Journal of Mineral Resources Engineering, 8(2): 41-59, (2023)



**Research Paper** 



# Quantitative Assessment of Podiform Chromite Deposits, Based on Three-Part Assessment Method in Naeen's Ophiolites

## Esmaeili M.<sup>1</sup>, Soltani-Mohammadi S.<sup>2\*</sup>, Banitaba S.A.<sup>3</sup>

Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, University of Kashan, Iran
 Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, University of Kashan, Iran
 M.Sc, Dept. of Mining Engineering, University of Kashan, Iran

## Received: 03 Jan. 2022 Accepted: 06 Jun. 2022

*Abstract:* Chromite is one of the most used strategic metals. Among different types of Chromite deposits, Padiform Chromite is more considerable economically. On other hand, decision-making for mineral exploration investigation requires accurate estimation of the quality and quantity of new deposits. For estimation of the quality and quantity of deposits, quantitative mineral resource assessments are required. Quantitative mineral resource assessment is based on descriptive, density, and average grade-tonnage models. In this research, a three-part assessment method has been used to estimate podiform chromite deposits in Naeen's Ophiolites. The three-Part assessment method is based on an inverse relationship between the permissive area for a specific deposit type and the number of deposits. Evaluation by the three-part assessment method shows that the understudy region is high potential. Results show a 50% chance of at least 19 deposits with at least 69400 metric tons of chromite & 10% chance of at least 40 deposits with at least 46700 tons of chromite existing in the understudy region. Geochemical anomalies have been used for validation. These anolmalies have been separated based on the concentration-area (C-A) and singularity index methods. At least three geochemical anomalies in the east margin of Naeen ophiolite were identified.

Keywords: Three-part assessments, Estimation of undiscovered deposits, Chromite Naeen.

#### How to cite this article

Esmaeili, M., Soltani-Mohammadi, S., and Banitaba, S. A. (2023). "Quantitative assessment of podiform chromite deposits, based on three-part assessment method in Naeen's Ophiolites". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(2): 41-59. DOI: 10.30479/JMRE.2022.16755.1571

\*Corresponding Author Email: saeedsoltani@kashanu.ac.ir



COPYRIGHTS ©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

#### **INTRODUCTION**

Chromite is one of the most used strategic metals. In Iran, Padiform Chromite is more considerable economically. On the other hand, decision-making for mineral exploration investigation requires accurate estimation of the quality and quantity of new deposits. For estimation of the quality and quantity of these deposits, quantitative mineral resource assessments are required. Mineral deposit models are important in quantitative resource assessments for two reasons: 1) numbers per unit area of deposits and grades and tonnages of most deposit types are significantly different, and 2) types occur in different geologic settings that can be identified from geologic maps [1]. In this research, the Three-part assessment method has been used to estimate podiform chromite deposits in Naeen's Ophiolites.

#### MATERIALS AND METHODS

In the first modern quantitative resource assessment, Allais (1957) used a Poisson distribution to model the occurrence of mineral deposits[2]. Later, Singer et al. developed Three-part assessment models for the estimation of undiscovered deposits[3,4]. Three-part assessment method calculates the deposit density model for a fully discovered region and uses the frequency distribution either directly to provide estimation or indirectly as a strategy in other methods[5]. In this method, fully discovering the region, is not necessary, but the area ratio and the number of discovered deposits are essential. Root et al. presented an algorithm based on the three-part assessment that estimates the number of deposits by 90, 50, and 10 present chance[6-8]. In this research, the probability of occurrence of Chromite deposits with different tonnages was determined by a three-part assessment method. This model could be used for paragenesis of chromite, like Platinum, Iridium, Rhodium, Ruthenium, and, Palladium. All calculations are carried out in the Eminer software.

#### **RESULTS AND DISCUSSION**

Evaluation by the three-part assessment method shows that the understudy region is high potential (Figure 1). Results show that a 50% chance of at least 19 deposits that contain at least 69400 metric tons of chromite, 90% chance of at least 40 deposits that contain at least 46700 tons of chromite & 10% chance of at least 90 deposits that contain at least 2140000 metric ton chromite, exists in understudy region (Figure 2).



Figure 1. Probability of Cr deposits existence versus the number of deposits

Geochemical anomalies have been used for validation. These anolmalies have been separated based on the concentration-area (C-A) (Figures 3A and 3B) and singularity index (Figures 3C and 3D) methods. At least three anomalies in the east margin of Naeen ophiolite were identified. This comparison shows that the north of Naeen is a high potential region for chromite.

#### CONCLUSION

The purpose of mineral resource assessments is to accurately estimate the quality and quantity of new deposits for economic decisions. Three-part assessment method based on the inverse relationship between the permissive area for a specific deposit type and the number of deposits. So the number of discovered deposits and their tonnage is estimable. Results show that a 50% chance of at least 19 deposits, 90% chance of at least 40 deposits & 10% chance of at least 90 deposits, exists in the understudy region.



Figure 2. A: Probability of Cr deposits existence versus The log(Tonnage(millions)) in Naeen region, B: Probability of Pt deposits existence versus The log(Tonnage(millions)) in Naeen region, C: Probability of Ir deposits existence versus The log (Tonnage(millions)) in Naeen region, D: Probability of Rh deposits existence versus The log(Tonnage(millions)) in Naeen region, E: Probability of Ru deposits existence versus The log(Tonnage(millions)) in

Naeen region, F: Probability of Pd deposits existence versus The log(Tonnage(millions)) in Naeen region



**Figure 3. A:** C-A chart for Cr in understudy region, **B:** Mapping Cr geochemical anomalies using C-A method, **C:** Mapping Cr geochemical anomalies using singularity index (SI>1.98), **D:** Mapping Cr geochemical anomalies using singularity index

## REFERENCES

- Cunningham, C. G., Zappettini, E. O., Waldo, V. S., Celada, C. M., Quispe, J., Singer, D. A., Briskey, J. A., Sutphin, D. M., Gajardo, M. M., Diaz, A., Portigliati, C., Berger, V. I., Carrasco, R., and Schulz, K. J. (2008). "Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes Mountains of South America". U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1253, pp. 282.
- [2] Allais, M. (1957). "Method of appraising economic prospects of mining exploration over large territories: Algerian Sahara case study". The Institute for Operations Research and the Management Sciences, 3(4): 285-347. DOI: https://doi. org/10.1287/mnsc.3.4.285.
- [3] Cox, D. P., and Singer, D. A. (1987). "Mineral deposit models". U.S. Geological Survey, Bulletin 1693: 139-141.
- [4] Singer, D. A., Mosier, D. L., and Menzie, W. D. (1993). "Digital grade and tonnage data for 50 types of mineral deposits". US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA.
- [5] Singer, D. A., Menzie, W. D., Sutphin, D. M., Mosier, D. L., and Bliss, J. D. (2001). "Mineral deposit density an update".
  U.S. Geological Survey Professional Paper 1640 A. DOI: 10.3133/pp1640a.
- [6] Cunningham, C. G., Singer, D. A., Zappettini, E. O., Waldo, V. S., Celada, C. M., Quispe, J., Briskey, J. A., Sutphin, D. M., Mariano, G. M., Diaz, A., Portigliati, C., Berger, V. I., Carrasco, R., and Schulz, K. J. (2007). "A preliminary quantitative mineral resource assessment of undiscovered porphyry copper resources in the Andes Mountains of South America". SEG Discovery, 1(71): 1-13. DOI: https://doi.org/10.5382/SEGnews.2007-71.fea.

- [7] Singer, D. A., and Berger, V. I. (2007). "Mineral resource assessment methodologies deposit models and their application in mineral resource assessments". Proceedings, Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resource Assessment, and Sustainable Development U.S. Geological Survey, 1294(1): 71-78.
- [8] Cox, D. P. Lindsey, D. A., Singer, D. A., and Diggles, M. F.(2007). "Sediment-hosted copper deposits of the world". Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.

نشریه مهندسی منابع معدنی، سال ۱۴۰۲، دوره هشتم، شماره ۲، ص ۵۹-۴۱



علمى-پژوهشى



دوره هشتم، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، صفحه ٤٦ تا ٥٩ Vol. 8, No. 2, Summer 2023, pp. 46-59

# بررسی کمی منابع کرومیت انبانهای در افیولیتهای نائین به روش ارزیابی سه بخشی

مریم اسماعیلی'، سعید سلطانی محمدی'`، سید علی بنی طبا ّ

۱ - دانشجوی دکترا، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان ۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان

دریافت: ۱٤۰۰/۱۰/۱۳ پذیرش: ۱٤۰۰/۱۰/۱۳

#### چکیدہ

کرومیت با مصرف گسترده در صنایع مختلف یکی از فلزات استراتژیک به شمار میرود. در میان انواع مختلف کانسارهای کرومیت ایران، کرومیتهای انبانهای از لحاظ اقتصادی بیشتر مورد توجه قرار گرفتهاند. از طرفی برنامهریزی برای تصمیمگیری در خصوص سرمایه گذاری در زمینه اکتشاف منابع معدنی، نیازمند تخمینهای دقیق و قابل استناد از کمیت (تناژ) و کیفیت ماده معدنی (عیار) مورد انتظار است. ارایه تخمینی از کیفیت و کمیت ماده معدنی مورد انتظار در محدودههای اکتشافی نیازمند ارزیابی کمی منابع معدنی بر یای مدلهای توصیفی، چگالی و تناژ – عیار متوسط تیپهای مختلف کانساری انجام می پذیرد. در این تحقیق از روش ارزیابی کمی منابع معدنی بر پایه مدلهای توصیفی، چگالی و تناژ – در افیولیتهای نائین استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن رابطه معکوس بین مساحت نواحی امیدبخش کانسار مورد نظر و چگالی در افیولیتهای نائین استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن رابطه معکوس بین مساحت نواحی امیدبخش کانسار مورد نظر و چگالی می کند به گونهای که انتظار می رود به احتمال ۹۰ درصد حداقل ۳ کانسار با تناژ حداقل ۴۶٬۰۰۰ تن منطقه را برای اکتشافات بعدی مستعد ارزیابی می کند به گونهای که انتظار می رود به احتمال ۹۰ درصد حداقل ۳ کانسار با تناژ حداقل ۴۶٬۰۰۰ تن منطقه و ابرای اکتشافات بعدی مستعد ارزیابی می کند به گونهای که انتظار می رود به احتمال ۹۰ درصد حداقل ۳ کانسار با تناژ حداقل ۴۶٬۰۰۰ تن منطقه و جرای درای درصد حداقل ۴۹ کانسار با تناژ حاصله، با ترسیم منحنی لگاریتمی عیار – مساحت و نیز شاخص سینگولاریتی، جامعه زمینه و آنومالی برای عنصر کروم در منطقه مورد مطالعه به حاصله، با ترسیم منحنی لگاریتمی عیار – مساحت و نیز شاخص سینگولاریتی، جامعه زمینه و آنومالی برای عنصر کروم در منطقه مورد مطالعه به در قلیک مشخص شد. آنومالی های کروم در حاشیه شرقی افیولیت نایین، به تعداد حداقل سه آنومالی بارز قابل مشاهده است. این تعداد آنومالی تفکیک مشخص شد. آنومالیهای کروم در حاشیه شرقی افیولیت نایین، به تعداد حداقل سه آنومالی بارز قابل مشاهده است. این تعداد آنومالی

## کلمات کلیدی

ارزیابی سه بخشی، تخمین کانسارهای کشف نشده، کرومیت، نایین.

استناد به این مقاله

اسماعیلی، م.، سلطانی محمدی، س.، بنی طبا، س. ع.؛ ۱۴۰۲؛ "**بررسی کمی منابع کرومیت انبانهای در افیولیتهای نائین به روش ارزیابی سه بخشی**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۲، ص ۵۹–۴۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.16755.1571

نويسنده مسئول و عهده دار مكاتبات Email: saeedsoltani@kashanu.ac.ir

حقمؤلف © نویسندگان ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

دوره هشتم، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲

## نشريه مهندسي منابع معدني

# ۱– مقدمه

با بررسی عرضه و تقاضای مواد معدنی می توان دلیل اهمیت برخي منابع معدني نسبت به ساير منابع را دريافت. عرضه و تقاضای منابع معدنی از الگوی توسعه منطقهای تبعیت می کند که بر قیمت تاثیر گذاشته و ضرورت ارزیابی را مشخص می کند. عرضه مواد معدنی تنها متاثر از برخی تیپهای کانساری خاص است. علاوه بر این تنها ذخایر بزرگ بر عرضه مواد معدنی در سطح جهانی تاثیر گذار هستند. این تاثیرات که از توزیع تناژ و تيپ كانسارها ناشي ميشود، مهمترين منبع عدم قطعيت در ارزیابیها است و بر ریسک اکتشافی نیز تاثیر می گذارد[۱]. در اکثر منابع علمی در زمینه ارزیابی مواد معدنی به دو مدل توصيفی و مدل عيار - تناژ اشاره شده است. اين دو مدل، پايه سایر مدلهای ارزیابی منابع معدنی مانند مدل چگالی است. سازگاری در ارزیابی کمی به سازگاری درونی مدل توصیفی و مدل تناژ عیار مربوطه، وابسته است[۲]. روش ارزیابی سه بخشی برای ارزیابی کانسارهای مختلف در سراسر جهان استفاده شده است[۵–۳]. از توزيع فراواني تناژ و عيار متوسط کانسارهای کاملا اکتشاف شده از یک تیپ مشخص می توان به عنوان مدل تناژ- عيار متوسط كانسارهاي كشف نشده آن تيپ در خاستگاه زمین شناسی مشابه استفاده کرد. ترکیب مدل های تناژ- عیار متوسط [۱۱-۶] با تخمینهای انجام گرفته از تعداد كانسارهاى كشف نشده، ابزارى اصولى براى ترجمه ارزيابى کانساری از زبان زمینشناسی به زبان مورد استفاده توسط تصمیم گیران را فراهم می آورد. منحنی های تناژ – عیار متوسط در ارزیابیهای کمی منابع معدنی و برنامهریزی اکتشاف سودمند هستند. این مدلها در طبقهبندی کانسارهای شناخته شده در یک منطقه مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین مدلهای تناژ- عیار متوسط برای تعیین مناطق مجاز (در اکتشاف) برای یک کانسار مشخص و بهبود اطلاعات درباره ارزش بالقوه کانسارهای کشف نشده مفید هستند[۱۲]. بررسی مدلهای کانساری مختلف حاکی از آن است که یک رابطه معکوس میان چگالی کانسار و مساحت نواحی امیدبخش وجود دارد[١٢-١٢]. هرچند ممكن است كه فهم همه دلايل رابطه معکوس میان چگالی کانسار و مساحت نواحی امیدبخش ممكن نباشد، ولى مىتوان از اين روابط براى تخمين تعداد کانسارهای کشف نشده استفاده کرد[۱۵،۱۲،۶،۹،۲]. اولین بار این ایده که می توان برای تخمین تعداد کانسارهای کشف نشده از مساحت نواحی امیدبخش استفاده کرد، توسط آلیاس

مطرح شد. وی از توزیع پواسون، تعداد کانسارهای کشف شده و مساحت نواحی امیدبخش برای تخمین تعداد کانسارهای کشف نشده استفاده کرد[۱۶]. مدلهای سه بخشی ارزیابی کمی کانسارهای کشف نشده بعدها توسط سینگر و همکارانش توسعه یافتند[۱۷،۷]. در ارزیابی سه بخشی، باید محدوده مجاز در نظر گرفته شده با مدلهای توصیفی، مدلهای تناژ – عیار متوسط با مدلهای توصیفی و با کانسارهای شناخته شده در منطقه و تخمینهای ارایه شده از تعداد کانسارها با مدلهای تناژ – عیار متوسط سازگار باشند. در چنین شرایطی میتوان انتظار داشت که ذاتا همه بخشها و تخمینهای ارایه شده نیز با یکدیگر سازگار باشند.

در ارزیابی سه بخشی تخمین تعداد کانسار موجود در منطقه برای حداقل تعداد کانسارهای مرتبط با چندکهای ۹۰، ۵۰،۱۰، ۵ و یک درصدی (به احتمال ۹۰، ۵۰،۱۰، ۵ و یک درصد) و بدون این پیش نیاز که تخمینها از توزیع فراوانی خاصی تبعیت میکنند، ارایه میشود[۱۲]. از ارزیابی سهبخشی برای ارزیابی کانسارهای مختلفی در سراسر جهان استفاده شده است که به عنوان نمونه میتوان به ارزیابی منابع مس پورفیری، کرومیت و اورانیم اشاره کرد[۵،۶۰۶–۱۸].

با توجه به وضعیت زمین شناسی و با بررسی کانسارهای کشف شده در ایران می توان به ظرفیت بالای کانسارهای کرومیت کشف نشده در ایران پی برد، اما ارزیابی کمی این ذخایر برای بررسیهای اقتصادی و تصمیم گیریهای بعدی، در سطح کلان ضروری به نظر میرسد. به طور کلی کانسارهای کرومیت انبانهای در مجموعههای افیولیتی که بدوا در پشتههای میان اقیانوسی و یا حوضههای پشت قوسی تشکیل شدهاند، مشاهده می شوند. در کانسارهای تودهای کرومیت در پوسته بیرونی در محل لنزها یا لایههای اولترامافیک و افیولیتی اتفاق میافتد که از لحاظ زمین شناسی به دوران مزوزوئیک یا زمانهای بعد از آن تعلق دارند. سنگ میزبان آنها شامل پریدوتیتهای سرپانتینیتی شده، هارزبورژیتها و نهشتههای دونیتی است. اشکال آنها به صورت لنزی، صفحهای و تودههای انباشته در ابعاد مختلف دیده می شود [۲۱]. در واقع افيوليتها به عنوان نواحي اميدبخش براي اكتشاف كانسارهاي کرومیت انبانهای به شمار میروند. کانسارهای کرومیت ایران به صورت تودههای عدسی مانند، نامنظم و به صورت پراکنده معرفی شدهاند، که چه در شمال ایران (منطقه خراسان) و چه در جنوب کشور (منطقه اسفندقه و فاریاب) به شکل عدسیها

و تودههای نامنظم در داخل سنگهای آذرین قلیایی تا بسیار قلیایی تشکیل شده است[۲۲]. افیولیتهای ایران، افیولیتهای خاور اروپا (شامل یونان و ترکیه) را به افیولیتهای باختر آسیا (مانند عمان، پاکستان و تبت) مرتبط میکنند. این افیولیتها بخشهایی از کمربند نئوتتیس در خاورمیانه هستند که در دوره زمانی ژوراسیک - کرتاسه پسین تشکیل شدهاند. تشکیل افیولیتهای آلپی (شامل آپنینها و دیناریدها - هلینیدها) به زمان ژوراسیک و شکل گیری افیولیتهای توروس (ترکیه)، زاگرس عمان و هیمالیا به کرتاسه پسین نیز بخشی از این شدهاند[۲۳]. کرومیتهای منطقه نائین نیز بخشی از این

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در شمال شهرستان نائین واقع شده است. این منطقه شامل آمیزههای رنگی افیولیتی است. در این تحقیق با استفاده ارزیابی سه بخشی میزان احتمال وقوع کانسارهای کرومیت با تناژهای مختلف مشخص شده است. این ارزیابی نه تنها برای کرومیت بلکه برای سایر عناصر همراه کانسارهای کرومیت انبانهای شامل پلاتینیم، ایریدیم، رودیم، روتنیم و پالادیم احتمال وقوع در تناژهای مختلف را مشخص میکند. همچنین احتمال وقوع تعداد مشخصی کانسار در منطقه نیز ارایه شده است. در پایان نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفتهاند. کلیه محاسبات این تحقیق در نرمافزار Eminer انجام شده است.

# ۲- مواد و روشها

# ۲-۱- ارزیابی سه بخشی منابع معدنی

اهمیت مدلهای کانساری در زمینه ارزیابی کمی منابع معدنی به دو دلیل باز می گردد: ۱) بین اکثر تیپهای کانساری از نظر چگالی کانساری (تعداد کانسارها بر واحد سطح) و تناژ و عیار متوسط تفاوت فاحشی وجود دارد و ۲) تیپهای مختلف درون خاستگاههای زمینشناسی متفاوتی رخ میدهند که از روی نقشههای زمینشناسی قابل تشخیصاند. در نتیجه میتوان از مدلهای کانساری برای کاهش عدم قطعیت در نشده استفاده کرد[۲]. در صورتی که ارزیابی صرفا با هدف تخمین تناژ فلز کشف نشده انجام شود، دسترسی به مدل فلز محتوی ضروری است ولی برای بررسی توجیه پذیری اقتصادی استحصال فلز (که به عنوان یک پارامتر مهم در اکثر ارزیابیها

مورد بررسی قرار می گیرد) اطلاع از عیار و تناژ کانسارها نیز ضروری خواهد بود [۱۲]. بررسیهای انجام شده در خصوص کانسارهای کرومیت انبانهای، مس پورفیری و ماسیوسولفید ولکانوژنیک به این نکته اشاره دارد که حداقل درون یک تیپ کانساری، از مساحت منطقه امیدبخش میتوان به عنوان راهنمایی برای ارایه یک تخمین نااریب از تعداد کانسارها استفاده کرد[۱۲]. به این منظور برای هر یک از کانسارهای مورد بررسی با یک جامعه آماری بزرگ از کانسارهای کشف شده، میتوان یک مدل کانساری مطابق با مدل توصیفی آن کانسار و نیز منطبق با مدل تناژ– عیار آن کانسار ارایه و از آن برای ارزیابیهای بعدی استفاده کرد.

# ۲-۲- مدل چگالی کرومیت انبانهای

مدل چگالی کانسار یکی از انواع مختلف مدلهای کانساری است که در آن تعداد کانسارها بر واحد سطح از مناطق کاملا کشف شده محاسبه شده و توزیع فراوانی حاصله برای آن، امکان تخمین تعداد کانسارهای کشف نشده را فراهم میآورد[۱۲]. همچنین میتوان در مدل چگالی کانسار تعداد کانسارهای از یک تیپ را در واحد سطح بر اساس مناطق کنترلی که اکتشاف آنها کامل شده است، محاسبه کرده و از توزیع فراوانی حاصله یا به صورت مستقیم برای ارایه تخمین یا به صورت غیرمستقیم به عنوان یک راهبرد در روشهای دیگر استفاده کرد[1]. در این روش لزومی ندارد که منطقه پایه کاملا اکتشاف شده باشد، اما اطلاع از تعداد کانسارهای کشف شده و نسبت مساحت اما اطلاع از تعداد کانسارهای کشف شده و نسبت مساحت

سینگر با استفاده از دادههای مرتبط با مساحت محدوده مورد بررسی در اکتشاف کانسارهای کرومیت انبانهای به ارایه مدل چگالی کانساری برای این تیپ کانسارها اقدام کرد[۴]. در جدول ۱ اطلاعات آماری مساحت محدوده اکتشافی مجاز و تعداد کانسار کرومیت انبانهای کشف شده که مبنای تهیه مدل چگالی بودهاند، ارایه شده است. در ادامه سینگر مدلی برای تخمین تعداد حداقل کانسارهای کرومیت انبانهای کشف نشده در یک محدوده در سطوح اطمینان ۱۰ ،۰۰ و ۹۰ درصدی ارایه کرد که نمودار شماتیک این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است[۴]. از این مدل میتوان برای تخمین منابع معدنی در سایر مناطق نیز استفاده کرد. محور افقی این نمودار نشانگر مساحت محدوده مجاز و محور قائم تعداد کانسارهای کشف نشده است.

	ميانگين	انحراف استاندارد	کشیدگی	چولگی
مساحت مناطق الترامافيك(كيلومتر مربع)	1,9VY	•,۴۸۲۶	-•,• <i>٣</i> ۴	• , ٣ • ١
تعداد كانسارهاي كروميت	1,.74	۰,۵۶۶۸	_•,۶۶⋏	-•,۴۷۴
تعداد كانسارهاي كروميت به مساحت مناطق الترامافيك	-•,9%XF	۰,۵۳۴۴	_•,۶۴۴	-•,\\ <b>\</b>

جدول ۱: اطلاعات آماری کانسارهای استفاده شده در مدل



شکل۱: خط رگراسیون تعداد کانسارهای کرومیت انبانهای در مقابل مساحت سنگهای الترامافیک با ضریب اطمینان ۸۰ درصد برای هر نقطه منفرد [۴]

## ۲-۳- مدل تناژ – عیار متوسط کرومیت انبانهای

مدلهای کانساری سنگ بنای ترکیب اطلاعات متنوع زمینشناسی، رخدادهای معدنی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی است و از آنها در ارزیابی منابع معدنی و اکتشاف کانسارها استفاده میشود. از توزیع فراوانی تناژ و عیار متوسط کانسارهای کاملا کشف شده از هر تیپ میتوان به عنوان مدلی برای تناژ و عیار متوسط کانسارهای کشف نشده از همان تیپ در ساختگاه زمینشناسی مشابه استفاده کرد[۲۲،۲۰۲]. در ارزیابی کمی منابع معدنی فرض میشود از مدل تناژ و عیار کانسارهای کشف نشده از یک تیپ خاص، که تناژ و عیار کانسارهای کشف نشده از یک تیپ خاص، کرد[۲]. مدل تناژ– عیار متوسط همان تیپ کانساری تبعیت میکند[۲]. مدل تناژ– عیار حاصل از مطالعه ۲۴۶ کانسار کرومیت انبانهای توسط مویزر و همکارانش در شکل ۲

## ۲-۴- کرومیت انبانهای فاریاب

همان گونه که عنوان شد رابطه معکوس میان چگالی کانسار و مساحت نواحی امیدبخش، پایه و اساس ارزیابی به روش سه بخشی است. از این رو صحت این ارزیابی را می توان در مناطق کاملا اکتشاف شده سنجید. کانسار کرومیت فاریاب، به عنوان یکی از بزرگترین کانسارهای کرومیت ایران، ذخیره قطعی حدود ۱۰۰۰۰ تن و ذخیره احتمالی حدود ۵۰۰۰۰ تن دارد. به دلیل اکتشافات زیادی که در منطقه فاریاب انجام شده است، این منطقه یک نمونه مناسب برای ارزیابی قدرت پیش بینی مدل سه بخشی در تخمین تعداد کانسارهای کرومیت انبانهای است. اگر افیولیتها را به عنوان نواحی امیدبخش برای کشف کانسارهای کرومیت در نظر بگیریم، می توان ارزیابی سه بخشی را برای این ناحیه نیز انجام داد. محدوده انتخاب شده برای این راستی آزمایی بین طولهای جغرافیایی '۲۰ ۵۷'۵

٬ ۳۰ ۵۷<sup>۰</sup> و عرضهای جغرافیایی ٬ ۱۵ ۲۷<sup>۰</sup> و ٬ ۲۷ ۲۷<sup>۰</sup> و در صد کیلومتری جنوب فاریاب انتخاب شده است. نقشه زمینشناسی

این محدوده و نیز کانسارهای کشف شده منطقه در شکل ۳ آمده است.



شکل۲: فراوانی تجمعی تناژ کانسارهای کرومیت انبانهای (نقاط قرمز کانسارهای منفرد و نمودار سبز درصد کانساری است.) در توزیع لاگ نرمال مقادیر مرتبط با درصدهای ۱۰، ۵۰ و ۹۰ مشخص شدهاند[۱۹]



شکل ۳: نقشه زمینشناسی منطقه فاریاب و کانسارهای کشف شده کرومیت در این منطقه

در ارتباط با تعیین مساحت مناطق امیدبخش در منطقه فاریاب نسبت به منطقه نائین و انارک تفاوتهایی وجود دارد. مجموعههای آذرین مجاور افیولیتها در منطقه نائین و انارک عمدتا اسیدیاند، اما مجموعههای آذرین مجاور افیولیتها در منطقه فاریاب الترامافیک هستند. از طرفی انجین و همکاران طبقهبندی زیر را برای موقعیت کانسارهای کرومیت انبانهای ارایه دادند:

 کانسارهایی که در اعماق بخش هارزبورژیتی مربوط به مجموعههای افیولیتی قرار دارند و در داخل غشای دونیتی احاطه شدهاند.

۲) کانسارهایی که در بخش بالایی هارزبورژیت تکتونیزه واقعند.

۳) کانسارهایی که درون لایههای دونیتی و در منطقه انتقالی بخش تکتونیزه به سنگهای انباشتی قرار دارند.

۴) کانسارهایی که در درون لایه دونیتی مربوط به توالی انباشتی قرار دارند[۲۴].

بنابراین در منطقه فاریاب، نواحی امیدبخش شامل افیولیتها و مجموعههای الترامافیک است. با بررسی دقیقتر مشاهده می شود که افیولیتها و نیز مجموعه های الترامافیک مساحتی در حدود ۱۸۰ کیلومتر مربع را به خود اختصاص دادهاند. همچنین ۲۳ کانسار کشف شده در این محدوده ثبت شده است. با استفاده از این مساحت و مدل ارایه شده توسط سینگر می توان حداقل تعداد کانسارهای کشف نشده را با احتمال ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد محاسبه کرد. مشاهده می شود که با احتمال ۹۰ درصد تعداد کانسارهای احتمالی حداقل ۶ مورد، با احتمال ۵۰ درصد، حداقل ۲۰ مورد و با احتمال ۱۰ درصد، حداقل ۷۰ مورد است. عدد به دست آمده برای سطح اطمینان ۹۰ درصد با آنچه تاکنون در این منطقه کشف شده است، اختلاف ناچیزی دارد. همان گونه که مشاهده شد تعداد کانسارهای کرومیت کشف شده در منطقه فاریاب با تعداد کانسارهای کرومیتی که انتظار میرود در سطح اطمینان ۵۰ درصد وجود داشته باشد بسیار نزدیک است، بنابراین میتوان انتظار داشت داشت که میزان کانسارهای کشف نشده منطقه نائین و انارک نیز با تعداد پیشبینی شده از روش ارزیابی سه بخشی که در ادامه به آن خواهیم پرداخت همخوانی داشته باشد. هر چند باید در نظر گرفت که در منطقه نائین و منطقه فاریاب مساحتهای یکسانی بررسی نشده و این مقایسه صرفا برای تایید قدرت ارزیابی مدل سه بخشی انجام شده است.

## ۲-۵- کرومیتهای انبانهای نائین

کمربند افیولیتی نایین – بافت که در راستای شمال شرق – جنوب غرب و به موازات زون سنندج – سیرجان گسترش یافته است. برون زدههای این کمربند شامل لایههای هارزبورژیت، آثاری از گابرو و کمپلکسهای دایکی دستهای است. این مجموعه همراه با سنگهای آتشفشانی متنوع، لاوا و برش با ترکیب بازالتی – آندزیتی تا داسیتی – ریولیتی گسترش یافتهاند [۲۶،۲۵]. محدوده مورد مطالعه بخشی از این کمربند به وسعت ۲۲۰ کیلومتر مربع بین طولهای جغرافیایی ۴۵ °۵۲ و ۵۱ °۵۳ و عرضهای جغرافیایی <sup>۲</sup>۵۵ °۳۲ و ۱۵ °۳۳ در شمال شهرستان نائین، استان اصفهان واقع شده است. این منطقه شامل زون انارک شناخته میشود. این کمپلکس به سه دوران کربونیفر، پرموتر شیاری و ترشیاری تعلق دارد [۲۸،۲۷]. همان طور که در نقشه زمینشناسی سادهسازی شده این منطقه (شکل ۴) نیز در نقشه زمینشناسی سادهسازی شده این منطقه (شکل ۴) نیز

 ۱) زون آمیزههای رنگی<sup>۲</sup> شامل افیولیت، لایمستون و رادیولاریتها که در شمال، مرکز و شمال غرب محدوده مشاهده می شوند.

۲) زون آتشفشانی ترشیاری در غرب

۳) زون رسوبی ترشیاری در شرق

از نظر سنگشناسی از سطح به عمق ۱) آهک ماسهای و راديولاريت كرتاسه بالايي، ٢) بازالتها با ساخت بالشي و تودهای، ۳) دایکهای صفحهای با ترکیب دلریتی، ۴) پلاژیوگرانیتها که در زیر دایکها و روی گابروها قرار دارند، ۵) خانواده گابروها که شامل نوریت، گابروهای نوریتی و گابروها هستند و ۶) سنگهای پریدوتیتی با بافت کومولا شامل هارزبورژیت، ورلیت و دونیت را شاهد هستیم[۲۹]. در مورد کانسارهای کرومیت نائین شواهد ژئوشیمیایی حاکی از آن است که تیپ این نوع کرومیت، آلپی است و از سویی وجود سریهای ماگمایی موثر در رخداد کرومیت را تایید میکند. پاراژنز کانهها در سنگهای پریدوتیت شامل كروميت، ايرارسيت، مكنتيت، هماتيت، پنتلانديت، ميلريت، كالكوپيريت، پيريت و كووليت هستند. عناصر ايريديم، پلاتینیم، پالادیم و اسمیم از گروه پلاتین همراه با کرومیتهای این منطقه، غنی شدگی نشان میدهند که عناصر پلاتینیم و اوسمیم بر اساس نتایج آنالیز EDS به ترتیب عیار ۵ درصد و ۳ درصد در سنگ میزبان دارند. عناصر پلاتین و پالادیم غالب



شکل ۴: نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی همراه با کانسارهای کشف شده منطقه

کانیهای گروه پلاتین در منطقه را تشکیل میدهند (بالای ۵۰ درصد) و عمدتا این عناصر درون پنتلاندیت، کالکوپیریت و یا مگنتیت تشکیل شده و همراه پیریت گزارش نشدهاند [۳۰]. به طور کلی، در این منطقه ۳ کانسار کشف شده کرومیت وجود دارد که موقعیت آنها در شکل ۲ مشخص شده است. کانسار کرومیت نائین، در شمال منطقه حسین آباد و سهیل پاکوه، قرار دارد. عیار ماده معدنی کرومیت، بیش از ۳۰ درصد است (۶۸٫۵ درصد کروم، ۱٫۹ درصد ایریدیم و ۳٫۷ درصد پلاتینیم) و طبق نقشه ژئوشیمیایی، در بخش جنوب غرب این ناحیه آنومالی نشان میدهد[۳۰].

## ۳- بحث و نتايج

برای تخمین تعداد کانسارهای کشف نشده در منطقه شمال شهرستان نائین از روش ارزیابی سه بخشی استفاده شد. بر طبق این روش لازم است که مساحت نواحی امیدبخش در

منطقه محاسبه شود. مساحت نواحی امیدبخش برای اکتشاف کانسارهای کرومیت انبانهای یا به عبارت دیگر مساحت آمیزههای رنگی افیولیتی در منطقه مورد بررسی ۷۷٬۴۵۵ کیلومتر مربع است. با در دست داشتن مساحت مناطق امیدبخش میتوان بر اساس مدل ارایه شده توسط سینگر [۴] تعداد کانسارهای کرومیت کشف نشده در منطقه را تخمین زد. بر این اساس، تعداد کانسارهای احتمالی در منطقه نائین و انارک به احتمال ۹۰ درصد با بیش از ۳ عدد، به احتمال ۵۰ درصد با بیش از ۱۹ کانسار و به احتمال ۱۰ درصد با بیش از ۴۰ کانسار است، سپس بر اساس روش شبیهسازی ارایه شده توسط روت و همکاران احتمال رخداد هر تعداد مشخص کانسار در محدوده محاسبه شده است.

روت و همکاران الگوریتمی برای تخمین احتمال مرتبط با وجود تعداد مشخصی از کانسارها برای اعداد واقع در بین تخمینهای مرتبط با سطوح احتمال ۹۰، ۵۰ و ۱۰ درصدی

ارایه کردند[۱۵]. به دلیل فرمت خاص تخمینهای ارایه شده برای چندکها که بیانگر "حداقل تعداد کانسار" است، در تفسير آنها بايد دقت كرد و تنها بر اساس توزيع استنباطي حاصله نمى توان يك تابع توزيع احتمال منفرد براى تعداد کانسارها محاسبه کرد[۱۵]. از این رو آنها روشی برای تعیین توزیع احتمالی که با تخمینهای ارایه شده برای چندکها سازگار باشد، ارایه کردند. در شکل ۵ احتمال متناظر با وجود تعداد مشخصی کانسار در منطقه که بر اساس الگوریتم روت و همکاران در نرمافزار Eminer محاسبه شده، نشان داده شده است. بر این اساس احتمال رخداد تعداد مشخصی کانسار (n) و یا احتمال رخداد بیش از تعداد مشخصی کانسار (n) نیز امکانپذیر است.

در شکل ۶ نمودار احتمال وقوع کرومیت و پاراژنزهای آن در کانسارهای کرومیت انبانهای کشف نشده در منطقه شمال نائین آورده شده است. این تخمین به ترتیب برای کرومیت، یلاتینیم، ایریدیم، رودیم، روتنیم و پالادیم در نرمافزار Eminer محاسبه شده است.

با توجه به شکل ۵ به احتمال ۵۰ درصد ذخایری با حداقل ۰٬۸۶ تن پلاتینیم و به احتمال ۱۰ درصد ذخایری با حداقل ۸۳۵ تن پلاتینیم در منطقه مورد بررسی وجود دارد. یا به عنوان نمونه، به احتمال ۵۰ درصد ذخایری با ۳۵۳ م تن یالادیم و به احتمال ۱۰ درصد ذخایری با ۳٫۷ تن یالادیم در منطقه مورد بررسی وجود دارد. در شکل ۶، مشاهده شد که با

شد.

استفاده از ارزیابی سه بخشی می توان برای ۳ احتمال، ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد، تعداد کانسارهای احتمالی را تخمین زد.

۴- راستی آزمایی

برای بررسی توزیع ژئوشیمیایی عنصر کروم در منطقه مورد بررسی از ۶۲۶ نمونه رسوبات آبراههای که توسط سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شدهاند، استفاده شد. موقعیت نمونهها در شکل ۷ نشان داده شده است. در ادامه برای بارزسازی آنومالی در منطقه از دو روش فرکتال ۳ عیار – مساحت و شاخص سینگولاریتی ٔ بهره گرفته

۴-۱- روش فرکتال عیار - مساحت

روش فرکتالی عیار - مساحت مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد نظر اشغال میکند[۳۱]. هر چه عیار عنصر افزایش یابد، میزان مساحت اشغالی به وسیله آن كاهش مييابد [٣٢]. اين روش بر اساس رابطه ۱ معرفي می شود [۳۳]:

> که در آن: N : غلظت عيار عنصر مورد نظر

C : فراوانی عیار عنصر مورد نظر





(1)

نشريه مهندسي منابع معدني

 $N(\geq C) \propto \rho^{-\beta}$ 

C : تعداد نمونههایی که عیار مساوی و یا بالاتر از N(≥C) : دارند

- ρ : عيار
- β : بعد فركتال است.

برای نمایش توزیع کروم در منطقه به وسیله نمونههای رسوبات آبراههای، حوضههای آبریز منطقه ترسیم و سپس به کمک مساحت و عیار هر یک از این حوضههای آبریز و به کارگیری روش عیار- مساحت، مرز جوامع شیمیایی در منطقه مشخص شد و آنومالیهای احتمالی به نقشه درآمد. در نمودار عیار- مساحت عنصر کروم (شکل ۸) میتوان پنج

نقطه شکست شاخص و چند مرحله غنی شدگی این عنصر در منطقه مورد مطالعه را به دلیل رفتار مولتی فرکتالی آن مشاهده کرد. بر این اساس حد آستانهای عنصر کروم ppm ۸۱۴٫۶، یعنی جایی که بیشترین میزان شیب خط مشاهده می شود، در نظر گرفته شد.

در شکل ۹ سه آنومالی بارز کروم در قسمت شرقی افیولیت نایین مشاهده می شود که احتمال وجود کانسار کرومیتهای بیشتر (بیش از ۳ کانسار کشف شده فعلی) را قوت می بخشد. تعدادی که با احتمالات به دست آمده از روش ارزیابی سه بخشی مطابقت دارد.



شکل۶: الف) نمودار لگاریتم تناژ- احتمال کرومیت در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، ب) نمودار لگاریتم تناژ- احتمال پلاتینیم در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، ج) نمودار لگاریتم تناژ- احتمال ایریدیم در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، د) نمودار لگاریتم تناژ-احتمال رودیم در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، ه) نمودار لگاریتم تناژ- احتمال روتنیم در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، ز) نمودار لگاریتم تناژ- احتمال پالادیم در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، ه) نمودار لگاریتم تناژ- احتمال روتنیم در کانسارهای کرومیت انبانهای نائین، ز) نمودار



شکل ۷: موقعیت نمونههای رسوبات آبراههای



شکل ۸: نمودار لگاریتمی عیار – مساحت برای عنصر کروم در منطقه مورد مطالعه



شکل ۹: نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی کروم در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش عیار – مساحت

## ۴-۲- شاخص سینگولاریتی

سینگولاریتی یک ابزار مهم برای تشخیص غنی شدگی و تهی شدگی محلی عناصر در نقشه های دو بعدی ژئوشیمیایی برای تشخیص آنومالی های ژئوشیمیایی است. در واقع سینگولاریتی یک روش پنجره متحرک بر پایه ارتباط مولتی فرکتالی بین چگالی فلز و مساحت مربوط به آن است که برای اولین بار توسط چنگ<sup>۵</sup> مطرح شد[۳۴]. برای تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره ها (۲) به شکل مربع برای اندازه گیری تراکم غلظت (C) حول یک موقعیت خاص (زZ) استفاده می شود. مقدار سینگولاریتی برای پنجره های کوچک مجاور هم بر اساس رابطه ۲ به دست می آید:

(٣)

E : بعد اقليدسي است.

شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت دادههای c و 3 در نمودار لگاریتمی تخمین زده میشود[۳۵]. در این روش دو نوع آنومالی ضعیف و قوی مشخص میشود. محاسبات در نرمافزار متلب<sup>2</sup> و بر اساس مراحل زیر انجام گرفت: (۱) موقعیتی بر روی نقشه با تعدادی پنجرههای متغیر (۲) مربع شکل  $r_{max} > ... > r_{rain} r_1 در نظر گرفته$  $شده و میانگین غلظت <math>[r_1 < r_2 > ... > r_{min} r_1 در نظر گرفته$  $شده و میانگین غلظت <math>[r_1 < r_2 > ... > r_{min} r_1 در نظر گرفته$  $شده و میانگین غلظت <math>[r_1 < r_2 > ... > r_{min} r_1 > r_2$  در نظر را م

) برای پیاده کردن دادههای (۲۱۹۹۱، ۲۱۱ و ۲۱ و ۲۱ و یک نمودار لگاریتمی از رابطه ۳ استفاده شد:

$$Log C[A_{ri}]=C+(2-\alpha)Log(r)$$

مقدار ۵-2 را میتوان از شیب خط راست به دست آورد. ۳) تکرار مراحل برای تمام قسمتهای نقشه ژئوشیمیایی[۳۶] مناطقی با سینگولاریتی مثبت (2<۵) تهیشدگی و (٢)

سینگولاریتی منفی (2>α) تمرکز عناصر در منطقه مورد بررسی را نشان میدهد[۳۷]. شاخص سینگولاریتی برای عنصر کروم در منطقه به وسیله نرمافزار متلب ترسیم شده است که نتیجه در شکل ۱۰ ارایه شده است.

حتی در بدبینانهترین حالت و با در نظر گرفتن حداقل شاخص سینگولاریتی که معادل با حداکثر غنیشدگی است، در شکل (۱۰–الف) حداقل سه آنومالی بارز کروم در قسمت شرقی افیولیت نایین مشاهده میشود. چنگ حد آستانه معمول در این روش را ۱٫۹۶=α معرفی میکند[۳۵]. با در نظر گرفتن این حد آستانه بیش از ۲۰ آنومالی کروم در منطقه مشاهده میشود (شکل ۱۰–ب) و این روش نیز احتمال وجود کانسار کرومیتهای بیشتر (بیش از ۳ کانسار کشف شده فعلی) را تقویت میکند. احتمالی که با احتمالات به دست آمده از روش ارزیابی سه بخشی مطابقت دارد.

## ۵- نتیجهگیری

ارزیابی کمی ذخایر معدنی به نحوی که بتواند در تصمیم گیری های کلان اقتصادی قابل فهم و قابل استفاده باشد، یکی از اهداف ارزیابی کمی ذخایر معدنی است. به این منظور، مدل های مختلفی از جمله مدل توصیفی، مدل تناژ-

عیار متوسط، مدل اقتصادی و نیز مدل چگالی ارایه شده است. مدل توصيفي و مدل تناژ – عيار، پايه و اساس ساير مدلها از جمله مدل چگالی است. رابطه معکوس میان چگالی کانسار و مساحت نواحی یکی از اصول اولیه ارزیابی سه بخشی است. بر این اساس، می توان تناژ احتمالی و نیز احتمال رخداد تعداد مشخصی کانسار با احتمال مشخص را تخمین زد. بر اساس محاسبات انجام گرفته، مشخص شد که تعداد کانسارهای احتمالی در منطقه نائین و انارک به احتمال ۱۰ درصد برابر با حداقل ۴۰ عدد، به احتمال ۵۰ درصد حداقل ۱۹ کانسار و به احتمال ۹۰ درصد حداقل ۳ کانسار است. همچنین به احتمال ۹۰ درصد ذخایری در منطقه با حداقل ۴۶۷۰۰ تن کرومیت، به احتمال ۵۰ درصد ذخایری با حداقل ۶۹۴۰۰ تن کرومیت و به احتمال ۱۰ درصد ذخایری با حداقل ۲۱۴۰۰۰۰ تن كروميت در منطقه شمال نائين وجود دارد. مقايسه ارقام به دست آمده با بارزسازی آنومالی کروم به روش فرکتال عیار- مساحت و شاخص سینگولاریتی به کمک دادههای رسوبات آبراههای نشان میدهد که در صورت برنامهریزی و سرمایه گذاری اکتشافی مناسب در منطقه شمال نائین، نتایج عملی خوبی به دست خواهد آمد.



شکل ۱۰: الف) نقشه شاخص سینگولاریتی برای عنصر کروم، ب) شاخص سینگولاریتی برای مقادیر کمتر از ۱٬۹۸

and exhumation in convergent margin orogens Insights from ore deposits". The Journal of Geology, 115(6): 611-627.

- [14] Singer, D. A., and Menzie, W. D. (2007). "Map scale effects on estimating the number of undiscovered mineral deposits". In: Progress in Geomathematics, Springer, 271-283.
- [15] Cunningham, C. G., Singer, D. A., Zappettini, E. O., Waldo, V. S., Celada, C. M., Quispe, J., Briskey, J. A., Sutphin, D. M., Mariano, G. M., Diaz, A., Portigliati, C., Berger, V. I., Carrasco, R., and Schulz, K. J. (2007). "A preliminary quantitative mineral resource assessment of undiscovered porphyry copper resources in the Andes Mountains of South America". SEG Discovery, 1(71): 1-13. DOI: https://doi.org/10.5382/SEGnews.2007-71. fea.
- [16] Allais, M. (1957). "Method of appraising economic prospects of mining exploration over large territories: Algerian Sahara case study". The Institute for Operations Research and the Management Sciences, 3(4): 285-347. DOI: https://doi.org/10.1287/mnsc.3.4.285.
- [17] Singer, D. A., Mosier, D. L., and Menzie, W. D. (1993). "Digital grade and tonnage data for 50 types of mineral deposits". US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA.
- [18] Cunningham, C. G., Zappettini, E. O., Waldo, V. S., Celada, C. M., Quispe, J., Singer, D. A., Briskey, J. A., Sutphin, D. M., Gajardo, M. M., Diaz, A., Portigliati, C., Berger, V. I., Carrasco, R., and Schulz, K. J. (2008). "Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes Mountains of South America". U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1253, pp. 282.
- [19] Mosier, D. L., Singer, D. A., Moring, B. C., and Galloway, J. P. (2012). "Podiform chromite deposits—database and grade and tonnage models". US Geological Survey Scientific Investigations Report, 5157: 45.
- [20] Singer, D. A., Berger, V. I., Menzie, W. D., and Berger, B. R. (2005). "Porphyry copper deposit density". Economic Geology, 100(3): 491-514.

[۲۱] شهاب پور، ج.؛ ۱۳۹۴؛ "زمین شناسی اقتصادی". انتشارات دانشگاه باهنر کرمان، کرمان.

[۲۲] عرفانی، ح.؛ ۱۳۵۱؛ "مطالعه تیپ کانسارهای کرومیت ایران". نشریه دانشکده فنی تهران، شماره ۲۴.

- [23] Lippard, S. J. (1986). "The ophiolite of northern Oman". Geological Society London Memoir, 11: 178.
- [24] Engin, T., Balci, M., Sümer, Y., and Özkan, Y. Z. (1981).

8- مراجع

- Singer, D. A., Menzie, W. D., Sutphin, D. M., Mosier, D. L., and Bliss, J. D. (2001). "Mineral deposit density an update". U.S. Geological Survey Professional Paper 1640 A. DOI: 10.3133/pp1640a.
- [2] Singer, D. A., and Berger, V. I. (2007). "Mineral resource assessment methodologies deposit models and their application in mineral resource assessments". Proceedings, Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resource Assessment, and Sustainable Development U.S. Geological Survey, 1294(1): 71-78.
- [3] Singer, D. A. (1993). "Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources". Nonrenewable Resources, 2(2): 69-81. DOI: 10.1007/BF02272804.
- [4] Singer, D. A. (1994). "Conditional estimates of the number of podiform chromite deposits". Nonrenewable Resources, 3(3): 200-204. DOI: 10.1007/BF02259045.
- [5] Singer, D. A., Jaireth, S., and Roach, I. (2018). "A three-part quantitative assessment of undiscovered unconformity-related uranium deposits in the Pine Creek region of Australia". Iaea Tecdoc Series, pp. 350.
- [6] Singer, D. A., Berger, V. I., and Moring, B. C. (2008). "Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models". Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2008-1155.
- [7] Cox, D. P., and Singer, D. A. (1987). "Mineral deposit models". U.S. Geological Survey, Bulletin 1693: 139-141.
- [8] Mosier, D. L. and Page, N. J. (1988). "Descriptive and Grade-tonnage Models of Volcanogenic Manganese Deposits in Oceanic Environments A Modification". Department of the Interior, US Geological Survey.
- [9] Cox, D. P. Lindsey, D. A., Singer, D. A., and Diggles, M. F. (2007). "Sediment-hosted copper deposits of the world". Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- [10] Bliss, J. D. (1992). "Grade-tonnage and other models for diamond kimberlite pipes". Nonrenewable Resources, 1(3): 214-230.
- [11] Bliss, J. D. (1992). "Developments in mineral deposit modeling". US Government Printing Office.
- [12] Singer, D. A., and Menzie, W. D. (2010). "Quantitative mineral resource assessments: An integrated approach". Oxford University Press.
- [13] Wilkinson, B. H., and Kesler, S. E. (2007). "Tectonism

*modeling and spatial statistics*". Mathematical Geosciences, 28(1): 1-16.

- [33] Afzal, P., Yasrebi, A. B., Saein, L. D., and Panahi, S. (2017). "Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran". Journal of Geochemical Exploration, 181: 294-304.
- [34] Cheng, Q. (2006). "GIS-based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits". Development of GIS in Geosciences, GAC/ MAC: 289-300.
- [35] Cheng, Q. (2007). "Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China". Ore Geology Reviews, 32(1-2): 314-324.
- [36] Zuo, R., Wang, J., Chen, G., and Yang, M. (2015). "Identification of weak anomalies: A multifractal perspective". Journal of Geochemical Exploration, 148: 12-24.
- [37] Liu, Y., Xia, Q., and Carranza, E. J. M. (2019). "Integrating sequential indicator simulation and singularity analysis to analyze uncertainty of geochemical anomaly for exploration targeting of tungsten polymetallic mineralization, Nanling belt, South China". Journal of Geochemical Exploration, 197: 143-158.

<sup>1</sup> Allais

- <sup>2</sup> Coloured Melange
- <sup>3</sup> Fractal
- <sup>4</sup> Singularity Index
- <sup>5</sup> Cheng
- <sup>6</sup> Matlab

"General geological setting and the structural features of the Guleman peridotite unit and the chromite deposits (*Elazig*, *Eastern Turkey*)". Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey, 95-96: 34-56.

- [25] Afzal, P., Yusefi, M., Mirzaie, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., and Daneshvar Saein, L. (2019). "Delineation of podiform-type chromite mineralization using geochemical mineralization prospectivity index and staged factor analysis in Balvard area (SE Iran)". Journal of Mining and Environment, 10(3):705-715.
- [26] Tarrah, J., Abedpour, Z., Strauss, K., Schirmer, T., and Mengel, K. (2015). "Mineralogical and geochemical investigations of chromite ores from ophiolite complexes of SE Iran in terms of chrome spinel composition". Iranian Journal of Earth Sciences, 7(2): 114-123.
- [27] Panahi, S., Khakzad, A., and Afzal, P. (2021). "Analytical hierarchical prospectivity mapping using integration of exploratory data in the Anarak region, Central Iran". Geopersia, 12(1): 53-68.
- [28] Bagheri, H., Moore, F., and Alderton, D. H. M. (2007). "Cu–Ni–Co–As (U) mineralization in the Anarak area of central Iran". Journal of Asian Earth Sciences, 29(5-6): 651-65.
- [29] Akbari, D., and Safari, A. (2012). "Support Vector Machine for Target Detection in Hyperspectral Images". Remote Sensing, II: 6135.
- [۳۰] شمسی پوردهکردی، ر.، صادقی، م.، غلامی فشارکی، ز.، ۱۳۹۰ ؛ "بررسی منشا کرومیت و عناصر گروه پلاتین در افیولیت شمال نائین". زمین شناسی اقتصادی، دوره سوم، شماره ۲.
- [31] Afzal, P., Mirzaeia, M., Yousefi M., Adiba, A., Khalajmasoumid, M., Zarifi, A. Z., Foster, P., and Yasrebib, A. B. (2016). "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis". Journal of African Earth Sciences, 119: 139-149. DOI: https:// doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.009.
- [32] Cheng, Q., and Agterberg, F. P. (1996). "Multifractal