https://gep.ui.ac.ir/?lang=en
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 33, Issue 3, No.87, Autumn 2022, pp. 1- 4
Received: 19/02/2022 Accepted: 08/05/2022

Geochemistry, Mineralogy, and Environmental Interpretation of Vesicular Horizons in the Soils of the Segzi Region, Eastern Isfahan

Omid Bayat [1], Alireza Karimi [2]*
1- MA, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
omid.bayat@gmail.com

2- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
karimi-a@um.ac.ir

Extended Abstract
Introduction
Vesicular horizons are common on the surface of landforms in arid regions and play an important role in the hydrological properties and pedogenic processes in these areas. Vesicular pores are a characteristic feature of vesicular horizons and include separate pores with spherical to elliptical shapes and dimensions of micrometers to millimeters in diameter (Dietze et al., 2012). The eastern region of Isfahan located in the eastern part of the Zayandehroud River basin is affected by environmental disasters due to severe environmental drought, destructive human activities, and desertification processes. Although vesicular horizons are frequent in the soils and landforms of the eastern region of Isfahan (Bayat et al., 2018), there is no information about the geochemical and mineralogical properties of these horizons. The aim of the present study was to investigate the physical, chemical, geochemical, and mineralogical properties of vesicular horizons at different elevation levels of three landforms in the eastern region of Isfahan.

Keywords: Aeolian Processes, Dust Addition, Alluvial Fan, Bulk Mineralogy.

Materials and Methods
The study area is located in the center of Iran, east of Isfahan and around Segzi Playa. According to the meteorological stations of the region, the mean annual precipitation and temperature are about 107 mm and roughly 15 ˚C, respectively. Groundwater in piedmonts and plateaus of the region is deep and there are no signs of groundwater activity in the studied soils and landforms. The studied landforms include a remnant paleosurface across the Zayandehroud River (RP), a pediment in Jey industrial city (JP), and an alluvial fan near the Zefreh (ZA). Seven samples of vesicular horizons were taken from vesicular horizons in RP (at altitudes of 1542 and 1552 m), ZA (altitudes of 1623, 1764, and 1901 m), and JP (at altitudes of 1542 and 1557 m) landforms. The samples were described according to

*Corresponding Author
Bayat, O., Karimi, A. (2022). Geochemistry, mineralogy and environmental interpretation of vesicular horizons in the soils of the Segzi region, eastern Isfahan. *Geography and Environmental Planning*, 33 (3), 1 - 4.

http://dx.doi.org/10.22108/gep.2022.132727.1492 20.1001.1.20085362.1401.33.3.5.7

Schoenberger (2012) and analyzed regarding standard methods (Soukup et al., 2008; Soil Survey Staff, 2014).

Results and Discussion

The thickness of the studied vesicular horizons varied in the range of 3-6 cm, and on the alluvial fan, the thickness of the horizon increases with increasing the elevation. The chemical properties of the studied samples indicated very low electrical conductivity and organic carbon content and were similar to vesicular horizons in the Mojave Desert of California (McFadden et al., 1998). The particle size distribution indicated the predominance of sand particles in all samples and all samples were characterized by a bimodal distribution of particle sizes suggesting the contribution of at least two mechanisms in the transfer of particles to the studied vesicular horizons (Karimi et al., 2017; Sweeney et al., 2013). Mineralogical analysis of the samples showed the predominance of quartz and calcite in all samples and varied concerning the presence of mica and fibrous minerals. It seems that quartz is inherited from the parent material while calcite and mica minerals originated from the parent material and were also added by the wind. Fibrous minerals were probably of autogenic origin. The geochemical properties of the samples were consistent with the mineralogical results and showed the abundance of SiO_2 and CaO in all samples. Among the trace elements, the highest abundance is observed in the strontium, which is due to the association of this element with carbonates (Ding et al., 2019). A comparison of geochemical properties of vesicular horizons with associated rocks showed the enrichment of SO_3 and CaO relative to corresponding parent material indicating the addition of soluble ions, carbonates, and especially gypsum to the surface of the studied landforms. The Zr/Al ratio showed an increasing trend with increasing the silt content which proved the aeolian source of the silt particles as previous studies have shown a very strong correlation between aeolian sediments and the element zirconium (e.g., Waroszewski et al., 2018).

Conclusions

Increasing the amount of silt and the ratio of fine-grained particles to sand with increasing the elevation indicated the role of aeolian processes in adding fine-grained particles to the surfaces of different landforms of eastern Isfahan. Mineralogical and geochemical evidence also confirms the effect of dust on the formation of these horizons, so that the addition of mica minerals along with silt particles has occurred at higher altitudes. The geochemical study of vesicular horizons and application of Zr/Al ratios show that the composition of past and current dust in eastern Isfahan was the origin of dust for different landforms of the region is the same.

Finally, the existence of developed vesicular horizons in the surfaces of the landforms of the region demonstrates long-term processes of wind erosion and dust influx into the soils. These natural processes are probably intensified by anthropogenic activities in recent years.

References

- Anderson, K., Wells, S., & Graham, R. (2002). Pedogenesis of vesicular horizons, Cima volcanic field, Mojave Desert, California. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(3), 878-887.
- Bayat, O., Karimzadeh, H. R., Eghbal, M. K., Karimi, A., & Amundson, R. (2018). Calcic soils as indicators of profound Quaternary climate change in eastern Isfahan, Iran. *Geoderma*, *315*, 220-230.
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (2009). Processes and forms of alluvial fans. In A.J. Parsons and A. D. Abrahams (Eds.) *Geomorphology of Desert Environments* (pp. 413-466). Springer, Berlin, Germany.
- Brown, K. J., & Dunkerley, D. (1996). The influence of hillslope gradient, regolith texture, stone size and stone position on the presence of a vesicular layer and related aspects of hillslope hydrologic processes: A case study from the Australian arid zone. *Catena*, *26*(1-2), 71-84.
- Carolin, S. A., Walker, R. T., Day, C. C., Ersek, V., Sloan, R. A., Dee, M. W., Talebian, M., & Henderson, G. M. (2019). Precise timing of abrupt increase in dust activity in the Middle East coincident with 4.2 ka social change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(1),

67-72.
- Chen, B., Yang, X., Jiang, Q., Liang, P., Mackenzie, L. L., & Zhou, Y. (2022). Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin Sandy Land, northern China: Implications for weathering, recycling, and provenance. *Catena*, *208*, 105769.
- Dietze M., Bartel, S., Lindner, M., & Kleber, A. (2012). Formation mechanisms and control factor of vesicular soil structure. *Catena*, *99*, 83-96.
- Ding, M., Peng, S. M., Zhang, W., Zhao, Q., Mao, L., Yang, J., & Zhang, L. (2019). Distribution of trace elements in Holocene loess-paleosol sequence and environmental change in lower reaches of the yellow river. *Journal of Earth and Environmental Science*, *237*(3), 032052.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis, In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods* (pp. 383-412). Second Edition. Soil Science Society of America, Book Series No. 5. SSSA and ASA, Madison, Wisconsin, USA.
- Gerson, R., & Amit, R. (1987). Rates and modes of dust accretion and deposition in an arid region-the Negev, Israel. In L.E. Frostick and I. Reid (Eds.), *Desert Sediments: Ancient and Modern* (pp. 157-169). Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Gheysari, F., Ayoubi, S., & Abdi, M. R. (2016). Using Cesium-137 to estimate soil partivle redistribution by wind in an arid region of central Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, *5*(4), 285-293.
- Han, F. X., & Singer, A. (2007). *Biogeochemistry of trace elements in arid environments.* Springer.
- Harris, W., & White, G. N. (2008). X-ray diffraction techniques for soil mineral identification, In A.L. Ulery and R. Drees (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 5- Mineralogical Methods* (pp. 81-115). Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Jones, S., Arzani, N., & Allen, M. B. (2014). Tectonic and climatic controls on fan systems: The Kohrud mountain belt, central Iran. *Journal of Sedimentary Geology*, *302*, 29-43.
- Karimi, A., Khormali, F., & Wang, X. (2017). Discrimination of sand dunes and loess deposits using grain-size analysis in northeastern Iran. *Arabian Journal of Geoscience*, *10*(12), 1-13.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods*. Second Edition. (pp. 961-1010). Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- May, J. H., Wells, S. G., Cohen, T. J., Marx, S. K., Nanson, G. C., & Baker, S. E. (2015). A soil chronosequence on Lake Mega-Frome beach ridges and its implications for late Quaternary pedogenesis and paleoenvironmental conditions in the drylands of southern Australia. *Quaternary Research*, *83*(1), 150-165.
- McFadden, L. D., McDonald, E. V., Wells, S. G., Anderson, K., Quade, J., & Forman, S. L. (1998). The vesicular layer and carbonate collars of desert soils and pavements: Formation, age, and relation to climate change. *Journal of Geomorphology*, *24*(2-3), 101-145.
- McFadden, L. D., Wells, S. G., & Jercinovich, M. J. (1987). Influences of eolian and pedogenic processes on the origin and evolution of desert pavements. *Journal of Geology*, *15*(6), 504-508.
- Mohammed, A., Hirmas, D., Nemes, A., & Giménez, D. (2020). Exogenous and endogenous controls on the development of soil structure. *Geoderma*, *357*, 113945.
- Neaman, A., & Singer, A. (2011). The effects of palygorskite on chemical and physico-*chemical* properties of soils. In E. Galan. & A. Singer (Eds.), *Developments in Palygorskite-sepiolite Research* (pp. 325-349). Developments in Clay Science, Vol. 3, Elsevier, the Netherlands.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods*. Second Edition. (pp. 961-1010). Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA
- Omran, E. E. (2016). A simple model for rapid gypsum determination in arid soils. *Journal of Modelling Earth Systems and Environment*, *2*(4), 1-12.
- Schaetzl, T. J., & Thompson, M. L. (2015). *Soils Genesis and Geomorphology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Scheib, A. J., Birke, M., & Dinelli, E. (2013). Geochemical evidence of aeolian deposits in European

soils. *Boreas*, *43*(1), 175-192.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., &Benham, E. C. (2012). *Field book for describing and sampling soils.* Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Soil Survey Staff. (2014) *Kellogg soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (Ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Soukup, D. A., Buck, B. J., & Harris, W. (2008). Preparing soils for mineralogical analyses. In A. L. Ulery & R. Drees (Eds.), *Methods of soil analysis, part 5- mineralogical methods* (pp. 13-31). Soil science society of America, Madison, USA.
- Sweeney, M. R., McDonald, E. V., & Markley, C. E. (2013). Alluvial sediment or playas: What is the dominant source of sand and silt in desert soil vesicular a horizons, southwest USA. *Journal of Geophysical Research*, *118*(1), 257-275.
- Thomas, G. W. (1996). *Soil pH and soil acidity, methods of soil analysis; Part 3 Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series.
- Toomanian, N., & Salami, H. R. (2020). Structural evolution of the Zayandeh-rud river basin based on historical climate changes. In S. Mohajeri, L. Horlrman, A. A. Besalatpour & W. Raber (Eds.), *Standing up to Climate Change*, (pp. 199-224). Springer, Cham, Switzerland.
- Turk, J., & Graham, R. C. (2011). Distribution and properties of vesicular horizons in the western United States. *Soil Science Society of America Journal*, *75*, 1449-1461.
- Waroszewski, J., Sprafke, T., Kabala, C., Musztyfaga, E., Labaz, B., & Wozniczka, P. (2018). Aeolian silt contribution to soils on mountain slopes (Mt. Sleza, southwest Poland). *Journal of Quaternary Research*, *89*(3), 702-717.
- Young, M. H., McDonald, E. V., Caldwell, T. G., Benner, S. G., & Meadows, D. (2004). Hydraulic properties of a desert chronosequence in the Mojave Desert, USA. *Vadose Zone Journal*, *3*(3), 956-963.

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی
سال ۳۳، پیاپی ۸۷، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۱، ص ٤۲- ۲۱
وصـول: ۱٤۰۰/۱۱/۳۰ پـذیرش: ۱٤۰۱/۲/۱۸

مقاله پژوهشی

ژئوشیمی، کانی‌شناسی و تفسیر محیطی افق‌های وزیکولار در خاک‌های منطقهٔ سگزی، شرق اصفهان

امید بیات، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
omid.bayat@gmail.com
علیرضا کریمی *، استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
karimi-a@um.ac.ir

چکیده

افق‌های وزیکولار در سطح لندفرم‌های مناطق خشک معمول هستند و نقش مهمی در ویژگی‌های چرخهٔ هیدرولوژی و فرایندهای پدوژنیک در این مناطق دارند. بر این اساس هدف پژوهش حاضر، بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی افق‌های وزیکولار در سطوح مختلف ارتفاعی سه لندفرم در ناحیهٔ شرق اصفهان در اطراف پلایای سگزی است. لندفرم‌های مطالعه‌شده شامل یک سطح قدیمی باقی‌مانده در امتداد رودخانهٔ زاینده‌رود (RP)، یک پدیمنت در شهرک صنعتی جی (JP) و یک مخروط‌افکنه در نزدیکی زفره (ZA) هستند. برای انجام پژوهش، هفت نمونه از افق‌های وزیکولار شامل دو نمونه در RP و دو نمونه در JP و سه نمونه در ZA در سطوح ارتفاعی مختلف برداشت شد. ضخامت افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده در دامنهٔ ۳- ٦ سانتی‌متر متغیر بود. همهٔ نمونه‌ها توزیع دونمایی در بخش شن و سیلت داشتند که نشان‌دهندهٔ مشارکت دست‌کم دو فرایند در انتقال ذرات در تشکیل این افق‌ها بود. کوارتز و کلسیت در همهٔ نمونه‌ها غالب بودند، ولی ازنظر وجود میکا و کانی‌های فیبری تفاوت داشتند. مقایسهٔ ویژگی‌های ژئوشیمیایی افق‌های وزیکولار با سنگ‌های همراه نشان‌دهندهٔ غنی‌شدن SO_3 و CaO نسبت به مادهٔ مادری متناظر آنها بود که با افزودن املاح محلول، کربنات‌ها و به‌ویژه گچ به سطح لندفرم‌ها توسط فعالیت‌های بادرفتی ارتباط داشت. نسبت Zr/Al_2O_3 با افزایش مقدار سیلت، روند افزایشی داشت که منبع بادرفتی ذرات سیلت را ثابت می‌کند. وجود افق‌های وزیکولار توسعه‌یافته در سطوح لندفرم‌های منطقه نشان‌دهندهٔ فرایندهای طولانی‌مدت فرسایش بادی و رسوب‌گذاری غبار در این منطقه است که این فرایند طبیعی به‌واسطهٔ فعالیت‌های انسانی در سال‌های اخیر تشدید شده‌است.

واژه‌های کلیدی: فرایندهای بادرفتی، ریزش گرد و غبار، مخروط‌افکنه، کانی‌شناسی کل

---

*نویسنده مسؤول

بیات, امید, کریمی, علیرضا. (۱٤۰۱). ژئوشیمی، کانی شناسی و تفسیر محیطی افق‌های وزیکولار در خاک‌های منطقه سگزی، شرق اصفهان. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۳ (۳)، ٤۲- ۲۱.

http://dx.doi.org/10.22108/gep.2022.132727.1492
20.1001.1.20085362.1401.33.3.5.7

مقدمه

افق‌های وزیکولار معمولاً در زیر سنگ‌فرش بیابانی خاک‌های مناطق خشک دنیا تشکیل می‌شوند و نقش مهمی در ویژگی‌های هیدرولوژیک و تکامل پدوژنیک خاک‌های مناطق خشک دارند. تکامل افق‌های وزیکولار طی زمان سبب تشکیل سله و کاهش چشمگیر ظرفیت نفوذپذیری خاک‌ها، تشدید خشکی هیدرولوژیک برای گیاهان، ایجاد رواناب سطحی و تأثیر بر فرایندهای ژئومورفیک در مناطق خشک می‌شود (McFadden et al., 1987; Young et al., 2004; Turk and Graham, 2011). منافذ وزیکولی از ویژگی‌های مشخصهٔ این افق‌هاست که منافذی جدا از هم با شکل‌های کروی تا بیضوی و با ابعادی در اندازهٔ میکرومتر تا میلی‌متر هستند (Dietze et al., 2012). مطالعات نشان داده که ساختار وزیکولی منافذ در افق‌های وزیکولار با چندین فرایند حاصل شده‌است؛ شامل اول، به‌دام افتادن هوا و جابه‌جایی ذرات خاک طی خیس‌شدن خاک، دوم، گرم‌شدن هوای زیر سنگ‌فرش بیابانی و آزادشدن گاز دی‌اکسیدکربن در اثر گرم‌شدن خاک‌های آهکی، سوم، آزادشدن دی‌اکسیدکربن به دلیل تنفس خاک و چهارم، تکرار وقایع خیس‌شدن و خشک‌شدن یا انجماد و ذوب (McFadden et al., 1987; Turk and Graham, 2011). مقادیر زیاد ذرات شن در افق وزیکولار سبب ایجاد منافذ وزیکولی بزرگ‌تر و گردتر می‌شود؛ در حالی که کربنات کلسیم اثر معکوس دارد (Dietze et al., 2012). به‌طورکلی تکامل افق‌های وزیکولار با تشکیل منافذ حباب‌مانند وزیکولی و سپس با بزرگ‌شدن و اتصال منافذ و درنهایت با تخریب منافذ وزیکولی و تشکیل ساختمان ستونی و صفحه‌ای در خاک رخ می‌دهد (Young et al., 2004; Mohammed et al., 2020).

مطالعهٔ روند تکاملی افق‌های وزیکولار در مناطق خشک جنوب استرالیا نشان داد که تکامل این افق‌ها به‌طور مستقیم به شیب اراضی و ابعاد سنگ‌ریزه‌ها بستگی دارد و اراضی با شیب کمتر و سنگ‌ریزه‌های کوچک‌تر، افق‌های وزیکولار تکامل‌یافته‌تری دارند (Brown and Dunkerley, 1996). ریشهٔ گیاهان نیز بر منافذ وزیکولی شدیداً مؤثر است و مهم‌ترین عامل محدودکنندهٔ منافذ وزیکولی در خاک محسوب می‌شود. ریشه‌ها با جذب آب و ایجاد مسیر ترجیحی برای جریان آب، ایجاد مسیر برای خروج هوا طی گسترش جبههٔ رطوبتی و تخریب فیزیکی منافذ طی رشد سبب تخریب منافذ وزیکولی می‌شوند و بنابراین افق‌های وزیکولار بیشتر در مناطق خشک با پوشش پراکندهٔ گیاهی و بارش سالانهٔ کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر مشاهده می‌شوند (Dietze et al., 2012).

افق‌های سطحی وزیکولار هنوز به‌عنوان یک افق مشخصهٔ اصلی یا یک ویژگی حاصل از فرایند خاک‌سازی در سامانهٔ رده‌بندی خاک آمریکایی (Schoenberger et al., 2012) معرفی نشده‌اند؛ با این حال این افق با نماد Av و در مواردی با عنوان یک افق اصلی با علامت V و در صورتی که حاوی کربنات‌های ثانویه باشد، با علامت Avk (McFadden et al., 1998; May et al., 2015) و در صورت تجمع رس با علامت Avt (Anderson et al., 2002) نمایش داده می‌شود. تجمع کربنات‌های ثانویه و رس در افق‌های وزیکولار به افزایش پایداری و مقاومت این افق‌ها درمقابل فرایندهای تخریب منجر می‌شود (Anderson et al., 2002; Dietze et al., 2012).

منطقهٔ شرق اصفهان در بخش شرقی حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زاینده‌رود و در فلات مرکزی ایران قرار گرفته و در حال حاضر به دلیل خشکی شدید محیطی، فعالیت‌های انسانی مخرب و بیابان‌زایی، وضعیت زیست‌محیطی آن

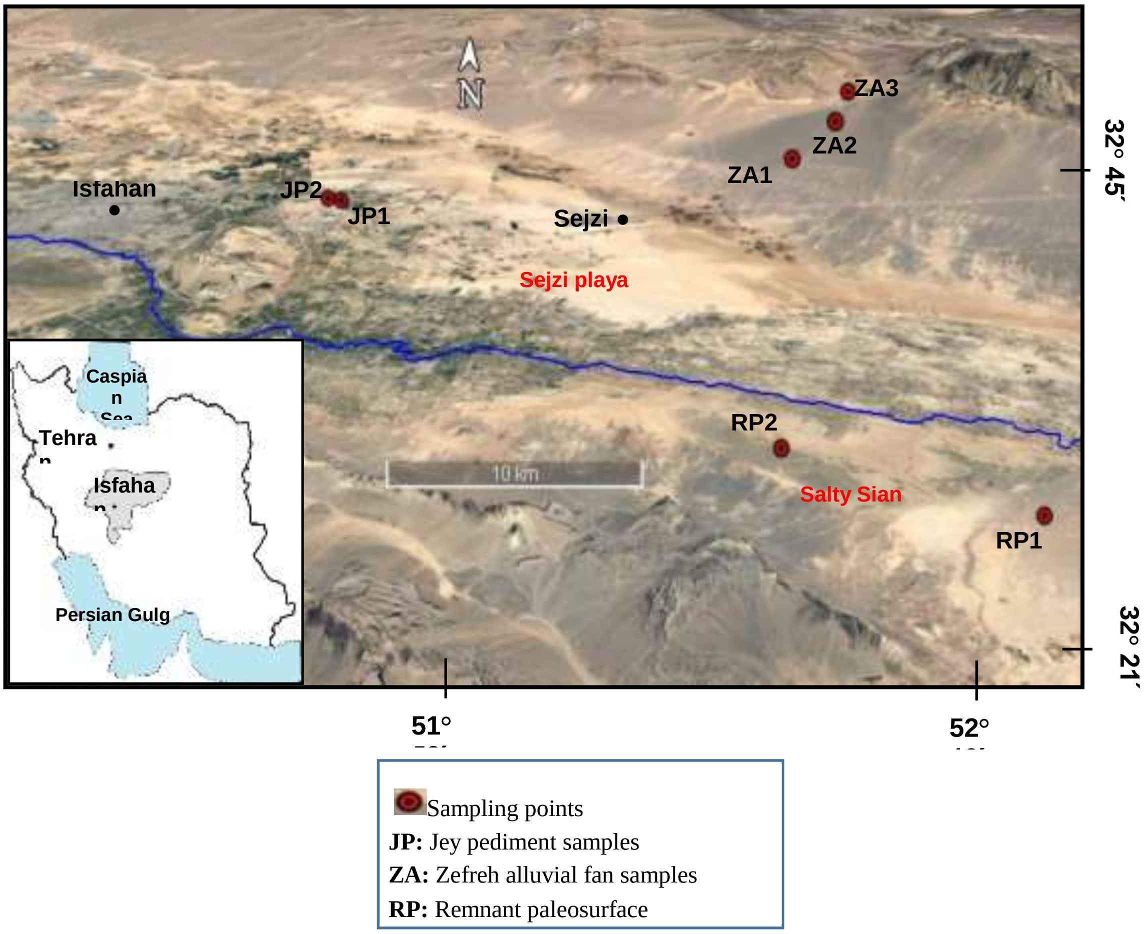
به‌شدت بحرانی است. منطقهٔ سگزی در شرق اصفهان به دلیل شرایط خاص توپوگرافی و اکولوژی در حال حاضر یکی از کانون‌های بحران زیست‌محیطی و فرسایش بادی کشور محسوب می‌شود (بخشنده‌مهر و همکاران، ۱۳۹۲؛ پیری، ۱۳۹٦). با توجه به نزدیکی دشت سگزی به شهر اصفهان، شهرک‌های صنعتی و همچنین فرودگاه اصفهان و از سوی دیگر، وضعیت بحرانی فرسایش بادی و بیابان‌زایی در منطقه، مطالعات متعددی دربارهٔ بیابان‌زایی، تخریب اراضی و فرسایش خاک در این منطقه انجام شده‌است؛ ازجمله بررسی فرایندهای فرسایش بادی در منطقهٔ سگزی اصفهان با تله‌های نمونه‌بردار از ذرات غبار در ارتفاعات مختلف (کریم‌زاده، ۱۳۸۱)، کاربرد مدل‌های فرسایش بادی (اختصاصی و زارع چاهوکی، ۱۳۹۵)، استفاده از شبکهٔ باور بیزی (Bayesian belief network) (بوعلی و همکاران، ۱۳۹٦)، استفاده از غبارسنج دیجیتال (پیری، ۱۳۹٦) و استفاده از تکنیک سزیم–۱۳۷ (Gheysari et al., 2016). درمجموع وقوع فرایندهای بیابان‌زایی و فرسایش بادی در این منطقه عمدتاً به تأثیر فعالیت‌های مخرب انسانی (مانند زهکشی اراضی و کاهش رطوبت خاک، چرای بی‌رویه، برداشت غیراصولی گچ و استفادهٔ نامناسب از اراضی) (کریم‌زاده، ۱۳۸۱؛ پیری، ۱۳۹٦) به‌ویژه طی یکصد سال اخیر نسبت داده شده‌است (تومانیان و همکاران، ۱۳۸۷).

با وجود تشکیل افق‌های وزیکولار در سطح خاک‌ها و لندفرم‌های منطقهٔ شرق اصفهان (کریم‌زاده، ۱۳۸۱؛ بیات ۱۳۸٦) تاکنون مطالعهٔ جامعی دربارهٔ این افق‌ها در این کانون بحرانی زیست‌محیطی انجام نشده‌است. مطالعهٔ حاضر با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی افق‌های وزیکولار در سطوح ارتفاعی لندفرم‌های مختلف اطراف پلایای سگزی در منطقهٔ شرق اصفهان انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه

منطقهٔ مطالعه در مرکز ایران و در شرق شهر اصفهان و در اطراف پلایای سگزی قرار دارد (شکل ۱). شرق اصفهان از دیدگاه زمین‌شناسی، در زون سنندج– سیرجان واقع است (جعفریان، ۱۳٦۵) و ساختار کوه– دشت (Basin and Range) دارد که درنتیجهٔ فعالیت‌های کوه‌زایی دوران سوم و تا حدودی اوایل کواترنری است (جعفریان، ۱۳٦۵؛ کریم‌زاده، ۱۳۸۱؛ بیات، ۱۳۸٦). آخرین فاز رسوب‌گذاری مخروط‌افکنه‌ای در منطقهٔ شرق اصفهان طی دورهٔ مرطوب هولوسن ابتدایی تا میانی رخ داده‌است (Jones et al., 2014). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که منطقهٔ شرق اصفهان تغییرات محیطی بسیار شدیدی از میوسن تاکنون تجربه کرده‌است (تومانیان و همکاران، ۱۳۸۷؛ بیات و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین ترکیب ایزوتوپی کربنات‌های پدوژنیک در خاک‌های منطقه نشان می‌دهد تغییرات رطوبتی این منطقه با افزایش خشکی محیطی از پلیستوسن میانی تاکنون همراه بوده‌است (Bayat et al., 2018).



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مطالعه و محل نقاط نمونه‌برداری از افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده در اطراف پلایای سگزی، شرق اصفهان

Fig. 1. Location of study area and sampling points of vesicular horizons around the Segzi playa, eastern Isfahan

براساس آمار ایستگاه هواشناسی شرق اصفهان در بازهٔ زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۵، اقلیم فعلی منطقهٔ خشک و میانگین بارندگی و دمای سالانه به ترتیب حدود ۱۰۷ میلی‌متر و ۱۵/۳ درجهٔ سلسیوس است. جهت وزش باد غالب در منطقهٔ اصفهان در بیشتر ماههای سال غربی است؛ اما نکتهٔ بسیار مهم آن است که در ماههای گرم و خشک سال (خرداد–شهریور) جهت وزش باد غالب شرقی است که با توجه به خشک‌بودن سطح اراضی در این موقع از سال، امکان انتقال غبار از منطقهٔ شرق اصفهان به شهر اصفهان را ایجاد می‌کند (کریم‌زاده، ۱۳۸۱). سرعت آستانهٔ فرسایش بادی در دشت سگزی ۳/۵ متر بر ثانیه است و با وقوع بادهای با سرعت ۱۲ تا ۱۶ متر بر ثانیه امکان انتشار گرد و غبار تا شهر اصفهان وجود دارد (پیری، ۱۳۹۶).

پوشش گیاهی طبیعی منطقهٔ مطالعه‌شده بسیار پراکنده و عمدتاً شامل بوته‌های بیابانی با مسیر فتوسنتزی C3 است (بیات، ۱۳۸٦). کاربری اراضی دشت سگزی در حال حاضر شامل کشت آبی (عمدتاً گندم، جو و صیفی‌جات)، اراضی لخت و بدون استفاده (شوره‌زار)، اراضی مسکونی، شهرک‌های صنعتی، کوره‌های آجرپزی و گچ‌پزی و معادن شن

است. آب زیرزمینی در مخروط‌افکنه‌ها و فلات‌های منطقه عمیق است و اثری از فعالیت آب زیرزمینی در خاک‌ها و لندفرم‌های مطالعه‌شده مشاهده نشد.

مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

لندفرم‌های مطالعه‌شده شامل سطوح قدیمی باقی‌مانده در جنوب منطقه با شیب عمومی بسیار کم (بیات، ۱۳۸٦)، مخروط‌افکنهٔ زفره با میانگین شیب حدود ۲ درصد، شعاع حدود ٦/۳ کیلومتر و مساحت حدود ۳۰۹ کیلومترمربع و با غالب‌بودن سنگ‌های آتشفشانی بازالتی، آندزیتی و همچنین سنگ‌های دولومیتی در شمال شرق (Jones et al., 2014) و پدیمنت شهرک صنعتی جی در شمال غرب منطقهٔ مدنظر است (شکل ۱).

تعداد هفت نمونه از افق‌های وزیکولار شامل دو نمونه RP1 و RP2 از سطوح قدیمی باقی‌مانده در دو سطح ارتفاعی ۱۵۳۹ و ۱۵٤۹ متر، سه نمونه ZA1، ZA2 و ZA3 از مخروط‌افکنهٔ زفره در سه سطح ارتفاعی ۱٦۲۳، ۱۷٦٤ و ۱۹۰۱ متر و دو نمونه JP1 و JP2 از پدیمنت شهرک صنعتی در دو سطح ارتفاعی ۱٥٤۲ و ۱٥٥۷ متر برداشت شد. ویژگی‌های نقاط نمونه‌برداری در جدول ۱ آورده شده‌است. همچنین سنگ همراه با افق‌های وزیکولار برای آزمایش‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی انجام شد.

جدول ۱. ویژگی‌های مکانی و محیطی نقاط نمونه‌برداری از افق‌های وزیکولار در شرق اصفهان

Table 1. The geographic and environmental characteristics of the sampling points of vesicular horizon in eastern Isfahan

کد نمونه Sample code	طول جغرافیایی Latitude	عرض جغرافیایی Longitude	ارتفاع (متر) Elevation (m)	لندفرم Landform	زمین‌شناسی Geology
سطوح قدیمی باقی‌مانده Remnant paleosurface					
RP1	52 06 14E	32 26 31N	1542	Remnant of gravelly alluvial paleosurface	Coarse gravelly alluvial deposits
RP2	52 11 55E	32 24 19N	1552		
مخروط‌افکنهٔ زفره Zefreh alluvial fan					
ZA1	52 10 42E	32 45 10N	1623	Alluvial fan	Alluvial from cretaceous igneous rocks
ZA2	53 13 35E	32 48 58N	1764		
ZA3	52 15 06E	32 52 25N	1901		
پدیمنت شهرک صنعتی جی Jey pediment					
JP1	51 51 47E	32 40 55N	1542	Pediment	Alluvial from limestone and shale
JP2	51 51 04E	32 40 59N	1557		

وضعیت منافذ افق‌های وزیکولار مطابق با راهنمای تشریح خاک‌رخ (Schoenberger et al., 2012) بررسی و شاخص تکامل افق وزیکولار با استفاده از ضخامت و ویژگی‌های منافذ (ابعاد و فراوانی) مطابق با روش Turk and

Graham (2011) محاسبه شد. در این روش، نخست مشخصات منافذ خاک کمّی می‌شود و سپس اعداد به‌دست آمده پس از نرمال‌شدن، در ضخامت افق وزیکولار ضرب می‌شوند. به‌منظور دریافت جزئیات بیشتر دربارهٔ نحوهٔ محاسبهٔ این شاخص به منبع Turk and Graham (2011) مراجعه شود.

نمونه‌ها پس از برداشت از صحرا و انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک‌شدن، از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند. درصد حجمی سنگ‌ریزه (۲ میلی‌متر تا ۷/۵ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد. توزیع اندازهٔ ذرات به روش پیپت (Gee and Bauder, 1986) تعیین و جداسازی اجزای شن و سیلت به ترتیب به روش الک خشک و روش پیپت انجام شد. ذرات شن در پنج طبقه شن خیلی درشت (۱– ۲ میلی‌متر)، شن درشت (۰/۵– ۱ میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۲۵– ۰/۵ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۱– ۰/۲۵ میلی‌متر) و شن خیلی ریز (۰/۰۵– ۰/۱ میلی‌متر) و ذرات سیلت در سه طبقه سیلت درشت (۲۰– ۵۰ میکرون)، سیلت متوسط (۵– ۲۰ میکرون) و سیلت ریز (۲– ۵ میکرون) و رس (کمتر از ۲ میکرون) تفکیک شد. منحنی تجمعی ذرات برای افق‌های مطالعه‌شده با استفاده از مقادیر تجمعی ذرات و اندازهٔ ذرات در مقیاس فی (لگاریتم منفی قطر ذره در پایه ۲) رسم شد.

ویژگی‌های هدایت الکتریکی (EC) و واکنش خاک (pH) در نسبت ۲:۱ آب به خاک اندازه‌گیری شد (Thomas, 1996). مقدار کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996) و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Loeppert and Suarez, 1996) انجام شد. کانی‌شناسی کلی ذرات به روش پودری و با استفاده از روش تفرق اشعهٔ ایکس در زاویهٔ 2Θ بین ۲ تا ۸۰ درجه مطالعه (Soukup et al., 2008) و شناسایی کانی‌ها مطابق با روش‌های استاندارد و کاربرد نرم‌افزار Xpert highscore انجام شد (Harris and White, 2008). عناصر اصلی و کمیاب در نمونه‌های وزیکولار و همچنین سنگ‌های همراه به روش اسپکتروسکوپی فلورسنس اشعهٔ ایکس (X-ray fluorescence: XRF) اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های وزیکولار

افق‌های وزیکولار بررسی‌شده در زیر سنگ‌فرش بیابانی تشکیل شده‌اند (شکل ۲). سنگ‌ریزه‌ها در سطوح باقی‌ماندهٔ قدیمی شدیداً گرد شدند و در سطح مخروط‌افکنه‌ها ذرات زاویه‌دار بودند. مقادیر سنگ‌ریزه در سطوح باقی‌ماندهٔ قدیمی و پدیمنت شهرک صنعتی جی بیش از ۵۰ درصد و در مخروط‌افکنهٔ زفره کمتر و در دامنهٔ ۱۸ تا ۳۲ درصد بود (جدول ۲). وجود این سنگ‌ریزه‌ها سبب ایجاد زبری در سطح زمین و میکروتوپوگرافی در منطقه شده‌است (شکل ۲). وجود زبری سطحی می‌تواند سبب تلاطم در جریان هوا، جداسازی و رسوب‌گذاری ذرات غبار شود (Gerson and Amit, 1987; McFadden et al., 1998). ضخامت افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده در محدودهٔ ۳ تا ٦ سانتی‌متر در منطقه متغیر بود و روی مخروط‌افکنهٔ زفره با افزایش ارتفاع ضخامت افق بیشتر می‌شد (جدول ۲). ضخامت افق‌های وزیکولار معمولاً کم و در بیابان‌های جنوب غرب ایالات متحدهٔ آمریکا بین ۰/۵ تا ۸ سانتی‌متر (McFadden et al., 1992; Sweeney et al., 2013) و در جنوب استرالیا ۱/۵ تا ۵ سانتی‌متر گزارش شده‌است (May et al., 2015).

شکل ۲. سنگ‌فرش بیابان در سطح مخروط‌افکنهٔ زفره همراه با پوشش گیاهی بسیار کم و پراکنده (سمت راست)؛ افق وزیکولار تشکیل‌شده در زیر سنگ‌فرش بیابانی (سمت چپ)

Fig. 2. Desert pavement on the Zefreh alluvial fan (right-side image) with sparse vegetation; The vesicular horizon beneath the desert pavement (left-side image)

جدول ۲. بعضی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده

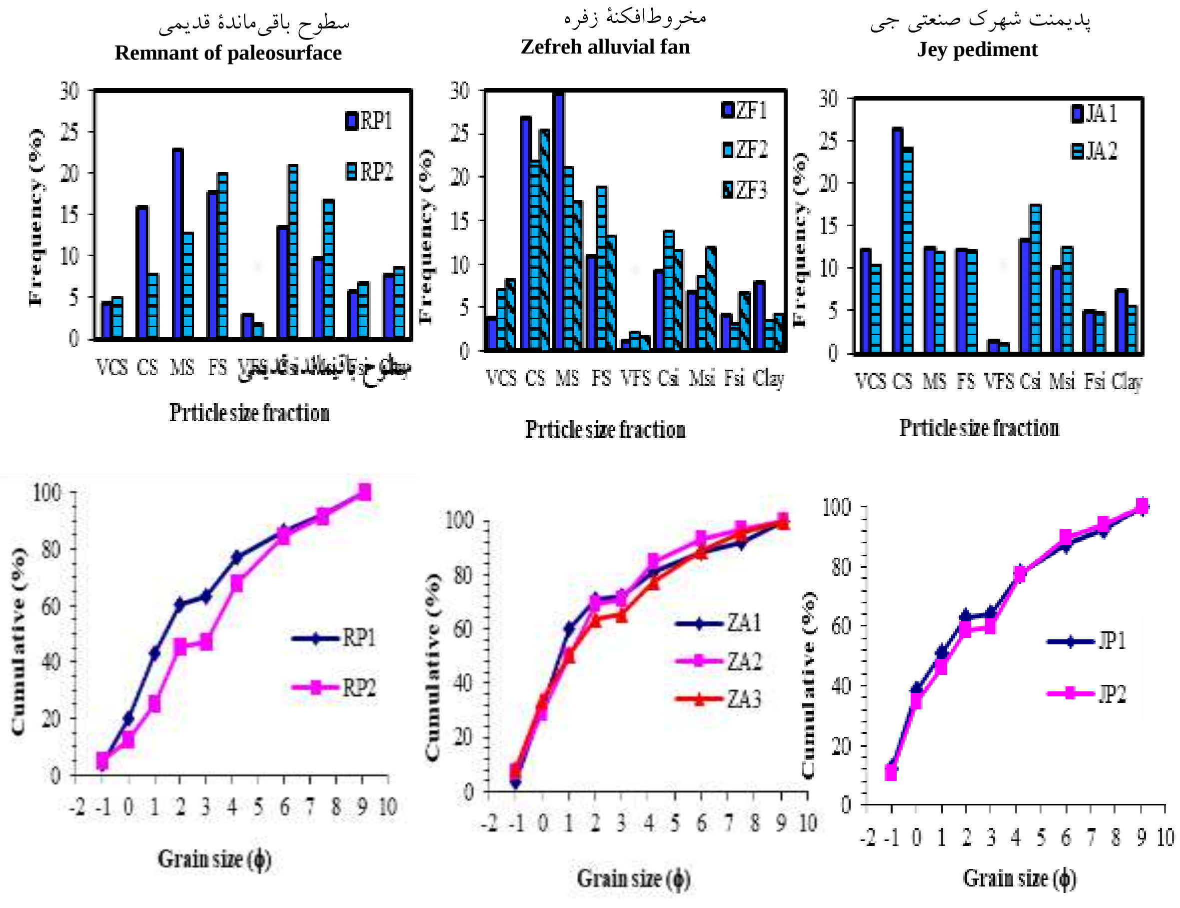
Table 2. Selected physical and chemical properties of the studied vesicular horizons

کد نمونه Sample code	ضخامت (سانتی‌متر) Thickness (cm)	pH		بافت Texture	(Si+C)/S	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	سنگ‌ریزه Gravel	کربنات کلسیم معادل CCE	کربن آلی Organic carbon	هدایت الکتریکی EC
						%						dS/m
	سطوح قدیمی باقی‌مانده Remnant paleosurface											
RP1	4	7.5		SL	0.57	7.8	28.8	63.5	53	40.3	0.27	1.5
RP2	5	7.7		L	1.1	8.6	44.3	47.7	38	40.5	0.11	9
	مخروط‌افکنهٔ زفره Zefreh alluvial fan											
ZA1	3	7.1		SL	0.38	7.8	20.1	72.1	23	24.1	0.13	2.2
ZA2	5	7.3		SL	0.40	3.5	25.4	71.1	32	22	0.13	0.2
ZA3	6	7.8		SL	0.52	4.2	30.2	56.6	18	22.3	0.15	0.2
	پدیمنت شهرک صنعتی جی Jey pediment											
JP1	6	8		SL	0.55	7.4	28.3	64.3	53	56.5	0.23	0.2
JP2	5	7.9		SL	0.67	5.6	34.8	59.6	50	54.8	0.23	0.9

افق‌های مطالعه‌شده شوری زیادی نداشتند و EC آنها ۰/۲ تا ۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود؛ جز نمونهٔ RP2 کـه در نزدیکی یک میکروپلایای بسیار شور (سیان نمکی) قرار گرفته‌است و EC آن ۹ دسی زیمنس بر متر بـود (جـدول ۲). بـا توجه به موقعیت سطوح باقی‌ماندهٔ قدیمی و نبود آب زیرزمینی، شوری سطحی این افـق احتمـالاً بـه دلیـل انتقـال نمـک به‌وسیلهٔ گرد و غبار است. مقادیر pH افق‌های مطالعه‌شده در محدودهٔ ۷/۱ تا ۸/۰ و میزان کربنات کلسیم معادل ۲۲ تـا ٥٦ درصد متغیر بود (جدول ۲). این افق‌ها فاقد کربنات ثانویه بودند و کربنات‌های موجود منشأ اولیه داشتند. مقـادیر کـربن

آلی در تمام نمونه‌ها کم و در محدودهٔ ۰/۱۱ تا ۰/۲۷ درصد بود (جدول ۲) که به علت حاکمیت اقلیم خشک و پوشش گیاهی بسیار پراکنده در منطقه است (شکل ۲).

نتایج توزیع اندازهٔ ذرات نشان‌دهندهٔ غالب‌بودن ذرات شن در تمام نمونه‌ها بود و همهٔ نمونه‌ها حاوی مقادیر کم رس (کمتر از ۱۰ درصد) بودند. این موضوع حاکی از هوادیدگی بسیار کم در نمونه‌ها و ورود ذرات از منشأ محلی و فواصل نزدیک به درون افق‌هاست. جز نمونهٔ فلات سیان با بافت لوم، بقیهٔ افق‌ها بافت لوم شنی داشتند (جدول ۲). در همهٔ نمونه‌ها، شن درشت و سیلت درشت، دو بخش غالب خاک بودند (شکل ۳). نکته جالب توجه اینکه مقادیر شن خیلی ریز، خیلی کم بود و دربین دو بخش غالب سیلت درشت و شن ریز قرار گرفته است و آنها را جدا می‌کند. در شکل ۳ نیز نمودار تجمعی توزیع ذرات نشان داده شده که در اندازهٔ فی ۳ (محدودهٔ شن خیلی ریز) شیب نمودار کاهش یافته است که نشان از کم‌شدن ناگهانی این بخش از ذرات دارد و ذرات خاک را به دو بخش تقسیم کرده‌است.



شکل ۳. نمودارهای فراوانی ستونی توزیع اندازهٔ ذرات (شکل‌های بالا) و نمودارهای تجمعی توزیع اندازهٔ ذرات نمونه‌های برداشت‌شده از لندفرم‌های مطالعه‌شده؛ رس :C؛ سیلت ریز :FSi؛ سیلت متوسط :MSi؛ سیلت درشت :CSi؛ شن خیلی ریز :VFS؛ شن ریز :FS؛ شن متوسط :MS؛ شن درشت :CS؛ شن خیلی درشت :VCS

Fig. 3. Frequency histograms (top images) cumulative curves of particle size distribution of the studied vesicular horizons; C: Clay, FSi: Fine silt, MSi: Medium silt, CSi: Coarse silt, VFS: Very fine sand, Fs: Fine sand, MS: Medium sand, CS: Coarse sand, VCS: Very coarse sand

شاخص افق وزیکولار

مقادیر شاخص افق وزیکولار محاسبه‌شده برای نمونه‌های مدنظر در جدول ۳ نشان داده شده که این شـاخص در دامنهٔ ۰/۸۱ تا ۳/۲۷ متغیر است (جدول ۳).

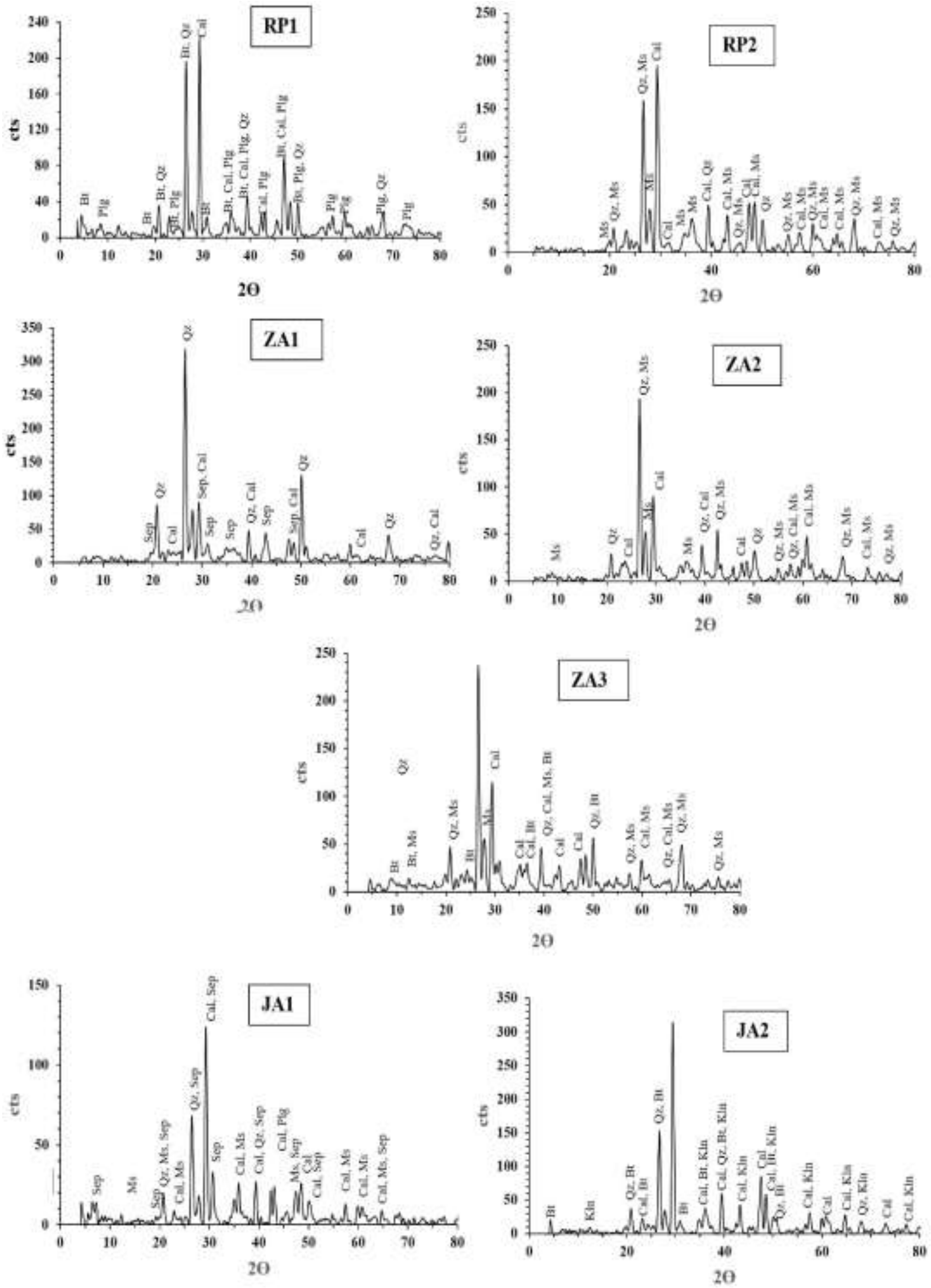
جدول ۳. فراوانی قطر منافذ و شاخص افق وزیکولار (VHI) برای افق‌های مطالعه‌شده

Table 3. Pores diameter frequency vesicular horizon index (VHI) of the studied vesicular horizons; M: Many, C: Common, F: Few

کد نمونه Sample code	منافذ خیلی ریز (کمتر از ۱ میلی‌متر)	منافذ ریز (۱ تا ۲ میلی‌متر)	منافذ متوسط (۲ تا ۵ میلی‌متر)	شاخص افق وزیکولار VHI
سطوح قدیمی باقی‌مانده Remnant paleosurface				
RP1	M	C	F	2.18
RP2	–	–	–	–
مخروطافکنهٔ زفره Zefreh alluvial fan				
ZA1	F	C	–	0.81
ZA2	M	C	–	1.81
ZA3	F	M	M	3.27
پدیمنت شهرک صنعتی جی Jey pediment				
JP1	F	F	–	1.26
JP2	M	M	C	3.18

ویژگی‌های کانی‌شناسی

پراش‌نگاشت‌های افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده در شکل ٤ نشان داده شـده‌اسـت. وجـود پیـک‌هـای ٤/٢٦، ٣/٠٤، ٢/٤٦، ٢/١٣، ١/٩٨ و ١/٨٢ آنگستروم و پیک‌های ٣/٨٦، ٣/٠٤، ٢/٨٤ و ٢/٥٠ آنگستروم به‌ترتیـب نشـان‌دهنـدهٔ وجـود کانی‌های کوارتز و کلسیت در تمام افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده است. مقادیر نیمه‌کمّی کانی‌ها در نمونه‌هـای مـدنظر در جدول ٤ نمایش داده شده‌است که نشان‌دهندهٔ فراوانی کانی‌های کوارتز و کلسـیت بـه‌عنـوان کـانی‌هـای اصـلی در خاک‌های مطالعه‌شده هستند.



شکل ٤. پراش‌نگاشت‌های XRD نمونه‌های پودری افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده؛ کلسیت **Cal:**، بیوتیت **Bt:**، کوارتز **Qz:**، موسکویت **Ms:**، کائولینیت **Kln:**، سپیولیت **Sep:**، پالیگورسکیت **Plg**

Fig. 4. XRD diffractograms of powdery samples of vesicular horizons; Cal: Calcite, Bt: Biotite, Qz: Quartz, Ms: Muscuvite, Kln: Kaolinite, Sep: Sepiolite, Plg: Palygorskite

جدول ٤. نوع و مقادیر کانی‌های موجود در افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده

Table 4. The kind and amount of minerals in the studied vesicular horizons

کد نمونه Sample code	کوارتز Quartz	کلسیت Calcite	گچ Gypsum	انهیدریت Anhydrite	بیوتیت Biotite	موسکویت Muscovite	پالیگورسکیت Palygorskite	سپیولیت Sepiolite	کائولینیت Kaolinite
سطوح قدیمی باقی‌مانده Remnant paleosurface									
RP1	XXX	XXXX	n.d.	tr	XX	n.d.	XX	n.d.	n.d.
RP2	XXX	XXXXX	n.d.	n.d.	n.d.	XX	n.d.	n.d.	n.d.
مخروط‌افکنهٔ زفره Zefreh alluvial fan									
ZA1	XXXXX	XXX	XX	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	XX	n.d.
ZA2	XXXX	XXX	n.d.	n.d.	n.d.	XXX	n.d.	n.d.	n.d.
ZA3	XXXXX	XXX	n.d.	n.d.	X	XX	n.d.	n.d.	n.d.
پدیمنت شهرک صنعتی جی Jey pediment									
JP1	XXX	XXXX	n.d.	n.d.	XX	n.d.	n.d	XX	n.d.
JP2	XXX	XXXX	n.d.	n.d.	XX	XX	n.d.	n.d.	XX

کانی‌های میکایی در مقادیر کمتر نسبت به کانی‌های کوارتز و کلسیت وجود داشتند و به‌وسیلهٔ پیک‌های ٤/٥١، ٢/٤٦ و ١/٩٨ آنگستروم برای کانی بیوتیت در سطح قدیمی باقی‌مانده، بالاترین سطح مخروط‌افکنهٔ زفره و هر دو سطح مخروط‌افکنهٔ شهرک صنعتی جی شناسایی شدند؛ در حالی که کانی میکایی مسکویت در فلات سیان و سطوح میانی و بالایی مخروط‌افکنهٔ زفره با پیک‌های ٤/٤٦، ٣/٢٠، ٢/٥٥ و ٢/٤٧ آنگستروم مشخص شده‌است. کانی گچ فقط در پایین‌ترین نقطهٔ مخروط‌افکنهٔ زفره و با پیک‌های ٧/٥٦، ٤/٢٧، ٣/٠٦، ٢/٨٧ و ٢/٦٨ آنگسترومی شناسایی شد و سطوح قدیمی باقی‌مانده هم حاوی مقادیر بسیار کم کانی انهیدریت با پیک‌های ٣/٨٧ و ٢/٤٧ آنگستروم بود.

کانی‌های فیبری پالیگورسکیت و سپیولیت فقط در بعضی نمونه‌ها شناسایی شدند. پالیگورسکیت فقط در نمونهٔ RP1 و با پیک‌های ١٠/٤، ٦/٤ و ١/٥٤ آنگسترومی وجود داشت. سپیولیت فقط در پایین‌ترین سطوح مخروط‌افکنهٔ زفره (ZA1) و پدیمنت شهرک صنعتی (JP1) و به‌وسیلهٔ پیک‌های ٧/٦٠، ٤/٥٠، ٣/٣٦ و ١/٥٤ آنگسترومی شناسایی شد (جدول ٥). همراهی سپیولیت و گچ در پایین‌ترین سطح مخروط‌افکنهٔ زفره و پالیگورسکیت و انهیدریت در فلات بهاران مشاهده شد.

ویژگی‌های ژئوشیمیایی

ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب در جدول ۵ نشان داده شده‌است. فراوان‌ترین عناصر اصلی در تمام نمونه‌های مطالعه‌شده، SiO_2 و CaO هستند که با نتایج کانی‌شناسی و فراوانی کانی‌های کوارتز و کلسیت در تمام نمونه‌ها همخوانی دارد. فراوانی اکسیدهای آهن و آلومینیوم در نمونه‌های مطالعه‌شده به دلیل حضور این عناصر در آلومینوسیلیکات‌هاست (Chen et al., 2022). در بین عناصر کمیاب، بیشترین فراوانی در عنصر استرانسیوم مشاهده شد که به دلیل همراهی این عنصر با کربنات‌هاست (Ding et al., 2019). در بین عناصر دیگر، غلظت بسیار زیاد

کبالت (۱۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطوح باقی‌ماندۀ قدیمی مشاهده می‌شود که در مقایسه با میانگین جهانی کبالت در خاک‌ها (۱۰ تا ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) خیلی بیشتر است (Han and Singer, 2007). با توجه به اینکه در شرایط قلیایی خاک‌های مطالعه‌شده، بسیاری از عناصر غیرمتحرک هستند (Schaetzl and Thompson, 2015)، مقایسۀ ترکیب عنصری افق‌های وزیکولار و سنگ همراه برای عناصر متحرک انجام شد که در بخش تفسیر نتایج و بحث به تفصیل بررسی می‌شود.

جدول ۵. غلظت عناصر اصلی و فرعی در افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده و سنگ همراه

Table 5. Concentration of major and trace elements in the vesicular horizons and associated coarse fragments

کد نمونه Sample code	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na2O	K2O	TiO_2	P_2O_5	SO_3	LOI	Co	Cr	Ni	Sr	V	Zr	Zr/Al_2O_3 ($\times 10^{-5}$)
	%											$mg\ kg^{-1}$						
سطوح قدیمی باقی‌مانده Remnant paleosurface																		
RP1	۳۵/۶۱	۹/۹۳	۵/۳۱	۱۹/۷۶	۳/۷۰	۱/۶۸	۱/۵۲	۰/۵۲	۰/۱۹	۱/۳۴	۲۲/۲۴	۱۲۹	۱۸	۸۸	۹۰۰	۱۷	۸	۹/۰
RP2	۳۷/۶۵	۹/۲۹	۳/۸۸	۱۹/۶۳	۳/۵۴	۱/۵۹	۱/۲۶	۰/۵۹	۰/۱۹	۱/۳۲	۲۱/۰۴	۱۶	۳۰	۷۲	۶۵۳	۱۶	۱۰	۱۲/۰
Coarse fragment	۳۹/۲۰	۱۰/۳۵	۵/۸۲	۱۷/۶۹	۳/۶۸	۰/۴۷	۲/۲۲	۰/۴۲	۰/۰۷	۰/۰۶	۱۹/۵۴	۱۲	۸۸	۶۹	۵۵۳	۵۳	۱۷۷	–
مخروط‌افکنۀ زفره Zefreh alluvial fan																		
ZA1	۳۱/۱۹	۸/۷۷	۶/۳۸	۱۶/۸۹	۳/۹۷	۱/۹۴	۱/۳۸	۰/۵۷	n.d.	۵/۸۵	۲۵/۱۶	۳۲	۱۱	۷۹	۱۵۳	۱۵	۴	۵/۱
ZA2	۴۱/۵۲	۹/۴۴	۵/۵۵	۱۴/۳۲	۳/۷۲	۲/۰۹	۱/۴۹	۰/۶۳	۰/۲۴	۰/۱۴	۲۱/۲۲	۲۱	۱۲	۸۷	۱۵۰	۱۶	۸	۹/۵
ZA3	۴۰/۰۵	۹/۵۲	۵/۴۰	۱۴/۶۳	۳/۷۲	۲/۱۳	۱/۵۱	۰/۶۰	۰/۲۲	۰/۱۳	۲۲/۱۷	۲۲	۵۵	۲۲	۶۸۲	۱۶	۱۲	۱۴/۱
Coarse fragment	۴۵/۳۰	۹/۹۷	۵/۶۷	۱۱/۷۲	۳/۱۶	۱/۹۶	۲/۷۷	۰/۷۳	۰/۱۵	۰/۰۳	۱۸/۲۴	۵۹	۱۴۶	۲۶	۸۷۹	۱۵۲	۱۲۵	–
پدیمنت شهرک صنعتی جی Jey pediment																		
JP1	۳۰/۸۸	۸/۹۳	۵/۵۴	۲۵/۷۵	۴/۵	۰/۵۵	۱/۳۹	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۱۶	۲۳/۳۸	۷۷	۳۲	۲۶	۱۸۴	۱۹	۱۲	۱۵/۰
JP2	۳۷/۶۵	۹/۲۹	۳/۸۸	۱۹/۶۳	۳/۵۴	۱/۵۹	۱/۲۶	۰/۵۹	۰/۱۹	۱/۳۲	۲۱/۱۰	۱۲	۲۲	۳۳	۱۵۵	۱۸	۱۱	۱۳/۲
Coarse fragment	۹/۷۲	۲/۰۲	۱/۴۷	۴۶/۵۹	۱/۱۶	۰/۴۴	۰/۸۷	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۳۹	۳۷/۱۰	۳۶	۱۸	۳۰	۲۶۲	۳۴	۲۲	–

بحث

ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های مطالعه‌شده، نشان‌دهندۀ مقادیر بسیار اندک شوری، کربن آلی و pH قلیایی آنها بود (جدول ۱) که مشابه افق‌های وزیکولار در بیابان موهاوی کالیفرنیا هستند (McFadden et al., 1998). به‌نظر می‌رسد که فراوانی کربنات‌ها نقش مهمی در کنترل pH داشته‌است (Schaetzl and Thompson, 2015).

بررسی نمودارهای توزیع اندازۀ ذرات نشان داد که تمام افق‌های مطالعه‌شده توزیع دونمایی (Bimodal)، یکی در بخش شن و دیگری در بخش سیلت، داشتند (شکل ۳). شن خیلی ریز کمترین مقدار ذرات را تشکیل می‌داد و به‌صورت مشخص دو گروه شن و سیلت را جدا کرده‌است. وجود الگوی توزیع دونمایی در افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده نشان‌دهندۀ منشأ دوگانۀ ذرات و فعال‌بودن دست‌کم دو فرایند در انتقال ذرات به افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده است (Sweeney et al., 2013; Karimi et al., 2017).

با توجه به اینکه سطوح قدیمی باقی‌مانده شیب بسیار کم (شیب حدود ۰/۲ درصد) و فعالیت سیلابی بسیار محدود دارند، به‌نظر می‌رسد عمدۀ ذرات با فرایندهای بادرفتی (جهش و سوسپانسیون) به افق‌های سطحی این لندفرم

منتقل شده باشند. در مخروطافکنه‌ها معمولاً با افزایش ارتفاع و نزدیک‌شدن به حوضهٔ آبخیز آن، افزایش مقادیر ذرات درشت قابل انتظار است (Blair and McPherson, 2009)؛ اما افزایش ذرات ریز با ارتفاع در مخروطافکنه‌های مطالعه‌شده، نشان‌دهندهٔ افزایش ذرات با فرایندهای بادرفتی و نقش طوفان‌های غبار در انتقال ذرات غبار به ارتفاعات بیشتر است. مطالعات نمونه‌برداری غبار به‌وسیلهٔ تله‌های رسوب‌گیر هم نشان داده‌است ذرات غبار غالب در منطقهٔ سگزی در ابعاد ذرات سیلت هستند (کریم‌زاده، ۱۳۸۱).

منحنی تجمعی توزیع اندازهٔ ذرات (شکل ۳) در سطوح قدیمی باقی‌مانده Sمانند است (شکل ۳). این امر خیزش در ناحیهٔ میانی منحنی را نشان می‌دهد که درواقع ناشی از اضافه‌شدن چشمگیر ذرات سیلت است (Karimi et al., 2017). در لندفرمهای دیگر، منحنی تجمعی عموماً شکل کروی دارد (شکل ۳) که نشان‌دهندهٔ تأثیر هر دو بخش شن و سیلت در محیط مخروطافکنه است. فقط در بالاترین سطح مخروطافکنهٔ زفره منحنی کمی حالت Sشکل یافته‌است (شکل ۳) که ناشی از اضافه‌شدن چشمگیر ذرات سیلت به این بخش است. در اندازهٔ ۳ فی در منحنی‌های تجمعی اندازهٔ ذرات (شکل ۳)، منحنی کمی تخت می‌شود که به دلیل این است که شن خیلی ریز در همهٔ نمونه‌ها نسبت به سایر اجزا خیلی کمتر است و این وضعیت در نمودار فراوانی اندازهٔ ذرات (شکل ۳) به‌وضوح مشاهده می‌شود.

درمجموع در تمام لندفرم‌های مطالعه‌شده، هم مقادیر ذرات سیلت و هم مقادیر نسبت سیلت + رس به شن با ارتفاع افزایش یافته‌است (جدول ۲) و با توجه به اینکه هم مقدار ذرات ریز (سیلت + رس) (Brown and Dunkerley, 1996; Young et al., 2004) و هم ضخامت افق وزیکولار (Turk and Graham, 2011) شاخص‌های تکامل افق‌های Av محسوب می‌شوند، در منطقهٔ شرق اصفهان با افزایش ارتفاع، تکامل افق‌های وزیکولار بیشتر می‌شود.

علاوه بر این مقادیر شاخص افق‌های وزیکولار (VHI) برای افق‌های مطالعه‌شده با افزایش ارتفاع زیاد می‌شود و بیشترین مقدار این شاخص در مرتفع‌ترین نقطهٔ نمونه‌برداری، نمونهٔ ZA3 در ارتفاع ۱۹۰۱ متر و نمونهٔ JP2 در ارتفاع ۱۵۵۷متری پدیمنت شهرک صنعتی بود. افق وزیکولار در این مناطق به‌صورت اسفنجی‌شکل بود (شکل ۵). این موضوع احتمالاً درنتیجهٔ افزایش رطوبت در بخش بالایی لندفرم‌ها، تشدید فرایندهای خیس‌شدگی و خشک‌شدگی است که از مهم‌ترین فرایندهای تشکیل منافذ وزیکولی هستند (McFadden et al., 1987, 1998)؛ علاوه بر این، افزایش مقدار ذرات ریزدانه با افزایش ارتفاع نیز می‌تواند شرایط را برای تشکیل منافذ وزیکولی بهبود بخشیده باشد.

شکل ٥. منافذ وزیکولی در نمونه‌های الف) RP1، ب) ZA1، ج) ZA3 و د) JP2

به توسعهٔ حفره‌ها و اندازهٔ بزرگ‌تر آنها در نمونه‌های ZA3 و JP2 دقت کنید.

Fig. 5. Vesicular pores in a) RP1, b) ZA1, c) ZA3 and d) JP2 samples; Note the expansion of pores and their larger size in the ZA3 and JP2 samples

کانی‌های کلسیت و کوارتز، کانی‌های غالب در لندفرم سطوح قدیمی باقی‌مانده با مواد مادری آهکی بودند. در سطوح قدیمی باقی‌مانده، کانی پالیگورسکیت همراه با انهیدریت و بیوتیت و در بخش شرقی (مقطع سیان) فقط مسکویت شناسایی شد (جدول ٤). درمقابل در مخروط‌افکنهٔ زفره کوارتز کانی اصلی بود و کلسیت ازنظر فراوانی در مکان دوم قرار داشت که بازتاب‌دهندهٔ فراوانی مواد مادری آتشفشانی است. در بخش پایینی این لندفرم، کانی فیبری سپیولیت شناسایی شده‌است؛ در حالی که با افزایش ارتفاع در سطح مخروط‌افکنه، کانی فیبری حذف شده‌است و کانی‌های میکایی (مسکویت و بیوتیت) افزایش یافته‌اند (جدول ٤). با توجه به اینکه با افزایش ارتفاع، مقدار سیلت در سطح مخروط‌افکنهٔ زفره افزایش می‌یابد (جدول ۲) و از سوی دیگر، کانی‌های میکایی بخش اصلی ترکیب کانی‌شناسی غبار در منطقهٔ شرق اصفهان را تشکیل می‌دهند (کریم‌زاده، ۱۳۸۱)، به‌نظر می‌رسد کانی‌های میکایی منشأ غبار در خاک‌های مخروط‌افکنهٔ زفره داشته باشند.

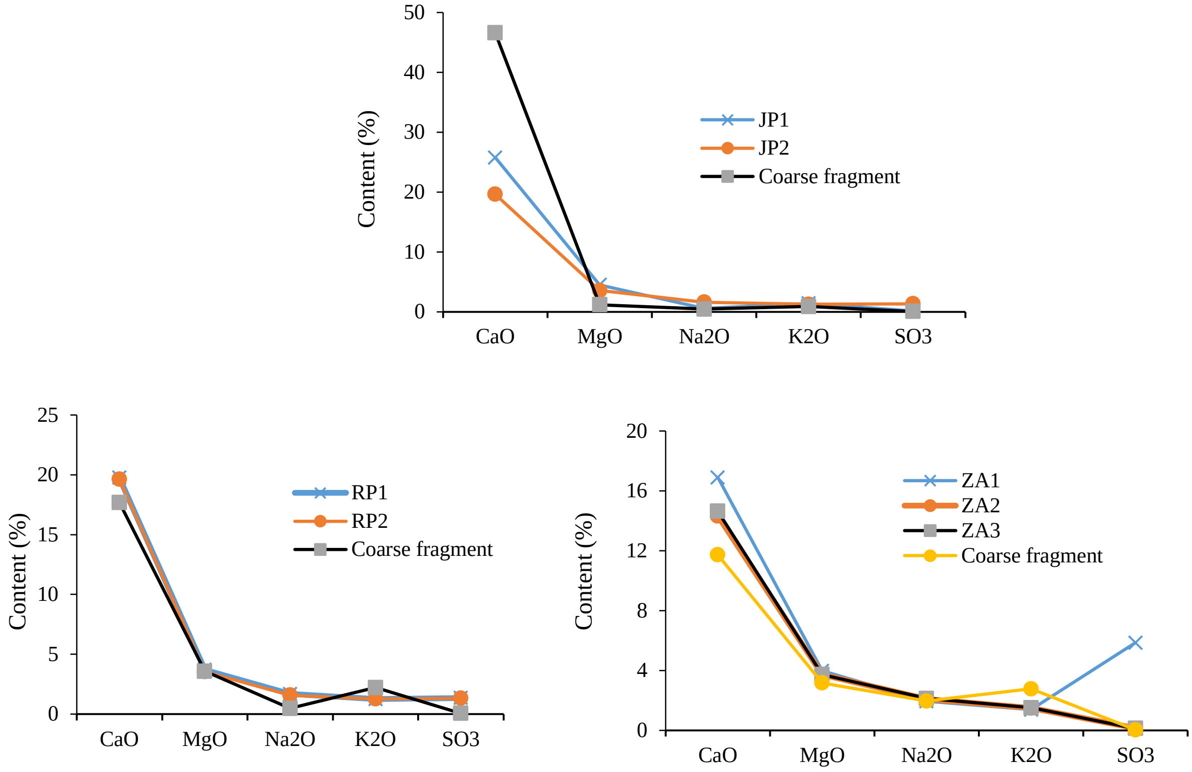
در پدیمنت شهرک صنعتی جی هم مانند سطوح قدیمی باقی‌مانده، کلسیت، کانی اصلی و غالب و کوارتز، کانی فرعی بود؛ علاوه بر این، در بخش پایینی مخروط‌افکنه، کانی‌های موسکویت و سپیولیت و در بخش بالایی، کانی‌های بیوتیت و کائولینیت شناسایی شده‌اند. در این منطقه هم مانند مخروط‌افکنهٔ زفره، کانی فیبری سپیولیت فقط در بخش پایینی مخروط‌افکنه مشاهده می‌شود. دربارهٔ کانی‌های فیبری با توجه به همراهی این کانی‌ها با گچ و انهیدریت، منشأ

اتوژنیک این کانی‌ها در نمونه‌های مطالعه‌شده پیشنهاد می‌شود (Neaman and Singer, 2011). درمجموع، کوارتز و کلسیت، کانی‌های غالب در همهٔ نمونه‌ها بودند که تغییراتی همراه با کانی‌های میکایی و فیبری نشان دادند.

مطالعهٔ کانی‌شناسی خاک‌های منطقهٔ شرق اصفهان نشان داده‌است در افق‌های با تکامل پدوژنیک، کانی‌های اسمکتیت و پالیگورسکیت، منشأ اتوژنیک و کانی‌های کوارتز، کائولینیت و کلریت حتی در بخش رس، منشأ توارثی داشتند (بیات و همکاران، ۱۳۹۰)؛ بنابراین می‌توان دریافت که در افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده، کانی کوارتز به‌ارث رسیده از مواد مادری، کانی‌های کلسیت و میکایی حاصل از مواد مادری و بخشی ناشی از اضافه‌شدن به‌وسیلهٔ باد و کانی‌های فیبری احتمالاً منشأ اتوژنیک دارند.

ژئوشیمی رسوبات شواهدی از منشأ رسوبات و فرایندهای هوادیدگی را آشکار می‌کند (Chen et al., 2022). مقادیر عناصر اصلی و کمیاب برای افق‌های وزیکولار و سنگ‌های همراه (جدول ۵) نشان می‌دهد نمونه‌های سطوح قدیمی باقی‌مانده در ارتفاع‌های مختلف، ترکیب شیمیایی مشابه با یکدیگر و کاملاً متفاوت با سنگ مادری دارند. مقادیر بسیار نزدیک TiO_2 و P_2O_5 در افق‌های وزیکولار و بسیار متفاوت با سنگ همراه نشان داد که این افق‌ها منشأ یکسانی دارند و همچنین از هوادیدگی سنگ همراه حاصل نشده‌اند. در مخروط‌افکنهٔ زفره با افزایش ارتفاع، مقادیر عناصر Al، Na، K، Cr و Zr افزایش و مقادیر عناصر Fe و Rb کاهش می‌یابند و این روند با تجمع کانی‌های میکایی در بخش بالایی مخروط‌افکنهٔ زفره هماهنگی دارد (جدول ۵).

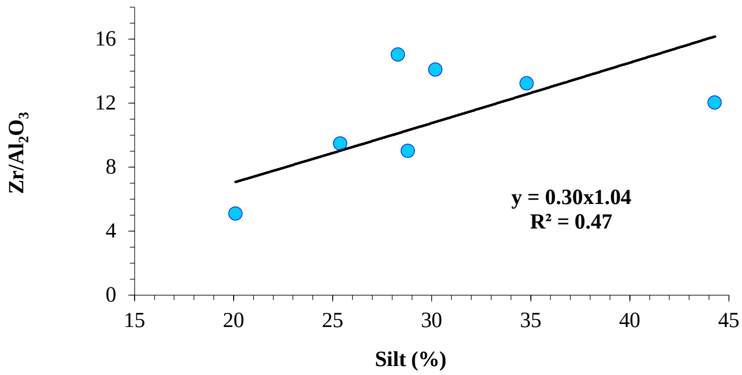
مقایسهٔ ویژگی‌های ژئوشیمیایی افق‌های وزیکولار با سنگ همراه نشان داد که در سطوح قدیمی باقی‌مانده، مقادیر SiO_2، Al_2O_3 و Fe_2O_3 کمتر و SO_3 و LOI بیشتر نسبت به سنگ همراه هستند. افق‌های وزیکولار مخروط‌افکنهٔ زفره در مقایسه با سنگ همراه، اکسیدهای سیلیسیم و آلومینیوم کمتر و اکسیدهای سدیم، کلسیم، منیزیم و گوگرد بیشتری داشتند؛ در حالی که در پدیمنت شهرک صنعتی با مواد مادری آهکی اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم، آهن، گوگرد، منیزیم، سدیم و پتاسیم بیشتر و اکسید کلسیم کمتری داشتند (جدول ۵). درمجموع در تمام لندفرم‌ها غنی‌شدگی SO_3 نسبت به مواد و در لندفرم‌های با مواد مادری غیرآهکی افزایش مقادیر CaO هم مشاهده شد (شکل ٦). با توجه به اینکه لندفرم‌های مطالعه‌شده متأثر از آب زیرزمینی نبودند، اضافه‌شدن این مواد از طریق فرایندهای بادرفتی و به‌صورت اضافه‌شدن یون‌های محلول، کربنات‌ها و به‌ویژه گچ به سطح این لندفرم‌ها بوده‌است. مطالعات نشان داده‌است ذرات غبار فعلی در منطقهٔ سگزی آهکی و حاوی مقادیر زیادی گچ است (کریم‌زاده، ۱۳۸۱)؛ بنابراین مشخص می‌شود که غبار قدیمی منطقهٔ شرق اصفهان هم مشابه با غبار فعلی و گچی–آهکی بوده‌است.



شکل ٦. مقایسهٔ عناصر متحرک در افق‌های وزیکولار در لندفرم‌های مطالعه‌شده و سنگ‌های همراه (CF)

Fig. 6. Comparison of immobile elements in vesicular horizons in the studied landforms and associated coarse fragments (CF)

نسبت عناصر غیرمتحرک (Zr، Ti و Al) در خاک‌های مناطق خشک برای شناخت منشأ رسوبات و بررسی همگنی مواد مادری استفاده می‌شود (Sweeney et al., 2013; Chen et al., 2022). در این مطالعه از نسبت زیرکونیوم به آلومینیوم برای بررسی منشأ خاک‌های مطالعه‌شده استفاده شد. استفاده از این نسبت نشان داد که با افزایش مقدار سیلت، نسبت فوق و درواقع در مقادیر ثابت آلومینیوم، مقدار عنصر زیرکونیوم در افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده به‌صورت خطی افزایش می‌یابد (شکل ٧). مطالعات پیشین هم، همبستگی قوی رسوبات بادرفتی و عنصر زیرکونیوم را نشان داده‌است. زیرکونیوم در ترکیب کانی‌های زیرکون ($ZrSiO_4$) و بدلیت (ZrO_2) دیده می‌شود و تحرک بسیار اندک و پایداری بسیار زیاد درمقابل فرایندهای سطحی زمین دارد (Waroszewski et al., 2018; Scheib et al., 2013). مطالعات نشان داده‌است فرایندها و چرخه‌های رسوبی می‌توانند سبب غنی‌شدن رسوبات بادرفتی با عنصر زیرکونیوم شوند که این غنی‌شدگی می‌تواند به‌وسیلهٔ یک فرایند سادهٔ تک‌مرحله‌ای مانند جورشدگی تا چندین چرخه فرایندهای رسوبی باشد (Chen et al., 2022). درمجموع، نتایج ژئوشیمیایی و به‌ویژه نسبت زیرکونیوم به آلومینیوم نشان داد که مقدار سیلت، کنترل‌کنندهٔ شاخص‌های ژئوشیمیایی در خاک‌های مطالعه‌شده است و منشأ سیلت و ذرات غبار در لندفرم‌های مختلف منطقهٔ سگزی یکسان و احتمالاً از منشأ محلی است. این نتیجه‌گیری با مطالعهٔ کانی‌شناسی رسوبات بادرفتی منطقه به‌وسیلهٔ تله‌های رسوب‌گیر همخوانی دارد (کریم‌زاده، ۱۳۸۱).



شکل ۷. رابطهٔ مقدار سیلت و نسبت زیرکونیوم به اکسید آلومینیوم در افق‌های وزیکولار مطالعه‌شده

Fig. 7. The relationship between the amount of silt and the ratio of zirconium to aluminum oxide in the studied vesicular horizons

دربارهٔ سن افق‌های وزیکولار، مطالعات سن‌یابی به روش‌های رادیوکربن و لومینسنس در بیابان‌های جنوب غرب ایالات متحده (هم‌عرض با مرکز ایران) نشان داده‌است که سطوح ژئومورفیک با سن کمتر از ۱۰۰۰ سال، افق‌های وزیکولار ندارند (Young et al., 2004) و افق‌های وزیکولار در دورهٔ زمانی ۶۳۰۰ تا ۳۰۰۰ سال قبل و به‌ویژه حدود ۵۰۰۰ سال قبل و در دوره‌های با شدت زیاد غبار هولوسن میانی تشکیل شده و از آن زمان پایدار مانده‌اند (McFadden et al., 1987, 1998; Anderson et al., 2002).

دربارهٔ سن افق‌های وزیکولار در مرکز ایران اطلاعاتی در دست نیست، اما به‌تازگی مطالعهٔ ژئوشیمی و سن‌یابی اورانیوم/توریم استالاگمیت‌ها در غار گل زرد در جنوب البرز نشان داده‌است دو دوره با افزایش ناگهانی غبارآلودگی (Dustiness) در مرکز ایران طی هولوسن میانی و در حدود ۴۵۱۰ و ۴۲۶۰ سال قبل رخ داده‌است (Carolin et al., 2019)، همچنین دورهٔ مهم خشکی در پلایای گاوخونی و تجمع رسوبات بادرفتی در بستر پلایای گاوخونی در حدود ۴۵۰۰ سال قبل به‌وسیلهٔ سن‌یابی رادیوکربن مشخص شده‌است (جلیلیان و همکاران، ۱۳۹۹). این نتایج با دورهٔ زمانی افزایش فعالیت‌های بادرفتی و رسوب غبار در جنوب غرب آمریکا همخوانی دارد و می‌توانند در تشکیل افق‌های وزیکولار در مرکز ایران هم مؤثر بوده باشد، اما سن‌یابی دقیق افق‌های وزیکولار در مرکز ایران در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

درمجموع با اینکه تومانیان و همکاران (۱۳۸۷) و Toomanian and Saleni (2020) بر این باورند که تا یکصد سال پیش فرسایش بادی در حوضهٔ زاینده‌رود وجود نداشته و فرسایش بادی به‌طور ناگهانی از دههٔ ۱۹۶۰ در منطقه شروع شده‌است، اما با توجه به اینکه روند خشکی محیطی منطقهٔ شرق اصفهان از پلیستوسن میانی آغاز شده (Bayat et al., 2018)، آخرین دورهٔ مرطوب‌تر از شرایط فعلی در منطقه در اوایل هولوسن رخ داده و حدود ۶ هزار سال پیش خاتمه یافته (Jones et al., 2014) و دوره‌های با افزایش غبار در ایران مرکزی طی هولوسن میانی رخ داده‌است (Carolin et al., 2019). تشکیل افق‌های وزیکولار در منطقهٔ مطالعه‌شده احتمالاً با شروع خشکی شدید و فرایندهای فرسایش بادی و رسوب‌گذاری غبار از هولوسن میانی روی داده‌است.

نتیجه‌گیری

افق‌های وزیکولار در سطح خاک‌ها در لندفرم‌های مختلف منطقهٔ شرق اصفهان و اطراف پلایای سگزی شناسایی شد. شواهد مختلف فیزیکی مانند توزیع اندازهٔ ذرات دونمایی حاصل از تجمع ذرات شن متوسط و سیلت درشت و افزایش مقادیر سیلت و نسبت ذرات ریزدانه به شن با افزایش ارتفاع زیاد نشان‌دهندهٔ نقش فرایندهای بادی در اضافه‌شدن ذرات ریزدانه به خاک‌های مطالعه‌شده بود.

شواهد کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی هم تأییدکنندهٔ تأثیر غبار بر تشکیل این افق‌ها بود؛ به طوری که اضافه‌شدن کانی‌های میکایی همراه با ذرات سیلت در سطوح ارتفاعی بالاتر رخ داده‌است. بررسی ژئوشیمیایی افق‌های وزیکولار و کاربرد نسبت‌های Zr/Al_2O_3 نشان می‌دهد ترکیب غبار گذشته و فعلی منطقهٔ شرق اصفهان یکسان و گچی–آهکی است و ذرات سیلت کنترل‌کنندهٔ شاخص Zr/Al_2O_3 در سطوح ارتفاعی لندفرم‌های مطالعه‌شده هستند و همچنین لندفرم‌های مختلف در منطقهٔ مطالعه‌شده منشأ یکسان ذرات سیلت دارند.

با توجه به اینکه مطالعات نشان داده تشکیل افق‌های وزیکولار در سطح خاک‌های بیابانی عمدتاً طی هولوسن میانی و در ۵۰۰۰ سال گذشته رخ داده‌است، وجود افق‌های متکامل وزیکولار در منطقهٔ سگزی اصفهان نشان‌دهندهٔ دورهٔ بلندمدت فرسایش بادی و رسوب غبار گچی‌آهکی در منطقه بود و فرسایش بادی در این منطقه فرایندی طبیعی و طولانی‌مدت است و به یکصد سال اخیر محدود نیست؛ بنابراین منطقهٔ شرق اصفهان به‌طور طبیعی اکوسیستم حساس به فرایندهای فرسایش بادی و رسوب غبار دارد و فعالیت‌های مخرب انسانی می‌تواند سبب تشدید این فرایند طبیعی شود.

تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد برای همکاری با این پژوهش و حمایت مالی از طریق طرح پژوهشی شمارهٔ ۲/۵۲۲۳۱ مصوب ۱۳۹۹/۰۳/۱۳ تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

اختصاصی، محمدرضا، زارع چاهوکی، اصغر، (۱۳۹۵). **بررسی مدل پیش‌بینی فرسایش بادی IRIFR1 و مقایسهٔ آن با اندازه‌گیری مستقیم فرسایش بادی با استفاده از دستگاه سنجش فرسایش بادی (W.E. Meter) در دشت سگزی اصفهان**، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دورهٔ ۲۳، ۲۵۵– ۲٦٤.

بخشنده‌مهر، لیلا، سلطانی، سعید، سپهر، عادل، (۱۳۹۲). **ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی و اصلاح مدل مدالوس در دشت سگزی اصفهان**، مجلهٔ مرتع و آبخیزداری، مجلهٔ منابع طبیعی ایران، دورهٔ ٦٦، ۲۷– ٤۱.

بوعلی، عبدالحسین، جعفری، رضا، بشری، حسین، (۱۳۹٦). **برآورد و ارزیابی فرسایش بادی با به‌کارگیری شبکهٔ باور بیزی (BBNs) در دشت سگزی اصفهان**، مهندسی اکوسیستم بیابان، دورهٔ ١٤، ٤٥– ٥۸.

بیات، امید، (۱۳۸٦). **شواهد چینه‌نگاری و پدوژنیک در تکوین لندفرم‌های شرق اصفهان**، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

بیات، امید، کریم‌زاده، حمیدرضا، خادمی، حسین، (۱۳۹۰). **کانی‌های رسی در دو خاک قدیمی سطوح ژئومورفیک یک مخروط‌افکنه در شرق اصفهان**، مجلهٔ بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دورهٔ ۱۹، ٤٥– ۵۸.

بیات، امید، خادمی، حسین، کریم‌زاده، حمیدرضا، (۱۳۹۲). **دماسنجی ایزوتوپی و بازسازی تغییرات اقلیمی گذشته با استفاده از شواهد پالئوپدولوژیک در بخش شرقی حوضهٔ زاینده‌رود اصفهان**، مجلهٔ پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دورهٔ ۱٤/۱۳، ۱۷– ۳۰.

پیری، فریبا، (۱۳۹٦). **تعیین مقدار غبار آزادشده از سطوح طبیعی و تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی بخشی از محدودهٔ کانون بحرانی سگزی اصفهان**، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد.

تومانیان، نورایر، خادمی، حسین، جلالیان، احمد، (۱۳۸۷). **چگونگی تکوین درهٔ زاینده‌رود**، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دورهٔ ٤٤، ۱۳۷– ۱۵۱.

جلیلیان، طاهره، تقیان، علیرضا، لک، راضیه، درویشی خاتونی، جواد، (۱۳۹۹). **بررسی نهشته‌های بادی بستر پلایای گاوخونی در طول پلیستوسن پایانی و هولوسن**، فصلنامهٔ کواترنری ایران، دورهٔ ٦، ٤۰۷– ٤۳۲.

جعفریان، محمدعلی، (۱۳٦۵). **جغرافیای گذشته و مراحل تکوین درهٔ زاینده‌رود**، مجلهٔ پژوهشی دانشگاه اصفهان، دورهٔ ۱، ۱۵– ۳۱.

کریم‌زاده، حمیدرضا، (۱۳۸۱). **چگونگی تکوین و تکامل خاک‌ها در لندفرم‌های مختلف و منشأیابی رسوبات فرسایش‌یافتهٔ بادی در منطقهٔ شرق اصفهان**، پایان‌نامهٔ دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکدهٔ کشاورزی.

کریمی، علیرضا، خادمی، حسین، جلالیان، احمد، (۱۳۸۷). **شناسایی خاک‌های لسی و تفکیک آنها از سایر خاک‌ها در جنوب شهر مشهد**، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دورهٔ ٤٤، ۱۸۵– ۲۰۱.

Anderson, K., Wells, S., Graham, R., (2002). **Pedogenesis of vesicular horizons, Cima Volcanic field, Mojave Desert, California**, *Soil Science Society of America Journal*, 66, 878- 887.

Bayat, O., Karimzadeh, H.R., Eghbal, M.K., Karimi, A., and Amundson, R., (2018). **Calcic soils as indicators of profound Quaternary climate change in eastern Isfahan, Iran**, *Geoderma*, 315, 220- 230.

Blair, T.C., and McPherson, J.G., (2009). **Processes and forms of alluvial fans. In A.J. Parsons and A. D. Abrahams (Eds.)**, *Geomorphology of Desert Environments* (pp. 413-466). Springer, Berlin, Germany.

Brown, K.J., and Dunkerley, D., (1996). **The influence of hillslope gradient, regolith texture, stone size and stone position on the presence of a vesicular layer and related aspects of hillslope hydrologic processes: A case study from the Australian arid zone**, *Catena*, 26, 71- 84.

Carolin, S.A., Walker, R.T., Day, C.C., Ersek, V., Sloan, R.A., Dee, M.W., Talebian, M., and Henderson, G.M., (2019). **Precise timing of abrupt increase in dust activity in the Middle East coincident with 4.2ka social change**, *PNAS*, 116 (1), 67- 72.

Chen, B., Yang, X., Jiang, Q., Liang, P., Mackenzie, L.L., and Zhou, Y., (2022). **Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin Sandy Land, northern China: implications for weathering, recycling, and provenance**, *Catena*, 105769.

Dietze M., Bartel, S., Lindner, M., and Kleber, A., (2012). **Formation mechanisms and control factor of vesicular soil structure**, *Catena*, 99, 83- 96.

Ding, M., Peng, S.M., Zhang, W., Zhao, Q., Mao, L., Yang J., and Zhang, L., (2019). **Ddistribution of trace elements in Holocene loess-paleo sol sequence and environmental change in lower reaches of the Yellow River**, *Earth and Environmental Science*, 237, 032052.

Gee, G.W., and Bauder, J.W., (1986). **Particle-size analysis, In A. Klute (Ed.)**, *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods* (pp. 383-412). second ed. Soil Science Society of America, Book Series No. 5. SSSA and ASA, Madison, Wisconsin, USA.

Gerson, R., and Amit, R., (1987). **Rates and modes of dust accretion and deposition in an arid region- the Negev, Israel. In L.E. Frostick and I. Reid (Eds.)**, *Desert Sediments: Ancient and Modern* (pp. 157-169). Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.

Gheysari, F., Ayoubi, S., and Abdi, M.R., (2016). **Using Caesium-137 to estimate soil particle redistribution by wind in an arid region of central Iran**, *Eurasian Journal of Soil Science*, 5 (4), 285- 293.

Han, F.X., and Singer, A., (2007). **Biogeochemistry of Trace Elements in Arid Environments**, Springer, Dordrecht, the Netherlands.

Harris, W., and White, G.N., (2008). **X-ray diffraction techniques for soil mineral identification, In A.L. Ulery and R. Drees (Eds.)**, *Methods of Soil Analysis, Part 5- Mineralogical Methods* (pp. 81-115), Soil Science Society of America, Madison, USA.

Jones, S., Arzani, N., and Allen, M.B., (2014). **Tectonic and climatic controls on fan systems: The Kohrud mountain belt, central Iran**, *Sedimentary Geology*, 302, 29- 43.

Karimi, A., Khormali, F., and Wang, X., (2017). **Discrimination of sand dunes and loess deposits using grain-size analysis in northeastern Iran**, *Arabaian Journal of Geoscience*, 10, 275.

Loeppert, R.H., and Suarez, D.L., (1996). **Carbonate and gypsum. In D.L. Sparks (Ed.) Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods, Second Edition**, (pp. 961-1010). Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.

May, J.H., Wells, S.G., Cohen, T.J., Marx, S.K., Nanson, G.C., and Baker, S.E., (2015). **A soil chrono sequence on Lake Mega-Frome beach ridges and its implications for late Quaternary pedogenesis and paleoenvironmental conditions in the drylands of southern Australia**, *Quaternary Research*, 83, 150-165.

McFadden, L.D., Wells, S.G., and Jercinovich, M.J., (1987**). Influences of aeolian and paedogenic processes on the origin and evolution of desert pavements**, *Geology*, 15, 504- 508.

McFadden, L.D., McDonald, E.V., Wells, S.G., Anderson, K., Quade, J., and Forman, S.L., (1998). **The Vesicular Layer and Carbonate Collars of Desert Soils and Pavements: Formation, Age, and Relation to Climate Change**, *Geomorphology*, 24, 101- 145.

McFadden, L.D., Wells, S.G., Brown, W.J., and Enzel, Y., (1992). **Soil genesis on beach ridges of Pluvial Lake Mojave: implications for Holocene Lacustrine and eolian events in the Mojave Desert, Southern California**, *Catena*, 19, 77- 97.

Mohammed, A., Hirmas, D., Nemes, A., and Giménez, D., (2020). **Exogenous and endogenous controls on the development of soil structure**, *Geoderma*, 357, 113945.

Neaman, A., and Singer, A., (2011). **The effects of palygorskite on chemical and physico-*chemical* properties of soils. In E. Galan. and A. Singer (Eds.)**, *Developments in Palygorskite-sepiolite Research* (pp. 325-349), Developments in Clay Science, Vol. 3, Elsevier, the Netherlands.

Nelson, D.W., and Sommers, L.E., (1996). **Total carbon, organic matter. In D.L. Sparks (Ed.) Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods,** Second Edition, (pp. 961-1010), Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA

Omran, E.E., (2016). **A simple model for rapid gypsum determination in arid soils**, 2, 185.

Scheib, A.J., Birke, M., Dinelli, E., and GEMAS Project Team., (2013). **Geochemical evidence of aeolian deposits in European soils**, *Boreas*, 43, 175- 192.

Schaetzl, T.J., and Thompson, M.L., (2015). **Soils Genesis and Geomorphology**, *Cambridge University Press*, Cambridge.

Schoenberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Soil Survey Staff, (2012). **Field book for describing and sampling soils**, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE

Soukup, D.A., Buck, B.J., and Harris, W., (2008). **Preparing soils for mineralogical analyses**, In A.L. Ulery and R. Drees (Eds.) *Methods of Soil Analysis*, *Part 5- Mineralogical Methods* (pp. 13-31). Soil Science Society of America, Madison, USA.

Sweeney, M.R., McDonald, E.V., and Markley, C.E., (2013). **Alluvial sediment or playas: what is the dominant source of sand and silt in desert soil vesicular A horizons, southwest USA**, *Journal of Geophysical Research*, 118, 257- 275.

Thomas, G.W., (1996). **Soil pH and Soil Acidity, Methods of Soil Analysis**, Part 3 Chemical Methods, Soil Science Society of America Book Series.

Toomanian N., and Salami, H.R., (2020). **Structural evolution of the Zayandeh-rud river basin based on historical climate changes**, In S. Mohajeri, L. Horlrman, A.A. Besalatpour. and W. Raber (Eds.) *Standing up to Climate Change*, (pp. 199-224). Springer, Cham, Switzerland.

Turk, J., and Graham, R.C., (2011). **Distribution and properties of vesicular horizons in the western United States**, *Soil Science Society of America Journal*, 75, 1449- 1461.

Waroszewski, J., Sprafke, T., Kabala, C., Musztyfaga, E., Labaz, B., and Wozniczka, P., (2018). **Aeolian silt contribution to soils on mountain slopes (Mt. Sleza, southwest Poland)**, *Quaternary Research*, 89, 702-717.

Young, M.H., McDonald, E.V., Caldwell, T.G., Benner, S.G., and Meadows, D., (2004). **Hydraulic properties of a desert chrono sequence in the Mojave Desert, USA**, *Vadose Zone Journal*, 3, 956- 963.