

Effect of Sodium Sulfate Extraction on Aeolian Process (A Case Study of South of Eyvankey City)

Majid Kaimpour Reihan¹, Naser Mashhadi^{2*}, Azam Beigi³

1- Associate Professor, International Desert Research Center (IDRC), University of Tehran.Iran.

2- Assistant Professor, International Desert Research Center (IDRC), University of Tehran. Iran.

(*Corresponding Author Email: nmashhad@ut.ac.ir)

3- Master expert of Coexistence with Desert, University of Tehran. Iran.

Extended abstract

Introduction

Lowlands, playas, and downstream portions of rivers in desert areas contain vast reserves of fine-grained sediments, such as silt and clay, as well as soluble materials including a variety of salts. Surfaces created by the combination of these materials can become periodically susceptible to wind erosion. Thus, they are considered to be major dust sources on a global scale.

Depending on the spatio-temporal distribution and composition of salts and fine materials, some proportions of these areas are usually either covered by an evaporite salt crust or dispersed soil.

Crust is a relatively thin consolidated soil surface layer or seal that is more compact and cohesive than the material immediately below it. When crusts are formed, particles are bound together and become less susceptible to abrasion by blowing soils compared to the less stable material below the crust. Both crusted surfaces and dispersed soils are morphologically and geochemically dynamic and can respond rapidly to changes in the local environmental conditions.

These changes can be natural, such as the frequencies of surface drying and flooding by rainwater or the changing groundwater levels, or can be the result of anthropogenic activities providing salt resources for economic use.

Over time, the continued operations of both mechanical and chemical processes on lowland surfaces ultimately lead to the decay of salt crust integrity.

Crusts usually provide a protection against an underlying 'luffy' layer of sediments representing a salty sediments of dust-size fractions with notably low bulk densities.

Wind erosion activity occurs particularly when the crust is disturbed or broken by different activities, such as salt extraction or vehicular traffic flow.

In all desert areas of Iran sodium sulphate (Na_2SO_4) salts are deposited based on humidity and temperature conditions, as well as groundwater levels and degrees of salt solubility (concentration). These areas usually occur between downstream of covered pediments and upstream of playas.

Traditionally, these areas are valued for sodium sulphate salt extraction, which contributes to the economy of the local population in several ways.

The study area was the lowland area of Ivanki, which was one of the areas undergoing wide sodium sulfate extraction. According to the residents, this area provided sand sources for wind erosion and air pollution. It was often a source of emission made by the existing materials not only because of wind erosion, but also due to sodium sulfate extraction.

This paper investigated the effect of sodium sulfate extraction on creating or exacerbating wind erosion through a collection of sediment samples taken at the sodium sulfate extraction site and their

grain-size testing.

Methodology

The sodium sulfate extraction sites were identified based on local information and interpretation of satellite images. The areas were located in the southwest of Eyvankey City between covered pediments and internetworks of playa. It occupied an area of approximately 5000 ha. The sampling points were identified based on geological and geomorphological studies.

The sampling was carried out at the summer season. Four sites were considered for sampling; two sites as the control sites and two sites for sodium sulfate extraction. In the control sites, only one sample was taken from the topsoil (natural land) without manipulation and extraction, while the samples in the other two sites were taken from three horizons: a) soil samples from the degraded surfaces; b) samples originated from the extraction horizon; and c) samples from the lower layers (without manipulation and extraction). Thus, 8 samples were totally collected. The obtained samples were granulated by the common dry-sieving method. Granulometric statistical analysis was done for each sample by using GRADISTAT software.

Discussion

According to the ambrothermic diagram, drought conditions prevailed in the region for about 7 months of the year. This drought could be the aggravating wind erosion parameters, such as soil moisture and vegetation cover. The warm period corresponded to the warm seasons (spring and summer).

Anemometer measurements showed that the study area was affected by erosive and strong winds blowing from the north, northwest, and east.

Land cover studies revealed that more than 60% of the soil surface in the control samples was preserved by the crust with particles larger than 2000 microns. However, after crust destruction for sodium sulfate extraction, the effect of crust cover was less than 45%. In other words, the soil surface lost 25% resistance to wind erosion.

In the process of sodium sulfate extraction, the soil under the crust, which contained soil particles, along with a significant amount of powdered sodium sulfate particles, was exposed to wind erosion.

Our study showed that the frequency percentage of vulnerable particles changed from about 10% in the surface layer in the control samples to about 50% in the middle and lower layers of the extracted areas. This meant that the region was about 5 times more sensitive to wind erosion.

Studies on the statistical parameters of the samples demonstrated that the average particle diameters significantly and regularly changed from very coarse sands (surface layers of the control samples or natural lands) to coarse sands (degraded surface layers), fine sands (middle layers), and finally very fine sands (bottom layers), which indicated increased sensitivity to the wind erosion process from the surface layer (crust) to the bottom layer.

Conclusion

In this research, field observations, mechanical analysis of soil particle granulation, and investigation of wind characteristics showed that a very high potential of dust emission from degraded crusts triggered by open extraction. Spatial changes and displacement of removal areas caused

by sodium sulfate reduction during the extraction period led to further environmental destruction and wind erosion intensification. The results revealed a significant complexity in the relationships of the flux of dust emitted from the crust degraded by sodium sulfate extraction and natural surface crust with the threshold wind speed required for wind erosion, which suggests further research to be conducted in this regard in the future.

Keywords: sodium sulphate, wind erosion, evaporative crust, granulometry, soil conservation

References:

- Anderson J. R. (2004). *Sieve analysis lab exercise*. University of Georgia.
- Alcántara Carrió, J. & Alonso Bilbao, I. (2001). *Aeolian sediment availability in coastal areas defined from sedimentary parameters*. Application to a case study in Fuerteventura. *Scientia Marina*.
- Arnold, A. & Zehnder, K. (1990). Salt weathering on monuments. In *The conservation of monuments in the Mediterranean Basin: the influence of coastal environment and salt spray on limestone and marble*. Proceedings of the 1st International Symposium, Bari, 7-10 June 1989= *La conservazione dei monumenti nel bacino Mediterraneo: Influenza dell ambiente costiero e dello spray marino sulla pietra calcarea e sul marmo*. Atti del 1 Simposio internazionale, Bari, 7-10 giugno 1989 (pp. 31-58).
- Asmarhansyah, A., Badayos, R. B., Sanchez, P. B., Cruz, P. C. S., & Florece, L. M. (2017). Land suitability evaluation of abandoned tin-mining areas for agricultural development in Bangka Island, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 4(4), 907.
- Baddock, M. C., Zobeck, T. M., Van Pelt, R. S., & Fredrickson, E. L. (2011). Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces: Cattle trampling effects. *Aeolian Research*, 3(1), 31-41.
- Bagnold, R. A. (2012). *The physics of blown sand and desert dunes*. Courier Corporation.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Brotons, J. M., Díaz, A. R., Sarría, F. A., & Serrato, F. B. (2010). Wind erosion on mining waste in southeast Spain. *Land Degradation & Development*, 21(2), 196-209.
- Chatterji, S. & Jensen, A. D. (1989). Efflorescence and breakdown of building materials. *Nordic Concrete Research*, (8), 56-61.
- Folk, R.L. & Ward, W. C. (1957). Brazos river bar: a study of the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary petrology*, 27; 3-26.
- Flatt, R. J. & Scherer, G. W. (2002). *Hydration and crystallization pressure of sodium sulfate: a critical review*. MRS Online Proceedings Library Archive, 712.
- Franks, D. M., Brereton, D., & Moran, C. J. (2010). Managing the cumulative impacts of coal mining on regional communities and environments in Australia. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 28(4), 299-312.
- Gillette, D. A., Niemeyer, T. C., & Helm, P. J. (2001). Supply-limited horizontal sand drift at an ephemerally crusted, unvegetated saline playa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,

- 106(D16), 18085-18098.
- Gillette, D. A., Adams, J., Muhs, D., & Kihl, R. (1982). Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C11), 9003-9015.
 - Houser, C. A. & Nickling, W. G. (2001). The factors influencing the abrasion efficiency of saltating grains on a clay-crusted playa. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(5), 491-505.
 - King, J., Etyemezian, V., Sweeney, M., Buck, B. J., & Nikolich, G. (2011). Dust emission variability at the Salton Sea, California, USA. *Aeolian Research*, 3(1), 67-79.
 - Kracek, F. C. (1928). In: Washburn, E. W. (Ed.), *International Critical Tables 3*. McGraw Hill, New York.
 - Kocurek, G. & Lancaster, N. (1999). Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example. *Sedimentology*, 46(3), 505-515.
 - Lakes Environmental WRPLOT. Available at: <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>
 - Lambe, T. W., Michaels, A. S., & Moh, Z. C. (1960). *Improvement of soil-cement with alkali metal compounds & discussion*. Highway Research Board Bulletin, (241).
 - Langbein, W. B. (1961). *Salinity and hydrology of closed lakes: A study of the long-term balance between input and loss of salts in closed lakes (Vol. 412)*. US Government Print. Office.
 - Langston, G. & Neuman, C. M. (2005). An experimental study on the susceptibility of crusted surfaces to wind erosion: a comparison of the strength properties of biotic and salt crusts. *Geomorphology*, 72(1-4), 40-53.
 - Li, S., Li, C., & Fu, X. (2021). Characteristics of soil salt crust formed by mixing calcium chloride with sodium sulfate and the possibility of inhibiting wind-sand flow. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11.
 - Lippmann, M. & Thurston, G. D. (1996). Sulfate concentrations as an indicator of ambient particulate matter air pollution for health risk evaluations. *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, 6(2), 123-146.
 - Nachshon, U., Shahraeeni, E., Or, D., Dragila, M., & Weisbrod, N. (2011). Infrared thermography of evaporative fluxes and dynamics of salt deposition on heterogeneous porous surfaces. *Water Resources Research*, 47(12).
 - Neave, M. & Rayburg, S. (2007). A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover. *Geomorphology*, 87(4), 378-390.
 - Nicol, T. (2006). WA's mining boom: where does it leave the environment? *Ecos*, 2006(133), 12-13.
 - Nield, J. M., Bryant, R. G., Wiggs, G. F., King, J., Thomas, D. S., Eckardt, F. D., & Washington, R. (2015). The dynamism of salt crust patterns on playas. *Geology*, 43(1), 31-34.
 - Nield, J. M., Neuman, C. M., O'Brien, P., Bryant, R. G., & Wiggs, G. F. (2016). Evaporative sodium salt crust development and its wind tunnel derived transport dynamics under variable climatic conditions. *Aeolian Research*, 23, 51-62.
 - Nield, J. M., Wiggs, G. F., King, J., Bryant, R. G., Eckardt, F. D., Thomas, D. S., & Washington, R. (2016). Climate–surface–pore-water interactions on a salt crusted playa: implications for crust

- pattern and surface roughness development measured using terrestrial laser scanning. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 738-753.
- Mbaya, R. P. (2013). Land degradation due to mining: the gunda scenario. *International Journal of Geography and Geology*, 2(12), 144-158.
 - Mehra, S. R., Chadda, L. R., & Kapur, R. N. (1955). ROLE OF DETRIMENTAL SALTS IN SOIL STABILIZATION WITH AND WITHOUT CEMENT. 1.--THE EFFECT OF SODIUM SULPHATE. *Indian Concrete Journal*, 33(7).
 - Mudd, G. M. (2010). The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. *Resources Policy*, 35(2), 98-115.
 - Muhs, D. R., Reynolds, R. L., Been, J., & Skipp, G. (2003). Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources. *Quaternary International*, 104(1), 3-18.
 - O'Brien, P. & Neuman, C. M. (2012). A wind tunnel study of particle kinematics during crust rupture and erosion. *Geomorphology*, 173, 149-160.
 - Pearson, K. E. & Bauder, J. W. (2006). *The basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties*. MSU Extension Water Quality Program.
 - Reynolds, R. L., Yount, J. C., Reheis, M., Goldstein, H., Chavez, P., Fulton, R., & Forester, R. M. (2007). Dust emission from wet and dry playas in the Mojave Desert, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(12), 1811-1827.
 - Rice, M. A., & McEwan, I. K. (2001). Crust strength: a wind tunnel study of the effect of impact by saltating particles on cohesive soil surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(7), 721-733.
 - Ripley, E. A., Redmann, R. E., & Maxwell, J. (1978). Environmental impact of mining in Canada.
 - Roche, C., & Mudd, G. (2014). *An overview of mining and the environment in Western Australia*. Resource Curse or Cure? 179-194.
 - Rosen, M. R. (1994). *The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and Paleoclimate and basin evolution of playa systems*. 289, 1.
 - Schwikowski, M., Döscher, A., Gäggeler, H. W., & Schotterer, U. (1999). Anthropogenic versus natural sources of atmospheric sulphate from an Alpine ice core. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51(5), 938-951.
 - Sherwood, P. T. (1962). Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils. *Highway Research Board Bulletin*, (353).
 - Simon-Coinçon, R., Spain, A. V., & Milnes, A. R. (2003). Landform processes in the post coal-mining Landscape, Bowen Basin, Australia. A geomorphological approach. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 17(1), 20-50.
 - Steiger, M. & Asmussen, S. (2008). Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: the phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and the generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(17), 4291-4306.
 - Sweeney, M. R., McDonald, E. V., & Etyemezian, V. (2011). Quantifying dust emissions from desert landforms, eastern Mojave Desert, USA. *Geomorphology*, 135(1-2), 21-34.

- Thaulow, N. & Sahu, S. (2004). Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization. *Materials Characterization*, 53(2-4), 123-127.
- Tsui, N., Flatt, R. J., & Scherer, G. W. (2003). Crystallization damage by sodium sulfate. *Journal of cultural heritage*, 4(2), 109-115.
- Udoekanem, N. B., Adoga, D. O., & Onwumere, V. O. (2014). Land ownership in Nigeria: Historical development, current issues and future expectations. *Journal of environment and Earth science*, 4(21), 182-189.
- Washington, R., Todd, M. C., Lizcano, G., Tegen, I., Flamant, C., Koren, I., & Goudie, A. S. (2006). Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodélé Depression, Chad. *Geophysical Research Letters*, 33(9).
- Webb, N. P. & Strong, C. L. (2011). Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Research*, 3(2), 165-179.
- Yocom, J. E. (1958). The deterioration of materials in polluted atmospheres. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 8(3), 203-208.
- Zobeck, T. M. (1991). Abrasion of crusted soils: Influence of abrader flux and soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55(4), 1091-1097.





اثر استخراج سولفات سدیم بر رفتار فرایند بادی نمونه پژوهش: جنوب بخش ایوانکی شهرستان گرمسار

مجید کریم پور ریحان، دانشیار مرکز تحقیقات بین المللی بیابان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

mrihan@ut.ac.ir

ناصر مشهدی*، استادیار مرکز تحقیقات بین المللی بیابان، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

nmashhad@ut.ac.ir

اعظم بیگی، کارشناس ارشد همزیستی با بیابان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

پوسته‌های تبخیری خاک که از انواع فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تشکیل شده‌اند، در تثبیت خاک در مناطق نیمه‌خشک و خشک نقش مهمی دارند. پایداری و یکپارچگی این پوسته‌ها با فعالیت‌های انسانی مانند تردد دام یا ماشین یا استخراج مواد معدنی به خطر می‌افتد. هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر استخراج سولفات سدیم و تخریب پوسته تبخیری بر رفتار حفاظتی سطح زمین است. این پژوهش در منطقه ایوانکی انجام شد. در این راستا چهار نمونه از خاک (دو نمونه شاهد به‌عنوان اراضی طبیعی با پوسته‌های دست‌نخورده و دو نمونه از محل استخراج و برداشت سولفات سدیم به‌عنوان پوسته‌های تخریب‌شده در سه افق) بررسی و آزمایش دانه‌بندی شد. نتایج این پژوهش نشان داد پوسته‌های دست‌نخورده حاوی بیش از ۶۰ درصد ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون هستند. در نتیجه این خاک‌ها در برابر فرسایش بادی آسیب‌پذیر نیستند؛ در حالی که درصد این ذرات در پوسته‌های بهم‌ریخته به کمتر از ۴۰ می‌رسد که به‌طور چشمگیری مقاومت برشی آنها را کاهش می‌دهد؛ از طرفی از دست‌دادن این پوسته ضمن کاهش عمل حفاظت‌کنندگی پوسته، رسوبات ریزدانه زیر سطحی را در معرض فرسایش بادی قرار می‌دهد که حاوی بیش از ۷۰ درصد ذرات آسیب‌پذیرند. نتایج نشان داد برداشت و استخراج سولفات سدیم در منطقه باعث فرسایش باد حدود ۵ برابر بیشتر از زمان حفظ خاک با پوسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سولفات سدیم، فرسایش بادی، پوسته‌های تبخیری، دانه‌بندی، حفاظت خاک



مقدمه

مناطق پست، پلایاها و انتهای ترین بخش رودخانه‌ها در مناطق بیابانی حاوی ذخایر گسترده‌ای از مواد رسوبی ریزدانه همانند سیلت و رس و مواد محلول شامل انواع نمک‌ها هستند. سطوح ایجادشده با ترکیب این دو ماده به‌طور دوره‌ای، مستعد فرسایش بادی هستند؛ بنابراین این سطوح، منابع اصلی گرد و غبار در مقیاس محلی و جهانی در نظر گرفته می‌شوند (Nield et al., 2016: 51; Washington et al., 2006: 4; Webb and Strong, 2011: 175; O'Brien and Neuman, 2012: 149; Pearson and Bauder, 2006: 4). بسته به موقعیت زمانی و مکانی توزیع و ترکیب نمک‌ها و مواد ریزدانه، سطوح این مناطق ممکن است پوسته‌های تبخیری نمک یا پراکندگی خاک^۱ داشته باشند (Reynolds et al., 2007: 1823).

آثار پیچیدگی فیزیکی و شیمیایی سه نوع از نمک‌های اصلی خاک از جمله نمک‌های کربنات کلسیم، سولفات کلسیم و کلرور سدیم در شرایط مختلف اقلیمی، آبیاری و خشکی، بسیار متفاوت و حیرت‌آور است؛ به طوری که گاه به سخت و سیمانی شدن خاک منجر می‌شود یا بالعکس موجب پوکی و حساس شدن آنها در برابر فرسایش بادی می‌شود (پاشایی، ۱۳۸۱: ۸۳).

پوسته‌ها، لایه‌ها یا سله‌هایی نسبتاً نازک در سطح خاک و فشرده‌تر و چسبنده‌تر از مواد زیرین خاک هستند. هنگامی که پوسته‌ها تشکیل می‌شوند، ذرات به هم متصل می‌شوند و بنابراین ضمن حفاظت سطح خاک در برابر سایش با باد، فرسایش پذیری خاک زیرین را نیز کمتر می‌کنند. در شرایط طبیعی پوسته‌ها از انواع مختلفی از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تشکیل می‌شوند (Neave and Rayburg, 2007: 379).

پویایی مورفولوژیکی و ژئوشیمیایی، وجه مشترک پوسته‌های تبخیری یا خاک پراکنده است؛ بنابراین می‌توانند به سرعت به تغییرات شرایط محیطی محلی پاسخ دهند (Gillette et al., 2001: 18088). این تغییرات ممکن است طبیعی مانند تناوب خشک‌شدگی و مرطوب‌شدگی سطوح با آب باران (Nield et al., 2015: 51) یا زیرزمینی یا انسانی به منظور استفاده اقتصادی از منابع نمک‌ها باشد.

با گذشت زمان، ادامه عملکرد این دو فرایند مکانیکی و شیمیایی روی سطح پلایا یا مناطق پست به تخریب یکپارچگی پوسته نمک می‌انجامد تا جایی که می‌توان آن را وضعیت شکننده یا تخریب‌شده نامید (Gillette et al., 2001: 18086; Reynolds et al., 2007: 1824; Nield et al., 2015: 52). پوسته‌های تخریب‌شده اغلب زبری در مقیاس کوچک (میلی‌متر) را نشان می‌دهند، اما توپوگرافی در حد مقیاس متوسط (سانتی‌متر) دارند (Nield et al., 2016: 52).

به هر حال پوسته‌ها، تخریب‌شده یا تخریب نشده، معمولاً از یک لایه رسوب پوک زیرین (۱ تا ۵ سانتی‌متر ضخامت) حاوی نمک‌های تبخیری یا رسوبات آغشته به نمک با ذرات در محدوده اندازه گرد و خاک با چگالی حجمی نسبتاً کم محافظت می‌کنند که به راحتی با باد فرسایش می‌یابد (Nield et al., 2015: 34; Reynolds et al., 2007: 1826). عمل فرسایش باد به‌ویژه زمانی که پوسته به دلیل فعالیت حیوانات، برداشت نمک یا حمل و نقل وسایل نقلیه به هم ریخته یا شکسته شده باشد، تشدید می‌شود (Gillette et al., 2001: 18097; Baddock et al., 2001: 18097).

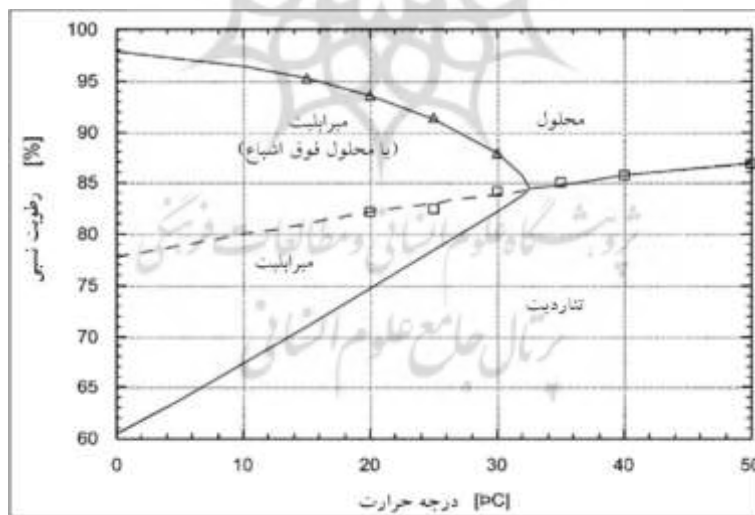
1. soil dispersion

Arnold and (2011: 38). شیمی نمک و تبلور نمک نقشه کلیدی در توسعه پوسته یا تخریب رسوبات دارد (Zehnder, 1989: 56)؛ در حالی که نقش تبخیر به اندازه ذرات رسوب سطحی، غلظت نمک، رطوبت (عمق آب زیرزمینی)، دما و رطوبت نسبی بستگی دارد (Nachshon et al., 2011: 13). با توجه به اهمیت رسوب گذاری توأمان شیمیایی و فیزیکی در مناطق بیابانی، در رسوب گذاری نقش اساسی را اندازه ذرات (مقدار تخلخل) و میزان حلالیت نمکها بازی می کنند (Nield et al., 2016: 751). با این وصف املاح می توانند پتانسیل انتشار گرد و خاک را در سطح یک منطقه تغییر دهند. یکی از این املاح، نمک سولفات سدیم است که یک ترکیب مشترک بین پلایاهای جهان است (Rosen, 1994: 7; Langbein, 1961: 17). سولفات سدیم، نمکی است که به تغییرات شرایط محیطی حساس است و به همین دلیل تخریبهای گستردهای را به وجود می آورد.

مطالعات میری (۱۳۸۱) نشان داد وجود بعضی از نمکها مانند نمکهای سدیم دار باعث پراکنده شدن و تخریب ساختمان خاک و در نتیجه افزایش حساسیت ذرات به فرسایش می شود.

برای علل تخریب ناشی از سولفات سدیم، فشار هیدراتاسیون و فشار تبلور ارائه شده است (Flatt and Scherer, 2002: 18; Tsui et al., 2003: 113).

جابه جایی سولفات سدیم بین میرابیلیت آبدار و تناردیت بی آب فشار تبلور بزرگی را ایجاد می کند (Chatterji and Thaulow and 1989: 60)؛ این امر با انحلال تناردیت و تبلور دوباره و جایگزینی میرابیلیت اتفاق می افتد (Sahu, 2004: 123). میرابیلیت به طور معمول زمانی شکل می گیرد که رطوبت نسبی بیش از ۶۰-۷۵ درصد با دمای بین ۰ تا ۲۰ درجه سانتی گراد باشد (شکل ۱)؛ (Kracek, 1928: 351; Steiger and Asmussen, 2008: 4291).



شکل ۱. نمودار فاز سولفات سدیم. خطوط پیوسته مرزهای مراحل پایدار را نشان می دهند. مثلثها و مربعها به ترتیب داده های آزمایشی میرابیلیت و تناردیت هستند (Kracek, 1928). خط ناپیوسته به یک محلول با تعادل ناپایدار تناردیت و محلول فوق اشباع میرابیلیت مربوط است.

Figure 1. Phase diagram for sodium sulfate. The continuous lines indicate the boundaries of the stable phases. Triangles and squares are experimental data for mirabilite and thenardite, respectively (Kracek, 1928). The discontinuous line corresponds to a solution in metastable equilibrium with respect to thenardite and supersaturated with respect to mirabilite.

این واکنش‌های شیمیایی و تغییرات تخریبی همراه با برداشت‌های اقتصادی انسانی، اهمیت این نمک را در تشدید فرسایش بادی نشان می‌دهد.

اختصاصی و همکاران (۱۳۸۱) تغییرات پتانسیل فرسایش‌پذیری بادی خاک را در مقابل املاح مختلف به کمک دستگاه سنجش فرسایش بادی مطالعه کردند. نتایج ضمن نشان‌دادن اختلاف معنادار بین نمک‌ها در فرسایش‌پذیری بادی خاک، بیان‌کننده نقش دوگانه آنها در غلظت‌های مختلف و خاک‌های با بافت متفاوت است.

علاوه بر مبانی نظری درباره تشکیل و توسعه پوسته‌های نمکی به‌ویژه سولفات سدیم، مطالعات متعددی نیز درباره آثار معدن‌کاوی نمک‌های تبخیری بر محیط‌زیست انجام شده است؛ به‌طورکلی معدن‌کاوی از هر نوع و در هر اندازه که خارج از توان اکولوژی باشد، با ویرانی چشم‌انداز و تخریب محیط‌زیست همراه است. معدن‌کاوی همچنین زمین را در معرض فرسایش بادی و آبی، آلودگی آب و سایر خطرات زیست‌محیطی قرار می‌دهد که تهدیدی برای سامانه‌های پشتیبان انسان است (Mbaya, 2013).

پژوهش‌های زیادی درباره استخراج معادن از هر نوع و در نهایت رهاسازی آنها که باعث تغییر در چشم‌انداز و از دست رفتن پوشش گیاهی شده، صورت گرفته است (Simon-Coinçon et al., 1978: 45; Ripley et al., 1978: 25). در روند معدن‌کاوی از نوع استخراج روباز، ابتدا به میزان زیادی تخریب چشم‌انداز سرزمین از طریق چاله‌ها و مسیرهای حمل صورت می‌گیرد (Nicol, 2006: 13; Mudd, 2010: 114). این فعالیت‌ها بر پتانسیل کشاورزی نیز تأثیر دارد (Roche and Mudd, 2014: 188; Franks et al., 2010: 302; Asmarhansyah et al., 2017: 907).

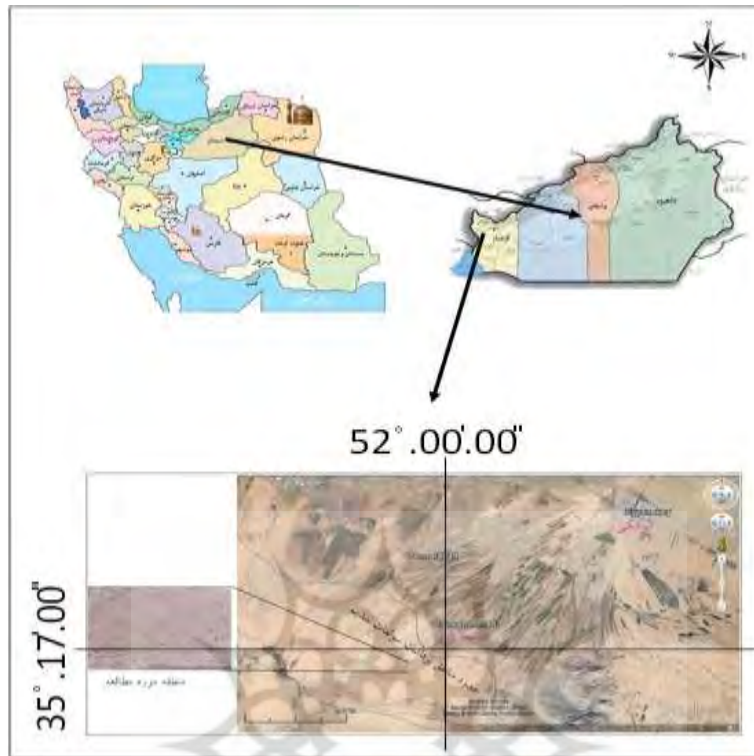
مطالعات مشابهی نیز درباره تأثیر معادن گچ و سولفات سدیم بر تخریب چشم‌انداز سرزمین، پاکسازی پوشش گیاهی، فرسایش بادی (جوزقیان و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۵؛ اصغری کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۷؛ قربانان، ۱۳۹۲: ۲۳؛ مشهدی، ۱۳۹۶: ۱۱؛ Brotons et al., 2010: 208; Zobeck, 1991: 1091; Rice and McEwan, 2001: 732; Gillette et al., 1982: 9014; Li et al., 2021: 4; Lippmann and Thurston, 1996: 144; Yocom, 1958: 203; Schwikowski et al., 1999: 946) و سلامت انسان انجام شده است. در تمامی مناطق بیابانی ایران، در جایی که شرایط از نظر رطوبت، دما، آب زیرزمینی و درجه حلالیت نمک (غلظت) اجازه دهد، نمک سولفات سدیم رسوب می‌کند. این مناطق به‌طور معمول اراضی پایین‌دست دشت‌سرهای پوشیده و بالادست پلایاها هستند.

منطقه مطالعاتی در این پژوهش، اراضی پایین‌دست منطقه ایوانکی است که یکی از مناطقی است که به‌طور گسترده سولفات سدیم از آن برداشت می‌شود و براساس اظهار نظر اهالی، منبعی برای فرسایش بادی و آلودگی هوا شده است (بیگی، ۱۳۹۶: ۹۵). این مقاله با مجموعه‌ای از نمونه‌های رسوب در مکان استخراج سولفات سدیم و آزمایش دانه‌بندی آنها، تأثیر برداشت سولفات سدیم را در ایجاد یا تشدید فرسایش بادی بررسی کرده است.

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش در جنوب روستای چشمه نادى شهر ایوانکی در استان سمنان واقع شده است. این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی در عرض ۳۵ درجه و ۱۶ دقیقه و ۴۵ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۱۶ دقیقه و ۵۸ ثانیه شمالی و در طول

۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه و ۰۸ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه و ۳۲ ثانیه شرقی با مساحت حدود ۵۰ هکتار قرار دارد. ارتفاع متوسط منطقه ۹۳۸ متر از سطح دریاست (شکل ۲).



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

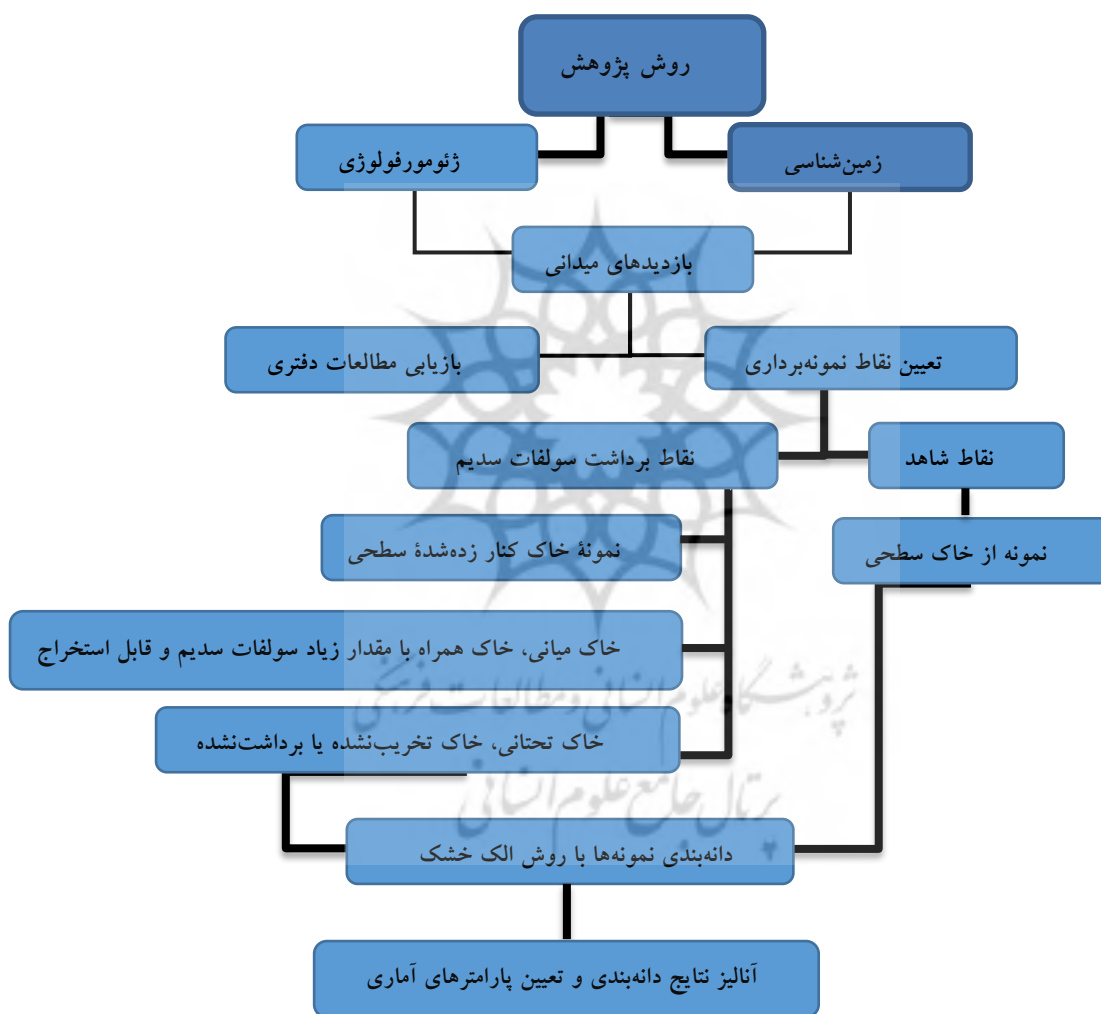
Figure 2. Geographical location of the study area (Source: Authors, 2020)

متوسط بارندگی سالانه براساس آمار ایستگاه سینوپتیک گرمسار در دوره آماری ۲۸ ساله، ۱۱۵ میلی متر است که بیشترین درصد بارندگی در فصل سرد سال اتفاق می افتد. براساس همین آمار متوسط درجه حرارت سالانه، ۱۹/۱ درجه سانتی گراد است (سازمان هواشناسی کشور). از نظر طبقه بندی اقلیمی آمبروزه، این منطقه جزو مناطق خشک سرد با بارش زمستانه است. بررسی ها نشان داد در این منطقه استخراج و برداشت سولفات سدیم به صورت روباز و از سطح زمین انجام می شود (بیگی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۶).

روش شناسی پژوهش

در این پژوهش، ابتدا محدوده برداشت سولفات سدیم براساس بازدیدهای محلی و میدانی و سپس ویژگی های مورفولوژی منطقه روی تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Terra از نرم افزار Google Earth تعیین شد. مطالعات زمین شناسی و ژئومورفولوژی در محدوده تعیین شده انجام و نقاط نمونه برداری مشخص شد. فلوجارت روش پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است. در گام بعدی بازدیدهای میدانی به منظور بازیابی مطالعات دفتری، تعیین موقعیت منطقه و نمونه برداری رسوب از بخش های مختلف انجام شد. چهار نقطه برای نمونه برداری در نظر گرفته شد. دو نقطه ۱ و ۲ به عنوان شاهد و وضعیت طبیعی منطقه در نظر گرفته شده که به دلیل در معرض فرسایش بادی

بودن سطح آنها، از هر نقطه فقط یک نمونه از خاک سطحی برداشت شد. دو نقطه ۳ و ۴ به‌عنوان نقاطی انتخاب شده‌اند که از آنها برداشت سولفات سدیم می‌شود و در معرض فرسایش بادی هستند (شکل ۴). از هر نقطه سه نمونه برداشت شد؛ شامل خاک کنار زده‌شده سطحی به‌عنوان خاک سطحی تخریب‌شده، خاک میانی (درست زیر خاک کنار زده‌شده) به‌عنوان خاک همراه با مقدار زیاد سولفات سدیم و قابل استخراج و درنهایت یک نمونه از خاک تحتانی که هنوز تخریب یا برداشت نشده است (شکل ۵). با توجه به هدف طرح و تأثیر دانه‌بندی خاک بر میزان فرسایش بادی، برای دانه‌بندی نمونه‌ها با روش الک خشک (Anderson, 2004: 5) اقدام شد. آنالیز نتایج دانه‌بندی و پارامترهای آماری با نرم‌افزار GRADISTAT (Blott and Pye, 2001: 3) صورت گرفت.



شکل ۳. روندنما (فلوچارت) روش پژوهش

Figure 3. Flowchart of research method

همچنین با توجه به موضوع مطالعه و قرارگرفتن منطقه مدنظر در نواحی خشک، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های باد نیز براساس داده‌های ایستگاه گرمسار بررسی شد.



شکل ۴. نقاط نمونه برداری و ویژگی‌های مورفولوژی آنها. عکس راست، منطقه شاهد و چشم انداز (لنداسکیپ) طبیعی

و عکس چپ، منظره منطقه برداشت سولفات سدیم (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 4. Sampling points and their morphological features. Right photo is the control area and natural landscape and left photo is the sodium sulfate extraction area (Source: Authors, 2020)



شکل ۵. مورفولوژی سطوح تحت برداشت سولفات سدیم (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 5. Morphology of surfaces of sodium sulfate extraction (Source: Authors, 2020)

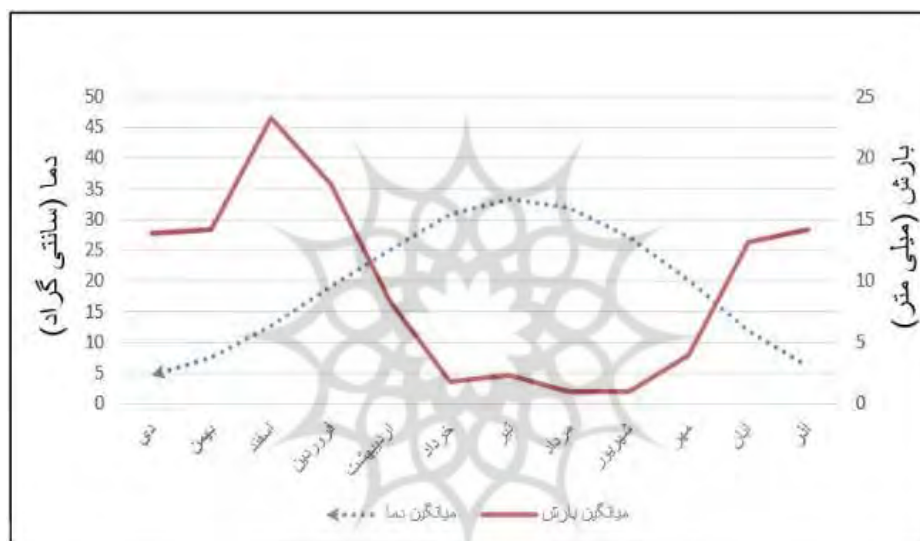
یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

- شرایط اقلیمی

براساس نتایج حاصل از آمار ایستگاه سینوپتیک گرمسار، میانگین بارش سالانه در دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۷۵ تا

۱۳۹۵)، ۱۱۲ میلی‌متر بوده که حداقل بارش، ۰/۹۶ میلی‌متر به ماه شهریور و حداکثر بارش، ۲۳/۳ میلی‌متر به ماه اسفند مربوط است. میانگین دمای سالانه نرمال، ۱۸ درجه سانتی‌گراد و گرم‌ترین ماه سال، تیرماه با متوسط ۳۳/۴ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه سال، دی‌ماه با متوسط دمای ۴/۶ درجه سانتی‌گراد بوده است.

مطالعه اقلیم منطقه براساس داده‌های ایستگاه گرمسار نشان داد اقلیم منطقه براساس روش دومارتن خشک و بیابانی است. براساس اقلیم نمای آمبروزه و ضریب بارندگی آمبروزه (Q)، شهرستان گرمسار در اقلیم خشک سرد با بارش زمستانه قرار می‌گیرد. به‌منظور شناخت بهتر از مدت و شدت خشکی منطقه، نمودار آمبروترمیک ایستگاه گرمسار ترسیم شد (شکل ۶). براساس این نمودار، حدود ۷ ماه از سال شرایط خشکی بر منطقه حاکم است. این حاکمیت خشکی می‌تواند بر پارامترهای تشدیدکننده فرسایش بادی همچون رطوبت خاک و پوشش گیاهی تأثیرگذار باشد. دوره مرطوب منطبق بر فصول سرد سال یعنی زمستان و پاییز است.



شکل ۶. نمودار آمبروترمیک ایستگاه گرمسار (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

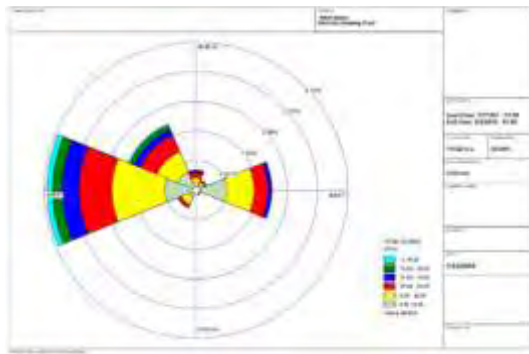
Figure 6. Ambrothermic diagram of Garmsar station (Source: Authors, 2020)

- ویژگی‌های باد

مطالعه بادسنجی منطقه شامل مطالعه گل‌باد و گل‌طوفان، براساس داده‌های ایستگاه گرمسار در یک دوره ۳۰ ساله و با نرم‌افزار WD convert و W R Plot انجام شد.

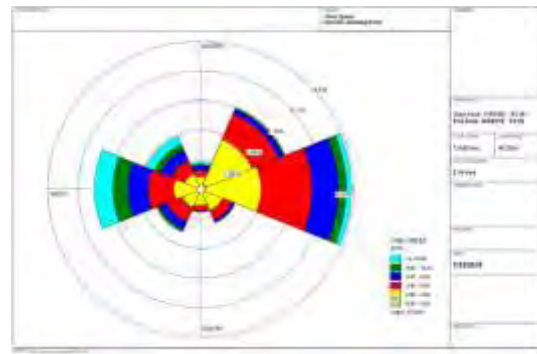
الف. گل‌باد: شکل ۷، گل‌باد سالانه ایستگاه گرمسار را به‌صورت نرمال ۳۰ ساله نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل ۷ نشان می‌دهد، جهت وزش باد غالب در این ناحیه دو جهت کاملاً روشن دارد؛ بادهایی که از شرق به غرب می‌وزند و فراوانی بیشتری دارند و بادهای غرب به شرق که فراوانی کمتر، ولی سرعت بیشتری دارند. با توجه به اینکه درصد مواقع باد آرام در کل سال ۴۷ درصد گزارش شده است، می‌توان گفت که ناحیه گرمسار نسبتاً بادخیز است.

ب. گل‌طوفان: نتایج حاصل از محاسبه و ترسیم گل‌طوفان سالانه نشان می‌دهد منطقه گرمسار به‌طور عمده تحت تأثیر بادهای فرساینده و طوفان‌زای وزیده‌شده از سمت غرب، شمال غرب و شرق قرار دارد (شکل ۸).



شکل ۸. گل طوفان سالانه نرمال ایستگاه گرمسار
(منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 8. Normal annual storm rose
(Source: Authors, 2020)



شکل ۷. گل باد سالانه نرمال ایستگاه گرمسار
(منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 7. Normal annual wind rose
(Source: Authors, 2020)

- زمین شناسی و ژئومورفولوژی

براساس نقشه زمین شناسی، تمامی منطقه مورد مطالعه شامل رسوبات کواترنری (Q) است. بازیدهای صحرایی نشان داد از نظر ژئومورفولوژی، منطقه به واحد دشت سر با تپ دشت سر پوشیده و با لندفرم اراضی پف کرده ناشی از ترکیب و غلظت املاح تعلق دارد.

- دانه بندی و پارامترهای آماری

براساس روش ارائه شده دانه بندی نمونه ها، درصد فراوانی ذرات رسوب نمونه ها در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۱. نتایج دانه بندی (درصد فراوانی ذرات روی هر الک) (منبع: یافته های پژوهش، ۱۳۹۹)

Table 1. granulometry results (percentage of particles on each sieve) (Source: Research findings, 2020)

جمع	اندازه ذرات (μ)							ویژگی عمق	شماره نقاط
	<۶۳	۶۳-۱۲۵	۱۲۵-۲۵۰	۲۵۰-۵۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	≥۲۰۰۰		
۱۰۰	۱/۶	۲/۱	۵/۶	۹/۶	۶/۸	۲/۵	۷۱/۸	سطحی	۱ شاهد
۱۰۰	۲/۵	۵/۴	۹/۴	۹/۸	۷/۷	۴/۵	۶۰/۷	سطحی	۲ شاهد
۱۰۰	۵/۶	۷/۵	۹/۹	۱۲/۴	۱۱/۹	۸/۶	۴۴/۱	لایه سطحی کنار زده شده	۳
۱۰۰	۱۰/۲	۲۶/۳	۴۱/۹	۱۸/۹	۱/۹	۰/۳	۰/۵	لایه میانی	
۱۰۰	۳۰/۳	۲۲/۹	۲۵/۹	۱۳/۹	۳/۸	۱/۱	۲/۱	لایه تحتانی	
۱۰۰	۳/۳	۷/۸	۱۳/۳	۱۳/۷	۱۰/۹	۶/۵	۴۴/۵	لایه سطحی کنار زده شده	۴
۱۰۰	۱۳/۰	۱۴/۲	۲۴/۹	۲۴/۷	۱۳/۶	۶/۳	۳/۳	لایه میانی	
۱۰۰	۲۰/۶	۲۲/۹	۳۰/۱	۱۹/۱	۴/۹	۱/۳	۱/۲	لایه تحتانی	

همان گونه که جدول ۱ نشان می دهد، دانه بندی ذرات برای ذرات کمتر از ۲۰۰۰ میکرون صورت گرفته است که براساس مراجع علمی شامل محدوده ذرات مورد فرسایش بادی هستند. براساس همین مراجع علمی، آسیب پذیرترین ذرات به محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون مربوط است (Bagnold, 2012: 97). ذرات بالاتر و پایین تر از این محدوده

حساسیت کمتری به فرسایش دارند. با این وصف، لایه سطحی نمونه شاهد ۱ که در معرض فرسایش بادی است، با ۷۱/۸ درصد ذرات بالای ۲۰۰۰ میکرون، بیشترین مقاومت را در برابر فرسایش بادی و لایه میانی نمونه ۳ که در زمان برداشت سولفات سدیم در معرض فرسایش بادی است، بیشترین حساسیت را به فرسایش بادی از خود نشان می‌دهند. پارامترهای آماری دانه‌بندی (Folk and Ward, 1957: 11) نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. پارامترهای آماری حاصل از دانه‌بندی نمونه‌ها (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Table 2. Statistical parameters obtained from the granulometry (Source: Research findings, 2020)

شماره نقاط	میانه (μm)	میانگین (μm)	متوسط اندازه دانه	مد طبقات رسوب (μm)	جورشدگی Sorting	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
۱ شاهد	۲۴۶۷/۵	۱۵۵۹/۳	Very Coarse Sand	≥۲۰۰۰	Poorly Sorted	Very Fine Skewed	Very Leptokurtic
۲ شاهد	۲۲۵۹/۹	۱۲۴۶/۹	Very Coarse Sand	≥۲۰۰۰	Poorly Sorted	Very Fine Skewed	Platykurtic
۳	۱۳۸۸/۵	۹۰۱/۳	Coarse Sand	≥۲۰۰۰	Poorly Sorted	Very Fine Skewed	Platykurtic
	۱۵۶/۳	۱۵۲/۰	Fine sand	۱۲۵-۲۵۰	Poorly sorted	Fine Skewed	Leptokurtic
	۱۱۳/۶	۸۵/۱۰	Very fine sand	۱۲۵-۲۵۰	Very Poorly Sorted	Fine Skewed	Leptokurtic
۴	۱۴۱۹/۸	۹۱۰/۸	Coarse Sand	≥۲۰۰۰	Poorly Sorted	Very Fine Skewed	Platykurtic
	۱۵۶/۳	۱۵۲/۱	Fine sand	۱۲۵-۲۵۰	Poorly sorted	Fine Skewed	Leptokurtic
	۱۴۵/۲	۱۲۱/۶	Very Fine sand	۱۲۵-۲۵۰	Poorly sorted	Fine Skewed	Leptokurtic

بر اساس جدول ۲، اختلاف چشمگیری بین میانه و میانگین نمونه‌ها مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده نامتجانس بودن ذرات تشکیل‌دهنده نمونه‌هاست که خود را در جورشدگی بسیار ضعیف نمونه‌ها نشان داده است. از طرفی چولگی به سمت ذرات ریزدانه و خیلی ریزدانه نیز اختلاف در حساسیت به فرسایش بادی را در نمونه‌ها تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های اقلیمی نشان داد منطقه بررسی شده جزو مناطق خشک از نوع سرد با بارش زمستانی است؛ بنابراین شرایط خشکی بر منطقه حاکم است. این حاکمیت خشکی می‌تواند بر واکنش‌های شیمیایی و رسوب‌گذاری املاح و همچنین بر فرایند بادی و پارامترهای تشدیدکننده فرسایش بادی همچون رطوبت خاک و پوشش گیاهی تأثیرگذار باشد.

تجزیه و تحلیل داده‌های جدول ۱، تأثیر وجود یا تخریب پوسته (crust) بر فرایند فرسایش باد را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۱، بیش از ۶۰ درصد سطح خاک (متوسط ۶۵ درصد) در نمونه‌های شاهد با پوسته (ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون) پوشش داده شده است؛ در صورتی که پس از تخریب این پوسته برای استخراج سولفات سدیم، میزان ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون به کمتر از ۴۵ درصد می‌رسد؛ یعنی سطح خاک ۲۵ درصد مقاومت در برابر فرایند فرسایش بادی را از دست داده است یا از تأثیر پوشش پوسته بر کاهش فرسایش بادی کم شده است (جدول ۳ و شکل ۹).

پژوهش‌های متعددی درباره تأثیر پوسته‌های تبخیری املاح بر کاهش چشمگیر فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار

انجام شده است؛ هرچند داده‌های این پژوهش‌ها به صورت کمی و همانند این پژوهش اعدادی ارائه نشده، ولی تأییدی بر نتیجه به دست آمده در این مقاله است (Baddock et al. 2011: 38; Houser and Nickling, 2001: 504;) (King et al. 2011: 77; O'Brien et al. 2012: 159; Sweeney et al. 2011: 29).

همچنین مطالعات گسترده آزمایشگاهی درباره تأثیر نمک‌های فلز قلیایی مانند سولفات سدیم بر تثبیت خاک انجام شده که با ایجاد پوسته (ایجاد ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون) به افزایش چشمگیری در مقاومت خاک منجر شده است. این مطالعات نیز نتایج پژوهش حاضر را پشتیبانی می‌کنند (Sherwood, 1962: 106; Lambe et al. 1960: 5;) (Mehra et al. 1955: 335; Li et al. 2021: 7).

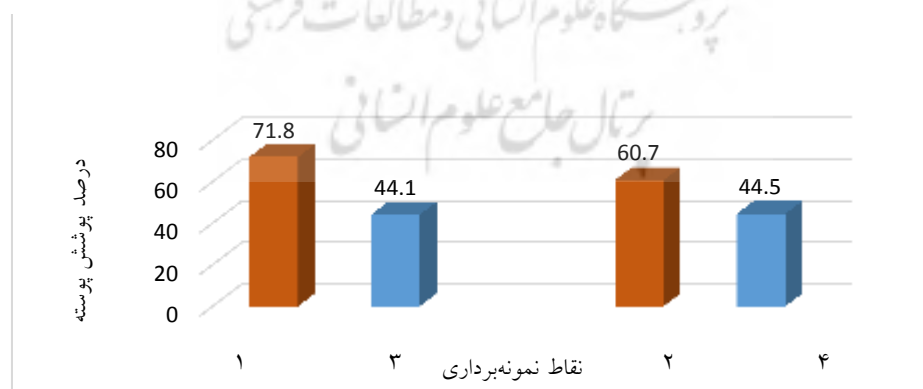
در مطالعه گیلت و همکاران^۱ (2001) درباره چهار نوع پوسته با مورفولوژی، مواد تشکیل دهنده و مقاومت متفاوت، تأثیر پوسته‌ها بر میزان فرسایش بادی در دریاچه خشک اوونز^۲ بررسی شده است. آنها نشان داده‌اند که پوسته‌های موقت و تخریب شده مقاومت کمتری دارند.

لانگستون و همکاران^۳ (2005) در مطالعه‌ای قدرت پایداری پوسته‌های نمکی و بیوتیکی را در برابر تأثیر ذرات در سیستم‌های بادی با استفاده از تونل باد بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد پوسته‌های نمکی بسیار قوی‌تر بوده‌اند، اما در مطالعات تونل باد زودتر از پوسته‌های بیوتیک درهم شکسته می‌شوند و فرسایش می‌یابند؛ زیرا پوسته‌های بیوتیک به دلیل ارتجاعی بودن در برابر سایش محافظت می‌شوند.

جدول ۳. درصد پوشش پوسته در سطوح اراضی مختلف (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Table 3. Percentage of crust cover at different lands surface (Source: Research findings, 2020)

شماره نقاط	ویژگی عمق	درصد پوشش پوسته
۱ شاهد	سطحی	۷۱/۸
۲ شاهد	سطحی	۶۰/۷
۳	سطحی تخریب شده	۴۴/۱
۴	سطحی تخریب شده	۴۴/۵



شکل ۹. تغییرات درصد پوشش پوسته (طبیعی و تخریب شده) (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Figure 9. Percentage of crust cover changes (natural and degraded) (Source: Research findings, 2020)

1. Gillette et al.
2. Owens Dry Lake
3. Langston et al.

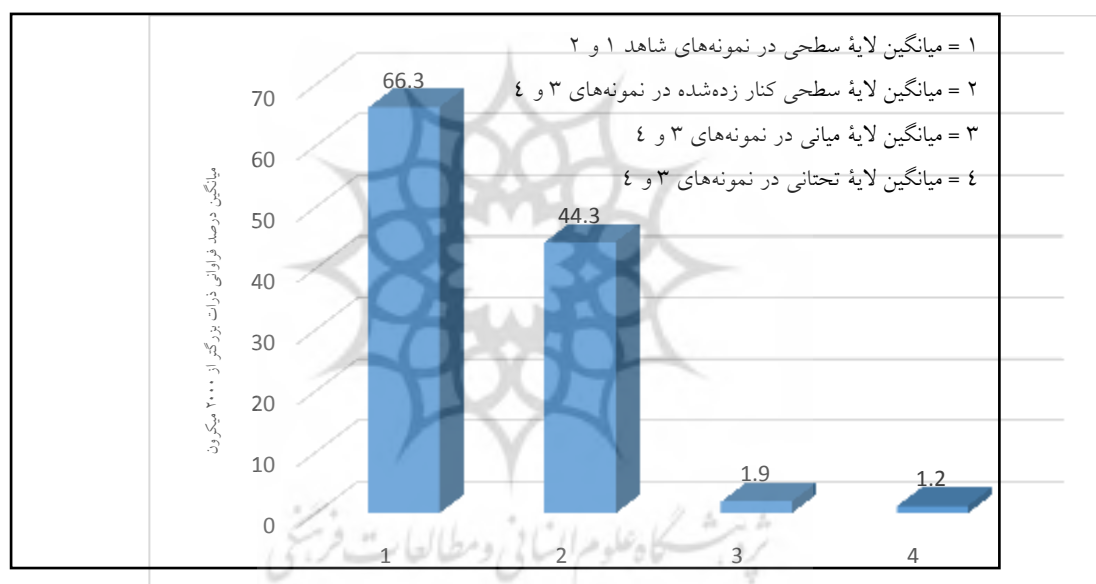
تجزیه و تحلیل تأثیر دانه‌بندی نمونه‌ها، با توجه به جدول ۱، می‌باید در دو قسمت صورت گیرد؛ اول براساس درصد فراوانی ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون (ذرات غیرآسیب‌پذیر یا بسیار کم‌آسیب‌پذیر در برابر فرسایش بادی) (جدول ۴ و شکل ۱۰) و دوم براساس درصد فراوانی آسیب‌پذیرترین ذرات (بین ۶۳ تا ۲۵۰ میکرون) (جدول ۵ و شکل ۱۱).

جدول ۴. میانگین درصد فراوانی ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون در نمونه‌ها (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Table 4. Percentage of Frequency of particles larger than 2000 microns in the samples as average (Source: Research findings, 2020)

میانگین لایه سطحی در نمونه‌های شاهد ۱ و ۲*	میانگین لایه سطحی کنار زده‌شده در نمونه‌های ۳ و ۴	میانگین لایه میانی در نمونه‌های ۳ و ۴	میانگین لایه تحتانی در نمونه‌های ۳ و ۴
۶۶/۳	۴۴/۳	۱/۹	۱/۲

* بیشترین مقدار ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون این لایه به‌صورت پوسته سیلتی-رسی-نمکی بوده است.



شکل ۱۰. تغییرات میانگین درصد فراوانی ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون در نمونه‌ها (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Figure 10. Changes of the percentage of particles larger than 2000 microns in the samples as average (Source: Research findings, 2020)

همان‌طور که جدول ۱ و ۴ نشان می‌دهد، میانگین درصد فراوانی ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون در لایه سطحی نمونه‌های شاهد بیش از ۶۰ درصد ذرات است که عمدتاً به‌صورت سله‌ها یا کلوخه‌های نمکی رسی است و نشان می‌دهد به‌طور کلی منطقه نسبت به فرسایش بادی در حد زیادی مقاوم است. با تخریب این لایه و به‌هم‌ریختن مورفولوژی سطحی خاک، برای برداشت سولفات سدیم از منطقه، میزان میانگین درصد ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. این، به این مفهوم است که اولاً ذرات از حالت سله خارج شده و به طرف ساختمان پودری رفته‌اند و ثانیاً میزان مقاومت سطحی خاک در برابر فرسایش بادی یک‌سوم کاهش یافته است (جدول ۴).

در ادامه فرایند برداشت سولفات سدیم، خاک زیرین که حاوی ذرات خاک با میزان زیادی از ذرات سولفات سدیم پودری است، در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که جدول ۴ و شکل ۱۰ نشان می‌دهند میانگین ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون در لایه سطحی نمونه‌های شاهد ۶۶/۳ درصد است، در حالی که در لایه تخریب‌شده سطحی این میانگین به ۴۴/۳ درصد می‌رسد و در نهایت این میانگین به ۱/۹ درصد در لایه میانی (لایه متأثر از فرسایش بادی) رسیده است که کاهش چشمگیری می‌یابد. این تغییرات به مفهوم کاهش ۳۰ برابری منطقه برداشت سولفات سدیم در برابر فرسایش بادی است.

با توجه به رفتار رسوب‌گذاری فیزیکی شیمیایی در مناطق خشک و نتایج بیشتر منابع علمی، پوسته‌های رسی-سیلتی-نمکی به صورت یک محافظ خاک ریزدانه زیرین عمل می‌کنند. نتایج به دست آمده از این پژوهش با نتایج و نظریه‌های علمی درباره حفاظت پوسته‌ها از ذرات ریز و پودری لایه زیرین (Nield et al., 2016: 59) هماهنگی دارد. همچنین مطالعات تخریب پوسته بر اثر فعالیت حیوانات (Baddock et al., 2011: 39) یا استخراج و برداشت انواع نمک (Gillette et al., 2001: 18096)، موضوع در معرض فرسایش بادی قرار گرفتن لایه زیرین پوسته را تأیید می‌کند.

چنانچه پیش از این اشاره شد، مطالعه گیلت و همکاران در دریاچه خشک اوونز نشان داد که ذرات ریزدانه در لایه زیرین پوسته‌های موقت و تخریب‌شده بیشتر در معرض فرسایش باد قرار دارند (Gillette et al. 2001: 1079). این نتیجه با نتایج کمی به دست آمده در این پژوهش همخوانی دارد.

حفاظت خاک زیرین با لایه پوسته، در توزیع ذرات رسوب در لایه تحتانی منطقه مورد مطالعه نیز مشهود است و همان‌گونه که جدول ۴ و شکل ۱۰ نشان می‌دهد، درصد ذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون این لایه به ۱/۲ می‌رسد. این موضوع به این مفهوم است که اگر برداشتی از سولفات سدیم هم صورت نگیرد و فقط حتی خاک سطحی بر اثر هر عاملی تخریب شود، منطقه به شدت مستعد فرسایش بادی می‌شود. رینولدز و همکاران^۱ (2007) این موضوع را اصولاً به چگالی حجمی کم رسوبات پوک همراه نمک مربوط می‌دانند. مطالعات کلجاهی و همکاران (۱۳۹۷) در دریاچه ارومیه با تونل باد نشان داده است که زیرپهنه‌های خاک نمک‌دار بیشترین پتانسیل تولید گردوغبار را دارد که تأییدی بر پژوهش حاضر است.

اعداد ارائه شده در آسیب‌پذیرترین ذرات (جدول ۵ و شکل ۱۱) نیز مطالب بحث بالا را تأیید می‌کند. تغییرات درصد فراوانی ذرات آسیب‌پذیر از حدود ۱۰ درصد در لایه سطحی در نمونه‌های شاهد به حدود ۵۰ درصد در لایه میانی و تحتانی مناطق برداشت‌شده رسیده است که به مفهوم حساس شدن منطقه به فرسایش بادی در حدود ۵ برابر شدن پس از فرایند برداشت سولفات سدیم است.

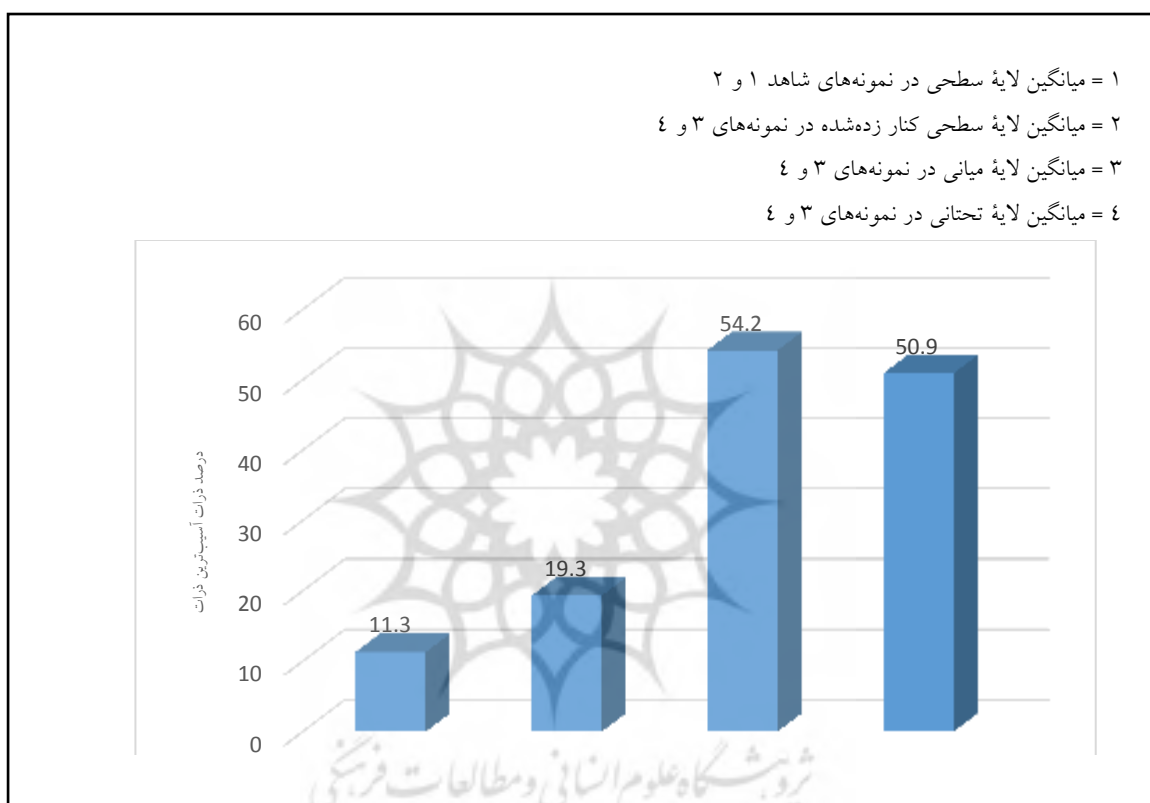
1. Reynolds et al., 2007

جدول ۵. میانگین درصد فراوانی آسیب‌پذیرین ذرات (بین ۶۳ تا ۲۵۰ میکرون) در نمونه‌ها

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Table 5. Percentage of Frequency of vulnerable particles as average (between 63 and 250 microns) in the samples (Source: Research findings, 2020)

میانگین لایه تحتانی در نمونه‌های ۳ و ۴	میانگین لایه میانی در نمونه‌های ۳ و ۴	میانگین لایه سطحی کنار زده‌شده در نمونه‌های ۳ و ۴	میانگین لایه سطحی در نمونه‌های شاهد ۱ و ۲
۵۰/۹	۵۴/۲	۱۹/۳	۱۱/۳



شکل ۱۱. تغییرات درصد فراوانی آسیب‌پذیرین ذرات (۶۳ تا ۲۵۰ میکرون) (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Figure 11. Changes in the frequency percentage of vulnerable particles (between 63 and 250 microns) in the samples (Source: Research findings, 2020)

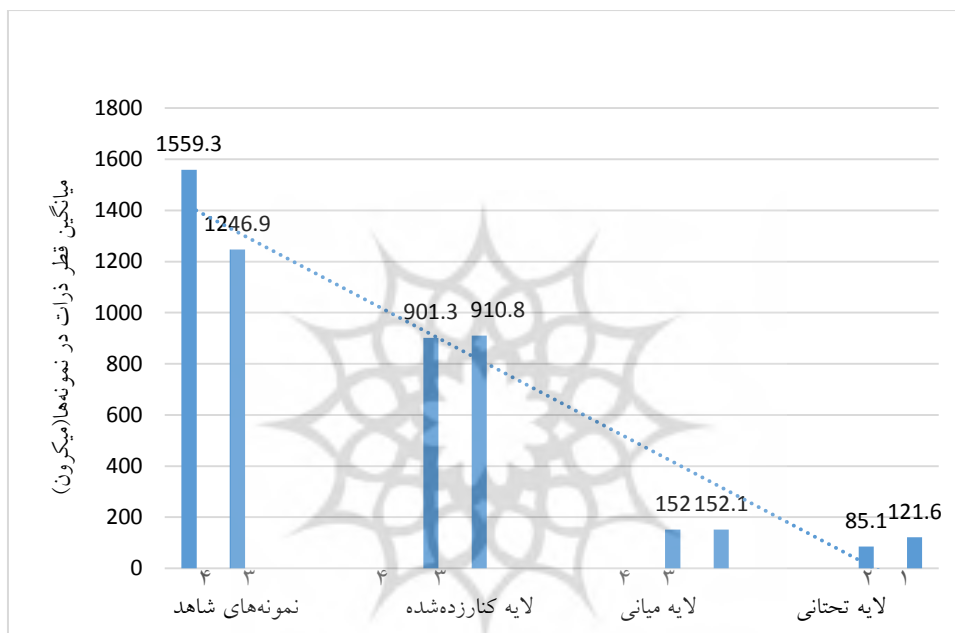
جدول ۲ منتج از جدول ۱، وضعیت میانگین و پارامترهای آماری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود متوسط قطر ذرات، تغییرات زیاد و منظمی از ماسه خیلی درشت (لایه سطحی نمونه‌های شاهد) تا ماسه درشت (لایه سطحی تخریب‌شده و کنار زده‌شده) و تا ماسه ریز (لایه میانی) و در نهایت ماسه خیلی ریز (لایه تحتانی) دارد که افزایش حساسیت به فرایند فرسایش بادی را از لایه سطحی (پوسته) تا لایه پایینی نشان می‌دهد. جدول ۶ و شکل ۱۲ این تغییرات را نشان می‌دهد. این به این معناست که منطقه به‌طور طبیعی در برابر فرایند فرسایش بادی مقاوم است و تخریب لایه سطحی به هر منظوری باعث افزایش فرسایش با باد و در دسترس قرار دادن ذرات در معرض فرسایش می‌شود. بحث قابلیت دسترسی به رسوب یا همان حساسیت ذرات سطح زمین به برداشته‌شدن با باد با

مطالعات و پژوهش‌های دیگران تأیید می‌شود (Kocurek et al., 1999: 351, Muhs et al., 2003: 12, Alcántara- (Carrió et al., 2001: 16).

جدول ۶. تغییرات میانگین قطر ذرات از لایه سطحی تا لایه تحتانی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Table 6. Changes in the average of particle diameter from the surface layer to the bottom layer (Source: Research findings, 2020)

میانگین (μm) لایه تحتانی در نمونه‌های ۳ و ۴		میانگین (μm) لایه میانی در نمونه‌های ۳ و ۴		میانگین (μm) لایه سطحی کنار زده شده در نمونه‌های ۳ و ۴		میانگین (μm) در نمونه‌های شاهد ۱ و ۲	
۱۲۱/۶	۸۵/۱	۱۵۲/۱	۱۵۲/۰	۹۱۰/۸	۹۰۱/۳	۱۲۴۶/۹	۱۵۵۹/۳



شکل ۱۲. تغییرات میانگین قطر ذرات (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

Figure 12. Changes of particle diameter average (Source: Research findings, 2020)

همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد، مد طبقات رسوب، تغییرات زیادی در لایه‌های سطحی و لایه‌های میانی و تحتانی دارد؛ به طوری که از لایه سطحی با مد بیش از ۲۰۰۰ میکرون به مد ۱۲۵-۲۵۰ میکرون در لایه میانی و تحتانی می‌رسد. همچنین جورشدگی‌های خیلی ضعیف لایه میانی و تحتانی نسبت به جورشدگی‌های ضعیف لایه پوسته و لایه سطحی کنار زده شده، به اضافه چولگی‌های به طرف ذرات ریزدانه لایه میانی و تحتانی نسبت به چولگی‌های به طرف ذرات خیلی ریزدانه لایه پوسته دست نخورده و لایه سطحی کنار زده شده و همچنین کشیده بودن منحنی توزیع در دو لایه میانی و تحتانی، نشان از حساس بودن این دو لایه به فرسایش دارد.

مطالعات انجام شده نشان داده که انتقال ذرات با باد به اندازه دانه، شکل و جورشدگی بستگی دارد (Williams, 1964: 285, Willetts et al., 1982: 409). مطالعات شاهوردی و همکاران (۱۳۹۵) نیز نشان داده که با ضعیف‌تر شدن جورشدگی ذرات در نمونه‌ها، تأثیر فرسایش بادی بر اراضی بیشتر می‌شود.

جمع‌بندی و پیشنهادها

درک فرایندهای استخراج و استحصال سولفات سدیم در محیط‌های پلایایی، چهارچوبی را برای تشخیص چگونگی تأثیر متقابل عوامل محیطی و انسانی بر تخریب چشم‌اندازهای (لنداسکیپ‌های) بیابانی و ایجاد آلودگی‌های ایجادشده از آنها فراهم می‌کند. فرایندهای تخریبی در محیط‌زیست استحصال سولفات سدیم شامل استخراج باز از طبیعت، دپوی مواد و درنهایت حوضچه‌های رسوب پسماندها می‌شود که در هر کدام از این مراحل آلودگی‌های مختلف ایجاد می‌شود. در استخراج روباز، مواد و عناصر خاک طبیعی تخریب می‌شوند و در معرض فرسایش قرار می‌گیرند. مطالعه حاضر بر این بخش تمرکز داشته است.

فرایند دپو از مراحل است که خاک با ساختمان پودری در معرض فرسایش قرار دارد. در این زمینه می‌توان از مطالعه جعفری (۱۳۹۲) نام برد که نشان داده فعالیت در استحصال سولفات سدیم در منطقه آرادان بر میزان کاهش پوشش گیاهی و افزایش فرسایش بادی منطقه اثر مثبت دارد. مطالعه برتونز و همکاران^۱ (2010) نشان داده است رسوبات و ضایعات معدنی در فرایند حوضچه‌های رسوب تحت تأثیر فرسایش بادی و فرسایش آب قرار می‌گیرند؛ همچنین غلظت زیاد فلزات سنگین در این حوضچه‌ها، سلامت انسان را به خطر می‌اندازد و تخریب اراضی کشاورزی را نیز تشدید می‌کند. این فرایندها شاید در وسعت کم رخ دهد، اما از نظر حجم و آثار تخریبی بالقوه ممکن است در مقیاس منطقه‌ای و محلی مهم باشد.

فرسایش بادی و گردوغبارهای حاصل از فرایند استحصال سولفات سدیم (گردوغبارهای معدنی - تبخیری evaporite-mineral) تمایزاتی از نظر خواص تابشی، شیمی جوی، پویایی اکوسیستم و سلامت انسان با گردوغبارهای طبیعی (معدنی - آواری clastic mineral) دارد (Reynolds et al., 2007: 1823).

مشاهدات صحرائی، نتایج آزمایشگاهی دانه‌بندی ذرات رسوب و ویژگی‌های آماری آنها و مطالعات گل باد، گل طوفان نشان داد برداشت سولفات سدیم به روش استخراج روباز به دلیل تخریب پوسته تبخیری با منشأ فیزیکوشیمیایی باعث تخریب محیط زیست و شروع فرسایش بادی می‌شود. همچنین این مطالعات نشان داد با برداشت سولفات سدیم، لایه زیرین پوسته که معمولاً ذرات ریزدانه دارد، در برابر فرایند باد آسیب پذیرتر می‌شود. درنهایت با تغییرات مکانی و جابه‌جایی استخراج از یک منطقه به مناطق دیگر، به دلیل کاهش میزان سولفات سدیم، تمام منطقه در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرد که باعث گسترش و تشدید تخریب محیط زیست و فرسایش بادی در نواحی وسیع‌تر می‌شود. با توجه به آثار محیط‌زیستی مشاهده‌شده در محل پیشنهاد می‌شود موضوعاتی از جمله بررسی موضوع به صورت داده‌های آماری، مقایسه منطقه مدنظر با مناطق مشابه به‌ویژه در پلایای میقان به‌عنوان وسیع‌ترین منطقه برداشت سولفات سدیم و اثر برد فیزیکی و مسافتی آلودگی حاصل از استخراج تا استحصال سولفات سدیم مطالعه شود.

1. Brotons et al.

منابع

اختصاصی، محمدرضا، قالیباف، محمد، عظیم‌زاده، حمیدرضا، امتحانی، محمدحسن، (۱۳۸۲) مطالعه تغییرات پتانسیل فرسایش‌پذیری بادی خاک درمقابل املاح مختلف به کمک دستگاه فرسایش بادی، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۱ و ۲.

اصغری کلجاهی، ابراهیم، حسین‌پور اصل کلیر، سکینه، ندیری، عطاءالله، (۱۳۹۷). بررسی امکان ایجاد ریزگردهای نمکی در پهنه شمال شرقی دریاچه ارومیه، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۸ (۲)، ۴۲-۶۱.

بیگی هرچگانی، اعظم، (۱۳۹۶). بررسی اثرات برداشت سولفات سدیم بر خاک و پتانسیل فرسایش بادی، کریم‌پور، مجید، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، پاشایی، عباس، (۱۳۸۱)، کویرهای ایران و خصوصیات ژئومورفولوژیکی و پالئوکلیماتولوژی آن، انتشارات سازمان جغرافیایی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح.

جوزقیان، امیر، بشری، حسین، پهلوانروی، احمد، آجرلو، مجید، (۱۳۹۵). تأثیر استخراج معادن رس و گچ بر وضعیت پوشش گیاهی و خاک اکوسیستم مناطق خشک؛ مطالعه موردی: دشت سگری اصفهان، بوم‌شناسی کاربردی، ۵ (۱۵)، ۶۵-۷۵.

شاهوردی، شعله، نیکو، شیما، مشهدی، ناصر، جنیدی، حامد، کیانیان، محمدکیا، (۱۳۹۵). بررسی توان رسوب‌زایی لندفرم‌ها براساس تغییر در کاربری اراضی؛ مطالعه موردی: دامغان، نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان، ۵ (۱۲)، ۳۷-۵۰.

قربانیان، جعفری، (۱۳۹۲). بررسی اثرات فعالیت شرکت سولفات سدیم آرادان بر پوشش گیاهی و فرسایش بادی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی.

مشهدی، ناصر، (۱۳۹۶). برداشت گچ و تأثیر آن بر تخریب سرزمین و فرایند باد؛ مطالعه موردی: استان سمنان، کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع طبیعی در کشورهای در حال توسعه.

میری، عباس، پهلوانروی، احمد، مقدم‌نیا، علیرضا، (۱۳۸۷). بررسی وقوع طوفان‌های گردوخاک در منطقه سیستان پس از وقوع خشکسالی‌های تناوبی، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۶، شماره ۳، صص ۳۴۲-۳۲۹.

Anderson J.R., (2004). **Sieve analysis lab exercise**. University of Georgia.

Alcántara Carrió, J., & Alonso Bilbao, I., (2001). **Aeolian sediment availability in coastal areas defined from sedimentary parameters**. Application to a case study in Fuerteventura. Scientia Marina.

Arnold, A., & Zehnder, K., (1990). **Salt weathering on monuments**. In **The conservation of monuments in the Mediterranean Basin: the influence of coastal environment and salt spray on limestone and marble**. Proceedings of the 1st International Symposium, Bari, 7-10 June 1989= La conservazione dei monumenti nel bacino Mediterraneo: Influenza dell'ambiente costiero e dello spray marino sulla pietra calcarea e sul marmo. Atti del 1 Simposio internazionale, Bari, 7-10 giugno 1989 (pp. 31-58).

- Asmarhansyah, A., Badayos, R.B., Sanchez, P.B., Cruz, P.C.S., & Florece, L.M., (2017). **Land suitability evaluation of abandoned tin-mining areas for agricultural development in Bangka Island, Indonesia**. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 4 (4), 907 p.
- Baddock, M.C., Zobeck, T.M., Van Pelt, R.S., & Fredrickson, E.L., (2011). **Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces: Cattle trampling effects**. *Aeolian Research*, 3 (1), 31-41.
- Bagnold, R.A., (2012). **The physics of blown sand and desert dunes**. Courier Corporation.
- Blott, S.J., & Pye, K., (2001). **GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments**. *Earth surface processes and Landforms*, 26 (11), 1237-1248.
- Brotos, J.M., Díaz, A.R., Sarría, F.A., & Serrato, F.B., (2010). **Wind erosion on mining waste in southeast Spain**. *Land Degradation & Development*, 21 (2), 196-209.
- Chatterji, S., & Jensen, A.D., (1989). **Efflorescence and breakdown of building materials**. *Nordic Concrete Research*, (8), 56-61.
- Folk, R.L., Ward, W.C., (1957). **Brazos river bar: a study of the significance of grain size parameters**. *Journal of sedimentary petrology*, 27; 3-26.
- Flatt, R.J., Scherer, G.W., (2002). **Hydration and crystallization pressure of sodium sulfate: a critical review**. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 712.
- Franks, D.M., Brereton, D., & Moran, C.J., (2010). **Managing the cumulative impacts of coal mining on regional communities and environments in Australia**. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 28 (4), 299-312.
- Gillette, D.A., Adams, J., Muhs, D., & Kihl, R., (1982). **Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air**. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87 (C11), 9003-9015.
- Gillette, D.A., Niemeyer, T.C., & Helm, P.J., (2001). **Supply-limited horizontal sand drift at an ephemerally crusted, unvegetated saline playa**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D16), 18085-18098.
- Houser, C.A., & Nickling, W.G., (2001). **The factors influencing the abrasion efficiency of saltating grains on a clay-crusted playa**. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26 (5), 491-505.
- King, J., Etyemezian, V., Sweeney, M., Buck, B.J., & Nikolich, G., (2011). **Dust emission variability at the Salton Sea, California, USA**. *Aeolian Research*, 3 (1), 67-79.
- Kracek, F.C., (1928). **In: Washburn, E.W. (Ed.), International Critical Tables 3**. McGraw Hill, New York.
- Kocurek, G., & Lancaster, N., (1999). **Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example**. *Sedimentology*, 46 (3), 505-515.
- Lakes Environmental WRPLOT. Available at: <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>.
- Lambe, T.W., Michaels, A.S., & Moh, Z.C., (1960). **Improvement of soil-cement with alkali metal compounds & discussion**. *Highway Research Board Bulletin*, (241).
- Langbein, W.B., (1961). **Salinity and hydrology of closed lakes: A study of the long-term balance between input and loss of salts in closed lakes (Vol. 412)**. US Government Print. Office.
- Langston, G., & Neuman, C.M., (2005). **An experimental study on the susceptibility of crusted surfaces to wind erosion: a comparison of the strength properties of biotic and salt crusts**. *Geomorphology*, 72 (1-4), 40-53.
- Li, S., Li, C., & Fu, X., (2021). **Characteristics of soil salt crust formed by mixing calcium chloride with sodium sulfate and the possibility of inhibiting wind-sand flow**. *Scientific Reports*, 11 (1), 1-11.
- Lippmann, M., & Thurston, G.D., (1996). **Sulfate concentrations as an indicator of ambient particulate matter air pollution for health risk evaluations**. *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, 6 (2), 123-146.

- Nachshon, U., Shahraeeni, E., Or, D., Dragila, M., Weisbrod, N., (2011). **Infrared thermography of evaporative fluxes and dynamics of salt deposition on heterogeneous porous surfaces.** *Water Resources Research*, 47 (12).
- Neave, M., Rayburg, S., (2007). **A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover.** *Geomorphology*, 87 (4), 378-390.
- Nicol, T., (2006). **WA's mining boom: where does it leave the environment?** *Ecos*, 2006(133), 12-13.
- Nield, J. M., Bryant, R.G., Wiggs, G.F., King, J., Thomas, D.S., Eckardt, F.D., Washington, R., (2015). **The dynamism of salt crust patterns on playas.** *Geology*, 43 (1), 31-34.
- Nield, J.M., Neuman, C.M., O'Brien, P., Bryant, R.G., Wiggs, G.F., (2016). **Evaporative sodium salt crust development and its wind tunnel derived transport dynamics under variable climatic conditions.** *Aeolian Research*, 23, 51-62.
- Nield, J.M., Wiggs, G.F., King, J., Bryant, R.G., Eckardt, F.D., Thomas, D.S., Washington, R., (2016). **Climate-surface-pore-water interactions on a salt crusted playa: implications for crust pattern and surface roughness development measured using terrestrial laser scanning.** *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (6), 738-753.
- Mbaya, R.P., (2013). **Land degradation due to mining: the gunda scenario.** *International Journal of Geography and Geology*, 2 (12), 144-158.
- Mehra, S.R., Chadda, L.R., & Kapur, R.N., (1955). **ROLE OF DETRIMENTAL SALTS IN SOIL STABILIZATION WITH AND WITHOUT CEMENT. 1.--THE EFFECT OF SODIUM SULPHATE.** *Indian Concrete Journal*, 33 (7).
- Mudd, G.M., (2010). **The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints.** *Resources Policy*, 35 (2), 98-115.
- Muhs, D.R., Reynolds, R.L., Been, J., & Skipp, G., (2003). **Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources.** *Quaternary International*, 104 (1), 3-18.
- O'Brien, P., Neuman, C.M., (2012). **A wind tunnel study of particle kinematics during crust rupture and erosion.** *Geomorphology*, 173, 149-160.
- Pearson, K.E., Bauder, J.W., (2006). **The basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties.** MSU Extension Water Quality Program.
- Reynolds, R.L., Yount, J.C., Reheis, M., Goldstein, H., Chavez, P., Fulton, R., Forester, R.M., (2007). **Dust emission from wet and dry playas in the Mojave Desert, USA.** *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (12), 1811-1827.
- Rice, M.A., & McEwan, I.K., (2001). **Crust strength: a wind tunnel study of the effect of impact by saltating particles on cohesive soil surfaces.** *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26 (7), 721-733.
- Ripley, E.A., Redmann, R.E., & Maxwell, J., (1978). **Environmental impact of mining in Canada.**
- Roche, C., & Mudd, G., (2014). **An overview of mining and the environment in Western Australia.** *Resource Curse or Cure?* 179-194.
- Rosen, M.R., (1994). **The importance of groundwater in playas: A review of playa classification** □ *Paleoclimate and basin evolution of playa systems*, 289, 1.
- Schwikowski, M., Döscher, A., Gäggeler, H.W., & Schotterer, U., (1999). **Anthropogenic versus natural sources of atmospheric sulphate from an Alpine ice core.** *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51 (5), 938-951.
- Sherwood, P.T., (1962). **Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils.** *Highway Research Board Bulletin*, (353).
- Simon-Coinçon, R., Spain, A.V., & Milnes, A.R., (2003). **Landform processes in the post coal-mining Landscape, Bowen Basin, Australia.** A geomorphological approach. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 17 (1), 20-50.

- Steiger, M., Asmussen, S., (2008). **Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: the phase diagram Na₂SO₄-H₂O and the generation of stress**. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (17), 4291-4306.
- Sweeney, M.R., McDonald, E.V., & Etyemezian, V., (2011). **Quantifying dust emissions from desert landforms, eastern Mojave Desert, USA**. *Geomorphology*, 135 (1-2), 21-34.
- Thaulow, N., Sahu, S., (2004). **Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization**. *Materials Characterization*, 53 (2-4), 123-127.
- Tsui, N., Flatt, R.J., Scherer, G.W., (2003). **Crystallization damage by sodium sulfate**. *Journal of cultural heritage*, 4 (2), 109-115.
- Udoekanem, N.B., Adoga, D.O., & Onwumere, V.O., (2014). **Land ownership in Nigeria: Historical development, current issues and future expectations**. *Journal of environment and Earth science*, 4 (21), 182-189.
- Washington, R., Todd, M.C., Lizcano, G., Tegen, I., Flamant, C., Koren, I., Goudie, A.S., (2006). **Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodélé Depression, Chad**. *Geophysical Research Letters*, 33 (9).
- Webb, N.P., Strong, C.L., (2011). **Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models**. *Aeolian Research*, 3 (2), 165-179.
- Willetts, B.B., Rice, M.A., & Swaine, S.E., (1982). **Shape effects in aeolian grain transport**. *Sedimentology*, 29 (3), 409-417.
- Williams, G., (1964). **Some aspects of the eolian saltation load**. *Sedimentology*, 3(4), 257-287.
- Yocom, J.E., (1958). **The deterioration of materials in polluted atmospheres**. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 8 (3), 203-208.
- Zobeck, T.M., (1991). **Abrasion of crusted soils: Influence of abrader flux and soil properties**. *Soil Science Society of America Journal*, 55 (4), 1091-1097.