Journal of Mineral Resources Engineering, 8(2): 129-149, (2023)

Imam Khomeini International University

Vol. 8, No. 2, Summer 2023

نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

Research Paper

Investigation of Solid - Liquid Separation of the Final Tailing at Zonouz Kaolin Processing Plant

Zamzami S.M.[1], Mehrabani J.V.[2*]

1- M.Sc, Dept. of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran

Received: 20 Apr. 2022 **Accepted: 04 Sep. 2022**

Abstract: In this research, the separation of solid phase and water in the final tailings of the Zonouz kaolin processing circuit was investigated. The sedimentation of solid particles was investigated by changing different parameters and their effects were evaluated on the initial rate of sedimentation, clarity of clear water, viscosity, and density of the settled pulp. Increasing the pH improved the sedimentation rate, and the settled pulp became denser. Despite the increase in sedimentation rate, the clarity of clear water decreased due to the presence of fine suspended particles at high pH. The use of flocculant, even in a small amount, increased the initial sedimentation rate by six times and improved the clarity of clear water. However, the density of the sedimented part decreased due to the increase in pulp volume.

Keywords: Settling rate, Water clarity, Flocculent, Tailings, Kaolin.

How to cite this article

Zamzami, S. M., and Mehrabani, J. V. (2023). *"Investigation of solid - liquid separation of the final tailing at Zonouz kaolin processing plant"*. Journal of Mineral Resources Engineering, 8(2): 129-149.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.17102.1586

*Corresponding Author Email: *mehrabani@sut.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

The amount of water used in the concentrating processes can be significant both economically and environmentally [1]. Water management is necessary for the plants, which should be minimized in the plants, especially in the tailing streams [2]. Mineral processing tailings usually contain significant parts of colloidal and wonderful particles, some of which are composed of clays [3].

The effect of particle properties, size distribution, specific surface area, density, pulp temperature, surface structure, bed porosity, particle sphericity, pulp properties such as solid concentration, pH and zeta, and dewatering performance, has been investigated by researchers [4-8].

Some researchers reported that the sedimentation rate for low solid percentages is higher compared to a pulp with high solid percentages. In pulps with high density, colloids are formed in the form of a network, which relatively reduces the sedimentation rate. [9,10].

Parsafer and his colleagues observed that the size, shape, and density of the flocs change with the increase in the amount of flocculant. The size of the clots increases with the increase in the amount of flocculant, and on the contrary, their density decreases [11].

In this research, due to the importance of reducing water loss in the final tailings of the Zonouz kaolin plant, the effective parameters in the tailing sedimentation process are investigated on a laboratory scale. The effects of the parameters of solid percentage, pH, pulp temperature, type and amount of flocculant, water clarity, pulp viscosity, and density are evaluated after the sedimentation process.

MATERIALS and METHODS

The sample was prepared in the outlet section of the tailings when the circuit was stable. The results of particle size analysis showed that D_{80} is about 100 microns, and 46%, 21%, and 9% of particles are more acceptable than 38 microns, 10 microns 5 microns, respectively. The average XRD analysis on the tailings showed that the main silica phase is in the form of quartz and the percentage of Quartz minerals in the tailings is higher than kaolinite and calcite minerals. In order to measure the viscosity, a drop viscometer was used. The settled experiments were performed in 500 ccs graduated cylinders.

RESULTS and DISCUSSION

According to Figure 1, it is clear that the particle sedimentation rate of the 5% solid pulp is 8.20 cm/min, while this rate is reduced to 0.229 cm/min in the 45% solid pulp. It can be concluded from Figure 1 that the sedimentation rate of particles in different percentages of solids is non-linear, and in three percentages of solids, a change in slope can be seen.

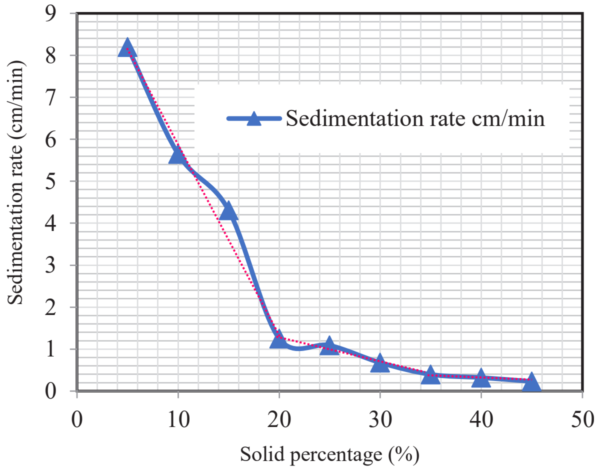


Figure 1. The effect of solid percentage on settling

The changes in sedimentation parameters with the change in pH are shown in Table 1. As it is clear from the results, with the increase of pH from 4 to 8, the sedimentation rate of particles increases significantly from 0.682 cm/min to 1.39 cm/min. In terms of increasing the sedimentation rate in the absence of flocculants,

two solutions are suggested: 1- adjusting the pH to the range of the isoelectric point, 2- neutralization with multivalent cations and multivalent ions; of course, combining both methods can also happen. In general, with the increase in pH by lime addition and the increase in the concentration of calcium ions in the pulp, due to changes in the surface charge and zeta potential, the repulsion between particles decreases, and the possibility of electrostatic attraction of particles and coagulation increases, which in turn increases the rate of sedimentation.

Table 1. The results of testing the effect of pH on the sedimentation of particles

Sedimentation rate (cm/min)	The density of the settled part (g/cm^3)	Viscosity section settled (cs)	pH
0.682±0.0518	1.433±0.011	5.035±0.475	4
1.087±0.0518	1.581±0.011	3.69±0.475	6
1.39±0.0518	1.614±0.011	5.3±0.475	8

The results of flocculants addition in different dosages have been presented in Table 2. The obtained results showed that the use of flocculant increases the initial rate of particle sedimentation up to 6 times. Based on the results (Table 2), there is no significant difference in the sedimentation rates of three amounts of selected flocculants. In general, it can be concluded that flocculant is effective in the sedimentation rate of particles. However, the amount of flocculant used in the selected range does not have a significant effect on sedimentation. By increasing the amount of flocculant from 1 g/t to 3 g/t, the density and viscosity of the settled pulp decreased.

Table 2. Results of sedimentation test with different amounts of flocculant

Sedimentation rate (cm/min)	The density of the settled part (g/cm^3)	Viscosity section settled (cs)	Flocculant rate (g/ton)
7.71±0.248	1.601±0.011	13.61±0.457	1
6.68±0.248	1.557±0.011	13.53±0.457	2
7.19±0.248	1.492±0.011	3.96±0.457	3
1.25±0.0518	1.628±0.011	15.07±0.457	No flocculant

After 60 minutes of sedimentation, it became clear that the relative transparency of the water increased with the increase in the amount of flocculant shown in Figure 2. The reason for this phenomenon may be due to the greater capacity of the flocculant chains, which collects all particles, both fine and colloidal. However, in the case where the amount of flocculant was low, with a limited absorption capacity, it only absorbed coarse particles.

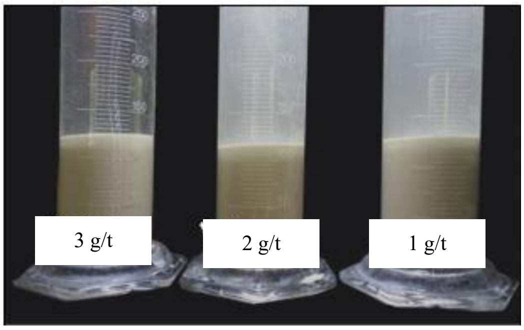


Figure 2. The effect of flocculant amount on the clarity of the water separated from the pulp (temperature 25°C, solid percentage 20%, amount of solution 20 ccs, flocculant type Basflak, pH=7.5, return water)

CONCLUSION

Based on the analysis results, Quartz and kaolinite were detected as main mineral phases and calcite as minor phases in the final tailing of the Zonouz kaolin processing plant. By increasing the amount of flocculant, the water clarity increased significantly due to the possibility of sedimentation of fine particles suspended in water. In the presence of the flocculant, water clarity increased with an increasing solid percentage. Sedimentation rate in acidic pH was lower than in alkaline pH, and the surface charge of particles had an essential effect on the sedimentation rate. According to the conducted experiments, most of the water can be returned using the thickener in the optimal conditions obtained from the experiments.

REFERENCES

[1] Nematolahi, H. (1384). *"Mineralization Volume II"*. Tehran University Press, Tehran, Second Period, 865-861.

[2] Qaidi, A. B., Sam, A., and Al-Dini, H. (2013). *"Investigation of the parameters affecting the settling speed and determining the optimal conditions for the settling of particles in thickener"*. Research Quarterly, 4: 27-31.

[3] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2016). *"Wills' Mineral Processing Technology"*. 8th Edition, Elsevier, Canada, Chapter 15, 417-439.

[4] Oruç, F., and Sabah, E. (2006). *"Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings"*. IMPC 2006, Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress, 1192-1197.

[5] Sengupta, D. K., Kan, J., Al Taweel, A. M., and Hamza, H. A. (1997). *"Dependence of separation properties on flocculation dynamics of kaolinite suspension"*. International Journal of Mineral Processing, 49: 73-85.

[6] O'Shea, J. P., Qiao, G. G., and Franks, G. V. (2010). *"Solid–liquid separations with a temperature-responsive polymeric flocculant: Effect of temperature and molecular weight on polymer adsorption and deposition"*. Journal of Colloid and Interface Science, 348: 9-23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.04.063.

[7] Aghajani, A., Goharrizi, A. S., and Qashlaghi, M. A. (1390). *"Investigation of the parameters affecting the solid-liquid separation process in Sarcheshme copper complex laboratory thickener"*. Journal of Separation Science and Engineering, 3(2): 43-56.

[8] Feng, B., Penga, J., Zhua, X., and Huang, W. (2016). *"The settling behavior of quartz using chitosan as flocculant"*. Journal of Materials Research and Technology, 6(1): 71-76. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.09.004.

[9] Moudgil, B. M., and shah, B. D. (1986). *"Selection of flocculant for solid liquid separation"*. Advances in Solid-Liquid Seperation, Ohio, 191-202.

[10] Besra, L., Sengupta, D. K., and Roy, S. K. (2000). *"Particle characteristics and their influence on dewatering of kaolin, calcite and quartz suspensions"*. International Journal of Mineral Processing, 59: 89-112.

[11] Parsafer, G., and Benisi, S. (2013). *"Determining the dimensions and density of clots formed in the tailings thickener of Gol-Ghar Sirjan magnetite processing plant"*. Scientific-Research Journal of Mining Engineering, 9(22): 75-84.

نشریه مهندسی منابع معدنی، سال ۱۴۰۲، دوره هشتم، شماره ۲، ص ۱۴۹-۱۲۹

دوره هشتم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۳ تا ۱۴۹

Vol. 8, No. 2, Summer 2023, pp. 133-149

نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

علمی-پژوهشی

بررسی جداسازی جامد از مایع باطله نهایی کارخانه فرآوری کائولن زنوز

سید محسن زمزمی[1]، جواد وظیفه مهربانی[2*]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

چکیده

در این تحقیق، جداسازی فاز جامد و آب در باطله نهایی مدار فرآوری کائولن زنوز بررسی شد. کوارتز، کائولینیت کانی‌های اصلی و به مقدار جزیی کلسیت کانی تشکیل‌دهنده باطله نهایی شناسایی شدند. ته‌نشینی ذرات جامد پالپ، با تغییر پارامترهای مختلف بررسی و تاثیر آنها، در سرعت اولیه ته‌نشینی، شفافیت آب بخش زلال، ویسکوزیته و چگالی پالپ ته‌نشین شده ارزیابی گردید. نتایج نشان داد، با افزایش درصد جامد پالپ ته‌نشین شده از ۵٪ تا ۴۵٪ (در غیاب فلوکولانت)، سرعت ته‌نشینی به صورت غیرخطی کاهش و شفافیت آب بخش زلال، به دلیل ته‌نشینی بهتر ذرات معلق در درصدهای جامد بالا، افزایش یافت. افزایش pH، سرعت ته‌نشینی را بهبود بخشید و پالپ ته‌نشین شده متراکم‌تر شد. علی‌رغم افزایش سرعت ته‌نشینی، شفافیت آب بخش زلال، به دلیل وجود ذرات ریز معلق در pH های بالا، کاهش یافت. آنالیزها، نشان داد که ۵۵٪ ذرات معلق در بخش آب زلال ریزتر از ۱۰ میکرون بوده و درصد کانی‌های کائولینیت و کلسیت در بخش معلق، نسبت به خوراک اولیه افزایش یافته است. باتوجه به نتایج حاصل، با افزایش pH بار سطح و پتانسیل زتای ذرات معلق منفی‌تر شده، که این مساله ممکن است باعث افزایش نیروی‌های دافعه ذرات ریز شده و در نهایت به معلق شدن ذرات ریز منجر شود. استفاده از فلوکولانت حتی به مقدار کم نیز سرعت اولیه ته‌نشینی را تا ۶ برابر افزایش داده و شفافیت آب زلال را بهبود بخشید، ولی چگالی بخش ته‌نشین شده به دلیل افزایش حجم پالپ، کاهش یافت.

کلمات کلیدی

سرعت ته‌نشینی، شفافیت آب، فلوکولانت، باطله، کائولن.

استناد به این مقاله

زمزمی، س. م.، وظیفه مهربانی، ج.؛ ۱۴۰۲؛ "**بررسی جداسازی جامد از مایع باطله نهایی کارخانه فرآوری کائولن زنوز**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۲، ص ۱۴۹-۱۲۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.17102.1586

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات **Email: mehrabani@sut.ac.ir**

حق‌مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

عموما، برای فرآوری مواد معدنی مقدار قابل توجهی آب نیاز است. جدایش مناسب آب از فاز جامد و برگشت آن از باطله‌های کارخانه فرآوری، تاثیر بسزایی در مصرف آب و اقتصادی بودن فرآیند دارد. مقدار آب مصرفی در فرآیندهای پرعیارسازی از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ محیط زیستی حایز اهمیت است [۱]. مسایل مربوط به صرفه‌جویی، نیاز به بهبود مدیریت مصرف و به حداقل رساندن هدررفت آب را افزایش داده است [۲]. باطله‌های فرآوری مواد معدنی معمولا شامل بخش‌های قابل توجهی از ذرات کلوییدی و خیلی ریز هستند، که بخشی از آنها، از رس‌ها تشکیل شده‌اند. رس‌ها اغلب با نرخ ته‌نشینی کم و تجمع ضعیف، مشکلات قابل توجهی در آبگیری باطله ایجاد می‌کنند [۳]. باطله کارخانه کائولن زنوز به همراه مقادیر قابل توجهی آب به صورت مستقیم، به سد باطله هدایت و بخشی از آب از سد باطله برگشت داده می‌شود. این باطله‌ها عموما تشکیل یافته از کوارتز، کائولینیت، کلسیت و اکسیدهای آهن است. بررسی رفتار ته‌نشینی پالپ باطله، برای استفاده از تیکنر آبگیری ممکن است حایز اهمیت باشد. در فرآیند ته‌نشینی پارامترهای مختلفی قابل بررسی و مطالعه‌اند. تاثیر خواص ذرات، توزیع اندازه، سطح مخصوص، چگالی، دمای پالپ، ساختار سطح، تخلخل بستر و کروی بودن ذرات و همچنین خواص پالپ مانند غلظت جامد، pH و پتانسیل زتا و تخلخل لخته‌ها بر عملکرد ته‌نشینی و آبگیری در محیط‌های آبی توسط محققان بررسی شده است [۸-۴]. برای ته‌نشینی ذرات کواتز در یک پالپ راهکارهای متعددی ارایه شده است. استفاده از سطح‌سازهای مختلف تا انواع فلوکولانت‌ها برای ته‌نشینی ذرات کوارتز مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از تحقیقات شرایط و نتایج ته‌نشینی کائولینیت در شرایط مختلف نشان می‌دهد که تاثیر دما بر روی ته‌نشینی ذرات، با افزایش دما موجب کاهش ویسکوزیته و بهبود سرعت ته‌نشینی می‌شود [۹-۵]. بسرا[۱] و همکارانش مشاهده کردند که نرخ ته‌نشینی برای درصدهای جامد پایین، در مقایسه با پالپ با درصد جامد بالا، بیشتر است. در پالپ‌هایی با چگالی بالا، لخته‌ها به صورت شبکه‌ای تشکیل می‌شوند که به طور نسبی نرخ ته‌نشینی را کاهش می‌دهد [۱۰]. سن‌گوپا و همکارانش دریافتند که درصد مواد جامد بالاتر در پالپ کائولینیت، شفافیت بخش آب زلال را افزایش و مقاومت در برابر فیلتراسیون را کاهش می‌دهد، اما غلظت جامد بالاتر از ۶ درصد وزنی ممکن است باعث تشکیل لخته ضعیف شود [۵]. مادگیل[۲] و همکارانش دریافتند که افزایش چگالی پالپ موجب بالا رفتن مقاومت پالپ در مقابل اغتشاش می‌شود. با وجود اینکه چگالی بالای پالپ، تشکیل لخته‌ها را تسریع می‌کند، لخته‌ها به صورت شبکه‌ای تشکیل می‌شوند که به طور نسبی نرخ ته‌نشینی را کاهش می‌دهد [۱۱]. آلکس[۳] و همکارانش به این نتیجه رسیدند، که در مقدار مصرف زیاد فلوکولانت اندازه ذرات و پل شدن ذرات افزایش می‌یابد که باعث تولید ذره قوی شده و شکنندگی لخته کاهش می‌یابد [۱۲]. در یک مطالعه توسط اوروج[۴] و همکاران این نتیجه حاصل شد که هنگام استفاده از فلوکولانت‌های آنیونی با وزن مولکولی بالا، پل‌هایی را در بین ذرات، از طریق پیوندهای هیدروژن و یا شیمیایی تشکیل می‌دهند و بر روی سطوح جذب می‌شوند [۴]. پارسافر و همکارانش مشاهده کردند که با افزایش میزان فلوکولانت اندازه، شکل و چگالی لخته‌ها تغییر می‌کند. اندازه لخته‌ها با افزایش میزان فلوکولانت افزایش و برعکس چگالی آنها کاهش می‌یابد [۱۳].

در این تحقیق با توجه به اهمیت کاهش دررفت آب همراه باطله نهایی کارخانه کائولن زنوز، پارامترهای موثر در فرآیند ته‌نشینی باطله در مقیاس آزمایشگاهی بررسی خواهد شد. تاثیر پارامترهای درصد جامد، pH، دمای پالپ، نوع و مقدار فلوکولانت، سرعت و مدت بررسی و سرعت ته‌نشینی، شفافیت آب، ویسکوزیته و چگالی پالپ بعد از فرآیند ته‌نشینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

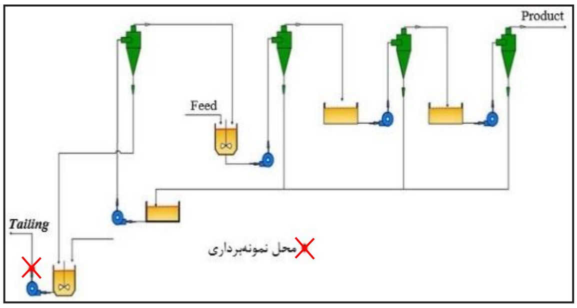
۲-۱- نمونه‌برداری و تهیه نمونه

نمونه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها در بخش خروجی تانک باطله به طرف سد خاکی (شکل۱) زمانی که مدار در حال تعادل بود، با استفاده از سطل ۱۵ لیتری در ۲ روز متوالی و در طول یک شیفت ۸ ساعته، هر دو ساعت یک بار تهیه شد که بعد از آبگیری و حذف رطوبت به صورت خشک مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۱- آنالیز دانه‌بندی باطله مدار

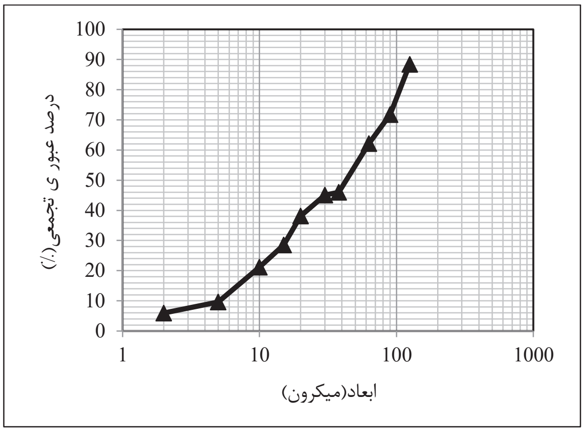
برای مشخص شدن ابعاد ذرات در نمونه از دانه‌بندی به روش تر، با استفاده از سرندهای استاندارد استفاده شد.

دانه‌بندی ذرات ریزتر از ۳۸ میکرون با استفاده از دستگاه سدەگراف[5] انجام گرفت.



شکل ۱: محل نمونه‌برداری از باطله مدار فرآوری کائولن

نتایج آنالیز دانه‌بندی در شکل ۲ نشان داد که D_{80} ابعاد ذرات در حدود ۱۰۰ میکرون و ۴۶٪ ذرات کوچکتر از ۳۸ میکرون، ۲۱٪ ریزتر از ۱۰ میکرون و ۹٪ ذرات ریزتر از ۵ میکرون است.



شکل ۲: دانه‌بندی نمونه باطله مدار فرآوری کائولن

۲-۱-۲- آنالیز شیمیایی باطله مدار به روش شیمی تر

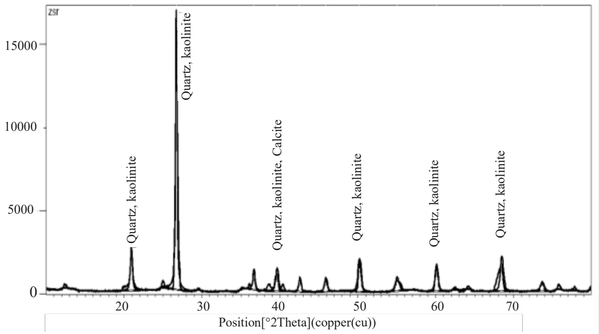
آنالیز شیمیایی به روش شیمی تر بر اساس استاندارد زمین‌شناسی آمریکا انجام گرفته است. بعد از انحلال کامل نمونه با استفاده از یکسری معرف‌ها و تغییر رنگ محلول درصد عناصر مشخص می‌شود که در این روش از دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-VIS مدل ۷۳۱۵ جنوی[6] ساخت کشور انگلستان) استفاده می‌شود. این آنالیز به وسیله آزمایشگاه شیمی شرکت صنایع خاک چینی ایران- کارخانه مرند انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نتیجه آنالیز شیمی تر نمونه باطله مدار فرآوری کائولن

نام جزء	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	SiO_2	L.O.I
مقدار(٪)	۰/۳۵	۰/۲۳	۱۱/۲۶	۸۲/۴۵	۵/۷۱

۲-۱-۳- آنالیز کانی‌شناسی و شناسایی فاز کانی‌ها با استفاده از روش XRD

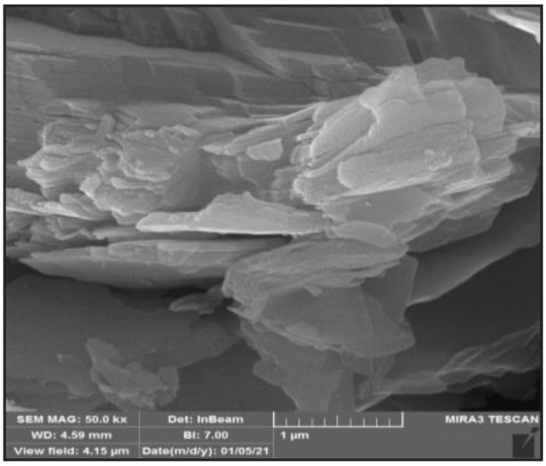
آنالیز XRD بر روی نمونه توسط شرکت بیم‌گسترتابان با استفاده از دستگاه XRD مدل PW ۱۷۳۰ ساخت شرکت فیلیپس هلند انجام گرفت. آنالیز XRD به صورت نرمال بر روی باطله در شکل ۳ نشان می‌دهد که فاز سیلیس موجود در کانی به صورت کوارتز و درصد کانی کوارتز در باطله نسبت به کانی‌های کائولینیت و کلسیت بیشتر است.



شکل ۳: آنالیز XRD نمونه باطله مدار فرآوری کائولن

۲-۱-۴- تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی[7]

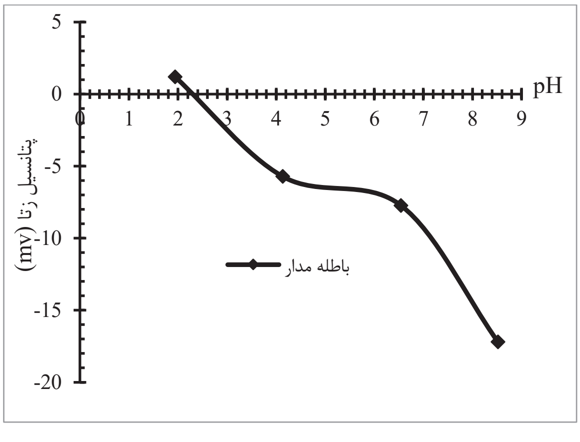
تصاویر از ذرات باطله در اندازه زیر یک میکرون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مدل میرا ساخت شرکت تسکان[8]، کشور جمهوری چک، تهیه شد که ورقه‌ای بودن ساختار ذرات را در شکل ۴ نشان می‌دهد.



شکل ۴: ذرات باطله در زیر میکروسکوپ الکترونی

۲-۱-۵- اندازه‌گیری زتا پتانسیل نمونه باطله نهایی

برای مشخص کردن نوع بار ذرات در pHهای مختلف، اندازه‌گیری زتا پتانسیل بر روی نمونه باطله نهایی مدار انجام گرفت. این آزمایش با استفاده از دستگاه زتامتر مالورن ساخت کشور انگلستان در pHهای مختلف انجام گرفت (شکل ۵) که نقطه ایزوالکتریک ذرات جامد باطله ۲/۴ اندازه‌گیری شد.



شکل ۵: زتاپتانسیل باطله نهایی مدار فرآوری کائولن

۲-۲- آنالیز آب برگشتی مدار و آب خام با روش ICP

با توجه به اینکه برخی یون‌های موجود در آب در بحث ته‌نشینی ذرات موثر هستند، از این رو برای شناسایی عناصر موجود در آب برگشتی و آب خام، با استفاده از روش ICP مورد آنالیز قرار گرفت که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: نتیجه آنالیز ICP از آب خام و برگشتی مدار

عنصر(ppm)	آب خام	آب برگشتی
B	۱/۱۰	۰/۷۶
Ca	۵۷	۱۳
K	۲۲/۶۰	۱۱/۱۰
Mg	۳۴/۳۰	۳۳/۱۰
Na	۲۵۷	۲۱۶
S	۵۶/۱۰	۲۷/۶۰
Si	۲/۴۶	۶/۳۴
Sr	۱/۲۲	۰/۹۶

۲-۳- مواد شیمیایی و فلوکولانت‌های مصرفی

برای تنظیم pH پالپ در محدوده اسیدی از سولفوریک اسید با وزن مولکولی ۹۸/۰۸ گرم بر مول ساخت کشور بلژیک و در محدوده قلیایی از هیدروکسید سدیم با وزن مولکولی ۴۰ گرم بر مول ساخت کشور آلمان استفاده شد. مشخصات فلوکولانت استفاده شده به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳: مشخصات فلوکولانت مصرفی

نام فلوکولانت	نوع فلوکولانت	جرم‌مولکولی	شرکت سازنده
بسفلاک	آنیونی	۸ تا ۲۴ میلیون	بسفلاک
A۲۷	آنیونی	۱۸ تا ۲۰ هزار	کوپلیمراصفهان
A۲۸	آنیونی	۲۰ تا ۲۲ هزار	کوپلیمراصفهان
سوپر فلاک	آنیونی	۱۰ تا ۱۵ هزار	سایتک

۲-۴-تجهیزات

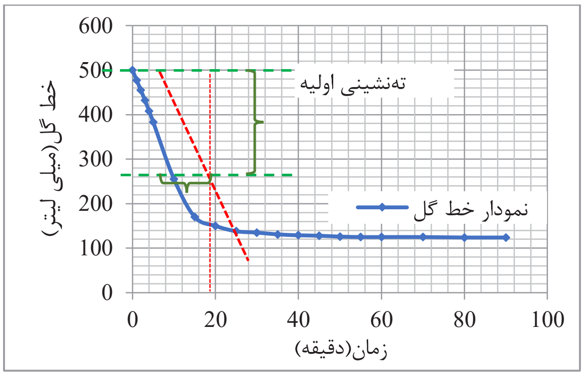
۲-۴-۱- ویسکوزیته‌متر ریزشی

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته، پالپ به داخل مخزن استوانه‌ای با انتهای مخروطی شکل ریخته می‌شود. پالپ از سوراخ انتهایی مخروط که به قطر ۴ میلی‌متر است خارج و مدت زمان تخلیه پالپ از مخزن اندازه گرفته می‌شود که بر حسب ثانیه ثبت و به سانتی استوکس تبدیل می‌گردد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل ۶: ویسکوزیته متر ریزشی

۲-۵- محاسبه سرعت ته‌نشینی

برای محاسبه سرعت در زمان‌های مختلف ته‌نشینی، ارتفاع خط گل ثبت و نمودار خط گل که در شکل ۷ نشان داده شده است، در زمان‌های مختلف رسم شد. نقطه‌ای از نمودار که سرعت ته‌نشینی از حالت خطی خارج شد به عنوان نقطه مورد نظر برای محاسبه سرعت انتخاب گردید. از تقسیم اختلاف ارتفاع بر مدت زمان رسیدن خط گل به نقطه مورد نظر، سرعت اولیه به دست آمد.



شکل ۷: محاسبه سرعت ته‌نشینی ذرات جامد پالپ

۳- آزمایش‌های ته‌نشینی

ته‌نشینی و جدایش ذرات جامد از فاز مایع بسته به نرخ ته‌نشینی ذرات از روش‌های بدون فلوکولانت و با فلوکولانت با استفاده از روش OVAT[۹] به تاثیر هرکدام پرداخته شد. برای انجام آزمایش‌های ته‌نشینی در محدوده تعریف شده، نمونه به مقدار لازم تهیه و بعد از اختلاط با آب تحت شرایط همزنی در دور ۱۰۰ تا ۵۰۰ دور در دقیقه پالپ تهیه شد.

پارامترهای دما و pH پالپ نیز اندازه‌گیری و محدوده پارامترها در دو حالت با فلوکولانت و بدون فلوکولانت در جدول ۴ نشان داده شده است. برای ارزیابی فرآیند ته‌نشینی سرعت (cm/min)، ویسکوزیته (cs) و چگالی پالپ (g/cm^3) به عنوان پاسخ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴: شرایط و محدوده آزمایش‌ها

ردیف	شرایط	پارامتر موثر	محدوده انجام آزمایش
۱	بدون فلوکولانت	دما (درجه سانتیگراد)	۱۰ – ۲۰ – ۳۰
۲		درصد جامد (درصد)	۵-۱۰-۱۵-۲۰-۲۵-۳۰-۳۵-۴۰-۴۵
۳		دانه‌بندی (µm)	زیر ۴۰، زیر۹۰، ۴۰ تا ۱۲۵
۴		نوع آب مصرفی	مقطر- برگشتی- خام
۵		pH	۴ -۶- ۸
۶	با فلوکولانت	غلظت فلوکولانت (pmm)	۳٫۶۳ و ۵٫۴۵ و ۱۰٫۹
۷		مقدار فلوکولانت (گرم بر تن)	۱ و ۲ و ۳
۸		درصد جامد (درصد)	۵ و ۱۵ و ۲۵ و ۳۵
۹		دور همزنی (دور در دقیقه)	۴۰۰ و ۵۰۰ و ۶۰۰
۱۰		مدت زمان همزنی (دقیقه)	۵ و ۷٫۵ و ۱۰

برای انجام آزمایش ته‌نشینی پالپ آماده شده به استوانه مدرج به حجم ۵۰۰ سی‌سی منتقل شد. برای آزمایش‌های با فلوکولانت، محلول فلوکولانت به مقدار لازم به پالپ اضافه و با سر و ته کردن استوانه مدرج، آزمایش ته‌نشینی شروع گردید.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تاثیر دما بر روی فرآیند ته‌نشینی ذرات در شرایط بدون فلوکولانت

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۵ و شکل ۸ مشاهده می‌شود که در دماهای بالاتر سرعت ته‌نشینی افزایش یافته و باعث تسریع در فرآیند ته‌نشینی می‌شود به طوری که در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد سرعت ته‌نشینی ۰٫۴۶۲ سانتی‌متر در دقیقه است و در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت ۱٫۶۸۸ سانتی‌متر در دقیقه رسیده است که با یافته‌های لین و همکارانش مطابقت دارد.

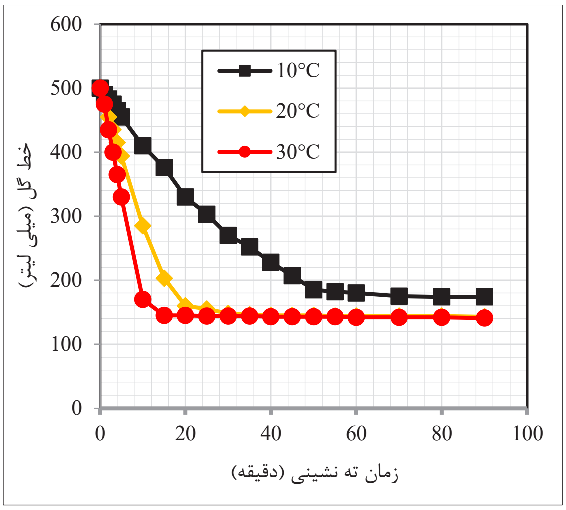
آنها دریافتند که کاهش دما موجب افزایش ویسکوزیته آب و افزایش زمان ته‌نشینی شده که بلافاصله در سرعت ته‌نشینی منعکس می‌شود[۱۴]. این تغییرات دما ممکن است تاثیر بسزایی در فصول مختلف سال داشته باشد.

با توجه به شکل ۹ مشخص است با کم شدن دما، ویسکوزیته آب افزایش می‌یابد و این افزایش ویسکوزیته ممکن است باعث ایجاد مقاومت و افزایش نیروی برشی در جریان سیال شده و سقوط آزاد ذرات را مختل کند، به طوری که در دمای پایین سرعت ته‌نشینی ذرات کاهش می‌یابد و در دمای بالا، سرعت ته‌نشینی ذرات بیشتر می‌شود.

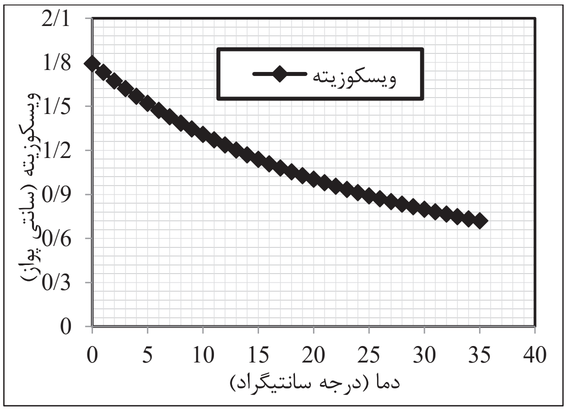
با افزایش دما از ۱۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی بخش ته‌نشین شده از ۱٫۶۲ به ۱٫۷۰ و نیز ویسکوزیته این بخش از ۱۰٫۸۸ cs به ۵۳٫۴۶ cs افزایش یافته است. اگر تغییرات دما در حجم بخش ته‌نشین شده در شکل ۸ بررسی شود، مشاهده می‌شود که حجم پالپ ته‌نشین شده در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بعد از ۶۰ دقیقه در دماهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۱۷۴، ۱۴۳ و ۱۴۱ میلی‌لیتر است. به عبارتی با افزایش دما از ۱۰ درجه سانتی گراد به ۳۰ درجه سانتی‌گراد، تراکم ذرات در بخش ته‌نشین شده افزایش چشمگیری داشت، که بیانگر فشرده شدن ذرات و کاهش حجم آب شبکه بین ذرات است.

۴-۲- تاثیر درصد جامد پالپ بر روی فرآیند ته‌نشینی ذرات در شرایط بدون فلوکولانت

نتایج حاصل از بررسی تاثیر درصد جامد بر روی سرعت ته‌نشینی چگالی و ویسکوزیته پالپ در جدول ۶ ارایه شده است. از روی نتایج ته‌نشینی ذرات مشخص است که سرعت ته‌نشینی ذرات در پالپ حاوی ۵٪ جامد برابر با ۸٫۲۰ سانتی‌متر در دقیقه است در حالی که این سرعت در پالپ ۴۵٪ جامد به ۰٫۲۲۹ سانتی‌متر در دقیقه کاهش یافته است. با افزایش درصد جامد همواره مقدار ذرات کلوییدی افزایش می‌یابد، بنابراین سبب افزایش ویسکوزیته پالپ شده و ذرات حین سقوط بهم برخورد کرده که این پدیده موجب کاهش چشمگیر سرعت سقوط ذرات و مانع ته‌نشینی می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که کاهش سرعت ته‌نشینی ذرات در درصدهای مختلف جامد غیرخطی است و در سه محدوده



شکل ۸: ته‌نشینی ذرات جامد در دماهای مختلف



شکل ۹: تاثیر دما بر روی ویسکوزیته آب[۱۵]

جدول ۵: نتایج حاصل از آزمایش تاثیر دما بر روی ته‌نشینی

دما (°C)	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
۱۰	۱۰٫۸۸±۰٫۴۵	۱٫۶۲۶±۰٫۰۱۱	۰٫۴۶۲±۰٫۰۵۱۸
۲۰	۳۹٫۹۲±۰٫۴۵	۱٫۶۷۲±۰٫۰۱۱	۰٫۸۷۲±۰٫۰۵۱۸
۳۰	۵۳٫۴۶±۰٫۴۵	۱٫۷۰۰±۰٫۰۱۱	۱٫۶۸۸±۰٫۰۵۱۸

درصد جامد تغییر شیب قابل مشاهده است به گونه‌ای که با افزایش درصد جامد از ۵ تا ۲۰ درصد کاهش سرعت ته‌نشینی اولیه با شیب تندتری نسبت به بازه افزایش درصد جامد از ۲۰ تا ۳۵ درصد را دارد و در بازه درصد جامد ۳۵ تا ۴۵ درصد کاهش سرعت‌های ته‌نشینی با شیب بسیار ملایمی اتفاق افتاده است. در ادامه فرآیند ته‌نشینی بعد از ۹۰ دقیقه، با توجه اینکه غلظت پالپ در بخش ته‌نشینی افزایش می‌یابد، شدت مقاومت سیال برای ته‌نشینی ذرات نیز افزایش می‌یابد.

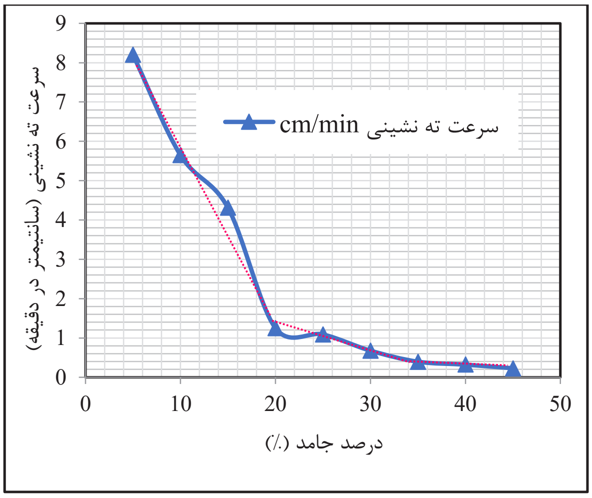
نتایج ویسکوزیته در جدول ۶ نشان می‌دهد که ویسکوزیته پالپ ته‌نشین شده در پالپ با ۱۰٪ جامد برابر با ۱۲٫۵۴ cs و برای پالپ ۴۵٪ جامد ویسکوزیته برابر ۳۰٫۹۶ cs است که افزایش ویسکوزیته را نشان می‌دهد.

فشردگی کم بین ذرات ته‌نشین شده به احتمال زیاد تاثیر نیروی وزن پالپ هم است، یعنی اینکه آب بین لایه‌های پالپ خارج شده و ذرات نزدیک به هم قرار گیرند که این کار سبب افزایش جزیی نیروی مقاومت پالپ می‌شود و اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار ویسکوزیته برابر با ۱۸٫۴۲ cs است.

۴-۳- تاثیر نوع آب در روند ته‌نشینی ذرات در شرایط بدون فلوکولانت

همان‌طور که از نتایج بخش آزمایش نوع آب در فرآیند ته‌نشینی ذرات در سرعت ته‌نشینی، ویسکوزیته و چگالی پالپ در شکل ۱۱ و جدول ۷ مشخص است نوع آب‌های مورد استفاده در فرآیند ته‌نشینی تاثیر چندانی را در محدوده آزمایشی نشان نمی‌دهد. به عبارتی تغییرات سرعت ته‌نشینی در محدوده خطا قرار دارد. از طرفی چگالی بخش ته‌نشین شده با آب خام، آب برگشتی و آب مقطر به ترتیب برابر ۱٫۶۵، ۱٫۶۷ و ۱٫۷۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. همچنین ویسکوزیته پالپ بخش ته‌نشین شده با آب خام، آب برگشتی و آب مقطر به ترتیب برابر ۲۴٫۴۲ cs، ۳۲٫۴۵ cs و ۵۲٫۵۸ cs است، که با توجه به محدوده‌های بازه اطمینان، اختلاف معناداری را نشان می‌دهند.

به عبارتی می‌توان عنوان کرد که با افزایش غلظت یون‌های محلول در آب ویسکوزیته پالپ ته‌نشین شده کاهش یافته است. با توجه به نتایج، کمترین چگالی و ویسکوزیته پالپ بخش ته‌نشین شده در وجود آب خام است. نتایج آزمایش ICP آب خام و برگشتی و در جدول ۲ نشان می‌دهد که مقدار یون‌ها در آب خام به ویژه غلظت یون‌های کلسیم و پتاسیم، بیشتر از آب برگشتی است. وجود یون‌ها در آب همراه ممکن است تاثیر مستقیم در تراکم و فشردگی ذرات در پالپ



شکل ۱۰: تاثیر درصد جامد بر روی ته‌نشینی ذرات

جدول ۶: نتایج آزمایش تاثیر درصد جامد بر روی ته‌نشینی ذرات

درصدجامد (٪)	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
۵	*	*	۸٫۲۰±۰٫۰۵۱۸
۱۰	۱۲٫۵۴±۰٫۴۵	۱٫۶۰۲±۰٫۰۱۱	۵٫۶۵±۰٫۰۵۱۸
۱۵	۱۲٫۵۴±۰٫۴۵	۱٫۶۲۷±۰٫۰۱۱	۴٫۳۱±۰٫۰۵۱۸
۲۰	۱۵٫۰۷±۰٫۴۵	۱٫۶۲۸±۰٫۰۱۱	۱٫۲۵±۰٫۰۵۱۸
۲۵	۱۹٫۰۲±۰٫۴۵	۱٫۶۴۰±۰٫۰۱۱	۱٫۰۹±۰٫۰۵۱۸
۳۰	۱۹٫۱±۰٫۴۵	۱٫۶۴۱±۰٫۰۱۱	۰٫۶۷۷±۰٫۰۵۱۸
۳۵	۱۹٫۶۴±۰٫۴۵	۱٫۶۶۵±۰٫۰۱۱	۰٫۳۹۶±۰٫۰۵۱۸
۴۰	۲۱٫۱۸±۰٫۴۵	۱٫۶۶۷±۰٫۰۱۱	۰٫۳۲۱±۰٫۰۵۱۸
۴۵	۳۰٫۹۶±۰٫۴۵	۱٫۶۶۸±۰٫۰۱۱	۰٫۲۲۹±۰٫۰۵۱۸

ته‌نشین شده داشته باشد. وجود یون‌های کلسیم و سدیم ممکن است احتمال آگلومراسیون ذرات را افزایش دهد. در غلظت کافی کلسیم، پتانسیل زتا به صفر کاهش می‌یابد، دافعه الکترواستاتیک از میان می‌رود و پالپ ته‌نشین شده متراکم می‌شود [۳].

نتایج نشان می‌دهد که ویسکوزیته پالپ ته‌نشین شده در آب مقطر با بیشترین مقدار برابر با ۵۱٫۵۸ cs است در حالی که کمترین مقدار ویسکوزیته مربوط به آزمایش آب خام با مقدار ۲۴٫۴۲ cs است.

۴-۴- تاثیر pH پالپ در روند ته‌نشینی ذرات در شرایط بدون فلوکولانت

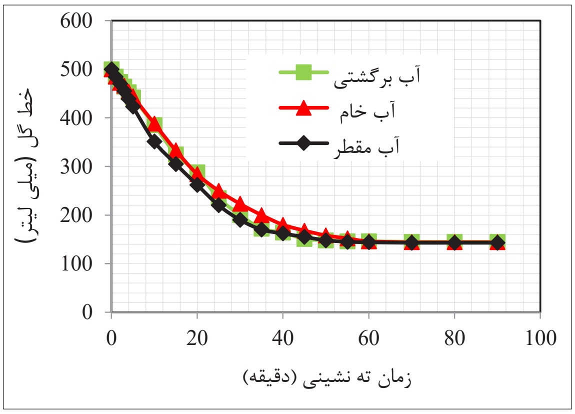
تغییرات پارامترهای ته‌نشینی با تغییر pH در جدول ۸ و شکل ۱۲ نشان داده شده است. چنانچه از نتایج مشخص است با افزایش pH از ۴ به ۸ سرعت ته‌نشینی ذرات از ۰٫۶۸۲ سانتی‌متر در دقیقه به ۱٫۳۹ سانتی‌متر در دقیقه افزایش می‌یابد.

در خصوص افزایش سرعت ته‌نشینی در غیاب فلوکولانت‌ها دو راهکار پیشنهاد می‌شود: ۱- تنظیم pH به محدوده نقطه ایزوالکتریک ۲- خنثی‌سازی با کاتیون‌های چند ظرفیتی یون‌های چند ظرفیتی [۱۶]، که تلفیق هر دو روش هم ممکن است اتفاق بیفتد. به طور کلی با افزایش pH به کمک آهک و افزایش غلظت یون‌های کلسیم در پالپ، به دلیل تغییرات بار سطحی و پتانسیل زتا، دافعه بین ذرات کاهش یافته و احتمال جذب الکترواستاتیکی ذرات و کوآگولاسیون افزایش می‌یابد که همین پدیده افزایش سرعت ته‌نشینی را با افزایش pH توجیه می‌کند.

اگر حجم پالپ ته‌نشین شده در آزمایش pH=۴ و pH=۸ مقایسه شود، به طور کامل مشخص است که تراکم پالپ در pH=۴ کمتر است که نشان‌دهنده وجود فاصله بین ذرات ته‌نشین شده است. با توجه به ویژگی‌های مختلف سطح و لبه، ذرات رس با یکدیگر در تعامل دارند و ساختارهای لبه- لبه (EE)، لبه -سطح (EF) و سطح- سطح (FF) را تشکیل می‌دهند. حالات ممکن وضعیت قرارگیری رس‌ها، به وسیله تعادل بین جاذبه واندروالس و نیروهای الکترواستاتیکی که بین لایه‌های دوگانه باردار در سطوح رس وجود دارد، تحت تاثیر قرار دارد.

برخی از محققان عنوان کرده‌اند که در محیط‌های اسیدی و قلیایی ضعیف کائولینیت ساختار EF را دارد. در محیط‌های اسیدی به دلیل بار مثبت لایه Al-OH در لبه‌ها و بار منفی سطح ساختار EF تشکیل می‌شود [۲۰-۱۷].

لازم به ذکر است که بار سطح در کانی کائولینیت به



شکل ۱۱: تاثیر نوع آب بر روی ته‌نشینی ذرات

جدل ۷: نتایج آزمایش نوع آب بر روی ته‌نشینی ذرات

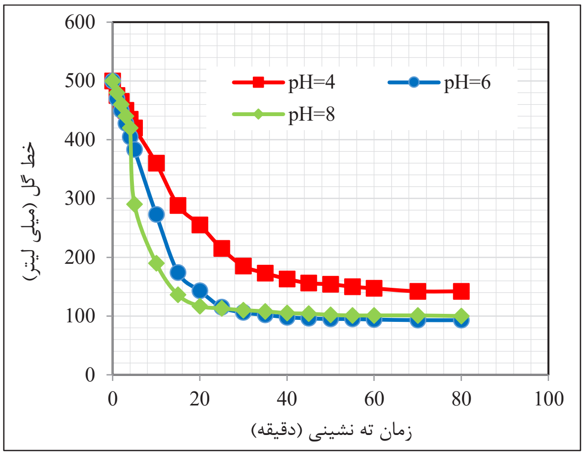
نوع آب	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده(cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
آب مقطر	۵۱٫۵۸±۰٫۴۵۷	۱٫۷۰۷±۰٫۰۱۱	۰٫۴۸۳±۰٫۰۵۱۸
آب برگشتی	۳۲٫۴۵±۰٫۴۵۷	۱٫۶۷۰±۰٫۰۱۱	۰٫۴۲۶±۰٫۰۵۱۸
آب خام	۲۴٫۴۲±۰٫۴۵۷	۱٫۶۵۰±۰٫۰۱۱	۰٫۴۳۸±۰٫۰۵۱۸

جدول ۸: نتایج آزمایش تاثیر pH بر روی ته‌نشینی ذرات

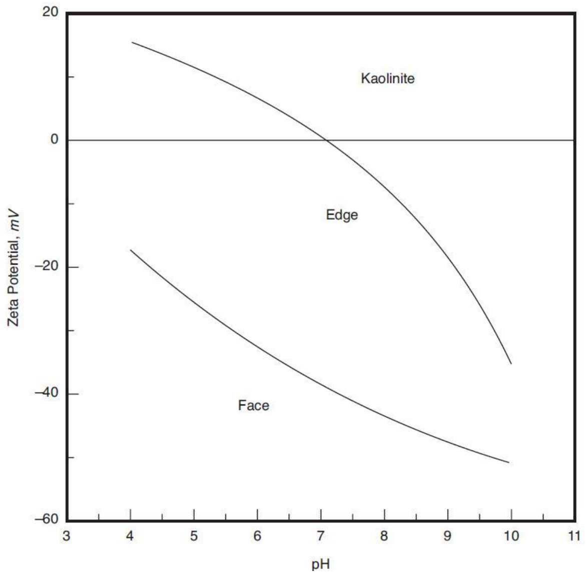
pH	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
۴	۵٫۰۳۵±۰٫۴۵۷	۱٫۴۳۳±۰٫۰۱۱	۰٫۶۸۲±۰٫۰۵۱۸
۶	۳٫۶۹±۰٫۴۵۷	۱٫۵۸۱±۰٫۰۱۱	۱٫۰۸۷±۰٫۰۵۱۸
۸	۵٫۳±۰٫۴۵۷	۱٫۶۱۴±۰٫۰۱۱	۱٫۳۹±۰٫۰۵۱۸

دلیل جانشینی شبکه‌ای یون‌ها، همواره منفی بوده ولی بار لبه وابسته به pH است. علاوه بر توضیحات داده شده، با اضافه کردن یون‌هایی مانند کلسیم به محیط پالپ، دو لایه الکتریکی متراکم‌تر می‌شود که این مساله با افزایش pH گزارش شده است [۱۶]. شکل ۱۳ تغیرات پتانسیل زتای سطح و لبه کانی کائولینیت را نشان می‌دهد.

با توجه به نحوه ساختارهای پیش‌بینی شده در شرایط اسیدی آب منفذی بین ذرات بیشتر بوده و حجم بخش ته‌نشین شده نسبت به شرایط قلیایی بالاست. نکته مهم و قابل توجه در این آزمایش شفافیت آب بخش زلال است.



شکل ۱۲: تاثیر pH بر روی ته‌نشینی ذرات



شکل ۱۳: تغییرات پتانسیل زتای سطوح کائولینیت با pH [۲۲]

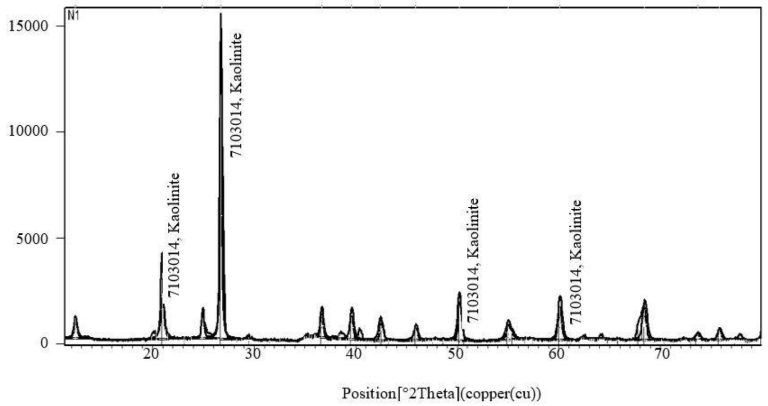
اگر آب بخش زلال در شکل ۱۴ مشاهده شود بعد از گذشت ۶۰ دقیقه مشخص است که کدورت آب در pH اسیدی نسبت به pH قلیایی کمتر می‌شود. با توجه به اینکه آب بخش زلال حاوی ذرات معلق بود، به جهت شناسایی این ذرات بعد از جمع‌آوری نمونه، آنالیزهای مورد نیاز بر روی نمونه صورت گرفت. آنالیز دانه‌بندی با استفاده از دستگاه سده‌گراف انجام گرفت.

شکل ۱۴: مقایسه شفافیت آب بخش جدا شده در pH=۴ (سمت چپ) و در pH=۸ (سمت راست) (دما ۲۵ °C ، درصد جامد ۲۵٪، آب برگشتی)

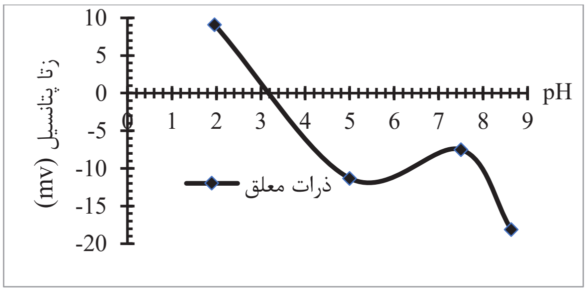
با توجه به ریز بودن ابعاد ذرات، مدت زمان زیادی برای ته‌نشینی لازم است، بنابراین باید با استفاده از روش‌های لخته‌سازی به همراه تنظیم pH محیط، این ذرات از آب بخش زلال جدا شوند. نتایج آنالیز در جدول ۹ نشان می‌دهد که عناصر تشکیل‌دهنده ذرات معلق نیز بیشتر سیلیس و اکسید آلومینیم است. اگر اکسید آلومینیم موجود در آنالیز به طور کامل به کانی کائولینیت مربوط شود، می‌توان گفت که حدود ۳۹٪ از ذرات معلق را کائولینیت تشکیل می‌دهد. نتایج آنالیز XRD در حالت نرمال در شکل ۱۵، کانی‌های تشکیل‌دهنده ذرات معلق را نشان می‌دهد.

جدول ۹: آنالیز شیمیایی ذرات معلق در بخش زلال

نام جزء	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	SiO_2	L.O.I
معلق	۰/۳۹	۱/۳۸	۱۵/۳۲	۷۵/۱۵	۷/۷۶
خوراک	۰/۳۵	۰/۲۳	۱۱/۲۶	۸۲/۴۵	۵/۷۱



شکل ۱۵: آنالیز XRD ذرات معلق در بخش زلال



شکل ۱۶: زتاپتانسیل اندازه‌گیری شده بخش ذرات معلق

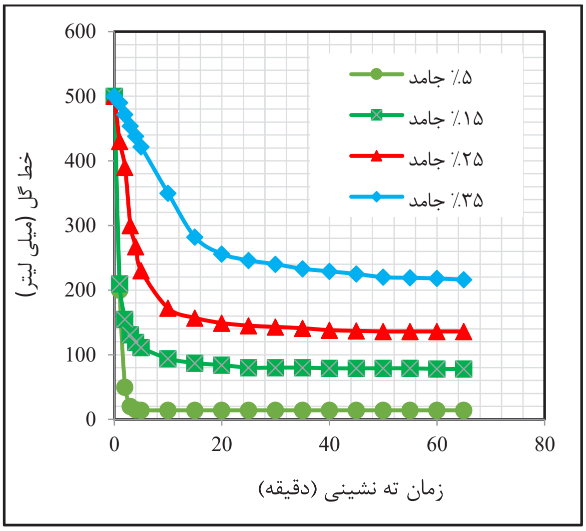
از نمودار زتا پتانسیل ذرات معلق در شکل ۱۶ و در شکل ۱۳ مشخص است که در محیط‌های قلیایی با توجه به بار منفی سطح ذرات معلق که عمدتا کوارتز و کائولینیت است، نیروهای دافعه نیروی غالب بوده و باعث تعلیق و کاهش شفافیت آب می‌شوند. در این شرایط با توجه به دانه‌بندی ذرات معلق که ۵۵٪ ذرات ریزتر از ۱۰ میکرون هستند، نیروی‌های دافعه بارهای منفی سطح ذرات بر نیروی وزن ذرات غلبه می‌کند و مانع از ته‌نشینی ذرات ریز می‌شود، ولی در pHهای اسیدی، با توجه به بار مثبت لبه‌ها و بار منفی سطح کائولینیت، ساختارهای اتصال لبه- سطح غالب بوده و باعث کوآگولاسیون ذرات ریز معلق در آب شده و شفافیت آب را افزایش می‌دهد [۲۲].

بر اساس پتانسیل زتای اندازه‌گیری شده بخش ذرات معلق که برابر با ۳٫۲ میلی‌ولت است آزمایش ته‌نشینی در نزدیک این نقطه (pH=۴) بیشترین مقدار شفافیت آب یا کمترین کدورت را نشان می‌دهد. با توجه به دو روش کلی که برای افزایش سرعت ته‌نشینی در غیاب فلوکولانت عنوان شد، به نظر می‌رسد که تنظیم pH به محدوده زتا پتانسیل، بیشتر برای ذرات خیلی ریز مشهود است. البته تحلیل بیشتر این بخش به آزمایش‌های تکمیلی و کار تحقیقاتی مفصل‌تر نیاز دارد.

۴-۵- تاثیر درصد جامد با مقدار ثابت فلوکولانت در ته‌نشینی

نتایج ته‌نشینی ذرات جامد باطله در درصدهای جامد مختلف در حضور ۱ گرم بر تن فلوکولانت بسفلاک[10] در شکل ۱۷ و جدول ۱۰ نشان داده شده است.

چنانچه از نتایج مشهود است سرعت ته‌نشینی در پالپ رقیق در وجود فلوکولانت به شدت بالاست. نتایج تحقیقات آلکس و بحری[11] نشان می‌دهد که با توجه به پایین بودن درصد



شکل ۱۷: سرعت ته‌نشینی ذرات در درصدهای مختلف جامد (مقدارفلوکولانت ۱ g/ton، دما ۲۵ °C درصد جامد ۲۰٪، pH=۷٫۵ فلوکولانت نوع بسفلاک، آب برگشتی)

جدول ۱۰: پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش تاثیر درصد جامد پالپ با فلوکولانت در سرعت ته‌نشینی

درصد جامد (٪)	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	دانسیته بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
۵	*	*	**۱۳٫۳±۰٫۴۳۶**
۱۵	۱۲٫۵۴±۰٫۴۵۷	۱٫۵۸۴±۰٫۰۱۱	۸٫۲۲±۰٫۲۷
۲۵	۲۱٫۴۱±۰٫۴۵۷	۱٫۶۶۷±۰٫۰۱۱	۲٫۷۷±۰٫۰۹۱
۳۵	۵٫۵۶±۰٫۴۵۷	۱٫۶۲۳±۰٫۰۱۱	۰٫۷۷۱±۰٫۰۲۵

جامد در پالپ، سقوط ذرات ممکن است به صورت آزاد باشد. از طرفی تشکیل لخته در ابعاد بزرگتر، باعث سقوط سریع ذرات و افزایش سرعت ته‌نشینی می‌شود. افزایش درصد جامد پالپ موجب کاهش اندازه لخته‌های تشکیل شده و کاهش سرعت ته‌نشینی می‌شود. همچنین در درصدهای جامد بالا، افزایش ویسکوزیته سیال به اتلاف انرژی حین لخته‌سازی و افزایش ضریب شکست منجر شده و در نهایت تولید لخته کوچکتر صورت می‌پذیرد [۱۲].

نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد که سرعت ته‌نشینی در پالپ حاوی ۵٪ جامد برابر با ۱۳٫۳ سانتی‌متر در دقیقه است و سرعت ته‌نشینی در پالپ ۳۵٪ به ۰٫۷۷۱ سانتی‌متر در دقیقه می‌رسد که ممکن است مربوط به تاثیر تبدیل شرایط سقوط آزاد به سقوط با مانع باشد. از نتایج سرعت ته‌نشینی ذرات مشخص است که تاثیر ویسکوزیته و وجود فلوکولانت در پالپ با درصد جامد کم، به طور قابل توجهی در ته‌نشینی ذرات موثر است. همان‌طور که در شکل ۱۷ برای پالپ با ۳۵٪ جامد، مشخص است سرعت ته‌نشینی به طرز چشمگیری کاهش داشته است که به احتمال زیاد به دلیل سقوط با مانع ذرات، ویسکوزیته بالای سیال و اشغال شدن محیط سیال به وسیله ذرات و با تشکیل لخته‌ها است. اگر یک پالپ با درصد جامد بالا مد نظر باشد، در لحظه اول اضافه شدن فلوکولانت ابتدا ذراتی که در مسیر و در تیررس زنجیرها قرار دارند به زنجیر متصل می‌شوند.

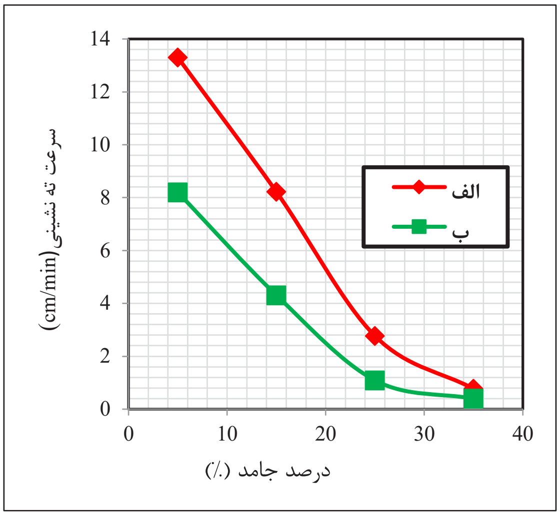
برخی ذرات جذب نشده حین سقوط لخته ما بین لخته‌ها به دام افتاده و به طرف پایین سقوط می‌کنند.

افزایش چگالی پالپ موجب بالا رفتن مقاومت پالپ در مقابل اغتشاش می‌شود. زمانی که لخته‌ها در اثر افزایش اغتشاش در محیط می‌شکنند، پلیمرهای جدا شده می‌توانند دوباره لخته‌هایی را ایجاد کنند و دوباره روی سطح مشابه جذب شوند. در پالپ‌هایی با چگالی بالا، لخته‌ها به صورت شبکه‌ای تشکیل می‌شوند که به طور نسبی نرخ ته‌نشینی را کاهش می‌دهد [۱۱].

از طرفی با توجه به شکل ۱۸ مشخص است که در صورت استفاده از مقدار یک گرم بر تن فلوکولانت، مقدار ذرات معلق در پالپ با درصد جامد بالا، نسبت به پالپ با درصد جامد کم، خیلی کم است. به عبارتی شفافیت آب در درصدهای جامد بالا، بیشتر است. این رفتار ممکن است به این دلیل باشد که در اثر تجمع و اتصال لخته‌ها در پالپ با درصد جامد بالا حین سقوط به عنوان یک فیلتر عمل کرده و سطح استوانه را به طور کامل اشغال می‌کند و ذرات ریز را در طول مسیر، یا جذب کرده یا باعث گیر کردن ذرات در بین لخته‌ها می‌شود که موجب شفاف شدن آب بخش زلال می‌شود [۵]. یعنی هرچقدر درصد جامد بیشتر باشد فیلتر تشکیل شده، ذرات بیشتری را ته‌نشین می‌کند که نتایج کدورت آب با نظریه سن‌گوپا[۱۲] و همکارانش مطابقت دارد [۱۰]. این اتفاق را می‌توان با مقایسه شفافیت آب بخش ته‌نشین نشده مشاهده کرد. با مقایسه تصویر آب بخش جدا شده استوانه‌ها، بعد از گذشت ۶۰ دقیقه ته‌نشینی در شکل ۱۸، در دو پالپ حاوی ۵ و ۳۵ درصد جامد که شفافیت پالپ ۳۵٪ بیشتر از ۵٪ است را نشان داد. برای مشخص شدن تاثیر فلوکولانت در ته‌نشینی ذرات، سرعت ته‌نشینی ذرات در دو حالت با فلوکولانت و بدون فلوکولانت در درصدهای مختلف جامد مقایسه شد.

شکل ۱۸: الف) مقایسه شفافیت نسبی آب بخش زلال در دو پالپ ۵٪ جامد (راست) و ۳۰٪ جامد (چپ). (مقدار فلوکولانت ۱ g/ton، دما ۲۵ °C، pH=۷٫۵، فلوکولانت نوع بسفلاک، آب برگشتی)، ب) تاثیر درصد جامد پالپ در جمع‌کنندگی ذرات در پالپ ۵٪ جامد (راست) و ۳۵٪جامد (چپ) (مقدارفلوکولانت ۱ g/ton، دما ۲۵ °C، pH=۷٫۵، فلوکولانت نوع بسفلاک، آب برگشتی)

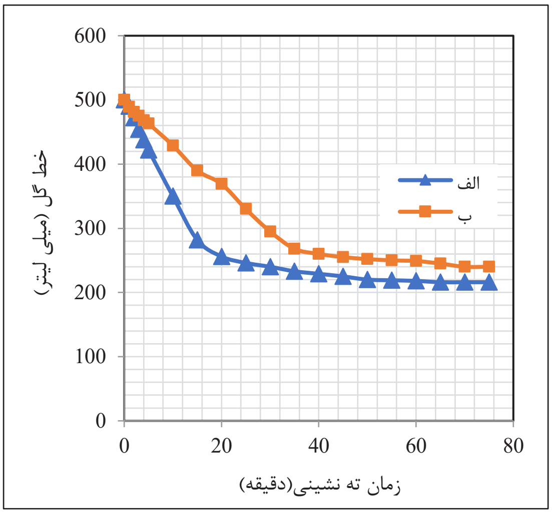
شکل ۱۹ نشان می‌دهد که در مقدار ثابت فلوکولانت (g/ton1)، با افزایش درصد جامد سرعت ته‌نشینی کاهش می‌یابد. این پدیده بیانگر سقوط با مانع ذرات در پالپ با درصد جامد بالا است که به جهت بیشتر شدن تعداد لخته‌ها و ذرات، سرعت ته‌نشینی کاهش می‌یابد و ذرات به راحتی ته‌نشین نمی‌شوند.



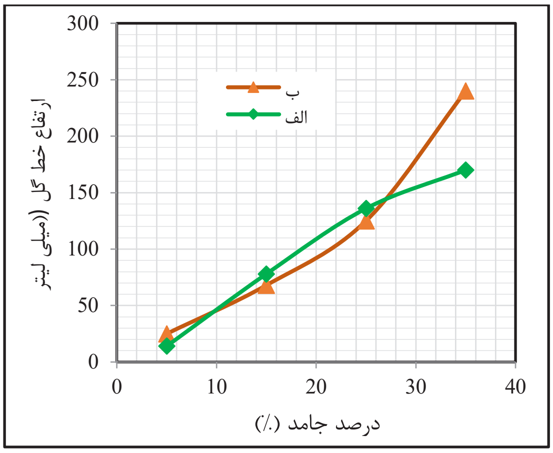
شکل ۱۹: تاثیر درصد جامد بر سرعت ته‌نشینی ذرات الف) با فلوکولانت (مقدارفلوکولانت g/ton ۱، فلوکولانت نوع بسفلاک) و ب) بدون فلوکولانت (دما C° ۲۵، pH=۷٫۵ آب برگشتی)

اگر اختلاف بین سرعت ته‌نشینی ذرات در شرایط با فلوکولانت و بدون فلوکولانت در درصدهای مختلف جامد بررسی شود مشاهده می‌شود که اختلاف سرعت در درصد جامد ۵٪ برابر با ۵ سانتی‌متر در دقیقه است که اختلاف سرعت ته‌نشینی با افزایش درصد جامد کاهش می‌یابد به طوری که در درصد جامد ۳۵٪ این اختلاف به ۰٫۳۷۵ می‌رسد.

با توجه به نمودار ته‌نشینی پالپ حاوی ۳۵٪ جامد در شکل ۲۰ مشخص است که تراکم و چسبندگی ذرات در پالپ ته‌نشین شده در حالت با فلوکولانت در درصد جامد ۳۵٪ نسبت به حالت بدون فلوکولانت بیشتر است، به طوری که بعد از ۷۵ دقیقه ته‌نشینی ارتفاع خط گل در حالت با فلوکولانت ۲۱۶ میلی‌لیتر و در پالپ بدون فلوکولانت ۲۴۰ میلی‌لیتر است که در شکل ۲۱ نشان داده شده است. یعنی به خاطر نیروی وزن ذرات و لخته‌ها پالپ متراکمی ایجاد شده است که احتمال دارد، زنجیرها به طور کامل از ذرات پر شده باشند و حالت پل‌زدگی بین لخته‌ها از بین رفته باشد.



شکل ۲۰: ته‌نشینی ذرات در پالپ حاوی ۳۵٪ جامد در شرایط الف) با فلوکولانت (مقدارفلوکولانت g/ton ۱، فلوکولانت نوع بسفلاک) و ب) بدون فلوکولانت (دما C° ۲۵، pH=۷٫۵، آب برگشتی)



شکل ۲۱: ارتفاع خط گل در انتهای آزمایش ته‌نشینی در درصدهای مختلف جامد الف) با فلوکولانت (مقدارفلوکولانت g/ton ۱، فلوکولانت نوع بسفلاک) و ب) بدون فلوکولانت (دما C° ۲۵، آب برگشتی، pH=۷٫۵)

۴-۶- تاثیر مقدار فلوکولانت در سرعت ته‌نشینی ذرات

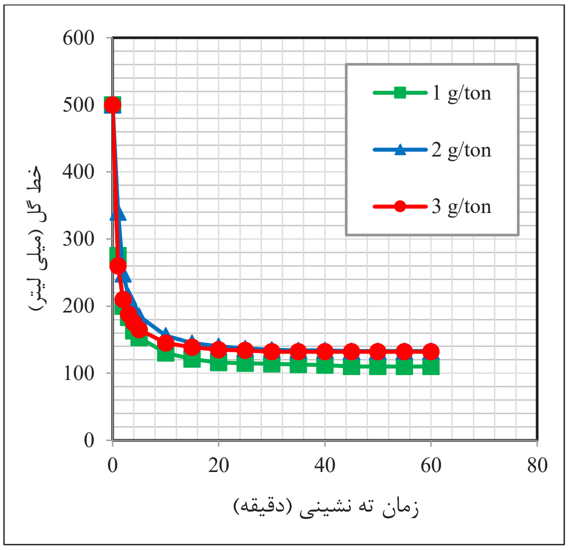
شکل ۲۲ و جدول ۱۱ نتایج ته‌نشینی پالپ باطله را در سه مقدار ۱، ۲ و ۳ گرم بر تن را نشان می‌دهد. استفاده از فلوکولانت سرعت اولیه ته‌نشینی ذرات تا ۶ برابر افزایش داده است و بر اساس نتایج حاصل اختلاف معناداری در سرعت ته‌نشینی سه مقدار فلوکولانت انتخابی قابل مشاهده نیست. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که فلوکولانت در سرعت

تەنشینی ذرات موثر است [۲۳]، ولی مقدار فلوکولانت مصرفی در محدوده انتخاب شده تاثیر بسزایی در تەنشینی ندارد. با بررسی چگالی و ویسکوزیته پالپ بعد از ۶۰ دقیقه تەنشینی می‌توان عنوان کرد که با افزایش مقدار فلوکولانت از یک گرم بر تن به ۳ گرم بر تن چگالی و ویسکوزیته پالپ بخش تەنشین شده کاهش یافته است.

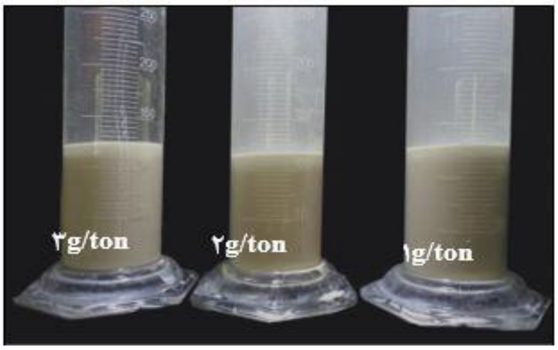
آلکس و همکارانش به این نتیجه رسیدند که در مقدار مصرف زیاد فلوکولانت، اندازه ذرات و پل شدن ذرات افزایش می‌یابد که باعث تولید ذره قوی شده و شکنندگی لخته را کاهش می‌دهد [۱۲].

پل‌زدن لخته‌ها باعث می‌شود که بخشی از آب در بین لخته‌ها به تله بیفتد و باعث کاهش چگالی پالپ شود [۱۳].

بعد از ۶۰ دقیقه تەنشینی مشخص است که با افزایش مقدار فلوکولانت که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، شفافیت نسبی آب افزایش می‌یابد. ممکن است دلیل این پدیده به جهت بیشتر بودن ظرفیت زنجیرهای فلوکولانت باشد که همه ذرات را اعم از ریز و کلوئیدی را جمع می‌کند، ولی در حالتی که مقدار فلوکولانت کم است با ظرفیت محدود جذب، صرفا ذرات درشت را جذب می‌کند [۲۲].



شکل ۲۲: تەنشینی ذرات در مقدار متفاوت فلوکولانت (دما ۲۵ °C، درصد جامد ۲۰٪ فلوکولانت نوع بسفلاک، pH=۷٫۵، آب برگشتی)



شکل ۲۳: تاثیر مقدار فلوکولانت در شفافیت آب جدا شده از پالپ (دما ۲۵ °C، درصدجامد ۲۰٪ ، مقدار محلول ۲۰سی‌سی، فلوکولانت نوع بسفلاک، pH=۷٫۵، آب برگشتی)

۴-۷- تاثیر دور همزنی و مدت زمان همزنی بعد از افزودن فلوکولانت در سرعت تەنشینی

۴-۷-۱- تاثیر دور همزنی در سرعت تەنشینی ذرات جامد در پالپ

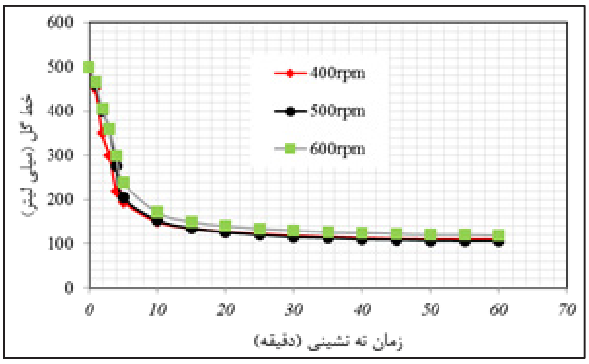
با توجه به شکل ۲۴ و جدول ۱۲ با بررسی سرعت تەنشینی در حالت بدون و با همزنی مشخص است که همزنی در دورهای تعریف شده به شدت سرعت تەنشینی را کاهش می‌دهد، به طوری که سرعت تەنشینی در حالت بدون همزنی ۵٫۷ سانتی‌متر در دقیقه است، در حالی که سرعت تەنشینی در بهترین حالت همزنی برابر با ۳٫۵۹ سانتی‌متر در دقیقه است. احتمال دارد که لخته‌ها و توده‌های تشکیل شده شکسته شود و موجب ریز شدن اندازه لخته‌ها شود که باعث کاهش سرعت سقوط لخته‌ها و ذرات می‌شود.

جدول ۱۱: نتایج آزمایش تەنشینی با مقدار متفاوت فلوکولانت

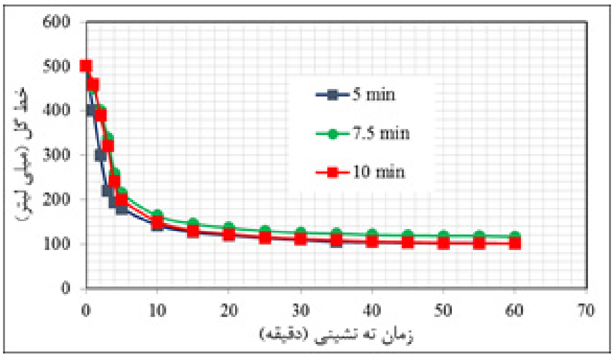
مقدار فلوکولانت (g/ton)	ویسکوزیته بخش تەنشین شده (cs)	دانسیته بخش تەنشین شده (g/cm^3)	سرعت تەنشینی (cm/min)
۱	۱۳٫۶۱±۰٫۴۵۷	۱٫۶۰۱±۰٫۰۱۱	۷٫۷۱±۰٫۲۴۸
۲	۱۳٫۵۳±۰٫۴۵۷	۱٫۵۵۷±۰٫۰۱۱	۶٫۶۸±۰٫۲۴۸
۳	۳٫۹۶±۰٫۴۵۷	۱٫۴۹۲±۰٫۰۱۱	۷٫۱۹±۰٫۲۴۸
بدون فلوکولانت	۱۵٫۰۷±۰٫۴۵۷	۱٫۶۲۸±۰٫۰۱۱	۱٫۲۵±۰٫۰۵۱۸

جدول ۱۲: نتایج آزمایش تاثیر دور همزنی در سرعت ته‌نشینی

سرعت همزنی (rpm)	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
بدون‌همزنی	۱۲٫۲۹±۰٫۴۵۷	۱٫۵۶۰±۰٫۰۱۱	۵٫۷±۰٫۰۵۱۸
۴۰۰	۱۰٫۹۷±۰٫۴۵۷	۱٫۶۱۴±۰٫۰۱۱	۳٫۵۹±۰٫۲۴۸
۵۰۰	۱۱٫۱۳±۰٫۴۵۷	۱٫۶۱۵±۰٫۰۱۱	۳٫۰۸±۰٫۲۴۸
۶۰۰	۱۱٫۰۵±۰٫۴۵۷	۱٫۶۱۷±۰٫۰۱۱	۲٫۶۷±۰٫۲۴۸



شکل ۲۴: سرعت ته‌نشینی ذرات در دورهای مختلف همزنی (درصد جامد ۲۰٪، مقدار فلوکولانت ۱ g/ton و دما °C ۲۵، pH=۷٫۵ آب برگشتی)



شکل ۲۵: سرعت ته‌نشینی ذرات در مدت همزنی (درصد جامد ۲۰٪، مقدارفلوکولانت ۱ g/ton و دمای °C ۲۵، pH=۷٫۵ آب برگشتی)

جدول ۱۳: نتایج آزمایش تاثیر مدت همزنی در سرعت ته‌نشینی

مدت همزنی (min)	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
بدون همزنی	۱۲٫۲۹±۰٫۴۵۷	۱٫۵۶۰±۰٫۰۱۱	۵٫۷±۰٫۰۵۱۸
۵	۲۱٫۴۱±۰٫۴۵۷	۱٫۶۶۵±۰٫۰۱۱	۴٫۶±۰٫۲۴۸
۷:۳۰	۱۵٫۷۹±۰٫۴۵۷	۱٫۶۰۷±۰٫۰۱۱	۳٫۴۵±۰٫۲۴۸
۱۰	۶٫۸±۰٫۴۵۷	۱٫۶±۰٫۰۱۱	۳٫۲۸±۰٫۲۴۸

سرعت ته‌نشینی ذرات نشان می‌دهد که با افزایش دور همزنی از ۴۰۰ دور در دقیقه به ۶۰۰ دور در دقیقه سرعت ته‌نشینی اولیه ذرات از ۳٫۵۹ به ۲٫۶۷ سانتی‌متر بر دقیقه کاهش می‌یابد.

اگر این آزمایش از نظر چگالی پالپ ته‌نشین شده بررسی شود چگالی هرسه آزمون با همزنی تقریبا یکسان و برابر با ۱٫۶۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و اختلاف در محدوده خطا قرار دارد ولی در آزمون بدون همزنی چگالی پالپ بعد از ته‌نشینی برابر با ۱٫۵۶۰ است. دلیل آن، ممکن است شکستگی و ریز شدن لخته‌ها باشد. در شرایط همزنی به جهت شکسته شدن لخته‌ها، فضای خالی بین لخته‌ها کاهش می‌یابد، یعنی لخته‌های تولید شده در این حالت تراکم بالایی دارند [۵].

۴-۷-۲- تاثیر مدت همزنی در ته‌نشینی ذرات جامد در پالپ

در این آزمایش با تغییر مدت زمان همزنی، سرعت ته‌نشینی زمانی که دور همزنی ثابت است بررسی می‌شود.

با توجه به اطلاعات حاصل از شکل ۲۵ و جدول ۱۳ چنین بر می‌آید که در مدت ۵ دقیقه همزنی، هم سرعت ته‌نشینی (۴٫۶ سانتی‌متر در دقیقه) و هم تراکم پالپ در بخش ته‌نشین شده نسبت به دو سطح بعدی همزنی بیشتر است.

با توجه به جدول ۱۳ در مقایسه با حالت همزنی و بدون همزنی مشخص است که در شرایط بدون همزنی سرعت

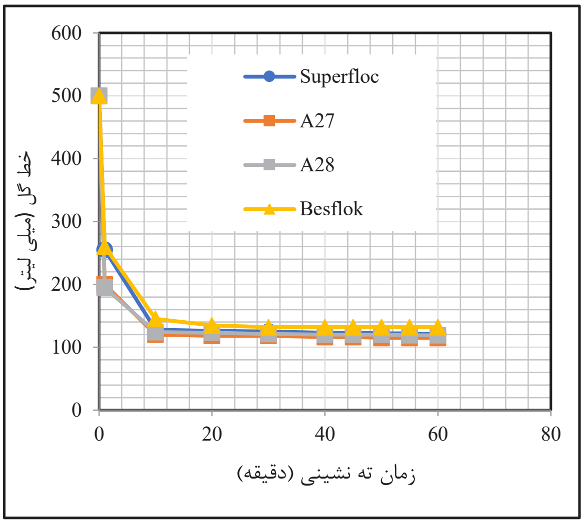
ته‌نشینی (۵٫۷ سانتی‌متر در دقیقه) بیشتر است که تاثیر منفی همزنی پالپ بر سرعت ته‌نشینی بعد از افزودن فلوکولانت را نشان می‌دهد.

۴-۸- تاثیر نوع فلوکولانت در نرخ ته‌نشینی ذرات

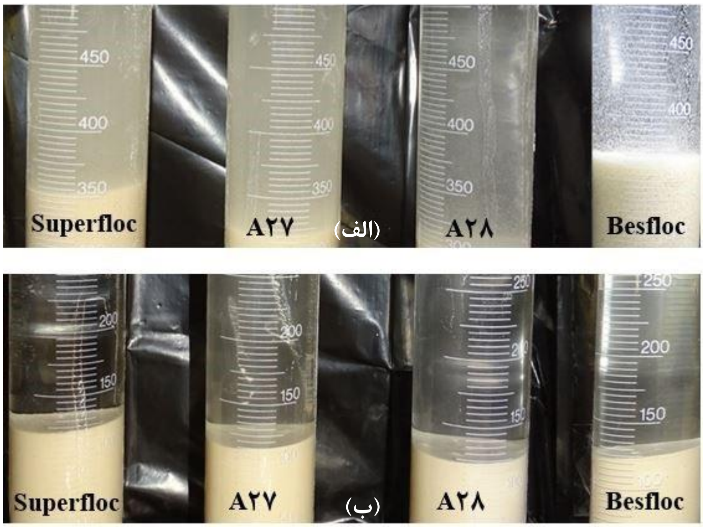
نتایج این بررسی در شکل ۲۶ نشان می‌دهد که سرعت ته‌نشینی در فلوکولانت A۲۷ و A۲۸ بیشتر از بقیه به ترتیب برابر با ۱۴٫۳ و ۱۴٫۱ سانتی‌متر در دقیقه است. از نظر چگالی هم نوع سوپرفلاک[۱۳] و A۲۷ با چگالی ۱٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب نسبت به نوع بسفلاک بیشتر است. در حالی که چنانچه شفافیت آب در ثانیه‌های اولیه بررسی شود که در شکل ۲۷-الف مشخص است شفافیت نسبی آب با فلوکولانت نوع بسفلاک بیشتر از سایر فلوکولانت‌ها است که این مساله در زلال بودن آب سرریز تیکنرها بسیار حایز اهمیت است.

با توجه به جدول ۱۴ که وزن مولکولی انواع فلوکولانت مصرفی بیان شده است چنین نتیجه می‌شود که شفافیت نسبی در بخش آب باقیمانده به وسیله فلوکولانت بسفلاک و A۲۸ در لحظه اول، ممکن است نتیجه بالا بودن جرم مولکولی فلوکولانت باشد، به طوری که وزن مولکولی بسفلاک، ۸ تا ۲۴ میلیون‌گرم بر مول با بالاترین مقدار و بعد از آن A۲۸ با وزن مولکولی ۲۰ تا ۲۲ هزارگرم بر مول که سبب جذب ذرات ریز و کلوییدی به وسیله زنجیرهای فلوکولانت شده و موجب شفافیت آب می‌شود. لازم به ذکر است که پس از مدت زمان چهل دقیقه از ته‌نشینی، شفافیت آب هر چهار نوع فلوکولانت مصرفی مشابه هم است.

با توجه به اینکه فلوکولانت‌های آنیونی با وزن مولکولی و یونیزاسیون بالا (با بار متراکم) باعث تولید لخته‌های بزرگ برای ته‌نشینی به حساب می‌آیند، اما یک فلوکولانت آنیونی که درجه یونیزاسیون پایین در شفاف‌سازی آب بخش باقیمانده موثرتر دارد فلوکولانت‌های آنیونی که دارای وزن مولکولی بالایی‌اند،



شکل ۲۶: سرعت ته‌نشینی ذرات در فلوکولانت‌های مختلف (مقدار فلوکولانت g/ton ۳ دما °C ۲۵، درصد جامد۲۰٪، pH=۷٫۵، آب برگشتی)



شکل ۲۷: مقایسه شفافیت نسبی آب بخش باقیمانده در آزمایش انواع فلوکولانت الف) قبل از یک دقیقه و ب) بعد از چهل دقیقه (مقدار فلوکولانت g/ton ۳ دما °C ۲۵، درصد جامد۲۰٪، pH=۷٫۵، آب برگشتی)

جدول ۱۴: نتایج آزمایش ته‌نشینی مربوط به نوع فلوکولانت مصرفی

فلوکولانت	جرم مولکولی	ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده (cs)	چگالی بخش ته‌نشین شده (g/cm^3)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
سوپرفلاک	۱۰ تا ۱۵ هزار	۱۳٫۲۸±۰٫۴۵۷	۱٫۶۰۶±۰٫۰۱۱	۱۱٫۹۴±۰٫۴۲۸
A۲۷	۱۸ تا ۲۰ هزار	۱۷٫۵۴±۰٫۴۵۷	۱٫۶۰۱±۰٫۰۱۱	۱۴٫۳±۰٫۴۲۸
A۲۸	۲۰ تا ۲۲ هزار	۹٫۱۱±۰٫۴۵۷	۱٫۵۸۵±۰٫۰۱۱	۱۴٫۱±۰٫۴۲۸
بسفلاک	۸ تا ۲۴ ملیون	۳٫۹۶±۰٫۴۵۷	۱٫۴۹۲±۰٫۰۱۱	۱۳٫۳۱±۰٫۴۲۸

پل‌هایی را در بین ذرات، از طریق پیوندهای هیدروژن و یا شیمیایی تشکیل می‌دهند و بر روی سطوح جذب می‌شوند [۲۴،۴].

۴- نتیجه‌گیری

نمونه‌برداری نشان داد که چگالی پالپ به طور متوسط در محدوده ۱٫۲۳۵ تا ۱٫۲۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. با توجه به نتایج آنالیزها، بخش عمده باطله را سیلیس تشکیل می‌دهد که از نوع کوارتز است که کانی‌های کائولینیت و به صورت جزیی کانی کلسیت را همراه دارد. نتایج آنالیز ICP نشان می‌دهد که کلسیم، منیزیم و نمک در آب خام و آب برگشتی وجود دارد. نتایج تاثیر دما نشان می‌دهد که با افزایش دما سرعت ته‌نشینی اولیه نیز افزایش یافت. با افزایش میزان فلوکولانت، شفافیت آب، به دلیل امکان ته‌نشینی ذرات نرمه معلق در آب، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. در وجود فلوکولانت، با افزایش درصد جامد، شفافیت آب بالاتر بود.

سرعت ته‌نشینی در pH اسیدی کمتر از pH قلیایی است که بار سطح ذرات تاثیر با اهمیتی در سرعت ته‌نشینی دارند. با انجام آزمایش ته‌نشینی در مقادیر مختلف فلوکولانت، سرعت ته‌نشینی در پالپ بدون فلوکولانت کمتر از پالپ حاوی فلوکولانت به دست آمد. با افزایش دور و زمان همزنی سرعت ته‌نشینی ذرات افت می‌کند. نوع فلوکولانت با جرم مولکولی متفاوت در حجم و ویسکوزیته بخش ته‌نشین شده و نیز شفافیت آب تاثیر دارد. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که ویسکوریته پالپ ته‌نشین شده در پالپ حاوی ذرات زیر افزایش و در پالپ حاوی ذرات با ابعاد درشت‌تر کاهش داشت. ویسکوزیته پالپ با افزایش دما و درصد جامد افزایش یافت. چگالی پالپ با افزایش ابعاد ذرات و pH پالپ افزایش داشت.

با مطالعات انجام گرفته و انجام آزمایش‌ها می‌توان با استفاده از تیکنر بخش عمده آب را در شرایط بهینه به دست آمده از آزمایش‌ها برگشت داد.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان، مراتب تشکر و سپاسگزاری خود را از مدیرعامل و مدیر محترم واحد تحقیقات و کنترل کیفی شرکت صنایع خاک چینی ایران را دارند.

۶- مراجع

[۱] نعمت اللهی، ح.؛ ۱۳۸۴؛ "**کانه آرایی جلد اول و جلد دوم**". انتشارات دانشگاه تهران، تهران، دوره دوم، ص ۸۶۵-۸۶۱.

[۲] بهمنی قاعدی، ع.، سام، ع.، اله دینی، ح.؛ ۱۳۹۱؛ "**بررسی پارامترهای موثر بر سرعت ته نشینی و تعیین شرایط بهینه برای ته نشینی ذرات در تیکنر**". فصلنامه پژوهشی پژوهشگر، شماره۴، ص ۳۱-۲۷.

[3] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2016). *"Wills' Mineral Processing Technology"*. 8th Edition, Elsevier, Canada, Chapter 15, 417-439.

[4] Oruç, F., and Sabah, E. (2006). *"Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings"*. IMPC 2006, Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress, 1192-1197.

[5] Sengupta, D. K., Kan, J., Al Taweel, A. M., and Hamza, H. A. (1997). *"Dependence of separation properties on flocculation dynamics of kaolinite suspension"*. International Journal of Mineral Processing, 49: 73-85.

[6] O'Shea, J. P., Qiao, G. G., and Franks, G. V. (2010). *"Solid–liquid separations with a temperature-responsive polymeric flocculant: Effect of temperature and molecular weight on polymer adsorption and deposition"*. Journal of Colloid and Interface Science, 348: 9-23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.04.063.

[۷] آقاجانی، ع.، سلطانی گوهرریزی، ع.، ابراهیم زاده قشلاقی، م.؛ ۱۳۹۰؛ "**بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند جداسازی جامد – مایع در تیکنر آزمایشگاهی مجتمع مس سرچشمه**". نشریه علوم و مهندسی جداسازی دوره سوم، شماره دوم، ص ۵۶-۴۳.

[8] Feng, B., Penga, J., Zhua, X., and Huang, W. (2016). *"The*

settling behavior of quartz using chitosan as flocculant". Journal of Materials Research and Technology, 6(1): 71-76. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.09.004.

[9] Griot, O., and Kitchener, J. A. (1965). *"Role of Surface Silanol Groups in the Flocculation of Silica Suspensions by polyacrylamide"*. Transactions of the Faraday Society, 61: 1026-1031. DOI: https://doi.org/10.1039/TF9656101026.

[10] Besra, L., Sengupta, D. K., and Roy, S. K. (2000). *"Particle characteristics and their influence on dewatering of kaolin, calcite and quartz suspensions"*. International Journal of Mineral Processing, 59: 89-112.

[11] Moudgil, B. M., and shah, B. D. (1986). *"Selection of flocculant for solid liquid separation"*. Advances in Solid-Liquid Seperation, Ohio, 191-202.

[12] Heath, A. R., Bahri, P. A., Fawell, P. D., and Farrow, J. B. (2006). *"Polymer Flocculation of Calcite: Relating the Aggregate Size to the Settling Rate Wiley"*. American Institute of Chemical Engineers, 52: 1987-1994.

[۱۳] پارسافر، غ.، بنیسی، ص.؛ ۱۳۹۳؛ "**تعیین ابعاد و چگالی لخته‌های تشکیل شده در تیکنر باطله کارخانه فرآوری مگنتیت گلگهر سیرجان**". نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره نهم، شماره ۲۲، ص ۸۴-۷۵.

[14] Lin, I. J. (1989). *"The effect of seasonal variations temperature on the performance of mineral processing plants"*. Minerals Engineering, 2(1): 47-57. DOI: https://doi.org/10.1016/0892-6875(89)90064-2.

[۱۵] انتظاری، ع.؛ ۱۳۹۷؛ "**طرح انتقال گلاب باطله معدن سرب و روی کوشک**". گزارش فنی، ۱۳ صفحه.

[16] Liu, D., Edraki, M., Fawell, P., and Berry, L. (2020). *"Improved water recovery: A review of clay-rich tailings and saline water interactions"*. Powder Technology, 364: 604-621.

[17] Tombácz, E., and Szekeres, M. (2006). *"Surface charge heterogeneity of kaolinite in aqueous suspension in comparison with montmorillonite"*. Applied Clay Science, 34: 105-124.

[18] Bartoli, F., and Philippy, R. (1987). *"The colloidal stability of variable-chargemineral suspensions"*. Clay Miner, 22: 167-180.

[19] Zhao, H., Low, P. F., and Bradford, J. M. (1991). *"Effects of pH and electrolyte concentration on particle interaction in three homoionic sodium soil clay suspensions"*. Soil Science, 151(3): 196-207.

[20] Penner, D., and Lagaly, G. (2001). *"Influence of anions on the rheological properties of clay mineral dispersions"*. Applied Clay Science, 19: 131-142.

[21] Johnson, S. B., Franks, G. V., Scales, P. J., Boger, D. V., and Healy, T. W. (2000). *"Surface chemistry-rheology in concentrated mineral suspensions"*. International Journal of Mineral Processing, 58: 267-304.

[22] Wencheng, Y. L. and Guangyuan, B. W. (2019). *"Filtration and dewatering of the mixture of quartz and kaolinite in different proportions"*. Journal of Colloid and Interface Science, 555: 731-739.

[۲۳] رحمانی، م. ر.، موسوی راد، س. م.، اسکندری نسب، م.؛ ۱۳۹۳؛ "**بررسی تاثیر دوز فلوکولانت بر سرعت ته‌نشینی سوسپانسیون تیکنر باطله کارخانه کنسانتره فولاد زرند ایرانیان**". دومین همایش عملی مهندسی فرآیند، تهران.

[24] Nasser, M. S., and James, A. E. (2006). *"The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions"*. Separation and Purification Technology, 52: 241-252.

---

[1] Besra

[2] Moudgil

[3] Alex R Heath

[4] F.Oruç

[5] Sedi Graph (micromeritics 5000ET)

[6] jenway

[7] FESEM

[8] TESCAN

[9] One varible at a time

[10] Besfloc

[11] Alex R. Heath, Parisa Bahri

[12] D.K.Sengupta

[13] Superfloc