_0 ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی یا ارتفاع قالب تحکیم (۲۰ میلی‌متر) می‌باشد.

لازم به ذکر است که درصد تورم نهایی (FS_{final}) مطابق با رابطه (۱)، با جای‌گذاری آخرین تغییرشکل ایجاد شده در نمونه آزمایشی (ΔH) که مقدار آن با گذشت زمان ثابت می‌شود، به‌دست می‌آید. تغییرات درصد تورم آزاد خاک مورد آزمایش در برابر زمان، از آغاز آزمایش تورم آزاد تا رسیدن به میزان تورم نهایی نشان‌دهنده منحنی تورم آزاد نمونه خاک می‌باشد.

به‌منظور انجام آزمایش فشار تورمی، از نمونه استفاده شده در آزمایش تورم آزاد استفاده گردید. برای این منظور پس از اتمام آزمایش تورم آزاد، با اعمال سربار و افزایش آن به نمونه خاک به‌صورت گام‌به‌گام از طریق سیستم بارگذاری اقدام به فشرده کردن نمونه تحت تأثیر بارهای مختلف گردید و تغییرشکل حاصله به‌ازای هر سربار از طریق اندازه‌گیر دستگاه قرائت و ثبت شد. اعمال فشار به نمونه تا جایی ادامه یافت که مقدار تغییرشکل حاصل از تورم آزاد در نمونه به‌طور کامل محو گردد. با ترسیم تغییرات درصد تغییرشکل در برابر فشار وارده به نمونه خاک، منحنی فشار تورمی به‌دست می‌آید. مقدار فشار تورمی نهایی (SP_{final}) برابر است با مقدار متناظر محل تلاقی منحنی فشار تورمی با محور افقی یا فشار اعمال شده به نمونه، یعنی نقطه‌ای که میزان تغییرشکل ایجادشده در نمونه برابر صفر گردد و یا ارتفاع نمونه به مقدار اولیه آن (۲۰ mm) رسیده باشد. برای تعیین میزان فشار تورمی در هر مرحله بارگذاری نمونه خاک از رابطه (۲) استفاده شد:

$$SP=\frac{F}{A} \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق:

SP میزان فشار تورمی (kPa)، F نیروی اعمال شده به خاک توسط سامانه بارگذاری تحکیم (kN) و A سطح مقطع نمونه آزمایشی با قطر ۷۵ میلی‌متر می‌باشد.

تعیین منحنی مشخصه آب و خاک

منحنی مشخصه آب و خاک عبارت است از تغییرات مقادیر رطوبت وزنی، حجمی و یا درجه اشباع با مکش ماتریک. در آزمایشگاه معمولاً تعیین این منحنی با استفاده از روش فیلتر کاغذی و یا استفاده از صفحات فشاری امکان‌پذیر می‌باشد. فردلاند و رهاردجو [۲۸] بیان کردند که روش فیلتر کاغذی قادر به اندازه‌گیری مکش در محدوده وسیعی از مقادیر می‌باشد. در شرایط فعلی، روش مذکور به‌عنوان یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری مکش شناخته شده‌است (ASTM-D5298-10). این روش نسبتاً ساده و قابل اجرا در آزمایشگاه است و به تجهیزات آزمایشگاهی ویژه‌ای نیاز ندارد. پژوهشگرانی مانند ریدلی و همکاران [۲۹] و لیونگ و همکاران [۳۰] بیان کردند که این روش، مناسب‌ترین روش برای تعیین مکش خاک است. در این پژوهش منحنی مشخصه آب و خاک با استفاده از روش فیلتر کاغذی و بر اساس استاندارد ذکر شده، تعیین گردید.

تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی در مکش‌های مختلف

هدف از انجام این کار تحقیقاتی تعیین تغییرات پتانسیل تورمی و فشار تورمی با مکش (درصد رطوبت) برای نمونه‌های تهیه شده با مایعات منفذی مختلف می‌باشد. از نتایج منحنی تغییرات درصد تورم مقابل زمان به‌دست‌آمده از نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی، به‌منظور مشخص کردن زمان‌های مناسب برای تعیین درصد تورم در مقابل مکش استفاده گردید. سپس نمونه‌های تهیه شده مستغرق گردیدند، به‌طوری که مدت زمان انجام این مرحله مطابق با زمان انتخاب شده بود. بنابراین تحت تأثیر این شرایط، نمونه‌های مختلف بعد از رسیدن به درصد تورم در زمان مشخص، از دستگاه خارج شدند و رطوبت آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از منحنی مشخصه آب و خاک، مکش مربوط به این درصد رطوبت تعیین گردید. به‌عبارت دیگر درصد تورم در مکش مربوطه برای نمونه‌های مختلف مشخص شد. فشار تورمی نیز روی نمونه‌های مشابه و در زمان‌های مشخص تعیین گردید و در نتیجه برای مکش‌های مختلف، درصد تورم و فشارتورمی در رابطه با نمونه‌های خاک با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی برآورد شد.

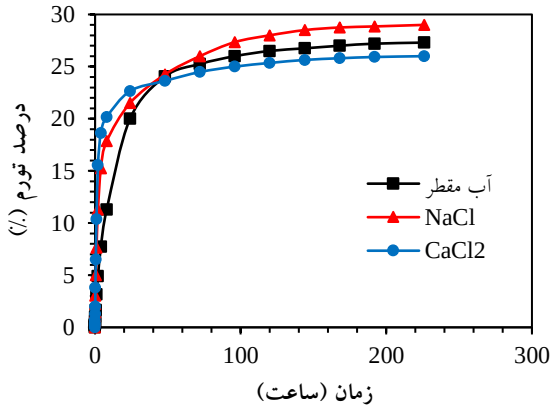
SEM

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی، امکان بررسی ریزساختار خاک در ابعاد میکرونی را فراهم کرده‌است. برای تهیه تصاویر SEM لازم است نمونه خشک باشد و به ابعاد کوچک

(حجم ۱ سانتی‌متر مکعب) در آمده باشد. هم‌چنین عمل پوشش‌دهی طلا روی نمونه قبل از عکس‌برداری می‌بایست صورت بگیرد. در این پژوهش، تصاویر SEM نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید در دو حالت قبل و بعد از انجام آزمایش تورم آزاد بررسی شده‌است. این آزمایش در آزمایشگاه SEM پژوهشگاه مواد و انرژی به انجام رسید.

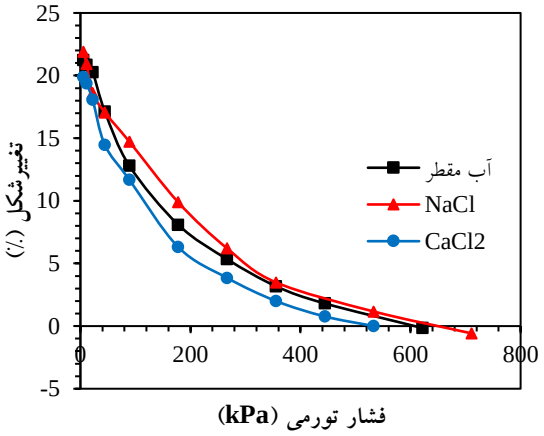
نتایج

نتایج آزمایش تورم آزاد برای خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی (آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید) در شکل (۲) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد تورم نمونه ساخته‌شده با مایع منفذی آب مقطر پس از حدود ۲۲۶ ساعت به تعادل رسیده‌است و میزان تورم آزاد آن ۲۶/۶ ٪ به‌دست آمده‌است. این در صورتی است که میزان تورم آزاد نمونه حاوی محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید به‌ترتیب برابر ۲۹/۷ ٪ و ۲۶/۲ ٪ می‌باشد.



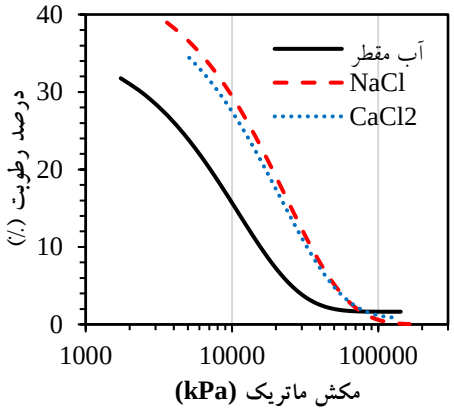
شکل ۲ منحنی تغییرات درصد تورم با زمان در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

منحنی فشار تورمی برای نمونه با کیفیت‌های مایع منفذی گوناگون، در شکل (۳) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، میزان فشار تورمی نهایی برای نمونه‌های حاوی مایع منفذی آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید به‌ترتیب برابر ۶۰۰، ۶۱۷/۵ و ۵۸۳/۵ کیلوپاسکال تعیین گردیده‌است.



شکل ۳ منحنی تغییرات درصد تغییرشکل با فشار اعمال شده به نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

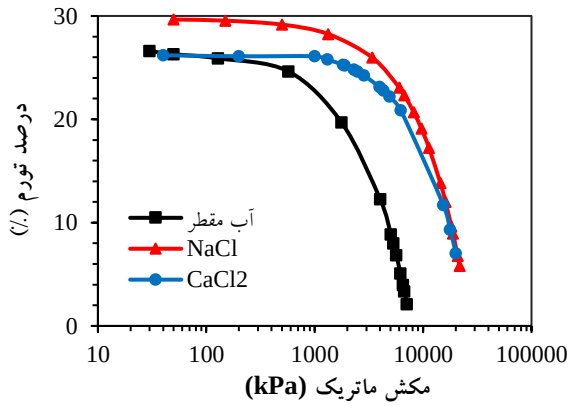
منحنی مشخصه آب و خاک برای نمونه‌های ساخته شده با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی (آب، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید) در شکل (٤) نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌ازای هر رطوبت ثابتی، نمونه حاوی مایع منفذی سدیم‌کلرید دارای مکش ماتریک بیشتری نسبت‌به دو کیفیت دیگر مایع منفذی می‌باشد. در واقع محلول سدیم‌کلرید سبب ایجاد مکش ماتریک بیشتری در مقایسه با آب مقطر و محلول کلسیم‌کلرید شده‌است.



شکل ٤ منحنی مشخصه آب و خاک برای نمونه‌های خاک تهیه شده با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

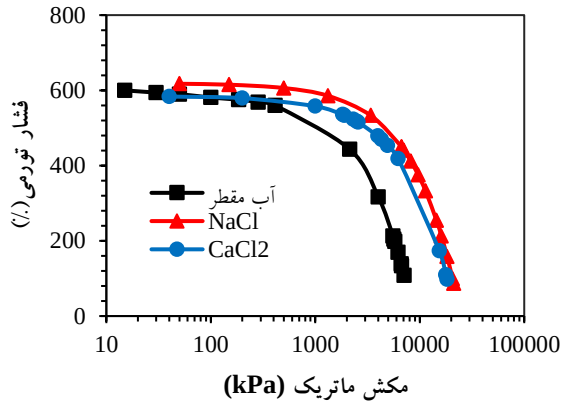
همان‌طور که بیان شد، درصد رطوبت نمونه‌های خاک با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی در زمان‌های متفاوت تعیین گردید. سپس با استفاده از منحنی‌های مشخصه آب و خاک

(شکل ٤) مکش ماتریک به‌ازای نتایج درصد رطوبت، تعیین شد. شکل (٥) تغییرات درصد تورم نمونه‌های مختلف خاک در برابر مکش ماتریک را که با انجام آزمایش مشخص گردید، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (٥) مشاهده می‌شود، با افزایش مکش درصد تورم خاک برای هر سه نمونه کاهش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید، موجب افزایش مکش ماتریک در خاک به‌ازای یک درصد تورمی ثابت می‌شود. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که در مکش‌های زیاد، محلول کلسیم‌کلرید رفتار تورمی مشابهی را در مقایسه با محلول سدیم‌کلرید دارد و منحنی این دو به‌هم نزدیک است. لیکن با کاهش مکش، منحنی مربوط به نمونه خاک حاوی محلول کلسیم‌کلرید به‌سمت منحنی نمونه خاک حاوی محلول آب مقطر متمایل می‌شود. به‌عبارت دیگر رفتار تورمی آن به رفتار تورمی آب مقطر نزدیک‌تر می‌شود. در واقع فقط در حالت رطوبت اشباع (مکش ماتریک صفر)، درصد تورم نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر ٠/٤ ٪ بیشتر از درصد تورم نمونه ساخته‌شده با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید می‌باشد و این مقدار نیز نامحسوس است. با افزایش مکش مقدار تورم آزاد محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از آب مقطر می‌شود و هرچه میزان مکش بیشتر شود، اختلاف آن‌ها بیشتر می‌گردد.



شکل ٥ تغییرات درصد تورم با مکش در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

شکل (٦) تغییرات فشار تورمی نمونه‌های خاک را در برابر مکش ماتریک نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فشار تورمی نمونه‌های خاک با کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی با افزایش مکش، کاهش می‌یابد. این شکل هم‌چنین نشان می‌دهد که در مکش‌های زیاد، فشار تورمی خاک با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از خاک با مایع منفذی آب مقطر می‌باشد، لیکن در مکش‌های نزدیک به صفر این رابطه معکوس می‌شود.

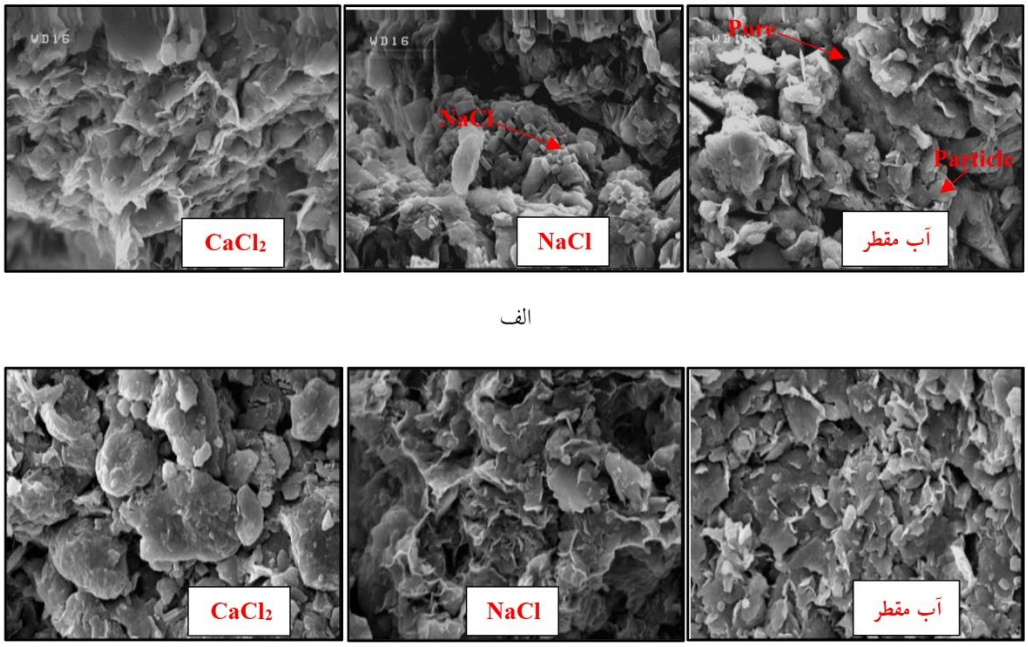


شکل ٦ تغییرات فشار تورمی با مکش در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

در جدول (٤) نتایج تمامی آزمایش‌ها برای چندین زمان مختلف، از ابتدای مستغرق کردن نمونه و هم‌چنین در طول آزمایش آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد زیادی از تغییرات در ٤٨ ساعت اولیه رخ داده‌است. لازم به ذکر است که در جدول (٤) تعداد محدودی از داده‌های مربوط آورده شده‌است؛ به‌عنوان مثال داده‌های منحنی‌های مندرج در شکل‌های (٥) و (٦)، شامل نتایج ١٢ آزمایش با سه بار تکرار در زمان‌های مختلف می‌باشد. به‌طوری‌که برای استحصال آن‌ها در مجموع ٣٦ آزمایش (با در نظر گرفتن سه تکرار) انجام گردیده که در این جدول تنها نتایج ٤ آزمایش برای هر یک از مایعات منفذی آورده شده‌است.

جدول ٤ مقادیر تورم، فشار تورمی، رطوبت و مکش در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی در زمان‌های متفاوت

نمونه	ساعت	تورم (٪)	فشار تورمی (kPa)	رطوبت (٪)	مکش (kPa)
آب مقطر	۱	۳/۳۳	۱۳۳/٦۲	۲۰/٦٦	٦۷۲٦/٤٤
	۸	۸/۸۵	۲۱۲/۸۸	۲۳/۸٤	۵۰۵۲/۱٤
	٤۸	۲۲/٦۰	۵۵۹/۷٤	۳۵/۱۸	۵۷٤/۰۲
	۲٤۰	۲٦/٦۰	٦۰۰	۳۷/۲۰	۳۰
NaCl	۱	٦/۷۷	۹۹/٤٤	۱۸/۳٦	۲۰۸۵٦/۰۱
	۸	۱۷/۲٤	۳۳۳/۰۳	۲۷/۸۰	۱۱۳۳۷/۹۱
	٤۸	۲٤/۲۵	٤٤۰/٦٦	۳۳/۹۹	٦۷۲۷/۱٤
	۲٤۰	۲۹/٦٦	٦۱۷/٤۹	٤۳/۰۱	۵۰
$CaCl_2$	۱	۹/۳۱	۱۰۹/۷۲	۱۹/۲۸	۱۷۷۸۵/۷۳
	۸	۲۲/۸	٤٦۹/۷۸	۳۵/۷۲	٤۳۰۰/۳
	٤۸	۲٤/٦۱	۵۱۸/۲۸	۳۸/۸٤	۲٤۸٤/۰۳
	۲٤۰	۲٦/۲۰	۵۸۳/۵۳	٤۰/۰۲	٤۰



الف

شکل ۷ تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر در رابطه با نمونه‌های خاک تهیه‌شده با سه کیفیت مختلف مایع منفذی، الف) قبل از شروع آزمایش تورم‌آزاد و ب) در پایان آزمایش تورم‌آزاد

شکل (۷) تصاویر SEM نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی آب مقطر، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید را در دو حالت قبل و بعد از انجام آزمایش تورم آزاد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۷– الف) مشاهده می‌گردد، نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر دارای ساختار لخته می‌باشد که با اضافه کردن محلول‌های نمک، درجه لخته شدن نمونه‌های خاک افزایش می‌یابد. هم‌چنین شکل (۷– ب) نشان می‌دهد که با انجام آزمایش تورم آزاد، درجه لخته شدن نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی مختلف در مقایسه با حالت قبل از شروع آزمایش، افزایش قابل

توجهی داشته‌است که تغییر ذکرشده در نمونه حاوی مایع منفذی کلسیم‌کلرید، بیشتر از دو نمونه دیگر بوده‌است. هم‌چنین مقایسه ساختار دو نمونه حاوی مایع منفذی سدیم‌کلرید در دو حالت قبل و بعد از آزمایش تورم آزاد (شکل‌های ۷- الف و ۷- ب) نشان می‌دهد که قبل از آزمایش تورم آزاد، بخشی از محلول سدیم‌کلرید به‌صورت بلور نمک بین ذرات خاک قرار گرفته‌است که این بلورها با انجام آزمایش تورم آزاد در نمونه حل شده و یا از آن خارج شده‌است. هم‌چنین مقایسه ساختار نمونه‌های تهیه‌شده قبل از آزمایش تورم آزاد (شکل ۷- الف) نشان می‌دهد که ذرات، دارای ساختار لخته و چسبیده به‌هم می‌باشند. لیکن در خاتمه آزمایش (شکل ۷- ب) ذرات به‌صورت جدا از هم درآمده‌اند. به‌عبارت دیگر در نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر، هیچ‌گونه پیوندی بین ذرات مشاهده نمی‌شود و این پیوندها در نمونه‌های با مایع منفذی کلسیم‌کلرید و سدیم‌کلرید نیز کاهش یافته‌است. بنابراین در طول انجام آزمایش تورم، ساختار اولیه خاک دستخوش تغییر می‌گردد.

بحث

ذرات خاک‌های رسی دارای بار الکتریکی منفی می‌باشند و وقتی که آب به رس اضافه می‌شود، کاتیون‌ها و آنیون‌هایی که در بین ذرات وجود دارند، در آب شناور می‌شوند. بنابراین اطراف ذرات رس را مایعی که حاوی این آنیون‌ها و کاتیون‌ها می‌باشد، فرا می‌گیرد. در این مایع و در نزدیکی لایه رس، غلظت کاتیون‌ها زیاد و غلظت آنیون‌ها کم است که با فاصله گرفتن از لایه رس، غلظت کاتیون‌ها کاهش و غلظت آنیون‌ها افزایش می‌یابد، تا این‌که کاتیون‌ها و آنیون‌ها به تعادل برسند. این لایه آب که اطراف لایه رس را فرا گرفته و حاوی ذرات باردار می‌باشد، لایه مضاعف نامیده می‌شود که ضخامت آن به عوامل متعددی مانند درجه حرارت، ثابت دی‌الکتریک، غلظت الکترولیت و... بستگی دارد. تغییر در ضخامت لایه مضاعف، موجب دگرگونی در ساختار خاک می‌گردد به‌طوری‌که کاهش ضخامت آن موجب افزایش نیروهای جاذبه و ایجاد ساختمان لخته و افزایش ضخامت آن موجب ایجاد ساختمان پراکنده می‌گردد. از خصوصیات دیگر ذرات رس، خاصیت تبادل یونی آن‌ها می‌باشد. به‌طور کلی نوع و مقدار کاتیون‌های تبادلی تابعی از ظرفیت و شعاع آب هیدراته آن‌ها می‌باشد. کاتیون‌هایی که دارای ظرفیت بیشتری می‌باشند، با نیروی زیادتری نسبت‌به کاتیون‌های دارای ظرفیت پایین‌تر جذب می‌گردند. در ظرفیت مساوی نیز کاتیون با شعاع آب هیدراته کمتر با نیروی بیشتری نسبت‌به کاتیون با شعاع آب هیدراته بیشتر، جذب ذره رس می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که وقتی نمونه‌ها با مایع حاوی کلسیم‌کلرید ساخته می‌شوند، یون‌های کلسیم نسبت‌به یون‌های سدیم با قدرت بیشتری جذب لایه رس می‌گردد. در این حالت ساختمان خاک حالت لخته‌شده‌تری نسبت‌به سدیم‌کلرید دارد و ذرات به‌هم چسبیده و دارای سطح ویژه کمتری می‌باشند و در نتیجه مقدار پتانسیل تورمی کاهش می‌یابد. تبادل یونی در نمونه خاک تهیه شده از مایع منفذی محلول سدیم‌کلرید نسبت‌به نمونه حاوی آب مقطر بیشتر صورت می‌پذیرد، بنابراین دارای پتانسیل تورمی بیشتری نسبت‌به آب مقطر است. در هر صورت همان‌طور که نتایج SEM (شکل ۷- الف) نشان می‌دهد، نمونه‌های تهیه شده با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی، دارای ساختار متفاوت می‌باشند که این امر نقش مهمی در پتانسیل تورمی آن‌ها دارد. همان گونه که بیان شد نمونه‌های ساخته شده، در حالت غیراشباع می‌باشند و وقتی که مستغرق می‌گردند، ابتدا مکش ماتریک آن‌ها از بین می‌رود و سپس مکش اسمزی نقش مهمی در رفتار تورمی خاک ایفا می‌کند.

نتایج شکل‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهند که وجود محلول سدیم‌کلرید به‌عنوان مایع منفذی، فاکتورهای تورم آزاد و فشار تورمی خاک را نسبت‌به آب مقطر به‌ترتیب به‌میزان ۱۱/۵٪ و ۲/۹۵٪ افزایش می‌دهد و وجود کلسیم‌کلرید، تورم آزاد و فشار تورمی خاک را نسبت‌به آب مقطر به‌ترتیب به‌میزان ۱/۵ ٪ و ۲/۷۵ ٪ کاهش می‌دهد. خواص فیزیکی و شیمیایی مایع منفذی مانند اسیدیته (pH)، درجه حرارت، ثابت دی‌الکتریک، نوع یون‌های محلول و... تأثیر به‌سزایی بر پتانسیل تغییر حجم خاک دارد به‌طوری‌که عمل متقابل بین مایع منفذی و ذرات رس می‌تواند موجب کاهش و یا افزایش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف و در نتیجه تغییر ساختمان خاک گردد[31,33]. میزان تورم آزاد نمونه ساخته‌شده با محلول کلسیم‌کلرید کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد (شکل ۲). همان طور که بیان شد یون کلسیم با نیروی بیشتری نسبت‌به یون سدیم به ذرات خاک متصل می‌شود که با مستغرق کردن نمونه‌ها، امکان جدایی یون کلسیم از ذرات رس خیلی کمتر از یون سدیم است و خاک از ساختار لخته‌شده برخوردار است. بنابراین در این حالت ذرات به‌هم چسبیده‌اند و

از قدرت تورمی کمتری برخوردار هستند. در نمونه‌های ساخته‌شده از محلول سدیم‌کلرید، یون‌های سدیم با نیروی کمتری نسبت‌به یون کلسیم به ذرات رس متصل‌اند و هنگام مستغرق کردن نمونه، امکان جدا شدن آن‌ها از ذرات رس بیشتر است. بنابراین درجه لخته شدن خاک نسبت‌به محلول کلسیم-کلرید کاهش می‌یابد و در نتیجه قدرت تورمی آن افزایش می‌یابد. شکل (۲) نشان می‌دهد که نمونه تهیه شده از آب مقطر حالت بینابین دارد، زیرا مایع منفذی آن، فاقد هرگونه یون می‌باشد و فقط پدیده آب‌شویی در نمونه رخ می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۲) با پژوهش‌های انجام شده توسط پولات و همکاران [34]، دلج و همکاران[35] و بوازا و همکاران [36] مطابقت دارد. لیکن با نتایج ارائه‌شده توسط رائو و شیواناندا [13] مغایرت دارد که نوع خاک و میزان غلظت محلول‌های نمکی به‌کار برده شده، ممکن است در این امر تأثیرگذار باشد و سبب بروز این عدم هماهنگی شده باشد.

شکل (۳) تغییرات فشار تورمی را برای نمونه‌های خاک با مایع منفذی مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۳) مشاهده می‌گردد که در حالت اشباع (مکش صفر)، فشار تورمی نمونه با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید، کمتر از نمونه‌های حاوی مایع منفذی آب مقطر و سدیم‌کلرید می‌باشد. شکل (۷- ب) تصاویر SEM را در حالت مکش صفر برای نمونه‌های با مایع منفذی مذکور نشان می‌دهد. ساختمان نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر در حالت مکش صفر، متشکل از ذرات نسبتاً ورقه‌ای‌شکل است که بدون هیچ‌گونه اتصالی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، درحالی‌که ساختمان نمونه خاک ساخته‌شده با محلول سدیم‌کلرید، به‌صورت صفحات ورقه‌ای مجتمع شده است و فضاهای بین ذرات آن در مقایسه با نمونه حاوی آب مقطر، نسبتاً بیشتر است. علاوه‌بر این ساختار نمونه خاک حاوی مایع منفذی کلسیم‌کلرید نیز در شکل (۷- ب) آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات به‌صورت چسبیده به‌هم (لختگی با درجه زیاد) با فضاهای بسیار زیاد در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. حال اگر این سه نمونه تحت تأثیر بار یکسان قرار بگیرند، تغییر مکان ذرات در نمونه حاوی مایع منفذی کلسیم‌کلرید در مقایسه با دو نمونه دیگر بیشتر است، زیرا در این نمونه ذرات به‌صورت چسبیده به‌هم و با فضاهای نسبتاً بزرگی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این تغییرشکل و جابه‌جایی ذرات در نمونه حاوی آب مقطر به‌علت کمتر بودن درجه لختگی، کمتر از نمونه حاوی کلسیم‌کلرید است. بنابراین برای رسیدن به حالت اولیه قبل از تورم، نیروی بیشتری لازم است که این امر سبب افزایش فشار تورمی می‌شود.

شکل (٤)، منحنی‌های مشخصه آب و خاک را برای نمونه-هایی از خاک با کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف (آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در یک درصد مشخصی از رطوبت، مکش برای آب مقطر کمتر از دو مایع منفذی دیگر است. این نتایج با یافته‌های فردلاند و رهاردجو [۲۸] مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند که اگر غلظت یونی مایع منفذی افزایش یابد، مکش کل نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین از آن‌جا که غلظت یونی سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید بیشتر از آب مقطر می‌باشد، مکش حاصل از آن‌ها در مقایسه با آب مقطر افزایش یافته‌است (شکل ٤). این نتایج با یافته‌های آزمایشگاهی پژوهشگرانی مانند پولات و همکاران [٣٤] نیز هماهنگ می‌باشد. از طرفی بایراک [۳۷] در سال ۲۰۰۸ از پژوهش‌های خود نتیجه گرفت که مایعات منفذی که حاوی محلول‌هایی با یون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم و یا منیزیم می‌باشند، مکش بیشتری در مقایسه با محلول‌هایی با یون-های تک‌ظرفیتی مانند سدیم و پتاسیم ایجاد می‌کنند، لیکن نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش خلاف این نتیجه‌گیری را نشان می-دهد. عدم انطباق این امر ممکن است به این دلیل باشد که وی از خاک بنتونیت در پژوهش خود استفاده کرده‌است. لیکن پولات و همکاران نشان دادند که اگر مایع منفذی حاوی یون‌های دو ظرفیتی باشد، مکش کمتری را در مقایسه با یون تک‌ظرفیتی ایجاد می‌نماید که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. هم‌چنین باید توجه داشت از آن‌جا که مکش ماتریک ارتباط مستقیمی با شعاع مویینگی بین ذرات دارد، بنابراین با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که شعاع مویینگی در نمونه ساخته‌شده با آب مقطر بیشتر از سایر محلول‌ها می‌باشد و در نتیجه مکش ایجادشده در آن در رطوبت ثابت، کمتر از سایر محلول‌ها است. مکش کل در خاک شامل دو نوع مکش ماتریک و اسمزی می‌باشد. افزودن محلول-های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید به خاک به‌عنوان مایع منفذی، سبب افزایش مکش اسمزی خاک نسبت‌به شرایط مایع منفذی آب مقطر می‌گردد و در نتیجه مکش کل نیز افزایش می‌یابد. مطابق با نظر فردلاند و رهاردجو [28]، افزایش در مکش کل سبب افزایش در مکش ماتریک و اسمزی به‌طور هم‌زمان می-گردد. افزایش در مکش ماتریک خاک در شرایط استفاده از

محلول‌های نمک به‌عنوان مایع منفذی نیز بر همین اساس قابل توجیه است. رابطه‌ای بین مکش ماتریک و درصد تورم در شکل (۵) برای کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی شامل آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید نشان داده شده‌است. پاندیا و ساچن [۳۸] اعلام کردند که هر قدر میزان مکش ماتریک خاک بیشتر باشد، مقدار تورم و فشار تورمی آن کمتر است. با توجه به شکل‌های (۵) و (٦) نتایج این گزارش با یافته‌های این پژوهشگران مطابقت دارد.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش مکش، درصد تورم برای هر سه نمونه خاک کاهش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از سدیم‌کلرید و کلسیم-کلرید موجب افزایش مکش ماتریک در خاک به‌ازای یک درصد تورم مشخص می‌شود. بررسی نتایج در این شکل نشان می‌دهد که محلول کلسیم‌کلرید در مکش‌های زیاد، رفتار تورمی مشابه سدیم‌کلرید دارد و منحنی این دو به‌هم نزدیک است. لیکن با کاهش مکش، منحنی محلول کلسیم‌کلرید به‌سمت منحنی محلول آب مقطر متمایل می‌شود و رفتار تورمی آن نیز به رفتار تورمی آب مقطر نزدیک‌تر می‌شود. در واقع فقط در رطوبت اشباع (مکش ماتریک صفر)، درصد تورم آب مقطر بیشتر از درصد تورم محلول کلسیم‌کلرید می‌باشد و این مقدار نیز نامحسوس است. با افزایش مکش ماتریک، مقدار تورم محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از آب مقطر می‌شود و هر قدر میزان مکش افزایش یابد، اختلاف آن‌ها بیشتر می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که رفتار تورمی خاک در مکش‌های غیرصفر بسیار متفاوت‌تر از مکش صفر می-باشد که دلیل این تفاوت رفتاری این است که در حالت اشباع (مکش صفر)، خصوصیات تورمی خاک تحت تأثیر مکش اسمزی قرار دارد. این در حالی است که در شرایط غیراشباع (مکش‌های غیرصفر) علاوه‌بر مکش اسمزی، مکش ماتریک نیز بر خصوصیات تورمی خاک اثر می‌گذارد و هر قدر مقدار مکش ماتریک در خاک بیشتر باشد، تأثیر آن بر قدرت تورمی نمونه نیز مشهودتر است [۳۹].

شکل (٦) تغییرات مکش ماتریک و فشار تورمی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش مکش، فشار تورمی نمونه‌های خاک با کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی کاهش می‌یابد. لیانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۱، طی انجام آزمایش‌های متعدد روی نمونه‌هایی از یک خاک متورم-شونده با چگالی‌های مختلف، با ایجاد مکش به‌روش اسمزی و تعیین توزیع مایع منفذی در نمونه به‌وسیله NRM نتیجه‌گیری کردند که روند افزایش فشار تورمی با کاهش مکش، غیریک‌نواخت می‌باشد. آن‌ها این پدیده را به شرایط توزیع مایع منفذی در توده خاک مرتبط دانستند. از آن‌جا که در آن روش، شرایط انجام آزمایش با شرایط انجام‌شده در این کار پژوهشی متفاوت می‌باشد، به همین دلیل نتایج یکسان نیست و نمی‌توان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. این شکل هم‌چنین نشان می‌دهد که فشار تورمی محلول سدیم‌کلرید، همواره بیشتر از دو محلول دیگر می‌باشد و هم‌چنین در مکش‌های زیاد، فشار تورمی خاک با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از خاک با مایع منفذی آب مقطر است. لیکن در مکش‌های نزدیک به صفر، این رابطه معکوس می‌شود. همان‌طور که نتایج SEM (شکل ۷- الف و ب) نشان می‌دهد، در مکش‌های بالا، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید سبب اتصالاتی بین ذرات می‌گردد که این امر منجر به افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل ناشی از اعمال بار وارده می‌شود و این موضوع در افزایش فشار تورمی در مقایسه با نمونه ساخته‌شده با آب مقطرنیز نقش مهمی ایفا می‌کند. هم‌چنین شکل‌های (۵) و (٦) نشان می‌دهند که فشار تورمی و هم‌چنین درصد تورم خاک در مکش‌های کم، تقریباً ثابت هستند و کاهش آن‌ها از یک میزان مکش مشخص شروع می‌شود. به این میزان مکش مشخص، نقطه ورود هوا (AEV) گفته می‌شود که برای خاک با مایعات منفذی گوناگون متفاوت است. در این پژوهش، نقطه ورود هوا برای مایعات منفذی مختلف مطابق با روش فردلاند و زینگ [٤۰] به-دست آمد و نتایج نشان داد که نقطه ورود هوای نمونه حاوی محلول سدیم‌کلرید بیشتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. هم‌چنین از شکل‌های (۵) و (٦) مشخص می‌شود که کاهش درصد تورم و پتانسیل تورمی همراه با افزایش مکش، به شرطی امکان‌پذیر است که مکش موجود در خاک بیشتر از مکش نقطه ورود هوا باشد. بنابراین با توجه به این نتایج می‌توان گفت که اگر عملیات به‌سازی برای شرایطی با مکش غیرصفر خاک باشد، مقدار فشار تورمی و تورم آزاد آن خاک کمتر از حالت مکش صفر می‌شود. به‌عنوان مثال در شرایطی که مکش در خاک ۳۰۰۰ کیلوپاسکال باشد، مقدار تورم آزاد برای نمونه‌هایی با مایع منفذی آب مقطر،

سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید، به‌ترتیب ٤٤، ۷ و ٤/٥ ٪ کاهش می‌یابد و فشار تورمی خاک نیز به همین ترتیب به‌میزان ۳۳، ١٤/٢ و ١٤/١ ٪ کاهش می‌یابد. بنابراین مشخص است که هر قدر مقدار مکش ماتریک خاک در طول مدت زمان کاربرد آن بیشتر باشد، مقادیر درصد تورم آزاد و فشار تورمی آن نیز کاهش بیشتری نسبت‌به مکش صفر دارند و در نتیجه به‌سازی خاک آسان‌تر و اقتصادی‌تر خواهد بود .

نتیجه‌گیری

نتایج این کار پژوهشی نشان داد که فاکتورهای پتانسیل تورمی و فشار تورمی یک خاک متورم‌شونده، به کیفیت مایع منفذی آن بستگی دارد به‌طوری‌که اگر نمونه خاک حاوی مایع منفذی محلول سدیم‌کلرید باشد، میزان تورم آزاد آن به‌میزان ۱۰/۳ و ۱۱/۷٪ بیشتر از نمونه‌هایی با مایع منفذی آب مقطر و محلول کلسیم‌کلرید است. از طرفی مقدار فشار تورمی آن نیز در شرایط یاد شده به‌میزان ۲/۸ و ۵/۵٪ بیشتر از نمونه‌های با مایعات منفذی آب مقطر و محلول کلسیم‌کلرید می‌باشد. از طرف دیگر بر اساس منحنی‌های مشخصه نمونه‌های خاک با مایعات منفذی متفاوت، نتیجه‌گیری شد که مقادیر پتانسیل تورمی و فشار تورمی تابعی از مکش یا رطوبت جذب شده نمونه می‌باشد. این مقادیر در مکش-های مختلف با هم مقایسه شد و نتایج نشان داد که در مکش ثابت، مقادیر فشار تورمی و تورم آزاد در محلول سدیم‌کلرید بیشتر از محلول کلسیم‌کلرید و آب مقطر است (به‌عنوان مثال، در مکش ۵۰۰ کیلوپاسکال مقدار تورم آزاد نمونه با مایع منفذی سدیم‌کلرید به‌ترتیب به مقدار ۱۱/۵ و ۱۳/۷٪ و فشار تورمی آن به‌ترتیب به میزان ٤ و ٦/٦٪ بیشتر از نمونه با مایع منفذی کلسیم-کلرید و آب مقطر می‌باشد). هم‌چنین در نقاط نزدیک به مکش صفر، پتانسیل تورمی و فشار تورمی آب مقطر بیشتر از محلول کلسیم‌کلرید است. بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی به‌منظور استفاده اقتصادی از روش‌های به‌سازی برای اصلاح خاک‌های متورم‌شونده محسوب گردد.

مراجع

1. Jones, D.E. and Jones, K.A., "Treating expansive soils", *Civil Engineering—ASCE*, Vol. 57, No. 8, pp. 62-65, (1987).
2. Puppala, A.J. and Cerato, A., "Heave distress problems in chemically-treated sulfate-laden materials", *Geo-Strata*, Vol. 10, No. 2, pp. 28-32, (2009).
3. Driscoll, R. and Crilly, M., "Subsidence damage to domestic buildings. Lessons learned and questions remaining", BRE Press, London, (2000).
4. Richards, B. G., "Footings for small and domestic structures", Linn Education and Training Services, Brisbane, Australia, (1990).
5. McManus, K. J., Lopes, D. and Osman, N. Y., "The effect of Thornthwaite Moisture Index Changes in ground movement predictions in Australian soils. To the ENZ of the Earth", *Proceedings of the 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Centre for Continuing Education, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, pp. 675-680, (2004).
6. Chen, Y.G., Zhu, C.M., Ye, W.M., Cui, Y.J. and Chen, B., "Effects of solution concentration and vertical stress on the swelling behavior of compacted GMZ01 bentonite", *Applied Clay Science*, Vol. (124-125), pp. 11-20, (2016).
7. Al-Yaqoub, T.H., Parol, J. and Znidarcic, D., "Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil", *Applied Clay Science*, Vol. 137, pp. 22-29, (2017).
8. Siddiqua, S., Blatz, J. and Siemens, G., "Evaluation of the impact of pore fluid chemistry on the hydromechanical behaviour of clay–based sealing materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, No. 2, pp. 199–213, (2011).

9. Castellanos, E., Villar, M.V., Romero, E., Lloret, A. and Gens, A., "Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol. 33, Suppl. 1, pp. S516-S526, (2008).
10. Estabragh, A.R., Moghadas, M. and Javadi, A.A., "Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying", *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 5, pp. 617-627, (2013).
11. Pusch, R., "Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectite clay", Technical Report No. TR01–07 (35 p.), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, (2001).
12. Di Maio, C., Santoli, L. and Schiavone, P., "Volume change behaviour of clays: The influence of mineral composition, pore fluid composition and stress", *Mechanics of Materials*, Vol. 36, No. (5–6), pp. 435–451, (2004).
13. Rao, S. M. and Shivananda, P., "Role of osmotic suction in swelling of salt–amended clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 307–315, (2005).
14. Laird, D.A., "Influence of layer charge on swelling of smectites", *Applied clay science*, Vol. 34, No. (1-4), pp. 74-87, (2006).
15. Zhang, F., Ye, W. M., Wang, Q., Chen, Y. G. and Chen, B., "An insight into the swelling pressure of GMZ01 bentonite with consideration of salt solution effects", *Engineering Geology*, Vol. 251, pp. 190–196, (2019).
16. Cui, Y.J., Nguyen, X.P., Tang, A.M. and Li, X.L., "An insight into the unloading/reloading loops on the compression curve of natural stiff clays", *Applied Clay Science*. Vol. (83-84), pp. 343-348, (2013).
17. He, Y., Ye, W.M., Chen, Y.G., Zhang, K.N. and Wu, D.Y., "Effects of NaCl solution on the swelling and shrinkage behavior of compacted bentonite under one-dimensional conditions", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 79, No.1, pp. 399–410, (2019).
18. Liang, W.Y., Yan, R.T., Xu, Y.F., Zhang, Q., Tian, H.H. and Wei, C.F., "Swelling pressure of compacted expansive soil over a wide suction range", *Applied Clay Science*, Vol. 203, pp. 106018, (2021).
19. Sun, H., Scaringi, G., Mašín, D. and Najser, J., "An experimental investigation on the swelling behavior of compacted B75 bentonite", *Engineering Geology*, Vol. 296, pp. 106452, (2022).
20. Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J. and Magnan, J.P., "On the swelling potential of compacted high plasticity clays", *Engineering Geology*, Vol. 104, No. (3-4), pp. 200-210, (2009).
21. McKeen, R.G., "A model for predicting expansive soil behavior", *In Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas, Tex. pp. 1–6., (1992).
22. Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C. and Carcia-Escudero, E., "Expansive bentonite-and mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting", *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 3, pp. 213-226, (2005).
23. Nowamooz, H. and Masrouri, F., "Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests", *Engineering Geology*, Vol. 101, No. (3–4), pp. 154–164, (2008).
24. Eimanifar, A. and Mohebbi, F., "Urmia Lake (Northwest Iran): a brief review", *Saline Systems*, Vol. 3, No.5, pp. 1-8, (2007).

25. Soltani, A. and Estabragh, A.R., "Laboratory study of expansive soil treatment using consecutive wetting and drying cycles", *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, Vol. 4, No. 1, 49-62, (2014). (In Persian)
26. Estabragh, A.R., Javadi, A.A. and Boot, J.C., "Effect of compaction pressure on consolidation behaviour of unsaturated silty soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 540-550, (2004).
27. Wheeler, S.J. and Sivakumar, V., "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil", *Géotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 35-53, (1995).
28. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons, (1993).
29. Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B. and Vaughan, P.R., "Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering", *Géotechnique*, Vol. 53, No. 2, pp. 241-253, (2003).
30. Leong, E.C., He, L. and Rahardjo, H., "Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 3, pp. 322-333, (2002).
31. Seed, H.B. and Chan, C.K., "Structure and strength characteristics of compacted clays", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 85, No. 5, pp. 87-128, (1959).
32. Barden, L. and Sides, G.R., "Engineering behavior and structure of compacted clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 96, No. 4, pp. 1171-1200, (1970).
33. Barbour, S.L. and Fredlund, D.G., "Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 4, pp. 551-562, (1989).
34. Pulat, H. F., Yukselen-Aksoy, Y. and Egeli, İ., "The effect of soil mineralogy and pore fluid chemistry on the suction and swelling behavior of soils", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 73, No. 1, pp. 37–42, (2014).
35. Delage P., Howat M.D. and Cui Y.J., "The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay", *Engineering Geology*, Vol. 50, No. (1-2), pp. 31–48, (1998).
36. Bouazza, A., Jefferis, S. and Vangpaisal, T., "Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet–dry cycles", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 3, No. 25, pp. 170–185, (2007).
37. Bayrak MC, "Zemin Suyu O¨ zelliklerinin Emme Basıncı U¨ zerindeki Etkileri", MSc. thesis, University of Su¨leyman Demirel, Fen Bilimleri Enstitu¨su¨, Turkey (in Turkish), (2008).
38. Pandya, S. and Sachan, A., "Matric suction, swelling and collapsible characteristics of unsaturated expansive soils", *Journal of Geotechnical and Transportation Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-9, (2018).
39. Tan, L. and Kong, L., "Study of swelling-shrinkage regularity of montmorillonite crystal and its relation with matric suction", *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, Vol. 44, No. 6, pp. 498-507, (2001).
40. Fredlund, D.G. and Xing, A., "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532, (1994).

Investigating the Relationship between Geometric Properties of Vehicles and Traffic Density*

Research Article

Hassan Khaksar[1] Hosein Baharzadeh[2]
Elham Ashrafy[3]

1. Introduction

Identifying the parameters affecting traffic flow density can be effective in managers' decisions and policies for the investment and prioritization of executive plans and projects. This study explored the effects of vehicle specifications on traffic density in the highway network of Tehran. Geometric details and movement characteristics of cars can affect the quality of traffic. This issue is more crucial in highways and arterial crossings, where other parameters such as delays and interruptions are less due to intersections and interferences.

Examining the effectiveness of traffic congestion reduction methods is one of the cases that has received a lot of attention in recent years, but various parts of it remain unknown. Based on the reviewed literature, various parameters such as traffic volume, geometric details of the passage, general characteristics of vehicles (vehicle length and width), and their effects on traffic flow characteristics have been studied, but the effects have not been addressed. The geometry and details of the car affect the traffic density. In this study, the effects of vehicle specifications on traffic congestion are identified. By determining these effects, solutions can be provided to reduce vehicle traffic congestion.

2. Research Goals

The main purpose of this study is to investigate the effective factors on reducing traffic on Shahid Hemmat Highway in Tehran. The main focus of this study is the effects of the type and dimensions of vehicles on traffic density, which has not been addressed before. Other objectives of this study are:

- Explaining the effects of the ratio of cross-section length to vehicle length on vehicle density per meter of road length;
- Explaining the effect of vehicle transit time on vehicle density per meter of road length;
- Explaining the effect of vehicle speed on vehicle density per meter of road length;
- Explaining the effect of the number of vehicles passing on the density of vehicles per meter of length.

3. Method

The research is applied in terms of the aim and is survey in terms of data collection. Regression model was used to solve the studied problem. Regression models are of the most widely used models in predicting the relationships between variables that have the ability to determine the relationship between dependent and independent variables. In this study, the dependent variables are the density of vehicles per meter of length of the passage. Various independent variables were examined in the modeling process of this study.

Some of these variables are: vehicle length, vehicle transit time, vehicle traffic speed, and vehicle volume. Accordingly, various models were constructed and validated, which are discussed in detail in the article. Various statistical tests were tested to calibrate the model. These tests were used to validate the proposed model. In the following, the components of the proposed model and the way of expanding and developing are described.

The regression model of the present study is as follows:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

Y: Vehicle density per meter of tread length
X_1 : Cross-section ratio to car length ratio
X_2: Vehicle transit time in seconds
X_3: Vehicle speed in kilometers per second
X_4: Number of vehicles passing

For the quantitative study statistical models were used to analyze the data. The relationship between details and geometric characteristics of vehicles and traffic density were investigated.

4. Results

The study investigated the effects of cars on traffic congestion on Hemmat Highway in Tehran. To do this, the details of the traffic on Hemmat Highway at different times were filmed. After processing the data by statistical tools

*Manuscript received: 15 March 2022; Revised, 09 April 2022, Accepted, 09 May 2022.
[1] Corresponding Author: Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran North Branch.
Email: h.khaksar@iau-tnb.ac.ir
[2] M.Sc. Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran North Branch.
[3] M.Sc. Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University

and software, the following results were obtained, which can indicate the appropriate answers to the questions raised in the research. The results showed:

Hypothesis 1: The ratio of cross-section length to vehicle length has a significant effect on vehicle density per meter of road length. Based on the analysis of findings, it can be said that the relationship between the ratio of cross-section length to vehicle length and vehicle density per meter of road length is significant and the first hypothesis is confirmed.

Hypothesis 2: The passage time of the vehicle has a significant effect on the density of the vehicle per meter of the length of the passage. Based on the analysis of the data, it can be said that the relationship between vehicle transit time and vehicle density per meter of road length is significant and the second hypothesis is confirmed.

Hypothesis 3: Vehicle speed has a significant effect on vehicle density per meter of road length. Based on the analysis, it can be said that the relationship between vehicle speed and vehicle density per meter of road length is significant and the third hypothesis is confirmed.

Hypothesis 4: The number of vehicles passing has a significant effect on the density of vehicles per meter of the length of the road. Based on the analysis, it can be said that the relationship between the number of vehicles passing and the density of vehicles per meter of the length of the passage is significant and the fourth hypothesis is confirmed.

Moreover, to investigate the simultaneous effect of the variables of ratio of cross-section length to vehicle length, vehicle transit time, vehicle speed, and number of vehicles passing on vehicle density per meter of road length and also predict car density per meter of road length at different times through these independent variables, multivariate regression analysis was used, the results of which were presented in the previous section.

DOI: 10.22067/jfcei.2022.75645.1127　　https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

بررسی رابطه خصوصیات هندسی خودروها و تراکم ترافیک*

حسن خاکسار [۱]　　حسین بهارزاده [۲]　　الهام اشرفی [۳]

چکیده *شناسایی پارامترهای مؤثر بر تراکم جریان ترافیک می‌تواند در تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری‌های مدیران در جهت سرمایه‌گزاری و اولویت‌بندی طرح‌ها و پروژه‌های اجرایی مؤثر باشد. در این مقاله به شناسایی تأثیرات مشخصات خودرو بر تراکم ترافیک در شبکه معابر بزرگراهی شهر تهران پرداخته شده‌است. جزئیات هندسی و مشخصات حرکتی خودروها می‌تواند بر کیفیت ترافیک مؤثر باشد. این موضوع در معابر بزرگراهی و شریانی که پارامترهای دیگر نظیر تأخیر و توقف ناشی از تقاطع‌ها و تداخل‌ها کمتر است تعیین‌کننده‌تر است. پژوهش حاضر از نوع هدف از نوع تحقیقات کاربردی محسوب می‌شود و از لحاظ جمع‌آوری داده‌ها تحقیقی پیمایشی است. روش تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش به‌صورت کمی است و برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از مدل‌های آماری استفاده شده‌است. در این پژوهش رابطه‌ی جزئیات و خصوصیات هندسی خودروها و تراکم ترافیک مورد بررسی قرار گرفته‌است. مطالعه موردی این پژوهش مقطعی از بزرگراه همت بوده‌است. بر اساس خروجی‌های مطالعه انجام‌شده، نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور، سرعت خودرو و تعداد عبور خودروها بیشترین تأثیر را بر تراکم خودروها داشته‌اند.*

واژه‌های کلیدی تراکم ترافیک، بزرگراه، حجم تردد، مشخصات هندسی، خودروی سواری.

مقدمه

همراه با روند سریع صنعتی شدن در جهان اکثر کشورها علی‌الخصوص کشورهای در حال توسعه در حال تجربه رشد سریع شهر نشینی هستند. حمل‌ونقل، مصرف کننده بیش از ۲۰ درصد کل انرژی و عامل ایجاد بخش عمده آلودگی هوا در سطح جهان است. هم‌چنان که شاهد هستیم مردم هر روز بیش از پیش به استفاده از اتومبیل شخصی وابسته می گردند. مشکلات زیست‌محیطی و صدمات وارده بر سلامت انسانی به‌دلیل رشد سریع حمل‌ونقل موتوری و روند ضعیف قانونمندی آن به‌طور جدی مشکل‌آفرین شده‌است. اغلب طرح‌های ترافیک و حمل‌ونقل شهری کشور به‌صورت بخشی و مستقل از واقعیات محیطی، اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی تهیه و اجرا می‌گردند. هدف این است که با ارائه تسهیلات و تجهیزات فنی و تکنولوژیکی و به‌ویژه مدل‌سازی، مسائل و مشکلاتی چون راه‌بندان‌ها، تصادفات، کمبودهای پارکینگ، زمان‌های طولانی انتظار، کمبود شبکه ارتباطی، آلودگی هوا، صدا و نظایر آن کاهش یابد. گرچه این برخورد با به‌کارگیری روش‌ها و مدل‌های پیشرفته ترافیکی می‌تواند در کوتاه‌مدت رضایت بخشی از عموم به‌ویژه رضایت مسئولان سیاسی را تأمین کند لیکن به‌علت ارتباط سیستمی عناصر و پدیده‌های شهری در بلند مدت منشأ بروز مسائل و مشکلات دیگری می‌گردد. وجود تراکم ترافیکی بسیار زیاد در کلان‌شهر تهران و نبود تناسب بین تعداد خودروهای موجود و ظرفیت معابر درون‌شهری از مشکلات موجود برای این شهر می‌باشد. بزرگراه همت به‌عنوان یکی از شریان‌های اصلی شرقی- غربی شهر تهران می‌باشد که مشکلات تراکم ترافیک و اتلاف زمان شهروندان در ترافیک در ساعات اوج عبور و مرور با توجه به به‌کار بستن شیوه‌های مختلف کاهش تراکم ترافیک از جمله جنبه‌های مهم و از عمده مشکلات مدیریت شهری تهران می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت بررسی اثر بخشی شیوه‌های کاهش تراکم ترافیک، یکی از مواردی است که در سال‌های اخیر، به آن توجه بسیار شده‌است اما بخش‌های مختلفی از آن کماکان ناشناخته باقی مانده‌است. بر اساس جستجوهای انجام شده در ادبیات موضوع پارامترهای مختلفی مانند حجم ترافیک، جزئیات هندسی معبر و مشخصات کلی خودروها (طول و عرض خودرو)

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۲/۱٤ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۲/۱۹می‌باشد.
(۱) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.　　**Email**: h.khaksar@iau-tnb.ac.ir
(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی شهری، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

و اثرات آن‌ها بر خصوصیات جریان ترافیک مطالعاتی انجام شده‌است اما یکی از موضوعاتی که کمتر به آن پرداخته شده‌است اثرات هندسه و جزئیات خودرو بر تراکم ترافیک معبر است. لذا در پژوهش حاضر به شناسایی اثرات مشخصات خودروها بر وضعیت تراکم ترافیکی پرداخته می‌شود. با تعیین این اثرات می‌توان به ارائه راهکارهایی برای کاهش تراکم ترافیکی خودروها پرداخت.

اهداف پژوهش

هدف اصلی در این مقاله مطالعه عوامل مؤثر برکاهش ترافیک در بزرگراه شهید همت شهر تهران است. تمرکز اصلی مطالعات حاضر بر مقوله اثرات نوع و ابعاد خودروها بر تراکم ترافیک است که پیش از این کمتر به این مقوله پرداخته شده‌است. سایر اهداف این مطالعه عبارت‌اند از:

- تبیین تأثیر نسبت طول مقطع به طول خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر.
- تبیین تأثیر مدت زمان عبور خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر.
- تبیین تأثیر سرعت خودروها بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر.
- تبیین تأثیر تعداد عبور خودروها بر تراکم خودرو در هر متر از طول.

پیشینه موضوعی

ترافیک پدیده‌ای است حاصل از ارتباط سه‌گانه بین انسان، راه و وسیله نقلیه. ویژگی‌ها و کیفیت عملکرد هر کدام از این سه عامل نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی ترافیک در هر زمان دارد[1]. شبکه ترافیک شهری سه عملکرد اصلی را بر عهده دارد: ۱) عملکرد ارتباطی، ۲) جمع و پخش کننده و ۳) توقف و پارک [2].

ترافیک یک واژه شناخته شده بین‌المللی است و در قوانین به مجموعه عبور و مرور وسیله نقلیه و اشخاص و حیوانات در راه‌ها اطلاق می‌گردد. ترافیک از سه عامل تشکیل می‌شود این عوامل عبارتند از انسان، راه، وسیله نقلیه. چنان‌چه هر یک از عوامل سه گانه نباشد اصولاً مسئله‌ای به نام ترافیک وجود نخواهد داشت. برهم خوردن تعادل در ترافیک شهری به عدم هماهنگی میان این سه فاکتور در راه‌های شهری مربوط می‌شود، که این عدم هماهنگی می‌تواند به عوامل و شرایط مختلفی مربوط باشد؛ از جمله عدم هماهنگی بین ظرفیت راه و تعداد وسیله نقلیه، عدم هماهنگی بین شرایط راه و نوع وسیله نقلیه، عدم هماهنگی بین زمان و تعداد استفاده‌کنندگان از وسیله نقلیه، عدم هماهنگی بین تقاضای استفاده‌کنندگان از وسیله نقلیه خاص و شرایط مکانی و زمانی. در واقع هرگونه برهم خوردن تعادل بین سه عامل فوق باعث ایجاد معضل ترافیک می‌شود[3]. حمیدی و فیروزه [4] در تحقیقی به ارائه مدلی برای مدیریت یکپارچه حمل‌ونقل و ترافیک شهری در بجنورد پرداختند. روش تحقیق فوق توصیفی- پیمایشی است که بر اساس آن شاخص‌ها و مؤلفه‌های مؤثر بر ترافیک شناسایی شده و پس از توسعه مدل اولیه با روش استقرایی، مفاهیم و فرضیه‌های تازه‌ای تدوین گردیده و بر مبنای آن‌ها مدل تکمیل و با داده‌های واقعی آزمایش شده‌است. بر اساس خروجی‌های مطالعه مذکور، عوامل مؤثر بر ترافیک عبارت است از: مدیریت سفرهای شهری، مدیریت پارکینگ‌ها، مدیریت ناوگانی و شبکه حمل‌ونقل عمومی، مدیریت فرهنگ‌سازی ترافیک، مدیریت شهرسازی، مدیریت اورژانس‌ها، مدیریت شبکه ترافیک، مدیریت استانداردسازی، نصب و نگه‌داری خدمات ترافیکی، مدیریت مکانیزه ترافیک، مدیریت مهندسی ترافیک، مدیریت تحقیق و توسعه.

آرمین[5] پژوهشی با هدف ارائه روش‌هایی در جهت سامان‌دهی وضعیت ترافیک در شهر الشتر انجام دادند، روش تحقیق در این پژوهش باتوجه به نوع هدف، توسعه‌ای- کاربردی و از نظر ماهیت و روش، از نوع تحقیقات توصیفی- تحلیلی و میدانی است. جمع‌آوری اطلاعات به دو صورت مشاهدات (مسقیم و غیرمستقیم) می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌ها بااستفاده از نرم‌افزار SPSS با حجم نمونه ۳۸۳ نفر و براساس (آزمون کولموگروف- اسمیرنوف، آزمون تی تک نمونه‌ای) می‌باشد. نتیجه حاصل از مقاله فوق نشان می‌دهد که بین هر سه متغیر مورد بررسی در سامان‌دهی مشکلات ترافیکی محدوده بخش مرکزی شهر، رابطه معناداری وجود دارد. به این معنا که بالا رفتن سطح هر از یک از متغیرهای مورد بررسی، باعث سامان‌دهی و بهبود مشکلات ترافیکی در سطح شهر الشتر خواهد شد.

سیاف زاده و پولادوند [6] در مقاله‌ای به روش کتابخانه‌ای و میدانی به بررسی نقش توسعه بزرگراه‌ها در کاهش تراکم جمعیت در شهرهای مرکزی پرداختند که با مقایسه الگوهای حمل‌ونقل در شهرهای جهان، علل افزایش جمعیت و مهاجرت به کلان‌شهرها و رشد حمل‌ونقل و ترافیک شهری و هزینه‌های متعاقب آن، به بررسی حوزه نفوذ کلان‌شهر تهران و ارائه آمارهای حجم مسافر و تعداد وسایل نقلیه ورودی و خروجی به تهران پرداخته‌است و با مطالعه موردی اتوبان همت، محور تهران- کرج به این نتیجه رسیده‌است که تکمیل و توسعه بزرگراه همت در کنار سیاست‌هایی اعم از تمرکززدایی از پایتخت و توسعه حمل‌ونقل عمومی، رفع گره‌های ترافیکی و یا به‌کارگیری شیوه‌های نوین حمل‌ونقلی اعم از خطوط وسایل نقلیه با ظرفیت بالا در بزرگراه‌ها، می‌تواند در حومه‌نشینی جمعیت و در نتیجه کاهش تراکم جمعیت تهران تأثیر داشته باشد.

گاو و همکاران [7] در تحقیقی به بررسی تخلفات پارک دوبله در محله مانهاتان نیویورک پرداختند. آن‌ها سعی کردند تا رابطه‌ای بین تخلفات و متغیرهای اقتصادی و اجتماعی منطقه برقرار نمایند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که رابطه معنا داری بین تعداد تخلفات پارک دوبله و کاربریهای خیابان‌های محل تخلف وجود دارد. هم‌چنین میزان نزدیکی به مراکز پلیس و تراکم حضور پارکبان‌ها در تعداد تخلفات مؤثر است [۷].

موریلو کاربونل و کامپوس کاچدا [8] به بررسی تأثیر پارکینگ غیر مجاز وسایل نقلیه بر زمان سفر در شبکه حمل‌ونقل پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌ساز خرد ترافیک چند سناریو تعریف کردند. در بعضی سناریوها فرض کردند که در تمام خیابان‌های یک شبکه از خیابان‌های شهری، پارک غیر مجاز وسایل نقلیه وجود دارد. در سناریوهای دیگر فرض کردند که تنها در بعضی قسمت‌ها پارک غیر مجاز وجود دارد. نتیجه شبیه‌سازی نشان داد که در سناریوهایی که پارک غیر مجاز در کل شبکه وجود دارد، زمان تأخیر در تمام سفرهای ساکنان شهر افزایش پیدا می‌کند. ولی در سناریوهایی که پارک غیر مجاز تنها در بعضی قسمت‌های شبکه وجود دارد، زمان تأخیر تنها در همان قسمت‌ها افزایش پیدا می‌کند و زمان کل سفرهای ساکنان شهر تغییر چندانی نمی‌کند.

یانگ و همکاران [9] به بررسی تأثیر عبور عابران پیاده بر ظرفیت خیابان‌ها با استفاده از شبیه‌سازهای خرد ترافیک پرداختند. آن‌ها با جمع‌آوری آمار تردد وسایل نقلید و عابران پیاده عبوری از بعضی خیابان‌ها مدلی تهیه کردند که توانست رفتار رانندگان و عابران پیاده را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. سپس این مدل با آمار خیابان‌های دیگر مقایسه و اعتبار مدل تهیه‌شده تأیید گردید. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نرخ عبور عابران پیاده از عرض خیابان، ظرفیت آن کاهش پیدا می‌کند و این کاهش ظرفیت در زمانی از روز که حجم ترافیک زیاد است، باعث افزایش زمان تأخیر وسایل نقلیه در عبور از آن خیابان‌ها می‌شود.

آلبالاته و فاگدا [10] در مقاله‌ای به بررسی اثرات سیاست‌گذاری و خط‌مشی‌های مدیریت شهری بر تراکم ترافیک شبکه معابر پرداخته‌اند. این پژوهشگران علاوه‌بر موضوع ترافیک به مبحث ایمنی هم پرداخته‌اند و با استفاده از مدل رگرسیون آثار تصمیم‌گیری‌های مدیران شهری بر پارامترهای مختلف ترافیک را مورد بررسی قرار داده‌اند].

لیو و لی [11] به بررسی آثار تغییرات پویا و دینامیک سیستم بر تراکم ترافیک خودروها پرداخته‌اند. در این مقاله به بررسی آثار دینامیک سیستم نوع خودرو نظیر خودروی شخصی، کامیون‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی بر تراکم و شلوغی تردد در معابر شهری در چین پرداخته‌اند.

نیان و همکاران [12] در پژوهش خود به بررسی آثار فرم و شکل شهر بر سرعت سفر با استفاده از مدل‌های پنل دیتا پرداخته‌اند. هدف از انجام پژوهش فوق تعیین اثرات تراکم کاربری‌ها بر کیفیت جریان ترافیک بوده‌است. نتایج این تحقیق نشان داده‌است: تعداد ایستگاه‌های اتوبوس، تراکم کاربری‌های مسکونی، تراکم کاربری‌های تجاری، تراکم کاربری‌های بهداشتی و درمانی، تراکم کاربری‌های ورزشی و تفریحی و تعداد ورودی و خروجی‌ها به پارکینگ، بیشترین آثار را بر سرعت تردد خودروها داشته‌اند.

بر اساس موارد بیان‌شده در مطالعات پیشین، مطالعات متعددی در زمینه تأثیر پارامترهای مختلف نظیر طرح هندسی، ترکیب خودروها، الگوی تردد و... بر ظرفیت معبر انجام شده‌است، اما کمتر مطالعه‌ای به بررسی اثرات ابعاد خودرو بر ظرفیت معبر پرداخته‌است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مطالعات پیشین در خصوص موضوع مورد بررسی آورده شده‌است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات پیشین

نام نویسندگان	عنوان	سال انتشار	محل انتشار	مدل و متغیرها
حمیدی و فیروزه	ارائه مدلی برای مدیریت یکپارچه حمل‌ونقل و ترافیک شهری	۱٤۰۰	پنجمین کنفرانس بین المللی چشم‌اندازهای نوین در مدیریت	مدیریت سفر، مدیریت پارکینگ، مدیریت ناوگان و ...
آرمین	راه‌بردهای سامان‌دهی ترافیک و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری	۱٤۰۰	پنجمین کنفرانس بین المللی مطالعات نوین مهندسی عمران	ارائه مدلی در جهت سامان‌دهی ترافیک شهر الشتر
سیاف‌زاده و پولادوند	توسعه بزرگراه و نقش آن‌ها در کاهش تراکم جمعیت در شهرهای مرکزی	۱۳۹۷	فصل‌نامه معماری سبز	حجم تردد خودروها، تراکم شهری
Zhao Yang, Yuanyuan Zhang, Renwei Zhu, Xiaofei Ye, Xiaohong Jiang	Impacts of Pedestrians on Capacity and Delay of Major Street Through Traffic at Two-Way Stop-Controlled Intersections	2015	Mathematical Problems in Engineering	تأثیرات عابران پیاده بر ظرفیت
Morillo Carbonell, Carlos1, Cacheda, José Magín	Effect of illegal on street parking on travel times in urban environment	2016	XIICongreso de Ingeniería del Transporte	تأثیرات پارک حاشیه‌ای بر ظرفیت
Gao, J., Xie, K., & Ozbay, K	Exploring the Spatial Dependence and Selection Bias of Double Parking Citations Data	2018	Transportation Research Record	پارک خودرو، زمان توقف خودرو
Albalate, D., Fageda, X	Congestion, road safety, and the effectiveness of public plicies in urban areas	2019	Sustainability	بررسی اثرات سیاست‌های مدیریتی
Liu, X., li, X	Research on Traffic Congestion Based on System Dynamics: The Case of Chongqing, China	2020	Hindawi	بررسی آثار سیستم دینامیک نوع خودرو
Nian, G., Sun, J., Huang	Exploring the effects of urban built environment on road travel speed variability with a spatial panel data model	2021	International journal of Geo- information	بررسی آثار تراکم کاربری شهری بر ترافیک

شکل ۱ فرایند انجام تحقیق

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نظر هدف، از نوع تحقیقات کاربردی محسوب می‌شود. هدف تحقیقات کاربردی توسعه دانش کاربردی در یک زمینه خاص است. به عبارت دیگر تحقیقات کاربردی به‌سمت کاربرد عملی دانش هدایت می‌شوند و از لحاظ جمع‌آوری داده‌ها تحقیقی پیمایشی است. هم‌چنین از نظر نحوه تجزیه و تحلیل داده‌ها این تحقیق توصیفی است و از آن جهت که به شناخت بیشتر شرایط موجود و یاری دادن به فرایند تصمیم‌گیری می‌انجامد از نوع هم‌بستگی است و میزان وابستگی متغیر وابسته و متغیر مستقل را نسبت‌به هم بررسی می‌کند. مهم‌ترین ویژگی یک پژوهش و بررسی علمی فرایند پژوهش و به عبارت دیگر نحوه گرداوری و تجزیه و تحلیل و پردازش داده‌ها می‌باشد. به‌طور کلی فرایند پژوهش شامل مجموعه‌ای از شیوه‌ها و تدابیری است که برای شناخت حقیقت و دوری از لغزش به‌کار برده می‌شود. این پژوهش از هشت گام اجرایی تشکیل شده‌است که در شکل (۱) نمایش داده شده‌است.

بزرگراه شهید همت یکی از بزرگراه‌های تهران است که معمولاً از آن با نام بزرگراه همت نام برده می‌شود. این بزرگراه اصلی‌ترین راه ارتباطی شرق به غرب و غرب به شرق تهران است. این بزرگراه به نام شهید محمدابراهیم همت، نام‌گذاری شده‌است و از بزرگراه شهید خرازی در غرب آغاز و به بزرگراه شهید زین‌الدین در شرق تهران منتهی می‌شود. بخشی از این بزرگراه قبل از انقلاب اسلامی ایران ساخته شده اما بخش اصلی و بیشتر آن پس از انقلاب احداث و راه‌اندازی شد. امتداد این بزرگراه به طول ۲۰ کیلومتر از انتهای اتوبان همت در منطقه ۲۲ شروع می‌شود و تا ابتدای کرج ادامه دارد.

در این مطالعه زمان تردد خودروها در بزرگراه همت به ۱۰ مقطع زمانی دسته‌بندی می‌شود:

- از دقایق پایانی ساعت ۲٤:۰۰ روز قبل تا ۷ صبح روز جاری: در این مقطع، نوع ترافیک به شرایط عمومی و عادی محور همت و رفتار استفاده‌کنندگان نزدیک است و از حالت شغلی خارج شده‌است.
- از ساعت ۷ تا ۸ صبح: ترافیک در بخش همت به غرب و همت به شرق ار نوع اداری و و کاری است.
- از ساعت ۸ تا ۹ صبح: بخشی از رفتار اجتماعی شهر و نیازهای عمومی جامعه به ترافیک قبل افزوده شده و آرام‌آرام ترافیک شهر، به تلفیقی از حالات عمومی و مدیریتی گرایش پیدا می‌کند.
- از ساعت ۹ تا ۱۱:۳۰: بخش قابل توجهی از مشاغل مدیریتی به‌علاوه نیازهای عادی و روزمره جامعه مستتر در این ترافیک است.
- از ساعت ۱۱:۳۰ تا قبل از ۱۳: ترافیک معابر، ضمن آن‌که از حالت مدیریتی خارج شده‌است به‌تدریج به وضع عادی رفتار جامعه و نیازهای آن برگشته‌است.
- از ساعت ۱۳ تا ۱۵: بخش قابل توجهی از ترافیک عادی و روزانه، کم‌کم به حالت آموزشی مبدل می‌گردد.
- از ساعت ۱۵ تا ۱۸: ترافیک از نوع ساعت بازگشت از کار است که بیشتر از نوع مشاغل کارمندی اداری و نیمه‌مدیریتی است.
- از ساعت ۱۸ تا ۲۰: ترافیک مدیریتی بازگشت مدیران به افزایش ترافیک نیازهای اجتماعی شهروندان.
- از ساعت ۲۰ تا ۲۱:۳۰: نوع ترافیک از شرایط کاری به‌تدریج خارج و به شرایط پاسخ‌گویی به نیاز اجتماعی تبدیل می‌گردد.
- از ساعت ۲۱:۳۰ تا ۲٤: نوع ترافیک کاملاً منطبق با نیاز اجتماعی شهروندان است و یک‌نواختی در تمام محدوده‌های این محور بدون گزارش شدت و تراکم ترافیک قابل مشاهده است.

مدل مفهومی پژوهش

در این بخش از مقاله به ارائه مدل مفهومی پژوهش پرداخته شده‌است. مدل‌های رگرسیون یکی از مدل‌های پرکاربرد در پیش‌بینی روابط بین متغیرها هستند که توانایی تعیین ارتباط بین متغیرهای وابسته و مستقل را دارا هستند. در این مقاله متغیر وابسته تراکم خودروها در هر متر طول از معبر هستند. متغیرهای مستقل مختلفی در فرایند مدل‌سازی این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. تعدادی از این متغیرها عبارتند از

طول خودرو، زمان عبور خودرو، سرعت تردد خودرو و حجم خودروها. بر این اساس مدل‌های مختلفی ساخته و صحت‌سنجی شد که در بخش بعدی مقاله به تفصیل در این خصوص صحبت شده‌است. برای کالیبره کردن مدل آزمون‌های آماری مختلفی کنترل شده‌است.از این آزمون‌ها برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی استفاده شده‌است. در ادامه اجزای مدل پیشنهادی و نحوه بسط و توسعه آن تشریح خواهد شد.

مدل رگرسیونی پژوهش حاضر به‌صورت زیر خواهد بود.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

Y: تراکم خودرو در هر متر از طول معبر (متغیر وابسته)

X_1: نسبت نسبت طول مقطع به طول خودرو (متغیر مستقل)

X_2: مدت زمان عبور خودرو بر حسب ثانیه (متغیر مستقل)

X_3: سرعت خودروها بر حسب کیلومتر بر ثانیه (متغیر مستقل)

X_4: تعداد عبور خودروها (متغیر مستقل)

آمار توصیفی

روش تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش به‌روش کمی است و برای تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده از نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS استفاده خواهد شد. یافته‌های حاصل از آزمون فرضیه‌های پژوهش، آمار استنباطی را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش، آمار استنباطی دارای دو مرحله است. در مرحله اول، رابطه بین متغیرهای پژوهش از طریق آزمون هم‌بستگی پیرسون سنجیده می‌شود و در مرحله دوم برای هریک از فرضیه‌های پژوهش، تحلیل رگرسیونی انجام خواهد شد. هم‌چنین از آزمون کلموگروف- اسمیرنف به‌منظور بررسی نرمال بودن متغیرهای پژوهش استفاده خواهد شد. فرض صفر و فرض مقابل برای این آزمون به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

H_0: توزیع متغیر مورد بررسی نرمال است.

H_1: توزیع متغیر مورد بررسی نرمال نیست.

این آزمون، بر اساس سطح معناداری به‌دست‌آمده از آزمون است. بدین‌گونه که هرگاه مقدار سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ باشد، فرض H_0 آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود و در غیر این صورت فرض H_0 پذیرفته می‌شود. در آزمون نرمال بودن کلموگروف-اسمیرنف، پذیرش H_0، به‌منظور نرمال بودن توزیع متغیر مورد بررسی است.

با توجه به نرمال بودن متغیرها، برای آزمون فرضیه‌ها می‌توان از آزمون هم‌بستگی پیرسون یا اسپیرمن استفاده کرد. فرضیه‌های آزمون هم‌بستگی به شرح زیر است:

H_0: دو متغیر، از هم مستقل هستند.

H_1: دو متغیر، از هم مستقل نیستند.

در این آزمون، رد H_0، به‌معنی رد معناداری رابطه بین دو متغیر است.

در نهایت به‌منظور بررسی تأثیر هم‌زمان متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته و نیز پیش‌بینی متغیر وابسته از طریق متغیرهای مستقل، از تحلیل رگرسیونی چندمتغیره استفاده می‌شود. در این مدل ε خطای تصادفی است که برای کامل شدن مدل و نشان دادن خطا در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تحلیل رگرسیونی خطی چندمتغیره، تأثیر متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته پژوهش بررسی می‌شود و در نهایت یک مدل رگرسیونی براورد خواهد شد. لازم به ذکر است که میزان اعتبار مدل رگرسیون خطی، به برقراری پیش‌فرض‌های رگرسیون برای برآورد مدل بستگی دارد. مهم‌ترین این پیش‌فرض‌ها عبارتند از نرمال بودن متغیر وابسته، عدم خودهم‌بستگی باقی‌مانده‌ها و عدم وابستگی متغیرهای مستقل به‌هم. برقراری هرکدام از پیش‌فرض‌های ذکر شده، از طریق آزمون‌های به‌ترتیب کلموگروف- اسمیرنف، آزمون دوربین- واتسون و آزمون عامل تورم واریانس (VIF) بررسی می‌شود.

مدل‌سازی و یافته‌های پژوهش

در این پژوهش، تجزیه و تحلیل داده‌ها مشتمل بر یافته‌های استنباطی است. برای تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده، ابتدا یافته‌های استنباطی و سپس نتایج حاصل از آزمون فرضیات پژوهش را ارائه می‌کنند.

آزمون نرمال بودن کلموگروف- اسمیرنف. در جدول (۲) نتایج آزمون نرمال بودن کلموگروف-اسمیرنف برای همه متغیرهای پژوهش آورده شده‌است. سطح معناداری آزمون برای تمامی متغیرها کوچک‌تر از ۰/۰۵ است پس فرض H_0 آزمون کلموگروف- اسمیرنف تأیید می‌شود و این متغیرها نرمال هستند. بنابراین به‌منظور سنجش ارتباط متغیرها از آزمون هم‌بستگی پیرسون استفاده خواهد شد.

جدول ۲ آزمون نرمال بودن متغیرهای پژوهش

متغیر		مقدار آماره	سطح معناداری
تراکم خودرو در هر متر از طول معبر	۹-۷	۰/۱۰۶	۰/۲۰۰
	۱۱-۱۳	۰/۰۷۳	۰/۲۰۰
	۱۶-۱۸	۰/۰۸۱	۰/۲۰۰
	۱۹-۲۱	۰/۰۶۹	۰/۲۰۰
	کل	۰/۰۵۲	۰/۲۰۰
نسبت طول مقطع به طول خودرو	۹-۷	۰/۰۳۷	۰/۲۰۰
	۱۱-۱۳	۰/۱۱۹	۰/۰۶۵
	۱۶-۱۸	۰/۰۸۹	۰/۲۰۰
	۱۹-۲۱	۰/۱۰۹	۰/۱۸۵
	کل	۰/۰۸٤	۰/۲۰۰
مدت زمان عبور خودرو	۹-۷	۰/۱۲۱	۰/۰۶۱
	۱۱-۱۳	۰/۰۸٦	۰/۲۰۰
	۱۶-۱۸	۰/۰۹۹	۰/۲۰۰
	۱۹-۲۱	۰/۰۸۹	۰/۲۰۰
	کل	۰/۰۵۸	۰/۰۹۵
سرعت خودروها	۹-۷	۰/۰۶۰	۰/۲۰۰
	۱۱-۱۳	۰/۱۰۵	۰/۲۰۰
	۱۶-۱۸	۰/۰۷۵	۰/۲۰۰
	۱۹-۲۱	۰/۰۸۲	۰/۲۰۰
	کل	۰/۰۵۹	۰/۰۷۸
تعداد عبور خودرو	۹-۷	۰/۱۷٤	۰/۰۶۱
	۱۱-۱۳	۰/۱۰٤	۰/۲۰۰
	۱۶-۱۸	۰/۰۷۰	۰/۲۰۰
	۱۹-۲۱	۰/۰۶۳	۰/۲۰۰
	کل	۰/۰۷۷	۰/۰۶۵

آزمون فرضیه اول

فرضیه اول. نسبت طول مقطع به طول خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد.

با توجه به نرمال بودن متغیرهای نسبت طول مقطع به طول خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در زمان‌های صبح، ظهر، بعد از ظهر و شب، به‌منظور آزمون فرضیه اول می‌توان از آزمون هم‌بستگی پیرسون استفاده کرد. نتایج آزمون هم‌بستگی پیرسون در جدول (۳) آورده شده‌است. ضریب هم‌بستگی بین نسبت طول مقطع به‌طول خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در ساعات ۹-۷، ۱۳-۱۱، ۱۸-۱۶ و ۱۹-۲۱، زمان کل به‌ترتیب برابر با ۰/۲۹۳، ۰/۵۰۱، ۰/۶۷۱، ۰/٦٤٦ و ۰/٦٢٢ و سطح معناداری تمامی آزمون‌ها کمتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌بستگی بین متغیر نسبت طول مقطع به طول خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر معنادار است. بنابراین فرض H_0 در آزمون هم‌بستگی رد می‌شود و می‌توان گفت که رابطه بین نسبت طول مقطع به طول خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه اول تأیید می‌گردد.

جدول ۳ نتایج آزمون هم‌بستگی فرضیه اول

متغیر	زمان	تراکم خودرو در هر متر از طول معبر		
		ضریب هم‌بستگی	سطح معنی داری	نتیجه آزمون
بین نسبت طول مقطع به طول خودرو	۹-۷	۰/۲۹۳	۰/۰۳۷	رد H_0
	۱۱-۱۳	۰/۵۰۱	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱٦-۱۸	۰/٦۷۱	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۹-۲۱	۰/٦٤٦	۰/۰۰۰	رد H_0
	کل	۰/٦۲۲	۰/۰۰	رد H_0

آزمون فرضیه دوم

فرضیه دوم. مدت زمان عبور خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد.

با توجه به نرمال بودن متغیر مدت زمان عبور خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در زمان‌های صبح، ظهر، بعد از ظهر و شب، به‌منظور آزمون فرضیه دوم می‌توان از آزمون هم‌بستگی پیرسون استفاده کرد. نتایج آزمون هم‌بستگی پیرسون در جدول (٤) آورده شده‌است. ضریب هم‌بستگی بین مدت زمان عبور خودرو و تراکم خودرو در

هر متر از طول معبر در ساعات ۷–۹، ۱۱–۱۳، ۱۶–۱۸ و ۲۱–۱۹، زمان کل به‌ترتیب برابر با ۰/۴۸۰، ۰/۵۶۰، ۰/۷۱۳، ۰/۷۰۵ و ۰/۶۵۳ و سطح معناداری تمامی آزمون ها کمتر از با ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌بستگی بین متغیر مدت زمان عبور خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر معنادار است. بنابراین فرض H_0 در آزمون هم‌بستگی رد می‌شود و می‌توان گفت که رابطه بین مدت زمان عبور خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه دوم تأیید می‌گردد.

جدول ٤ نتایج آزمون هم‌بستگی فرضیه دوم

متغیر	زمان	تراکم خودرو در هر متر از طول معبر		
		ضریب هم‌بستگی	سطح معنی داری	نتیجه آزمون
مدت زمان عبور خودرو	۹–۷	۰/۴۸۰	۰/۰۰۶	رد H_0
	۱۱–۱۳	۰/۵۶۰	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۶–۱۸	۰/۷۱۳	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۹–۲۱	۰/۷۰۵	۰/۰۰۰	رد H_0
	کل	۰/۶۵۳	۰/۰۰	رد H_0

آزمون فرضیه سوم

فرضیه سوم. سرعت خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد.

با توجه به نرمال نبودن متغیرهای سرعت خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در زمان‌های صبح، ظهر، بعد از ظهر و شب، به‌منظور آزمون فرضیه سوم می‌توان از آزمون هم‌بستگی پیرسون استفاده کرد. نتایج آزمون هم‌بستگی پیرسون در جدول (۵) آورده شده‌است. ضریب هم‌بستگی بین سرعت خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در ساعات ۷–۹، ۱۱–۱۳، ۱۶–۱۸ و ۱۹–۲۱، زمان کل به‌ترتیب برابر با ۰/۶۳۵، ۰/۴۹۷، ۰/۴۳۹، ۰/۶۱۷ و ۰/۶۷۱ و سطح معناداری تمامی آزمون‌ها کمتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌بستگی بین متغیر سرعت خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر معنادار است. بنابراین فرض H_0 در آزمون هم‌بستگی رد می‌شود و می‌توان گفت که رابطه بین سرعت خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه سوم تأیید می‌گردد.

جدول ۵. نتایج آزمون هم‌بستگی فرضیه سوم

متغیر	زمان	تراکم خودرو در هر متر از طول معبر		
		ضریب هم‌بستگی	سطح معنی داری	نتیجه آزمون
سرعت خودرو	۹–۷	۰/۶۳۵	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۱–۱۳	۰/۴۹۷	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۶–۱۸	۰/۴۳۹	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۹–۲۱	۰/۶۱۷	۰/۰۰۰	رد H_0
	کل	۰/۶۷۱	۰/۰۰	رد H_0

آزمون فرضیه چهارم

فرضیه چهارم. تعداد عبور خودروها بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معنا داری دارد.

با توجه به نرمال بودن متغیرهای تعداد عبور خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در زمان‌های صبح، ظهر، بعد از ظهر و شب، جهت آزمون فرضیه چهارم می‌توان از آزمون هم‌بستگی پیرسون استفاده کرد. نتایج آزمون هم‌بستگی پیرسون در جدول (٦) آورده شده‌است. ضریب هم‌بستگی بین تعداد عبور خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در ساعات ۷–۹، ۱۱–۱۳، ۱۶–۱۸ و ۱۹–۲۱، زمان کل به‌ترتیب برابر با ۰/۴۳۸، ۰/۳۲۷، ۰/۶۵۸، ۰/۷۲۸ و ۰/۵۴۳ و سطح معناداری تمامی آزمون‌ها کمتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌بستگی بین متغیر تعداد عبور خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر معنادار است. بنابراین فرض H_0 در آزمون هم‌بستگی رد می‌شود و می‌توان گفت که رابطه بین تعداد عبور خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه چهارم تأیید می‌گردد.

جدول ٦ نتایج آزمون هم‌بستگی فرضیه چهارم

متغیر	زمان	تراکم خودرو در هر متر از طول معبر		
		ضریب هم‌بستگی	سطح معنی داری	نتیجه آزمون
تعداد عبور خودرو	۹-۷	۰/٤۳۸	۰/۰۰۱	رد H_0
	۱۱-۱۳	۰/۳۲۷	۰/۰۱۹	رد H_0
	۱٦-۱۸	۰/٦٥۸	۰/۰۰۰	رد H_0
	۱۹-۲۱	۰/۷۲۸	۰/۰۰۰	رد H_0
	کل	۰/٥٤۳	۰/۰۰	رد H_0

تحلیل رگرسیونی خطی چندمتغیره

به‌منظور بررسی تأثیر هم‌زمان متغیرهای نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها بر روی تراکم خودرو در هر متر از طول معبر و نیز پیش‌بینی تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در زمان‌های مختلف از طریق این متغیرهای مستقل، از تحلیل رگرسیونی چند متغیره استفاده شده‌است. در این مدل نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها متغیرهای مستقل می‌باشد. مدل رگرسیون خطی مورد استفاده به‌صورت زیر است:

$$\text{تراکم خودرو} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon$$

که در این رابطه:

نسبت طول مقطع به طول خودرو: x_1

مدت زمان عبور خودرو: x_2

سرعت خودروها: x_3

تعداد عبور خودروها: x_4

در این مدل، β_iها $(i = 0,1,2,3,4)$، ضرایب رگرسیونی مدل هستند که براورد خواهند شد. ε خطای تصادفی است که برای کامل شدن مدل و نشان دادن این‌که خطا نیز تا حدی وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود لازم به ذکر است که میزان اعتبار مدل رگرسیون خطی، به برقراری پیش‌فرض‌های رگرسیون برای براورد مدل بستگی دارد. مهم‌ترین این پیش‌فرض‌ها عبارتند از نرمال بودن متغیر وابسته، عدم خودهم‌بستگی باقی‌مانده‌ها و عدم وابستگی متغیرهای مستقل به‌هم، که برقراری هرکدام از پیش‌فرض‌های ذکر شده، از طریق آزمون‌های به‌ترتیب کلموگروف- اسمیرنف، آزمون دوربین- واتسون و آزمون عامل تورم واریانس(VIF)، بررسی می‌شود. نرمال بودن متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر ثابت شده‌است. بنابراین پیش فرض نرمال بودن متغیر وابسته در این مدل رگرسیونی برقرار است.

نتایج تحلیل رگرسیونی مدل پژوهش در جدول (۷) آورده شده‌است. در ساعت ۷-۹ مقدار آماره دوربین-واتسون برابر با ۱/۷۲۷ بوده که حاکی از نبود مشکل خودهم‌بستگی است. سطح معناداری آزمون برابر با ۰/۰۰۰ است که این مقدار کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، بنابراین فرض H_0 مبنی بر مناسب نبودن مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۵ درصد، رد می‌شود. در نتیجه مدل رگرسیونی مناسب است، بنابراین تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر پذیرفته می‌شود. ضریب تعیین در این مدل برابر با ۰/۷۳٦ است که حاکی از آن است که تقریباً ۷٤ درصد از تغییرات متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر توسط نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها، قابل توضیح است.

در ساعت ۱۱-۱۳ مقدار آماره دوربین- واتسون برابر با ۲/۲۳۷ بوده که حاکی از نبود مشکل خودهم‌بستگی است. سطح معناداری آزمون برابر با ۰/۰۰۰ است که این مقدار کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، بنابراین فرض H_0 مبنی بر مناسب نبودن مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۵ درصد، رد می‌شود. در نتیجه مدل رگرسیونی مناسب است، بنابراین تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر پذیرفته می‌شود. ضریب تعیین در این مدل برابر با ۰/۸٦٦ است که حاکی از آن است که تقریباً ۸۷ درصد از تغییرات متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر توسط نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها، قابل توضیح است.

جدول ۷ آزمون معناداری ضرایب در مدل رگرسیونی

بازه زمانی	متغیر	ضریب غیراستاندارد	ضریب استاندارد	آماره t	سطح معناداری	VIF
۹-۷	ثابت(عرض از مبدأ)	۰/۱۵۸	–	۰/۷۴۷	۰/۴۵۹	–
	نسبت طول مقطع به طول خودرو	۰/۱۴۳	۰/۱۵۸	۲/۴۵۵	۰/۰۲۲	۴/۲۳۴
	مدت زمان عبور خودرو	۰/۱۲۳	۰/۲۷۹	۲/۵۵۶	۰/۰۱۴	۲/۶۳۴
	سرعت خودروها	۰/۱۸۹	۰/۶۴۲	۴/۹۲۸	۰/۰۰۰	۳/۳۴۱
	تعداد عبور خودروها	۰/۱۱۱	۰/۱۲۰	۲/۱۵۱	۰/۰۱۸	۳/۸۵۹
	ضریب تعیین	۰/۷۳۶		آماره F	۱۳/۵۶۵	
	آماره دوربین واتسون	۱/۷۲۷		سطح معنی‌داری	۰/۰۰۰	
۱۳-۱۱	ثابت(عرض از مبدأ)	۰/۲۷۱	–	–	۰/۱۷۴	–
	نسبت طول مقطع به طول خودرو	۰/۲۲۵	۰/۱۳۱	۰/۱۳۱	۰/۰۲۵	۴/۱۲۷
	مدت زمان عبور خودرو	۰/۳۶۱	۰/۲۴۹	۰/۲۴۹	۰/۰۰۰	۳/۴۶۳
	سرعت خودروها	۰/۱۱۶	۰/۱۴۵	۰/۱۴۵	۰/۰۳۴	۴/۶۹۳
	تعداد عبور خودروها	۰/۱۹۳	۰/۱۹۵	۰/۱۹۵	۰/۰۲۳	۳/۴۹۸
	ضریب تعیین	۰/۸۶۶		آماره F	۳۴/۴۱۹	
	آماره دوربین واتسون	۲/۲۳۷		سطح معنی‌داری	۰/۰۰۰	
۱۸-۱۶	ثابت(عرض از مبدأ)	۰/۳۷۹	–	۳/۵۷۰	۰/۰۰۱	–
	نسبت طول مقطع به طول خودرو	۰/۱۳۳	۰/۱۳۵	۳/۲۳۰	۰/۰۱۹	۲/۳۸۴
	مدت زمان عبور خودرو	۰/۱۸۸	۰/۱۸۰	۲/۱۵۱	۰/۰۰۶	۳/۲۴۹
	سرعت خودروها	۰/۱۱۴	۰/۷۵۵	۱۱/۸۶۲	۰/۰۰۰	۲/۲۸۷
	تعداد عبور خودروها	۰/۱۲۸	۰/۱۴۹	۲/۷۶۸	۰/۰۰۸	۳/۴۹۶
	ضریب تعیین	۰/۹۵۶		آماره F	۱۲۰/۷۴۳	
	آماره دوربین واتسون	۱/۹۲۲		سطح معنی‌داری	۰/۰۰۰	
۲۱-۱۹	ثابت(عرض از مبدأ)	۰/۷۷۰	–	۴/۷۸۸	۰/۰۰۰	–
	نسبت طول مقطع به طول خودرو	۰/۳۰۶	۰/۳۱۳	۴/۰۳۳	۰/۰۰۰	۲/۳۲۸
	مدت زمان عبور خودرو	۰/۱۲۷	۰/۲۷۰	۲/۹۸۵	۰/۰۰۵	۳/۱۴۵
	سرعت خودروها	۰/۰۳۶	۰/۲۶۳	۳/۳۸۰	۰/۰۰۱	۲/۵۲۴
	تعداد عبور خودروها	۰/۲۶۹	۰/۳۱۹	۳/۵۰۶	۰/۰۰۱	۲/۳۱۷
	ضریب تعیین	۰/۸۸۷		آماره F	۴۲/۵۹۲	
	آماره دوربین واتسون	۲/۱۷۸		سطح معنی‌داری	۰/۰۰۰	
کل شبانه روز	ثابت(عرض از مبدأ)	۰/۴۵۴	–	۵/۱۱۷	۰/۰۰۰	–
	نسبت طول مقطع به طول خودرو	۰/۱۷۲	۰/۱۹۱	۳/۱۵۳	۰/۰۰۲	۴/۵۲۴
	مدت زمان عبور خودرو	۰/۱۳۲	۰/۲۹۲	۴/۷۸۷	۰/۰۰۰	۲/۲۸۹
	سرعت خودروها	۰/۱۵۳	۰/۳۷۹	۸/۰۵۲	۰/۰۰۰	۳/۵۶۳
	تعداد عبور خودروها	۰/۱۸۰	۰/۲۲۸	۵/۰۷۲	۰/۰۰۰	۳/۴۱۲
	ضریب تعیین	۰/۸۲۹		آماره F	۱۰۹/۳۷۴	
	آماره دوربین واتسون	۱/۸۲۶		سطح معنی‌داری	۰/۰۰۰	

در ساعت ۱۶–۱۸ مقدار آماره دوربین- واتسون برابر با ۱/۹۲۲ بوده که حاکی از نبود مشکل خودهم‌بستگی است. سطح معناداری آزمون برابر با ۰/۰۰۰ است که این مقدار کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، بنابراین فرض H_0 مبنی بر مناسب نبودن مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۵ درصد، رد می‌شود. در نتیجه مدل رگرسیونی مناسب است، بنابراین تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر پذیرفته می‌شود. ضریب تعیین در این مدل برابر با ۰/۹۵۶ است که حاکی از آن است که تقریباً ۹۶ درصد از تغییرات متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر توسط نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها، قابل توضیح است.

در ساعت ۱۹–۲۱ مقدار آماره دوربین- واتسون برابر با ۲/۱۷۸ بوده که حاکی از نبود مشکل خودهم‌بستگی است. سطح معناداری آزمون برابر با ۰/۰۰۰ است که این مقدار کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، بنابراین فرض H_0 مبنی بر مناسب نبودن مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۵ درصد، رد می‌شود. در نتیجه مدل رگرسیونی مناسب است، بنابراین تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر پذیرفته می‌شود. ضریب تعیین در این مدل برابر با ۰/۸۸۷ است که حاکی از آن است که تقریباً ۸۹ درصد از تغییرات متغیر وابسته تراکم خودرو در هر متر از طول معبر توسط نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها، قابل توضیح است.

مدل رگرسیون خطی مورد استفاده به‌صورت زیر است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

که در این رابطه:

Y: تراکم خودرو در هر متر از طول معبر (متغیر وابسته)

X_1: نسبت نسبت طول مقطع به طول خودرو (متغیر مستقل)

X_2: مدت زمان عبور خودرو بر حسب ثانیه (متغیر مستقل)

X_3: سرعت خودروها بر حسب کیلومتر بر ثانیه (متغیر مستقل)

X_4: تعداد عبور خودروها (متغیر مستقل)

براساس مدل‌سازی انجام‌شده در هر یک از ساعت‌های تحلیل شده نتایج مدل رگرسیون به شرح زیر است:

ساعت ۷–۹ :

$$Y = 0.143\,X_1 + 0.123X_2 + 0.189X_3 + 0.111X_4$$

ساعت ۱۱–۱۳ :

$$Y = 0.225\,X_1 + 0.361X_2 + 0.116X_3 + 0.193X_4$$

ساعت ۱۶–۱۸

$$Y = 0.379 + 0.133\,X_1 + 0.188X_2 + 0.114X_3 + 0.128X_4$$

ساعت ۱۹–۲۱

$$Y = 0.770 + 0.306\,X_1 + 0.127X_2 + 0.336X_3 + 0.269X_4$$

کل شبانه روز

$$Y = 0.454 + 0.172\,X_1 + 0.132X_2 + 0.053X_3 + 0.180X_4$$

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی مطالعه اثرات خودروها بر تراکم ترافیک در بزرگراه همت شهر تهران پرداخته شده‌است. برای این کار جزئیات تردد خودروها در بزرگراه همت در زمان‌های مختلف از طریق فیلم‌برداری برداشت شده‌است. پس از پردازش داده‌ها توسط ابزارها و نرم افزارهای آماری، نتایج زیر حاصل شدند که می‌توانند نشان‌دهنده پاسخ‌های مناسب برای سؤالات مطرح شده در تحقیق باشند. نتایج تحقیق نشان داد:

فرضیه اول: نسبت طول مقطع به طول خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان گفت که رابطه بین نسبت طول مقطع به طول خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه اول تأیید می‌گردد.

فرضیه دوم: مدت زمان عبور خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد. براساس تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان گفت که رابطه بین مدت زمان عبور خودرو و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و

فرضیه دوم تأیید می‌گردد.

فرضیه سوم: سرعت خودرو بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان گفت که رابطه بین سرعت خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه سوم تأیید می‌گردد.

فرضیه چهارم: تعداد عبور خودروها بر تراکم خودرو در هر متر از طول معبر تأثیر معناداری دارد. براساس تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان گفت که رابطه بین تعداد عبور خودروها و تراکم خودرو در هر متر از طول معبر، معنادار است و فرضیه چهارم تأیید می‌گردد.

هم‌چنین به‌منظور بررسی تأثیر هم‌زمان متغیرهای نسبت طول مقطع به طول خودرو، مدت زمان عبور خودرو، سرعت خودروها و تعداد عبور خودروها بر روی تراکم خودرو در هر متر از طول معبر و نیز پیش‌بینی تراکم خودرو در هر متر از طول معبر در زمان‌های مختلف از طریق این متغیرهای مستقل، از تحلیل رگرسیونی چندمتغیره استفاده شده‌است که نتایج در بخش قبلی ارائه شده‌است.

مراجع

1. Rohani, A, “Challenges and perspectives of the country's road and traffic safety”, *Police Human Development*, Vol.6 , No. 22, (2009), (In persian).
2. Tavasoli, G, “Urban sociology”, Tehran, Payam Noor University publication. Inc, Tehran, (2014), (In Persian).
3. Tashakori, S.J, “Statistical yearbook of transportation and traffic of Tehran city”, Transportation and Traffic Organization of Tehran, (2014), (In Persian).
4. Hamidi, M., Firozeh, J., “Providing a model for the integrated management of transportation and urban traffic in Bojnord”, *The fifth international conference on new perspectives in management, Accounting and entrepreneurship*, Tehran, (2021), (In Persian).
5. Armin, M., “Strategies for organizing traffic and urban transportation planning (case study of Al Ashtar city)”, *The fifth international conference on modern studies of civil engineering, architecture, urban planning and environment in the 21st century*, Tehran, (2021), (In persian).
6. Sayafzadeh, A., Poladvand, A, “Highway development and their role in reducing population density in central cities”, *Green Architecture*, Vol. 4, No. 13, (2018), (In Persian).
7. - Gao, J., Xie, K., & Ozbay, K., "Exploring the Spatial Dependence and Selection Bias of Double-Parking Citations Data", *Transportation Research Record*, Vol. 2672, No. 42, pp.159-169, (2018).
8. - Carbonell, M., Cacheda, C., Magín, J., "Effect of illegal on street parking on travel times in urban environment", *16th IEEE International Conference on Computer and Information Technology*, Shanghai, (2016).
9. Yang, Z., Zhang, Y, Zhu, R., Ye X., Jiang, X, "Impacts of Pedestrians on Capacity and Delay of Major Street Through Traffic at Two-Way Stop-Controlled Intersections", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, Article ID 383121, pp.1-11, (2015).

10. - Albalate, D., Fageda, X., "Congestion, road safety, and the effectiveness of public plicies in urban areas", *Sustainability*, Vol. 11, No. 18, (2019).
11. - Liu, X., li, X., "Research on Traffic Congestion Based on System Dynamics: The Case of Chongqing, China", *Hindawi*, Vol. 2020, pp. 1-13, (2020).
12. - Nian, G., Sun, J., Huang, J, "Exploring the effects of urban built environment on road travel speed variability with a spatial panel data model", *International journal of Geo- information*, Vol. 10, no. 829, (2021).

Investigating the Most Important Geomechanical Parameter of Unsaturated Soils using Different Artificial Intelligence Methods*

Reserch Articel

Hadi Fattahi[1] Fateme Jiryaee[2]

1. Introduction

Today, engineers in most mining and civil projects deal with unsaturated soils. Unsaturated soil is a multi-phase porous medium composed of soil grains and the liquid and gas phase, which is usually air and water. Soil behavioral modeling and designs, regardless of unsaturated soil conditions, although simpler, reduce the safety factor and increase costs. The principle of effective stress is a basic principle in soil mechanics that transforms a porous environment consisting of several phases and multi-stresses into a continuous environment consisting of one phase and one stress to allow the application of the principles of solid mechanics. The determination of shear strength in unsaturated soils in the Bishop relation, in addition to the effective stress, depends on a parameter called the effective stress parameter (χ). This parameter determines the degree of suction participation in the effective stress. The value of this parameter is one in the saturated state and zero in the dry state. The value of this parameter is usually determined by thriaxial, shear, pressure plate, and filter paper tests. The relationship between the χ parameter and its related parameters is a nonlinear and complex relationship and the definition of this relationship is experimentally associated with many errors. Accurate predictions of χ can be achieved using advanced approaches such as intelligent methods and inferential systems. Among the intelligent methods, some are used for classification problems and some for regression problems. Some of them are able to solve both types of problems. Support Vector Machine (SVM) is one of the most widely used high performance methods. K-Nearest Neighbor (KNN) and Random Forest (RF) methods have also proven in many cases that they can work well.

In this research, to predict the χ parameter due to its effective parameters, artificial intelligence methods such as random forest, support vector machine and k-nearest neighbor are used for modeling. The modeling is performed in WEKA software and will use laboratory data collected from several articles. Inlet parameters in this model are soil-water characteristic curve fitting parameter, confining pressure, suction and volumetric water content and output variable, χ parameter.

2. The most important methods used in this research

2.1. Support vector machine. The support vector regression method consists of training algorithms that work based on the classifier support vector machine. This method achieves a model for prediction by using statistical learning theory and minimizing structural risk. The SVR method was first proposed by Vepnik (1995). In this method, a nonlinear mapping is used to train the data and the data is transferred to a higher dimensional space and then the error function ε in Equation 1 is used to construct the regression shape.

$$L(y.f(x.a)) = |y - f(x.a)|_{\varepsilon} = \begin{cases} 0 & \text{if} |y - f(x.a)| \le \varepsilon \\ |y - f(x.a)| - \varepsilon & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Equation 1 shows that errors with values less than ε are not considered. Nonlinear relation, the input and output parameters are written as an optimal function according to Equation 2.

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (2)$$

where *x* is the input variable vector, *w* is the weight vector, and *b* is the bias. This function is known as the ε-Insensitive Loss Function and its solution can be expressed as a quadratic problem in Equation 3.

$$\begin{cases} \text{Min} \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^{L} (\xi_i - \xi_i^*) \\ \text{s.t. } y_i - w \cdot \varphi(x_i) - b \le \varepsilon + \xi_i \\ w \cdot \varphi(x_i) + b - y_i \le \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i \ge 0 \\ \xi_i^* \ge 0 \end{cases} \quad (3)$$

where *C* is the penalty parameter and ξ is the auxiliary variable. By introducing the Lagrangian coefficients and applying the kernel function instead of the internal multiplication of the operators, the above optimization problem is simplified and Equation 2 becomes Equation 4.

$$f(x) = \sum_{x_i \in SV} (a_i - a_i^*) K(x_i . x_j) + b \quad (4)$$

where a_i and a_i^*Lagrange coefficients and $k(x_i . x_j)$ are kernel functions.

2.2. K-Nearest Neighbor

The k-nearest neighbor method is a non-parametric statistical method used for classification and regression problems. This method is based on the concept of similarity, and predictions are made based on similar situations that have occurred in the past. In other words, by observing the independent variables in real time, the model searches for patterns similar to the current conditions in the historical series and selects possible

*Manuscript received: 17 December 2021; Revised, , Accepted, 16 May 2022 .

1. Corresponding author. Associate Professor in Rock Mechanics, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran. **Email**: H.fattahi@arakut.ac.ir

2. MSc Student in Mining Engineering, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

options. Equation 5 shows The vector (1 × m) of the predictive values of xj at time t.

$$\mathrm{Pr}_{jt} = (x_{jt}) \qquad j = 1 \dots m \tag{5}$$

Also, the matrix (n × m) of the value of predictor variables xj in the historical time series is as Equation 6.

$$\mathrm{Pr}_{j.(t-i)} = x_{j.(t-i)} \qquad j = 1 \dots m \,.\, i = 1 \dots n \tag{6}$$

Using the distance meter function (Dist), in Equation 7, the distance between the vector $\mathrm{Pr}_{j,\,t}$ and the rows of the matrix $\mathrm{Pr}_{j,\,(t-i)}$ is calculated.

$$\mathrm{Dist}(t-i) = f(w_j . x_{j.(t-i)} . x_{jt}) \tag{7}$$

where *j* is the index corresponding to the predictor variables and *i* is the index corresponding to the time step in the historical series. w_j are also the weights of the predictor variables. In order to improve the performance of the model, appropriate methods should be used to estimate the best neighbors and develop data transfer functions and distance measurement functions.

3. Case studies

The database included in the analyzes contains 120 data from the results of thriaxial, shear, pressure plate and filter paper tests, which were collected from several articles. These data include 7 variables: suction (s), bubbling pressure (hb), net confining pressure (p), residual water content (θr), saturated volumetric water content (θs), soil-water characteristic curve fitting parameter (λ), and the effective stress parameters (χ). For initial processing, the parameters s, hb, p, θr and θs are dimensionlessly entered into the model so that the dimensionless confining pressure parameter is obtained from the $\frac{P}{P_0}$ ratio (where the parameter is P_0 = 101.325KPa) and the suction parameter is dimensioned by the ratio $\frac{s}{h_b}$. Also, from the $\frac{\theta_r}{\theta_s}$ ratio, the dimensionless volume water content parameter is obtained. Thus, in the modeling, the input parameters include $\frac{P}{P_0}$, $\frac{s}{h_b}$, $\frac{\theta_r}{\theta_s}$ and λ, and the output parameter χ. Of this number of normalized data, 80% are used as training data and 20% as test data to evaluate the models.

4. Results and conclusion

Given that a significant percentage of the earth's surface is covered by unsaturated soils, it is obvious that these soils are encountered during operations in most mining and civil projects. The determination of shear strength in unsaturated soils in a Bishop relationship depends on a parameter called the χ parameter, which is a function of suction. In this research, models were developed and evaluated to predict the χ parameter. These models were performed using three intelligent methods of random forest, support vector machine and k-nearest neighbor in the form of WEKA software and in it, 120 laboratory samples collected from several papers were used. The results showed:

- Random forest model in both training dataset (R^2 = 0.968 and RMSE = 0.051) and test dataset (R^2 = 0.869 and RMSE = 0.107), with high accuracy can accurately predict the parameter χ;
- Support vector machine and k-nearest neighbor models also have good performance and accuracy in training dataset;
- Sensitivity analysis performed on the parameters showed that the parameter of volumetric water content is very important in predicting the parameter χ, and in contrast, the parameter of the soil-water characteristic curve fitting is less important than other parameters.
- In general, it can be said that WEKA powerful and practical software can be used as a powerful tool in data mining and earth engineering sciences in estimating geomechanical parameters.

DOI: 10.22067/jfcei.2022.74090.1100 https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

تخمین مهم‌ترین پارامتر ژئومکانیکی خاک‌های غیراشباع با به‌کارگیری روش‌های مختلف هوش مصنوعی*

مقاله پژوهشی

هادی فتاحی[۱] فاطمه جیریایی[۲]

چکیده *در پیش‌بینی رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی که بر خاک‌های غیر اشباع احداث می‌شوند، دانستن خواص ژئومکانیکی به‌ویژه تنش مؤثر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تأثیر مکش در خاک های غیراشباع موجب تغییر در رفتار حجمی و برشی خاک می‌شود. از این رو در تعیین مقاومت برشی در خاک‌های غیراشباع، پارامتر تنش مؤثر (χ) به‌عنوان تابعی از مکش نقش اساسی دارد. تعیین این پارامتر نیازمند زمان و هزینه زیادی است که در آزمون‌های آزمایشگاهی صرف می‌شود. هدف از این تحقیق ارزیابی چند روش هوشمند برای ایجاد مدل‌هایی است که از طریق غیرمستقیم پارامتر χ را به‌طور دقیق تخمین بزنند. بدین منظور از ۱۲۰ داده (که از نتایج آزمایش‌های سه محوره، برشی، صفحه فشار و کاغذ فیلتر است) و روش‌های هوشمند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار هوشمند WEKA استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های توسعه یافته توسط سه روش هوشمند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایگی، از عملکرد و دقت بسیار خوبی برخوردار هستند. اما مدل جنگل تصادفی در ارزیابی بر روی داده‌های آزمون با $R^2=0.918$ و $RMSE=0.079$، بهتر از دو مدل دیگر است. به‌علاوه در این تحقیق آنالیز حساسیت به‌منظور تعیین اهمیت پارامترهای مؤثر بر روی پارامتر χ انجام شد که از بین پارامترهای ورودی در مدل‌سازی، مشخص شد که پارامتر محتوای آب حجمی ($\frac{\theta_r}{\theta_s}$) بیشترین تأثیر را بر روی پارامتر χ دارد.*

واژه‌های کلیدی تنش مؤثر، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، نزدیک‌ترین همسایگی، آنالیز حساسیت، نرم‌افزار WEKA.

مقدمه

امروزه مهندسان در اکثر پروژه‌های معدنی و عمرانی با خاک‌های غیراشباع سر و کار دارند. پروژه‌هایی مانند احداث جاده‌ها، فضاهای زیرزمینی و تونل‌ها، ساخت سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای و فرودگاه‌ها، خاک‌ریزهای شیروانی‌ها و... از مواردی هستند که در حین عملیات با خاک‌های غیراشباع برخورد می‌شود [1]. خاک غیراشباع (Unsaturated Soil) یک محیط متخلخل چندفازی است که از دانه‌های خاک و فاز مایع و گاز که معمولاً آب و هواست، تشکیل می‌شود. از این رو، وجود نیروی کشش سطحی در مرز تماس آب و هوا و یا به عبارتی وجود پارامتر مکش (Suction)، فشار فاز سیال را متفاوت از حالت خاک اشباع می‌کند و منجر به تغییر در رفتار خاک می‌شود [2]. باران، تبخیر یا بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، از عوامل زیست‌محیطی هستند که منجر به خشک‌شدگی یا ترشدگی و به‌عبارتی اشباع یا غیراشباع بودن خاک می‌شوند. مدل‌سازی رفتاری خاک و طراحی‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط خاک غیراشباع، گرچه ساده‌تر انجام می‌شود اما ضریب ایمنی را کاهش و هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. اصل تنش مؤثر (Effective Stress) یک اصل اساسی در مکانیک خاک است که یک محیط متخلخل متشکل از چند فاز و چند تنشی را به یک محیط پیوسته تشکیل شده از یک فاز و یک تنش تبدیل می‌کند تا امکان استفاده از اصول مکانیک جامد فراهم شود. تعیین مقاومت برشی در خاک‌های غیراشباع در رابطه بیشاپ (Bishop)، علاوه‌بر تنش مؤثر وابسته به پارامتری به نام پارامتر تنش مؤثر (χ) است. این پارامتر، میزان مشارکت مکش در تنش مؤثر را مشخص می‌کند. مقدار این پارامتر در حالت اشباع یک و در حالت خشک صفر است [3]. رابطه بین پارامتر χ و پارامترهای مرتبط آن یک رابطه غیر خطی و پیچیده است و تعریف این رابطه به‌طور تجربی با خطای زیادی همراه می‌شود. با استفاده از رویکردهای پیشرفته‌ای مانند روش‌های هوشمند و سیستم‌های استنباطی می‌توان به

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۲۶ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.
(۲) دانشجو، دانشکدهٔ مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.
Email: h.fattahi@arakut.ac.ir

پیش‌بینی‌های دقیقی از χ دست یافت. پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر در این راستا انجام شده‌است به شرح زیر است.

لی و همکاران (۲۰۰۳) [4] یک رابطه غیرخطی برای تخمین مقاومت برشی در خاک غیر اشباع ارائه دادند که در آن برای پیش‌بینی پارامتر چسبندگی C_{max} از روش شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) استفاده کردند.

کایادلن [5] با هدف بررسی قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی رابطه پیچیده بین پارامترهای اساسی خاک، مکش و پارامتر χ، پنج مدل شبکه عصبی مصنوعی را با پارامترهای ورودی متفاوت ایجاد کرد.

اجدری و همکاران [6] از مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی پارامتر تنش مؤثر استفاده کردند.

جوهری و همکاران [7] به توسعه یک مدل GEP (Gene Expression Programing) به‌عنوان یک مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی پارامتر χ پرداختند. آن‌ها نشان دادند، پارامتر مکش مؤثرترین پارامتر در پیش‌بینی پارامتر χ است.

کاننگو و همکاران [8] روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون درختی CART (Classification and Regression Tree) را برای تخمین غیرمستقیم پارامترهای مقاومت برشی خاک غیر اشباع به‌کار بردند. آن‌ها برای ساخت مدل‌های مختلف از پارامترهای ورودی درصد تشکیل‌دهنده شن، ماسه، سیلت، خاک رس، چگالی خشک و شاخص پلاستیسیته استفاده کردند.

راهنما و همکاران [9] دو مدل سیستم استنتاج فازی FCM-FIS (Fuzzy C-means Clustering method- Fuzzy) و SC-FIS (Subtractive clustering) را به‌کار گرفتند و پارامتر χ را پیش‌بینی کردند. آن‌ها نشان دادند پارامترهای فشار محصورکننده (Confining Pressure) و محتوای آب حجمی (Volumetric Water Content) مؤثرترین پارامترها در روند پیش‌بینی هستند.

تین بوی و همکاران [10] یک روش پیشنهادی برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک ارائه دادند و در آن دو روش حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان LSSVM (Least Squares Support Vector Machine) و الگوریتم CSO (Cuckoo Search Optimization) را تلفیق کردند. آن‌ها برای ارزیابی مدل ارائه شده از نمونه‌های جمع‌آوری شده از یک بزرگراه در ویتنام استفاده کردند.

در این تحقیق برای پیش بینی پارامتر χ به‌واسطه پارامترهای مؤثر آن، از روش‌های هوش مصنوعی نظیر، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و نزدیکترین همسایگی، برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌سازی‌ها در نرم افزار هوشمند WEKA انجام می‌شود و در آن‌ها مجموعه داده‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده از چندین مقاله به کار گرفته خواهد شد. پارامترهای ورودی در این مدل، پارامتر منحنی مشخصه آب-خاک (Soil-Water Characteristic Curve Fitting Parameter)، فشار محصور کننده، مکش و محتوای آب حجمی و متغیر خروجی، پارامتر χ است.

پارامتر تنش مؤثر در روابط تجربی

در پروژه‌هایی که با خاک‌های غیراشباع سر و کار دارند، متغیر حالت تنش، نقش تعیین‌کننده‌ای در مدل‌سازی رفتاری خاک دارد. در خاک‌های اشباع تنش مؤثر به‌عنوان متغیر حالت تنش در نظر گرفته می‌شود، اما در خاک‌های غیراشباع متغیر حالت تنش، مطابق رابطه (۱) از دو متغیر حالت تنش مجزا تشکیل می‌شود.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \qquad (۱)$$

که در آن χ پارامتر تنش مؤثر، u_a فشار آب حفره‌ای، $(\sigma - u_a)$ تنش خالص نرمال، $(u_a - u_w)$ نماینده مکش ارائه شده توسط خلیلی و خباز می‌باشد [11]. آن‌ها χ را به‌عنوان تابعی از نسبت مکش طبق رابطه (۲) معرفی کردند.

$$\chi = \begin{cases} \left(\frac{u_a - u_w}{u_e}\right)^{-0n55} & for \quad u_a - u_w > u_e \\ 1 & for \quad u_a - u_w \le u_e \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن u_e مقدار ورودی هوا می‌باشد. این رابطه گذار از حالت اشباع، به حالت غیراشباع را نشان می‌دهد. تعیین پارامتر χ نیازمند زمان و هزینه زیادی است که در طی آزمون‌های آزمایشگاهی صرف می‌شود. طوری که مطالعات نشان می‌دهد این پارامتر بسیار غیرخطی بوده و روابط تجربی قادر به تخمین دقیق آن نخواهند بود [12]. بیشاپ رابطه (۳) را برای محاسبه مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع ارائه داد [13].

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + \chi s \tan\phi \qquad (۳)$$

که در آن $\acute{c}$ و $\acute{\varphi}$ چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر هستند. به‌طور کلی χ تابعی از درجه اشباع‌شدگی (sr) فرض می‌شود. رگرسیون‌های برازش‌شده بر روی برخی از داده‌های تجربی، تناسب خوبی را بین این دو پارامتر نشان می‌دهند. در رابطه (٤) χ تابعی از (sr) تعریف شده‌است [14].

$$\chi = S_r^k = (\frac{\theta}{\theta_s})^k \qquad (٤)$$

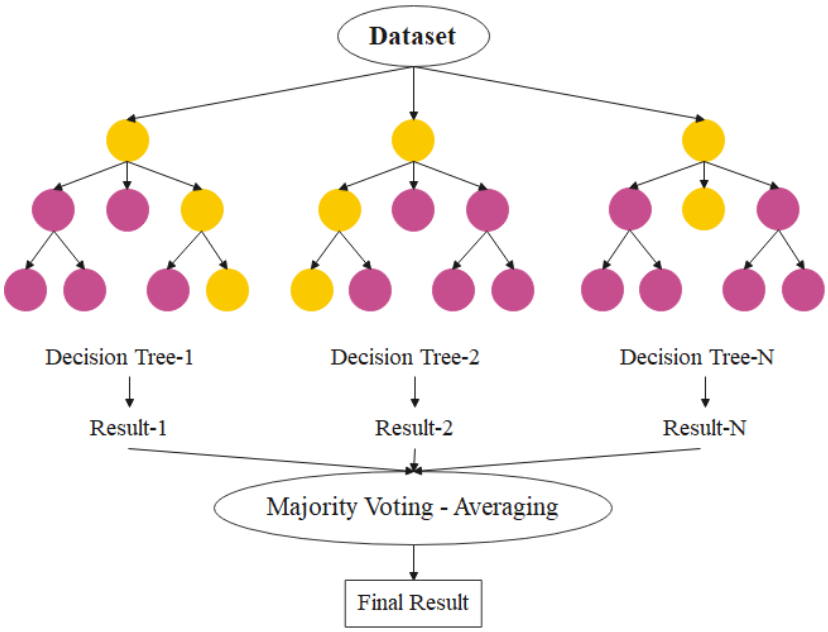
که در آن θ محتوای آب حجمی، θ_s محتوای آب اشباع و k یک پارامتر بهینه شده‌است که از طریق بهترین برازش بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده به‌دست می‌آید.

معرفی روش‌های هوشمند

در این بخش به توصیف برخی از تکنیک‌های داده‌کاوی که در این تحقیق بکارگرفته شده‌اند، پرداخته خواهد شد.

جنگل تصادفی RF (Random Forest)

جنگل تصادفی روشی برگرفته از روش درخت تصمیم است و برای اهداف طبقه‌بندی و رگرسیون داده‌های گسسته و پیوسته مناسب می‌باشد. روش درخت تصمیم نوسانات بالایی را در نتایج خود نشان می‌دهد، به همین دلیل کار جنگل تصادفی کاهش نوسانات و واریانس براوردها و در نتیجه بهبود نتایج درخت تصمیم است. جنگل تصادفی این کار را با ترکیب چند درخت تصمیم انجام می‌دهد، که در ساخت هر درخت تصمیم، تعدادی از متغیرها به‌طور تصادفی شرکت می‌کنند. مجموعه درخت‌ها با در نظر گرفتن n نمونه بوت استرپ از داده‌ها به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای مستقل ساخته می‌شوند. به این معنی که تعداد زیادی نمونه‌برداری همراه با جای‌گذاری انجام می‌شود. سپس بر روی هر نمونه یک درخت تصمیم تعریف می‌شود. اگر تعداد تمام متغیرهای مستقل M باشد، در هر شاخه از درخت به‌طور تصادفی m متغیر مستقل، برای تقسیم شدن انتخاب می‌شود. برای حالت رگرسیون نسبت $\frac{m}{M} = \frac{1}{3}$ و در حالت طبقه‌بندی $m = \sqrt{M}$ پیشنهاد می‌شود. سرانجام به تعداد درخت‌ها برای بردارهای ورودی، یک خروجی حاصل می‌شود و خروجی نهایی مدل از میانگین‌گیری این خروجی‌ها حاصل می‌شود [15]. شکل (۱) نمونه‌ای از جنگل تصادفی تشکیل شده از N درخت رویداد را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمایی از جنگل تصادفی متشکل از N درخت رویداد

ماشین بردار پشتیبان SVM (Support Vector Machine)

ماشین بردار پشتیبان یک الگوریتم نظارت‌شده یادگیری ماشین است که از نوع مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برای کلاس‌بندی داده‌ها و از نوع مدل رگرسیون بردار پشتیبان، برای حل مسائل پیش‌بینی استفاده می‌شود. روش رگرسیون بردار پشتیبان از الگوریتم‌های آموزشی تشکیل شده که بر اساس ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی‌کننده کار می‌کند. این روش با بهره‌گیری از تئوری یادگیری آماری و مینیمم کردن ریسک ساختاری به مدلی برای پیش‌بینی می‌رسد. روش SVR (Support Vector Regression) نخستین بار توسط وپنیک ارائه شد [16]. در این روش برای آموزش داده‌ها از یک نگاشت غیرخطی استفاده می‌شود و داده‌ها به فضایی با ابعاد بالاتر منتقل می‌شوند و سپس برای ساخت شکل رگرسیون از تابع خطای ε در رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$L\left(y.f\left(x.a\right)\right)=\left|y-f\left(x.a\right)\right|_{\varepsilon}= \\ =\begin{cases}0 & if\ \left|y-f\left(x.a\right)\right|\le\varepsilon \\ \left|y-f\left(x.a\right)\right|-\varepsilon & Otherwise\end{cases} \quad (۵)$$

رابطه (۵) نشان می‌دهد که خطاهایی با مقادیر کمتر از ε در نظر گرفته نمی‌شوند. رابطه غیرخطی پارامترهای ورودی و خروجی مطابق رابطه (٦) به شکل یک تابع بهینه نوشته می‌شود.

$$f(x) = w^T\varphi(x) + b \quad (٦)$$

که در آن x بردار متغیر ورودی، w بردار وزن و b بایاس است. این تابع به‌عنوان تابع زیان ε- غیرحساس (Insensitive ε-Loss Function) شناخته می‌شود و حل آن می‌تواند به شکل مسئله درجه دوم در رابطه (۷) بیان شود.

$$\begin{cases} Min\frac{1}{2}w^Tw + C\sum_{i=1}^{L}(\xi_i - \xi_i^*) \\ s.t.\ y_i - w\cdot\varphi(x_i) - b \le \varepsilon + \xi_i \\ w\cdot\varphi(x_i) + b - y_i \le \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i \ge 0 \\ \xi_i^* \ge 0 \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن C پارامتر جریمه و ξ متغیر کمکی است. با معرفی ضرایب لاگرانژ و کاربرد تابع کرنل به‌جای ضرب داخلی عملگرها، مسئله بهینه‌سازی فوق ساده‌تر شده و رابطه (٦) به شکل رابطه (۸) در می‌آید.

$$f(x) = \sum_{x_i\in SV}(a_i - a_i^*)K(x_i.x_j) + b \quad (۸)$$

که در آن a_i و a_i^* ضرایب لاگرانژ و $k(x_i.x_j)$ تابع کرنل است [17].

نزدیک‌ترین همسایگی (KNN)

روش نزدیک‌ترین همسایگی یک روش آماری ناپارامتری است که برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش مبتنی بر مفهوم تشابه بوده و پیش‌بینی‌ها بر اساس موقعیت‌های مشابهی که در گذشته اتفاق افتاده، انجام می‌شود. به عبارتی با مشاهده متغیرهای مستقل در زمان واقعی، مدل به جستجوی الگوهای مشابه شرایط فعلی در سری تاریخی می‌پردازد و گزینه‌های محتمل را انتخاب می‌کند [18]. رابطه ۹ بردار 1×m مقادیر پیش‌بینی‌کننده x_j در زمان t را نشان می‌دهد.

$$Pr_{jt} = (x_{jt}) \qquad j = 1 \dots m \quad (۹)$$

هم‌چنین ماتریس n×m مقادیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده x_j در سری زمانی تاریخی به‌صورت رابطه (۱۰) است.

$$Pr_{j.(t-i)} = x_{j.(t-i)} \quad (۱۰)$$

$$j = 1 \dots m\ .\ i = 1 \dots n$$

با استفاده از تابع فاصله‌سنج Dist، در رابطه (۱۱)، فاصله بین بردار $Pr_{j,t}$ با سطرهای ماتریس $Pr_{j,(t-i)}$ محاسبه می‌شود.

$$Dist(t-i) = f(w_j.x_{j.(t-i)}.x_{jt}) \quad (۱۱)$$

که در آن j اندیس مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و i اندیس مربوط به گام زمانی در سری تاریخی است. w_j نیز وزن‌های متغیرهای پیش‌بینی‌کننده می‌باشد. در ادامه می‌بایست به‌منظور بهبود عملکرد مدل، از روش‌های مناسبی برای تخمین بهترین همسایه‌ها، توسعه توابع انتقال اطلاعات و توابع فاصله سنجی استفاده کرد [19].

معرفی اجمالی نرم‌افزار هوشمند WEKA

تا به امروز نرم‌افزارهای فراوانی در حوزه داده‌کاوی عرضه

شده‌اند که هر یک متناسب با نوع و فرمت داده‌هایی که پردازش می‌کنند، شامل الگوریتم‌های مختلفی می‌شوند. نرم‌افزار WEKA از جمله ابزارهای قدرتمند داده‌کاوی است و شامل الگوریتم‌های روز یادگیری ماشین و ابزارهای پیش‌پردازش داده‌ها می‌باشد. در این نرم‌افزار می‌توان روش‌های مختلف داده‌کاوی را بر روی داده‌ها آزمایش کرد و با ایجاد چند میز کار، نتایج مدل‌سازی برای روش‌های مختلف یا داده‌های متفاوت را به‌طور هم‌زمان مقایسه کرد. مجموعه روش‌ها برای مسائلی مانند رگرسیون، طبقه‌بندی، خوشه‌بندی، کاوش قواعد انجمنی و انتخاب ویژگی، در این نرم‌افزار گرد آمده‌اند. همه روش‌ها، ورودی‌های خود را با فرمت ARFF دریافت می‌کنند که می‌توان آن را به‌وسیله یک درخواست از پایگاه داده تولید کرد. به‌علاوه کتابی جامع و مرتبط با این نرم افزار [20] برای آشنایی بیشتر معرفی می‌شود.

توصیف پایگاه داده برای مدل‌سازی با روش‌های هوشمند

پایگاه داده شرکت داده شده در آنالیزها، شامل ۱۲۰ داده از نتایج آزمایش‌های سه‌محوره، برشی، صفحه فشار و کاغذ فیلتر است که از چندین مقاله جمع‌آوری شده‌است [21-29]. این داده‌ها شامل ۷ متغیر شامل: مکش (s)، فشار حبابی (h_b)، فشار خالص محصور کننده (p)، محتوای آب باقی‌مانده (θ_r)، محتوای آب حجمی اشباع شده (θ_s)، پارامتر منحنی مشخصه آب-خاک (λ) و پارامتر تنش مؤثر (χ) می‌باشند. به‌منظور پردازش اولیه، پارامترهای s، h_b، p، θ_r و θ_s به‌صورت بی‌بعد وارد مدل‌سازی می‌شوند بدین صورت که از نسبت $\frac{P}{P_0}$ پارامتر فشار محصور کننده بدون بعد حاصل می‌شود (که در آن پارامتر P_0=101.325KPa است) و پارامتر مکش نیز توسط نسبت $\frac{s}{h_b}$ بدون بعد می‌شود. هم‌چنین از نسبت $\frac{\theta_r}{\theta_s}$ پارامتر محتوای آب حجمی بدون بعد به‌دست می‌آید. بدین صورت در مدل‌سازی‌ها پارامترهای ورودی شامل $\frac{P}{P_0}$، $\frac{s}{h_b}$، $\frac{\theta_r}{\theta_s}$ و λ و پارامتر خروجی χ می‌شوند. جدول (۱) مشخصات آماری داده‌های مربوط به این پارامترها را نشان می‌دهد. از این تعداد داده نرمالایز شده، ۸۰ درصد به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد، به‌عنوان داده‌های آزمون جهت ارزیابی مدل‌ها به‌کار گرفته می‌شوند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{n}(Y_{mea} - Y_{pre})^2}{\sum_{k=1}^{n} Y_{mea}^2 - \frac{\sum_{k=1}^{n} Y_{pre}^2}{n}} \quad (۱۲)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left|\frac{Y_{mea} - Y_{pre}}{Y_{mea}}\right| \quad (۱۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(Y_{mea} - Y_{pre})^2} \quad (۱٤)$$

مدل‌سازی و تحلیل نتایج

به‌منظور ارزیابی عملکرد و دقت مدل‌های هوشمند چندین شاخص و معیار شامل ضریب هم‌بستگی مربع (R^2)، میانگین درصد خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین خطای مربع (RMSE) معرفی شده‌اند. در تمامی این معادلات (معادلات ۱۲ تا ۱٤) Y_{mea} و Y_{pre} به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده هستند و n تعداد نمونه‌ها می‌باشند.

جدول ۱ مشخصات آماری پارامترهای ورودی و خروجی مدل‌ها

پارامترها	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار
فشار محصورکننده ($\frac{P}{P_0}$)	۰	۳/۹٤۸	۱/۲٤۳	۱/۰۳٤
مکش ($\frac{S}{h_b}$)	۰	۳۰۰	۲٤/۲٦۲	٤٦/٤۱٥
محتوای آب حجمی ($\frac{\theta_r}{\theta_s}$)	۰	۰/۷۱٤	۰/۲٤۹	۰/۲۳۱
منحنی مشخصه آب- خاک (λ)	۰/۱۹	۱۱/۸۲	۱/۲۹٤	۲/٤۱۹
پارامتر تنش مؤثر (χ)	۰/۰۹۱	۱	۰/٦۸۹	۰/۲۷٤

مطابق با روابط فوق، هر قدر مقادیر MAE و RMSE به صفر نزدیک‌تر و مقدار R^2 به‌سمت عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی‌شده به مقدار واقعی نزدیک‌تر شده و به‌عنوان یک مدل ایدئال پذیرفته می‌شود.

در ادامه، پس از آماده‌سازی داده‌ها نوبت به ساخت مدل‌هایی برای پیش‌بینی/تخمین پارامتر χ با استفاده از روش‌های هوشمند در نرم‌افزار WEKA می‌رسد. از جمله روش‌های هوشمند موجود در نرم‌افزار، سه روش هوشمند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایگی که دارای عملکرد و دقت بهتری بوده‌اند، برای ساخت مدل‌های مدنظر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای ارزیابی عملکردها مدل‌ها از سه شاخص آماری استفاده می‌شود که در جدول (۲) مقادیر R^2، RMSE و MAE مربوط به هر یک از مدل‌ها، برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون به‌طور مجزا ارائه شده‌است. همان‌طور که مشخص است، ضریب R^2 برای هر سه مدل هوشمند در بخش آموزش داده‌ها، دارای مقادیر بالا و قابل توجهی است. البته مقادیر همین ضریب در بخش آزمون مدل‌های هوشمند، شرایط متفاوتی دارد. می‌توان گفت مدل جنگل تصادفی، در این بخش از شاخص‌های آماری مطلوبی برخوردار است.

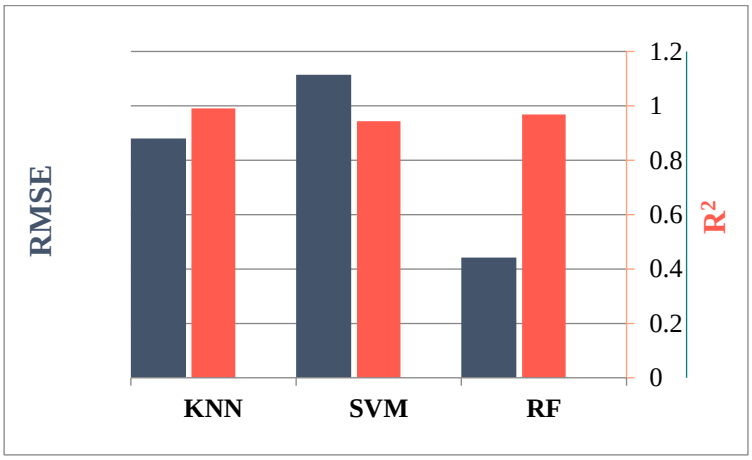
هم‌چنین نمودارهای نشان داده‌شده در شکل (۲) و (۳) به‌صورت گرافیکی مقادیر R^2 و RMSE سه مدل هوشمند جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و نزدیک‌ترین همسایگی (KNN) را برای مجموعه داده آموزش و آزمون مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در بخش داده‌های آموزش مدل نزدیک‌ترین همسایگی به‌طور نسبی دارای مقدار R^2 بالا و RMSE پایین‌تری می‌باشد و از این نظر مدل جنگل تصادفی پس از مدل نزدیک‌ترین همسایگی قرار می‌گیرد اما با نظر به نمودار بخش داده‌های آزمون، مدل جنگل تصادفی دارای مقدار R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تری است. بنابراین مدل جنگل تصادفی ضمن عملکرد و دقت خوب در داده‌های آموزش، همان عملکرد را در داده‌های آزمون نیز حفظ کرده‌است.

هوشمند برای داده‌های آزمون

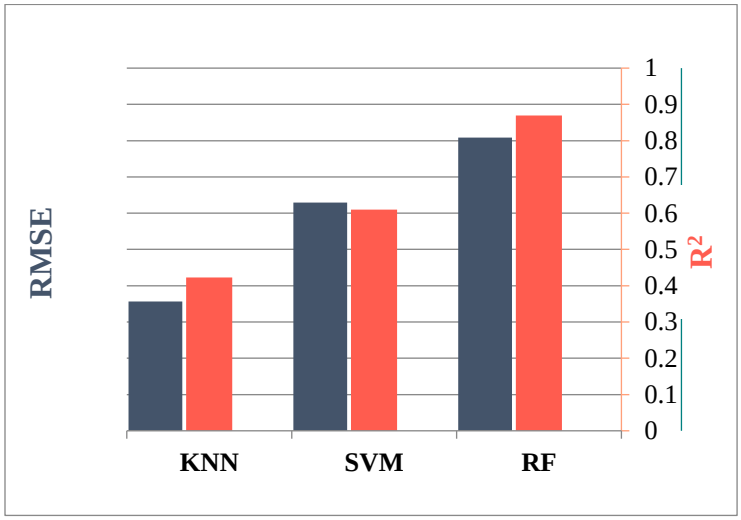
به‌علاوه در شکل‌های (٤) تا (٦) نیز می‌توان عملکرد مدل‌های هوشمند در داده‌های آموزش و آزمون را در کنار هم مشاهده کرد. در این نمودارها نقاط مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده پارامتر χ رسم شده‌است. در شکل مربوط به مدل جنگل تصادفی در هر دو نمودار، نقاط نزدیک به خط، قطری و دارای برازش مناسبی هستند اما در مدل نزدیک‌ترین همسایگی، نمودار داده‌های آموزش بسیار منظم و روی خط قطری اما در داده‌های آزمون بسیار پراکنده هستند. بنابراین مدل جنگل تصادفی در هر دو مجموعه دارای عملکرد بهتر و دقت بالاتری است و در مجموع مدل کارآمدی می‌باشد.

جدول ۲ مقدار شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها در داده‌های آموزش و آزمون

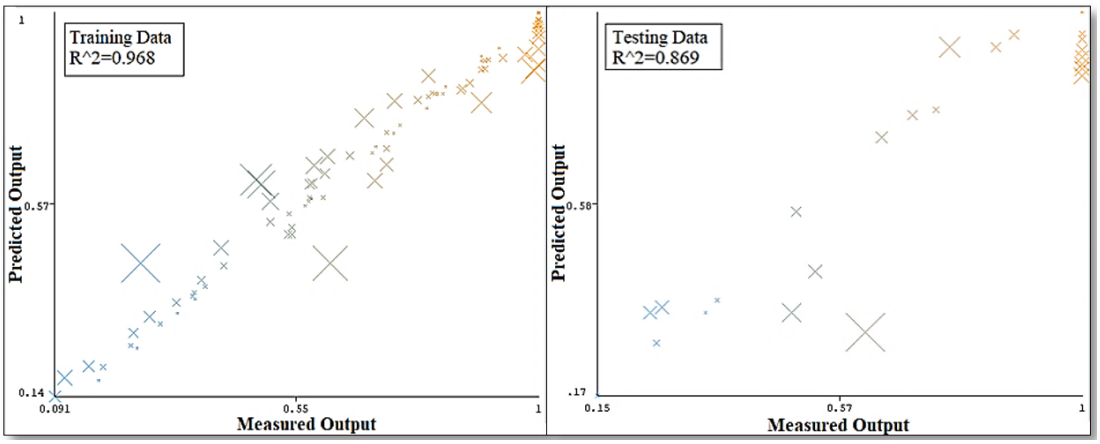
مدل‌ها		R^2	RMSE	MAE
جنگل تصادفی	برای داده‌های آموزش	۰/۹٦۷۹	۰/۰۵۱۳	۰/۰۳٤۳
	برای داده‌های آزمون	۰/۸٦۹۲	۰/۱۰٦۹	۰/۰۸٦٦
ماشین بردار پشتیبان	برای داده‌های آموزش	۰/۹٤۳۰	۰/۰٦۵	۰/۰۱۰٦
	برای داده‌های آزمون	۰/٦۱۰۱	۰/۱۸۸۹	۰/۱۵۷۸
نزدیک‌ترین همسایگی	برای داده‌های آموزش	۰/۹۹۰۸	۰/۰۲۵۸	۰/۰۰۳۷
	برای داده‌های آزمون	۰/٤۲۳۰	۰/۲٤۲۵	۰/۱۹۱



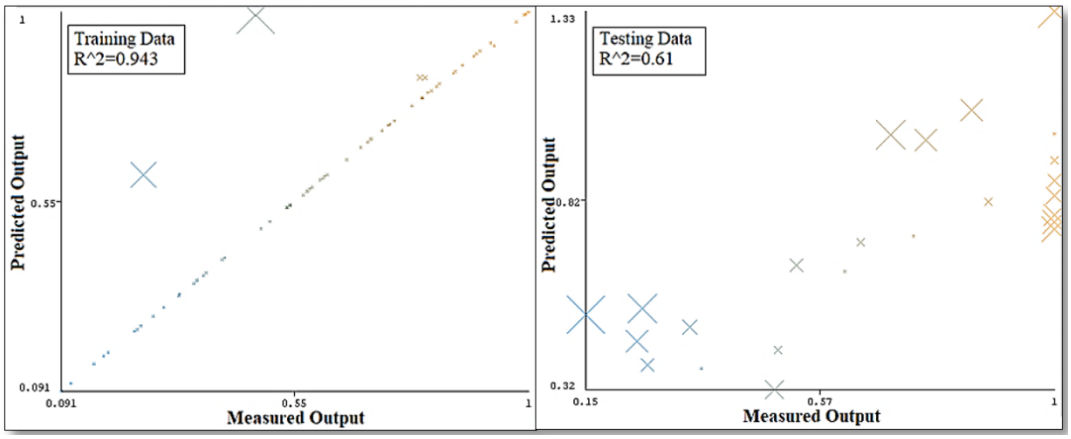
شکل ۲ نمودار ستونی مقادیر R^2 و RMSE سه مدل هوشمند برای داده‌های آموزش



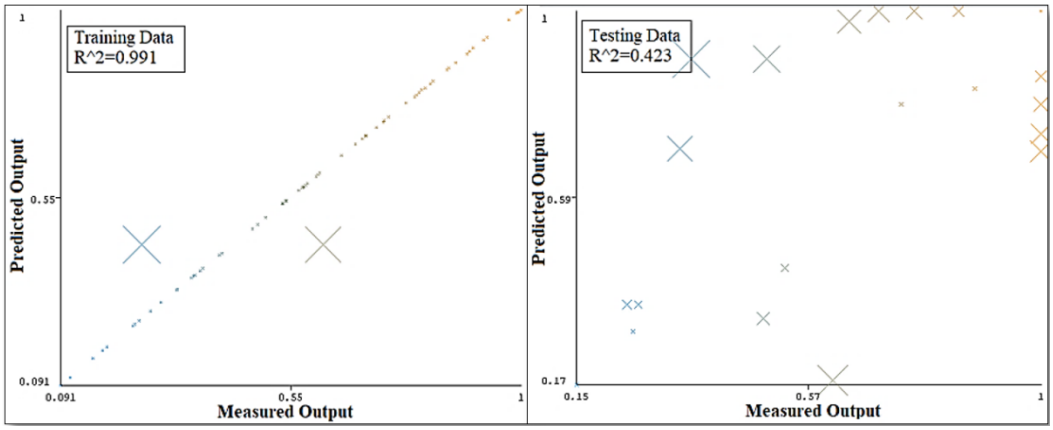
شکل ۳ نمودار ستونی مقادیر R^2 و RMSE سه مدل



شکل ٤ نمودار مقادیر اندازه‌گیری‌شده χ و مقادیر پیش بینی‌شده آن در مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار WEKA



شکل ٥ نمودار مقادیر اندازه‌گیری‌شده χ و مقادیر پیش‌بینی‌شده آن در مدل ماشین بردار پشتیبان در نرم‌افزار WEKA



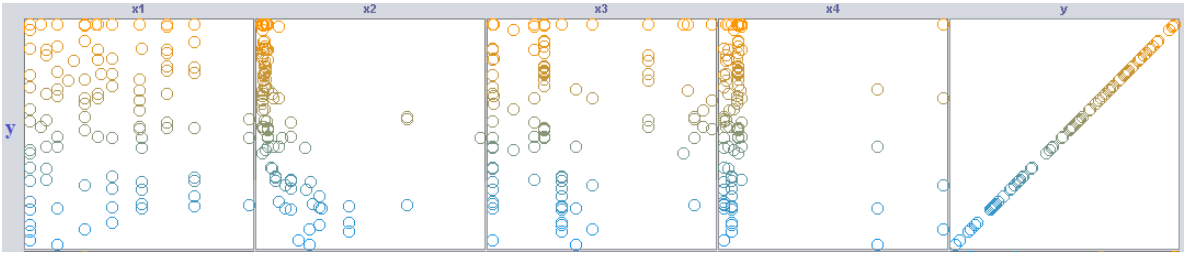
شکل ٦ نمودار مقادیر اندازه‌گیری‌شده χ و مقادیر پیش‌بینی‌شده آن در مدل نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار WEKA

مدل‌سازی‌های انجام‌شده در قسمت‌های بالا، پارامترهای ورودی، هر یک با تاثیر متفاوتی در پیش‌بینی پارامتر χ مؤثر بوده‌اند. به‌منظور تشخیص تأثیرگذارترین پارامترها در تخمین، آنالیز حساسیتی در نرم‌افزار WEKA انجام شده‌است. ارزش و تأثیرگذاری هر پارامتر از طریق اندازه‌گیری هم‌بستگی پارامتر مورد نظر با پارامتر هدف تعیین می‌شود. در جدول (٤) با توجه به مقدار شایستگی متوسط، رتبه هر یک از پارامترها از لحاظ اهمیت مشخص شده‌است، که مطابق آن، $\frac{\theta_r}{\theta_s}$ مؤثرترین پارامتر و λ بی‌ارزش‌ترین پارامتر گزارش شده‌است.

هم‌چنین با رسم نمودار پراکندگی دو به دوی پارامترها می‌توان از چگونگی رابطه و رفتار آن‌ها نسبت‌به یکدیگر مطلع شد. شکل (٧) نمودار پراکندگی همه پارامترها را نسبت‌به پارامتر هدف یعنی پارامتر تنش مؤثر نشان می‌دهد. به این صورت که x_1، x_2، x_3 و x_4 به‌ترتیب بیانگر پارامترهای $\frac{P}{P_0}$، $\frac{s}{h_b}$، $\frac{\theta_r}{\theta_s}$ و λ و y بیانگر پارامتر χ است.

جدول ٣ آنالیز حساسیت برای تأثیر پارامترهای ورودی مدل‌های هوشمند در نرم‌افزار WEKA

پارامترها	رتبه	مقدار شایستگی متوسط
$\frac{\theta_r}{\theta_s}$	١	٠/١٥٧
$\frac{P}{P_0}$	٢	−٠/٠٥٦
$\frac{S}{h_b}$	٣	−٠/١٦
λ	٤	−٠/٥٢٥



شکل ۷ نمودار پراکندگی پارامترها نسبت به پارامتر خروجی در نرم‌افزار WEKA

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که درصد قابل توجهی از سطح زمین را خاک‌های غیراشباع دربرگرفته‌اند، بدیهی است در حین عملیات در اکثر پروژه‌های معدنی و عمرانی با این خاک‌ها برخورد می‌شود. تعیین مقاومت برشی در خاک‌های غیراشباع در رابطه بیشاپ وابسته به پارامتری به نام پارامتر χ است، که تابعی از مکش می‌باشد. در این تحقیق مدل‌هایی برای پیش‌بینی پارامتر χ ایجاد و ارزیابی شد. این مدل‌ها به‌کمک سه روش هوشمند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایگی در قالب نرم‌افزار WEKA انجام شد و در آن از ۱۲۰ نمونه آزمایشگاهی جمع‌آوری‌شده از چندین مقاله استفاده شد. پارامترهای ورودی شامل پارامتر منحنی مشخصه آب– خاک (soil-water characteristic curve fitting parameter)، فشار محصور کننده، مکش و محتوای آب حجمی و پارامتر خروجی، پارامتر تنش مؤثر است. نتایج نشان داد:

- مدل جنگل تصادفی هم در مجموعه داده‌های آموزش (R^2=0.968 و RMSE=0.051) و هم در داده‌های آزمون (R^2=0.869 و RMSE=0.107)، با دقت بالا قابلیت انجام پیش‌بینی دقیق پارامتر χ را دارد.
- مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایگی نیز در خصوص مجموعه داده‌های آموزش، عملکرد و دقت خوبی دارند.
- آنالیز حساسیت انجام‌شده بر روی پارامترها نشان داد، پارامتر محتوای آب حجمی اهمیت بالایی در پیش‌بینی پارامتر χ دارد و در مقابل، پارامتر منحنی مشخصه آب–خاک، نسبت‌به سایر پارامترها اهمیت کمتری دارد.
- به‌طور کل می‌توان گفت نرم‌افزار قدرتمند و کاربردی WEKA می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قوی در علم داده‌کاوی و علوم مهندسی زمین در تخمین پارامترهای ژئومکانیکی به‌کار گرفته شود.

مراجع

1. Fredlund, D.G., "Unsaturated soil mechanics in engineering practice". *Journal of geotechnical geoenvironmental engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 286-321, (2006).
2. Aitchison, G.D., Russam, K., and Richards, B., "Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soils". *Ministry of Transport*, Vol., (1966).
3. Sheng, D., "Constitutive modelling of unsaturated soils: Discussion of fundamental principles". *Unsaturated soils*, Vol. 1, No. pp. 91-112, (2011).
4. Lee, S., Lee, S.R., and Kim ,Y., "An approach to estimate unsaturated shear strength using artificial neural network and hyperbolic formulation". *Computers Geotechnics*, Vol. 30, No. 6, pp. 489-503, (2003).
5. Kayadelen, C., "Estimation of effective stress parameter of unsaturated soils by using artificial neural networks". *International journal for numerical analytical methods in geomechanics*, Vol. 32, No. 9, pp. 1087-1106, (2008).

6. Ajdari, M., Habibagahi, G., and Ghahramani, A., "Predicting effective stress parameter of unsaturated soils using neural networks". *Computers and Geotechnics*, Vol. 40, No. pp. 89-96, (2012).

7. Johari, A., Habibagahi, G., and Nakhaee, M., "Prediction of unsaturated soils effective stress parameter using gene expression programming". *Scientia Iranica* ,Vol. 20, No. 5, pp. 1433-1444, (2013).

8. Kanungo, D., Sharma, S., and Pain, A., "Artificial Neural Network (ANN) and Regression Tree (CART) applications for the indirect estimation of unsaturated soil shear strength parameters". *Frontiers of earth science*, Vol. 8, No. 3, pp. 439-456, (2014).

9. Rahnema, H., Hashemi Jokar, M., and Khabbaz, H., "Predicting the effective stress parameter of unsaturated soils using adaptive neuro-fuzzy inference system". *Scientia Iranica*, Vol. 26, No. 6, pp. 3140-3158, (2019).

10. Tien Bui, D., Hoang, N.-D., and Nhu, V.-H., "A swarm intelligence-based machine learning approach for predicting soil shear strength for road construction: a case study at Trung Luong National Expressway Project (Vietnam)". *Engineering with Computers*, Vol. 35, No. 3, pp. 955-965, (2019).

11. Khalili, N. and Khabbaz, M., "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils". *Geotechnique*, Vol. 48, No. 5, pp. 681-687, (1998).

12. Cui, Y.J., et al., "Unsaturated soil mechanics". *International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol., (2004).

13. Bishop, A.W., "The principle of effective stress". *Teknisk ukeblad*, Vol. 39, No. pp. 859-863, (1959).

14. Vanapalli, S., et al., "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction". *Canadian geotechnical journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-392, (1996).

15. vladimir, et al., "A classification and regression tool for compound classification and qsar modeling svetnik". *Journal of Chemical Information Computer Sciences*, Vol. 43, No. 6, pp. 1947-1958, (2003).

16. Cortes, C. and Vapnik, V., "Support vector machine". *Machine learning*, Vol. 20, No. 3, pp. 273-297, (1995).

17. Zhang, D., et al., "Parameter optimization for support vector regression based on genetic algorithm with simplex crossover operator". *Journal of Information Computational Science*, Vol. 8, No. 6, pp. 911-920, (2011).

18. Shahrabi, J. and Hejazi, T., *Data mining 2, Tehran, Industrial university of amirkabir*. 2013, Jahad daneshgahi Press.(In Persian).

19. Azmi, M. and Araghinejad, S., "Development of K-Nearest Neighbour Regression Method in Forecasting River Stream Flow". *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 23, No. 2, pp. 108-119, (2012).

20. Witten, I.H., et al. Practical machine learning tools and techniques. in DATA MINING. 2005.

21. Thu, T.M., Rahardjo, H., and Leong, E.-C., Effects of hysteresis on shear strength envelopes from constant water content and consolidated drained triaxial tests, in Unsaturated soils 2 .٠٠٦p. 1212-1222.

22. Russell, A.R. and Khalili, N., "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 6, pp. 1179-1192, (2004).

23. Russell, A. and Khalili, N., "A unified bounding surface plasticity model for unsaturated soils". *International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30, No. 3, pp. 181-212, (2006).

24. Rampino, C., Mancuso, C., and Vinale, F., "Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 4, pp. 748-763, (2000).

25. Rahardjo, H., Heng, O.B., and Choon, L.E., "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 421-436, (2004).

26. Miao, L., Liu, S., and Lai, Y., "Research of soil–water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil". *Engineering Geology*, Vol. 65, No. 4, pp. 261-267, (2002).

27. Lee, I.-M., Sung, S.-G., and Cho, G.-C., "Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 2, pp. 624-631, (2005).

28. Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G., "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence". *International journal of Geomechanics*, Vol. 4, No. 2, pp. 115-126, (2004).

29. Bishop, A.W. and Blight, G., "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils". *Geotechnique*, Vol ,۱۳ .No. 3, pp. 177-197, (1963).

Risk Assessment of the Shatt Al-Arab Overflow in Basra*

Reserch Articel

Hossein Etemadfard[1] Nemah Aldirawi[2]
Hamed Kharaghani[3]

1. Introduction

Floods are one of the most common, widespread, and costly natural disasters in the world. Floods can classify into three groups: a) flash floods that usually occur within 6 hours after heavy rainfall; b) river overflow due to continuous rainfall in large catchment areas; and c) coastal floods, caused by coastal storms that are often amplified by tidal cycles. As mentioned, one of the most important types of floods occurs because of the increase in the volume of water and lack of sufficient space to transfer that, which refers to overflowing rivers. Overflowing can cause significant financial and human damage to urban environments. The occurrence of this event can have various reasons, such as climate change, sedimentation in rivers, human changes in soil and landuse, and environmental and hydrological factors.

The advent and development of spatial information technologies have made it possible to collect and store data, analyze and process, and generate output maps. An example of such a map is a valuable zoning map, which produced by analyzing the current state of a region, helps to identify and classify areas based on one or more specific criteria.

Since the phenomenon of flooding causes inevitable damage to the environment and humans, this event's risk can be used as a criterion for zoning an area. For the river overflow study, firstly, the factors affecting the severity of river floods are identified, then these factors are adapted to the environmental conditions of the study area. These criteria can be classified as hydrological (like the characteristics of the river including its width, height, and depth at different stages), meteorological (including rainfall periods and rainy seasons), natural, landuse, and others that affect the occurrence and severity of floods. Their effects have different roles and weights in different cities and regions.

This study tried to explore some of the existing criteria in a region in Iraq. There are many villages, agricultural lands, and urban facilities in the Shatt Al-Arab River Basin in Basra Province, Iraq, which are at risk of flooding. For this reason, it is necessary to spatially evaluate and analyze the areas prone to river flooding and prepare a map of floodplains in this area.

This study investigated the river overflow risk in the areas around the Shatt Al-Arab River. For this purpose, river characteristics and required data, including depth and width of the river collected in 12 cross sections of the river and landuse data of the study area were extracted through satellite images. The innovation of this research is determining the desired criteria for estimating river flooding. After determining these criteria, the riverside zoning was done, which is the identification and presentation of five groups for areas with different degrees of risk. This is another innovation. Finally, the assessment and zoning of the Shatt Al-Arab river overflow in the city of Basra, which is a precious area in terms of agriculture, population distribution, and port, was provided as the river overflow risk map.

A quantitative and interpretive analytical method were used based on spatial data. It should be mentioned the result of the study is completely applicable and can be base for making the decision.

2. Implementation

There are seven types of landuse around the Shatt Al-Arab, including commercial, military, wharf, park, industrial, agricultural, and residential areas. According to previous studies and the damage caused by past floods, a distance of 500 meters around the river was studied to determine landuses. In order to classify the river overflow risk along the streamway, it is necessary to select the appropriate index. Due to the direct effect of the geometric dimensions of each section of the river on the capacity of the passing water volume, the width and depth of the river were selected as the two primary indexes. In addition, for a more reasonable assessment, the product of width and depth was used as the main index.

It was assumed that water flow filled the largest cross section of the river, and then the overflow situation was investigated in other sections. That is, that the largest section is in the lowest flood risk category. Based on the obtained results, the risk level of each of the landuses around Shatt Al-Arab was found. All landuses along with their area were classified into 5 quality categories: very low, low, medium, high, and very high. Figure 1 shows the zoning of the Shatt al-Arab route in terms of overflow risk assessment.

3. Results and discussion

Risk assessment indicators computations were implemented in GIS environment and risk maps and spatial analysis of landuses were prepared in statistical tables and graphs. Spatial analytical methods using GIS help managers' decision-making process and prevent river overflow risk.

The numerical results show that a large part of the region around the river has been used for agriculture, and over 70% of them are in the category of medium to very high risk. Floods damage agricultural land and make it difficult to grow crops and provide food to surrounding areas.

*Manuscript received: 30 November 2021; Revised, 29 January 2022, Accepted, 22 May 2022.
[1]. Corresponding Author. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email**: etemadfard@um.ac.ir
[2]. MSc Student in GIS, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[3]. MSc Student in GIS, Civil Engineering department, Engineering faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

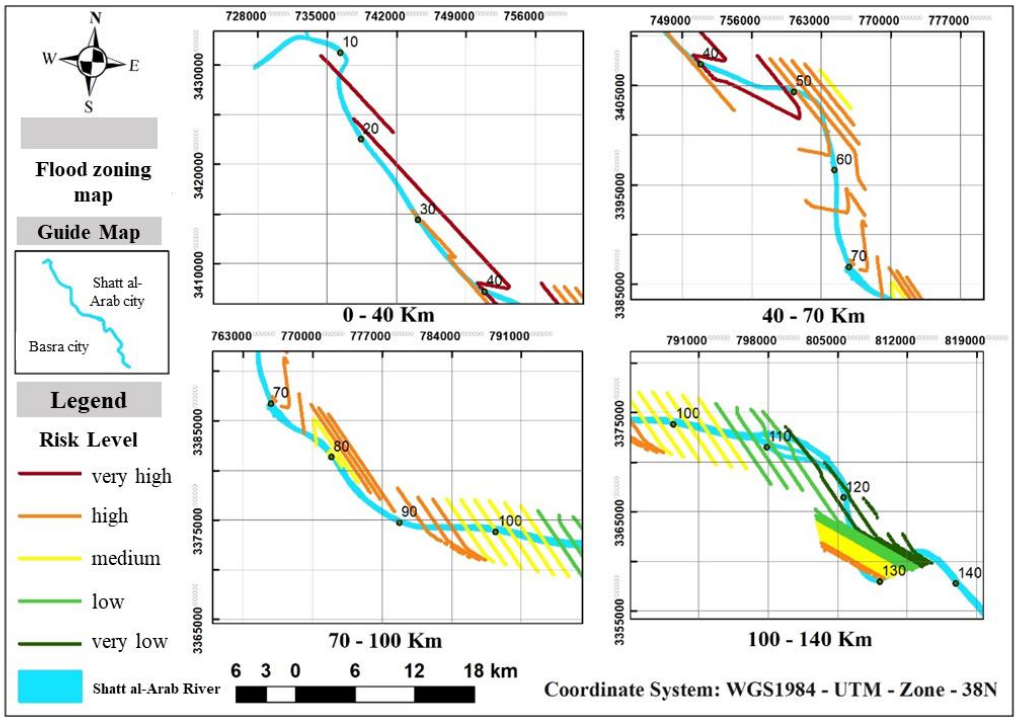


Figure 1. Zoning of the Shatt al-Arab route in terms of flood risk assessment

The residential part is about 45 square kilometers and about 38 square kilometers is between medium to very high risk. In other words, among the existing landuses, residential use has the highest level of sensitivity, so that in most cases, the damage to it is irreparable.

The share of industrial use of the space adjacent to the river is 2 square kilometers, all of which is in the medium to the high-risk range. The flooding of industrial facilities causes a lot of direct and indirect damage. Its straight effect is the failure of industrial equipment due to flooding and the indirect effect is the unemployment of people working in factories and surrounding industrial towns.
Another landuse around the river with an area of about 2.8 square kilometers is the pier. Based on numerical analysis, all areas are in the category of medium to high risk.

There is a park in Shatt al-Arab; it has been at a high-risk level with an area of about 17 square kilometers. This region is adjacent to water on all sides and requires great care and continuous management before a crisis occurs.
Commercial landuse covers an area of nearly 6 square kilometers and it has been in the category of medium-risk level. Although this landuse is not in the high-risk category, in the event of an overflow, the financial burden of damage can be significant.

Finally, military landuse, due to its convenient location, has very little risk at the time of the overflowing. The results of this study indicate that GIS has played a significant role, that is, as an effective tool in spatial analysis.

DOI: 10.22067/jfcei.2022.74235.1103 https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

ارزیابی خطر طغیان شط‌العرب در محدوده شهرستان بصره*

مقاله پژوهشی

حسین اعتمادفرد[۱] نعمه الدیراوی[۲] حامد خرقانی[۳]

چکیده *رود شط‌العرب حدوداً به طول ۲۰۰ کیلومتر است و از به هم پیوستن دو رود دجله و فرات در شهر قرنه که در ۷۴ کیلومتری شمال غربی شهر بندری بصره در جنوب عراق واقع شده‌است، شکل می‌گیرد. این رود تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، باران‌های مکرر و مستعد خطر و ریسک طغیان رود و هم‌چنین جاری شدن سیل است. حوضه رودخانه شط‌العرب در محدوده شهرستان بصره شاهد وقوع سیلاب‌ها و نتایج مخرب آن بوده‌است. هدف از این پژوهش ارزیابی و تحلیل مکانی خطر طغیان رود شط‌العرب در محدوده شهرستان بصره عراق با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) می‌باشد. در این پژوهش از GIS برای برآورد و ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی مناطق طغیان رود شط‌العرب در منطقه بصره با بهره از داده‌های موجود استفاده خواهد شد. با مشخص نمودن انواع کاربری‌های اطراف رودخانه، تحلیل دقیقی از نحوه توزیع آن‌ها در مناطق با خطرپذیری مختلف ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که کاربری زمین‌های کشاورزی با توجه به مساحت زیادی که دارند بیش از سایر کاربری‌ها در معرض خطر طغیان قرار دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند تأثیر زیادی در پیشگیری از ایجاد صدمات جبران‌ناپذیر طغیان در این محدوده داشته باشد.*

واژه‌های کلیدی تحلیل مکانی، طغیان رودخانه، سامانه اطلاعات مکانی، شط‌العرب، بصره..

مقدمه

سیل یکی از متداول‌ترین، گسترده‌ترین و پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی در جهان است. براساس گزارش سازمان ملل متحد، سیل در مقایسه با هر مخاطره دیگری بیشترین تلفات را به‌همراه دارد [1]. سیل را می‌توان به سه گروه طبقه‌بندی کرد: الف) سیل‌های ناگهانی که معمولاً در عرض ۶ ساعت پس از بارندگی شدید رخ می‌دهند، ب) طغیان رودخانه‌ها در دشت، ناشی از بارش‌های مداوم در مناطق بزرگ حوضه آبریز و ج) سیل‌های ساحلی، ناشی از طوفان‌های ساحلی که اغلب توسط چرخه‌های جزر و مدی تقویت می‌شوند [1]. در صورت وقوع سیل علاوه‌بر خسارت‌های جانی از نظر مالی نیز آسیب‌های زیادی به شهرها وارد می‌شود. به‌طور متوسط تا سال ۲۰۰۵ در ۱۳۶ شهر ساحلی بزرگ سالانه ۶ میلیارد دلار خسارت سیل در جهان گزارش شده‌است که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ تنها از طریق تغییرات اجتماعی و اقتصادی به ۵۲ میلیارد دلار افزایش یابد [2]. در یک مطالعه [3] اخیراً نشان داده شد که افزایش ۴ درجه سانتی‌گرادی در دمای جهانی منجر به افزایش شدید خطر سیل (بیش از ۵ برابر از دوره پایه ۱۹۷۶-۲۰۰۵) در کشورهایی می‌شود که تقریباً ۷۳٪ از جمعیت جهان و ۷۹٪ از تولید ناخالص داخلی جهانی را تشکیل می‌دهند.

یکی از مهم‌ترین انواع سیل، به‌دلیل افزایش حجم آب رودخانه و عدم وجود فضای کافی برای انتقال حجم آب به وقوع می‌پیوندد که از آن به‌عنوان طغیان یاد می‌شود. طغیان رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین خطرات طبیعی در جهان است که صدمات اقتصادی زیادی به‌همراه دارد و انتظار می‌رود این خطر در آینده افزایش پیدا کند. وقوع این اتفاق را می‌توان به عوامل مختلفی نسبت داد که تغییرات آب و هوایی، رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها، تغییرات انسانی به‌وجودآمده در خاک و کاربری زمین و هم‌چنین عوامل اجتماعی و اقتصادی از جمله آن است [4]. طغیان رودخانه‌ها یکی از پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی هستند که در حوضه رودخانه‌ها، دلتاها و مناطق ساحلی مشاهده می‌شود [5]. درباره وقوع طغیان و فرایندهای منجر به ایجاد سیلاب رودها مطالعات زیادی انجام شده که خصوصیات مختلف این نوع سیلاب‌ها را بیان کرده و تغییرات احتمالی آن‌ها هنگام وقوع را بیان داشتند [6-9].

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۳/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. **Email:** etemadfard@um.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

در زمینه مطالعات مشابه انجام شده داخلی می‌توان به پژوهش نگارش و همکاران [10] اشاره کرد که با استفاده از داده‌های بارش و دبی روزانه در یک دوره ۲۸ ساله شدت سیل‌خیزی حوضه کشکان را بررسی کردند که نتایج نشان داد روند تغییرات ضریب رواناب سالانه حوضه دارای رشد ۸٤ درصدی بوده‌است. زرگر و معصومی‌نژاد [11] با مطالعه بر روی رودخانه چناران بجنورد، کاربرد سامانه‌های اطلاعات مکانی (GIS) را در تعیین حد حریم و بستر رودخانه‌ها مورد بررسی قرار دادند و به پهنه‌بندی سیلاب در سطح این رودخانه پرداختند. در تحقیق دیگری اصلانی و مهدی‌پور [12] با به کارگیری GIS در پهنه استان تهران، به برنامه‌ریزی کاهش خطرپذیری سیلاب پرداختند. نتایج تحلیل داده‌های آن‌ها نشان می‌دهد آن‌چه باعث ایجاد ناامنی و خطر و مطرح شدن سیلاب ناشی از بارش به‌عنوان مخاطره و تهدید می‌شود، مکان‌گزینی نادرست و بی‌توجهی به حریم رودخانه‌ها و اشغال پهنه‌های سیل‌گیر توسط سکونت‌گاه‌هایی است که گاه به‌صورت غیرمجاز بنا شده‌است. فلاح زواره و همکاران [13] تأثیر عدم قطعیت توزیع مکانی بارش را بر روی مقدار دبی اوج سیلاب با استفاده از روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین با استفاده از روش تحلیل حساسیت اثر تداوم بارش را بر روی میزان دبی اوج تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تأثیر عمده عدم قطعیت ورودی‌های مدل بر روی نتایج شبیه‌سازی مدل بارش رواناب است. در پژوهشی قوامی و محمدی‌نیا [14] به پیش‌بینی مکانی مناطق سیل‌خیز استان گیلان با استفاده از GIS و هفت پارامتر دما، رطوبت، بارش، ارتفاع، شیب، پوشش گیاهی و فاصله از رودخانه پرداخته‌اند. آن‌ها از روش رگرسیون معمولی، روش ضریب هم‌بستگی پیرسون و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی استفاده کردند که روش آخر بهترین نتایج در پیش‌بینی مناطق سیل‌خیز ارائه نموده‌است.

هم‌چنین از مطالعات پیشین خارجی می‌توان به پژوهش زیوپی و همکاران [15] اشاره کرد که به مطالعه تأثیر سیلاب بر سازه‌های شهری در شهر ساحلی بمبئی در هند پرداختند. آن‌ها با استفاده از نقشه‌های تغییرات پوشش سطح زمین و کاربری اراضی، نقشه خطر سیل برای کاربری‌های اراضی مختلف را با مدل هیدرولیکی HEC-RAS تهیه کردند. نتایج نشان داد نقشه‌های پهنه‌بندی سیل توسط مدل HEC-RAS برای براورد سیلاب و خطر سیل بسیار مؤثر است. کالیانوپا و همکاران [16] در کارولینای شمالی با استفاده از چهارچوب مونت کارلو برای تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت پرداختند و نتایج نشان داد در مواقعی که از سازه‌های کنترل سیلاب استفاده می‌شود تا ۸۰/٤ درصد نسبت‌به وضع موجود کاهش خسارت مورد انتظار سالانه (EAD) را پیش‌بینی کردند. سنت- جورجز و همکاران [17] در فرانسه به‌منظور رتبه‌بندی منابع عدم قطعیت در مدل‌سازی خسارت سیل با تجزیه و تحلیل منابع عدم اطمینان از طریق زنجیره مدل‌سازی به ارزیابی عدم قطعیت با استفاده از روش مونت کارلو پرداختند و نشان دادند رتبه‌بندی عدم اطمینان بستگی به بخش اقتصادی (مسکن خصوصی، زمین کشاورزی، فعالیت‌های اقتصادی) دارد عدم قطعیت در منحنی عمق- خسارت قابل‌توجه است. وو و همکاران [18] مدل‌های هیدرودینامیک تک‌بعدی و دوبعدی را با GIS به‌صورت مکانی-زمانی به‌منظور شبیه‌سازی پویای ریسک‌های سیل تلفیق کردند. در این سامانه پشتیبانی تصمیم، یک مدل سه بعدی از ناحیه مطالعه و امکانات مهندسی هیدرولیک با استفاده از فناوری مدل‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر تصویربرداری به‌سرعت می‌تواند ایجاد شود. مبتنی بر این چارچوب، یک پلتفرم داده‌های مکانی-زمانی چندمنبعی برای شبیه‌سازی‌های ریسک سیل برای مخزن ژیاشان در رود ویهه به‌عنوان مطالعه موردی توسعه یافت. نتایج ارزیابی مدل در مقاله وو و همکاران [18] نشان داد تلفیق مدل‌های هیدرودینامیک و GIS بازده شبیه‌سازی‌های ریسک سیل را برای پشتیبانی تصمیم هم‌چون شبیه‌سازی‌های بصری پویا و شبیه‌سازی‌های سیل شکست سد می‌تواند بهبود بخشد. مونیر و همکاران [19] یک مدل هیدرولوژیکی و یک مدل هیدرولیکی مبتنی بر براوردهای استخراج‌شده از GIS و سنجش از دور را به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ جریان مسیل سیلابی به رویدادهای سیل‌های ناگهانی در پاکستان تلفیق ساختند. این مطالعه با استفاده از تلفیق تکنیک سنجش از دور و GIS پارامترهای هیدرولوژیکی مختلف را برای مدل‌ها در یک سطح پیکسل استخراج ساختند. تلفیق این مدل‌ها مشخص شد که توانایی شبیه‌سازی درجات و شرایط سیل‌های ناگهانی به‌طور دقیق‌تر را داراست. این دو مطالعه مشخص ساخت

تلفیق مدل‌ها با روش‌های تحلیل مکانی- زمانی بازده و دقت شبیه‌سازی‌های سیل را برای مدیریت سیل می‌تواند بهبود بخشد.

در تحقیق حاضر، به مطالعه ریسک‌پذیری مناطق اطراف رودخانه شط‌العرب واقع در شهرستان بصره کشور عراق پرداخته شد. این امر ابتدا با مطالعه مشخصات رودخانه و گرداوری داده‌های مورد نیاز که شامل عمق و عرض رودخانه در ۱۲ مقطع عرضی رودخانه بود، صورت گرفت و هم‌زمان داده‌های کاربری آن مناطق از طریق تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد. از آن‌جا که این رودخانه به‌دلیل موقعیت مناسب و کاربردی، کاربری‌های مختلفی از جمله کشاورزی، مسکونی، صنعتی، اسکله، تجاری و پارک را در خود جای داده‌است، ضروری است مطالعات بیشتر برای شناسایی محدوده‌های پُرریسک و به‌دنبال آن اندیشیدن تدابیر مناسب به‌منظور حفظ ارزش‌های جانی و مالی صورت گیرد. از نوآوری‌های این تحقیق، تعیین معیارهای مورد نظر برای تخمین طغیان رودخانه است. پس از تعیین آن‌ها بایستی پهنه‌بندی حرایم رود براساس فواصل مشخصی انجام گردد که مشخص و معرفی کردن پنج کلاس برای نواحی حریم با میزان خطر متفاوت از دیگر موارد نوآوری این تحقیق است. در نهایت نیز ارزیابی و پهنه‌بندی خطر طغیان شط‌العرب در محدوده شهرستان بصره که از منظر کشاورزی، توزیع جمعیت و بندری محدوده‌ای بسیار ذی‌قیمت است، به‌عنوان مستندی در اختیار وزارت منابع آب عراق قرار خواهد گرفت تا برای اولین بار در آن کشور از این پهنه‌بندی برای تعیین راهکارهای مدیریتی و اجرایی مورد استفاده قرار بگیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش از لحاظ هدف کاربردی می‌باشد و منطقه مورد مطالعه آن حوضه رود شط‌العرب در محدوده شهرستان بصره عراق (به طول جغرافیایی ٤٧ درجه و ٢٦ دقیقه و ۲۹ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۷ ثانیه شمالی) می‌باشد. روش مورد استفاده در این پژوهش روش تحلیلی کمی و تفسیری مبتنی بر داده‌های پژوهش است. بعد از جمع‌آوری داده‌های مربوطه با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف تحلیل‌های مکانی انجام می‌شود و سپس براساس اطلاعات حاصل شده تحلیل‌ها و تفسیرهای لازم بر روی نتایج انجام می‌پذیرد. با توجه به این‌که در پژوهش حاضر داده‌ها از طریق ابزارهای تحلیل کمی که روش‌های آماری و ریاضی برای جمع‌آوری داده‌ها هستند تهیه شدند از روش‌های کمی بهره گرفته شده‌است. داده‌های این تحقیق شامل کاربری‌های زمین در اطراف رود و مسیر رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای احصا شده‌است و مشخصات هندسی رودخانه شامل عمق و عرض و ارتفاع رودخانه در مقاطع مختلف از نماینده وزارت منابع آب عراق در شهرستان بصره به‌دست آمده‌است. روش‌های به‌کار گرفته‌شده، تکنیک‌های تحلیل‌های مکانی در محیط GIS با استفاده از نرم‌افزارهای برنامه‌نویسی تعیین هم‌بستگی میان ارتفاع آب در ابتدا و انتهای شط‌العرب انجام شده‌است.

محدوده مطالعه

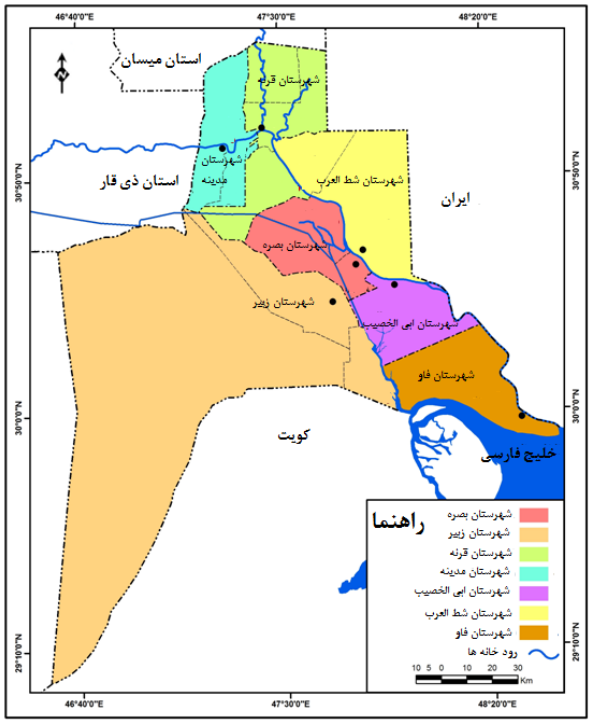
شهر بصره به‌عنوان بزرگ‌ترین بندر عراق در امتداد شط‌العرب ایجاد شده‌است و با جمعیت تقریبی ۳ میلیون نفر سومین شهر بزرگ کشور عراق و مرکز استان بصره است. بصره در ۵۵ کیلومتری خلیج‌فارس و در ٥٤٥ کیلومتری بغداد است. مناطق اطراف بصره دارای منابع مهم نفتی و هم‌چنین مناطق حاصل‌خیز کشاورزی است. شکل (۱) استان بصره به‌همراه شهرستان‌های آن را نشان می‌دهد.

رودخانه شط‌العرب یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین است که به خلیج‌فارس می‌ریزد که از تلاقی رودهای دجله و فرات در منطقه کرمهٔ علی تشکیل می‌شود. عرض جریان شط‌العرب بین ۲۰۰ متر تا بیش از ۲ کیلومتر است و عمق آن ۸ تا ۱۵ متر متغیر است. درازای این رود از قرنه تا ریزشگاه آن در خلیج‌فارس حدود ۱۹۰ کیلومتر است. ریزشگاه رود در میان شهر ایرانی اروندکنار و شهر عراقی فاو است. بصره، خرمشهر، آبادان، خسروآباد و فاو از جمله بندرهای مهم این آب‌راه هستند که نقش چشم‌گیری در رونق بازرگانی منطقه دارند. هم‌اکنون ۸۱ کیلومتر از ۱۷۵ کیلومتر طول این رود – از محل پیوستن نهر خین به این رودخانه تا مصب آن در خلیج‌فارس– مرز مشترک ایران و عراق به‌شمار می‌آید.

داده‌ها

به‌منظور بررسی خطر وقوع سیل در رودخانه شط‌العرب ابتدا نیاز به داده‌های معرفی‌کننده این رود شامل عرض رودخانه، ارتفاع و عمق در مقاطع مختلف است. مختصات دو سمت رودخانه در هر مقطع به‌همراه عمق و ارتفاع آب نسبت‌به سطح دریا از نماینده وزارت منابع آب عراق در شهرستان بصره و هم‌چنین برداشت‌های میدانی تهیه شده‌است. با استفاده از

مختصات دو سمت رودخانه، در نرم‌افزار ArcMap مشخصه عرض حاصل شده‌است. لایه‌های GIS مربوط به شهرستان بصره و مسیر رودخانه شط‌العرب نیز برای تحلیل‌های مکانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عملیات رقومی سازی تهیه شده‌است. جدول (۱) مختصات مقاطع مورد بررسی را به نمایش می‌گذارد.



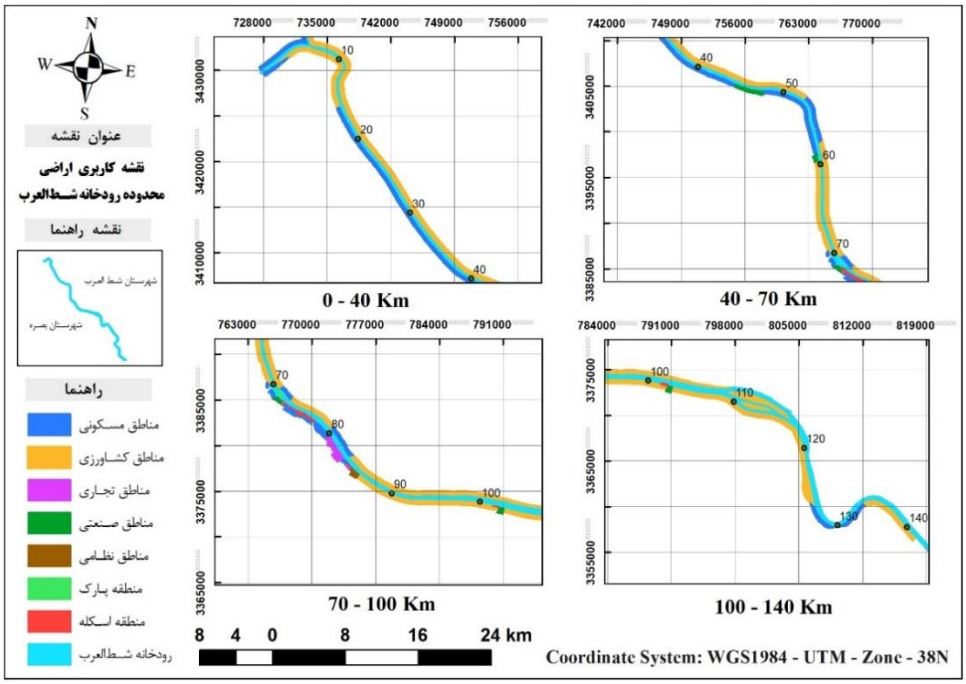
شکل ۱ نقشه استان بصره به‌همراه شهرستان‌های این استان

جدول ۱ مختصات ۱۲ مقاطع شط‌العرب مورد بررسی در پژوهش

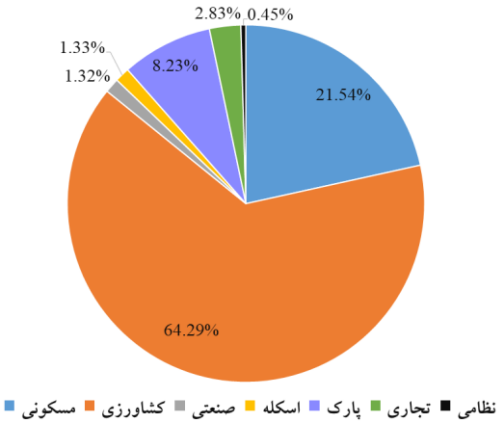
شماره مقطع	X_1	Y_1	X_2	Y_2
۱	۷۳۳۲۲۲	۳٤۳۲۵۸٤	۷۳۳۲۷۹	۳٤۳۲۷۰۳
۲	۷۳٦۸٦۰	۳٤۳۰۳۰۸	۷۳٦۹۷۱	۳٤۳۰۲۹٤
۳	۷۳۸۸٦٤	۳٤۲۱۹۱۵	۷۳۹۰۳۰	۳٤۲۲۰۳٤
٤	۷٤٦۰٦۳	۳٤۱۱٦٦۵	۷٤٦۲۵٤	۳٤۱۱۷۹۸
۵	۷۵۰۸٦٦	۳٤۰۷۳٤۰	۷۵۰۸۰۲	۳٤۰۷۱۹۱
٦	۷۵۸۳۷۲	۳٤۰٤٦۹۷	۷۵۸۳٦۵	۳٤۰٤۸۲۹
۷	۷٦٤۰۹۳	۳۳۹۷۵٦۱	۷٦٤۲۹۱	۳۳۹۷٦۰۵
۸	۷٦۸۳۷٦	۳۳۸٤۲٦۳	۷٦۸۲٦۱	۳۳۸٤۰٤٦
۹	۷۷۲۵۷٦	۳۳۸۰۳۰٤	۷۷۲۹۱۰	۳۳۸۰٤۹۲
۱۰	۷۷۹۷۸۹	۳۳۷٤۳۷۹	۷۷۹۸۷۹	۳۳۷٤٦٤۳
۱۱	۸۰۹۲۲۱	۳۳۵۷۹٤۸	۸۰۹۱٦۹	۳۳۵۸۱۷۸
۱۲	۸۱٤۹۹٤	۳۳۵۹۸٦۱	۸۱۵۳٤٤	۳۳٦۰۱۹۲

پیاده‌سازی

انجام تحلیل‌های مکانی مناسب وابسته به تعیین کاربری‌های اراضی اطراف رودخانه شط‌العرب است. به دیگر بیان از آن‌جایی که میزان صدمات ناشی از وقوع طغیان در مناطقی با کاربری‌های گوناگون یکسان نیست بایستی در طول مسیر رودخانه کاربری‌های اراضی تعیین گردد. این کار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و رقومی کردن توسط نگارندگان انجام شده‌است و هم‌چنین پاره‌ای از موارد از بازدیدهای میدانی محاسبه شده‌است. با در نظر گرفتن هفت نوع کاربری مختلف که در اطراف رودخانه وجود دارند و شامل مناطق تجاری، نظامی، اسکله، پارک، صنعتی، کشاورزی و مسکونی می‌شود، شکل (۲) توزیع این کاربری‌ها را در اطراف رودخانه نشان می‌دهد. با توجه به مطالعات پیشین و خرابی‌های ناشی از سیل‌های گذشته فاصله ۵۰۰ متری اطراف رودخانه برای تعیین کاربری‌های اراضی مورد بررسی قرار گرفته‌است.



شکل ۲ کاربری‌های اراضی اطراف رودخانه شط‌العرب



شکل ۳ سهم هر کاربری از مساحت کل منطقه مورد مطالعه برحسب درصد

جدول ۲ شاخص‌های معرفی شده برای مقاطع رودخانه شط‌العرب

شماره مقطع	عرض	عمق	حاصل‌ضرب عرض در عمق
١	١٣٢	١٠/٧٥	١٤١٩
٢	١١١	١٠/٥٠	١١٦٥/٥٠
٣	٢٠٤	١١	٢٢٤٤
٤	٢٣٢	١١/٥٠	٢٦٦٨
٥	١٦٢	١١/٥٠	١٨٦٣
٦	١٣٢	١٢	١٥٨٤
٧	٢٠٣	١٢/٥٠	٢٥٣٧/٥
٨	٢٤٥	١٥	٣٦٧٥
٩	٣٨٣	١٤	٥٣٦٢
١٠	٢٧٨	٩	٢٥٠٢
١١	٢٣٦	١٣	٣٠٦٨
١٢	٤٨٢	٢٤	١١٥٦٨

در شکل (۲) مشخص است که بیشتر مناطق اطراف رودخانه شط‌العرب را کاربری‌های کشاورزی تشکیل می‌دهد. این زمین‌ها تقریباً در تمام طول مسیر رود وجود دارند. مناطق مسکونی پس از مناطق کشاورزی بیشترین سهم زمین‌های اطراف رودخانه را به خود اختصاص می‌دهد که با توجه به امکان صدمه جانی در این مناطق در صورت بروز طغیان دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. شکل (۳) سهم هر یک از کاربری‌های اطراف شط‌العرب را از مساحت کل منطقه مورد مطالعه برحسب درصد نشان می‌دهد.

برای تعیین میزان خطرپذیری وقوع سیل در طول مسیر نیاز به انتخاب شاخص‌های مناسب است. با توجه به تأثیر مستقیم ابعاد هندسی هر مقطع از رود در گنجایش حجم آب عبوری، عرض و عمق رود به‌عنوان دو شاخص اولیه انتخاب می‌شود. از آن‌جایی که عمق و عرض به‌تنهایی نمی‌توانند شاخص مناسبی باشند لذا برای رسیدن به شاخصی قابل قضاوت از ضرب عرض و عمق در یکدیگر به‌عنوان شاخصی اصلی استفاده شده‌است. از طرف دیگر با توجه به توپوگرافی نسبتاً هموار در محدوده مطالعاتی این شاخص مبین ویژگی‌های موردنظر تحقیق است. جدول (۲) سه شاخص مورد استفاده برای ارزیابی میزان خطر را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر از شاخص حاصل‌ضرب عرض در عمق رودخانه برای ارزیابی میزان خطر طغیان شط‌العرب استفاده شده‌است.

با فرض این‌که در بزرگ‌ترین سطح مقطع رودخانه، دقیقاً مساحت اشغال‌شده توسط آب، به اندازه شاخص سوم جدول (۲) باشد، می‌توان سایر مقاطع را از نظر خطر وقوع طغیان رودخانه ارزیابی نمود. به بیانی دیگر با در شرف سرریز بودن مقطعی با بیشترین گنجایش (مقطع شماره ۱۲) و قرار گرفتن آن در کلاسی با خطر طغیان بسیار کم، طبقه‌بندی سایر مناطق اطراف رود را می‌توان انجام داد. جدول (۳) دسته‌بندی خطرپذیری طغیان را براساس معیار تعریف شده، با نظر کارشناسان این زمینه کاری در ۵ کلاس نمایش می‌دهد. این ۵ کلاس با استفاده از نظرات خبرگان محلی انتخاب شده‌است. آن‌ها علاوه‌بر آشنایی بر توپوگرافی و مدل ارتفاعی زمین و ساختمان‌ها در محدوده مطالعاتی، سابقه طغیان رودخانه مورد نظر را نیز در نظر گرفته‌اند. نظرات آن‌ها در فرم‌های نظرسنجی جمع‌آوری‌شده و با میانگین-گیری از کران‌های دسته‌ها محدوده‌ها تعیین شدند. کلاس‌بندی پیشنهادی، تنها برای این محدوده مطالعاتی با ویژگی‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و عوارض جغرافیایی قابل استفاده بوده و می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت تحلیل‌های مکانی کاربری‌های اطراف رود استفاده شود. محققان بایستی برای نواحی دیگر شرایط و کلاس‌های خاص آن منطقه را در نظر گیرند.

جدول ۳ دسته‌بندی ارزیابی خطر وقوع طغیان

عنوان کیفی دسته خطرپذیری	مقدار شاخص سطح مقطع رودخانه (مترمربع)
بسیار زیاد	۱۵۰۰-۲۰۰۰
زیاد	۲۰۰۰-۴۰۰۰
متوسط	۴۰۰۰-۷۰۰۰
کم	۷۰۰۰-۹۰۰۰
خیلی کم	۹۰۰۰-۱۱۰۰۰

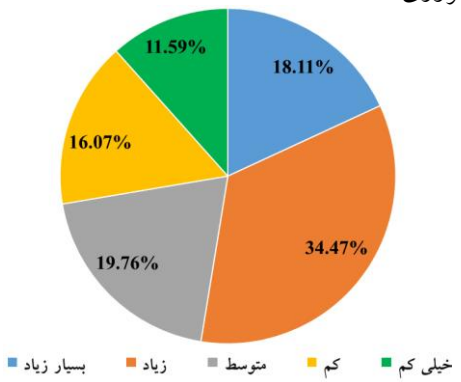
نتایج و بحث

استفاده از روش‌های تحلیلی مکان‌محور با استفاده از GIS برای استخراج نتایج مختلف از پژوهش‌های انجام‌شده، در کمک به فرایند تصمیم‌گیری مدیران و بهبود عملکرد در پیشگیری از خطر طغیان و صدمات بعدی آن بسیار تأثیرگذار است. در این تحقیق از نرم‌افزارهای متداول برای تحلیل‌های مکانی و آماری استفاده شده‌است. در محیط GIS تعداد هریک از کاربری‌ها که در کلاس‌های مختلف خطرپذیری وجود دارد، احصای گشته‌است. هم‌چنین جداول آماری و نمودارهای هریک از کاربری‌ها حاصل شده‌است. جدول (٤) نشان می‌دهد توزیع زمین‌های با کاربری کشاورزی در مناطقی با ریسک‌های مختلف به چه نحو است. از بین ۲۷ منطقه کشاورزی موجود در اطراف شط‌العرب ۳ منطقه در شرایطی با خطرپذیری بسیار زیاد است که مساحتی در حدود ۲٤۲۷ هکتار را دارا می‌باشد.

جدول ٤ توزیع آماری کاربری کشاورزی در خطرپذیری‌های مختلف برحسب هکتار

مناطق کشاورزی		
خطر	مجموع مساحت (هکتار)	تعداد
بسیار زیاد	۲٤۲۷	۳
زیاد	٤٦۲۰	۷
متوسط	۲٦٤۹	۷
کم	۲۱٥٤	٦
خیلی کم	۱٥٥٤	٤

شکل (٤) توزیع آماری محدوده‌های کشاورزی در دسته‌های مختلف خطرپذیری اطراف شط‌العرب را برحسب درصد نشان می‌دهد. دسته با عنوان خطرپذیری زیاد بیشترین مساحت را نسبت‌به سایر دسته‌ها در خود جای داده‌است. بیشتر از ۵۰ درصد مساحت زمین‌های این کاربری در مناطق مربوط به دو دسته اول خطر طغیان قرار دارند. همان‌طور که در جدول (٤) و هم‌چنین شکل (٤) نشان داده شده‌است، مساحت مناطقی موجود در خطر طغیان خیلی کم، نسبت‌به سایر دسته‌ها کمترین سهم را دارد. این مورد حاکی از آن است که در صورت بروز طغیان، بخش اندکی از زمین‌های کشاورزی اطراف شط‌العرب، از شانس مناسب برای در امان ماندن از آسیب‌های احتمالی برخوردار هستند. فلذا مدیریت و اطلاع‌رسانی صحیح قبل از وقوع حادثه در این کاربری امری ضروری است.



شکل ٤ توزیع آماری مناطق کشاورزی اطراف شط‌العرب برحسب درصد

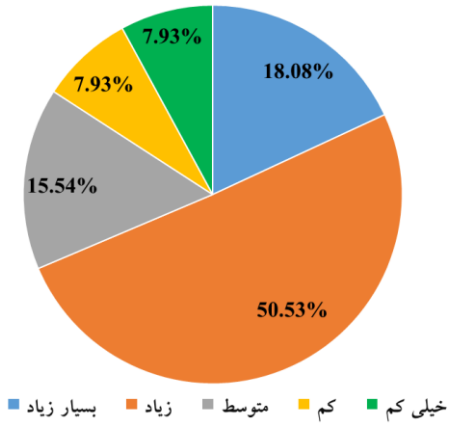
جدول (۵) نشان می‌دهد توزیع آماری زمین‌های با کاربری مسکونی در مناطقی با ریسک‌های مختلف به چه شکل است. از بین ١٤ منطقه مسکونی موجود در اطراف شط‌العرب ۲ منطقه در شرایطی با خطرپذیری بسیار زیاد است که مساحتی در حدود ۸۱۲ هکتار را دارا می‌باشد. شکل (۵) توزیع آماری محدوده‌های مسکونی در دسته‌های مختلف خطرپذیری اطراف شط‌العرب را برحسب درصد نشان می‌دهد. تنها دو منطقه مسکونی در اطراف شط‌العرب در مناطقی با خطرپذیر کم و خیلی

کم قرار گرفته‌است که در مجموع حدود ۱۶ درصد مساحت کل مناطق مسکونی اطراف رود است (شکل ۵). درحالی‌که بیش از ۵۰ درصد مساحت این کاربری در خطرپذیری زیادی قرار دارند.

جدول ۵ توزیع آماری کاربری مسکونی در خطرپذیری‌های مختلف برحسب هکتار

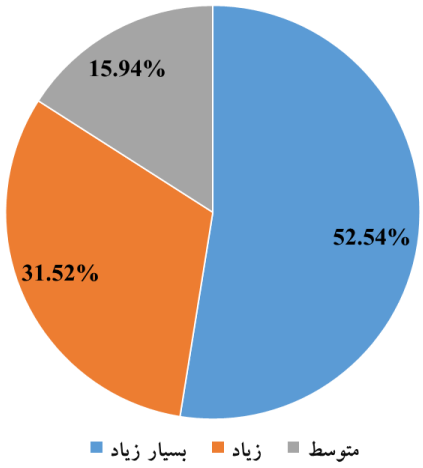
مناطق مسکونی		
خطر	مجموع مساحت (هکتار)	تعداد
بسیار زیاد	۸۱۲	۲
زیاد	۲۲۷۰	٦
متوسط	٦۹۸	٤
کم	۳۵٦	۱
خیلی کم	۳۵٦	۱

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، بیشتر مناطق مسکونی در خطرهای زیاد و خیلی زیاد وقوع طغیان هستند. مناطق مسکونی اطراف شط‌العرب عموماً در نزدیکی شهرهای مهم اطراف رودخانه مانند بصره قرار دارد و باتوجه به این‌که در مناطق مسکونی تعداد افراد بیشتری زندگی می‌کنند، حتماً باید تدابیر لازم برای جهت جلوگیری از صدمات جانی و مالی اندیشیده شود.

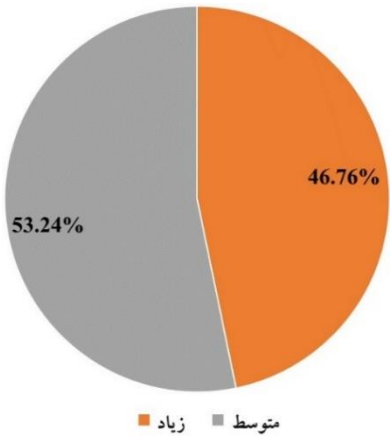


شکل ۵ توزیع آماری مناطق مسکونی اطراف شط‌العرب بر حسب درصد

شکل (٦) توزیع زمین‌های با کاربری صنعتی در مناطق با ریسک‌های مختلف وقوع طغیان را برحسب درصد نشان می‌دهد از بین چهار منطقه صنعتی موجود در اطراف شط‌العرب یک منطقه در شرایطی با خطرپذیری بسیار زیاد است که مساحتی در حدود ۱٤۵ هکتار را دارا می‌باشد و بیش از ۵۰ درصد مساحت این منطقه را شامل می‌شود. از سه منطقه دیگر نیز که هریک مساحتی برابر دارند، دو مورد در خطر زیاد و یک مورد در خطر متوسط قرار دارد. مناطق صنعتی در خطرپذیری طغیان کم و خیلی کم قرار ندارند و این بدان معناست که در احداث مناطق صنعتی، توجه کافی به پدیده طغیان و احتمال بروز خسارات ناشی از وقوع آن نشده‌است.



شکل ٦ توزیع آماری مناطق صنعتی اطراف شط‌العرب بر حسب درصد



شکل ۷ توزیع آماری مناطق اسکله اطراف شط‌العرب بر حسب

منطقه اسکله رودخانه شط‌العرب از نظر موقعیت مکانی به‌صورت پراکنده نیست اما در دو دسته خطر زیاد و متوسط قرار گرفته‌است. این منطقه به‌دلیل کشتی‌رانی در شط‌العرب دارای اهمیت بالایی است و جز مناطق استراتژیک محدوده مورد مطالعه است که حفاظت از آن در برابر طغیان اهمیت بالایی دارد. شکل

(۷) توزیع آماری کاربری اسکله در دسته‌های مختلف خطرپذیری را برحسب درصد نشان می‌دهد.

درصد تنها یک پارک با مساحت ۱۷۱۵ هکتار در محدوده مورد مطالعه وجود دارد که در بخش خطر طغیان زیاد قرار دارد. به‌علت موقعیت خاص این پارک که در میان رود قرار گرفته‌است، باید با پیش‌بینی زمان وقوع طغیان از تعطیل بودن پارک اطمینان حاصل نمود تا صدمات جانی به حداقل برسد.

هم‌چنین در بررسی کاربری تجاری مشخص می‌شود که تمامی مناطق تجاری محدود مورد مطالعه در کنار یکدیگر جمع شده‌اند، از نظر میزان خطر طغیان نیز در یک دسته قرار گرفته و دارای خطر متوسط هستند.

در نهایت منطقه نظامی شط‌العرب نیز با مساحت ۹٤ هکتار در بخش خطرپذیری خیلی کم قرار گرفته‌است که نشان از موقعیت مناسب آن دارد.

در جدول (٦) نمای کلی وضعیت هرکدام از کاربری‌های مجاور رود شط‌العرب به‌همراه مقدار مساحت دسته‌بندی شده و تحت خطر را نشان می‌دهد. با استفاده از این جدول امکان مقایسه بین خطرپذیری طغیان کاربری‌های مختلف فراهم است.

بخش بزرگی از مساحت مجاورت این رودخانه را مناطق با کاربری کشاورزی پوشش می‌دهند که در این میان، بیش از ۷۰ درصد مناطق این کاربری با مساحت حدود ۹۷۰۰ هکتار در طبقه میزان ریسک متوسط تا بسیار زیاد وقوع سیل قرار دارد. در صورت طغیان رود و جاری شدن سیل این مناطق بیشتر از سایر کاربری‌ها تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. وقوع این رخداد، به زمین‌های زراعی و کشاورزی آسیب وارد می‌کند و کشت محصول و تأمین مواد غذایی مناطق اطراف را با مشکل روبه‌رو خواهد کرد. جدول (٦) توزیع آماری انواع کاربری‌ها با میزان خطرپذیری مختلف دومین کاربری از نظر میزان مساحت واقع در محدوده خطر، مناطق با کاربری مسکونی می‌باشند که حدود ٤۵۰۰ هکتار مساحت را تا شعاع ۵۰۰ متری رود تشکیل می‌دهند. از این مقدار مساحت، حدود ۳۸۰۰ هکتار در محدوده با میزان ریسک متوسط تا بسیار زیاد وقوع سیل قرار دارد. از میان کاربری‌های موجود، کاربری مسکونی از بالاترین میزان حساسیت برخوردار است به‌طوری‌که در اغلب مواقع صدمات وارد به آن جبران‌ناپذیر است. قرارگیری این میزان مساحت از کاربری مسکونی در محدوده پر ریسک وقوع سیل، می‌تواند خسارات جانی و مالی شدیدی به بار آورده و به تخریب منازل و اموال ساکنین مجاور منجر شود. با مقایسه میدانی مشخص شد که مناطقی با کاربری‌های مختلف که در نتایج حاصل، در دسته‌های خطرپذیری خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته‌اند، در طغیان‌های گذشته بیشتر دچار صدمه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در حوضه رودخانه شط‌العرب واقع در استان بصره، باتوجه به این‌که روستاها، اراضی زراعی و تأسیسات احداث‌شده در حاشیه رودخانه همواره در معرض خطر طغیان سیل قرار دارند، ارزیابی و تحلیل مکانی نواحی مستعد طغیان رودخانه و تهیه نقشه پهنه‌های سیل‌گیر در این محدوده ضرورت دارد که این تحقیق سعی بر این داشته‌است برای اولین بار به تحلیل این منطقه بپردازد.

جدول ٦- توزیع آماری انواع کاربری‌ها با میزان خطرپذیری مختلف

میزان ریسک	مساحت به تفکیک کاربری (هکتار)						
	کشاورزی	مسکونی	صنعتی	اسکله	پارک	تجاری	نظامی
بسیار زیاد	۲٤۲۷	۸۱۲	۱٤۵	۰	۰	۰	۰
زیاد	٤٦۲۰	۲۲۷۰	۸۷	۱۳۰	۱۷۱۵	۰	۰
متوسط	۲٦٤۹	٦۹۸	٤٤	۱٤۸	۰	۵۹۱	۰
کم	۲۱۵٤	۳۵٦	۰	۰	۰	۰	۰
خیلی کم	۱۵۵٤	۳۵٦	۰	۰	۰	۰	۹٤

در این مطالعه با فرض به‌وجود آمدن جریانی که بزرگ‌ترین سطح مقطع رودخانه را کاملاً از آب پر کند، وضعیت طغیان رود در مقاطع دیگر بررسی گردید. این مقطع در دسته خطر طغیان بسیار کم جای داده شده و شاخص سطح مقطع رودخانه در مقاطع دیگر محاسبه شد. به‌کمک نتایج حاصل می‌توان دریافت که در کدام منطقه با چه کاربری میزان طغیان تا چه اندازه جدی و مخاطره‌آمیز است. در نتایج حاصل از تحقیق تمامی کاربری‌های موجود به‌همراه میزان مساحت آن‌ها در پنج طبقه کیفی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد دسته‌بندی شده‌اند؛ که هرکدام از این دسته‌ها نماد کیفی بازه معینی از شاخص سطح مقطع است.

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده این است که GIS به‌عنوان ابزاری کارامد در تحلیل‌های مکانی نقش ایفا کرده‌است. با استفاده از GIS عرض مقاطع رودخانه مشخص شد و سپس با استفاده از عمق مقاطع که از قبل حاصل شده بود، سطح مقطع رودخانه به‌عنوان شاخص ارزیابی خطر طغیان به‌دست آمد. در گام بعدی با استفاده از این شاخص طبقه‌بندی خطر طغیان در محدوده ۵۰۰ متری از شط‌العرب انجام شد. استفاده اصلی GIS در این پژوهش در بررسی وضعیت قرارگیری کاربری‌های اطراف رود در هر یک از طبقات خطرپذیری طغیان شط‌العرب بود که به‌خوبی مساحت و تعداد مناطق هر کاربری در هر یک از طبقات خطرپذیری مشخص شد. کاربرد دیگر GIS در دسته‌بندی و بصری‌سازی کاربری‌های اطراف رودخانه بود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی میزان طغیان رودخانه با استفاده از روش‌های شبکه عصبی بررسی و برآورد گردد و از مدل‌های هیدرولیکی بهره گرفته شود. هم‌چنین وجود مدل رقومی ارتفاعی مناسب از محدوده مورد مطالعه سبب تدقیق نتایج می‌شود.

مراجع

1. Iqbal, U., Perez, P., Li, W., & Barthelemy, J., "How computer vision can facilitate flood management: A systematic review", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, No. 53, p. 102030, (2021).
2. Mohanty, M. P., H, V., Yadav, V., Ghosh, S., Rao, G. S., & Karmakar, S., "A new bivariate risk classifier for flood management considering hazard and socio-economic dimensions", *Journal of Environmental Management*, 255, *109733*. doi:10.1016/j.jenvman.2019.10973, (2020).
3. Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., Wyser, K., Feyen, L., Roo, A. De, de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., Feyen, L., "Earth's Future Global projections of river flood risk in a warmer world", *Earth's Futur*. 5, pp. 171–182, (2017).
4. Mel, R. A., Viero, D. P., Carniello, L., & D'Alpaos, L., "Optimal floodgate operation for river flood management: The case study of Padova (Italy)", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, No. 30, p. 100702, (2020).
5. Gamble, D. W., & Meentemeyer, V. G., "A synoptic climatology of extreme unseasonal floods in the southeastern United States, 1950-1990*", Physical Geography*, No. 18(6), pp. 496–524, (1997).
6. Hirschboeck, K. K., "Hydroclimatically-defined mixed distributions in partial duration flood series. In Hydrologic frequency modeling: Proceedings", (1987).
7. Merz, B., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Nied, M., "Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, No. 14(7), pp. 1921–194, (2014).
8. Shareef, M., & Abdulrazzaq, D., "Civil Engineering Journal River Flood Modelling For Flooding Risk Mitigation in Iraq", *Civil Engineering Journal*. 7. 1702-1715. 10.28991/cej-2021-03091754. (2021).
9. Hirschboeck, K. K., "Future Hydroclimatology and the research challenges of a Post-stationary world", *Journal of Contemporary Water Research & Education*, No. 142(1), pp. 4–9, (2009).

10. Negaresh, H., Tavoosi, T., & Mahdinasab, m., "Investigating the severity of flooding in the Kashkan River catchment area", *Journal of Natural geography*, No. 4(13), pp. 49-58, (2011). (In Persian)
11. Zargar, M., Masominezhad, A., "The application of GIS in the studies of determining the boundaries and bed of rivers, a case study: the catchment area of Chenaran River", *The 4th Iran Water Resources Management Conference.*, Amirkabir university of technology, Iran, (2011). (In Persian)
12. Aslani, F., Mehdipour, H., "Planning for Flood Risk Reduction by Using GIS Technique in Tehran Province", *Disaster Prevention and Management Knowledge*, No. 5 (3), pp. 173-185, (2015). (In Persian)
13. Falahzavareh, F., Saghafian, B., Behzadian, K., "Estimation of the flood hydrograph using the SWMM model, taking into account the uncertainty of the spatial distribution of precipitation using the Monte Carlo method", *9th International Congress on Civil Engineering*, Isfehan, Iran, (2012). (In Persian)
14. Ghavami, Z., Mohammadinia, A., "Spatial prediction of flood prone areas using geospatial information system", *The 4th national conference on the application of GIS in the water and electricity industry*, Arak, Iran, (2017). (In Persian)
15. Zope, P.E. Eldho, T.I. Jothiprakash, V., "Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India*", Journal of Natural Hazards, January 2015*, Vol. 75, Issue 1, pp. 887-908, (2015).
16. Kalyanapu, A. J., Judi, D.R., McPherson, T. N., "Monte Carlo-based flood modelling framework for estimating probability weighted flood risk", *Journal of Flood Risk Management*, No. 5(1), pp. 37-48, (2012).
17. Saint-Geours, N., Grelot, F., Bailly, J. S., Lavergne, C., "Ranking sources of uncertainty in flood damage modelling: a case study on the cost-benefit analysis of a flood mitigation project in the Orb Delta, France", *Journal of Flood Risk Management*, No. 8, pp. 161–176, (2015).
18. Wu, Y., Peng, F., Peng, Y., Kong, X., Liang, H. and Li, Q., "Dynamic 3D Simulation of Flood Risk Based on the Integration of Spatio-Temporal GIS and Hydrodynamic Models", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, No. 8, p. 520, (2019).
19. Munir, B.A., Ahmad, S.R., Hafeez, S., "Integrated hazard modeling for simulating torrential stream response to flash flood events", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, (2019).

Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution*

Research Article

Maryam Jamali Dizaji[1] Morteza Mozafari [2]

Elham Fijani[3] Roya Eskandari[4]

1- Introduction

Hydraulic conductivity is the ability of a porous medium to pass fluid. As one of the most important characters of the aquifer, it is useful in estimating groundwater flow velocity, determining contaminant transport, and solving geotechnical problems (Saha et al., 2016). Hydraulic conductivity measurement methods are divided into two main groups, based on Darcy's law and based on empirical relationships using the pore or particle size or distribution results. Darcy-based methods can be grouped into two categories: laboratory and field. In laboratory methods, hydraulic conductivity could be estimated by water flows through a small sample of the desired material. Field methods are divided into small-scale and large-scale categories. In small-scale methods, the amount of hydraulic conductivity in the saturated and unsaturated parts of the soil is calculated with the help of various tools. The most important large-scale methods include pumping testing and tracing test. Pumping test is the most common method for calculating the hydraulic conductivity of the aquifer from the group of large-scale methods in which the values of hydraulic conductivity and aquifer storage coefficient can be obtained by observing the behavior of the water surface around the pumping well. In some plains, it is not possible to perform pumping and tracing tests since they are expensive and time consuming. In these stations, the method of experimental relations can be used to calculate the hydraulic conductivity. Many researchers have worked to determine the relationship between soil particle size distribution and hydraulic conductivity (Hazen, 1892; Slichtcher, 1899; Kazni, 1927; Carmen, 1937, 1956; Crombin and Monk, 1942; Breyer, 1964; Terzaghi and Pack, 1964; Musch and Danny, 1966). Vanke et al. In 2000 and seventeen studied 431 samples collected from different sedimentary environments and proposed new equations for calculating hydraulic conductivity. Razaz et al. (2014) concluded that the hydraulic conductivity is strongly influenced by the effective particle diameter in the grading curves, by studying the samples with effective diameter of 0.05 to 0.83 mm and uniformity coefficient of 1.3 to 18.3. Arfin and Ali Khan (2020) determined the hydraulic conductivity of 25 soil samples using laboratory methods and Hazen, Slaughter, Breyer, and Kazney-Carmen equations. The results of this study showed that experimental formulas are suitable for calculating the hydraulic conductivity of soil with a wide range of particle sizes. Tai Huang et al. (2017) obtained hydraulic conductivity values for coarse, medium and fine-grained sandy soils from experimental formulas, partial effective porosity modeling and tracing experiments. The results of this study showed that the values of hydraulic conductivity obtained from the Kozney-Carmen relationship are 1.5 to 1.7 times the values obtained from the Hazen method. Also, the difference between the values of hydraulic conductivity obtained in the tracing method and the experimental formulas was greater than the results obtained from the model. The final result confirmed that the closer proximity of the hydraulic conductivity of the model to the real conditions. Saho and Saha (2016) compared the hydraulic conductivity values obtained from the experimental formulas (Hazen-Breyer relations) and the pumping test. The results showed obvious differences in the values of hydraulic conductivity from the experimental equations and the pumping test.

2- Methodology

In the present study, an attempt has been made to calculate the hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using the experimental relationships based on the results of alluvial grain size curve. The samples was obtained by drilling of 20 boreholes in Asaluyeh plain (Fig. 1). The plain is located in a narrow zone formed between the Asaluyeh Anticline in the north and the Persian Gulf in the south. The Asaluyeh aquifer is composed of Quaternary sediments, where the water table is located at a depth of 10 to 15 m and the general direction of groundwater flow is from the north toward the sea. The Asaluyeh Plain has been selected as a suitable coastal area for construction of refineries of the South Pars Gas Field. Therefore, understanding the hydraulic conductivity of the aquifer is important for simulating the groundwater flow and probable contaminant transport. To do the research, in the laboratory, particle size distribution test (by sieving for soils with particles larger than 0.07 mm and hydrometers for smaller particles) was performed on the samples. To do this, the soil sample was first washed to remove clay and silt and then placed at a temperature of about 105 ° C for 24 hours to dry completely.

*Manuscript received: 09 March 2022; Revised, 08 May 2022, Accepted, 15 June 2022.

1. Master Student of Hydrogeology, School of Geology, College of Science, University of Tehran.

2. Corresponding Author. Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.
Email: mmozafari@ut.ac.ir

3. Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

4. MSc of Environmental Geology.

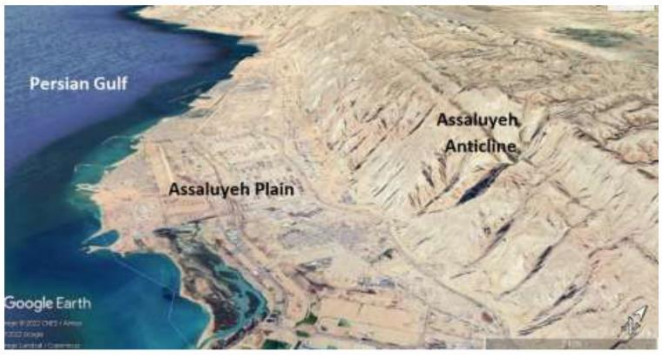


Fig. 1. An aerial view of the Study area

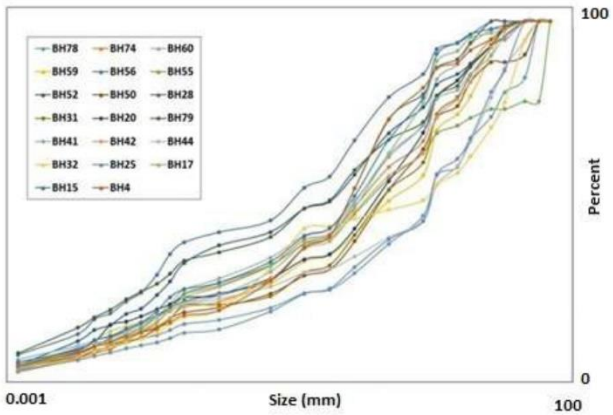


Fig. 2. Particle size distribution

In the next step, the soil lumps were eaten and the mass of the sample was determined and then the soil sample was passed through sieves. At the end of the sieving step, the mass of residual soil on each sieve was measured. Also, the silt and clay values of the samples were determined using hydrometric testing. After determining the particle size of the samples, Folk diagrams were used to determine their type. Finally, the results of the granulation experiment were displayed in a semi-logarithmic aggregation diagram in which the figures for the cumulative percentage of particle mass on the vertical axis and the particle size on the horizontal axis were displayed. After plotting the particle size distribution diagram, the required parameters for calculating hydraulic conductivity were obtained using experimental equations. In the next step, using the experimental relationships, the values of hydraulic conductivity were determined.

3- Result and discussion

The particle size distribution curve for the studied samples is plotted in Fig. 2. Based on the Folk diagram, among the samples, 10, 9 and 1 were classified respectively as sand-mud gravel, gravel-mud sand and mud gravel types. Due to the fact that the sediments tested are alluvial, so the variety of particle sizes in them is high. The values of the uniformity coefficient in most of the samples were a large number, indicating the wide range of soil particle size changes. According to Breyer method, the amount of hydraulic conductivity of the samples was between -0.019 to 2.2 cm per day. The values of hydraulic conductivity by Gustafson, Kozney-Carmen, Terzaghi and Slicter methods are between 0.1 to 1.4, 0.38 to 4.3, 0.2 to 2.8, 0.17 to 1.9 cm, respectively. The wide range of changes in hydraulic conductivity can be due to the range of particle size variability of samples from gravel to silt. Larger values of hydraulic conductivity are associated with samples with higher gravel and sand content, and lower values are associated with samples with high clay content. In a heterogeneous porous environment, such conditions can cause the fine particles to fill the space between the large particles and reduce the hydraulic conductivity.

4- Conclusion

The values of hydraulic conductivity obtained from the experimental method for 20 studied samples vary between 0.1 to 4.3 cm per day, which is in the range of common values of hydraulic conductivity of silt and clay. It seems that the calculated hydraulic conductivities for the studied samples were less than its actual value, since gravel and sand was observed in all samples. It could be concluded that the use of different experimental relationships to calculate the hydraulic conductivity of aquifers shows different results. Therefore, to validate the computational hydraulic conductivity values, it is recommended to perform a pumping test or slug test in the aquifer.

DOI: 10.22067/jfcei.2022.75751.1128 https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان عسلویه با استفاده از روابط تجربی مبتنی بر دانه‌بندی آبرفت*

مقاله پژوهشی

مریم جمالی دیزجی[۱] مرتضی مظفری[۲] الهام فیجانی[۳] رویا اسکندری[۴]

چکیده *هدایت هیدرولیکی مهم‌ترین متغیر در معادله‌های جریان آب زیرزمینی است که در برآورد سرعت جریان آب، پیش‌بینی چگونگی انتقال آلاینده، حل مشکلات ژئوتکنیکی و تعیین برنامه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش دارد. در این پژوهش کوشش شده تا با استفاده از روش رابطه‌های تجربی، میزان هدایت هیدرولیکی در بخشی از آبخوان عسلویه برآورد گردد. به این منظور، از دستاوردهای ۲۰ آزمایش دانه‌بندی آبرفت و ترسیم منحنی توزیع اندازه ذرات خاک، برای تهیه داده‌های مورد نیاز استفاده شده‌است. مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از روش تجربی بین ۰/۱ تا ۴/۳ سانتی متر بر روز متغیر است که در محدوده مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج مواد ریزدانه می‌باشد. با توجه به میزان گراول و ماسه قابل توجه در نمونه‌ها، به نظر می‌رسد که مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده تا حدی کمتر از مقدار واقعی آن باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود برای استفاده از روابط تجربی، مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده دامنه گسترده‌ای از تغییرات را در بر می‌گیرد. بنابراین انجام آزمایش پمپاژ برای صحت‌سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسباتی پیشنهاد می‌گردد.*

واژه‌های کلیدی آبخوان دشت عسلویه، هدایت هیدرولیکی، روابط تجربی، منحنی دانه‌بندی.

مقدمه

هدایت هیدرولیکی به معنای توانایی یک محیط متخلخل برای عبور سیال است. این ویژگی بیانگر مقدار جریان عبوری تحت شیب هیدرولیکی معین از سطح مقطع خاک می‌باشد و مهم‌ترین متغیر در کاربرد قانون‌های جریان آب زیرزمینی است[1]. هدایت هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آبخوان است که در تخمین سرعت جریان آب زیرزمینی، تعیین نحوه انتشار ابر آلودگی، شبیه سازی جریان آب زیرزمینی، حل مشکلات ژئوتکنیکی و تعیین برنامه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش دارد (ساها و همکاران، ۲۰۱۶). روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی به دو گروه مبتنی بر قانون دارسی و مبتنی بر روابط تجربی (بر اساس توزیع اندازه منافذ، توزیع اندازه ذرات و بافت خاک) تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر رابطه دارسی به دو دسته آزمایشگاهی و صحرایی قابل گروه‌بندی هستند. در روش‌های آزمایشگاهی، جریان آب در طول یک نمونه کوچک از مواد مورد نظر برقرارشده و افت بار و سرعت جریان از این طریق مشخص می‌گردد. در روش بار ثابت، بار آبی ثابت است، دبی عبوری از نمونه خاک در گذر زمان اندازه‌گیری می‌شود و مقدار هدایت هیدرولیکی با استفاده از قانون دارسی از محاسبه می‌گردد. در روش بار افتان، با اندازه‌گیری سرعت افت بار آبی و دانستن مقدار سرعت جریان گذرکننده از نمونه خاک، میزان هدایت هیدرولیکی بر اساس رابطه دارسی تعیین می‌گردد[2,3]. روش‌های صحرایی به دو دسته کلی روش‌های کوچک مقیاس و روش‌های بزرگ مقیاس تقسیم می‌شوند. در روش‌های کوچک مقیاس، مقدار هدایت هیدرولیکی در بخش اشباع و غیر اشباع خاک با کمک ابزارهای گوناگون محاسبه می‌گردد. مهم‌ترین روش‌های بزرگ مقیاس شامل آزمایش پمپاژ و ردیابی است[2]. آزمون پمپاژ رایج‌ترین روش برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان از گروه روش‌های بزرگ مقیاس است که در آن براساس مشاهده رفتار سطح آب در اطراف چاه پمپاژ می‌توان مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان را به‌دست آورد[3]. در برخی از دشت‌ها امکان انجام آزمایش پمپاژ و ردیابی (به‌دلیل فراهم نبودن شرایط انجام) وجود ندارد و تنها داده‌های حاصل از حفاری در دسترس است. در این جایگاه‌ها،

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
(۲) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران. **Email**: mmozafari@ut.ac.ir
(۳) استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
(۴) کارشناس ارشد زمین شناسی زیست‌محیطی.

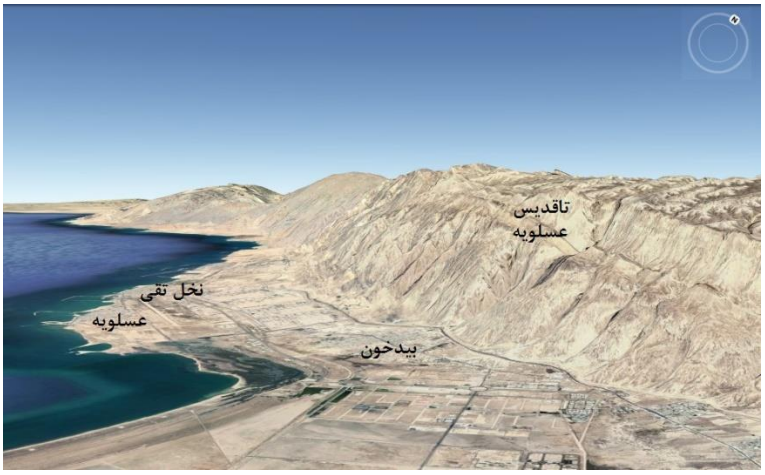
برای محاسبه هدایت هیدرولیکی می‌توان از روش روابط تجربی استفاده کرد.

پژوهشگرهای زیادی برای تعیین رابطه بین توزیع اندازه ذرات خاک و هدایت هیدرولیکی آن کار کرده‌اند (هازن، ۱۸۹۲؛ اسلیتچر، ۱۸۹۹؛ کزنی، ۱۹۲۷؛ کارمن، ۱۹۳۷، ۱۹٥٦؛ کرومبین و مونک، ۱۹٤۲؛ بریر، ۱۹٦٤؛ ترزاقی و پک، ۱۹٦٤؛ ماسچ و دنی، ۱۹٦٦). وانکه و همکاران در سال ۲۰۰۰ و هیفده بر روی ٤۳۱ نمونه که از محیط‌های رسوبی مختلف جمع‌آوری شده بود مطالعه کردند و معادلات جدیدی برای محاسبه‌ی هدایت هیدرولیکی ارائه نمودند [4]. رزاز و همکاران (۲۰۱٤) با مطالعه بر روی نمونه‌هایی با قطر مؤثر ۰/۰۵ تا ۰/۸۳ میلی‌متر و ضریب یک‌نواختی ۱/۳ تا ۱۸/۳ به این نتیجه رسیدند که مقادیر هدایت هیدرولیکی بسیار تحت تأثیر قطر مؤثر ذرات در منحنی‌های دانه‌بندی می‌باشد [5]. آرفین و علی خان (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی (مبتنی بر منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات) هدایت هیدرولیکی ۲۵ نمونه خاک را تعیین نمودند. روابط تجربی به‌کار رفته شامل روش های هازن، اسلیتچر، بریر و کزنی- کارمن بود. هم‌چنین از رابطه وکوویچ و سورو (۱۹۹۲) برای محاسبه‌ی تخلخل و چگانی توده(Bulk density) استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فرمول‌های تجربی برای محاسبه هدایت هیدرولیکی نمونه‌های با طیف گسترده‌ای از اندازه‌ی ذرات مناسب است[6]. ایشاکو و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه‌ی جیمتا-یولا واقع در کشور نیجریه مقادیر هدایت هیدرولیکی نمونه‌های حاصل از حفاری را از طریق فرمول‌های تجربی محاسبه نمودند و به این نتیجه رسیدند که روابط ترزاقی، کزنی و اسلیتچر بهترین مقادیر را برای هدایت هیدرولیکی آبخوان ماسه‌سنگی این منطقه ارائه می‌دهد[7]. تایی هوآنگ و همکاران (۲۰۱۷) مقادیر هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های ماسه‌ای درشت‌دانه، متوسط و ریزدانه را از فرمول‌های تجربی، تهیه مدل تخلخل مؤثر نسبی و آزمایش ردیابی به‌دست آوردند و نتایج حاصل را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌داد که مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از رابطه کزنی-کارمن ۱/۵تا ۱/۷ برابر مقادیر حاصل از روش هازن می‌باشد. هم‌چنین اختلاف بین مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده در روش ردیابی و فرمول‌های تجربی بیشتر از نتایج حاصل از مدل است. نتیجه نهایی تأییدکننده نزدیکی بیشتر هدایت هیدرولیکی حاصل از مدل به شرایط واقعی بود[8]. ساهو و ساها (۲۰۱٦) مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از فرمول‌های تجربی (روابط هازن و بریر) و آزمون پمپاژ را با یکدیگر مقایسه کردند. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های حاصل از حفاری چهار گمانه به عمق ۳۰ متر به‌روش تجربی مبتنی بر توزیع اندازه ذرات صورت گرفت. نتایج نشانگر تفاوت آشکار مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط تجربی و آزمایش پمپاژ بود[4].

دشت عسلویه در حاشیه خلیج فارس و در فاصله ۳۰۰ کیلومتری شرق شهر بوشهر قرار دارد و به‌عنوان منطقه ساحلی مناسب برای ایجاد واحدهای خشکی و توسعه مرحله‌ای میدان گازی پارس جنوبی (شامل پالایشگاه‌ها و خطوط انتقال) انتخاب شده‌است (شکل ۱). با توجه به بالا بودن تراز آب زیرزمینی، آلودگی نشت کرده از خطوط انتقال و مخازن پالایشگاه‌ها می‌تواند سبب آلودگی آب زیرزمینی دشت بشود. بنابراین شناخت ویژگی آبخوان آزاد دشت (از جمله هدایت هیدرولیکی) دارای اهمیت است و می‌تواند به مطالعه آبخوان، شبیه‌سازی شرایط حاکم بر جریان آب زیرزمینی و هم‌چنین ارائه برنامه‌های مدیریتی منابع آب آن کمک نماید. در پژوهش پیش رو کوشش شده تا با استفاده از رابطه‌های تجربی مبتنی بر نتایج منحنی دانه‌بندی آبرفت، هدایت هیدرولیکی در بخشی از آبخوان عسلویه محاسبه گردد.

منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش

از نظر زمین‌شناسی، دشت عسلویه در پهنه ساختاری زاگرس قرار دارد و تاقدیس عسلویه مهم‌ترین ساختار زمین‌ساختی آن است. مهم‌ترین واحدهای سنگ‌چینه‌ای سازنده تاقدیس عسلویه از قدیم به جدید عبارتند از: گروه خامی (شامل سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان)، گروه بنگستان (شامل سازندهای کژدمی، سروک و ایلام)، سازندهای گورپی، پایده، و جهرم-آسماری، گروه فارس (متشکل از سازندهای گچساران، میشان و آغاجاری) و کنگلومرای بختیاری[9]. دشت عسلویه به‌صورت نوار باریکی در بین تاقدیس عسلویه در شمال و خلیج فارس در جنوب قرار دارد و از رسوبات کواترنری تشکیل شده‌است. سطح ایستابی در دشت عسلویه در عمق ۱۰ تا ۱۵ متری قرار دارد و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شمال دشت به‌سوی دریا است.



شکل ۱ نمایی از تاقدیس عسلویه و دشت عسلویه. جهت نگاه به شمال باختر.

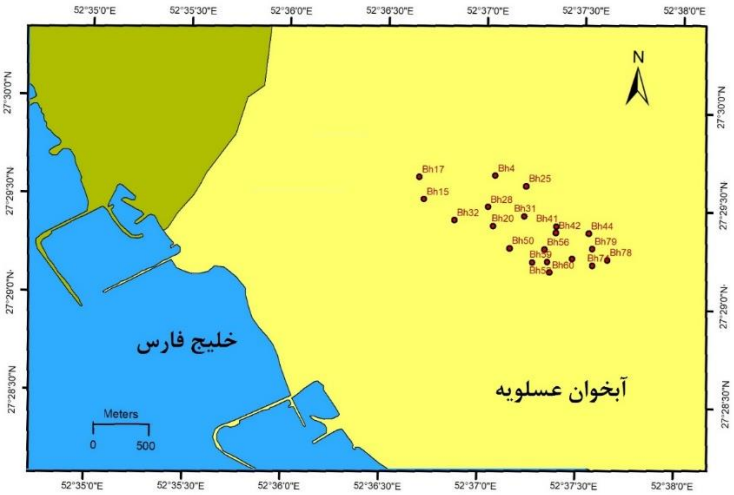
در این پژوهش کوشش شده تا با استفاده از آزمایش برروی نمونه‌های خاک حاصل از حفاری ۲۰ گمانه در دشت عسلویه (شکل ۲)، تخمین مناسبی از هدایت هیدرولیکی آن به‌دست آید. برای این منظور، ابتدا نمونه خاک از عمیق‌ترین بخش گمانه‌های حفر شده برداشته شد و برای آنالیز دانه‌بندی به آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه تهران ارسال گردید. در آزمایشگاه، آزمایش توزیع اندازه ذرات (با کمک الک کردن برای خاک‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۰/۰۷ میلی‌متر و هیدرومتری برای ذرات ریزتر) بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای این کار، ابتدا نمونه خاک شسته شد تا رس و سیلت از آن جدا شود و سپس برای مدت ٢٤ ساعت در کوره با درجه حرارت حدود ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا به‌صورت کامل خشک گردد. در مرحله بعد کلوخه‌های خاک خورد شده و جرم نمونه مشخص گردید و سپس نمونه خاک از الک‌ها عبور داده شد. بعد از اتمام مرحله الک کردن، جرم خاک باقی‌مانده بر روی هر الک اندازه‌گیری شد (شکل ۳). هم‌چنین مقادیر سیلت و رس نمونه‌ها با استفاده از آزمایش هیدرومتری مشخص گردید. پس از تعیین اندازه ذرات نمونه‌ها، از نمودار فولک[10,11] برای تعیین نوع آن‌ها استفاده شد. در نهایت نتیجه به‌دست‌آمده از آزمایش دانه‌بندی در یک نمودار تجمعی نیمه لگاریتمی نمایش داده شد که در آن ارقام مربوط به درصد تجمعی جرم ذرات بر روی محور عمودی و اندازه ذرات بر روی محور افقی نمایش داده می‌شود. پس از رسم نموار توزیع اندازه ذرات، پارامترهای مورد نیاز محاسبه هدایت هیدرولیکی با استفاده از روابط تجربی به‌دست آمد. مهم‌ترین این پارامترها عبارتند از: قطر مؤثر ذرات که در اغلب فرمول‌ها قطری که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند به‌عنوان قطر مؤثر انتخاب شده‌است (d_{10})، ضریب یک‌نواختی (C_u)، قطری که ۳۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند (d_{30}) و قطری که ٦۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند (d_{60}).

در مرحله بعد، با استفاده از روابط تجربی ارائه‌شده در جدول (۱) مقادیر هدایت هیدرولیکی مشخص گردید. شایان ذکر است که این فرمول‌ها براساس کارهای تحلیلی و تجربی برای محاسبه مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده‌اند و هر کدام دارای شرایط و محدودیت‌های ویژه خود می‌باشند[12,13,14]. همانطور که در رابطه‌های جدول (۱) دیده می‌شود، محاسبه تراوایی با استفاده از برخی روابط (مانند رابطه کزنی-کارمن) نیازمند دانستن تخلخل نمونه‌های خاک است. تخلخل نمونه‌های خاک از رابطه شماره (۱) محاسبه گردید که در آن n، ρ_m و ρ_d به‌ترتیب تخلخل، چگالی ذرات و چگالی توده می‌باشد.

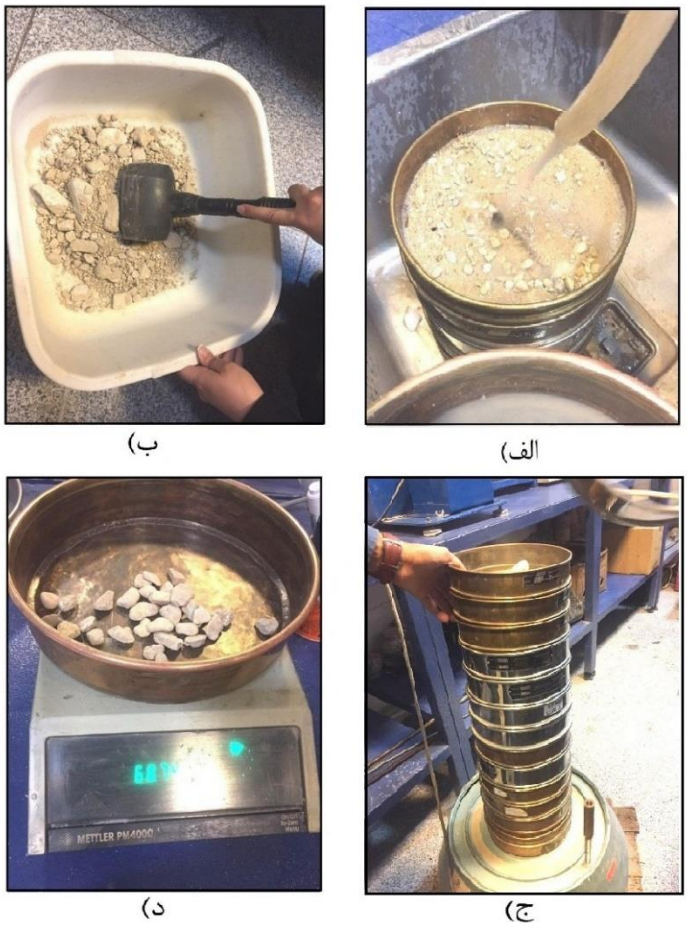
$$n = (\rho_m - \rho_d)/ \rho_m \qquad (1)$$

چگالی ذرات خاک برای نمونه‌های این مطالعه برابر با ۲/٦۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده‌است. هم‌چنین برای محاسبه چگالی توده (جرم واحد حجم توده، شامل حجم دانه‌ها و فضای خالی بین آن‌ها) به‌ترتیب یاد شده عمل شد و سپس با جای‌گذاری آن در رابطه شماره (۱) مقدار تخلخل نمونه‌های انتخابی به‌دست آمد: ۱) از بین نمونه‌های حاصل از حفاری تعداد ۱۷ نمونه از توده خاک (که تقریباً دست‌نخورده بود) برداشت شد و جرم هر یک اندازه‌گیری شد، ۲) نمونه‌ها توسط پارافین پوشیده شد، ۳) جرم نمونه‌های پوشیده‌شده از پارافین اندازه‌گیری گردید

و حجم آن‌ها نیز با فرو بردن در ظروف مدرج پر از آب مشخص شد، ٤) با کم کردن حجم پارافین از حجم نمونه‌ها، حجم توده خاک مشخص گردید، و ۵) جرم توده خاک بر حجم آن تقسیم شد.



شکل ۲ موقعیت گمانه‌های مورد مطالعه در گستره دشت عسلویه



الف) ب) ج) د)

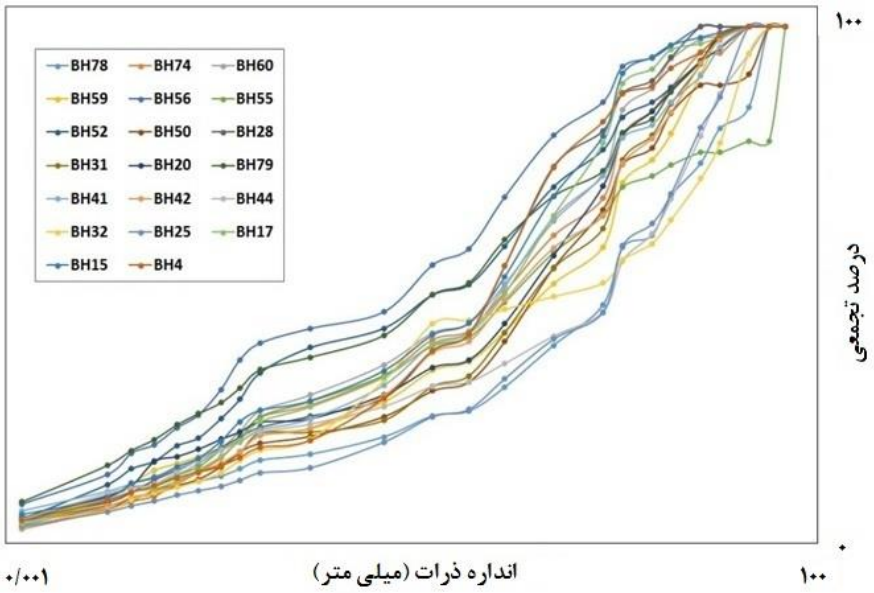
شکل ۳ آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش دانه‌بندی: الف) شستشوی نمونه‌ها، ب) خورد کردن کلوخه‌ها پس از خروج از کوره، ج) الک کردن و د) اندازه گیری جرم باقیمانده بر روی هر الک

جدول ۱. روابط تجربی مورد استفاده برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی

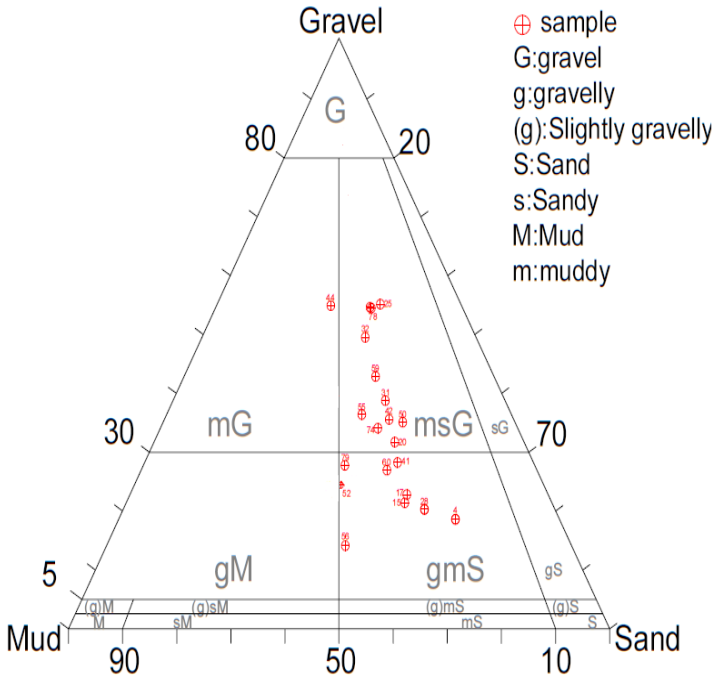
نام رابطه	فرمول تجربی
کزنی-کارمن (Kozeny_Carman)	$K=(\frac{g}{v}) \times (8.3 \times 10^{-3}) \times [\frac{n^3}{(1-n)^2}] \times d^2_{10}$, $n= 0.225(1+0.83^{Cu})$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n=porosity from empirical formula; d10= Diameter that 10% of the grains are smaller than.
بریر (Breyer)	$K=(\frac{g}{v}) \times (6 \times 10^{-4}) \times [\log (\frac{500}{Cu})] \times d^2_{10}$, $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity Cu=Uniformity coefficient d_{10}=Diameter that 10% of the grains are smaller than. d_{60}=Diameter that 60% of the grains are smaller than.
گوستافسون (Gustafson)	$K= E(C_u)(\frac{d_{10}}{1000})^2$, $E(C_u)= (10.2 \times 10^6)(\frac{E^3}{1+E})(\frac{1}{g(C_u)^2})$, $E= 0.8 (\frac{1}{2Ln(C_u)} - \frac{1}{(C_u)^2 -1})$ $g(C_u)= (\frac{1.3}{\log C_u})(\frac{(C_u)^2 -1}{(C_u)^{1.8}})$, $C_u= \frac{d_{60}}{d_{10}}$ Cu=Uniformity coefficient d_{10}=Diameter that 10% of the grains are smaller than.
اسلیتچر (Slitcher)	$K= \frac{g}{v} . 1\times 10^{-2} .n^{3.287}. d^2_{10}$, $n= 0.255(1+0.83^{Cu})$, $C_u= \frac{d_{60}}{d_{10}}$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n=porosity from empirical formula; d10= Diameter that 10% of the grains are smaller than. Cu=Uniformity coefficient; d_{60}=Diameter that 60% of the grains are smaller than.
ترزاقی (Terzaghi)	$K= \frac{g}{v} .C_t. (\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}})^2. d^2_{10}$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n=porosity from empirical formula; d10= Diameter that 10% of the grains are smaller than. Ct= the sorting coefficient between 6.1×10^{-3} and 10.7×10^{-3}, and the average value of Ct, 8.4×10^{-3}

واکاوی دستاوردها

دانه‌بندی ذرات. منحنی دانه‌بندی اندازه ذرات برای نمونه‌های مورد مطالعه در شکل (٤) ترسیم گردیده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌های مورد مطالعه دامنه گستره‌ایی از توزیع اندازه ذرات (از سیلت و رس تا گراول) را شامل می‌گردد؛ به عبارت دیگر، شیب منحنی دانه‌بندی ذرات از حالت عمودی بسیار فاصله دارد. شکل (۵) و جدول (۲) نتایج برازش تعیین اندازه ذرات نمونه‌ها در نمودار فولک را نشان می‌دهد. از ۲۰ نمونه مورد مطالعه، ۱۰ عدد از نوع گراول ماسه‌ای- گلی، ۹ عدد از نوع ماسه گلی- گراولی و یک نمونه از نوع گراول- گلی است. با توجه به این‌که رسوبات مورد آزمایش از نوع آبرفتی می‌باشند، بنابراین تنوع اندازه ذرات در آن‌ها زیاد است. مقادیر ضریب یک‌نواختی در اغلب نمونه‌ها عدد بزرگی بود که نشانگر دامنه گسترده تغییر اندازه ذرات خاک است. رسوب‌های سازنده دشت عسلویه (نهشته‌های کواترنری) بیشتر حاصل فرسایش سازندهای رخنمون یافته در تاقدیس عسلویه می‌باشد. شرایط زمین‌شناسی همراه با اقلیم و هیدرولوژی منطقه سبب هوازدگی شدید سنگ‌ها در تاقدیس عسلویه شده‌است. از سوی دیگر، دامنه پرشیب تاقدیس و اختلاف ارتفاع شدید در مسافتی کوتاه سبب می‌شود که رواناب حاصل از بارندگی دارای دبی زیاد و زمان تمرکز کوتاه باشد. بنابراین پتانسیل فرسایش و رسوب‌زایی منطقه به‌طور طبیعی زیاد است. باتوجه به عرض کم دشت، به‌نظر می‌رسد که رسوب‌های شکل‌گرفته از فرسایش فرصت چندانی برای جدایش و دانه‌بندی بر اساس کاهش انرژی رواناب‌ها نداشته‌اند. با این وجود و به‌صورت طبیعی با حرکت به‌سمت نواحی پایین‌دست دشت از مقدار و اندازه قلوه‌ها و بولدرهای سنگی کاسته می‌شود.



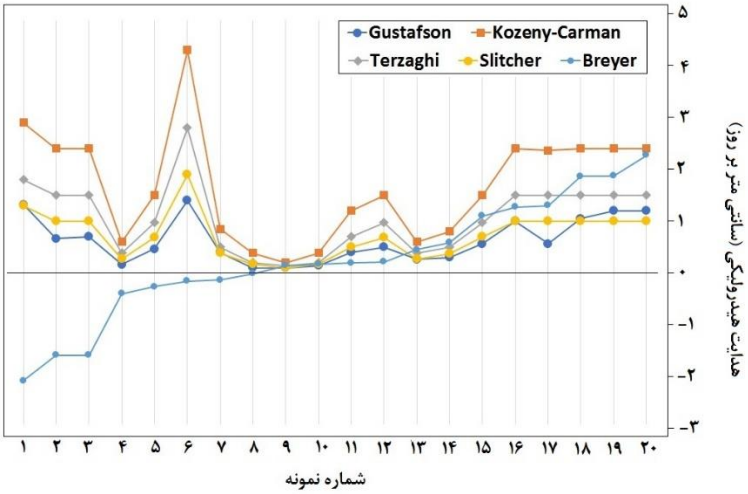
شکل ٤ منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها



شکل ۵ طبقه بندی نمونه‌ها بر اساس مثلث فولک

جدول ۲ نام گمانه، عمق نمونه‌برداری و نوع نمونه‌ها

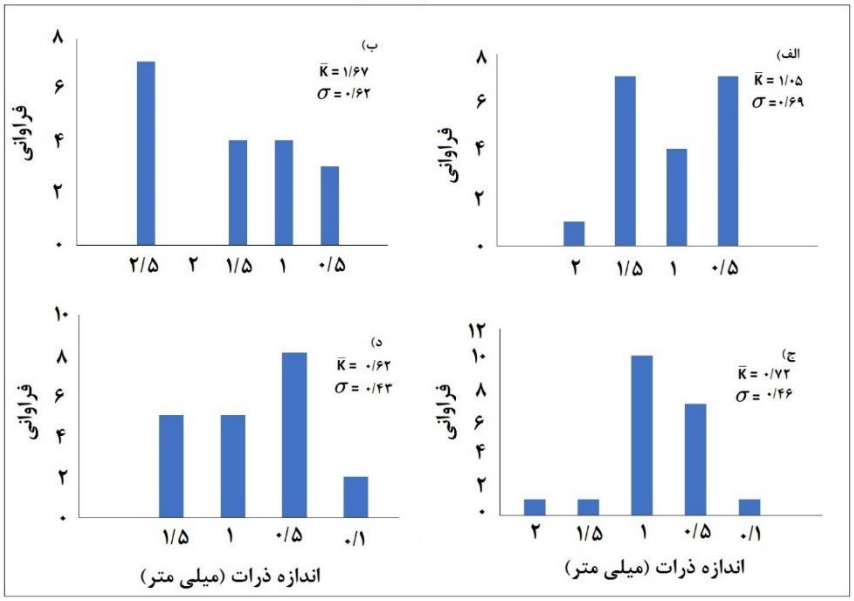
نام گمانه	عمق(m)	ضریب یکنواختی	نوع نمونه
BH٤	۱۲	۳/۰	ماسه گلی گراولی
BH۱۵	۱۰	۲/۰	ماسه گلی گراولی
BH۱۷	۱۳/۸	۲/۳	ماسه گلی گراولی
BH۲۰	۱۵	٤/۲	گراول ماسه‌ای گلی
BH۲۵	۲۱	۵/۲	گراول ماسه‌ای گلی
BH۲۸	۹	۲/۵	ماسه گلی گراولی
BH۳۱	۱٤/۵	۵/۹	گراول ماسه‌ای گلی
BH۳۲	۱۵	۱۰/۰	گراول ماسه‌ای گلی
BH٤۱	۱۱	۲/۵	ماسه گلی گراولی
BH٤۲	۱۱	۳/۰	گراول ماسه‌ای گلی
BH٤٤	۱٦/۵	۹/۵	گراول گلی
BH۵۰	۱۲/۵	٤/٤	گراول ماسه‌ای گلی
BH۵۲	۱۲/۵	۳/۲	ماسه گلی گراولی
BH۵۵	۱٤	۵/۸	گراول ماسه‌ای گلی
BH۵٦	۱۳	۲/۷	ماسه گلی گراولی
BH۵۹	۸/۵	۹/٦	گراول ماسه‌ای گلی
BH٦۰	۱۲	۵/۲	ماسه گلی گراولی
BH۷٤	۱۵	۲/۷	گراول ماسه‌ای گلی
BH۷۸	۱۵	۹/۵	گراول ماسه‌ای گلی
BH۷۹	۱٤	۲/٤	ماسه گلی گراولی



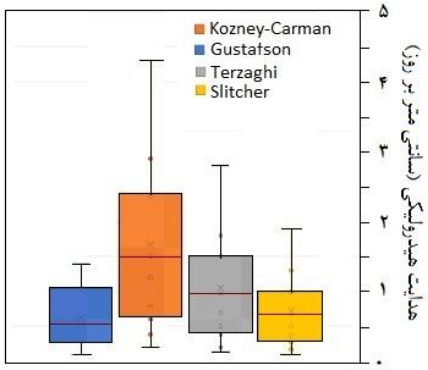
شکل ٦ مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش‌های تجربی مختلف

محاسبه هدایت هیدرولیکی. نتایج حاصل از محاسبه هدایت هیدرولیکی براساس روش‌های تجربی مختلف در شکل‌های (٦) و (۷) نشان داده شده‌است. براساس روش بریر، مقدار هدایت هیدرولیکی نمونه‌ها بین ۰/۰۱۹- تا ۲/۲ سانتی‌متر بر روز به‌دست آمد. رابطه بریر برای نمونه‌هایی با توزیع ناهمگن و دانه‌بندی ضعیف با ضریب یک‌نواختی بین ۱ تا ۲۰ و اندازه مؤثر ۰/٦ تا

۰/۰۶ میلی‌متر بسیار مفید است[12]. در نمونه‌های مورد مطالعه این پژوهش، از یک‌سو مقادیر ضریب یک‌نواختی همه نمونه‌ها بزرگ است و از سوی دیگر قطر مؤثر نمونه‌ها نیز کوچک‌تر از ۰/۰۶میلی‌متر است، بنابراین رابطه بریر برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آن‌ها مناسب نیست. مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌روش گوستافسون، کزنی- کارمن، ترزاقی و اسلیتچر به‌ترتیب بین ۰/۱ تا ۱/٤، ۰/۳۸ تا ٤/۳، ۰/۲ تا ۲/۸، ۰/۱۷ تا ۱/۹ سانتی‌متر بر روز به‌دست‌آمد. دامنه گسترده تغییرات هدایت هیدرولیکی می‌تواند ناشی از گستره تنوع اندازه ذرات نمونه‌ها از گراول تا سیلت باشد. مقادیر بزرگ‌تر هدایت هیدرولیکی مربوط به نمونه‌های با درصد گراول و ماسه بیشتر است و مقادیر کم نیز به نمونه‌هایی با درصد رس بیشتر تعلق دارد. در محیط متخلخل ناهم‌گن، چنین شرایطی می‌تواند موجب گردد که ذرات ریزدانه فضای خالی بین ذرات درشت‌دانه را پرکند و هدایت هیدرولیکی را کاهش دهد. مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌روش گوستافسون، کزنی- کارمن، ترزاقی و اسلیتچر در نمودار جعبه‌ایی ترسیم شده‌است (شکل ۸). به‌دلیل معنی‌دار نبودن مقادیر منفی هدایت هیدرولیکی، در این شکل مقادیر محاسبه شده بر اساس رابطه بریر آورده نشده‌است. هدایت هیدرولیکی محاسبه شده براساس رابطه‌های گوستافسون و اسلیتچر مقادیر کم و بیش مشابهی را حاصل نموده‌است. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده مربوط به رابطه کزنی- کارمن می‌باشد و رابطه ترزاقی نیز مقادیر هدایت هیدرولیکی حد واسطی را نشان می‌دهد. دلیل تفاوت هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده بر اساس این رابطه‌ها، می‌تواند به تفاوت سهم پارامترهای مؤثر در هر رابطه و محدودیت‌های مربوط به ضریب یک‌نواختی و قطر مؤثر ذرات برگردد. برای نمونه، استفاده از رابطه کزنی- کارمن برای ذرات با قطر مؤثر کمتر از ۳ میلی‌متر کاربرد دارد و برای خاک‌های رسی توصیه نمی‌شود[12]. در تمام ۲۰ نمونه مورد بررسی، مقدار قطر مؤثر دانه‌ها، کمتر از ۳ میلی‌متر است و ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها علاوه‌بر رس، مقادیری گراول و ماسه دارند. بنابراین از این رابطه می‌توان برای نمونه‌های با مقدار گراول کم استفاده کرد. رابطه اسلیتچر برای رسوبات با قطر مؤثر بین ۰/۰۱تا ۵ میلی‌متر مناسب است [12,13] و در نتیجه این رابطه برای محاسبه هدایت هیدرولیکی ۹ عدد از نمونه‌ها (که این شرط در آن‌ها رعایت شده) کاربرد دارد. رابطه گوستافسون برای رسوبات با ضریب یک‌نواختی بزرگ‌تر از ۱۵ کاربرد دارد[14] که به‌دلیل دارا بودن این شرط، از این فرمول می‌توان برای محاسبه هدایت هیدرولیکی همه نمونه‌ها استفاده کرد. رابطه ترزاقی برای ماسه‌های درشت‌دانه کاربرد دارد[12]. نمونه‌های موجود اغلب حاوی ماسه در اندازه‌های مختلف هستند و در نتیجه رابطه ترزاقی برای آن‌ها قابل استفاده‌است.



شکل ۷ فراوانی، میانگین و انحراف از معیار مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش‌های: الف) ترزاقی؛ ب) کوزنی-کارمن ؛ ج) اسلیتچر؛ و د) گوستافون



شکل ۸ نمودار جعبه اییمقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش های تجربی مختلف

نتیجه‌گیری

مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از روش تجربی برای ۲۰ نمونه مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ٤/۳ سانتی‌متر بر روز متغیر است که در محدوده مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج مواد ریزدانه می‌باشد. به نقل از تاد و میز (۲۰۰۵) مقادیر هدایت هیدرولیکی برای گراول بین ۱۵۰ تا ٤۵۰ متر بر روز، برای ماسه بین ۲/۵ تا ٤۵ متر بر روز و برای سیلت و رس بین ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۸ متر بر روز است. به نظر می‌رسد که قادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده برای نمونه‌های مورد مطالعه تا حد زیادی کمتر از مقدار واقعی آن باشد، چرا که از ۲۰ نمونه حاصل از حفاری، ۵۰ درصد در گروه گراول ماسه‌ای- گلی، ٤۵ درصد در گروه ماسه گلی- گراولی و ۵ درصد در گروه گراول گلی می‌گنجد. از بین روابط تجربی استفاده شده، بیشترین مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده مربوط به رابطه کزنی- کارمن (بین ۰/۳۸ تا ٤/۳ سانتی‌متر بر روز) و ترزاقی (۰/۲ تا ۲/۸ سانتی‌متر بر روز) بود، بنابراین به نظر می‌رسد که مقادیر به‌دست‌آمده از این دو رابطه بیشتر نزدیک به واقعیت باشد. از سوی دیگر باید به این نکته توجه داشت که با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت استفاده از روابط تجربی، تنها رابطه گستافسون قابل کاربرد برای تخمین هدایت هیدرولیکی همه ۲۰ نمونه مورد مطالعه‌است. مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده از این رابطه بین ۰/۱ تا ۱/٤ سانتی‌متر بر روز می‌باشد که باتوجه به وجود گراول قابل توجه در نمونه‌ها، این مقدار هدایت هیدرولیکی کمتر از مقدار واقعی آن به‌نظر می‌رسد. با توجه به موارد اشاره‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روابط تجربی مختلف برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان‌ها نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد و دامنه گسترده تغییرات هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده به محدودیت‌های موجود برای هریک از روابط برمی‌گردد. بنابراین برای صحت‌سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسباتی، انجام آزمایش پمپاژ و یا اسلگ تست در منطقه پیشنهاد می‌شود.

مراجع

1. Todd, D.K., and Mays, L.W., "Groundwater hydrology", John Wiley and Sons, (2004).
2. Ritzema, H.P., "Drainage principles and applications", Wageningen: ILRI publication. 16 (2006).
3. Fetter, C.W., "Applied hydrogeology", Waveland Press, (2018).
4. Sahu, S., and Saha, D., "Empirical methods and estimation of hydraulic conductivity of fluvial aquifers", *Journal of Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 22, No. 4, pp. 319-340, (2016).
5. Wang, J.P., François, B., and Lambert, P., "Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis, "*Water Resources Research*, Vol. 53, No. 9, pp. 8127-8134, (2017).

6. Arfeen, N., and Ali khan, T., "Evaluation of PSD Models for the Estimation of Hydraulic Conductivity for Different Soil Textural Classes", *International Journal of Engineering Works*, Vol. 7, No. 10, pp. 338-341, (2020).

7. Ishaku, J.M., Gadzama, E.W., and Kaigama, U., "Evaluation of empirical formulae for the determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis", *Journal of geology and mining research*, Vol. 3, No. 4, pp. 105-113. (2011).

8. Hwang, H.T., Jeen, S.W., Suleiman, A.A., and Lee, K.K., "Comparison of saturated hydraulic conductivity estimated by three different methods", *Water*, Vol. 9, No. 12, p. 942. (2017).

9. Aghanabati, A., "Geology of Iran", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. In Persian (2004).

10. Valentine, P.C., "Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains", *Providing a physical framework for ecological research and seabed management*, (No. 2019-5073), US Geological Survey, (2019).

11. Folk, R.L., "Practical Petrographic Classification of Limestones", *AAPG Bulletin*, Vol. 43, No.1, pp. 1–38, (1959).

12. Odong, J., "Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis", *Journal of American Science*, Vol. 3, No. 3, pp. 54-60, (2007).

13. Zhang, S., "Relationship between particle size distribution and porosity in dump leaching (Doctoral dissertation", *University of British Columbia*, (2017).

14. Svensson, A., "Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analyses A comparative study of different sampling and calculation methods focusing on Västlänken, Master's thesis, (2014).

Investigating the Factors Affecting the Severity of Heavy Vehicle Crashes on Rural Roads Using Logit Regression*

Research Article

Iraj Bargegol[1]
Mohammad Rahmaninezhad Asil[2]
Saeed Fatemi[3] Seyed Amir Saadatjoo[4]

1. Introduction

Fatality caused by traffic accidents is a worrying problem for the World Health Organization. According to the statistics of this organization, more than 90% of fatalities caused by traffic accidents occur in developing countries, while 54% of the registered vehicles in the world are located in these countries. Iran is the 18th most populous country in the world, having one of the highest risks of death caused by road accidents in the world, so that traffic accidents cause the fatality rate of 32.1 per 100,000 people in this country. Heavy vehicles play an essential role in any country's economic development, especially developing countries such as Iran; additionally, their accidents have great importance in terms of other road users' safety. According to the Road Maintenance and Transportation Organization of Iran (RMTO), heavy vehicles carry about 89% of goods per ton-kilometer. It is a safe and reliable way of transporting goods that positively impact the country's economy. Accidents of heavy vehicles with light vehicles increase injuries to drivers and passengers of light vehicles. Since Guilan has a free zone and a port with suitable conditions for commerce, heavy vehicles have heavy traffic flows on the rural roads in Guilan province. Unique urban forms, populated rural areas, and agricultural lands in Guilan province cause many motorcycles and pedestrians to cross the rural roads that put themselves in danger of severe traffic crashes. This study aimed to investigate the effective factors influencing the crash severity of heavy vehicles on Guilan province rural roads.

2. The Study Area

The current study was conducted in Guilan province in northern Iran. This province is limited to the Caspian Sea and Azerbaijan from the north, Ardabil province from the west, Zanjan and Qazvin provinces from the south, and Mazandaran province from the east. Guilan has an area of more than 14,000 square kilometers, and its population, according to the official census in 2016, is more than 2.5 million people. Guilan is the tenth most populous province in the country, and its density is 177 people per square kilometer. The province consists of 16 cities and 2615 villages. Due to its geographical conditions and having a water border with the countries of the Caspian Sea, Guilan province has several ports as well as the Anzali Free Trade Zone. This issue causes trade and transportation of goods to be common in this province. Moreover, agriculture is very prosperous in the province due to the favorable weather conditions.

In this study, 3810 records of traffic accidents, including fatal, injury, and property damage only (PDO) collisions on rural roads, had been used registered in the traffic police of Guilan province from 2014 to 2019. Data include crash severity, time, day and season of a crash, road surface conditions, road geometry, road lighting condition, type of vehicle accident, driver age, driver gender, and weather condition. The target variable in this study is different levels of crash severity, initially divided into three categories of injury, fatal, and PDO. Since fatal crashes have a much less contribution than other crashes, fatal crashes are combined with injury crashes, and the target variable is divided into two categories of fatal-injury and PDO crashes.

3. Results

The total number of independent variables was 16; however, to create a logit model, the sub-variables were required to enter the model separately to the effect of sub-variables to be measured on the target variable. Therefore, 38 independent variables were defined for modeling the severity of heavy vehicle crashes using logistic regression. Although, it was not possible to have all of these variables together in the model due to the likely correlation between the independent variables. Three methods can be used to select the best combination of variables: general entry of variables, forward step-wise, and backward step-wise methods. In the general entry of variables' method, since all variables are entered into the equation simultaneously, the model does not have the opportunity to process the data correctly and select the most important variables. Therefore, it cannot be a good method. For this reason, forward and backward step-by-step methods were used to enter the data into the logit equation.

The superior method is a method with more accuracy in predicting the crash severity. The model results show that the crash time in two time periods of 1 to 6 in the morning and 19 to midnight increases the crash severity. The head-on collision is one of the factors influencing the increase in crash severity. In addition, the presence of a curve in the road curvature, familiar drivers, a collision of the motorcycle with heavy vehicles, collision with agricultural vehicles increase the crash severity. In contrast, the spring season, side-swipe collisions, clear

*Manuscript received: 29 November 2021; Revised, 12 January 2022, Accepted, 05 February 2022.
[1]. Corresponding Author.Asisstans Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. **Email**: bargegol@guilan.ac.ir.
[2]. MS.c Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
[3]. Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[4]. Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.

weather, and truck collision with heavy vehicles reduce the severity of injuries in accidents.

4. Conclusion

This study examined the effect of various factors on the crash severity of heavy vehicles on rural roads in Guilan province. The results indicate that accidents are more severe in off-peak hours from 1 to 6 in the morning and from 19 to midnight. One of the main reasons for this issue is the lighter traffic flow of heavy vehicles during the day. In addition, during off-peak hours, the rural roads traffic volume decreases, which speeds up vehicles' movement. The collision angle is one of the effective factors on the crash severity so that head-on collisions increase the severity and side-swipe collisions decrease the crash severity. As it is known, head-on collisions occur on undivided roads. The results show that the crash severity is reduced on roads with a median. This problem can be solved by improving the infrastructure of rural roads in Guilan province. Motorcycles suffer the most damage colliding with heavy vehicles. Motor drivers are more vulnerable than other vehicles. Also, the collision of a truck with a heavy vehicle reduces the crash severity.

Moreover, the results indicate that drivers' familiarity increases the crash severity. Some drivers are familiar with the route and its characteristics, which can negatively affect the driver's speed and attention accuracy. Also, the climate factor is one of the influential factors, as the results indicate that clear weather reduces the crash severity. Higher surface friction of the pavement in dry conditions can be a probable reason leading to better brake performance and, consequently, reduced crash severity. Another reason can be the drivers' better vision in favorable weather conditions.

DOI: 10.22067/jfcei.2022.73927.1093
https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در راه‌های برون‌شهری

مقاله پژوهشی

ایرج برگ‌گل[۱] محمد رحمانی نژاد اصیل[۲] سعید فاطمی[۳] سید امیر سعادتجو[۴]

چکیده *با توجه به رشد جمعیت و افزایش تعداد وسایل نقلیه در راه‌های برون‌شهری، تصادفات رانندگی یکی از مهم‌ترین مشکلات سیستم حمل‌ونقل می‌باشد. وسایل نقلیه سنگین تأثیر زیادی در پیشرفت اقتصادی کشورهای در حال توسعه مانند ایران دارند. وسایل نقلیه سنگین حجم زیادی از کالا را در داخل کشور جابه‌جا می‌کنند. راه‌های برون‌شهری در استان گیلان، به‌دلیل امکان بازرگانی با کشورهای حاشیه دریای خزر و وجود زمین‌های کشاورزی، تردد حجم زیادی از وسایل نقلیه سنگین را تجربه می‌کنند. این پژوهش به بررسی تصادفات وسایل نقلیه سنگین در راه‌های برون‌شهری و بررسی عوامل تأثیرگذار بر شدت تصادفات با استفاده از آزمون‌های آماری کولموگروف اسمیرنوف و آزمون فریدمن و هم‌چنین رگرسیون لاجیت می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد وجود قوس در هندسه راه، برخورد جلوبه‌جلو، تصادفات ساعات غیراوج (یک تا شش صبح) و ساعات اوج عصر (۱۹ تا نیمه‌شب)، بومی‌بودن راننده و برخورد با ماشین‌آلات‌کشاورزی باعث افزایش شدت تصادفات می‌شود. هم‌چنین موتورسواران آسیب‌پذیرترین کاربران راه در برخورد با وسایل نقلیه سنگین هستند. از سوی دیگر، عواملی نظیر وجود میانه‌راه، نوع برخورد بغل‌به‌بغل و آب و هوای صاف باعث کاهش شدت تصادفات می‌شود.*

واژه‌های کلیدی شدت تصادفات، وسایل نقلیه سنگین، راه‌های برون‌شهری، رگرسیون لاجیت.

مقدمه

مرگ و میر ناشی از تصادفات رانندگی یک مسئله نگران‌کننده برای سازمان بهداشت جهانی می‌باشد. براساس آمارهای این سازمان بیش از ۹۰ درصد مرگ و میر های ناشی از تصادفات رانندگی در کشورهای در حال توسعه رخ می‌دهد درحالی‌که ٪۵٤ از وسایل نقلیه ثبت شده در جهان در این کشورها قرار دارد. کشور ایران هجدهمین کشور پرجمعیت جهان می‌باشد که یکی از بالاترین خطرات مرگ ناشی از تصادفات جاده‌ای را در جهان دارد به‌طوری‌که تصادفات رانندگی جان ۳۲/۱ نفر از هر ۱۰۰ هزار نفر را در این کشور می‌گیرد[1,2]. وسایل نقلیه سنگین نقش مهمی در توسعه اقتصادی هر کشور به‌ویژه کشورهای در حال توسعه مانند ایران دارد و هم‌چنین تصادفات آن‌ها از لحاظ ایمنی کاربران راه اهمیت بالایی دارد. به گفته معاونت حمل‌ونقل کشور ایران، وسایل نقلیه سنگین حدود ۸۹ درصد از کالاها برحسب تن کیلومتر را جابه‌جا می‌کنند. براین اساس یک جریان ایمن، قابل اعتماد از حمل کالا باعث تأثیر مثبت بر اقتصاد کشور می‌شود[3]. تصادفات وسایل نقیله سنگین با وسایل نقلیه سبک باعث افزایش جراحت بر رانندگان و سرنشینان وسایل نقلیه سبک می‌شود. استان گیلان به‌علت داشتن شرایط مناسب برای بازرگانی، دارای منطقه آزاد تجاری و بندر می‌باشد، که باعث می‌شود وسایل نقلیه سنگین همراه با بار، در جاده‌های برون‌شهری این استان تردد داشته باشند. راه‌های استان گیلان به علت نوع خاص بافت شهری و وجود روستاها و ده‌های پرتعداد در حاشیه راه‌ها و وجود تفریگاه‌ها و زمین‌های کشاورزی پرتعداد، باعث عبور موتورها و عابران پیاده زیادی از راه و حاشیه آن می‌شود[4,5]. در این پژوهش تلاش شده‌است عوامل مؤثری که باعث افزایش شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در این استان شده‌است را بررسی کند[6].

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۹/۸و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۱/۱۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، گروه مهندسی عمران دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
(۳) دانشجوی دکتری راه و ترابری، گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(٤) دانشجوی دکتری راه و ترابری، گروه مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
Email: bargegol@guilan.ac.ir

پیشینه تحقیق

طی سالیان اخیر در مطالعات مختلفی به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین پرداخته شده‌است. راحیمی و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی شدت تصادفات تک‌وسیله‌ای، وسایل نقلیه سنگین در راه‌های ایران پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد عوامل تأثیرگذار در شدت این نوع تصادفات شامل آموزش راننده، داشتن سیستم ترمز پیشرفته، وجود قوس در راه‌ها و سرعت بالا می‌باشد[۳]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در دو آزادراه کوهستانی پرداختند. در این پژوهش عوامل مرتبط با ویژگی‌های راننده، ویژگی‌های خودرو، هندسه راه و شرایط محیطی مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن نشان می‌دهد عواملی نظیر رانندگان سالمند، تصادف چند وسیله‌ای، عدم استفاده از کمربند ایمنی، بارگذاری بیش از حد مجاز، سرعت غیرمجاز، ترمز و رفتارهای پرخطر، در بخش قوس‌راه، فصول (تابستان، پاییز و زمستان)، در زمان شب و شرایط جوی نامساعد، احتمال آسیب‌دیدگی و تصادفات منجر به مرگ را به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد[7]. چانگ و همکاران[8] در سال ۲۰۱۳، به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در آزادراه‌های کشور تایوان پرداختند. در این پژوهش با استفاده از مدل CART به بررسی رابطه بین شدت تصادف با مشخصات راننده و وسیله نقلیه و هم‌چنین متغیرهای هندسی بزرگراه پرداختند. نتایج نشان می‌دهد نوشیدن مشروبات الکلی، استفاده از کمربند ایمنی، نوع وسیله نقلیه، نوع برخورد، شرایط کمک‌کننده و اقدام راننده/ وسیله نقلیه، تعداد وسایل نقلیه درگیر در تصادف و محل تصادف عوامل اصلی تعیین‌کننده میزان شدت آسیب در تصادفات وسایل نقلیه سنگین بوده‌اند. کاپلان و همکاران[9] در سال ۲۰۱۲، به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات اتوبوس در ایالات متحده امریکا پرداختند. نتایج نشان می‌دهد عواملی که باعث افزایش شدت تصادفات می‌شوند شامل ۱) رانندگان جوان اتوبوس زیر ۲۵ سال، ۲) رانندگان بالای ٦٥ سال، ۳) رانندگان زن، ٤) سرعت بسیار بالا (بیش از ٦٥ مایل در ساعت) و بسیار کم (زیر ۲۰ مایل در ساعت)، ۵) در محل تقاطع‌ها، ٦) رانندگی خطرناک و بی‌توجهی عظیمی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ نیز به بررسی تصادفات واژگونی کامیون‌ها پرداختند. آن‌ها داده‌های تصادفات ایالت فلوریدا بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱٦ را مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن نشان می‌دهد تأثیر شرایط نور و سرعت رانندگی در بین مشاهدات دارای تغییرات قابل‌توجهی است و این تغییر را می‌توان به اقدامات راننده و شرایط راننده در زمان تصادف و هم‌چنین انسداد دید راننده نسبت داد[10]. بهنود و البدایری[11] در سال ۲۰۲۰ به بررسی شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در روزهای کاری و آخر هفته پرداختند. این پژوهش نشان می‌دهد عوامل مؤثر بر شدت تصادف در روزهای کاری و آخر هفته با یکدیگر متفاوت می‌باشد و بهتر است برای بررسی بهتر این دو دسته از یکدیگر جدا شوند اما با این حال عواملی نظیر رانندگان جوان، رانندگان مقصر، تصادف پشت‌به‌پشت، برخورد با شیء ثابت و تصادفات در تقاطع‌ها و زمان تصادف بر شدت آسیب هر دو مدل تأثیر دارند.

روش تحقیق

آزمون کولموگروف اسمیرنوف. یکی از اصلی‌ترین ملاک‌ها برای انتخاب نوع آزمون، براساس نرمال و یا غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها، انجام آزمون کلموگروف-اسمیرنوف می‌باشد. انجام این آزمون برای تعیین استفاده از آزمون های آماری پارامتریک یا آزمون های ناپارامتریک می‌باشد. میزان تقریبی معنی‌داری آزمون پس از انجام آزمون در بخش خروجی نمایان می‌شود در این آزمون دو فرض وجود دارد[12]:

H_0 : داده ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند.

H_1: داده ها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند.

برای اثبات این فرضیه‌ها از مقایسه میزان معناداری و α استفاده می‌شود. میزان α برابر با ۰,۰۱ می‌باشد، اگر میزان p-value< 0.05 باشد فرض صفر رد شده و داده‌ها غیر نرمال می‌باشند و در غیر این صورت فرض صفر که نرمال بودن داده‌ها است، اثبات می‌شود.

آزمون فریدمن. آزمون فریدمن از مجموعه آزمون‌های آماری می‌باشد که برای مقایسه چند گروه به‌کاربرده می‌شود و ازنظر میانگین رتبه‌های گروه‌ها را مشخص می‌کند که آیا گروه‌های مدنظر می‌توانند از یک جامعه باشند و یا نه؟ مقیاس در این آزمون باید حداقل رتبه‌ای باشد. آزمون فریدمن آزمون متناظر غیر پارامتری آزمون F می‌باشد چرا که در آزمون F باید واریانس‌ها همگن باشند که این امر در مقیاس‌های رتبه‌ای کمتر رعایت می‌شود و لذا در مقیاس‌های رتبه‌ای به‌جای F کاربرد دارد و جایگزین آن می‌شود. آزمون فریدمن برای تجزیه واریانس

دوطرفه (برای داده‌های ناپارامتری) به‌صورت رتبه‌بندی استفاده می‌شود و هم‌چنین برای مقایسه میانگین رتبه‌بندی گروه‌های مختلف کاربرد دارد[13,14].

رگرسیون لاجیت. پیش‌بینی وقوع تصادف منجر به جرح یا فوت را می‌تواند به‌صورت یک رخداد دوتایی تعریف کرد. مدل‌های لاجیت یکی از روش‌های پیش‌بینی رخدادهای گسسته (دراین‌جا وقوع یا عدم وقوع تصادف منجر به جرح یا فوت) است. در این مدل، متغیر وابسته به‌صورت ارائه‌شده در رابطه زیر فرمول‌بندی می‌شود[15].

$$g(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_j x_j + \cdots + \beta_p x_p \qquad (۱)$$

که در آن x_j = مقدار متناظر با j امین متغیر وابسته است. β_j = ضریب متناظر با متغیر j ام به ازای j = 1,2,3,…,p است و p شمار تمامی متغیرهای مستقل است. با وجود این متغیرها، احتمال انتخاب x به‌صورت رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\pi(x) = \frac{\exp\big(g(x)\big)}{1 + \exp\big(g(x)\big)} \qquad (۲)$$

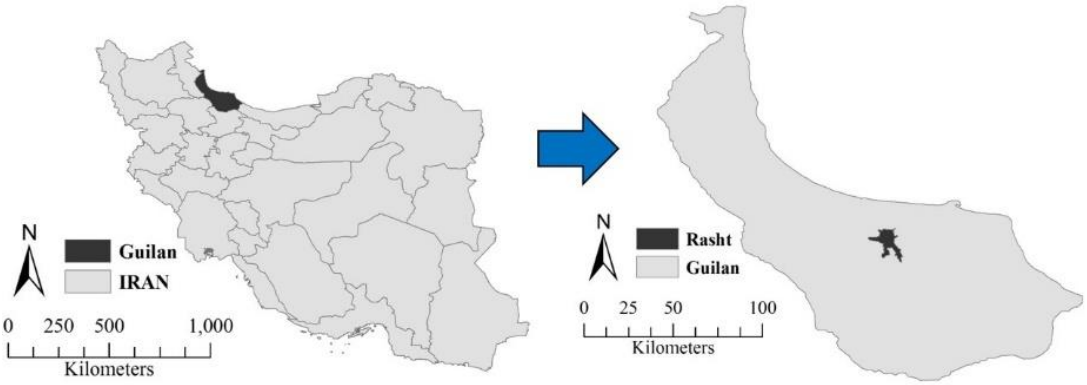
که در آن $\pi(x)$ معرف احتمال انتخاب گزینه ۱ به‌ازای بردار متغیر مستقل (x) است[16].

منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در استان گیلان در شمال ایران انجام شده‌است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی استان گیلان و مرکز آن، شهر رشت، را نشان می‌دهد. این استان از شمال به دریای خزر و آذربایجان، از غرب به استان اردبیل، از جنوب به استان زنجان و قزوین و از شرق به استان مازندران محدود شده‌است. گیلان دارای مساحت بیش از ۱٤ هزار کیلومتر مربع است و جمعیت آن طبق سرشماری رسمی در سال ۱۳۹۵، بیش از ۲/۵ میلیون نفر است[6]. گیلان دهمین استان پرجمعیت کشور است و تراکم آن ۱۷۷ نفر در هر کیلومتر مربع اعلام شده‌است. این استان از ۱٦ شهر و ۲٦۱۵ روستا تشکیل شده‌است[17]. استان گیلان به‌دلیل شرایط جغرافیایی و داشتن مرز آبی با کشورهای حوزه دریای خزر، دارای بنادر متعدد و هم‌چنین منطقه آزاد تجاری انزلی است. که این امر سبب می‌شود بازرگانی و حمل‌ونقل کالا در این استان رواج داشته باشد. هم‌چنین در استان گیلان به‌دلیل داشتن شرایط مساعد آب‌وهوایی، کشاورزی رونق فراوان دارد[18,19].

داده‌ها

در این پژوهش از ۳۸۱۰ مورد تصادفات رانندگی منجر به فوت، جراحت و خسارت در راه‌های برون شهری ثبت شده در پلیس راه استان گیلان از ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ استفاده شده‌است. داده شامل شدت تصادف، زمان تصادف، روز تصادف، فصل تصادف، شرایط سطح جاده، وضعیت هندسه محل تصادف، وضعیت روشنایی جاده، نوع تصادف وسیله‌نقلیه، سن راننده، جنسیت راننده و وضعیت آب‌وهوا است. متغیر هدف در این مطالعه، سطوح مختلف شدت تصادفات است که در ابتدا به سه دسته جرحی، فوتی و خسارتی تقسیم شد. از آن‌جا که تصادفات فوتی نسبت‌به سایر تصادفات سهم بسیار کمتری دارد، لذا تصادفات فوتی با تصادفات جرحی ترکیب شده و متغیر هدف به دو دسته تصادفات جرحی- فوتی و خسارتی تقسیم‌بندی شده‌است.



شکل ۱ فراوانی متغیرهای مستقل براساس شدت تصادف

جدول ۱ فراوانی متغیر های مستقل براساس شدت تصادف

متغیر	دسته‌بندی	شدت		مجموع
		خسارتی	جرحی و فوتی	
روزهای هفته	شنبه	۳۱۸	۲۸۰	۵۹۸
	یک‌شنبه	۲۸۵	۲۴۱	۵۲۶
	دوشنبه	۳۲۳	۲۳۸	۵۶۱
	سه‌شنبه	۲۷۰	۲۰۸	۴۷۸
	چهارشنبه	۳۳۵	۲۶۴	۵۹۹
	پنج‌شنبه	۳۲۶	۲۵۸	۵۸۴
	جمعه	۲۳۸	۲۲۵	۴۶۳
فصل	بهار	۵۹۱	۴۳۲	۱۰۲۳
	تابستان	۵۵۴	۵۳۸	۱۰۹۲
	پاییز	۴۵۹	۳۵۱	۸۱۰
	زمستان	۴۹۱	۳۹۳	۸۸۴
سال	۱۳۹۳	۳۵۰	۲۲۰	۵۷۰
	۱۳۹۴	۲۹۴	۲۰۵	۴۹۹
	۱۳۹۵	۳۷۲	۳۱۲	۶۸۴
	۱۳۹۶	۳۶۵	۳۲۶	۶۹۱
	۱۳۹۷	۲۷۸	۴۴۸	۷۲۶
	۱۳۹۸	۴۳۶	۲۰۳	۶۳۹
جداکننده وسط	دارد	۹۷۰	۵۴۴	۱۵۱۴
	ندارد	۱۱۲۵	۱۱۷۰	۲۲۹۵
زاویه برخورد	جلو به جلو	۲۷۶	۳۷۰	۶۴۶
	جلو به عقب	۷۴۴	۵۳۹	۱۲۸۳
	بغل به بغل	۴۳۷	۲۲۴	۶۶۱
	سایر	۶۳۸	۵۸۱	۱۲۱۹
وضعیت روسازی	خشک	۱۷۳۳	۱۴۰۴	۳۱۳۷
	خیس	۳۶۲	۳۱۰	۶۷۲
وضعیت آب‌وهوا	ابری	۲۴۴	۲۴۹	۴۹۳
	صاف	۱۴۴۱	۱۱۰۷	۲۵۴۸
	بارانی	۳۸۶	۳۴۶	۷۳۲
	برفی	۲۴	۱۲	۳۶

متغیر	دسته‌بندی	شدت		مجموع
		خسارتی	جرحی و فوتی	
هندسه راه	مستقیم	۱۸۱۸	۱۴۲۵	۳۲۴۳
	قوس افقی	۱۳۴	۲۰۳	۳۳۷
	قوس قائم	۸۰	۳۱	۱۱۱
	قوس افقی و قائم	۶۳	۵۵	۱۱۸
روشنایی	روز	۱۳۷۸	۹۸۵	۲۳۶۳
	شب بدون روشنایی	۳۳۰	۳۷۷	۷۰۷
	شب با روشنایی	۳۸۷	۳۵۲	۷۳۹
راننده	بومی	۱۲۷۷	۱۲۰۰	۲۴۷۷
	غیربومی	۸۱۸	۵۱۴	۱۳۳۲
راننده وسیله نقلیه سنگین	بومی	۱۱۴۱	۱۱۴۱	۲۲۸۲
	غیربومی	۹۵۴	۵۷۳	۱۵۲۷
نوع وسیله	سواری	۱۵۸۲	۱۱۲۲	۲۷۰۴
	اتوبوس	۱۱	۷	۱۸
	موتور	۳۱	۳۳۵	۳۶۶
	پیکاپ	۲۰۴	۱۳۵	۳۳۹
	تریلی	۲۶۷	۱۱۵	۳۸۲
سن راننده	زیر ۳۰ سال	۵۷۴	۵۹۱	۱۱۶۵
	بین ۳۱ تا ۵۵ سال	۱۳۳۰	۹۴۶	۲۲۷۶
	بالای ۵۶ سال	۱۹۱	۱۷۷	۳۶۸
جنسیت راننده	مرد	۱۹۷۰	۱۶۳۱	۳۶۰۱
	زن	۱۲۵	۸۳	۲۰۸
نوع وسیله نقلیه سنگین	ماشین آلات کشاورزی	۴۲	۲۱۷	۲۵۹
	اتوبوس	۲۱۰	۱۶۹	۳۷۹
	تریلی	۱۸۴۳	۱۳۲۸	۳۱۷۱
راننده وسیله نقلیه سنگین	زیر ۳۰ سال	۲۸۲	۲۴۹	۵۳۱
	بین ۳۱ تا ۵۵ سال	۱۶۳۱	۱۲۹۵	۲۹۲۶
	بالای ۵۶ سال	۱۸۲	۱۷۰	۳۵۲

نتایج

در ابتدا با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف، پارامتریک یا ناپارامتریک بودن داده‌ها شناسایی شده‌است. سپس برای تعیین اولویت عوامل از آزمون فریدمن استفاده شد. برای تعیین تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته (شدت تصادفات) از

مدل لاجیت استفاده شد و براساس آن متغیر های تأثیرگذار بر شدت تصادفات دو وسیله‌ای، وسایل نقلیه سنگین شناسایی شد.

نتایج آزمون کولموگروف اسمیرنوف. برای ارزیابی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف استفاده شده‌است. جدول (۲) نتایج این آزمون برای هر متغیر مستقل را نشان می‌دهد. با توجه به سطح معناداری که در آزمون کولموگروف- اسمیرنوف (با توجه به sig)، ۰/۰۱ می باشد. فرض H_0 که نرمال بودن توزیع متغیرها می‌باشد، رد می‌شود و فرض H_1 پذیرفته می‌شود. با توجه به نتایج این آزمون، همه متغیرهای مورد بررسی از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند و باید از آزمون های ناپارامتریک استفاده شود.

نتایج آزمون فریدمن. در این پژوهش ۱۶ متغیر مستقل وجود دارد که با استفاده از آزمون فریدمن رتبه‌بندی شده‌اند. جدول (۳) مشخصات کلی این آزمون شامل تعداد نمونه، مجذور کای، درجه آزادی و سطح معناداری را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ می باشد که نشان‌دهنده مستقل بودن رتبه میانگین این متغیر ها از یکدیگر می‌باشد. جدول (٤) رتبه‌بندی متغیرهای مستقل براساس میانگین رتبه آن‌ها می‌باشد به‌طوری که هر چه میانگین رتبه یک متغیر عدد کوچک‌تری باشد آن متغیر از اهمیت بالاتری برخوردار است. با توجه به جدول (٤) سه متغیر جنسیت راننده، وضعیت روسازی و هندسه راه با اهمیت‌ترین متغیرها می‌باشند و هم‌چنین سه متغیر روزهای هفته، نوع وسیله نقلیه سنگین و ساعت تصادف دارای بیشترین رتبه میانگین بوده‌اند و از اهمیت کمتری برخوردار هستند.

نتایج رگرسیون لاجیت. برای مدل‌سازی لاجیت شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین، ۳۸ متغیر مستقل تعریف و سپس مدل‌سازی شد. لازم به ذکر است که تعداد کل متغیرهای مستقل در این تحقیق ١٦ متغیر بوده‌است، اما برای ایجاد مدل لاجیت لازم بود که متغیرهای فرعی به‌صورت جداگانه وارد مدل شوند تا تأثیر هر یک از زیر متغیرها روی متغیر هدف اندازه‌گیری شود. بنابراین تعداد متغیرهای ورودی به مدل به ۳۸ عدد رسید. گرچه، به‌علت هم‌سویی احتمالی بین متغیرهای مستقل، امکان حضور توأم تمامی این متغیرها با هم در مدل وجود نداشت[4,5].

جدول ۲ نتایج آزمون کولموگروف اسمیرنوف

متغیرها	Normal Parameters	Std. Deviation	Most Extreme Differences			Test Statistic	Sig.
	Mean		Absolute	Positive	Negative		
روزهای هفته	۳/۹۳	۱/۹۹۳	۰/۱۳۶	۰/۱۲۹	-۰/۱۳۶	۰/۱۳۶	۰/۰۰۰
فصل	۲/۴۱	۱/۱۱۵	۰/۱۹۸	۰/۱۹۸	-۰/۱۵۵	۰/۱۹۸	۰/۰۰۰
جداکننده وسط	۱/۶	۰/۴۸۹	۰/۳۹۴	۰/۲۸۸	-۰/۳۹۴	۰/۳۹۴	۰/۰۰۰
زاویه برخورد	۲/۵۰	۰/۹۶۸	۰/۲۰۳	۰/۲۰۳	-۰/۱۹۲	۰/۲۰۳	۰/۰۰۰
وضعیت روسازی	۱/۱۸	۰/۳۸۱	۰/۵۰۲	۰/۵۰۲	-۰/۳۲۲	۰/۵۰۲	۰/۰۰۰
وضعیت آب و هوا	۲/۰۸	۰/۵۹۴	۰/۳۵۳	۰/۳۵۳	-۰/۳۱۶	۰/۳۵۳	۰/۰۰۰
هندسه راه	۱/۲۴	۰/۶۵۳	۰/۴۹۵	۰/۴۹۵	-۰/۳۵۷	۰/۴۹۵	۰/۰۰۰
وضعیت روشنایی	۱/۵۷	۰/۷۹۵	۰/۳۸۵	۰/۳۸۵	-۰/۲۳۵	۰/۳۸۵	۰/۰۰۰
راننده بومی	۱/۳۵	۰/۴۷۷	۰/۴۱۹	۰/۴۱۹	-۰/۲۶۳	۰/۴۱۹	۰/۰۰۰
راننده وسیله نقلیه سنگین، بومی	۱/۴۰	۰/۴۹۰	۰/۳۹۲	۰/۳۹۲	-۰/۲۹۰	۰/۳۹۲	۰/۰۰۰
نوع وسیله	۱/۸۷	۱/۴۳۱	۰/۴۳۷	۰/۴۳۷	-۰/۲۷۳	۰/۴۳۷	۰/۰۰۰
سن راننده	۳۸/۲۰	۱۲/۰۸۷	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	-۰/۰۴۹	۰/۰۸۹	۰/۰۰۰
جنسیت	۱/۰۵	۰/۲۲۷	۰/۵۴۰	۰/۵۴۰	-۰/۴۰۵	۰/۵۴۰	۰/۰۰۰
نوع وسیله نقلیه سنگین	۲/۷۶	۰/۵۶۲	۰/۴۹۵	۰/۳۳۸	-۰/۴۹۵	۰/۴۹۵	۰/۰۰۰
سن راننده وسیله نقلیه سنگین	۴۱/۳۴	۱۰/۱۳۳	۰/۰۸۰	۰/۰۸۰	-۰/۰۴۹	۰/۰۸۰	۰/۰۰۰

جدول۳ نتایج کلی آزمون فریدمن

تعداد نمونه	مجذور کای	درجه آزادی	سطح معناداری
۳۸۰۹	۲٤۳۷٦/٤٤	۱۵	۰/۰۰۰

جدول٤ رتبه میانگین برای‌های متغیر در آزمون فریدمن

رتبه	متغیر	میانگین رتبه
۱	جنسیت راننده	۳/۹۸
۲	وضعیت روسازی	٤/٤۹
۳	هندسه راه	٤/٦٦
٤	بومی‌بودن راننده	۵/٤۲
۵	بومی‌بودن راننده وسیله نقلیه سنگین	۵/٦٦
٦	وضعیت روشنایی راه	٦/۱
۷	نوع وسیله نقلیه	٦/۳
۸	جداکننده وسط	٦/٦۹
۹	وضعیت آب‌وهوا	۸/٦۵
۱۰	فصل	۸/۹٤
۱۱	زاویه برخورد	۹/٤۸
۱۲	نوع وسیله نقلیه سنگین	۱۰/٦۳
۱۳	روزهای هفته	۱۱/۰۸
۱٤	سن راننده	۱۵/٤
۱۵	سن راننده وسیله نقلیه سنگین	۱۵/٦

برای انتخاب بهترین ترکیب متغیر می‌توان از سه روش: ورود کلی متغیرها(Enter)، روش گام‌به‌گام جلو(Forward stepwise) و روش گام‌به‌گام عقب(Backward stepwise) استفاده کرد[15]. در روش ورود کلی متغیرها، از آن‌جایی که همه متغیرها به‌طور هم‌زمان وارد معادله می‌شوند، مدل فرصت پردازش صحیح داده‌ها و انتخاب مهم‌ترین متغیرها را ندارد. بنابراین نمی‌تواند روش مناسبی باشد. به همین دلیل از روش‌های گام‌به‌گام جلو و عقب برای واردکردن داده‌ها در معادله لاجیت استفاده شد. هر روشی که در پیش‌بینی شدت حوادث دقت بیشتری داشته باشد به‌عنوان روش برتر شناخته می‌شود. جدول (۵) خلاصه‌ای از مدل‌های دو روش (گام‌به‌گام به عقب و به جلو) را ارائه می‌دهد که شامل دو معیار برای درصد صحیح و نیکویی برازش (R2) مدل است.

با توجه به نتایج جدول (۵) روش گام‌به‌گام جلو انتخاب می‌شود زیرا میزان درصد صحیح و نیکویی برازش بالاتری دارد. جدول (٦) نتایج نهایی مدل لاجیت می‌باشد که ۱۲ متغیر معنادار که بهترین عملکرد را دارند انتخاب شده‌اند و اثرات هر متغیر که شامل مقدار B (میزان تغییرات لگاریتم نسبت شانس)، S.E خطای استاندارد، Wald نتایج آزمون والد، sig سطح معناداری و Exp(B) نسبت شانس را نشان می‌دهد.

جدول۵ مشخصات روش ورود اطلاعات

روش‌ها	درصد صحیح	نیکویی برازش (R2)
روش گام‌به‌گام جلو	٦۸/٤	۰/۲۳۵
روش گام‌به‌گام عقب	٦۸/۱	۰/۲۳۲

جدول ٦ نتایج رگرسیون لاجیت

متغیرها	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
زمان ۱ تا ٦ صبح	۰/۵۵۱	۰/۱۲٦	۱۹/۰۹٦	۱	۰/۰۰۰	۱/۷۳٦
زمان ۱۹ تا ۰ (نیمه‌شب)	۰/۳۰۳	-۰/۲٦۹	۱۲/۹۲۸	۱	۰/۰۰۰	۱/۳۵٤
بهار	-۰/۲٦۹	۰/۰۸۲	۱۰/٦۱٤	۱	۰/۰۰۱	۰/۷٦٤
جداکننده وسط	-۰/٤۰۹	۰/۰۷۷	۲۸/٤۵۵	۱	۰/۰۰۰	۰/٦٦٤
برخورد جلوبه‌جلو	۰/٤۸۱	۰/۰۹۸	۲٤/۳۵۱	۱	۰/۰۰۰	۱/٦۱۸
برخورد بغل‌به‌بغل	-۰/٤٦۸	۰/۱۰۱	۲۱/٦۱۳	۱	۰/۰۰۰	۰/٦۲٦
آب و هوای صاف	-۰/۲۳۳	۰/۰۷٦	۹/٤٤٦	۱	۰/۰۰۲	۰/۷۹۳
قوس در هندسه راه	۰/۲۸۷	۰/۱۰۲	۷/۹٦۲	۱	۰/۰۰۵	۱/۳۳۳
بومی بودن راننده	۰/۱۸۹	۰/۰۷٦	٦/۲٦٤	۱	۰/۰۱۲	۱/۲۰۸
وسیله نقلیه- موتور	۲/٦۹٤	۰/۱۹٦	۱۸۹/۷۷۱	۱	۰/۰۰۰	۱٤/۷۹۱
وسیله نقلیه- تریلی	-۰/۵۲۱	۰/۱۲۳	۱۷/۹۵۲	۱	۰/۰۰۰	۰/۵۹٤
وسیله نقلیه سنگین- ماشین‌آلات کشاورزی	۱/٦٦۲	۰/۱۸۳	۸۲/٤٦۸	۱	۰/۰۰۰	۵/۲۷۰
عدد ثابت	-۰/۳۵۸	۰/۰۹۹	۱۳/۱۰٦	۱	۰/۰۰۰	۰/٦۹۹

جدول ۷ طبقه بندی درصد پیش‌بینی مدل

مشاهده شده		پیش‌بینی مدل		
		شدت تصادف		درصد صحیح
		خسارتی	جرحی و فوتی	
شدت تصادف	خسارتی	۱۸۲۱	۲۷٤	۸٦/۹
	جرحی و فوتی	۹۳۱	۷۸۳	٤٥/۷
درصد کل		٦۸/٤		

نتایج مدل نشان می‌دهد، زمان تصادف در دو بازه زمانی ۱ تا ٦ صبح و ۱۹ تا نیمه‌شب باعث افزایش شدت تصادف می‌شود. تصادفات با زاویه برخورد جلوبه‌جلو نیز یکی از عوامل تأثیرگذار بر افزایش شدت تصادفات می‌باشد و هم‌چنین قوس در هندسه راه، بومی‌بودن راننده، برخورد موتور با وسایل نقلیه سنگین، برخورد با ماشین‌آلات کشاورزی باعث افزایش سطح شدت تصادفات می‌شود. در مقابل فصل بهار، برخورد بغل‌به‌بغل، آب‌وهوای صاف و برخورد تریلی با وسایل نقلیه سنگین عواملی هستند که باعث کاهش شدت جراحات در تصادفات می‌شوند. در جدول (۷) میزان دقت مدل در پیش‌بینی شدّت تصادفات مورد استفاده در طراحی مدل محاسبه شده‌است. این مدل ۸٦/۹ درصد تصادفات خسارتی و ٤٥/۷ درصد تصادفات فوتی را درست پیش‌بینی می‌کند و دارای دقت کلی ٦۸/٤ درصد می‌باشد.

بحث و بررسی نتایج

مطالعه حاضر به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در راه‌های برون‌شهری استان گیلان پرداخته‌است. نتایج نشان می‌دهد تصادفات در ساعات غیر اوج ۱ تا ٦ صبح و ساعات ۱۹ تا نیمه‌شب از شدت بیشتری برخوردارند یکی از دلایل اصلی این امر محدودیت تردد وسایل نقلیه سنگین باری در طول روز می‌باشد[19]، هم‌چنین در ساعات غیراوج، حجم ترافیک عبوری در راه‌های برون‌شهری کاهش می‌یابد و این امر باعث می‌شود سرعت حرکت وسایل نقلیه افزایش یابد[۲۰]. زاویه برخورد یکی از علل تأثیرگذار بر شدت تصادفات می‌باشد به‌طوری که تصادفات جلوبه‌جلو باعث افزایش شدت و تصادفات بغل‌به‌بغل باعث کاهش شدت برخورد می‌شود. تصادفات جلوبه‌جلو به‌طور حتم در راه‌های بدون جداکننده وسط رخ می‌دهد که نتایج نشان می‌دهد در راه‌هایی که جداکننده وسط وجود دارد شدت تصادفات کاهش می‌یابد[21]، این عامل می‌تواند با بهبود زیرساخت‌های راه‌های برون‌شهری استان گیلان رفع شود[22]. موتور وسیله نقلیه‌ای می‌باشد که بیشترین آسیب را در برخورد با وسایل نقلیه سنگین متحمل می‌شود دلیل این امر آسیب‌پذیر بودن رانندگان موتور نسبت‌به سایر وسایل نقلیه می‌باشد به‌طوری‌که برخورد تریلی با وسایل نقلیه سنگین باعث کاهش شدت تصادفات می‌شود[۲۳]. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد، بومی‌بودن راننده عاملی تأثیرگذار بر شدت تصادفات است و باعث افزایش شدت برخورد می‌شود، زیرا رانندگان بومی به مسیر آشنا بوده‌اند و این عامل می‌تواند بر سرعت و دقت راننده تأثیر منفی داشته باشد[24]. عامل آب و هوا نیز یکی از عوامل تأثیرگذار است، به‌طوری‌که نتایج نشان می‌دهد آب‌وهوای صاف باعث کاهش شدت تصادفات می‌شود. یک دلیل احتمالی برای این موضوع می‌تواند بالاتر بودن اصطکاک سطحی روسازی در شرایط خشک باشد که منجر به عملکرد بهتر ترمزها و در نتیجه کاهش شدت برخورد می‌گردد. دلیل دیگر هم می‌تواند متوجه دید بهتر راننده در شرایط جوی مساعد باشد.

مراجع

1. Hosseinian, S.M. and Gilani, V.N.M., "Analysis of factors affecting urban road accidents in Rasht metropolis", *Eng Transactions*, Vol. 1, pp. 1-4. (2020).
2. Hosseinian, S.M., Najafi Moghaddam Gilani, V., Mirbaha, B. and Abdi Kordani, A., "Statistical analysis for study of

the effect of dark clothing color of female pedestrians on the severity of accident using machine learning methods", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2021, pp. 1-21. (2021).

3. Rahimi, E., Shamshiripour, A., Samimi, A. and Mohammadian, A.K., "Investigating the injury severity of single-vehicle truck crashes in a developing country", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 137, pp. 105444. (2020).
4. Effati, M. and Saheli, M.V., "Examining the influence of rural land uses and accessibility-related factors to estimate pedestrian safety: The use of GIS and machine learning techniques", *International journal of transportation science and technology*, Vol. 11, pp. 144-157. (2022).
5. Vahedi Saheli, M. and Effati, M., "Segment-based count regression geospatial modeling of the effect of roadside land uses on pedestrian crash frequency in rural roads", *International journal of intelligent transportation systems research*, Vol. 19, pp. 347-365. (2021).
6. Saheli, M.V. and Effati, M., "Examining the impact of land-use related factors on rural traffic collisions", *Journal of Injury and Violence Research*, Vol. 11, (2019).
7. Wang, Y., Luo, Y. and Chen, F., "Interpreting risk factors for truck crash severity on mountainous freeways in Jiangxi and Shaanxi, China", *European transport research review*, Vol. 11, pp. 1-11. (2019).
8. Chang, L.-Y. and Chien, J.-T., "Analysis of driver injury severity in truck-involved accidents using a non-parametric classification tree model", *Safety science*, Vol. 51, pp. 17-22. (2013).
9. Kaplan, S. and Prato, C.G., "Risk factors associated with bus accident severity in the United States: A generalized ordered logit model", *Journal of safety research*, Vol. 43, pp. 171-180. (2012).
10. Azimi, G., Rahimi, A., Asgari, H. and Jin, X., "Severity analysis for large truck rollover crashes using a random parameter ordered logit model", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 135, pp. 105355. (2020).
11. Behnood, A. and Al-Bdairi, N.S.S., "Determinant of injury severities in large truck crashes: A weekly instability analysis", *Safety science*, Vol. 131, pp. 104911. (2020).
12. Ruxton, G.D., Wilkinson, D.M. and Neuhäuser, M., "Advice on testing the null hypothesis that a sample is drawn from a normal distribution", *Animal Behaviour*, Vol. 107, pp. 249-252. (2015).
13. Eisinga, R., Heskes, T., Pelzer, B. and Te Grotenhuis, M., "Exact p-values for pairwise comparison of Friedman rank sums, with application to comparing classifiers", *BMC bioinformatics*, Vol. 18, pp. 1-18. (2017).
14. Kamboozia, N., Ameri, M. and Hosseinian, S.M., "Statistical analysis and accident prediction models leading to pedestrian injuries and deaths on rural roads in Iran", *International journal of injury control and safety promotion*, Vol. 27, pp. 493-509. (2020).
15. Najafi Moghaddam Gilani, V., Hosseinian, S.M., Ghasedi, M. and Nikookar, M., "Data-driven urban traffic accident analysis and prediction using logit and machine learning-based pattern recognition models", *Mathematical problems in engineering*, Vol. 2021, (2021).
16. Ghasedi, M., Sarfjoo, M. and Bargegol, I., "Prediction and analysis of the severity and number of suburban accidents using logit model, factor analysis and machine learning: a case study in a developing country", *SN Applied Sciences*, Vol. 3, pp. 1-16. (2021).

17. Saheli, M.V. and Effati, M., "Investigation of factors contributing to pedestrian crash severity in rural roads", *Journal of Injury and Violence Research*, Vol. 11, (2019).
18. Bargegol, I., Gilani, V.N.M., Ghasedi, M. and Ghorbanzadeh, M., "Delay modeling of un-signalized roundabouts using neural network and regression", *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, Vol. 2, pp. 28-34. (2016).
19. Effati, M., Behbahani, H., Mortezaei, S. and Vahedi Saheli, M., "Modelling and analyzing the severity of two-lane highway crashes using the spatial data mining, case study: old corridor of Qazvin-Loshan", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 51.4, pp. 81-95. (2020).
20. Gilani, V.N.M., Sashurpour, M., Hassanjani, S. and Hosseinian, S.M., "Analysis of the Effect of the Speed Factor on Highway Safety Using the Machine Learning Method", *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 29, pp. 19-28. (2021).
21. Abolfazlzadeh, M., Asil, M.R., Mohammadi, Z. and Ghanbari, M.R., "Accident Hotspot Detection of Exclusive Bus Transit Lanes (Case Study: City of Rasht)", *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, Vol. 8, pp. 1-4. (2022).
22. Asil, M.R. and Bargegol, I., "Investigating the Factors Affecting the Severity of Single-Vehicle Crashes on Urban Roads using Bayesian Binary Probit Regression", *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, Vol. 8, pp. 1-6. (2022).
23. Asil, M.R., Toroghi, H. and Bargegol, I., "Analysis of Factors Associated with Traffic Injury Severity on Urban Roads in Different Lighting Conditions", *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, Vol. 8, pp. 1-6. (2022).
24. Saheli, M.V., "Understanding the Factors Affecting Urban Vehicle-to-Vehicle Crash Severity with Focus on Drivers' Route Familiarity", *Environmental Engineering*, Vol. 8, pp. 1-7. (2022).

CONTENTS

The Effect of Different Chemical Quality Pore Fluids on the Relationship between Suction and Swelling Characteristics of an	Sohrab Khezrian - Ali Raeesi Estabragh Mohadeseh Amini - Jamal Abdollahi Ali Beik	1
Investigating the Relationship between Geometric Properties of Vehicles and Traffic Density	Hassan Khaksar - Hosein Baharzadeh Elham Ashrafy	19
Investigating the Most Important Geomechanical Parameter of Unsaturated Soils using Different Artificial Intelligence Methods	Hadi Fattahi - Fateme Jiryaee	35
Risk Assessment of the Shatt Al-Arab Overflow in Basra	Hossein Etemadfard - Nemah Aldirawi Hamed Kharaghani	49
Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution	Maryam Jamali Dizaji - Morteza Mozafari Elham Fijani - Roya Eskandari	63
Investigating the Factors Affecting the Severity of Heavy Vehicle Crashes on Rural Roads Using Logit Regression	Iraj Bargegol Mohammad Rahmaninezhad Asil Saeed Fatemi Seyed Amir Saadatjoo	75

JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD

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

Text Editor: Yousef Bina
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; Fax: +98 51 38807384; Email: ejour@um.ac.ir
Web site: http://civil-ferdowsi.um.ac.ir

نشریه مهندسی عمران فردوسی

سال ۳۵، شماره ۲، ۱۴۰۱

شماره پیاپی ۳۸

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Serial No. 38

ISSN 2783-2805

The Effect of Different Chemical Quality Pore Fluids on the Relationship between Suction and Swelling Characteristics of an 1
Sohrab Khezrian - Ali Raeesi Estabragh
Mohadeseh Amini - Jamal Abdollahi
Ali Beik

Investigating the Relationship between Geometric Properties of Vehicles and Traffic Density 19
Hassan Khaksar - Hosein Baharzadeh
Elham Ashrafy

Investigating the Most Important Geomechanical Parameter of Unsaturated Soils using Different Artificial Intelligence Methods 35
Hadi Fattahi - Fateme Jiryaee

Risk Assessment of the Shatt Al-Arab Overflow in Basra 49
Hossein Etemadfard - Nemah Aldirawi
Hamed Kharaghani

Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution 63
Maryam Jamali Dizaji - Morteza Mozafari Elham Fijani
Roya Eskandari

Investigating the Factors Affecting the Severity of Heavy Vehicle Crashes on Rural Roads Using Logit Regression 75
Iraj Bargegol - Mohammad Rahmaninezhad Asil
Saeed Fatemi - Seyed Amir Saadatjoo

Vol. 35, No. 2
Summer, 2022