



Imam Khomeini International University
Vol. 9, No. 4, Winter 2024



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Energy Management in Cement Plant Mills with Optimize Plan for Extraction and Blending of Mining Zones

Bahrami A.^{1*}, Chubani Golsaeed M.², Hosseinzadeh H.³, Kazemi F.⁴, Moomivand H.⁵, Abdollahi Sharif J.⁵, Soltan Alinezhad S.², Taghizadeh D.⁶

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2-M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Environmental, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

4- Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

5- Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

6- B.Sc, Expert in Urmia Cement Co.

Received: 14 Aug. 2023

Accepted: 28 Oct. 2023

Abstract: Considering the consumption of more than 25% of energy by raw mill materials in cement plants, providing a suitable plan for blending different mining zones can be an effective approach in reducing the energy consumption. The purpose of this paper is optimizing the plan of blending limestone mining zones to reduce milling energy consumption raw mills (ball mill and HPGR). The geomechanical properties of different mine zones have been identified by performing the bond work index, drop weight, and uniaxial compressive strength (UCS) tests. Also, to comply with cement production standards, cementing modules including S.I.M, A.L.M, and L.S.F have been calculated for different mine zones. Mining production planning with the aim of achieving the minimum comminution energy and transportation costs has been developed by the Goal programming method. Planning constraint equations are also considered to regulate cement modules. Finally, utilizing windows Quantitative System for Business software, the necessary calculations have been carried out. Based on the results, the extraction order and blending values of different mine zones are adjusted regarding cement modules and minimizing transportation costs, leading to a reduction in energy consumption of raw mills.

Keywords: Cement, Raw mills materials, Comminution tests, Cement modules, Goal programming.

How to cite this article

Bahrami, A., Chubani Golsaeed, M., Hosseinzadeh, H., Kazemi, F., Moomivand, H., Abdollahi Sharif, J., Soltan Alinezhad, S., and Taghizadeh, D. (2024). "Energy management in cement plant mills with optimize plan for extraction and blending of mining zones". Journal of Mineral Resources Engineering, 9(4): 61-80.

DOI: [10.30479/JMRE.2023.19198.1659](https://doi.org/10.30479/JMRE.2023.19198.1659)

*Corresponding Author Email: a.bahrami@urmia.ac.ir

COPYRIGHTS



©2024 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

After chemical, petrochemical, and metal industries, Non-metallic industries (Non-metallic mineral products comprise of cement, ceramics, glass, and lime) with about 12% of global energy consumption. is the third-largest consumer of energy in the world [1]. Cement factories as sub-industries of non-metallic industries, consume about 2% of the total global energy and 5% of the total industrial energy [2-4]. The average consumption of electricity and fossil fuels in a cement plant is 119 kWh/ton and 105 lit/ton, respectively. Despite the high energy consumption, the cement industry is considered a low-yield industry with an efficiency of 60 to 70% [5]. The low efficiency of cement plants is directly related to the inefficiency of their comminution circuits; because more than 60% of energy consumption is related to crushing and grinding units, especially raw materials and clinker mills [6,7]. Low efficiency of milling circuits leads to increased production costs; conversely, a slight increase in the efficiency of milling circuits can significantly reduce production costs. The selection of raw materials, which have the necessary characteristics to produce the desired cement and, on the other hand, have low comminution indices (bond work index, drop weight, and axial strength), will reduce energy consumption in the milling section and thus in the entire cement plant [6].

The purpose of this study is to optimize the blending of limestone mine zones for comminution energy reduction in the raw mills of cement plant. The raw materials (mined) are transferred to the mills for pulverization based on the mineral composition determined in the X-ray laboratory (to adjust the modules). Energy consumption in these mills is largely dependent on the comminution properties of raw materials and the raw material blending ratio. Therefore, the blending plan regarding the geomechanical properties and the grindability of different zones (zones) of the mine, especially the limestone mine which supplies about 75% of the raw material for cement production, will have a significant effect on the reduction of energy consumption in the comminution of raw materials. For this purpose, the geomechanical properties and grindability of different zones of the mine have been investigated. To determine the required comminution energy of each face's rock in mills, the relevant sample was subjected to comminution tests such as the drop weight test and the bond work index, as well as the uniaxial compressive strength test. Finally, using windows Quantitative System for Business (WinQsb) software, the objective equations were determined, and according to the tests to determine the grindability and constraints, including cement modules and transportation costs in the system, mathematical calculations to optimize energy consumption and production planning have been performed.

METHODS

Rashkan limestone and marl mine with a reserve of 200 million tons, belongs to Urmia cement company-owned. In this mine, Miocene limestone deposits are often in the form of thick layers, and in some cases massifs, which are inter-finger with marl deposits. The lower and upper layers of these limestones are not recognizable due to the lack of a specific layer. This issue is also due to the geological features of the Qom formation, in which the limestone and marl deposits of Rashkan are located. For a detailed study of the quantitative and qualitative characteristics of the mineral reserve, and taking into account the geomechanical characteristics as well as the technical characteristics, the limestone mine and depots stored at the factory site are divided into 10 zones (or faces), 7 zones for limestone in the mine area, and 3 other zones are divided into silica, iron ore and clay depots. Figure 1 shows the zoned areas in the aerial image. It should be noted that codes X1 to X7 are related to different zones of a limestone mine, X8 is clay depot, X9 is iron ore depot, and X10 is silica depot. The aforementioned zones are located at different distances from the factory' so, it is necessary to pay attention to the distance between the zones and the transportation costs.

FINDINGS AND ARGUMENT

As a general result, the different zones of Rashkan limestone mine can be classified in the following order according to the amount of energy consumption in the raw mill (ball mill of Urmia cement plant):

for Ball Mill Grinding: $X1 > X3 > X4 > X6 > X5 > X2 > X7$

Accordingly, zone 1 will have the highest energy consumption and zone 7 will have the lowest energy consumption per unit weight ground in the mill. However, this classification can be altered due to the lack of some data and the proximity of available data. Considering the values of the bond work index and

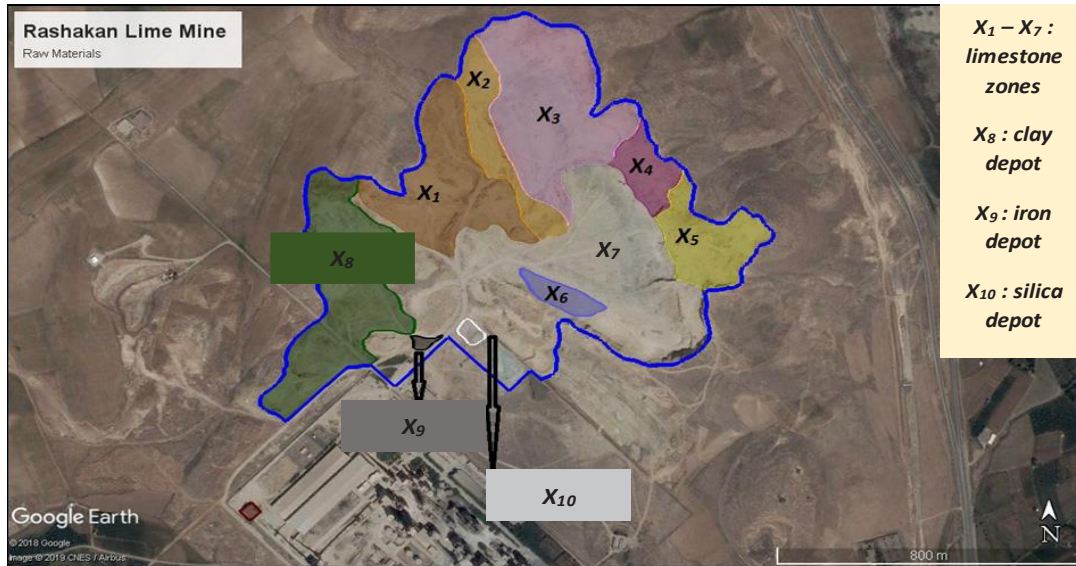


Figure 1. Aerial image of zoning in the area of Rashkan limestone mine in Urmia and cement-related raw material depots using Google Earth Pro software

Table 1. The amount of energy savings of each region compared to the hardest region

Zone	Maximum value	The amount of energy savings of each region compared to the hardest region (%)						
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Wi (kWh/t)	13.0	0.0	-20.8	0.0	-20.0	-21.5	-16.9	-24.6
UCS (Mpa)	34.7	-8.9	-39.2	-27.4	0.0	-32.9	-42.9	-33.4

obtained A^*b values, zone 1 undoubtedly has the highest energy consumption per unit weight in ball mills, and after that, is zone 3. The lowest energy consumption belongs to zone 7. Zones 2, 4, 5, and 6 have very close comminution properties and their energy consumption will not be much different. By applying more comminution parameters, the classification of these zones can be changed.

In the case of utilizing a HPGR, this classification of Rashkan limestone mining zones can be changed as follows:

$$\text{for HPGR Grinding: } X1 > X4 > X3 > X5 > X7 > X2 > X6$$

To determine the amount of energy (or power) efficiency or energy savings in different zones, it is necessary to know which parameters, such as grinding indices, texture and ore structure, type of failure mechanism, etc. are affecting it. However, in this study, it can be determined based on the type of mill and, as a result, the grinding index related to that mill can be applied. In the case of phase 1 of Urmia cement plant, which utilizes a ball mill, the bond index will be utilized as the main measurement tool for determining the reduction in power consumption per tonnage of feed entering the mill. For this purpose, the zone with the highest W_i is assumed as the base zone and the energy reduction percentages of other zones are obtained from the $\frac{W_{xi} - W_{max}}{W_{max}} \times 100$ relation. According to the results, despite the W_i values of zones

1 and 3 being equal, zone 1 is the hard zone (maximum grinding energy); therefore, the energy reduction of other zones will be compared to this zone. In the case of phase 2 of the Urmia cement plant, which utilizes HPGR, uniaxial compressive strength will be the main criterion for determining the reduction in mill power consumption (energy). For this purpose, the zone with the highest UCS is assumed as the base zone and the energy reduction percentage of the other zones is obtained from the $\frac{UCS_{xi} - UCS_{max}}{UCS_{max}} \times 100$ relation.

According to the results, zone 4 is the hard zone (maximum failure resistance); therefore, the energy reduction of other zones will be compared to this zone. The results for both indices are given in Table 1.

In Table 1, a negative sign indicates the amount of energy reduction in terms of the percentage of different zones compared to the most resistant zone. The results of this table show that in the case of the ball mill, the highest energy reduction belongs to zones 7, 5, and 2, and in the case of HPGR, the highest energy reduction belongs to zones 6, 2, and 7.

Short-term production planning was limited to the formulation of equations, taking into account the simultaneous grindability and modules adjustment, as well as economic considerations (from the perspective of energy consumption reduction in raw mills and transportation costs reduction to crushing facility). Inserting these equations in the model of ideal programming and solving by simplex method, the order and the values extracted from each active mine zone were determined. In approaches A and B, the extraction tonnage was determined for the production of cement types 1 and 2 in plant phase 1, respectively. In approaches C and D, the tonnage extracted from the mine zones is determined for plant phase 2 and cement types 1 and 2, respectively. According to Table 2, currently, the most optimal composition and sequence for limestone mine exploitation is mining from zones No. 2, 6, and 7. The mine zone with the most extracted material tonnage is zone No.7, followed by zones No. 6 and 2, respectively. Due to the existence of seven active zones in the mine and also according to the operating conditions of the benching method from the existing open-pit limestone mine, it is necessary to re-prepare and re-arrange the short-term production planning, order, and sequence of optimal exploitation after extracting the mentioned zones up to the bench height. Also, due to the limitations in the regulation of cement modules and according to Table 2, it can be stated that in the present program, there will be no need to harvest the clay depot (X8); that is, the cement modules will be per standard by combining the materials extracted from zones No.2, 6, and 7, as well as the silica and iron depots based on the tonnages of Table 2.

Table 2. Optimal approaches obtained from solving the ideal planning model in Rashkan Cement Plant

No.	Decision variables	Phase 1		Phase 2	
		Optimal values A	Optimal values B	Optimal values C	Optimal values D
1	X1	0	0	0	0
2	X2	1151.22	802.69	1255.87	875.66
3	X3	0	0	0	0
4	X4	0	0	0	0
5	X5	0	0	0	0
6	X6	4544.72	4913.63	4957.88	5360.32
7	X7	9442.73	9182.12	10301.17	10016.86
8	X8	0	0	0	0
9	X9	348.37	442.16	380.04	482.35
10	X10	1012.95	1159.41	1105.04	1264.81

CONCLUSIONS

Raw mills are one of the major consumers of energy in cement plants, where energy consumption is directly related to the geomechanical properties of the input load and the operating parameters of the comminution circuit (including the type of the mill). Mining production planning according to the blending ratio of mining zones and other raw materials for cement production based on their grindability, can have a significant impact on comminution optimization in raw mills. In this study, by zoning the limestone mine (cement plant feed) based on geomechanical and tectonic characteristics and examining the grindability of each zone, the mine zones were classified according to energy consumption. The hardest zone has a bond index of about 13 kWh/ton and the lowest comminution energy is measured around 10 kWh/ton. Cement modules were calculated for each zone and their usage amount was calculated to determine the mixing ratio of the zones (to determine the desired quality of cement) and the amount of exploitation from silica, iron, and clay depots. Also, in production planning, the type of raw mill and comminution system was considered. Finally, the use of the ideal production planning to reduce grinding costs as well as transportation costs from

the mine to the factory, considering the constraints of cement modules estimation, leads to determining the mixing ratio of materials from various mine zones and depots of raw materials (silica, iron, and clay). This production program will lead to the lowest comminution costs in raw mills.

REFERENCES

- [1] Huang, Y. H., Chang, Y. L., and Fleiter, T. (2016). "A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan's cement industry". *Energy Policy*, 96: 14-26.
- [2] Worrell, E., and Galitsky, C. (2004). "Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making, An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers". Berkeley: California.
- [3] Avami, A., and Sattari, S. (2007). "Energy conservation opportunities: cement industry in Iran". *International Journal of Energy*, 3: 1-7.
- [4] Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., and Rahim, N. A. (2011). "A critical review on energy use and savings in the cement industries". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2042-2060.
- [5] Ghalandari, V., and Iranmanesh, A. (2020). "Energy and exergy analyses for a cement ball mill of a new generation cement plant and optimizing grinding process: A case study". *Advanced Powder Technology*, 31: 1796-1810.
- [6] Khurana, S., Banerjee, R., and Gaitonde, U. (2002). "Energy balance and cogeneration for cement plant". *Applied Thermal Engineering*, 22: 485-94.
- [7] Ghalandari, V., Majd, M. M., and Golestanian, A. (2019). "Energy audit for pyro-processing unit of a new generation cement plant and feasibility study for recovering waste heat: A case study". *Energy*, 173: 833-843.



مدیریت انرژی در آسیای کارخانه سیمان با الگوی بهینه برداشت و اختلاط زون های معدنی

عطاله بهرامی^{۱*}، مریم چوبانی گل سعید^۲، حجت حسین زاده^۳، فاطمه کاظمی^۴، حسن مومیوند^۵، جعفر عبداللهی شریف^۵، سینا سلطانعلی نژاد^۶، داوود تقی زاده^۶

- ۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
- ۳- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه
- ۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان
- ۵- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
- ۶- کارشناس کارخانه سیمان ارومیه، ارومیه

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

چکیده

با توجه به مصرف بیش از ۲۵ درصد از انرژی کل یک کارخانه سیمان به وسیله آسیاهای مواد خام، ارایه طرح مناسب برای اختلاط زون های مختلف معدن راهکار موثری در کاهش مصرف انرژی این کارخانه ها است. هدف تحقیق حاضر ارایه طرحی بهینه برای اختلاط زون های معدن آهک (به عنوان عمده تشکیل دهنده خوراک آسیاهای مواد خام کارخانه های سیمان)، برای کاهش انرژی خردایش در آسیاهای گلوله ای و غلتکی مواد خام کارخانه سیمان ارومیه است. خواص ژئومکانیکی زون های مختلف معدن با انجام آزمایش های اندیس کار باند، آزمون بار افتان و مقاومت فشاری تک محوره، شناسایی و تعیین شده است. همچنین در راستای رعایت استانداردهای تولید سیمان، مدول های سیمان سازی (L.S.F, A.L.M, S.I.M) برای زون های مختلف معدن محاسبه شده است. برنامه استخراج از زون های معدن با اهداف دستیابی به کمینه انرژی خردایش و هزینه حمل و نقل، به روش برنامه ریزی آرمانی تدوین شده است. معادلات محدودیت طرح تنظیم مدول های سیمان سازی (L.S.F, A.L.M, S.I.M) در نظر گرفته شده است. در نهایت با استفاده از نرم افزار WinQsb محاسبات مربوطه انجام شده است. بر اساس نتایج، ترتیب استخراج و مقادیر اختلاط زون های مختلف به گونه ای تنظیم شده است که با رعایت مدول های سیمان و حداقل کردن هزینه های حمل و نقل، به کاهش مصرف انرژی در آسیاهای مواد خام منجر شود.

کلمات کلیدی

سیمان، آسیای مواد خام، آزمایش های قابلیت خردایش، مدول های سیمان، برنامه ریزی آرمانی.

استناد به این مقاله

بهرامی، ع.، چوبانی گل سعید، م.، حسین زاده، ح.، کاظمی، ف.، مومیوند، ح.، عبداللهی شریف، ج.، سلطانعلی نژاد، س.، تقی زاده، د.، ۱۴۰۳؛ "مدیریت انرژی در آسیای کارخانه سیمان با الگوی بهینه برداشت و اختلاط زون های معدنی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۴، ص ۸۰-۶۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.19198.1659



۱- مقدمه

صورت ماکرو ساختاری، بیشترین تاثیر را بر خردایش سنگ ناشی از انفجار دارند، اما ویژگی‌های ریزساختاری یا مقاومت فشاری، در مراحل بعدی خردایش نیز تاثیر بسزایی دارند. از طرفی تیپ ماده معدنی با توجه به نوع کانی‌های تشکیل دهنده، ویژگی‌های ریزساختاری و همچنین ویژگی‌های ژئومکانیکی مربوطه، می‌تواند بر بازدهی مرحله خردایش بسیار موثر واقع شوند، بنابراین می‌توان اظهار داشت که تغییر در ویژگی‌های بار ورودی به آسیاها، متاثر از خواص مکانیک سنگی توده سنگ برجا و همچنین پارامترهای استخراجی شامل تعیین توالی استخراج زون‌ها است [۱۳]. بار ورودی به کارخانه سیمان و یا به عبارت دیگر مواد اولیه تولید سیمان به طور عمده از معادن آهک، خاک رس، سیلیس و گچ تامین می‌شود. در این میان، آهک از جمله مهم‌ترین مواد اولیه تولید سیمان است که حدود ۷۵ درصد از خوراک ورودی را تشکیل می‌دهد. با توجه به سهم بالای آهک در بار ورودی به کارخانه سیمان، برنامه‌ریزی تولید مناسب برای معدن آهک یک کارخانه سیمان، بر اساس خواص ژئومکانیکی زون‌های مختلف معدن، تاثیر بسزایی در انرژی مصرفی واحد خردایش مواد خام آن خواهد داشت.

تاکنون تحقیق‌های متعددی [۲۰-۱۳] در رابطه با برنامه‌ریزی تولید معادن کارخانه سیمان و با هدف بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی، بدون توجه به خردایش مواد و هزینه‌های مربوط به آن هستند. برنامه‌ریزی تولید معدن برای معادن خوراک کارخانه سیمان با در نظر گرفتن تفاوت‌های موجود در ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی کانسار و همچنین توجه به خردایش آنها در آسیاهای مواد خام همراه با توجه به سایر پارامترهای فنی و اقتصادی، به تدوین طرحی کارآمد و بهینه برای استخراج معادن منجر خواهد شد، زیرا با توجه به مصرف بالای انرژی خردایش در آسیای مواد خام این کارخانه‌ها، در نظر گرفتن خواص ژئومکانیکی زون‌های مختلف معدن در طی استخراج ممکن است به ارایه رهیافتی برای کاهش مصرف انرژی در مدار خردایش منجر شود.

هدف از این ارایه طرحی برای اختلاط زون‌های مختلف معدن آهک با دیدگاه کاهش انرژی خردایش در آسیای مواد خام و در نظر گرفتن همزمان مدول‌های سیمان است. آسیاهای مواد خام یکی از مهم‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی در فرآیند تولید سیمان هستند (حدود ۲۵ درصد انرژی کل کارخانه در این آسیاها مصرف می‌شود که مصرف این مقدار انرژی از محل منابع سوخت‌های فسیلی به تولید مقادیر بالایی از آلاینده‌ها از جمله CO_2 منجر خواهد شد). مواد اولیه (استخراجی از معدن)

بخش صنعت مصرف‌کننده بخش اعظم انرژی در جهان بوده و صنایع غیرفلزی با مصرف حدود ۱۲ درصد از انرژی جهانی، پس از صنایع شیمیایی-پتروشیمی و صنایع فلزی، در جایگاه سومین مصرف‌کننده عمده انرژی در جهان هستند [۱]. کارخانه‌های تولید سیمان- زیربخش صنایع غیرفلزی- حدود ۲ درصد از کل انرژی جهانی و ۵ درصد از کل انرژی صنعتی جهان را مصرف می‌کنند [۴-۲]؛ به گونه‌ای که میزان مصرف انرژی الکتریکی و سوخت‌های فسیلی مصرفی به طور متوسط در یک کارخانه سیمان به ترتیب ۱۱۹ kWh/ton و ۱۰۵ lit/ton است. علیرغم مصرف بالای انرژی، صنعت سیمان با راندمان ۶۰ تا ۷۰ درصدی، صنعتی کم بازده به حساب می‌آید. بازده پایین کارخانجات سیمان در ارتباط مستقیم با بازده مدارهای خردایش آن است؛ زیرا بیش از ۶۰ درصد از مصرف انرژی مربوط به واحدهای خردایش و نرم‌کنی به ویژه آسیای مواد خام و کلینکر است [۵]. کاهش راندمان مدارهای آسیاکنی به افزایش هزینه تولید منجر می‌شود و بلعکس افزایش اندکی در راندمان مدارهای آسیای سیمان، هزینه‌های تولید را به صورت چشمگیری کاهش می‌دهد.

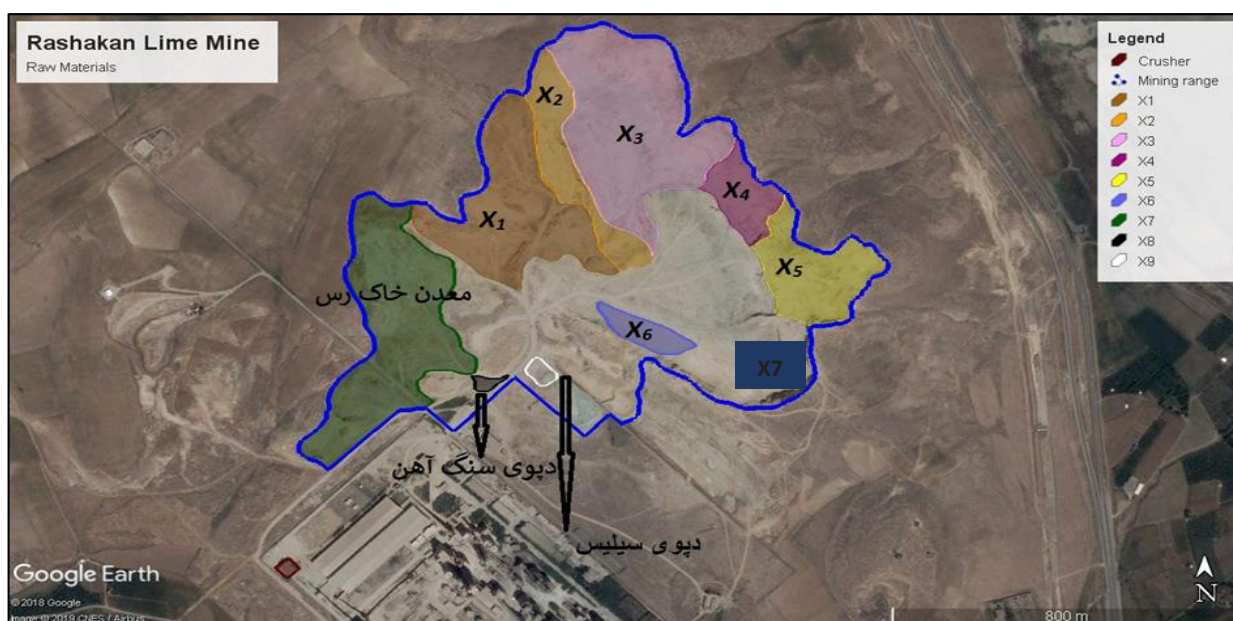
رویکردهای مختلفی برای بهینه‌سازی فرآیند آسیاکنی در کارخانه‌های سیمان استفاده شده است. این رویکردها شامل بهینه‌سازی روی خط (on line) با به کارگیری استراتژی کنترل خودکار برای پایداری فرآیند، بهینه‌سازی خارج از خط (off line) به منظور اصلاح متغیرهای عملیاتی و طراحی است. تحقیقات متعددی برای کاهش مصرف انرژی در آسیا، بر استفاده از رویکرد بهینه‌سازی روی خط، تمرکز داشته‌اند [۶-۸]. در این تحقیقات تاثیر پارامترهای عملیاتی آسیا مانند بار در گردش، کارایی کلاسیفایرهای هوایی آن، نرخ باردهی به آسیا، توزیع ابعادی بار ورودی به آسیا و نظایر آن، بر میزان مصرف انرژی بررسی و به تعیین شرایط بهینه آنها پرداخته شده است [۹-۱۱]. در مبحث رویکردهای خارج از خط، بهینه‌سازی خردایش مواد در آسیا را می‌توان بر اساس ویژگی‌های بار ورودی به کارخانه (مواد استخراجی از معدن) بررسی کرد. ویژگی‌های مکانیکی ماده سنگ بر بازدهی فرآیند خردایش آنها، به ویژه در آسیاها موثر هستند [۱۲]. تنوع زون‌های معدن از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، مواد تشکیل دهنده و یا طرح همگن‌سازی (اختلاط)، بر فرآیندهای خردایش تاثیرگذار خواهند بود. ناپیوستگی‌های دارای فاصله و جهت یافتگی به

۲- مواد و روش

۲-۱- معدن آهک رشکان

معدن سنگ آهک و مارن رشکان با ذخیره ۲۰۰ میلیون تن، متعلق به کارخانه سیمان ارومیه (استان آذربایجان غربی) است. در این معدن نهشته‌های آهکی میوسن به صورت لایه‌ای غالباً ضخیم و در مواردی توده‌ای که با نهشته‌های مارنی به حالت بین‌انگشتی قرار گرفته‌اند. طبقات زیرین و فوقانی این آهک‌ها به علت نبود لایه مشخص، قابل تشخیص نیستند. همچنین این مساله ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی سازند قم بوده که کانسار آهک و مارن رشکان در آن قرار دارد [۲۱]. برای بررسی دقیق ویژگی‌های کمی و کیفی ذخیره معدن و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ژئومکانیکی و نیز ویژگی‌های تکنولوژیکی، معدن آهک و دپوهای ذخیره شده در محل کارخانه به ۱۰ زون شامل ۷ زون برای مواد آهکی در گستره معدن و ۳ زون دیگر شامل دپوی سیلیس، سنگ آهن و خاک رس تقسیم‌بندی شده است. در شکل ۱ نواحی زون‌بندی شده در تصویر هوایی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که کدهای X1 تا X7 مربوط به زون‌های مختلف معدن آهک، X8 دپوی خاک رس، X9 دپوی سنگ آهن و X10 دپوی سیلیس است. زون‌های معرفی شده در فاصله‌های متفاوتی از کارخانه قرار دارند.

بر اساس درصد‌های تعیین شده در آزمایشگاه X-ray (برای تنظیم مدول‌ها) به آسیای مواد خام، برای پودر شدن منتقل می‌شوند. انرژی مصرفی در این آسیا تا حد زیادی به خواص خردایشی مواد اولیه و نسبت‌های آنها وابسته است، بنابراین ارزیابی طرح اختلاط با توجه به خواص ژئومکانیکی و قابلیت خردایش زون‌های مختلف معدن، به ویژه معدن آهک که تامین‌کننده حدود ۷۵ درصد از ماده خام اولیه تولید سیمان است؛ تاثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی خردایش مواد خام خواهد داشت. بدین منظور در این مطالعه، ویژگی‌های ژئومکانیکی و قابلیت خردایش زون‌های مختلف معدن، بررسی شده است. در راستای تعیین انرژی خردایش هر زون در آسیا، بر روی نمونه مربوطه آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش مانند بارافتان و اندیس باند و همچنین آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوره انجام شد. با استفاده از داده‌های دستگاه X-Ray مقادیر اکسیدهای هر زون تعیین و مدول‌های سیمان‌سازی هر یک محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار WinQsb معادلات هدف تعیین و با توجه به آزمون‌های تعیین قابلیت خردایش و محدودیت‌های شامل مدول‌های سیمان و هزینه‌های حمل و نقل در سیستم، محاسبات ریاضی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و تدوین طرح اختلاط زون‌ها، انجام شده است.



شکل ۱: تصویر هوایی زون‌بندی‌های انجام شده در گستره معدن سنگ آهک رشکان ارومیه و دپوهای مواد خام سیمان به کمک نرم‌افزار

Google Earth Pro

۲-۲- آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش

بر روی نمونه زون‌های معدن آهک (X1 تا X7)، آزمایش‌های تعیین اندیس کار باند، بار افتان و مقاومت فشاری تک محوره انجام گرفته است. لازم به ذکر است که در کارخانه سیمان مورد مطالعه (کارخانه سیمان ارومیه)، از دو آسیای گلوله‌ای و غلتکی به ترتیب در فازهای ۱ و ۲ کارخانه استفاده می‌شود. ظرفیت آسیای گلوله‌ای ۲۳۰ ton/h با میزان انرژی الکتریکی مصرفی ۴۵۴۵ kW و بار ورودی به آسیای غلتکی ۴۲۰ ton/h است. ویژگی‌های مکانیکی سنگ مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، ضریب ارتجاعی، دانسیته و نظایر آن، تاثیر بسزایی در رفتار خردایشی سنگ و بالتبع مصرف انرژی خردایش آن دارند. با توجه به ارتباط بین ضریب باند با خواص یاد شده [۲۵، ۲۲]، تعیین اندیس باند برای زون‌های مختلف یک معدن، شاخصی کارآمد برای بررسی رفتار خردایشی آن خواهد بود. برای تعیین اندیس کار بار ورودی به آسیاهای خردایش مواد خام، برای زون‌های مختلف معدن سنگ آهک و مطابق با روش استاندارد باند، آزمایش باند انجام گرفته است. لازم به ذکر است که این آزمایش‌ها در آسیای استاندارد باند کارخانه سیمان ارومیه (ساخت شرکت دانش فرآوران) انجام گرفته است. از طرفی، برای تعیین توزیع شکست و درک ماهیت پیچیده شکست ذرات در خردایش آسیاهای صنعتی، می‌توان از روش‌های آزمون خصوصیات شکست ذرات منفرد مانند آزمون بار افتان استفاده کرد. این آزمایش‌ها توسط بسیاری از محققان برای بررسی روابط کاهش انرژی ورودی بر اساس مصرف انرژی استفاده شده‌اند و روشی عملی و مفید در تعیین مقاومت فشاری مواد مختلف در یک محدوده ابعادی مشخص است. آزمون بار افتان به طور گسترده‌ای برای توصیف ذرات معدنی پایه در آسیا گلوله‌ای تر یا خشک استفاده می‌شود. در این راستا بر روی نمونه‌های زون‌های مختلف معدن سنگ آهک، آزمایش‌های بار افتان در ۵ فراکسیون دانه‌بندی و برای ۳ انرژی ویژه خردایش انجام شده است. به بیان دیگر برای هر زون ۱۵ آزمایش و در مجموع برای ۷ زون ۱۰۵ آزمایش بار افتان انجام شده است.

۲-۳- برنامه‌ریزی آرمانی

پس از زون‌بندی و بررسی کیفیت زون‌های فعال معدن بر اساس آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش، به کمک الگوی برنامه‌ریزی آرمانی یا مدل (GP) Goal Programing - روش

حل سیمپلکس، به امکان‌سنجی ارایه مدلی برای تنظیم مواد خام با رعایت استانداردهای سیمان و با هدف کاهش میزان مصرف انرژی در آسیای مواد خام پرداخته شده است. اولین قدم در تدوین یک مدل GP تعیین مجموعه اهداف به عنوان ترکیبی از هر ویژگی با هدف مربوطه است [۲۶]. در این تحقیق اهداف شامل به حداقل رساندن مصرف انرژی آسیای مواد خام و در کنار آن کاهش هزینه‌های بارگیری و حمل بوده است. در حل برنامه‌ریزی آرمانی به روش حل سیمپلکس به یک سری متغیرهای تصمیم نیاز است؛ زون‌بندی‌های صورت گرفته برای معدن و دپوهای موجود (X1 to X10)، متغیرهای تصمیم مورد نیاز برای حل الگوی برنامه‌ریزی آرمانی هستند.

۳- بررسی قابلیت خردایش و برآورد مدول‌های سیمان‌سازی

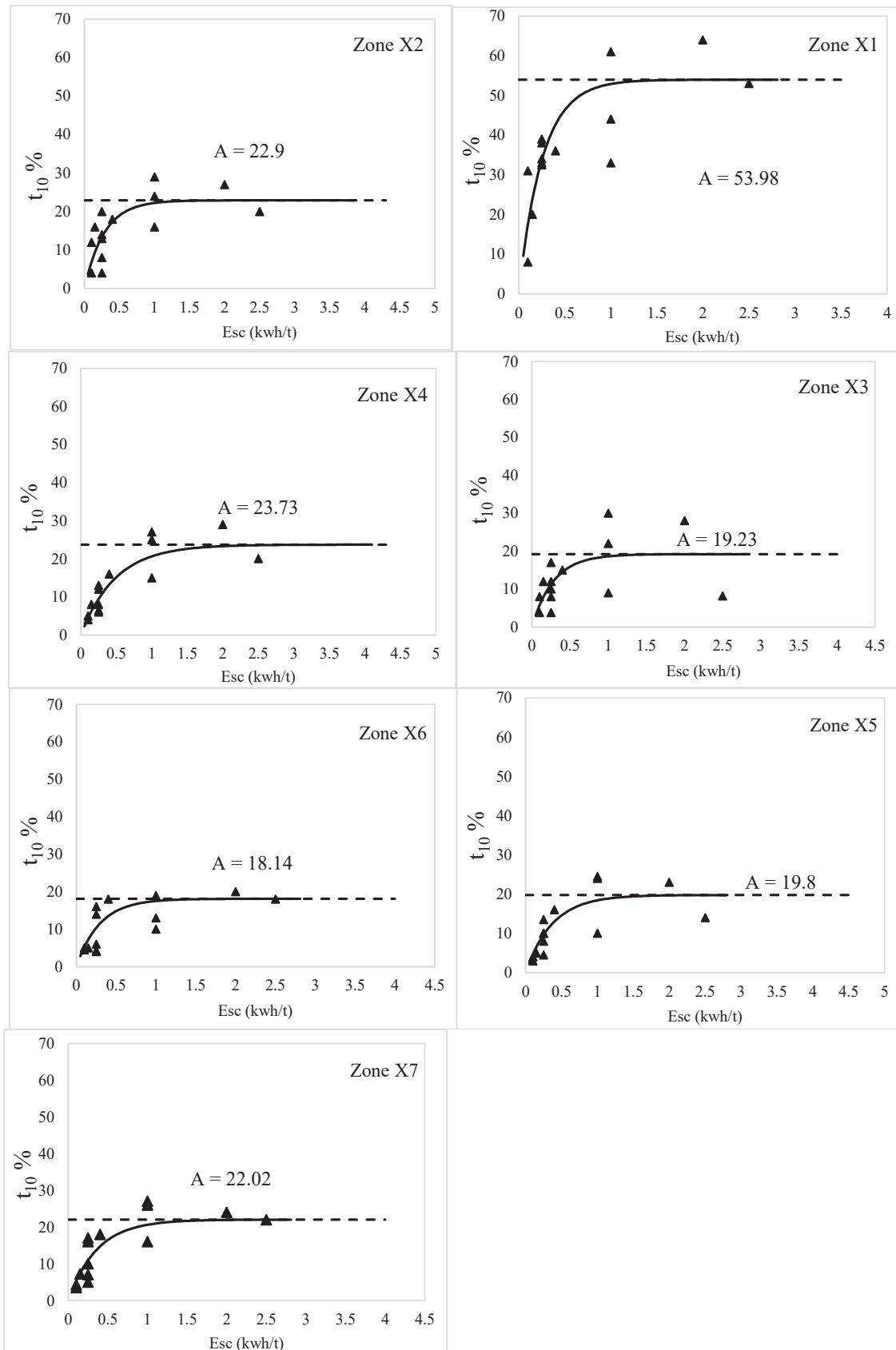
۳-۱- خردایش و مصرف انرژی خردایش برای زون‌های مختلف- بار ورودی به آسیاها

الف) تعیین اندیس کار باند: در راستای ارایه طرح اختلاط بهینه برای زون‌های معدن آهک با دیدگاه کاهش انرژی خردایش در آسیای مواد خام، به بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی و بررسی قابلیت خردایش زون‌های مختلف معدن، پرداخته شده است. با مشخص شدن خواص خردایشی هر زون می‌توان ترتیب و توالی استخراج و اختلاط آنها را به گونه‌ای تنظیم کرد که به کاهش مصرف انرژی در آسیای مواد خام منجر شود. در جدول ۱، مقادیر اندیس باند زون‌های ۷ گانه معدن آهک آمده است. بر اساس نتایج، بیشترین مقدار اندیس کار باند به میزان ۱۳/۳ کیلووات ساعت بر تن، مربوط به نمونه زون X1 و کمترین مقدار اندیس باند نیز برای نمونه زون X7 با میزان ۹/۸ کیلووات ساعت به ازای هر تن، است.

جدول ۱: مقادیر اندیس کار باند آسیای گلوله‌ای برای زون‌های X1 تا X7 سنگ آهک رشکان

کد زون	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Wi (kWh/ton)	۱۳/۳	۱۰/۲	۱۲/۹	۱۰/۴	۱۰/۲	۱۰/۷	۹/۸

ب) آزمون بار افتان: برای نمونه‌های مختلف زون‌های آهک آزمایش بار افتان انجام شده است. در شکل ۲ نمودارهای t₁₀-Esc برای زون‌های ۱ تا ۷ معدن آهک رشکان نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودارهای t_{10} - E_{sc} برای زون‌های X1-X7 معدن آهک رشکان

مختلف معدن، آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوره نیز بر روی نمونه زون‌های مختلف معدن آهک انجام گرفته است. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل، زون‌های X4 و X1، با مقادیر مقاومت فشاری برابر با ۳۴٫۷ و ۳۱٫۵ مگاپاسکال، خردایش سخت‌تر و مقاومت بالاتری نسبت به سایر موارد دارند و زون X6 دارای کمترین مقدار مقاومت فشاری تک محوره است. تحقیقات انجام گرفته در مورد معدن آهک مورد مطالعه نیز بیان‌کننده متوسط مقاومت فشاری در حدود ۳۰ مگاپاسکال برای این معدن است [۲۸،۲۱].

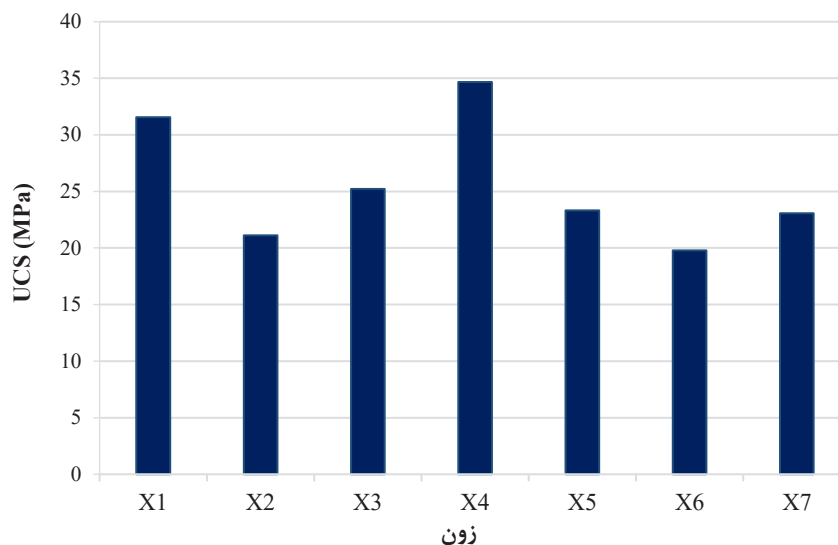
در شکل ۴ به بررسی و مقایسه نتایج آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش زون‌های مختلف معدن آهک مورد مطالعه پرداخته شده است. با توجه به شکل ۴، زون X1 از نظر

در جدول ۲ نیز پارامترهای قابلیت خردایش زون‌های مختلف و میزان سختی آنها بیان شده است. بر اساس رده‌بندی بیان شده در جدول ۲ که به وسیله JKTech ارایه شده، مقدار $A*b$ نشان‌دهنده درجه سهولت خردایش مواد در مقابل شکست ضربه‌ای است. بدین ترتیب که بزرگ بودن مقدار عددی $A*b$ نشان‌دهنده شکست بیشتر مواد به ازای یک انرژی معین ورودی است [۲۷]. مطابق جدول ارزیابی ویژگی‌های شکست JKTech و با توجه به مقادیر $A*b$ به دست آمده برای زون‌های مختلف، زون‌های X2 و X3 در محدوده سنگ‌های نرم و زون‌های X₁، X₄ و X₅ در محدوده سنگ‌های با سختی متوسط قرار دارند.

ج) تعیین مقاومت فشاری تک محوره: برای انجام مطالعات تکمیلی و بررسی خواص ژئومکانیکی زون‌های

جدول ۲: شاخص‌های خردایشی زون‌های X1-X7 معدن آهک رشکان - حاصل از آزمایش‌های بار افتان

JK Drop Weight Index Test ($A*b$)	سختی	$A*b$	b (kwh/ton)	A (%)	کد زون
۴۳-۵۶	متوسط	۴۴٫۶	۲٫۰	۲۲٫۱	X1
۶۷-۱۲۷	نرم	۸۰٫۳	۳٫۵	۲۲٫۹	X2
	نرم	۶۷٫۴	۳٫۵	۱۹٫۲	X3
۴۳-۵۶	متوسط	۴۸٫۵	۲٫۰	۲۳٫۷	X4
	متوسط	۵۲٫۹	۲٫۶	۱۹٫۸	X5
۶۷-۱۲۷	نرم	۶۱٫۸	۳٫۴	۱۸٫۱	X6
	نرم	۶۰٫۶	۲٫۷	۲۲٫۰	X7

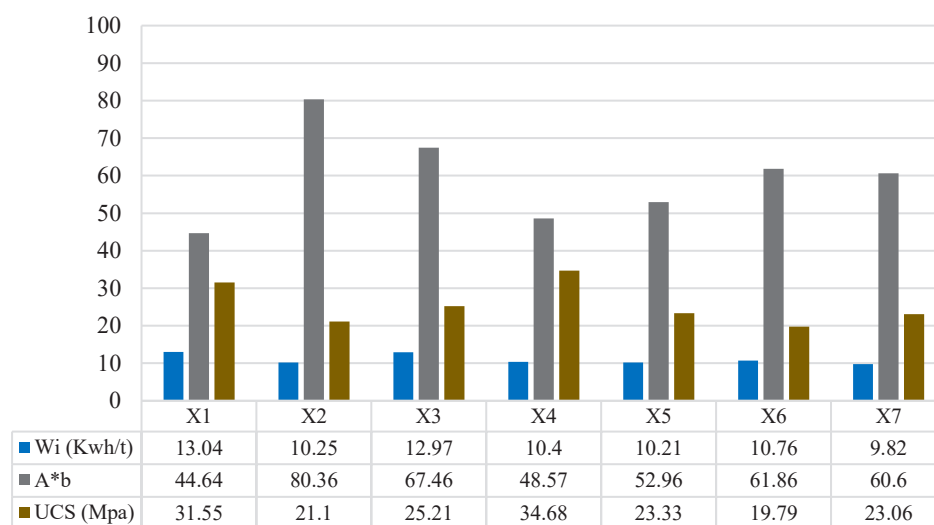


شکل ۳: مقادیر مقاومت فشاری تک محوره برای زون‌های X1 تا X7 معدن آهک رشکان

۵ و ۶ دارد. این زون ممکن است بیشترین ویژگی ساینده‌گی در آسیاهای غلتکی را داشته باشد. زون‌های ۵، ۶ و ۷ تقریباً خواص خردایش مشابهی دارند. زون‌های ۵ و ۷ از نظر شکست سایشی و شکست ضربه‌ای انرژی بالا و زون‌های ۵ و ۶ از نظر شکست ضربه‌ای- ترکیبی (به وسیله آسیای گلوله‌ای) رفتاری مشابه خواهند داشت.

رده‌بندی زون‌های استخراجی از دیدگاه راندمان انرژی مصرفی به ازای خردایش واحد وزن، وابسته به نوع دستگاه خردایش است. در آسیاهای گلوله‌ای، ترکیبی از مکانیسم‌های شکست ضربه‌ای و شکست سایشی حکمفرما است؛ و در آن مکانیسم غالب شکست ضربه‌ای در اثر برخورد گلوله‌ها به ماده معدنی داخل آسیا است. برای تعیین زون‌های مناسب برای خردایش یعنی زون‌هایی که کانسنگ استخراجی از آنها دارای کمترین مصرف انرژی به ازای واحد وزن بوده، مقایسه اندیس کار گلوله‌ای باند کافی است. کانسنگی که دارای کمترین مقدار اندیس کار گلوله‌ای باند بوده، نرم‌ترین و در عین حال کم مصرف‌ترین ماده معدنی از نظر انرژی ویژه خردایش خواهد بود، اما در صورت برابری و یا تفاوت اندک این اندیس‌ها، مقدار $A*b$ یک معیار کمکی تعیین‌کننده، خواهد بود. بدین ترتیب که کانسنگ دارای مقدار $A*b$ بیشتر، انرژی ویژه خردایش کمتری خواهد داشت، اما اگر هدف خردایش مواد معدنی در آسیای غلتکی باشد، معیار اصلی تعیین‌کننده، کانسنگ‌های با بیشترین راندمان خردایش آزمایش آسیای غلتکی فشار بالا

شکست ضربه‌ای دارای دومین سختی است و اندیس کار باند سنگ و مقاومت فشاری نیز موید این ویژگی هستند؛ به عبارت دیگر توده سنگ این زون کانسنگ تقریباً همگن است و سختی دارد. زون شماره X1 از نظر شکست ضربه‌ای کمترین راندمان خردایش را به ازای انرژی ورودی ثابت دارد، در حالی که دارای بالاترین اندیس کار بوده و مقاومت فشاری متوسطی دارد. با مقایسه دو پارامتر شکست ضربه‌ای و اندیس کار این زون می‌توان استنباط کرد که کانسنگ این زون همگن‌ترین و در عین حال سخت‌ترین ماده معدنی استخراجی در مقابل خردایش ضربه‌ای (با توجه به مقادیر $A*b$ به دست آمده) و دومین ماده معدنی مقاوم در مقابل خردایش فشاری (با توجه به مقادیر UCS به دست آمده) بوده و به همین سبب نیز دارای میزان سایش بالایی خواهد بود. با توجه به مقدار $A*b$ به دست آمده برای زون X2، این زون تردترین کانسنگ معدن مورد مطالعه است (دارای بالاترین مقدار $A*b$). از طرفی با توجه به مقادیر دو شاخص W_i و UCS این زون می‌توان گفت که انرژی خردایش زون X2 کمتر از زون X1 است. زون X3 دارای ویژگی‌های مکانیک سنگی مشابهی با زون X1 است، با این تفاوت که نسبت به زون X1 تردتر و ساینده‌گی کمتری دارد و دارای راندمان خردایش بالاتری است. زون X4 از دیدگاه خردایش فشاری و ضربه‌ای انرژی بالا و رفتاری شبیه کانسنگ زون X1 خواهد داشت؛ اما از دیدگاه مصرف انرژی به ازای تولید محصول معین، رفتاری شبیه به زون‌های ۲،



زون

شکل ۴: نتایج کلی آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش (W_i , $A*b$, UCS)

خردایشی بسیار نزدیک به هم هستند و میزان مصرف انرژی آنها تفاوت چندانی نخواهند داشت و با اعمال پارامترهای خردایش بیشتر، رده بندی این زون ها قابل تغییر است. در صورت استفاده از آسیای غلتکی فشار بالا جهت خردایش این رده بندی زون های معدن آهک رشکان ممکن است به صورت زیر تغییر کند:

for HPGR Grinding:

$$X1 > X4 > X3 > X5 > X7 > X2 > X6$$

۲-۳- بررسی زون های مختلف معدن از دیدگاه تنظیم مدول های سیمان سازی

برنامه ریزی تولید در معادن آهک کارخانه سیمان، وابستگی شدیدی به سه مدول سیمان سازی شامل مدول سیلیس (S.I.M)، مدول آلومینا (A.L.M) و اشباع آهکی (L.S.F) داشته و در واقع اهداف استخراجی به شدت متأثر از این مدول هاست [۲۹]. در تدوین طرح اختلاط زون های معدن، لازم است که پارامتر تنظیم مدول های سیمان نیز در نظر گرفته شده و در تعیین روابط اختلاط زون ها، این پارامتر نیز تاثیر داده شود. در جدول ۳ نتایج آنالیز X-Ray زون های ۷ گانه معرفی شده و سه دیپوی آهن، سیلیس و خاک رس، برای اندازه گیری اکسیدهای اصلی، آمده است. به کمک روابط تعریف شده برای تنظیم مدول های سیمان سازی (روابط ۱ تا ۳)، مقادیر عددی ضریب اشباع آهکی (L.S.F)، نسبت سیلیس (S.I.M) و نسبت آلومینا (A.L.M) برای زون های X1 تا X7 و سه دیپوی نامبرده، محاسبه شده است. نتایج مربوط به این

(HPGR) و در صورت نبود آن، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره است. از آنجایی که مکانیسم غالب شکست در آسیاهای غلتکی فشار و برش مواد معدنی است، کانسنگ دارای کمترین مقدار اندیس UCS، نرم ترین و در عین حال کم مصرف ترین ماده معدنی از نظر انرژی ویژه خردایش خواهد بود، اما در صورت برابری و یا تفاوت اندک میان اندیس ها، از مقدار $A*b$ و مقدار اندیس کار گلوله ای باند می توان به عنوان معیار کمکی استفاده کرد؛ به نحوی که کانسنگ با مقدار $A*b$ یا مقدار اندیس کار گلوله ای باند بیشتری، محصول ریز دانه تری را تولید کرده و در نتیجه انرژی ویژه خردایش کمتری را خواهد داشت. به عنوان یک نتیجه کلی، زون های مختلف معدن آهک رشکان را با توجه به میزان مصرف انرژی در آسیای گلوله ای مواد خام (آسیای گلوله ای کارخانه سیمان ارومیه) می توان به ترتیب زیر طبقه بندی کرد:

for Ball Mill Grinding:

$$X1 > X3 > X4 > X6 > X5 > X2 > X7$$

بر این اساس زون ۱ دارای بیشترین مصرف انرژی و زون ۷ دارای کمترین مصرف انرژی به ازای خردایش واحد وزن در آسیاهای گلوله ای خواهد بود. البته این رده بندی با توجه به کمبود برخی از داده ها و نزدیکی داده های موجود ممکن است دچار تغییراتی شود. با توجه به مقادیر اندیس کار باند و $A*b$ به دست آمده، بدون شک زون ۱ بیشترین مصرف انرژی به ازای خردایش واحد وزن در آسیاهای گلوله ای را دارد. بعد از آن زون شماره ۳ قرار دارد. کمترین مصرف کننده انرژی نیز زون شماره ۷ است. زون های ۲، ۴، ۵ و ۶ دارای خواص

جدول ۳: نتایج آنالیز دستگاه X-Ray برای اکسیدهای اصلی و تغییرات مدول های سیمان در زون های مختلف معدن رشکان

L.S.F	A.L.M	S.I.M	آنالیز ترکیب شیمیایی				کد زون
			SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	
۹۲٫۹	۳٫۵	۶٫۸	۱۵٫۹	۱٫۸	۰٫۵	۴۴٫۶	X1
۴۶٫۸	۲٫۹	۲٫۲	۲۱٫۲	۷٫۷	۲٫۶	۳۳٫۴	X2
۱۵۸٫۶	۲٫۲	۲٫۶	۱۷٫۲	۴٫۴	۱٫۹	۳۸٫۸	X3
۲۰۵٫۶	۲٫۱	۲٫۸	۹٫۰	۲٫۴	۱٫۰	۴۶٫۴	X4
۴۵۸٫۱	۲٫۰	۲٫۶	۷٫۳	۱٫۷	۰٫۸	۴۸٫۱	X5
۱۰۶٫۵	۲٫۵	۲٫۶	۳٫۴	۰٫۹	۰٫۴	۵۱٫۴	X6
۱۹٫۲	۲٫۲	۲٫۵	۱۲٫۹	۳٫۵	۱٫۳	۴۴٫۵	X7
۱۴٫۸	۲٫۲	۲٫۴	۳۴٫۸	۹٫۴	۴٫۲	۲۱٫۷	X8
۵٫۶	۰٫۱	۰٫۵	۲۵٫۳	۶٫۳	۴۴٫۷	۶٫۱	X9
۷٫۶	۲٫۸	۷٫۳	۶۲٫۱	۶٫۳	۲٫۲	۱۴٫۳	X10

$$MIN = 0.88X1 + 0.87X3 + 0.9X4 \quad (۴)$$

$$MAX = 0.7X2 + 0.62X5 + 0.59X6 + 0.64X \quad (۵)$$

همانگونه که در شکل ۱ نشان و شرح داده شد، زون‌های تعریف شده برای معدن و دپوهای سیلیس، آهن و خاک رس، فواصل متفاوتی با کارخانه سیمان دارند. همچنین کارخانه سیمان مورد مطالعه در دو فاز ۱ و ۲ در حال فعالیت است، بنابراین لازم است، فواصل زون‌ها از فازهای کارخانه و هزینه‌های حمل و نقل برای هر یک مد نظر قرار گیرد. در روابط ۶ و ۷، معادلات هدف برای هزینه حمل مواد معدنی به فازهای (به ترتیب) ۱ و ۲ بیان شده است:

$$\begin{aligned} \text{Min} = & 36100X1 + 45150X2 + 51000X3 + 53500X4 + \\ & 52200X5 + 47250X6 + 6400X7 + 5000X8 + \\ & 122400X9 + 124800X10 \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} = & 57350X1 + 66500X2 + 74000X3 + 80500X4 + \\ & 79000X5 + 72450X6 + 10800X7 + 9200X8 + \\ & 357000X9 + 262400X10 \end{aligned} \quad (۷)$$

۴-۲- معادلات محدودیت

الف) محدودیت مدول‌های سیمان: معادلات محدودیت در حالت کلی در برگیرنده روابط میان متغیرهای تصمیم، روابط میان متغیرهای تصمیم و منابع و روابط میان متغیرهای تصمیم با هدف یا آرمان هستند. منابع مورد نیاز در تامین مواد خام (متغیرهای تصمیم) برای استفاده در مدول‌های سیمان و برخی از معادلات محدودیت عناصر موجود در مواد خام، زون‌های X1 تا X10 هستند. اساس تنظیم معادلات محدودیت بر پایه سیمان تولیدی تیپ ۱ و ۲ در فاز ۱ و همچنین تیپ ۱ و ۲ در فاز ۲ با در نظر گرفتن ویژگی‌های سیستم و مدار کارخانه و استانداردهای موجود است. بر اساس رابطه L.S.F مورد استفاده در تنظیم بار ورودی کوره در کارخانه سیمان، معادله محدودیت برای ضریب اشباع سنگ آهک به صورت روابط زیر است. لازم به ذکر است که در روابط زیر C نماد ترکیب CaO، S نماد SiO₂، A نماد Al₂O₃ و F نماد Fe₂O₃ است. همچنین با توجه به تولید سیمان‌های تیپ ۱ و ۲ در کارخانه مورد مطالعه، محدودیت‌ها (رابطه ۸) با دیدگاه برآورد مدول‌های سیمان تیپ ۱ و ۲ تنظیم شده‌اند.

محاسبات در جدول ۳ آمده است. با توجه به مقادیر محاسبه شده برای ۳ مدول سیمان‌سازی، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مقادیر مدول‌های ضریب اشباع آهکی، نسبت سیلیس و نسبت آلومینا بسیار بالا است. به گونه‌ای تغییرات نسبت سیلیس در محدوده ۲۱۰۵ تا ۷۱۳ برای زون‌های ۱ تا ۷، متغیر است. مقدار آلومینا نیز برای هیچ از زون‌های معدن و دپوهای کارخانه در بازه مطلوب ۱٫۶-۱٫۴۵ قرار ندارد. مقادیر L.S.F نیز مشابه با A.L.M در محدوده مطلوب مورد نظر قرار ندارند. به عبارت دیگر برای تنظیم استانداردهای سیمان بر اساس مدول‌ها، نیاز به اختلاط زون‌ها با دپوهای سیلیس، آهن و خاک رس، برای دستیابی به مقدار مطلوب هر مدول وجود دارد.

$$S.I.M. = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}, \quad 2.50 \leq S.M. \leq 2.60 \quad (۱)$$

$$A.L.M. = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}, \quad 1.45 \leq A.M. \leq 1.6 \quad (۲)$$

$$L.S.F. = \frac{100 \times CaO}{2.85 \times SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65 \times Fe_2O_3}, \quad 91 \leq L.S.F. \leq 96 \quad (۳)$$

۴-۴ طرح اختلاط زون‌های معدن

۴-۱- معادلات هدف

بعد از زون‌بندی و بررسی کیفیت زون‌های فعال معدن، بر اساس آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش، با استفاده از روش Goal Programing به تدوین طرح اختلاط زون‌های معدن پرداخته شده است. هدف اصلی در این طرح به حداقل رساندن مصرف انرژی آسیای مواد خام در کارخانه سیمان بوده که در کنار آن اهدافی شامل کاهش هزینه‌های حفاری، آتشباری، بارگیری و حمل نیز مورد نظر قرار گرفته است. در راستای برآورد هدف کاهش انرژی مصرفی در آسیا، باید مصرف زون‌هایی که برای خردایش آنها انرژی بیشتری احتیاج است min گشته و بالعکس مصرف زون‌هایی با مصرف کم انرژی خردایش با رعایت تمامی محدودیت‌ها max گردد. به عبارت دیگر هدف بهینه‌سازی و متعادل‌سازی مصرف انرژی در آسیای مواد خام است.

در روابط ۴ و ۵، معادلات هدف کاهش مصرف انرژی در آسیای گلوله‌ای و غلتکی به ترتیب بیان شده است:

$$LSF = \frac{100C}{2.85S + 1.18A + 0.65F}, \quad 91 \leq L.S.F. \leq 96$$

MIN 91 ≤ LSF Limits FOR TYPE I & II CEMENTS ≤ MAX 96

$$MIN 91 \leq LSF = \frac{100C}{2.85S + 1.18A + 0.65F} \leq MAX 96$$

$$(2.85S + 1.18A + 0.65F) \times MIN 91 \leq 100C \leq (2.85S + 1.18A + 0.65F) \times MAX 96$$

$$91 \leq \frac{100 \sum_{i=1}^{10} C_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} X_i} \leq 96 \quad (8)$$

$$91 \leq \frac{2.85 \sum_{i=1}^{10} S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} X_i} + \frac{1.18 \sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} X_i} + \frac{0.65 \sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} X_i} \leq 96$$

$$91 \leq \frac{100 \sum_{i=1}^{10} C_i \times X_i}{2.85 \sum_{i=1}^{10} S_i \times X_i + 1.18 \sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i + 0.65 \sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i} \leq 96$$

$$100 \sum_{i=1}^{10} C_i \times X_i - \left(96 \times \left(2.85 \sum_{i=1}^{10} S_i \times X_i + 1.18 \sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i + 0.65 \sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \leq 0$$

$$100 \sum_{i=1}^{10} C_i \times X_i - \left(91 \times \left(2.85 \sum_{i=1}^{10} S_i \times X_i + 1.18 \sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i + 0.65 \sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \geq 0$$

به صورت معادلات رابطه ۹ است:

بر اساس رابطه S.I.M مورد استفاده در تنظیم بار ورودی
به کوره در کارخانه سیمان، معادله محدودیت نسبت سیلیس

$$SIM = \frac{S}{A + F}, \quad 2.50 \leq S.M. \leq 2.60$$

$$MIN 2.5 \leq SIM Limits FOR TYPE I & II CEMENTS \leq MAX 2.6$$

$$MIN 2.5 \leq SIM = \frac{S}{A + F} \leq MAX 2.6 \rightarrow (A + F) \times MIN 2.5 \leq S \leq (A + F) \times MAX 2.6$$

$$2.50 \leq \frac{\sum_{i=1}^9 S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^9 X_i} \leq 2.60 \quad (9)$$

$$2.50 \leq \frac{\sum_{i=1}^9 S_i \times X_i}{\frac{\sum_{i=1}^9 A_i \times X_i}{\sum_{i=1}^9 X_i} + \frac{\sum_{i=1}^9 F_i \times X_i}{\sum_{i=1}^9 X_i}} \leq 2.60$$

$$2.50 \leq \frac{\sum_{i=1}^9 S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^9 A_i \times X_i + \sum_{i=1}^9 F_i \times X_i} \leq 2.60$$

$$\sum_{i=1}^{10} S_i \times X_i - \left(2.60 \times \left(\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i + \sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^{10} S_i \times X_i - \left(2.50 \times \left(\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i + \sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \geq 0$$

تولید سیمان تیپ ۱ به صورت رابطه ۱۰ حل می شود.

بر اساس رابطه A.L.M مورد استفاده در تنظیم بار ورودی
کوره در کارخانه سیمان، معادله محدودیت نسبت آلومینا برای

$$ALM = \frac{A}{F} \quad , \quad 1.45 \leq A.M. \leq 1.6$$

MIN 1.45 ≤ ALM Limits FOR TYPE I CEMENTS ≤ MAX 1.6

$$MIN 1.45 \leq ALM = \frac{A}{F} \leq MAX 1.6 \quad \rightarrow \quad (F) \times MIN 1.45 \leq S \leq (F) \times MAX 1.6$$

$$1.45 \leq \frac{\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} X_i} \leq 1.6 \quad , \quad 1.45 \leq \frac{\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i} \leq 1.6 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i - \left(1.6 \times \left(\sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i - \left(1.45 \times \left(\sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \geq 0$$

برای سیمان تیپ ۲، روابط A.L.M به صورت رابطه ۱۱ خواهد بود:

$$ALM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad , \quad 1.3 \leq A.M. \leq 1.4$$

MIN 1.3 ≤ ALM Limits FOR TYPE II CEMENTS ≤ MAX 1.4

$$MIN 1.3 \leq ALM = \frac{A}{F} \leq MAX 1.4 \quad , \quad (F) \times MIN 1.3 \leq A \leq (F) \times MAX 1.4$$

$$1.3 \leq \frac{\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} X_i} \leq 1.4 \quad , \quad 1.3 \leq \frac{\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i}{\sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i} \leq 1.4 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i - \left(1.4 \times \left(\sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^{10} A_i \times X_i - \left(1.3 \times \left(\sum_{i=1}^{10} F_i \times X_i \right) \right) \geq 0$$

۰٫۳۵ درصد اکسید منیزیم هستند، بنابراین محدوده را بین ۰٫۳۵ تا ۳ درصد در نظر می‌گیرند (رابطه ۱۲).

بر اساس استانداردهای سیمان‌سازی مقدار اکسید منیزیم در ترکیب مواد خام باید کمتر از ۳ درصد باشد. در معدن سنگ آهک رشکان ارومیه به دلیل اینکه مواد خام حداقل دارای

$$0.35\% \leq \frac{\sum_{i=1}^9 \%M_i \times X_i}{\sum_{i=1}^9 X_i} \leq 3\% \quad , \quad 0.35\% \leq \%MgO \leq 3\%$$

$$0.35\% \times \sum_{i=1}^9 X_i \leq \sum_{i=1}^9 \%M_i \times X_i \leq 3\% \times \sum_{i=1}^9 X_i$$

(۱۲)

$$\sum_{i=1}^{10} \%M_i \times X_i - \left(3\% \times \left(\sum_{i=1}^{10} X_i \right) \right) \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^{10} \%M_i \times X_i - \left(0.35\% \times \left(\sum_{i=1}^{10} X_i \right) \right) \geq 0$$

ب) معادلات هدف رهیافت B: معادلات کامل فاز ۱ و

سیمان تیپ ۲

$$Min=0.93X1+0.99X3+0.79X4$$

$$Max=0.78X2+0.67X5+0.71X6+0.68X7$$

$$Min=36100X1+45150X2+51000X3+53500X4$$

$$+52200X5+47250X6+6400X7+5000X8+$$

$$122400X9+124800X10$$

ج) معادلات هدف رهیافت C: معادلات کامل فاز ۲ و

سیمان تیپ ۱

$$Min=0.88X1+0.87X3+0.9X4$$

$$Max=0.7X2+0.62X5+0.59X6+0.64X7$$

$$Min=57350X1+66500X2+74000X3+80500X4$$

$$+79000X5+72450X6+10800X7+9200X8+$$

$$357000X9+262400X10$$

د) معادلات هدف رهیافت D: معادلات کامل فاز ۲ و

سیمان تیپ ۲

$$Min=0.88X1+0.87X3+0.9X4$$

$$Max=0.7X2+0.62X5+0.59X6+0.64X7$$

$$Min=57350X1+66500X2+74000X3+80500X4$$

$$+79000X5+72450X6+10800X7+9200X8+$$

$$357000X9+262400X10$$

در رهیافت‌های A و B تناژ استخراج به ترتیب برای تولید

سیمان‌های تیپ ۱ و ۲ در فاز یک مشخص و در رهیافت‌های

C و D تناژ استخراجی از زون‌ها برای فاز دو و تیپ‌های ۱

و ۲ سیمان به ترتیب، تعیین شده است. با توجه به جدول

۴، در حال حاضر بهینه‌ترین ترکیب و توالی برای استخراج

معدن آهک، استخراج از زون‌های شماره ۲، ۶ و ۷ معدن

ب) محدودیت ظرفیت کارخانه: برای تنظیم مواد خام

یک پارامتر محدودیت دیگر ظرفیت سالن مواد است. ظرفیت

پایل فاز ۱ در محدوده ۱۶۰۰۰ تن تا ۱۶۵۰۰ تن و ظرفیت

پایل فاز ۲ در محدوده ۱۷۰۰۰ تن تا ۱۸۰۰۰ تن است،

بنابراین معادلات محدودیت برای ظرفیت پایل‌های فاز ۱ و ۲

به ترتیب به صورت روابط ۱۳ و ۱۴ هستند.

$$16000 \leq \sum_{i=1}^{10} X_i \leq 16500 \quad (۱۳)$$

$$17000 \leq \sum_{i=1}^{10} X_i \leq 18000 \quad (۱۴)$$

۳-۴- معادلات نهایی فازهای ۱ و ۲ کارخانه سیمان (معادلات

ورودی نرم‌افزار WinQsb)

در نهایت پس از تدوین معادلات محدودیت و آرمان‌ها،

مساله به روش سیمپلکس در محیط نرم‌افزار WinQsb اجرا

و در نهایت چهار جواب که بیشترین هماهنگی را با اهداف و

آرمان‌های تولیدی داشتند به عنوان جواب‌های بهینه انتخاب

شد. چهار نتیجه بهینه به دست آمده از حل مدل ریاضی الگوی

برنامه‌ریزی آرمانی در جدول ۴ ارائه شده است.

الف) معادلات هدف رهیافت A: معادلات کامل فاز ۱

و سیمان تیپ ۱

$$Min=0.93X1+0.99X3+0.79X4$$

$$Max=0.78X2+0.67X5+0.71X6+0.68X7$$

$$Min=36100X1+45150X2+51000X3+53500X4$$

$$+52200X5+47250X6+6400X7+5000X8+$$

$$122400X9+124800X10$$

جدول ۴: رهیافت‌های بهینه حاصل از حل الگوی برنامه‌ریزی آرمانی در کارخانه سیمان رشکان

شماره	متغیر تصمیم‌گیری	فاز ۱		فاز ۲	
		رهیافت A	رهیافت B	رهیافت C	رهیافت D
۱	X1	۰	۰	۰	۰
۲	X2	۱۱۵۱,۲	۸۰۲,۷	۱۲۵۵,۸	۸۷۵,۶
۳	X3	۰	۰	۰	۰
۴	X4	۰	۰	۰	۰
۵	X5	۰	۰	۰	۰
۶	X6	۴۵۴۴,۷	۴۹۱۳,۶	۴۹۵۷,۸	۵۳۶۰,۳
۷	X7	۹۴۴۲,۷	۹۱۸۲,۱	۱۰۳۰۱,۱	۱۰۰۱۶,۸
۸	X8	۰	۰	۰	۰
۹	X9	۳۴۸,۳	۴۴۲,۱	۳۸۰,۰	۴۸۲,۳
۱۰	X10	۱۰۱۲,۹	۱۱۵۹,۴	۱۱۰۵,۰	۱۲۶۴,۸

یکی از عمده مصرف‌کننده‌های انرژی در کارخانه‌های تولید سیمان هستند که مصرف انرژی در آنها ارتباط مستقیم با خواص ژئومکانیکی بار ورودی به آنها و پارامترهای عملیاتی مدار خردایش (از جمله نوع آسیا) دارد. ارایه طرحی بهینه برای اختلاط زون‌های معدن و سایر مواد اولیه تولید سیمان بر اساس قابلیت خردایش آنها، تاثیر چشمگیری در بهینه‌سازی خردایش در آسیای مواد خام دارد.

در این تحقیق با زون‌بندی معدن آهک (خوراک کارخانه سیمان) بر اساس ویژگی‌های ژئومکانیکی و تکنیکی و بررسی قابلیت خردایش هر زون، زون‌های معدن با دیدگاه مصرف انرژی طبقه‌بندی شدند. سخت‌ترین زون دارای اندیس باندی در حدود 13 kwh/ton و کمترین انرژی خردایش نیز حدود 10 kwh/ton اندازه‌گیری شده است. مدول‌های سیمان‌سازی برای هر زون و استفاده از آنها برای تعیین نسبت اختلاط زون‌ها (برای تعیین کیفیت مطلوب سیمان) و میزان برداشت از دپوهای سیلیس، آهن و خاک رس محاسبه گردید. همچنین در برنامه‌ریزی تولید، نوع آسیای مورد استفاده برای مواد خام نیز مورد توجه قرار گرفته و سیستم خردایش نیز دخالت داده شد. در نهایت استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی با اهداف کاهش هزینه‌های خردایش و همچنین هزینه‌های حمل و نقل از معدن تا کارخانه و در نظر گرفتن محدودیت‌های برآورد مدول‌های سیمان، به تعیین نسبت اختلاط مواد از زون‌های مختلف معدن و دپوهای مواد اولیه (سیلیس، آهن و خاک رس) منجر شده است. این برنامه تولید به کمترین هزینه خردایش در آسیای مواد خام منجر خواهد شد.

است. بیشترین تناژ استخراجی از سینه‌کار ۷ و پس از آن به ترتیب زون‌های ۶ و ۲ است. با توجه به وجود ۷ زون فعال در معدن و همچنین با توجه به شرایط عملیاتی استخراج پله‌ای از معدن روباز آهک موجود، پس از برداشت زون‌های نامبرده تا ارتفاع پله، لازم است طرح اختلاط زون‌ها مجدداً تهیه و تنظیم و ترتیب و توالی استخراج بهینه تعیین شود. همچنین با توجه به محدودیت موجود در تنظیم مدول‌های سیمان و بر اساس جدول ۴، می‌توان اظهار داشت در برنامه حاضر نیازی به برداشت از دپوی خاک رس (X8) نخواهد بود. به عبارت دیگر با ترکیب مواد برداشت شده از سینه‌کارهای ۲، ۶ و ۷ و همچنین دپوهای سیلیس و آهن بر اساس تناژهای جدول ۴، مدول‌های سیمان در حد استاندارد برآورد خواهند شد.

۵- نتیجه‌گیری

صنعت تولید سیمان به عنوان سومین مصرف‌کننده انرژی در جهان، علاوه بر مصرف بالای انرژی، تاثیر بسزایی در انتشار گازهای مضر از جمله CO_2 به محیط و آلودگی اتمسفر دارد (به ازای تولید هر یک کیلوگرم سیمان، 0.7 کیلوگرم CO_2 و دیگر آلاینده‌ها وارد محیط زیست می‌شود). یکی از منابع اصلی منتشرکننده گاز CO_2 در صنعت سیمان از سوزاندن سوخت‌های هیدروکربنی برای تولید انرژی مورد نیاز در پروسه تولید سیمان هستند. با توجه به هزینه‌های چشمگیر تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی و مسایل محیط زیستی ناشی از آن، لزوم بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی در صنعت تولید سیمان همواره مورد توجه بوده است. آسیاهای مواد خام

۶- مراجع

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ در کارخانه سیمان ارومیه". مجله تحقیقات بتن، دوره یازدهم، شماره ۴، ص ۱۳۱-۱۲۳.

[13] Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C. T., and Godoy, M. (2002). "Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design". Mining Technology, 111(1): 82-88.

[14] Jones, P., Douglas, I., and Jewbali, A. (2013). "Modeling combined geological and grade uncertainty: application of multiple-point simulation at the Apensu gold deposit, Ghana". Mathematical Geosciences, 45(8): 949-965.

[15] Rehman, S., Asad, M. W. A., and Khattak, I. (2008). "A managerial solution to operational control of the raw materials blending problem in cement manufacturing operations". In Proceedings of the COMSATS international conference on management for humanity and prosperity.

[16] Memtsas, D. P. (2003). "Multiobjective programming methods in the reserve selection problem". European Journal of Operational Research, 150(3): 640-652.

[17] Lamghari, A., and Dimitrakopoulos, R. (2012). "A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty". European Journal of Operational Research, 222(3): 642-652.

[18] Asad, M. W. A. (2011). "A heuristic approach to long-range production planning of cement quarry operations". Production Planning & Control, 22(4): 353-364.

[۱۹] صفرلو، ا.، ابراهیم ابادی، آ.، اکبری، ا.؛ ۱۳۹۷؛ "برنامه ریزی تولید معادن روباز آهک با تاکید ویژه برتنظیم مدول ضریب اشباع آهکی به منظور کاهش آلاینده‌گی زیست محیطی صنایع سیمان (مطالعه موردی: کارخانه سیمان تهران)". فصلنامه زمین شناسی محیط زیست، دوره دوازدهم، شماره ۴۳، ص ۷۹-۹۳.

[20] Vu, T., Drebenstedt, C., and Bao, T. (2020). "Assessing geological uncertainty of a cement raw material deposit, southern Vietnam, based on hierarchical simulation". International Journal of Mining Science and Technology, 30(6): 819-837.

[۲۱] بهرامی، ع.، کاظمی، ف.؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی بکارگیری دستگاه خراشنده (Surface Miner) مناسب در معدن سنگ آهک رشکان ارومیه". چهارمین همایش ملی معادن روباز، کرمان، ایران.

[22] Gent, M., Menendez, M., Toraño, J., and Torno, S. (2012). "A correlation between Vickers Hardness indentation values and the Bond Work Index for the grinding of brittle minerals". Powder Technology, 224: 217-222.

[23] Abdel Hafez, G. S. (2012). "Correlation between Bond

[1] Huang, Y. H., Chang, Y. L., and Fleiter, T. (2016). "A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan's cement industry". Energy Policy, 96: 14-26.

[2] Worrell, E., and Galitsky, C. (2004). "Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making". An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers.

[3] Avami, A., and Sattari, S. (2007). "Energy conservation opportunities: cement industry in Iran". International Journal of Energy, 3(1): 1-7.

[4] Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., and Rahim, N. A. (2011). "A critical review on energy use and savings in the cement industries". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4): 2042-2060.

[۵] بهرامی، ع.، عبداللہی شریف، ج.، علیلو، م.، کاظمی، ف.؛ ۱۳۹۸؛ "بررسی نقش افزودنی‌های معدنی در آسیای کلینکر بر قابلیت خردایش و کیفیت سیمان". مجله تحقیقات بتن، دوره دوازدهم، شماره ۲، ص ۱۲۵-۱۱۱.

[6] Chiaroni, D., Chiesa, V., Franzò, S., Frattini, F., and Latilla, V. M. (2017). "Overcoming internal barriers to industrial energy efficiency through energy audit: a case study of a large manufacturing company in the home appliances industry". Clean Technologies and Environmental Policy, 19(4): 1031-1046.

[7] Ghalandari, V., and Iranmanesh, A. (2020). "Energy and exergy analyses for a cement ball mill of a new generation cement plant and optimizing grinding process: A case study". Advanced Powder Technology, 31(5): 1796-1810.

[8] Ghalandari, V., Majd, M. M., and Golestanian, A. (2019). "Energy audit for pyro-processing unit of a new generation cement plant and feasibility study for recovering waste heat: A case study". Energy, 173: 833-843.

[9] Altun, O. (2018). "Energy and cement quality optimization of a cement grinding circuit". Advanced Powder Technology, 29(7): 1713-1723.

[10] Altun, O., and Benzer, H. (2014). "Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers". Powder Technology, 264: 1-8.

[11] Altun, O., Toprak, A., Benzer, H., and Darilmaz, O. (2016). "Multi component modelling of an air classifier". Minerals Engineering, 93: 50-56.

[۱۲] بهرامی، ع.، مومیوند، ح.، کاظمی، ف.، دهقانی، ا.، موتاب، م.؛ ۱۳۹۷؛ "بررسی رابطه بین انرژی لازم برای خردایش مواد معدنی و

مهندسی، دانشگاه ارومیه.

- [27] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., and Kojovic, T. (1996). "Mineral comminution circuits: their operation and optimization". Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, pp. 413.
- [28] سلطانعلی نژاد، س.، عبداللهی شریف، ج.، نعمتی، ع.؛ ۱۳۹۸؛ "برنامه‌ریزی تولید ذخایر آهکی کارخانه سیمان ارومیه بر اساس ملاحظات زیست محیطی و تکنولوژیکی". دومین کنفرانس معدنکاری و صنایع معدنی سبز ایران، خانه معدن ایران.
- [29] فرهودی، پ.؛ ۱۳۹۵؛ "برنامه‌ریزی تولید ذخایر آهک کارخانه سیمان تهران با دیدگاه تنظیم مدول‌های صنعت سیمان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد استخراج معدن؛ دانشگاه ارومیه.
- [26] چوبانی گل سعید، م.؛ ۱۳۹۹؛ "برنامه‌ریزی تولید معدن آهک کارخانه سیمان ارومیه با دیدگاه کاهش انرژی مصرفی در آسیای مواد خام". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و
- work index and mechanical properties of some Saudi ores". JES. Journal of Engineering Sciences, 40(1): 271-280.
- [24] Ahmadi, R., Hashemzadehfini, M., and Parian, M. A. (2013). "Rapid determination of Bond rod-mill work index by modeling the grinding kinetics". Advanced Powder Technology, 24(1): 441-445.
- [25] Chandar, K. R., Deo, S. N., and Baliga, A. J. (2016). "Prediction of Bond's work index from field measurable rock properties". International Journal of Mineral Processing, 157: 134-144.