Journal of Geography and Planning

Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078

Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

# The Influence of the Evolution Pattern of the Alluvial Fans North of Kermanshah City on Foundation Settlement Potential

**Iraj Jabbari[1]✉, Sudabeh Moradi[2], Kazem Bahrami[3]**

1. Corresponding Author, a: Department of Geography, Faculty of literature and human sciences, Razi University, Kermanshah, Iran
   b: Department of Geography and Environmental Sustainability, Environmental Research Center, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: iraj.jabbari@razi.ac.ir
2. MSc. Student, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: sodabem1995@gmail.com
3. PhD in geology, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: Bahrami.kazem@gmail.com

## Article Info

**Article type:**

Research Article

**Article history:**

Received: 14 November 2024

Revised: 1 January 2026

Accepted: 6 February 2026

Published: 15 March 2026

**Keywords**:

foundation settlement,
alluvial fan,
engineering geomorphology,
sensitivity analysis,
geomorphological hazards,
Kermanshah.

## ABSTRACT

Economic considerations and sustainable urban development require accurate identification of the geotechnical properties of soils before any construction. Alluvial fans exhibit highly variable geotechnical characteristics due to historical changes in sedimentation conditions and lateral and vertical variations in sediment types, creating complexities in the assessment of foundation settlement potential. The analysis of geomorphological processes and the evolution of alluvial fans facilitates soil distribution analysis and reduces sampling costs. In this study, 56 boreholes were drilled in the northern alluvial fan of Kermanshah city, and soil samples were collected every 2 meters up to a depth of 24 meters. SPT tests were performed, and soil settlement potential was determined using the empirical DAS equation. Soil texture characteristics were obtained by sampling and measuring the maximum grain volume. Relationships among data were analyzed using Excel and SPSS software, and distribution maps of sediment types along with foundation settlement potential maps—based on both actual data and model predictions—were created using Arc GIS. The results showed that the best predictive model is a linear model incorporating three variables: “distance from the mountain,” “clay thickness,” and “sand thickness.” Sensitivity analysis demonstrated the model’s robustness even with reduced data, highlighting the increasing key role of the “distance from the mountain front” variable. Based on these findings, new indices based on geomorphological data can be defined, enabling improved prediction accuracy with fewer measurements and providing practical guidance for engineers in selecting optimal sampling locations over larger areas.

**Cite this article:** Jabbari, I., Moradi, S., & Bahrami, K. (2026). The Influence of the Evolution Pattern of the Alluvial Fans North of Kermanshah City on Foundation Settlement Potential. *Journal of Geography and Planning*, 30(95), 175-191. http//doi.org/10.22034/gp.2026.64512.3326

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/gp.2026.64512.3326

## Introduction

Settlement of foundations is one of the most critical geotechnical hazards in urban environments, potentially causing significant structural damage. This phenomenon results from soil compression due to imposed loads, with the intensity, pattern, and rate of settlement dependent on soil type, sediment distribution, and geomorphological conditions. Alluvial fans, with their complex deposition patterns, diverse sediment sources, and pronounced variations in grain size and layer thickness, provide a unique setting for studying foundation settlement. Understanding sediment characteristics in these geomorphological units and their relation to settlement behavior is crucial for sustainable urban planning and for reducing engineering costs. Especially in rapidly developing urban areas on these units, identifying resistant and vulnerable zones enables targeted sampling strategies and reduces the need for high-density borehole networks.

## Materials and Methods

The study area encompasses alluvial fans north of Kermanshah city, between the Ghere-Su River and the Taq-Bostan slopes, covering approximately 15 km². The area consists of alluvial fans with diverse morphometric features, some overlapping downstream. Data were collected from 56 boreholes with civil engineering objectives. In each borehole, excavation was performed down to the base, followed by Standard Penetration Test (SPT) according to ASTM 1586. Results were corrected to obtain the $N_{60}$ SPT index. Soil modulus of elasticity was estimated using empirical relationships, and elastic settlement was calculated for a 12 m × 12 m square foundation. The thicknesses of clay, sand, and gravel layers were recorded up to 25 m depth.

Data analysis included correlation assessment between clay, sand, gravel, and distance from the mountain front with settlement. Multiple regression was applied to quantify the influence of these factors on settlement. Linear and non-linear models were compared using the coefficient of determination ($R^2$) to select the optimal model. Geostatistical modeling of settlement employed Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation, producing predictive settlement maps. Sensitivity analysis was performed by randomly removing 15%, 30%, and 50% of data points, calculating RMSE and MAE to evaluate model stability and reliability.

## Results and Discussion

Results indicated that the northern Kermanshah alluvial fan primarily formed from sediments delivered by the Kenesht River, with smaller debris and alluvial fans from slope deposits contributing to the geomorphological development. Alternating sequences of gravel, sand, and clay produced notable vertical and horizontal variations in texture and grain size. Vertically, from a 25 m sediment thickness, the average distribution was 10.8 m gravel, 10.6 m clay, and 3.6 m sand. Gravel and clay layers were generally thicker, while sand layers were mostly less than 6 m. A strong inverse correlation was observed between gravel and clay thickness ($r = -0.83$).

Horizontally, sandy sediments dominated near the mountain front, with clay proportion increasing with distance from the mountains. Sand layers were more widely distributed, forming isolated pockets mainly in mid-fan areas. This pattern reflects high spatial variability and gradual lateral migration of river channels over time. Sedimentological evidence in fan margins and proximal zones indicates that sediments were largely transported by mudflows and debris flows. As slope and flow energy decreased downstream, coarser particles settled, and particle size gradually decreased with distance from the mountain, consistent with geomorphological principles of flow energy reduction and sediment sorting in alluvial fans.

Analysis of a 12 m × 12 m foundation settlement revealed minimum, maximum, and mean settlements of 1.5 cm, 5.6 cm, and approximately 3 cm, respectively. A strong positive correlation existed between clay thickness and settlement ($r = 0.86$) and a strong negative correlation between gravel thickness and settlement ($r = -0.84$). Sand thickness showed weak and non-significant correlation. Distance from the mountain front also played a crucial role in controlling settlement behavior.

These results, combined with multivariate correlation analysis, indicated that univariate analysis cannot fully capture the relationships between variables. A linear model using distance from the mountain front and clay thickness provided strong settlement predictions, while sand thickness, although less significant, improved model performance. Sensitivity analysis demonstrated that the model remained stable even when up to 50% of data points were removed, with minimal changes in RMSE and MAE. This highlights the importance of key spatial variables in representing overall settlement patterns, even with limited data.

Distance from the mountain front reflects a combination of sedimentary, hydrological, and geomorphological processes affecting settlement. Coarse and calcareous sediments in upstream areas exhibit higher resistance to settlement, whereas fine sediments downstream have higher settlement potential. Selecting critical variables and

integrating spatial modeling with geomorphological analysis allows the development of predictive models with minimal input data but maximum explanatory power.

**Conclusion**

This study demonstrates that identifying distinct sedimentary and geomorphological zones enables targeted and efficient sampling strategies. The model derived from distance from the mountain front and clay thickness predicts settlement accurately, even with limited data. This approach assists engineers and urban planners in selecting resilient areas, reducing costs, and providing a scientific framework for sustainable development on alluvial fans. The results provide a foundation for future research in spatial settlement analysis and geotechnical hazard management in similar environments.

**Keywords:** foundation settlement, alluvial fan, engineering geomorphology, sensitivity analysis, geomorphological hazards, Kermanshah.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۸۰۷۸ شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۵۳۴
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

# تأثیر شیوهٔ تحوّل مخروط افکنه‌های شمال شهر کرمانشاه بر پتانسیل نشست فونداسیون

ایرج جباری[۱]✉، سودابه مرادی[۲]، کاظم بهرامی[۳]

۱. نویسنده مسئول، استاد، الف: گروه جغرافیا ، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه. ایران
ب: استاد، گروه جغرافیا و پایداری محیط، مرکز پژوهش‌های محیط زیست، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: iraj.jabbari@razi.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: sodabem1995@gmail.com
۳. دکتری زمین‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: Bahrami.kazem@gmail.com

## اطلاعات مقاله

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۸/۲۴
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۰/۱۱
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۱/۱۷
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

**کلیدواژه‌ها:**
نشست فونداسیون، مخروط‌افکنه، ژئومورفولوژی مهندسی، تحلیل حساسیت، مخاطرات ژئومورفولوژیک، کرمانشاه.

## چکیده

ملاحظات اقتصادی و توسعه پایدار در طرح‌های توسعه شهری مستلزم شناسایی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ها پیش از هر ساخت‌وسازی است. مخروط‌افکنه‌ها به‌دلیل تغییرات تاریخی در شرایط رسوب‌گذاری و تغییرات جانبی و عمودی نوع رسوبات، ویژگی‌های ژئوتکنیکی بسیار متغیری دارند که پیچیدگی‌هایی را در ارزیابی پتانسیل نشست فونداسیون ایجاد می‌کند. بررسی فرآیندهای ژئومورفولوژیکی و تحولات مخروط‌افکنه‌ها تحلیل توزیع خاک‌ها و ویژگی‌های آن‌ها را تسهیل و هزینه‌های نمونه‌برداری را کاهش می‌دهد. در این پژوهش برای بررسی تحول مخروط‌افکنه شمال شهر کرمانشاه و رابطه آن با پتانسیل نشست، ۵۶ گمانه حفر و با آزمایش SPT هر ۲ متر تا عمق ۲۴ متر نمونه‌برداری شده و قابلیت نشست خاک با استفاده از رابطه تجربی DAS تعیین گردید. ویژگی‌های بافت خاک نیز از طریق نمونه‌برداری و تعیین بیشینه حجم دانه‌ها استخراج شد. داده‌ها با نرم‌افزارهای Excel و SPSS تحلیل شدند و نقشه‌های توزیع رسوبات و پتانسیل نشست فونداسیون بر اساس داده‌های واقعی و مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS ترسیم شد. نتایج نشان داد بهترین مدل پیش‌بینی، مدل خطی مشتمل بر سه متغیر «فاصله از کوهستان»، «ضخامت رس» و «ضخامت ماسه» است. تحلیل حساسیت این مدل‌ها بیانگر پایداری پیش‌بینی‌ها حتی با کاهش داده‌ها و اهمیت کلیدی متغیر «فاصله از جبهه کوهستان» است. بر اساس این یافته‌ها می‌توان با تعریف شاخص‌های نوین مبتنی بر داده‌های ژئومورفولوژیکی و کاهش تعداد نمونه‌برداری، دقت پیش‌بینی را بهبود داد و مشاوره کاربردی برای انتخاب هوشمند محل نمونه‌برداری و استفاده بهینه در پهنه‌های وسیع‌تر ارائه کرد.

**استناد:** جباری، ایرج؛ مرادی، سودابه و بهرامی، کاظم (۱۴۰۵). تأثیر شیوهٔ تحوّل مخروط افکنه‌های شمال شهر کرمانشاه بر پتانسیل نشست فونداسیون. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۵)، ۱۹۱-۱۷۵.
http//doi.org/10.22034/gp.2026.64512.3326

CC BY NC
© نویسندگان.
ناشر: دانشگاه تبریز.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

## مقدمه

هنگامی که خاک در اثر بار پِی یا فونداسیون تحت افزایش تنش فشاری قرار می گیرد، خاک دچار فشردگی می شود و با تخلیه هوای بین منافذ به صورت عمودی پایین می‌رود (داس و سیواکوگان[1]، ۲۰۰۷). کل جابجایی عمودی که در نتیجهٔ این امر در سطح پی یا فونداسیون رخ می دهد نشست نامیده می‌شود (کالیاکین[2]، ۲۰۱۷) نشست، اغلب به صورت موضعی رخ می‌دهد و بر اساس ویژگی‌های خاک در مدت کوتاهی پس از احداث ساختمان‌های جدید اثراتش ظاهر شده و سپس بتدریج متوقف می‌شود. برحسب ویژگی خاک‌ها و میزان و توازن بار وارد شده به سطح خاک، اثراتش در خود سازه ممکن است خیلی واضح نباشد یا اینکه به نشست همسان یا ناهمسان و یک‌طرف، و در نتیجه ایجاد ترک‌ها در سازه مشخص شود. این نوع نشست که به نشست پِی یا نشست فونداسیون در بین مهندسین معروف است در واقع با نشست زمین یا فرونشینی که در آن معمولاً مایعات خاک تخلیه می‌شود یا زیر خاک خالی می‌شود و در نتیجهٔ کل خاک زمین به صورت عمودی به پایین حرکت می کند (روستایی و جباری، ۱۳۹۲: ۹۲) تفاوت دارد.

فونداسیون‌ها روی سنگ بستر مقدار نشست ناچیزی را نشان می‌دهند. در مقابل، بر روی خاک‌ها به‌ویژه خاک رس ممکن است نشست بیشتری داشته باشند. از این رو از آنجاکه سازه‌ها به دلیل نشست فونداسیون آن به ویژه زمانی که نشست به سرعت اتفاق بیفتد متحمل آسیب می شوند، مهندسین ژئوتکنیک سعی می‌کنند قبل از ساخت سازه‌ها پتانسیل خاک‌ها را در برابر وزنی که به آنها تحمیل می‌شود برآورد کنند و مقادیر متوسط و تغییرپذیری خواص خاک را تعیین کنند (الجبان[3]، ۲۰۱۳). آزمایش درجا در مهندسی ژئوتکنیک مهم است، زیرا آزمایش‌های آزمایشگاهی ساده ممکن است قابل اعتماد نباشند و آزمایش‌های آزمایشگاهی پیچیده‌تر نیز زمان‌بر و پرهزینه باشند. یکی از روش‌های آزمایش درجا، تست نفوذ استاندارد[4] *(SPT)* است که برای شناسایی نوع خاک و چینه‌شناسی به همراه معیار نسبی مقاومت استفاده می‌شود (صلاح‌الدین و صادق[5]، ۲۰۱۶)، به طوری که ۸۵ تا ۹۰ درصد از طراحی پی مرسوم در آمریکای شمالی و جنوبی از نتایج *SPT* استفاده می شود (بولز[6]، ۱۹۹۶). ولی موضوع این است که این امکان وجود ندارد که برای هر بنایی که ساخته می‌شود آزمایش *SPT* انجام گیرد و نیاز است که به برآوردهای حاصل از نمونه‌ها اکتفا شود. کفایت این نمونه‌ها نیز به توزیع رسوباتی بستگی دارد که شرایط نهشته‌گذاری یکسانی را پشت سرگذاشته باشند. شاید در بین زمین ریخت‌ها مخروط افکنه‌ها جزء عوارضی باشد که در متن خود متنوع‌ترین شرایط رسوب-گذاری را ثبت کرده باشند و از این رو، برای ترسیم پهنه‌های پتانسیل پِی‌نشست به بیشترین برداشت نمونه‌ها نیاز باشد.

مخروط افکنه‌ها در جایی ایجاد می‌شوند که رودها از کوهستان یا جبهه یخچال خارج شده و به دلیل کاهش شیب رسوبات خود را به دره‌ها یا دشت ها تخلیه کنند. در این صورت شکل نیم دایره‌ای را به‌وجود می‌آورد و ۳ بخش مختلف را تولید می‌کند: بخش داخلی یا فوقانی پرشیب که دارای مجاری محدود ولی بزرگ و از نظر رسوب شناختی سنگ‌ریزه یا تخته سنگ می‌باشد؛ بخش میانی کمی کم‌شیب‌تر با اندازه ذارت و رسوبات بستری کوچکتر با رخسارهٔ در حد ریگ و جور شدگی و گرد شدگی نسبتاً ضعیف و بالاخره بخش بیرونی یا انتهایی کم شیب با تراکم مجاری کم‌عمق زیاد و متشکل از رسوبات ریز دانه و و جور شدگی و گرد شدگی نسبتاً خوب (بلر و مک‌فرسُن[7] ۲۰۰۹؛ بول[8]، ۱۹۷۷؛ موسوی حرمی، ۱۳۶۷). جریان در مخروط فوقانی که تندترین شیب را داشته و معمولاً دارای یک مجرا یا خندق رأس مخروط می‌باشد، محدود می‌شود (لیدر[9]، ۲۰۱۱ ؛ هاروی و همکاران[10]،

1. Das & Sivakugan
2. Kaliakin
3. Aljabban
4. standard penetration test (SPT)
5. Salahudeen & Sadeeq
6. Bowles
7. Blair & McPherson
8. Bull
9. Leeder
10. Harvey et al.

۱۹۸۰). این مجرا در معرض انسداد توسط رسوبات انباشته شده یا جریان‌های مواد قرار گرفته و باعث می شود جریان به طور دوره‌ای از مجرای قدیمی خود خارج شود و به قسمتی از مخروط با شیب تندتر منتقل شود. در نتیجه، معمولاً تنها بخشی از مخروط در هر زمان خاص فعال است و مناطق غیرفعال ممکن است تحت تشکیل خاک یا فرسایش قرار گیرند (هاروی و همکاران، ۱۹۸۰؛ مختاری و همکاران، ۱۳۸۶). فعالیت و گسترش هر یک از این بخش‌ها به حجم رسوباتی بستگی دارد که توسط رود یا جریان مواد که از جریانات ورقه‌ای روی دامنه‌ها سرچشمه می‌گیرند و این عامل نیز به آب وهوا، زمین‌ساخت، ویژگی‌های زمین شناسی حوضه، تغییرات سطح اساس و فعالیت‌های انسانی وابسته است که مقصودی و محمدنژاد آروق (۱۳۹۲: ۶۵) به خوبی آن را توضیح داده‌اند.

هر چند که مخروط‌افکنه‌ها در مناطق نیمه گرمسیری، معتدل، و حتی قطب شمال و زیر قطبی نیز وجود دارند، ولی بیشترین گسترش آنها در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک می باشد (اُرشی[1] و همکاران، ۲۰۰۱؛ هاروِی و همکاران، ۲۰۰۵؛ جیکوب و هانگر[2]، ۲۰۰۵). ایران به دلیل شرایط متنوع اقلیمی که در دوران چهارم داشته است شرایط مناسبی را هم برای تولید رگولیت و هم برای تخلیه آنها داشته است. اعتقاد بر این است که شرایط بهینه برای تشکیل مخروط‌های حاشیه جنوبی رشته کوه‌های البرز در دوره‌های یخبندان کواترنر رخ داده است (بیُمونت[3] ، ۱۹۷۲). ولی شواهد رسوب شناختی در نهشته‌های کواترنزی مخروط افکنه ماهدشت کرج نشان می‌دهد که در تحول آن جریان‌های سیلابی انرژی متوسط تا پایین که مبین دوران گرم و خشک است وجریان متوسط رو به بالا که که در شرایط بارش‌های یکنواخت و مستمر و طولانی که مبین دوران سرد و مرطوب می باشد، نقش زیادی داشته اند (بیرامعلی کیوی و همکاران، ۱۴۰۱). از سوی دیگر جریان‌هایی که در درازمدت تغییر کرده و متحوّل شده اند، تحت تأثیر فعالیت‌زمین‌ساخت بوده‌اند و جریان‌هایی که در کوتاه مدت تغییر کرده و جابه‌جا شده اند، تحت تأثیر سیلاب‌های فصلی و ناگهانی با دبی و بار رسوبی زیاد و نیز تغییرات زمانی بارش قرار داشته‌اند (یمانی و مقصودی ۱۳۸۲، مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸؛ رجبی و همکاران ۱۳۹۸؛ تقیان و ملک‌زاده، ۱۴۰۱؛ گورابی و کریمی، ۱۳۹۱). در دوران تاریخی فرسایش عمقی و مهاجرت مجاری گیس بافته بیشتر حاکم بوده داشته است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۱).

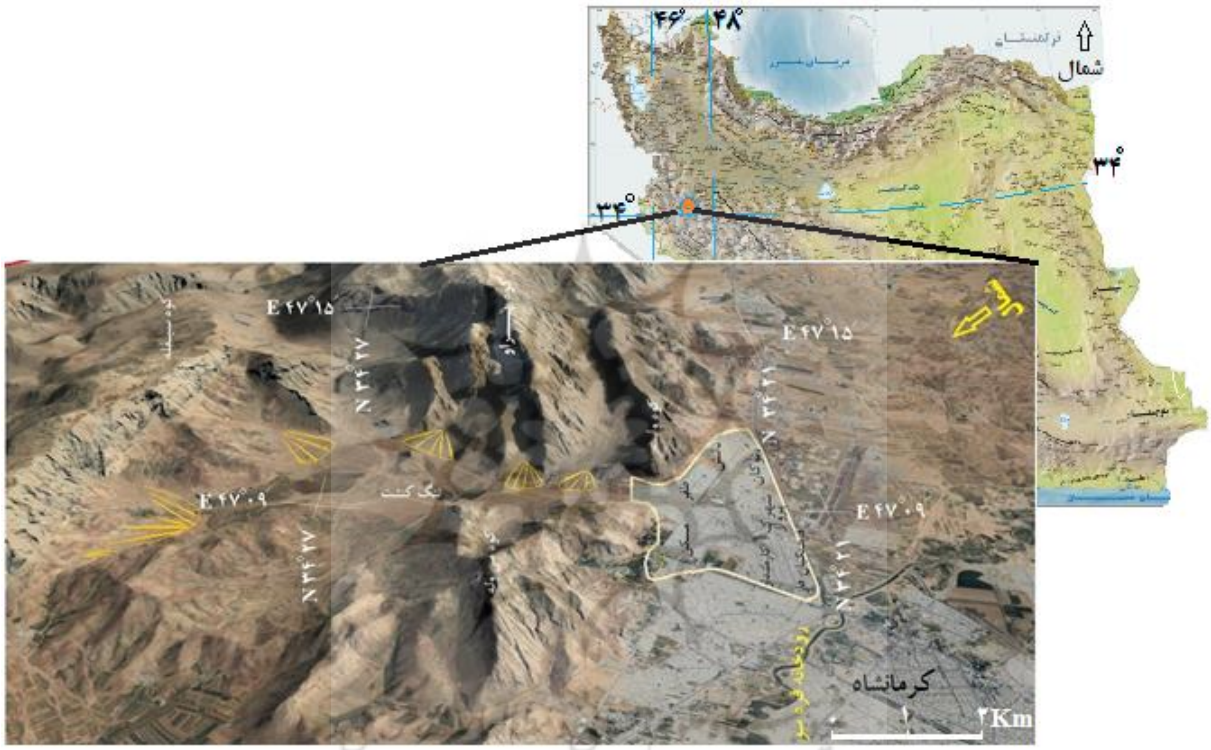
بنابراین، مخروط‌افکنه‌های ایران در دورهٔ تحول خود شرایط متنوعی را پشت سر گذاشته‌اند که علاوه بر تنوع بخشی به شکل و وسعت آنها به واحدهای مورفولوژیک و توزیع رسوبات متن مخروط نیز تنوع داده‌اند. از سوی دیگر مخروط‌افکنه‌ها به دلیل مطلوب بودن‌شان از نظر منابع آبی محل‌های مناسبی برای تشکیل سکونتگاه‌ها انتخاب شده و اکنون با توسعه سریع شهرها، سکونتگاه‌ها و سازه‌ها نیز بر روی نهشته‌هایی بنا می‌شوند که ظرفیت متفاوتی را در برابر پی‌نشست دارند. از ین‌رو در این تحقیق سعی شده است تا با الگو قرار دادن مخروط افکنه‌های بخش شمال شرقی شهر کرمانشاه خصوصا مخروط‌افکنه کنشت، داده‌های به دست آمده از $SPT$ را با روش‌های زمین آماری بر روی مخروط‌افکنه تعمیم داده و رابطه آن با شرایط رسوبگذاری کشف شود تا ضمن آگاهی در زمینه نحوهٔ گسترش مخروط‌افکنه‌های منطقه اطلاعات لازم برای توسعه شهر با توجه به پتانسیل نشست داده شود و همچنین در زمینه کفایت نمونه‌های مورد نیاز در شرایط مشابه تصمیم‌گیری شود. نتایج این پژوهش می تواند به مدیران و برنامه‌ریزان توسعه شهری کمک کند که مکان‌ها و محدوده‌های مناسبی را برای توسعه شهرها انتخاب کنند. در واقع با شناسایی محدوده‌های مقاوم مخروط افکنه‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌ها به توسعه پایدار کمک کرد.

## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مخروط‌افکنه‌های شمال کرمانشاه (شرق بلوار طاق‌بستان)، حدفاصل شمال رودخانه قره‌سو تا حاشیه کوه‌های طاق‌بستان است. این مخروط افکنه‌ها شکل تیپیک ندارند و متشکل از مخروط افکنه‌های با مساحت و ویژگی‌های مورفومتری متفاوتی هستند. بخش‌های از مخروط افکنه‌ها به‌ویژه در قسمت پایین دست با هم همپوشانی داشته و تفکیک مرز

1. Oguchi
2. Jakob and Hungr
3. Beaumont

دقیق مخروط افکنه امکان پذیر نیست. با این وجود در تمامی این مخروط افکنه‌ها یک روند بسیار مشخصی وجود دارد که از راس به سمت پنجه مخروط افکنه‌ها اندازه رسوبات ریزتر می شوند. مخروط افکنه کشت تقریباً در وسط محدوده مورد مطالعه قرار گرفته که گاهی به صورت یک جریان فصلی چند ماهه وجود دارد. این مجرای جریان باعث انتقال جریان‌های سیلابی قدرتمند از محدوده کنشت به درون دشت کرمانشاه می شود و آثار آن به صورت قلوه سنگ های درشت در بستر مجرای جریان مشهود است. شواهد ژئومورفولوژیکی و رسوب شناسی به دست آمده در این پژوهش نشان می دهد مجرای جریان مخروط افکنه‌ها به شدت پویا و دینامیک بوده و در طول دوره رسوبگذاری خاک های دشت کرمانشاه جابجایی جانبی زیادی داشته و باعث رسوبگذاری نامنظم رسوبات شنی در مقطع قائم خاک شده است (شکل ۱).



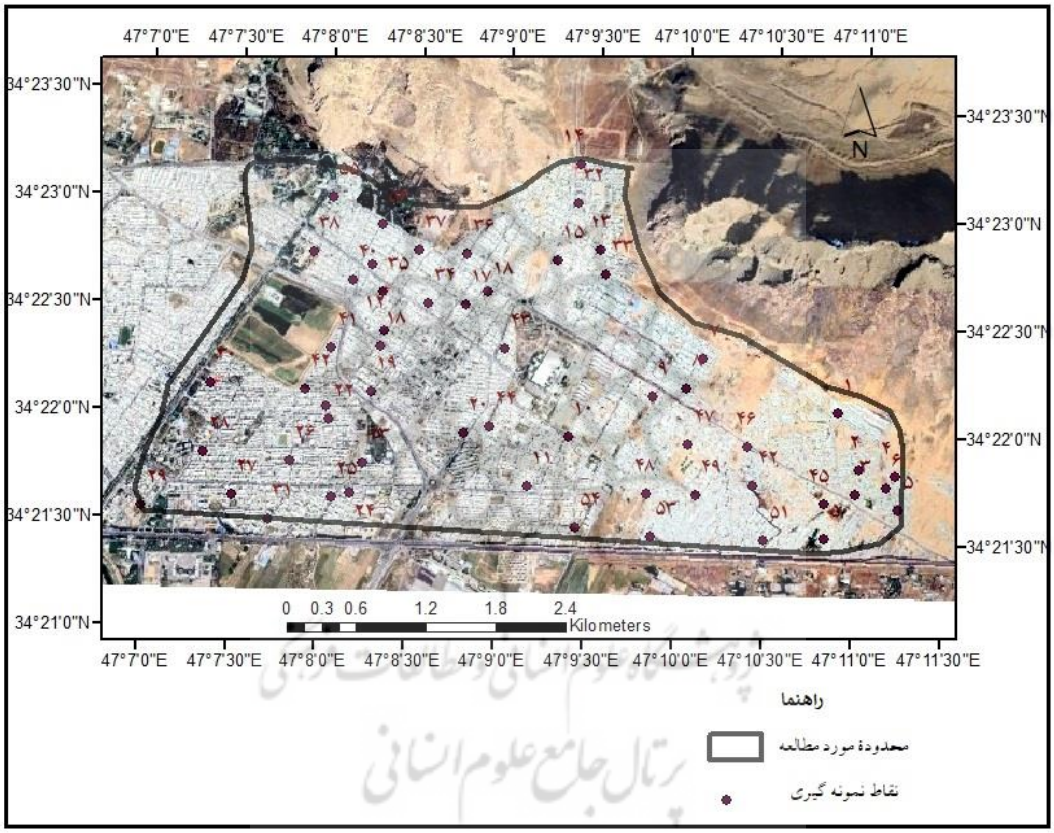

**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه**

**Figure 1. Geographical location of the study area**

این محل که مساحتی در حدود ۱۵ کیلومتر مربع یا ۱۵۰۰ هکتار دارد بدین دلیل انتخاب شده است که از ۳ دههٔ گذشته شهر کرمانشاه بر روی آن گسترش چشمگیری داشته است و شهرک‌های دانش، ظفر و نوکان را بر بدنهٔ خود افزوده است (شکل ۱) و هنوز هم این توسعه ادامه دارد. از آنجاکه با تراکم مناطق مسکونی و افزایش وزن ساختمان‌ها فشردگی بیشتری بر رسوبات تحمیل شده و ساختمان‌ها نیز دچار خسارت ناشی از نشست می‌گردند، مهندسین ژئوتکنیک را مجبور می‌کند، قبل از ساخت و ساز ویژگی‌های رسوبات را از نظر پتانسیل نشست ارزیابی کنند و این اطلاعات به جغرافی‌دانان نیز کمک می‌کند تا شرایط رسوب‌گذاری مختلفی که در محیط‌های مخروط‌افکنه‌ای ایجاد می‌شود را شناسایی کنند تا ضمن ایجاد رابطه بین نوع نهشته‌ها و نشست به مهندسین نیز از نظر تعیین نواحی آسیب‌پذیر و انتخاب تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای ارزیابی یاری کند. از این‌رو، با توجه به اهداف تحقیق تعیین مرز دقیق مخروط افکنه اهمیت چندانی نداشت و محدودهٔ مورد بررسی به مساحت تقریباً ۱۵ کیلومتر مربع طوری انتخاب شده است تا رسوبات رودخانه‌ای، دشت سیلابی و مواد دامنه‌ای را به ضخامت‌های مختلف در خود جای دهد و از سوی دیگر داده‌های مناسب تا عمق ۲۵ متری را نیز در دسترس باشد.

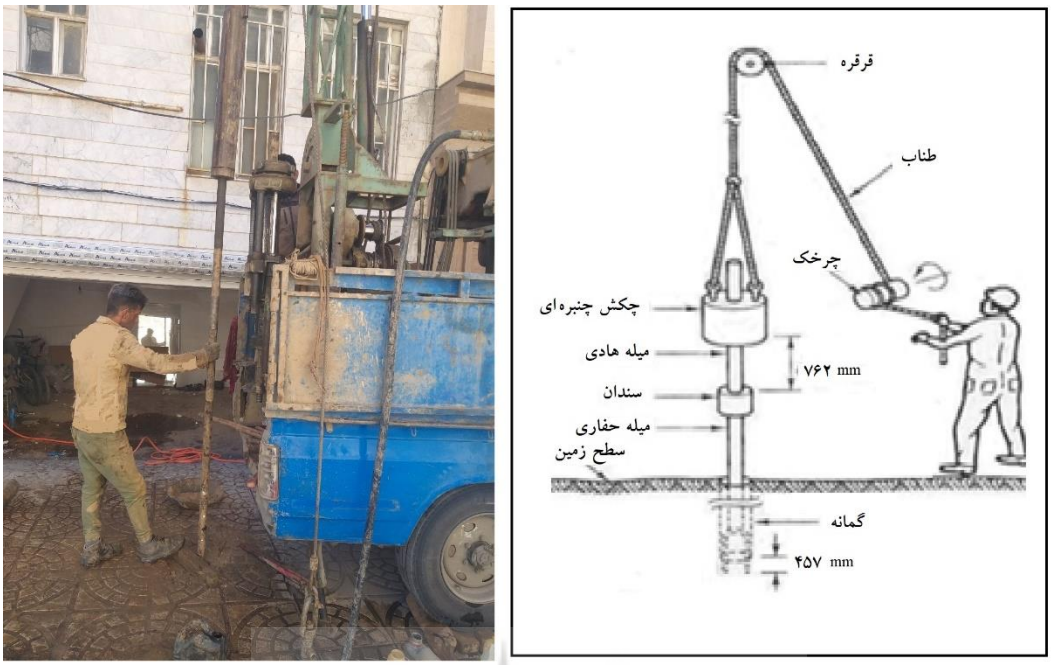
## روش پژوهش

داده‌هایی که در این تحقیق استفاده شد در واقع داده‌هایی بودند که از ۵۶ نقطه نمونه‌گیری با اهداف عمرانی به دست آورده شده بودند (پیوست ۱). برای برداشت نمونه‌ها در هر ۵۶ نقطه (شکل ۲) ابتدا گمانه‌ای با قطر تقریباً ۱۰ سانتی متر حفر می‌گردید و سپس ابزار حفاری خارج شده تا در کف آن تنها خاک دست‌نخورده باقی بماند. سپس آزمایش نفوذ استاندارد (*SPT*) مطابق با استاندارد *ASTM 1586* در کف گمانه حفاری شده انجام می‌شود و مطابق با استاندارد مذکور اصلاحات لازم بر روی نتایج انجام می‌شود. بر اساس عواملی از قبیل اثر سربار، انرژی کوبش وارد بر لوله نمونه‌گیر، سطح آب زیرزمینی احتمالی، طول و قطر لوله و روش نمونه‌گیری تصحیح شدند و *SPT N60* به دست می آید. در شکل ۳ طرح شماتیک انجام آزمایش *SPT* و تصویری از مرحلهٔ انجام آن در این پژوهش نمایش داده شده است. این آزمایش برای هر گمانه در اعماق ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ متر اجرا و میانگین $N_{60}$ *SPT* برای این ۱۲ عمق به عنوان شاخص نفوذ استاندارد هر گمانه محسوب شد.




**شکل ۲. موقعیت نمونه‌های برداشته شده در محدوده مورد مطالعه (شرق بلوار طاق‌بستان).**

**Figure 2. The location of the samples taken in the study area (east of Taqe_bestan Blvd.).**




**شکل ۳: تصویر شماتیک (سمت راست) و واقعی (سمت چپ) در طی انجام آزمایش *spt* در این پروژه**
**Figure 3. Schematic (right) and real (left) images during spt testing in this project**

جهت تعیین مدول الاستیسیته، از روابط تجربی متداول از جمله رابطه داس $Es= N60\ SPT*7.66$ بهره گرفته شد. بنابراین، محاسبه پتانسیل نشست بر اساس رابطه زیر صورت گرفت:

$$Si=q.B\frac{1-u^2}{E}Ip$$

که در آن: $Si$ = نشست الاستیک، $q$ = تنش موثر بر پی، $B$ = عرض شالوده، $\mu$ = نسبت پواسون، $E$ = مدول الاستیسیته خاک، $Ip$ = ضریب تاثیر بدون بعد می باشد. در این محاسبات تنش موثر بر پی ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و عرض پی ۱۲ متر فرض شده است و نشست در مرکز پی گسترده مربعی با ابعاد ۱۲ متر محاسبه شده است.

این محاسبات در ۵۶ نقطه با مختصات دقیق ثبت‌شده اجرا شد تا اطلاعاتی شامل فاصله از جبهه کوهستان، مدول الاستیسیته خاک، میزان نشست، و ضخامت لایه‌های رس، شن و ماسه تا عمق ۲۵ متر حاصل شود. در تعیین نوع و حجم غالب رسوبات، حجم نسبی در نمونه برداشت‌شده ملاک قرار گرفت.

در مرحله تحلیل داده‌ها، ابتدا همبستگی میان سه متغیر رسوب (رس، ماسه، شن) و فاصله از جبهه کوهستان با مقدار نشست فونداسیون بررسی شد. سپس رگرسیون چندگانه بین این متغیرها انجام شد تا میزان تأثیرگذاری هر عامل بر نشست مشخص شود. مدل‌های خطی و غیرخطی با استفاده از ضریب تعیین ($R^2$) مقایسه و مدل مطلوب معرفی گردید.پس از تعیین مدل منتخب، داده‌ها جهت مدل‌سازی مکانی نشست با روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله ($IDW$) به‌کار رفت و نقشه پیش‌بینی نشست تولید شد.

مدل‌ها می‌توانند از تحلیل‌های ژئومورفولوژیک بهره‌مند شوند. برای ارزیابی و پاسخ به این ادعا، تحلیل حساسیت انجام گرفت؛ به عبارتی نشان داده شد که در صورت تغییر جزئی مقدار هر متغیر ورودی (مانند نوع نهشته‌ها و فاصله از کوهستان)، خروجی مدل (نشست) تا چه اندازه تغییر می‌کند. بنابراین، برای سنجش دقت، نقشه داده‌های واقعی ترسیم شد و این داده‌ها با داده‌های حاصل از نقشه‌های پیش‌بینی در $SPSS$ مقایسه گردید. تحلیل‌هایی که برای این مقایسه به کار رفتند، شامل خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$) و میانگین خطای مطلق ($MAE$) بودند که از معادلات زیر به دست آمدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Ri - Pi)2}{n}}$$

$$MAE = \frac{\sum_1^n |Ri - Pi|}{n}$$

که در آن، $Ri$: مقدار واقعی نشست، $Pi$: مقدار پیش‌بینی‌شده نشست در همان نقطه و $n$: تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

در نهایت، تحلیل حساسیت مدل انجام شد. روند مدل‌سازی، شامل درون‌یابی، ترسیم نقشه، استخراج داده و محاسبه $RMSE$ و$MAE$ ، برای چندین بار، هر مرتبه با حذف تصادفی ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد نمونه‌ها، تکرار گردید و تغییرات شاخص‌های خطا و همبستگی در هر مرحله مقایسه شد.

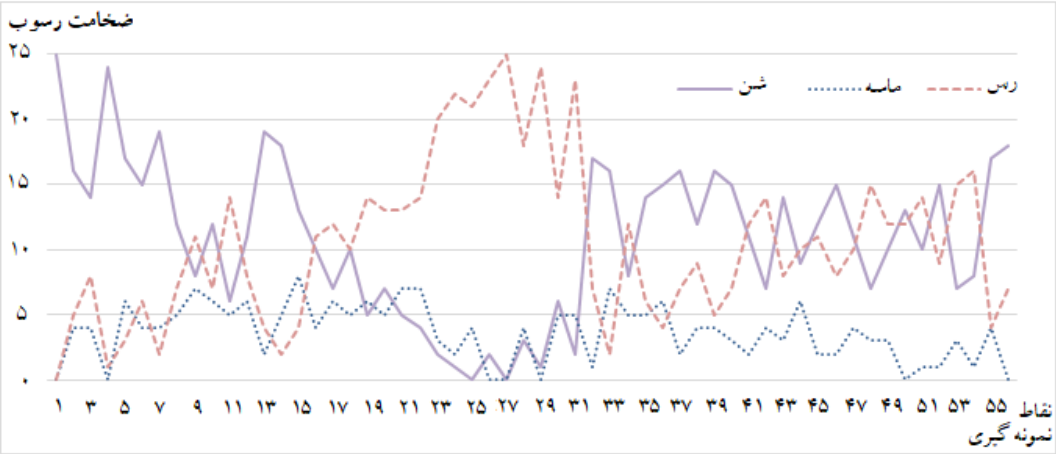
## نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مخروط‌افکنهٔ شمال کرمانشاه عمدتاً در اثر ورود و نهشته‌گذاری رسوبات رودخانه کنشت شکل گرفته است. در عین حال، مخروط‌های واریزه‌ای و آبرفتی کوچک ناشی از حمل رسوبات دامنه‌ای از پرتگاه‌های مشرف به دشت نیز در تکامل و تحول این واحد ژئومورفولوژیک نقش داشته‌اند. تنوع منابع رسوبی و جابه‌جایی تدریجی بستر رودخانه در طول زمان، موجب تشکیل توالی‌های متناوب شن، ماسه و رس و ایجاد تغییرات بافتی چشمگیر در راستاهای قائم و افقی شده است.

در جهت قائم، از مجموع ۲۵ متر ضخامت رسوبات،، به‌طور میانگین ۸ /۱۰متر شن، ۶ /۱۰ متر رس و ۶ /۳ متر ماسه وجود دارد. بیشترین ضخامت‌ها عمدتاً مربوط به لایه‌های شنی و رسی است، در حالی که ضخامت لایه‌های ماسه‌ای در بیشتر نقاط کمتر از ۶ متر می‌باشد (شکل ۴). ویژگی برجسته در پراکنش رسوبات، وجود رابطه معکوس بین ضخامت شن و رس با ضریب همبستگی ۸۳ /۰− = $r$ است؛ به این معنا که هرگاه ضخامت رس افزایش می‌یابد، ضخامت شن کاهش می‌یابد و بالعکس. اما بین توزیع ضخامت ماسه و دو نوع رسوب دیگر رابطه معناداری مشاهده نشد.

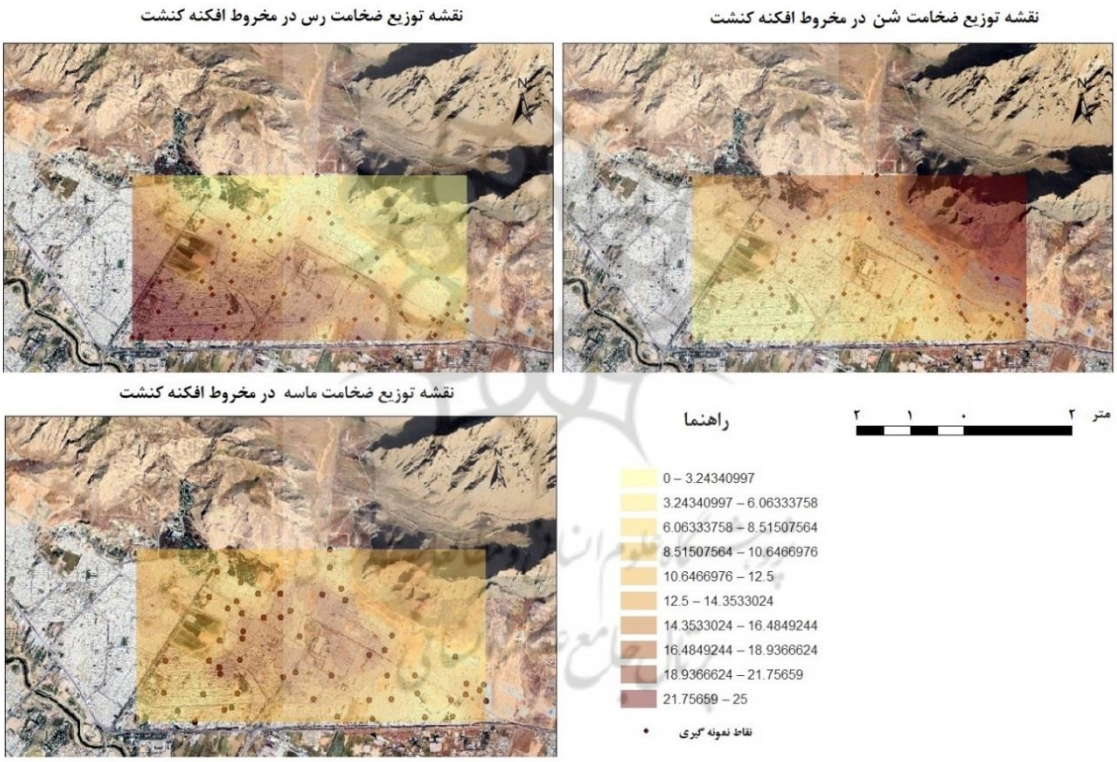
در راستای افقی، الگوی مشخصی در توزیع رسوبات مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که در نواحی مجاور جبههٔ کوهستان، رسوبات شنی غالب بوده و با افزایش فاصله از کوهستان، سهم رسوبات رسی به‌تدریج افزایش می‌یابد. رسوبات ماسه‌ای پراکندگی گسترده‌تری دارند و عمدتاً در بخش‌های میانی مخروط‌افکنه، به‌صورت لکه‌ای و منفصل گسترش یافته‌اند (شکل ۵). این الگو بیانگر تغییرپذیری فضایی بالای رسوبات و جابه‌جایی تدریجی مسیر جریان رودخانه در طول زمان است.

شواهد رسوب‌شناسی در بخش‌های حاشیه‌ای مخروط‌افکنه و نزدیک به کوهستان نشان می‌دهد که رسوبات عمدتاً توسط جریان‌های گلی و واریزه‌ای جابه‌جا شده‌اند. وجود دانه‌های درشت با لبه‌های تیز، گردشدگی کم، جورشدگی ضعیف و ماتریکس رسی یا سیلتی، از شاخص‌های بارز این نوع نهشته‌ها است. با کاهش شیب و انرژی جریان در بخش‌های پایین‌دست، توان حمل ذرات درشت کاهش یافته و ذرات ریزتر به‌تدریج ته‌نشین شده‌اند؛ در نتیجه، اندازه ذرات با افزایش فاصله از کوهستان به‌صورت پیوسته کاهش یافته است. این الگو با اصول ژئومورفولوژیکی حاکم بر کاهش انرژی جریان و تفکیک دانه‌بندی در مخروط‌افکنه‌ها که در ادبیات علمی مطرح شده است، همخوانی دارد (آیرد، ۲۰۱۹؛ سلبی، ۱۹۹۴؛ جباری، ۱۳۹۷).




**شکل ٤. توزیع ضخامت خاک‌های مختلف در مقطع ۲۵ متری در ٥٦ گمانه حفاری شده**

**Figure 4. The distribution of sediments in a 25-meter section at 56 sampling points**

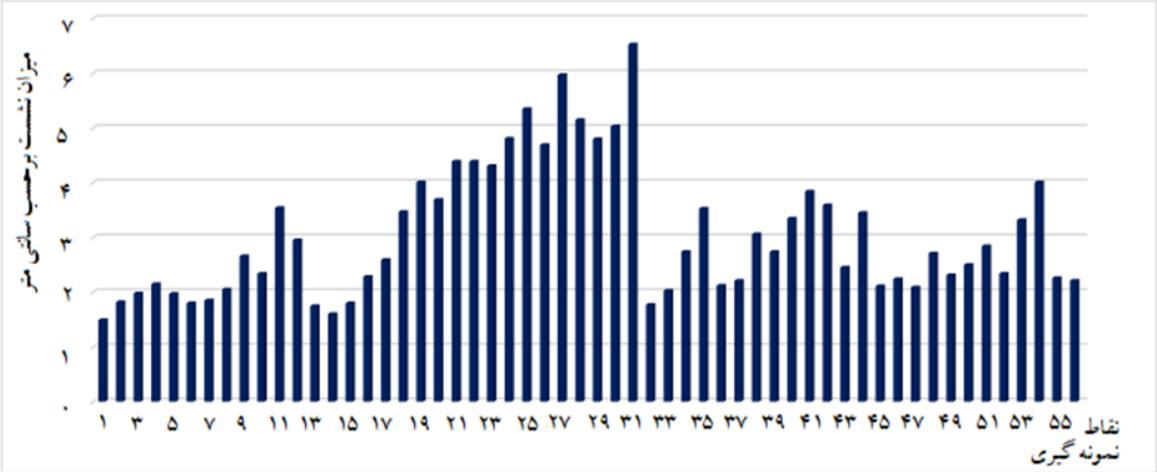



**شکل ٥. نقشه توزیع ضخامت رسوبات (رس، ماسه و شن) در مقطع۲۵ متری در مخروط افکنه کنشت در شمال کرماشاه**

**Figure 5. Map showing the distribution of sediment thickness (clay, sand, and gravel) along the 25-meter section of the Kenesht alluvial fan, north of Kermanshah**

تحلیل نشست‌پذیری نشان داد که بخش‌های مختلف مخروط‌افکنه برای یک فونداسیون مربعی با عرض ۱۲ متر، حداقل ۱/ ۵ و حداکثر ۶/ ۵ سانتی‌متر و به‌طور متوسط در حدود ۳ سانتی‌متر نشست را تجربه می‌کنند (شکل ۶). این روند به دلیل خاصیت ارتجاع‌پذیری و تراکم رسوبات است که ارتباط معکوس قوی با میزان نشست دارد ( $r$ =- ۰/۹۴). نتایج تحلیل همبستگی بیانگر رابطهٔ مستقیم و قوی بین میزان نشست و ضخامت رس ($r$ = ۰/۸۶ ، $df$=۵۶، $P$<۰/۰۱ )، رابطهٔ معکوس و قوی بین نشست و ضخامت شن ($r$ = −۰/۸۴، $df$=۵۶، $P$<۰/۰۱) است. در مقابل، ضخامت ماسه رابطهٔ ضعیف و غیرمعناداری با نشست نشان داد ($r$= ۰/۰۲۶، $df$=۵۶، $P$ >۰/۰۵ ). همچنین، رابطهٔ معنادار و قوی بین میزان نشست و فاصله از جبههٔ

کوهستان به‌دست آمد ($r = -۰/۸۵$، $df=۵۶$، $P<۰/۰۱$) که بیانگر نقش الگوی نهشته‌گذاری در کنترل رفتار ژئوتکنیکی زمین است.




**شکل ٦. نمودار پراکندگی پتانسیل نشست در ۵۹ نمونه روی مخروط افکنهٔ کنشت.**

**Figure 6. Scatter plot of settlement potential in 59 samples on Kenesht fan**

این نتایج به همراه نتایج حاصل از تحلیل همبستگی بین متغیرهای مستقل نشان داد که بررسی تک‌متغیره نمی‌تواند تصویر کاملی از روابط میان متغیرها و در نتیجه مدل‌سازی نشست فونداسیون ارائه دهد. بنابراین، داده‌ها به صورت ترکیبی و چندمتغیره برای مدل‌سازی به کار گرفته شدند. ارزیابی مدل‌ها با متغیرهای مختلف نشان داد که مدل خطی با دو عامل «فاصله از کوهستان» و «ضخامت رس» می‌تواند پیش‌بینی‌کننده قوی نشست باشد، هرچند که ضخامت ماسه علی‌رغم درجه معنی‌داری کمتر، در بهبود پیش‌بینی مؤثر واقع شد (شکل ۷).

نتایج تحلیل حساسیت این مدل نیز نشان داد که مدل نسبت به کاهش داده‌ها از پایداری قابل‌توجهی برخوردار است؛ به‌طوری‌که کاهش تعداد نمونه‌ها تأثیر چشمگیری بر *RMSE* و *MAE* نداشته و ضریب همبستگی همچنان در سطح بالایی باقی ماند. این امر بیانگر آن است که متغیرهای مکانی عمده، به‌ویژه فاصله از جبهه کوهستان و ضخامت رس، نقش تعیین‌کننده‌ای در تبیین رفتار نشست دارند و حتی در شرایط محدودیت داده نیز می‌توانند الگوی کلی نشست را بازنمایی کنند (شکل ۷ و ۸).

**۱۰۰ ٪ داده ها**

**Coefficients[a]**

| Model | | Unstandardized Coefficients B | Unstandardized Coefficients Std. Error | Standardized Coefficients Beta | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (Constant) | .924 | .210 | | 4.403 | .000 |
| | Distance | .498 | .135 | .407 | 3.701 | .001 |
| | Clay | .107 | .022 | .546 | 4.862 | .000 |
| | Sand | .067 | .035 | .120 | 1.915 | .061 |

a. Dependent Variable: Subsidance

**Model Summary**

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .901[a] | .812 | .801 | .53951493 |

a. Predictors: (Constant), Sand, Distance, Clay

**Descriptive Statistics**

| | N | Mean |
|---|---|---|
| AbsError | 53 | .4313 |
| SqrError | 53 | .2604 |
| Valid N (listwise) | 53 | |

RSMI= 0.51
MAR= 0.43

**۸۵ ٪ داده ها**

**Coefficients[a]**

| Model | | Unstandardized Coefficients B | Unstandardized Coefficients Std. Error | Standardized Coefficients Beta | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (Constant) | 1.009 | .234 | | 4.313 | .000 |
| | Distance | .524 | .149 | .428 | 3.528 | .001 |
| | Clay | .103 | .025 | .510 | 4.177 | .000 |
| | Sand | .050 | .040 | .086 | 1.256 | .216 |

a. Dependent Variable: Subsidance

**Model Summary**

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .895[a] | .801 | .787 | .57186 |

a. Predictors: (Constant), Sand, Distance, Clay

**Descriptive Statistics**

| | N | Mean |
|---|---|---|
| AbsError | 46 | .2599 |
| SqrError | 46 | .4369 |
| Valid N (listwise) | 46 | |

RSMI= 0.51
MAR= 0.44

**۷۰ ٪ داده ها**

**Coefficients[a]**

| Model | | Unstandardized Coefficients B | Unstandardized Coefficients Std. Error | Standardized Coefficients Beta | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (Constant) | 1.013 | .211 | | 4.811 | .000 |
| | Distance | 1.073 | .179 | .834 | 5.993 | .000 |
| | Clay | .022 | .028 | .110 | .790 | .435 |
| | Sand | .056 | .036 | .094 | 1.544 | .132 |

a. Dependent Variable: Subsidance

**Model Summary**

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .935[a] | .874 | .863 | .49170 |

a. Predictors: (Constant), Sand, Distance, Clay

**Descriptive Statistics**

| | N | Mean |
|---|---|---|
| AbsError | 37 | .33180 |
| SQRError | 37 | .18041 |
| Valid N (listwise) | 37 | |

RSMI= 0.42
MAR= 0.33

**۵۰ ٪ داده ها**

**Coefficients[a]**

| Model | | Unstandardized Coefficients B | Unstandardized Coefficients Std. Error | Standardized Coefficients Beta | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (Constant) | 1.182 | .238 | | 4.965 | .000 |
| | Distance | .885 | .219 | .750 | 4.035 | .000 |
| | Clay | .035 | .034 | .195 | 1.038 | .309 |
| | Sand | .039 | .040 | .078 | .983 | .335 |

a. Dependent Variable: Subsidance

**Model Summary**

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .922[a] | .851 | .833 | .49927 |

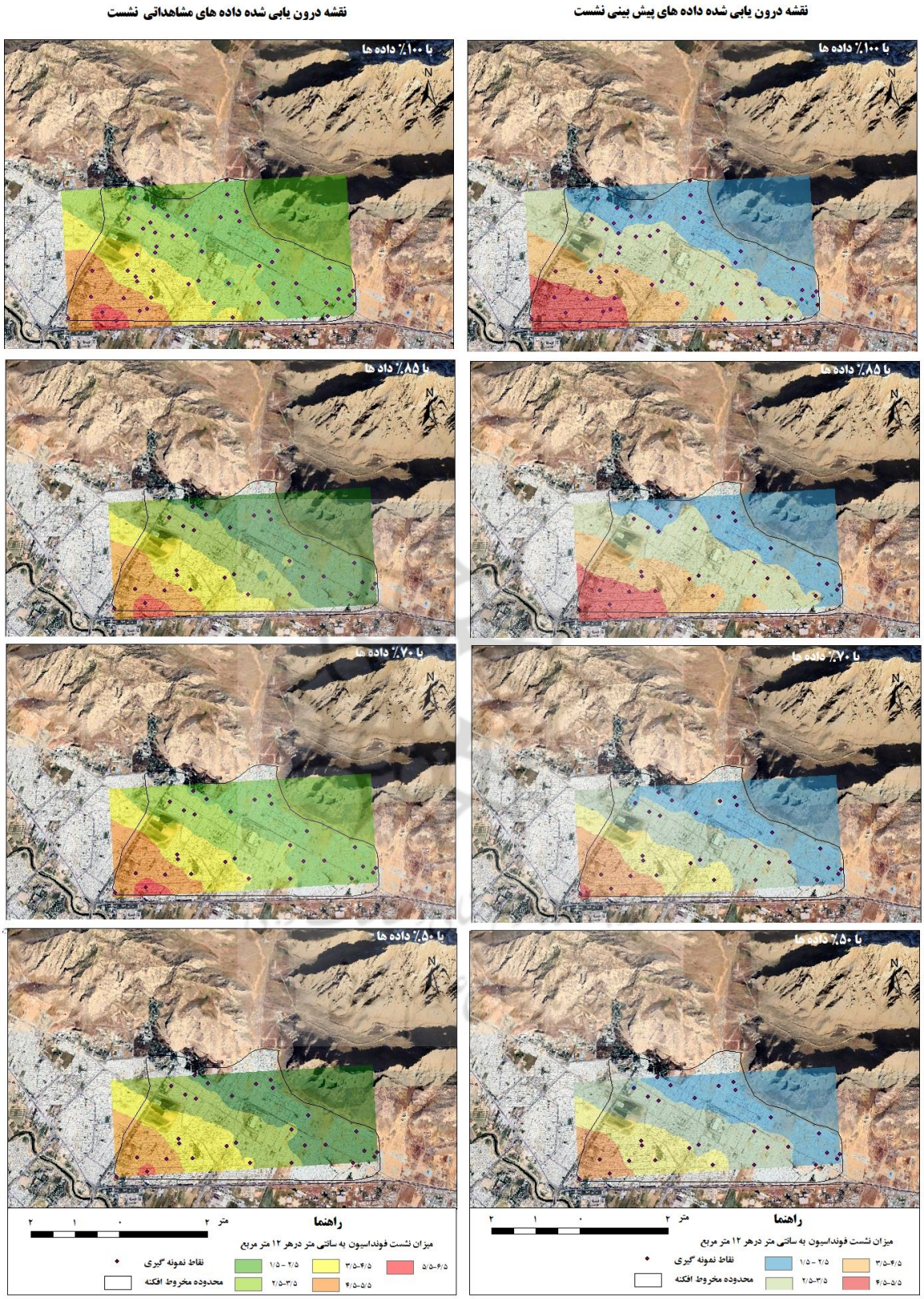
a. Predictors: (Constant), Sand, Distance, Clay

**Descriptive Statistics**

| | N | Mean |
|---|---|---|
| AbsError | 27 | .35778 |
| SQRError | 27 | .20372 |
| Valid N (listwise) | 27 | |

RSMI= 0.45
MAR= 0.36

**شکل ۷. مدل‌های خطی برای پیش بینی پتانسیل نشست از ۳ متغیر فاصله از جبهه کوهستان، ضخامت رس و ضخامت ماسه برای ۱۰۰ ٪، ۸۵ ٪، ۷۰ ٪ و ۵۰ ٪ داده‌ها و محاسبه شاخص‌های آماری به منظور انجام تحلیل حساسیت مدل.**




**شکل ۸. مقایسه نقشه‌های درون‌یابی نشست بر اساس داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده در سطوح مختلف نمونه‌برداری؛ یعنی تغییر رفتار مدل درون‌یابی (*IDW*) در شرایط داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده با کاهش تدریجی تعداد داده‌ها (از ۱۰۰٪ تا ۵۰٪).**

اثرگذاری متغیر فاصله از جبهه کوهستان، نکات کلیدی مهمی را در ارتباط با تأثیر تحول ژئومورفولوژیکی بر ویژگی‌های رسوبات روشن می‌سازد. در بخش‌های نزدیک به کوهستان، رسوبات دانه‌درشت حاصل از ریزش‌ها و حرکات توده‌ای غالب هستند که به‌طور ذاتی مقاومت بیشتری در برابر نشست دارند. این رسوبات اغلب با قشر نازکی از اندود آهکی پوشیده شده‌اند که با واکنش جوششی به اسید سولفوریک، ماهیت کربناته آن تأیید می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که شیب زیاد و نفوذپذیری بالا در این بخش‌ها، موجب نوسانات گسترده‌تر سطح آب زیرزمینی و تبخیر بیشتر کربنات کلسیم در اطراف دانه‌های شن و قلوه‌سنگ‌ها شده و در نتیجه، مقاومت خاک در برابر نشست افزایش یافته است.

در مقابل، در بخش‌های دورتر از جبهه کوهستان، عملکرد رودخانه‌ها با انشعابات متعدد پررنگ‌تر شده و نهشته‌گذاری رسوبات ریزدانه‌تر، به‌ویژه در دشت‌های سیلابی، افزایش یافته است. این رسوبات که از مقاومت کمتری در برابر نشست برخوردارند، نقش مهمی در افزایش پتانسیل نشست در این نواحی ایفا می‌کنند. بدین‌ترتیب، فاصله از جبهه کوهستان به‌عنوان شاخصی مکانی، مجموعه‌ای از فرایندهای رسوبی، هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی مؤثر بر رفتار نشست را به‌صورت هم‌زمان در خود بازتاب می‌دهد.

بنابراین، نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که انتخاب متغیرهای کلیدی می‌تواند به استخراج مدلی منجر شود که حتی در شرایط کاهش تعداد نمونه‌ها نیز از قابلیت پیش‌بینی قابل قبولی برخوردار باشد. در چنین شرایطی، اتکای صرف به افزایش تراکم گمانه‌ها برای تبیین رفتار نشست ضروری به نظر نمی‌رسد و می‌توان از ترکیب مدل‌های مکانی و تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی برای درک بهتر تغییرات فضایی نشست بهره گرفت. این رویکرد نشان می‌دهد که در صورت شناسایی پهنه‌های رسوبی و ژئومورفولوژیکی متمایز، هر گمانه می‌تواند نماینده یک واحد مشخص باشد و در نهایت، مدلی برای پیش‌بینی نشست زمین حاصل شود که با حداقل داده‌های ورودی، بیشترین توان تبیین و پیش‌بینی را دارا باشد.

## نتیجه‌گیری

روش *SPT* یکی از شیوه‌های رایج و کم‌هزینه برای نمونه‌برداری از فونداسیون‌ها به‌منظور ارزیابی پتانسیل نشست است. با این حال، بر اساس دستورالعمل‌های ژئوتکنیکی، تعداد برداشت‌های *SPT* به نوع خاک، میزان ناهمگنی منطقه و اهمیت پروژه وابسته است. این مسئله به‌ویژه در مخروط‌افکنه‌ها که از ناهمگون‌ترین محیط‌های رسوبی محسوب می‌شوند، اهمیت بیشتری می‌یابد و در بسیاری از موارد، ضرورت نمونه‌برداری با فواصل کمتر، پیچیدگی اجرایی و هزینه‌های پروژه را افزایش می‌دهد.

در منطقه کرمانشاه، بیشترین نمونه‌برداری انجام‌شده بر روی مخروط‌افکنه‌ای به مساحت حدود ۵/۱ کیلومتر مربع، شامل ۵۶ گمانه بوده است؛ به‌گونه‌ای که هر گمانه به‌طور متوسط نماینده بیش از ۲۶۰۰۰ متر مربع از سطح منطقه است. این موضوع نشان می‌دهد که تعیین تعداد نمونه مورد نیاز و هزینه‌های مرتبط با آن همواره یکی از چالش‌های اساسی در پروژه‌های ژئوتکنیکی بوده است. در این زمینه، بهره‌گیری از تحلیل‌های تخصصی ژئومورفولوژیکی و شناسایی دقیق متغیرهای پیش‌بینی‌کننده می‌تواند به برآورد علمی‌تر و ارائه پیشنهادهای بهینه برای کاهش تعداد نمونه‌ها، بدون افت دقت، منجر شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که فاصله از جبهه کوهستان متغیری کلیدی در تبیین ویژگی‌های رسوبات و رفتار نشست زمین است. داده‌ها بیانگر آن است که نهشته‌گذاری رسوبات دانه‌درشت و سیمانی‌شده در بخش‌های نزدیک به کوهستان و تجمع رسوبات ریزدانه در مجاری و دشت‌های سیلابی دورتر، چارچوبی قانون‌مند برای تغییرات مکانی نشست فراهم کرده است. بر این اساس، مدل خطی مبتنی بر فاصله از جبهه کوهستان و ضخامت رس به‌عنوان مؤثرترین متغیر مرتبط با نشست معرفی شد.

پایداری این مدل در شرایط کاهش تعداد نمونه‌ها نشان می‌دهد که تلفیق تحلیل‌های مکانی و ژئومورفولوژیکی می‌تواند زمینه‌ساز نمونه‌برداری هوشمند و هدفمند باشد. در این رویکرد، هر گمانه نماینده یک پهنه رسوبی و ژئومورفولوژیکی مشخص خواهد بود و در نهایت، مدلی برای پیش‌بینی نشست زمین حاصل می‌شود که با حداقل داده‌های ورودی، بیشترین توان پیش‌بینی

را داراست. افزون بر این، افزودن متغیرهایی نظیر فاصله از محدوده‌های پرفعالیت رودخانه و مسیرهای قدیمی آن‌ها می‌تواند در مطالعات آتی به شناسایی دقیق‌تر و کم‌هزینه‌تر پهنه‌های مستعد نشست کمک کند.

## منابع


بیرامعلی کیوی، فرشته؛ سبک‌خیز، فاطمه؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ قهرودی‌تالی، منیژه و جمال‌آبادی، جواد (۱۴۰۱). بررسی تغییرات محیط رسوبی در نهشته‌های کواترنری مخروط‌افکنه ماهدشت. *تحقیقات جغرافیایی*، ۳۷(۲)، ۲۸۵–۲۹۳.
http://georesearch.ir/article-1-1247-fa.html

تقیان، علیرضا و ملک‌زاده، فرخ (۱۴۰۱). ارزیابی فعالیت‌های نئوتکتونیکی در تحولات حوضه‌های آبریز (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز جنوب کوهستان کرکس). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۲)، ۱۵۱–۱۶۷.
https://doi.org/10.22059/JPHGR.2021.254527.1007197

روستایی، شهرام و جباری، ایرج (۱۳۹۲). *ژئومورفولوژی مناطق شهری* (چاپ پنجم). تهران: سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت). https://samta.samt.ac.ir/product

رجبی، معصومه؛ مختاری، داوود و هاشمیان، میرابراهیم (۱۳۹۸). تحلیل روابط کمی بین حجم مخروط‌افکنه‌ها و ارتباط آن با تکتونیک فعال (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه‌های دامنه شمالی بزقوش). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۳(۷۰)، ۱۲۳–۱۴۳.
https://doi.org/10.22108/gep.2018.98317.0

گورابی، ابوالقاسم و کریمی، مصطفی (۱۳۹۱). تأثیر تکتونیک فعال و تغییرات اقلیمی در تحول مخروط‌افکنه مروست، ایران مرکزی. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۲(۲۷)، ۷–۳۰. http://jgs.khu.ac.ir/article-1-671-fa.html

مختاری، داوود؛ کرمی، فریبا و بیاتی‌خطیبی، مریم (۱۳۸۶). اشکال مختلف مخروط‌افکنه‌ای در اطراف توده کوهستانی میشوداغ (شمال‌غرب ایران) با تأکید بر نقش فعالیت‌های تکتونیکی کواترنر در ایجاد آن‌ها. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۱۱(۱۰)، ۲۵۷–۲۹۲. https://hsmsp.modares.ac.ir/article_14210.html

مقصودی، مهران؛ باقری سیدشکری، سجاد و مینایی، مسعود. (۱۳۸۸). بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول مخروط‌افکنه‌ها (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه‌های دامنه تاقدیس قلاجه). *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، (12)7، 124–99.
https://doi.org/10.22067/geography.v7i12.8930

مقصودی، مهران؛ فاضلی‌نشلی، حسن؛ عزیزی، قاسم؛ گیلمور، گوین و اشمیت، آرمین (۱۳۹۱). نقش مخروط‌افکنه‌ها در توزیع سکونت‌گاه‌های پیش از تاریخ از دیدگاه زمین‌باستان‌شناسی (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه‌های جاجرود و حاجی‌عرب). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۴(۴)، ۱–۲۲. https://doi.org/10.22059/JPHGR.2012.30239

مقصودی، مهران و محمدنژادآروق، وحید (۱۳۹۰). *ژئومورفولوژی مخروط‌افکنه‌ها*. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

موسوی‌حرمی، رضا (۳۶۷). *رسوب‌شناسی*. مشهد: انتشارات آستان قدس رضوی. https://digital.aqr.ir/newindex

یمانی، مجتبی و مقصودی، مهران (۱۳۸۲). بررسی و تحول کانال‌های گیسویی در سطح مخروط‌افکنه‌ها (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه تنگوییه در چاله سیرجان). *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳۵(۴۵)، ۱۰۳–۱۱۳. https://sid.ir/paper/5469/fa

Al-Jabban, M.J.W. (2013). Estimation of standard penetration test (SPT) of Hilla City-Iraq by using GPS coordination. *Jordan Journal of Civil Engineering (JJCE)*, 7(2), 133–145. https://www.iiste.org/index.php/JJCE/article/view

Beaumont, P. (1972). Alluvial fans along the foothills of the Elburz Mountains, Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 12(4), 251–273. https://doi.org/10.1016/0031-0182(72)90022-3

Beiramali Kivi, F., Sabokkhiz, F., Amirahmadi, A., Ghahroudi Tali, M., & Jamalabadi, J. (2022). Investigation of sedimentary environment changes in Quaternary deposits of Mahdasht alluvial fan. *Geographical Research*, 37(2), 285–293. http://georesearch.ir/article-1-1247-fa.html. [In Persian]

Blair, T.C., & McPherson, J.G. (1994). Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research*, A64, 450–489.

Blatt, H., Middleton, G., & Murray, R. (1980). Origin of sedimentary rocks (2nd ed.). Englewood Cliffs, NJ: rentice-Hall. Doi: 10.1306/D42681B2-2B26-11D7-8648000102C1865D

Bowles, J.E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

Bull, W.B. (1977). The alluvial fan environment. *Progress in Physical Geography*, 1, 222–270. https://doi.org/10.1177/030913337700100202

Das, B.M., & Sivakugan, N. (2007). Settlements of shallow foundations on granular soil: An overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1, 19–29. DOI:10.3328/IJGE.2007.01.01.19-29

Gorabi, A., & Karimi, M. (2012). Impact of active tectonics and climate change on Marvast alluvial fan, Central Iran. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 12(27), 7–30. http://jgs.khu.ac.ir/article-1-671-fa.html [In Persian]

Harvey, A.M., Mather, A.E., & Stokes, M. (2005). Alluvial fans: Geomorphology, sedimentology and dynamics – Introduction. In A.M. Harvey, A.E. Mather & M. Stokes (Eds.), Alluvial Fans: Geomorphology, Sedimentology and Dynamics (pp. 1–7). London: Geological Society, Special Publication 251.

Jakob, M., & Hungr, O. (Eds.). (2005). Debris flow hazards and related phenomena. Heidelberg: Springer.

Jakob, M., Bale, S., McDougall, S., & Friele, P. (2016). Regional frequency–magnitude curves for debris flows and debris floods. In GeoVancouver 2016: 69th Canadian Geotechnical Conference. Canadian Geotechnical Society. https://doi.org/10.1002/esp.4942

Kaliakin, V.N. (2017). *Example problems related to compressibility and settlement of soils*. In V.N. Kaliakin (Ed.), Soil Mechanics: Calculations, Principles, and Methods (pp. 331–376). Butterworth-Heinemann. Doi: 10.1016/B978-0-12-804491-9.00008-2

Leeder, M. (2011). *Sedimentology and sedimentary basins: From turbulence to tectonics* (2nd ed.). Chichester: Wiley-Blackwell.

Maqsoudi, M., Bagheri-Sedshokri, S., & Minaii, M. (2009). Evaluation of tectonic role on appearing and change of alluvial fans (case study: Ghalajeh syncline). *Geography and Regional Development*, 7(12), 99–124. https://doi.org/10.22067/geography.v7i12.8930 [In Persian]

Maqsoudi, M., Fazeli-Neshli, H., Azizi, Gh., Gilmore, G., & Schmitt, A. (2012). Geoarchaeology of alluvial fans: A case study from Jajroud and Hajiarab alluvial fans, Iran. *Physical Geography Research*, 44(4), 1–22. DOI: 10.22059/jphgr.2012.30239 [In Persian]

Maqsoudi, M., & Mohammadnejad-Arogh, V. (2011). *Geomorphology of alluvial fans. Tehran: University of Tehran Press*. [In Persian]

Moussavi-Harmi, R. (1988). *Sedimentology. Astan Quds Razavi Publications*. https://digital.aqr.ir/newindex [In Persian]

Mokhtari, D., Karami, F., & Bayati Khatibi, M. (2007). Differential features of alluvial fans controlled by Quaternary tectonic activities around Misho-Dagh mountainous area (NW Iran). *Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 11, 257–292. https://hsmsp.modares.ac.ir/article_14210.html. [In Persian]

Oguchi, T., Saito, K., Kadomura, H., & Grossman, M. (2001). Fluvial geomorphology and paleohydrology in Japan. *Geomorphology*, 39, 2–19. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00048-4

Rajabi, M., Mokhtari, D., & Hashemian, M.A. (2019). Analysis of quantitative relationship between alluvial-fan volume and active tectonics (case study: northern Bozqush slopes). *Geography and Planning*, 23(70), 123–143. https://doi.org/10.22108/gep.2018.98317.0 [In Persian]

Saito, K., & Oguchi, T. (2005). Slope of alluvial fans in humid regions of Japan, Taiwan and the Philippines. *Geomorphology*, 70(1–2), 147–162. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.04.006

Salahudeen, A.B., & Sadeeq, J.A. (2016). Evaluation of bearing capacity and settlement of foundations. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 29, 93–114.

Taghian, A., & Malekzadeh, F. (2022). Evaluation of neotectonic activity in catchment developments: Southern Karkas Mountain watersheds. *Physical Geography Research*, 54(2), 151–167. DOI: 10.22059/jphgr.2021.254527.1007197 [In Persian]

Yamani, M., & Maqsoudi, M. (2003). Study and evolution of braided channels on alluvial fans: A case study of Tangouiyeh fan, Sirjan Basin. *Geographical Research Quarterly*, 35(2), 103–113. https://sid.ir/paper/5469/fa [In Persian]

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

## پیوست ۱. نتایج نمونه‌گیری

| ضخامت لایه رسی | ضخامت لایه ماسه | ضخامت لایه شنی | فاصله به کیلومتر | میزان نشست به cm برای پی مربعی با عرض ۱۲متر | مقدار نشت با مدول الاستیسیته | ردیف |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۰ | ۲۵ | ۰/۲۲۸ | ۱/۴۹ | ۶۴۳ | ۱ |
| ۵ | ۴ | ۱۶ | ۰/۶۳۳ | ۱/۸۲ | ۵۲۵ | ۲ |
| ۸ | ۴ | ۱۴ | ۰/۸۵۵ | ۱/۹۸ | ۴۸۴ | ۳ |
| ۱ | ۰ | ۲۴ | ۰/۵۸ | ۲/۱۵ | ۴۴۵ | ۴ |
| ۳ | ۶ | ۱۷ | ۰/۸۶ | ۱/۹۷ | ۴۸۷ | ۵ |
| ۶ | ۴ | ۱۵ | ۰/۷۴۱ | ۱/۸ | ۵۳۳ | ۶ |
| ۲ | ۴ | ۱۹ | ۰/۲۹۷ | ۱/۸۵ | ۵۱۸ | ۷ |
| ۷ | ۵ | ۱۲ | ۰/۶۳۸ | ۲/۰۵ | ۴۶۸ | ۸ |
| ۱۱ | ۷ | ۸ | ۰/۹۰۱ | ۲/۶۶ | ۳۶۰ | ۹ |
| ۷ | ۶ | ۱۲ | ۲/۳۱۹ | ۲/۳۴ | ۴۰۹ | ۱۰ |
| ۱۴ | ۵ | ۶ | ۲/۵۰۱ | ۳/۵۴ | ۲۷۱ | ۱۱ |
| ۸ | ۶ | ۱۱ | ۱/۳۹۸ | ۲/۹۵ | ۳۲۵ | ۱۲ |
| ۴ | ۲ | ۱۹ | ۰/۸۳۱ | ۱/۷۵ | ۵۴۶ | ۱۳ |
| ۲ | ۵ | ۱۸ | ۰/۱۳۹ | ۱/۶ | ۶۰۰ | ۱۴ |
| ۴ | ۸ | ۱۳ | ۰/۹۷۸ | ۱/۸ | ۵۳۱ | ۱۵ |
| ۱۱ | ۴ | ۱۰ | ۰/۸ | ۲/۲۸ | ۴۱۹ | ۱۶ |
| ۱۲ | ۶ | ۷ | ۰/۹۳۵ | ۲/۵۹ | ۳۶۹ | ۱۷ |
| ۱۰ | ۵ | ۱۰ | ۱/۵۶۹ | ۳/۴۷ | ۲۷۶ | ۱۸ |
| ۱۴ | ۶ | ۵ | ۲/۰۱۳ | ۴/۰۱ | ۲۳۹ | ۱۹ |
| ۱۳ | ۵ | ۷ | ۲/۰۳۳ | ۳/۶۹ | ۲۶۰ | ۲۰ |
| ۱۳ | ۷ | ۵ | ۲/۱۹۷ | ۴/۳۹ | ۲۱۸ | ۲۱ |
| ۱۴ | ۷ | ۴ | ۲/۳۱۶ | ۴/۳۹ | ۲۱۸ | ۲۲ |
| ۲۰ | ۳ | ۲ | ۲/۶۲۹ | ۴/۳۱ | ۲۲۲ | ۲۳ |
| ۲۲ | ۲ | ۱ | ۲/۸۹۳ | ۴/۸۱ | ۱۹۹ | ۲۴ |
| ۲۱ | ۴ | ۰ | ۲/۹۸۱ | ۵/۳۵ | ۱۷۹ | ۲۵ |
| ۲۳ | ۰ | ۲ | ۲/۷۶۵ | ۴/۶۹ | ۲۰۴ | ۲۶ |
| ۲۵ | ۰ | ۰ | ۳/۶۶۲ | ۵/۹۷ | ۱۶۰ | ۲۷ |
| ۱۸ | ۴ | ۳ | ۳/۵۱۶ | ۵/۱۵ | ۱۸۶ | ۲۸ |
| ۲۴ | ۰ | ۱ | ۳/۸۵۳ | ۴/۸ | ۱۹۹ | ۲۹ |
| ۱۴ | ۵ | ۶ | ۲/۹۲۲ | ۵/۰۳ | ۱۹۰ | ۳۰ |
| ۲۳ | ۵ | ۲ | ۳/۵۵۸ | ۶/۵۳ | ۱۴۷ | ۳۱ |
| ۷ | ۱ | ۱۷ | ۰/۴۶۹ | ۱/۷۷ | ۵۴۱ | ۳۲ |
| ۲ | ۷ | ۱۶ | ۰/۳۶ | ۲/۰۳ | ۴۷۱ | ۳۳ |
| ۱۲ | ۵ | ۸ | ۰/۹۱۷ | ۲/۷۴ | ۳۵۰ | ۳۴ |
| ۶ | ۵ | ۱۴ | ۱/۰۳۸ | ۳/۵۳ | ۲۷۱ | ۳۵ |
| ۴ | ۶ | ۱۵ | ۰/۴۵۸ | ۲/۱۲ | ۴۵۱ | ۳۶ |
| ۷ | ۲ | ۱۶ | ۰/۹۵ | ۲/۲۱ | ۴۳۴ | ۳۷ |
| ۹ | ۴ | ۱۲ | ۰/۹۲۳ | ۳/۰۶ | ۳۱۳ | ۳۸ |
| ۵ | ۴ | ۱۶ | ۱/۱ | ۲/۷۴ | ۳۵۰ | ۳۹ |
| ۷ | ۳ | ۱۵ | ۱/۷۳۶ | ۳/۳۵ | ۲۸۶ | ۴۰ |

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۲ | ۲ | ۱۱ | ۲/۱۳۹ | ۳/۸۴ | ۲۴۹ | ۴۱ |
| ۱۴ | ۴ | ۷ | ۱/۲۶۸ | ۳/۵۹ | ۲۶۷ | ۴۲ |
| ۸ | ۳ | ۱۴ | ۱/۹۴ | ۲/۴۵ | ۳۹۱ | ۴۳ |
| ۱۰ | ۶ | ۹ | ۱/۵۱ | ۳/۴۵ | ۲۷۸ | ۴۴ |
| ۱۱ | ۲ | ۱۲ | ۰/۹۵۶ | ۲/۱۱ | ۴۵۵ | ۴۵ |
| ۸ | ۲ | ۱۵ | ۱/۱۱۷ | ۲/۲۴ | ۴۲۸ | ۴۶ |
| ۱۰ | ۴ | ۱۱ | ۱/۷۶۶ | ۲/۰۹ | ۴۵۷ | ۴۷ |
| ۱۵ | ۳ | ۷ | ۱/۴۶۲ | ۲/۷۱ | ۳۵۴ | ۴۸ |
| ۱۲ | ۳ | ۱۰ | ۱/۳۵۸ | ۲/۳۱ | ۴۱۴ | ۴۹ |
| ۱۲ | ۰ | ۱۳ | ۱/۶۹۱ | ۲/۵ | ۳۸۳ | ۵۰ |
| ۱۴ | ۱ | ۱۰ | ۱/۲۶۵ | ۲/۸۴ | ۳۳۷ | ۵۱ |
| ۹ | ۱ | ۱۵ | ۱/۰۹۴ | ۲/۳۴ | ۴۱۰ | ۵۲ |
| ۱۵ | ۳ | ۷ | ۳/۲۵۲ | ۳/۳۲ | ۲۸۸ | ۵۳ |
| ۱۶ | ۱ | ۸ | ۰/۴۶ | ۴/۰۱ | ۲۳۹ | ۵۴ |
| ۴ | ۴ | ۱۷ | ۰/۴۹۲ | ۲/۲۶ | ۴۲۴ | ۵۵ |
| ۷ | ۰ | ۱۸ | ۰/۵۷۲ | ۲/۲۱ | ۴۳۴ | ۵۶ |

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی