



Feasibility Study of the Potential Use of Drilling Cuttings in Concrete to Reduce Environmental Damage

Dariuosh Abdi Kohanaki¹, Alireza Lork^{2*} and Babak Amin Nejad³

1. Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran

2. Department of Civil Engineering, Safadasht Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

Alireza.lork@iaau.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4687.3103

Received: December/23/2021

Accepted: November/15/2022

Introduction

In general, the waste of industrial activities causes irreparable damage to the environment, including drilling cuttings in the oil industry, which are the most important waste of well drilling. If the drilling cuttings are not managed properly, severe soil and groundwater pollution will be caused [1,2].

For concrete structures, it is generally assumed that concrete is homogeneous, while contains various components such as cement paste, aggregate, sand and air. The existence of these components is particularly important in determining the behavior of concrete. In the initial models, concrete has two phases including aggregate and cement paste, but studies have shown the existence of a transition zone in concrete (between cement paste and aggregate). As a result, concrete should be considered as a mixture consisting of three phases, and the presence of a transition zone has a significant effect on the permeability and strength of concrete [3].

Recently, studies have shown that if concrete has high compressive strength, it will not necessarily have high durability under environmental operational conditions. In fact, for proper concrete design, both parameters of durability and compressive strength of concrete should be considered simultaneously.

Materials and Methods

The cement used for sampling is Portland cement type 1- 425 (Hegmatan). Also, Abdi sand with a modulus of 3.61, bulk density of 2.61 and water absorption of 0.5 % was used. Metosak sand with a maximum size

of 9.5 mm, bulk density of 2.63 and water absorption of 1.8 % was used. Fly ash is one of the residual by-products of pulverized coal combustion in thermal power plants, including silica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), iron oxide (Fe_2O_3) and calcium oxide (CaO).

Sampling

First, sand and cement are mixed for 5 minutes. By adding coarse aggregate, mixing is done for another 9 minutes. It should be noted that in the designs including fly ash and silica fume, it is mixed with water and then with the mixture. In general, the samples were tested in 5 categories of concrete including a control sample and 4 mixtures containing different percentages of drilling cuttings, fly ash, silica fume and a mixture of silica fume and ash. Drilling cuttings separated from the drilling site (Figure 1a) are first dried in a greenhouse at 100 °C for 24 hours and then passed through mesh 100. The concrete mixture is designed according to the American Concrete Institute (ACI).

In this study, type I Portland cement was used. Drilling cuttings and cement are completely mixed and a uniform mixture is prepared. In Figure 1(b) concrete is poured into a cylindrical mold with a height of 20 cm (8 inches) and a diameter of 10 cm (4 inches). The reported resistance values represent the mean resistance of three samples. Then, the samples were placed in water at room temperature for 7 days. The composition ratio of the components is shown in Table 1. To compensate for the lost compressive strength, different percentages of silica fume and fly ash have been added as additives to the mixture.



Fig. 1 a) Drilling shards b) Prepared concrete sample.

Table 1 Chemical analysis and physical properties of cement, fly ash and silica fume.

fly ash	Silica fume	Portland Cement	parameter
60.9	87.63	22.17	SiO ₂
3.91	0.63	5.01	Al ₂ O ₃
5.16	1.25	3.67	Fe ₂ O ₃
13.1	–	64.69	CaO
–	–	1.78	MgO
1.35	–	0.97	K ₂ O
0.96	0.91	0.51	Na ₂ O
2.67	–	2.73	SO ₃
2.39	2.69	1.36	LOI
–	–	53.96	C ₃ S
–	–	10.16	C ₂ S
–	–	7.26	C ₃ A
–	–	12.27	C ₄ AF
–	–	–	P ₂ O ₅
411	28300	326	(m ² /kg) Special Surface

Results and Discussion

In order to investigate the effect of drilling cuttings on the compressive strength of concrete samples, different amounts of drilling cuttings have been replaced with cement. Compared to the control sample, the samples containing 5, 20 and 35% of drilling cuttings reduced the compressive strength of the samples by 17, 31 and 61%, respectively. The test results showed that replacing 15, 20 and 25% of cement with drilling cuttings had no significant effect on the compressive strength of the prepared samples. In other words, use of 25% drilling cuttings reduced the compressive strength by 34%, which is reported as desired. In order to improve the compressive strength of the samples, various amounts of fly ash have been added to the concrete samples containing 25% of the drilling cuttings. Compressive strength of specimens containing different amounts of drilling logs is shown in Figure 2. In general, fly ash improves the efficiency, cohesion and final strength of samples [4, 5]. As shown in Figure 3, adding fly ash to concrete has increased the compressive strength of

the samples. In this test, different amounts of fly ash (5, 10, 15, 20 and 25%) were used. Adding 25% of fly ash to concrete samples containing 25% of drilling cuttings significantly reduces the compressive strength. In addition to saving energy, the use of fly ash improves the properties of concrete. Also, by adding fly ash, the heat of hydration of concrete reduces [6-7]. Figure 4 shows the effect of silica fume on the compressive strength of concrete samples containing 25% of drilling cuttings. Different percentages of silica fume (5, 10, 15 and 20%) have been added to the concrete samples. It should be noted that optimally adding 15% of fly ash and 5% of silica fume increases the compressive strength of the samples containing 25% of the drilling cuttings by 41 and 8%, respectively. Figure 5 shows the effect of adding fly ash/silica fume mixture to concrete samples containing 25% of drilling cuttings. As shown, by increasing the percentage of fly ash / silica fume, an increase in the compressive strength of the samples is observed. 15% of additives (5.7% fly ash / 7.5% silica fume) increases the compressive strength by 50% [8].

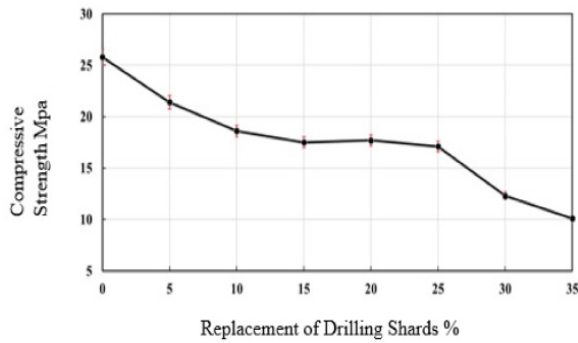


Fig. 2 Compressive strength of specimens containing different amounts of drilling logs.

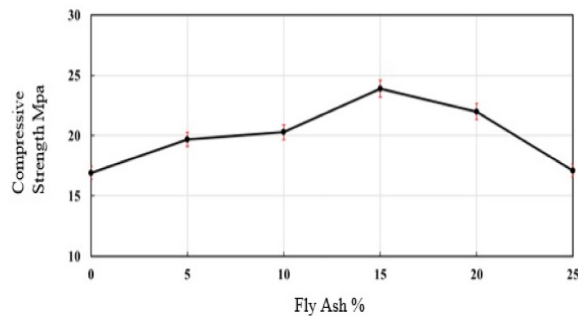


Fig. 3 Compressive strength of samples containing different amounts of fly ash.

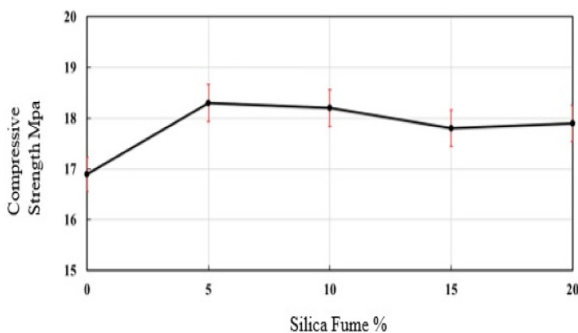


Fig. 4 Compressive strength of samples containing different amounts of silica fume.

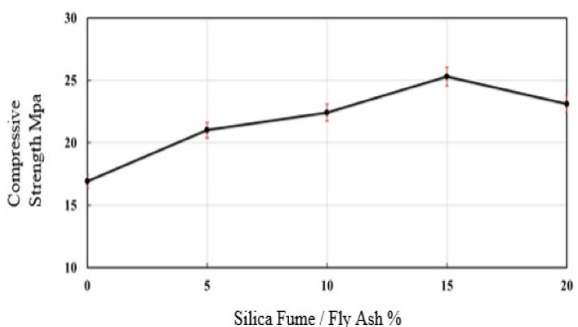


Fig. 5 Compressive strength of samples containing different amounts of a mixture of fly ash and silica fume.

Conclusions

- Use of drilling cuttings as a substitute for part of the cement in concrete led to a reduction in the compressive strength of the samples. Compared to the control samples, replacing 15, 20 and 25% of cement with

drilling cuttings, on average, reduces the compressive strength of the samples by 33%. Substituting larger amounts of cement with drilling cuttings caused a sharp drop in the resistance of the samples against pressure. Therefore, replacing 25% of cement with drilling cuttings has been reported as desired.

- Laboratory tests showed that adding 5% of silica fume increased the compressive strength of concrete samples containing 25% of drilling cuttings by 8%. However, increasing the silica fume concentration to more than 5% does not improve the compressive strength of the samples.

- According to the laboratory results, the maximum compressive strength of the samples containing 25% of the drilling cuttings was obtained from adding a mixture of fly ash and silica fume. The results showed that the addition of 7.5% of fly ash and 7.5% of silica fume increased the compressive strength of the samples by 49%.

References

1. Gbadebo A, Taiwo A Eghele U (2010) Environmental impacts of drilling mud and cutting wastes from the Igbokoda onshore oil wells, Southwestern Nigeria, *Indian Journal of Science and Technology*, 3, 5: 504-510.
2. Sharif MDA, Nagalakshmi NVR, Reddy S, Vasanth G, Sanker K (2017) Drilling waste management and control the effects, *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 7, 166: 4110-4172.
3. Ramesh G, Sotelino E D, Chen W F (1998) Effect of transition zone on elastic stresses in concrete materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10, 4: 275-282.
4. Memon A H, Radin S S, Zain M F M, Trottier J F (2002) Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, *Cement and Concrete Research*, 32, 3: 373-377.
5. Oner A D N A N, Akyuz S, Yildiz R (2005) An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, *Cement and Concrete Research*, 35, 6: 1165-1171.
6. Amnadhua K, Tangchirapat W, Jaturapitakkul, C (2013) Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash, *Materials and Design*, 51: 894-901.
7. Han F, Liu R, Wang D, Yan P (2014) Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature, *Thermochimica Acta*, 586: 52-57.
8. Heba A, Mohamed (2011) Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Zagazig University, Egypt, 279-86,

بررسی امکان استفاده از پتاسیل کنده‌های حفاری در ساخت بتن به‌منظور کاهش آسیب‌های محیط زیستی

داریوش عبدی کهنکی^۱، علیرضا لورک^{۲*} و بابک امین نژاد^۳

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

چکیده

از مهم‌ترین نگرانی‌های صنعت حفاری، کاهش اثرات منفی کنده‌های حفاری تولید شده در حین حفاری چاه‌های نفت-گاز است. رشد روزافزون صنعت نفت و افزایش حفر چاه‌های نفت و گاز منجر به تولید مقادیر زیادی از ضایعات حفاری شده است و سالانه میلیون‌ها فوت مکعب از پسماندهای حفاری تولید می‌شود به‌دلیل پیچیدگی، سرعت پایین و هزینه زیاد روش‌های مختلف به‌منظور مدیریت این پسماندها، استفاده از پتاسیل این پسماندها در بخش‌های ساختمانی توجه بسیاری از محققان را به‌خود جلب کرده است. به همین دلیل در این پژوهش، از کنده‌های حفاری در بتن به‌عنوان جایگزینی برای بخشی از سیمان مورد استفاده در صنعت ساختمان، مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. نوآوری این مطالعه فقط منحصر به تولید یک ماده جدید و مقرون به‌صرفه از کنده‌های حفاری نیست، بلکه کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی نیز است. در این مطالعه، امکان استفاده از کنده‌های حفاری از سازندهای گروه بنگستان که شامل سیلستون (siltstone) و سندستون (sandstone)، در ساخت بتن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان موجود در بتن ارزیابی شده است. برای دستیابی به این اهداف، مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین کمیت مقاومت فشاری نمونه‌های بتن انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهینه در میزان استفاده از کنده‌های حفاری ۲۵٪ است که باعث کاهش ۳۴٪ از مقاومت کلی نمونه‌های بتنی می‌شود. علاوه بر این، اثر دو افزودنی خاکستر بادی و دوده سیلیکا بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی کنده‌های حفاری بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن این مواد تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری دارد به‌طوری‌که مقاومت فشاری از دست رفته از ۳۴٪ به کمتر از ۲٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کنده‌های حفاری، بتن، خاکستر بادی، دوده سیلیس، مقاومت فشاری، مدیریت ضایعات حفاری، محیط زیست

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: Alireza.lork@iauo.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4687.3103)

مقدمه

به‌طور کلی ضایعات تولید شده از فعالیت‌های صنعتی آسیب‌های جبران ناپذیری را بر محیط زیست وارد می‌سازد که از جمله آن در صنعت نفت می‌توان به کنده‌های حفاری اشاره کرد که مهم‌ترین زباله تولید شده در هنگام حفاری چاه است. در صورتی که کنده‌های حفاری به‌درستی مدیریت نشوند باعث آلودگی شدید خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود [۱ و ۲]. ترکیب کنده‌های حفاری می‌تواند شامل ۱۵-۳۵٪ آب؛ ۷۰-۵۰٪ خرده‌های حفاری؛ ۰/۱-۰/۵٪ کلریدها؛ ۴-۶٪ فلزات سنگین؛ ۵-۷٪ افزایش‌های سیال حفاری؛ ۲-۰/۱٪ از نفت و مشتقات نفتی؛ ۱-۰/۱٪ از سایر ترکیبات. کنده‌های حفاری با داشتن عناصر مفید، یکی از نمونه ضایعاتی است که از پتانسیل بالایی برای بازیافت برخوردار است [۳-۵].

ترکیب کانی‌شناسی کنده‌های حفاری به ترکیب سنگ در حال حفاری بستگی دارد و با افزایش عمق چاه، تغییر می‌یابد [۶]. به‌طور کلی، کنده‌های حفاری مخلوطی از خرده‌های اطراف دیواره چاه و ترکیبات گل حفاری است که ممکن است به نفت نیز آلوده باشد. کنده‌های حفاری را می‌توان با استفاده از لرزاننده‌های شیلی، سانتریفیوژها و ... از سایر ترکیبات جدا ساخت [۷]. با وجود شست و شوی کنده‌های حفاری برای جلوگیری از آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، مدیریت این کنده‌ها به یک نگرانی عمده تبدیل شده است. به همین دلیل در سال‌های اخیر اهمیت پرداختن به کاربردهای بالقوه کنده‌های حفاری در صنعت ساخت افزایش یافته است [۸]. رشد روز افزون صنعت ساخت و همچنین الزام به بازسازی بافت‌های فرسوده و معابر باعث کاهش ذخایر معادن سنگ‌دانه طبیعی شده است. سالانه حدود ۲۵ میلیارد تن بتن در جهان تولید می‌شود [۹] که حجم قابل توجهی از آن بتن سبک است که در تولید مصالح ساختمانی،

جداول بتنی، کفپوش و دیگر فرآورده‌های پیش ساخته استفاده می‌شود. بررسی امکان استفاده از کنده‌های حفاری در تولید مصالح ساختمانی باعث کاهش مصرف سنگ‌دانه‌ها می‌شود. همچنین با بازیافت کنده‌های حفاری، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از دفن این مواد کاهش می‌یابد.

در بحث بررسی سازه‌های بتنی عموماً بتن ماده‌ای همگن فرض می‌شود، در حالی که بتن شامل اجزای مختلفی مانند خمیر سیمان، سنگ‌دانه شن، ماسه و هوا است. وجود این اجزا در تعیین رفتار بتن اهمیت ویژه‌ای دارد. در مدل‌های اولیه، بتن به‌صورت دو فاز شامل سنگ‌دانه و خمیر سیمان در نظر گرفته می‌شد اما تحقیقات بیانگر وجود یک ناحیه انتقالی در بتن (ناحیه بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه) است. در نتیجه بتن را باید ترکیبی متشکل از سه فاز در نظر گرفت که وجود ناحیه انتقالی اثر قابل توجهی بر نفوذپذیری و مقاومت بتن دارد [۱۰].

مطالعات اخیر بیانگر آن است که چنانچه بتنی دارای مقاومت فشاری بالایی باشد، لزوماً در شرایط محیطی بهره‌برداری از دوام بالایی نیز برخوردار نخواهد بود. در واقع، برای طراحی بتن مناسب باید هر دو پارامتر دوام و مقاومت فشاری بتن به‌طور هم‌زمان مد نظر قرار گرفته شود. با توجه به اینکه بتن مهم‌ترین و فراگیرترین ماده ساختمانی است، ضرورت ساخت این ماده بستری مناسب و جذاب را برای محققان در بررسی نقش مواد بازیافتی در بهینه‌سازی تولید و بهبود خواص مکانیکی و پایایی آن فراهم آورده است. در این پژوهش اندازه‌گیری تخلخل بر روی برش‌هایی از نمونه‌ها انجام شده است. نمونه‌ها در دمای $5 \pm ^\circ\text{C}$ تا ۱۰۰ ثابت شدن وزن نمونه‌ها خشک شده است. سپس نمونه‌ها برای مدت زمان ۳ h در دسیکاتور تحت خلا قرار می‌گیرد و توسط آب مقطر به اشباع رسانده می‌شود.

و سختی بالا برای استفاده در ساختمان مناسب است [۱۴]. از طرفی دیگر، خاکستر بادی^۴ به دلیل فرآیند تولید جزو محصولات سبز محسوب می‌شود که جایگزینی آن به جای سیمان باعث کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان نیز می‌شود. خاکستر بادی از جمله مواد با ارزش نیروگاه است که حاوی فلزات سنگینی چون آرسنیک، سرب و جیوه است. ترکیب این مواد با آب و محیط زیست آسیب جبران‌ناپذیری را به همراه دارد در حالی که استفاده از این مواد به‌عنوان افزودنی در ساخت بتن مفید است. استفاده از خاکستر بادی مقرون به‌صرفه است چرا که در کشور ایران به دلیل وجود معادن زغال‌سنگ، پتانسیل مناسبی برای تولید این ماده وجود دارد.

مواد آزمایش

سیمان مصرفی در ساخت نمونه‌ها، سیمان پرتلند نوع ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان هگمتان می‌باشد. همچنین ماسه عبیدی با مدول نرمی برابر ۳/۶۱ و چگالی ظاهری برابر ۲/۶۱ و جذب آب ۰/۵٪ استفاده شده است. شن متوساک با حداکثر اندازه ۹/۵ mm و چگالی ظاهری ۲/۶۳ و جذب آب ۰/۱۸٪ استفاده شده است. خاکستر بادی یکی از محصولات جانبی باقی مانده از احتراق زغال‌سنگ پودر شده در نیروگاه‌های حرارتی است می‌باشد که شامل سیلیس (SiO_2)، آلومین (Al_2O_3) و اکسیدهای آهن (Fe_2O_3) و کلسیم (CaO) است. در دهه گذشته، استفاده از این پوزولان به‌عنوان یک ماده افزودنی در بتن افزایش یافته است و خاکستر بادی متداول‌ترین پوزولان مصنوعی می‌باشد [۱۵]. افزودن خاکستر بادی در بتن به دلیل حرارت‌زایی کم، باعث کاهش دمای هیدراسیون و افزایش مقاومت فشاری به دلیل اثرات پوزولانی^۵ می‌شود.

1. IBurial
2. Neutralization
3. Recycle
4. Flyash
5. Pozzolanic Effects

کاهش اثر منفی ضایعات حفاری بر محیط زیست

مطالعات پیشین بیانگر آن است که فعالیت‌های تولید نفت، افزودنی‌های گل حفاری و فلزات سنگین که بخشی از کنده‌های حفاری است از اصلی‌ترین عوامل مخرب محیط زیست است. در مطالعه‌ای اثر منفی هیدروکربن‌های نفتی بر سلامت گیاهان و جانوران به دلیل نفوذ این ترکیبات در اندام حیوانات و بافت‌های گیاهی مورد بررسی قرار گرفته است. پس استفاده از گیاهان مقاوم به ترکیبات نفتی می‌تواند روشی مناسب و کارا و در عین حال ارزان برای کاهش یا تجزیه ترکیبات آلی سمی لجن در خاک باشد [۲۹]. همچنین ورود این ترکیبات به محیط آبی باعث تغییر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب می‌شود و تحت تأثیر نور خورشید، تبخیر بخش‌های سبک هیدروکربن‌ها باعث آلودگی محیط زیست می‌شود [۱۲]. در پژوهشی دیگر، اثر منفی ترکیبات شیمیایی فلزات سنگین مانند کلریدها، سولفات‌ها، نیترات‌ها (CdCl_2 ، ZnCl_2 ، NiCl_2 ، CoCl_2 ، MnCl_2 ، CrCl_2)، PbSO_4 ، $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ مورد بررسی قرار گرفته است. این ترکیبات به‌خوبی در آب حل می‌شوند و باعث تغییر ترکیب شیمیایی آب و تخریب هیدروسفر می‌شود. در مجموع، به دلیل اثرات منفی پیچیده‌ای که این ترکیبات بر انسان و اکوسیستم‌های طبیعی دارد حداقل‌سازی اثرات منفی کنده‌های حفاری بر محیط زیست امری الزامی است [۴]. براساس مطالعات انجام شده، روش‌های مدیریت کنده‌های حفاری به‌صورت سه روش اصلی است: دفن^۱، خنثی‌سازی^۲ و بازیافت^۳ که از این بین، بازیافت ضایعات روشی پیشرفته‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر است [۱۳]. در مطالعات انجام شده، امکان تولید سرامیک شیشه‌ای از کنده‌های حفاری از طریق افزایش دما به 1300°C و با افزودن سدیم اکسید و کلسیم اکسید مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به‌دست آمده، ماده تولیدی به دلیل استحکام

مش شماره ۱۰۰ عبور داده می‌شود. مخلوط بتن مطابق با استانداردهای ACI طراحی شده است. در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع I به‌عنوان ماده سیمانی استفاده شد. کنده‌های حفاری و سیمان به‌طور کامل مخلوط شده و ترکیبی یکنواخت آماده می‌شود. در **شکل ۱ ب** بتن در قالب استوانه‌ای به ارتفاع ۲۰ cm (۸ inch) و قطر ۱۰ cm (۴ inch) ریخته شده است. مقادیر مقاومت گزارش شده نشان دهنده مقاومت متوسط سه نمونه است. نمونه‌ها پس از برداشته شدن از قالب، به مدت ۷ روز در دمای اتاق در آب قرار گرفته‌اند. نسبت ترکیب اجزای تشکیل دهنده در **جدول ۱** نشان داده شده است. برای جبران مقاومت فشاری از دست رفته، درصد‌های مختلفی از دوده سیلیس و خاکستر بادی به‌عنوان افزودنی به مخلوط اضافه شده است. همچنین در **جدول ۲**، اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ها از قبیل کنده‌های حفاری، خاکستر بادی، دوده سیلیس و خاکستر بادی همراه با توده سیلیس با توجه به غلظت ذرات و مقدار تخلخل بر حسب درصد ذکر شده‌اند.

نتایج آزمایش‌ها

به‌منظور بررسی اثر خرده‌های حفاری بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، مقادیر مختلفی از خرده‌های حفاری با سیمان جایگزین شده است.

همچنین ذرات خاکستر بادی به‌دلیل ظاهر کروی شکل و بی‌شکل، نقش مهمی در روانی بتن دارند. خاکستر بادی در انواع C و F وجود دارد. نوع C خاکستر بادی به‌دلیل دارا بودن بیش از ۱۰٪ کلسیم اکسید خاصیت سیمانی شدن نیز دارد. سیمان پرتلند غنی از آهک (CaO) است، درحالی‌که خاکستر بادی حاوی حدود ۲۰٪ آهک است. اگرچه آهک موجود در خاکستر بادی کمتر از سیمان پرتلند است اما عملکرد خاکستر بادی در بتن متأثر از مقدار آهک آن می‌باشد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا ماسه و مواد سیمانی به مدت ۵ min مخلوط می‌شوند. با اضافه کردن سنگ‌دانه درشت عمل اختلاط به مدت ۹ min دیگر انجام می‌شود. لازم به ذکر است در طرح‌های شامل خاکستر بادی و دوده سیلیسی، از قبل آن را با آب مخلوط نموده و سپس با مخلوط ترکیب شده است. به‌طور کلی نمونه‌های آزمایش شده در ۵ دسته جداگانه از بتن شامل یک نمونه شاهد و ۴ مخلوط حاوی درصد‌های مختلف از کنده‌های حفاری، خاکستر بادی، دوده سیلیس و مخلوطی از دوده سیلیس و خاکستر بادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کنده‌های حفاری جداشده از محل حفاری (**شکل ۱ الف**)، ابتدا در گرم‌خانه با دمای ۱۰۰ °C به مدت ۲۴ h خشک شده و سپس از



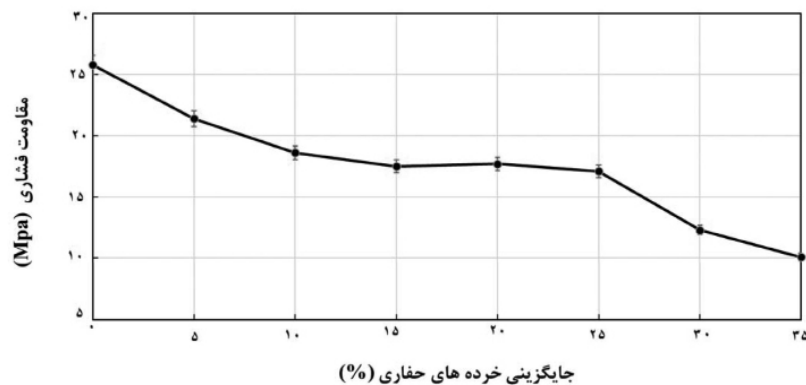
شکل ۱ الف) خرده‌های حفاری ب) نمونه بتن تهیه شده

جدول ۱ آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان، خاکستر بادی و دوده سیلیسی

پارامتر	سیمان پرتلند (%wt)	دوده سیلیسی (%wt)	خاکستر بادی (%wt)
SiO ₂	۲۲/۱۷	۸۷/۶۳	۶۰/۹
Al ₂ O ₃	۵/۰۱	۰/۶۳	۳/۹۱
Fe ₂ O ₃	۳/۶۷	۱/۲۵	۵/۱۶
CaO	۶۴/۶۹	-	۱۳/۱
MgO	۱/۷۸	-	-
K ₂ O	۰/۶۷	-	۱/۳۵
Na ₂ O	۰/۵۱	۰/۹۱	۰/۹۶
SO ₃	۲/۷۳	-	۲/۶۷
LOI	۱/۳۶	۲/۶۹	۲/۳۹
C ₃ S	۵۳/۹۶	-	-
C ₂ S	۱۰/۱۶	-	-
C ₃ A	۷/۲۶	-	-
C ₄ AF	۱۲/۲۷	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-
(m ² /kg) Special Surface	۳۲۶	۲۸۳۰۰	۴۱۱

۲- اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ها

ترکیب سیمان	غلظت ذرات	سیمان پرتلند ۱ (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	سنگ‌دانه ریز (kg/m ³)	سنگ‌دانه درشت (kg/m ³)	خرده‌های حفاری (kg/m ³)	دوده سیلیس (kg/m ³)	خاکستر بادی (kg/m ³)	تخلخل (%)
نمونه شاهد	-	۲۶۸/۵	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۰	۰	۰	۱۲/۳۸
کنده‌های حفاری	%۵	۲۵۵	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۱۳/۴	۰	۰	۱۴/۳۶
	%۱۰	۲۴۱/۷	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۲۶/۹	۰	۰	۱۵/۷۹
	%۱۵	۲۲۸/۲	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۴۰/۲	۰	۰	-
	%۲۰	۲۱۴/۸	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۵۳/۷	۰	۰	-
	%۲۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۰	-
	%۳۰	۱۸۸	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۸۰/۵	۰	۰	-
	%۳۵	۱۷۴/۵	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۹۴	۰	۰	-
خاکستر بادی	%۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۱۰/۰۷	۱۳/۶۰
	%۱۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۲۰/۱۴	۱۳/۲۳
	%۱۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۳۰/۲۱	-
	%۲۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۴۰/۲۸	-
	%۲۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۵۰/۳۵	-
دوده سیلیس	%۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۱۰/۰۷	۰	۱۰/۶۳
	%۱۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۲۰/۱۴	۰	۱۰/۱۲
	%۱۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۳۰/۲۱	۰	-
	%۲۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۴۰/۲۸	۰	-
	%۲۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۵۰/۳۵	۰	-
خاکستر بادی + دوده سیلیس	%۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۵/۰۴	۵/۰۴	۱۳/۶۵
	%۱۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۱۰/۰۷	۱۰/۰۷	۱۱/۷۱
	%۱۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۱۵/۱۱	۱۵/۱۱	-
%۲۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۲۰/۱۴	۲۰/۱۴	-	

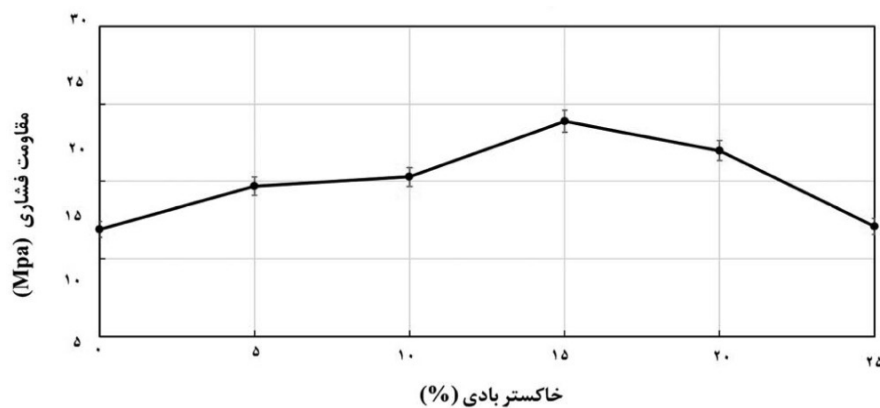


شکل ۲ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از کنده‌های حفاری

حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری افزوده شده است. به‌طور کلی خاکستر بادی قابلیت کارایی، انسجام و مقاومت نهایی نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد [۱۶-۱۷]. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص می‌باشد، افزودن خاکستر بادی به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. در این آزمایش از مقادیر مختلف خاکستر بادی شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ استفاده شده است که در تمام این نمونه‌های بتنی ۲۵٪ از وزن سیمان با کنده‌های حفاری جایگزین شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در نمونه‌های بتنی حاوی ۱۵٪ از خاکستر بادی، ۴۱٪ افزایش در مقاومت فشاری نمونه‌ها گزارش شده است.

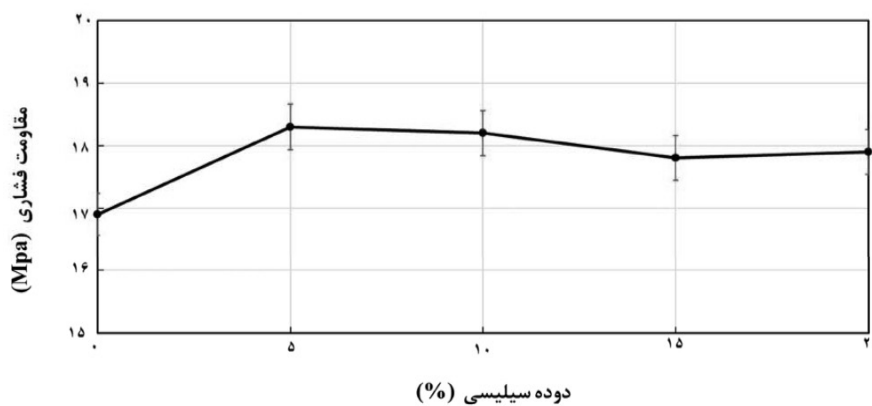
شکل ۲ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر متفاوتی از خرده‌های حفاری را پس از گذشت ۷ روز از عمل‌آوری^۱ نشان می‌دهد. میله‌های خطا در شکل انحراف استاندارد را نشان می‌دهد. در مقایسه با نمونه شاهد، نمونه‌های حاوی ۵، ۲۰ و ۳۵٪ از خرده‌های حفاری به ترتیب باعث کاهش ۱۷، ۳۱ و ۶۱٪ از مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ از سیمان با خرده‌های حفاری تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نمونه‌های تهیه شده ندارد. به عبارتی دیگر، استفاده از کنده‌های حفاری به میزان ۲۵٪ باعث کاهش ۳۴٪ از مقاومت فشاری می‌شود که به‌عنوان مقدار بهینه گزارش شده است. با هدف بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها، مقادیر مختلفی از خاکستر بادی به نمونه‌های بتنی



شکل ۳ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از خاکستر بادی

باعث کاهش حجم منافذ قابل دسترسی در داخل بتن می‌شود. واکنش پوزولانی بین دوده سیلیس و CH که یک محصول هیدراسیون سیمان است رخ می‌دهد و ژل CSH را در بسیاری از حفره‌های اطراف ذرات سیمان هیدراته شده ایجاد می‌کند که باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود [۲۱-۲۲]. واکنش پوزولانی خاکستر بادی بسیار کندتر از هیدراسیون سیمان می‌باشد [۲۳]. استفاده از خاکستر بادی علاوه بر صرفه‌جویی در انرژی، خصوصیات بتن را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین با افزودن خاکستر بادی، گرمای هیدراسیون بتن کاهش می‌یابد [۲۴-۲۵]. شکل ۴ اثر دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری را نشان می‌دهد. غلظت‌های مختلفی از دوده سیلیس شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ به نمونه‌های بتنی اضافه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، افزودن ۵٪ از دوده سیلیس به‌عنوان ماده افزودنی باعث افزایش ۸٪ از مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. نتایج آزمایشگاهی بیانگر آن است که افزایش غلظت دوده سیلیس، باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نمی‌شود.

با این حال، افزودن ۲۵٪ از خاکستر بادی به نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری، مقاومت فشاری آن‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی تحت تأثیر واکنش هیدراسیون، واکنش‌های هیدراسیونی (بین سیمان پرتلند و آب) و پوزولانی (بین سیمان پرتلند به‌همراه خاکستر و آب) واکنشی شیمیایی می‌باشند اما اثر بسته‌بندی یک آرایش مناسب از ذرات کوچک است به گونه‌ای که با کاهش فضای حفره‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۱۸-۱۹]. در مراحل ابتدایی فرآیند هیدراسیون، ذرات خاکستر بادی به‌عنوان ریزدانه‌هایی عمل می‌کنند که باعث پر شدن منافذ بین محصولات هیدراسیون می‌شوند (اثر بسته‌بندی) [۲۰]. با گذشت زمان و وقوع فرآیند هیدراسیون، اثر شیمیایی خاکستر بادی نیز فعال می‌شود. در واقع حضور سیمان پرتلند و آب در کنار یکدیگر منجر به فرآیند هیدراسیون می‌شود و در نتیجه دو ترکیب شیمیایی ایجاد می‌شود: هیدروکسید کلسیم (CH) ^۱ و هیدرات سیلیکات روی (CSH) ^۲ که این تبلور انرژی‌زا است. همچنین یک محصول جانبی این واکنش آهک آزاد ^۳ می‌باشد که

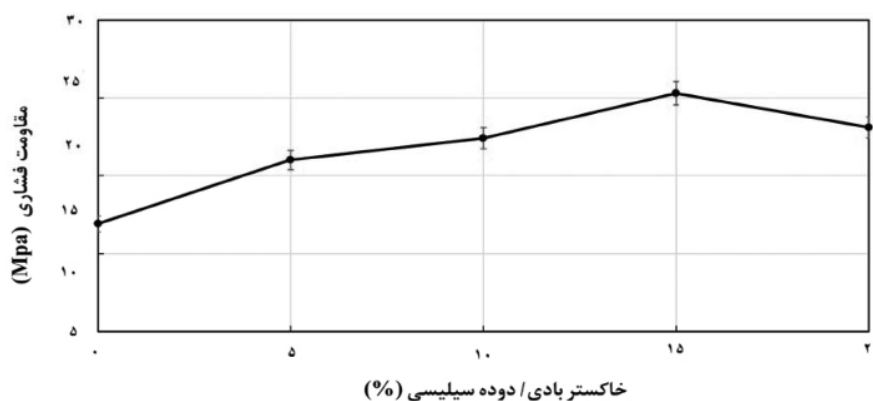


شکل ۴ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از دوده سیلیسی

1. Calcium Hydroxide
2. Zinc Silicate Hydrate
3. Free Lime

کاهش دهد [۲۸]. تخلخل نمونه بتن شاهد برابر ۱۲/۳۸٪ می‌باشد که افزودن ۵٪ از دوده سیلیسی باعث کاهش قابل توجه تخلخل به ۱۰/۶۳ شده است. عملکرد بتن تحت تأثیر عوامل زیادی است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بیانگر آن است که افزودن دوده سیلیس و خاکستر بادی به‌طور جداگانه باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن می‌شود. در این آزمایش، اثر حضور ترکیبی این دو افزودنی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. درصدهای مختلفی از مخلوط خاکستر بادی و دوده سیلیس (به‌عنوان مثال، ۲/۵٪ دوده سیلیس و ۲/۵٪ خاکستر بادی؛ ۵٪ دوده سیلیس و ۵٪ خاکستر بادی) به‌عنوان ماده افزودنی به نمونه‌های تهیه شده اضافه شده است. شکل ۵ اثر افزودن مخلوط خاکستر بادی / دوده سیلیس به نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری را نشان می‌دهد. در این شکل، با افزایش درصد خاکستر بادی / دوده سیلیس روند افزایشی در مقاومت فشاری نمونه‌ها مشاهده می‌شود. غلظت ۱۵٪ از افزایش‌ها (۷/۵٪ خاکستر بادی / ۷/۵٪ دوده سیلیس) مقاومت فشاری را تا ۵۰٪ افزایش می‌دهد [۳۰].

همچنین می‌توان اشاره کرد که در بهینه‌ترین حالت، افزودن ۱۵٪ از خاکستر بادی و ۵٪ از دوده سیلیسی به‌ترتیب باعث افزایش ۴۱ و ۸٪ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری شده است. افزایش مقاومت فشاری در حضور دوده سیلیسی به پیوند سطحی بهبود یافته بین خمیر (ماتریس سیمان هیدراته) و سنگدانه مرتبط می‌باشد. این افزایش مقاومت فشاری به‌دلیل تبدیل هیدروکسید کلسیم به هیدرات سیلیکات کلسیم بر روی سطح ذرات سنگدانه است. مطالعات پیشین نیز بیانگر آن است که دوده سیلیس چندان باعث افزایش مقاومت اولیه نمی‌شود ولی مقاومت ثانویه نمونه‌ها (پس از ۷ روز) به‌طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابند [۲۶-۲۷]. همچنین لازم به ذکر می‌باشد که اندازه ذرات دوده سیلیس تا ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از سیمان پرتلند معمولی است که این امر باعث افزایش خاصیت لغزندگی و تغییر در ویسکوزیته بتن می‌شود. در نتیجه، حضور دوده سیلیس باعث افزایش رفتار تیکسوتروپیک سیال می‌شود. لیو و همکاران ثابت کردند که خاکستر بادی می‌تواند سیالیت بتن را بهبود بخشد و با کاهش تخلخل بتن، منقبض شدن بتن را تا حدی



شکل ۵ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از ترکیب دو افزایش‌دهنده خاکستر بادی و دوده سیلیسی

نتیجه گیری

در این مطالعه، امکان استفاده از کنده‌های حفاری در ساخت بتن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان موجود در بتن ارزیابی شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر را نشان می‌دهد:

- استفاده از کنده‌های حفاری به‌عنوان جایگزینی برای بخشی از سیمان موجود در بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های شاهد، جایگزینی ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ از سیمان با کنده‌های حفاری، به‌طور میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا ۳۳٪ کاهش می‌دهد. جایگزینی مقادیر بیشتری از سیمان با کنده‌های حفاری، باعث افت شدید مقاومت نمونه‌ها در برابر فشار می‌شود. بنابراین، جایگزینی ۲۵٪ از سیمان با خرده‌های حفاری به‌عنوان بیشترین مقدار مطلوب گزارش شده است.
- برای جبران کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی سیمان با خرده‌های حفاری، خاکستر بادی به نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از خرده‌های حفاری اضافه شده است. افزودن خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، غلظت بهینه خاکستر بادی ۱۵٪ می‌باشد که منجر به افزایش ۴۱٪ از مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. لازم به ذکر

است که افزودن بی‌رویه خاکستر بادی، مقاومت فشاری را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

- بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که افزودن ۵٪ از دوده سیلیس باعث افزایش ۸٪ از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از خرده‌های حفاری می‌شود. با این وجود، افزایش غلظت دوده سیلیس به بیش از ۵٪ باعث بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها نمی‌شود.

- براساس نتایج آزمایشگاهی، حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۵٪ از خرده‌های حفاری، با افزودن مخلوطی از خاکستر بادی و دوده سیلیسی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۷/۵٪ از خاکستر بادی و ۷/۵٪ از دوده سیلیسی مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا ۴۹٪ افزایش می‌دهد. مقاومت فشاری به‌دست آمده در این آزمایش، حدود ۲٪ از مقاومت فشاری نمونه شاهد کمتر می‌باشد درحالی‌که ۲۵٪ از سیمان نمونه‌ها توسط خرده‌های حفاری جایگزین شده است.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاس‌گزاری را دارند.

مراجع

- [1]. Gbadebo A, Taiwo A, Eghele U (2010) Environmental impacts of drilling mud and cutting wastes from the Igbokoda onshore oil wells, Southwestern Nigeria, *Indian Journal of Science and Technology*, 3, 5: 504-510.
- [2]. Sharif M D A, Nagalakshmi N V R, Reddy S, Vasanth G, Sanker K (2017) Drilling waste management and control the effects. *J. Adv. Chem. Eng.*, 7, 166: 10-4172.
- [3]. Kujawska J, Pawłowska M, Cel W, Pawłowski A (2016) Potential influence of drill cuttings landfill on groundwater quality—comparison of leaching tests results and groundwater composition, *Desalination and Water Treatment*, 57, 3: 1409-1419.
- [4]. Junttila J, Dijkstra N, Aagaard-Sørensen S (2018) Spreading of drill cuttings and sediment recovery of three exploration wells of different ages, SW Barents Sea, Norway. *Marine pollution bulletin*, 135: 224-238.
- [5]. Vlasov A S, Pugin K G (2021) Development of a method for minimizing the negative environmental impact of drill cuttings by using it as a mineral powder in asphalt concrete, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1079, 7: 072024, IOP Publishing.
- [6]. Liu D S, Wang C Q, Mei X D, Zhang C (2018) Environmental performance, mechanical and microstructure analysis of non-fired bricks containing water-based drilling cuttings of shale gas, *Construction and Building Materials*,

183: 215-225.

- [7]. Rezaei Somee M, Shavandi M, Daštghaib S M M, Amoozegar M A (2018) Bioremediation of oil-based drill cuttings by a halophilic consortium isolated from oil-contaminated saline soil, 3 Biotech, 8, 5: 1-13.
- [8]. Hossain M E, Al-Majed A, Adebayo A R, Apaleke A S, Rahman S M (2017) A critical review of drilling waste management towards sustainable solutions, Environmental Engineering and Management Journal (Eemj), 16: 7.
- [9]. Chana P (2011) Low carbon cements: the challenges and opportunities, In Proceedings of the Future Cement Conference and Exhibition, 8-9.
- [10]. Ramesh G, Sotelino E D, Chen W F (1998) Effect of transition zone on elastic stresses in concrete materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 10, 4: 275-282.
- [11]. Cabrera J G, Lynsdale C J (1988) A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete, Magazine of Concrete Research, 40, 144: 177-182.
- [12]. Li L, Zhou P, Zhang H, Meng X, Li J, Sun T (2017) Mid-temperature deep removal of hydrogen sulfide on rare earth (RE= Ce, La, Sm, Gd) doped ZnO supported on KIT-6: Effect of RE dopants and interaction between active phase and support matrix, Applied Surface Science, 407: 197-208.
- [13]. Yagafarova G G, Barahnina V B (2006) Utilizatsiya ekologicheskii opasnykh burovnykh othodov [Disposal of environmentally hazardous drilling waste], Setevoe Izdanie «Neftegazovoe delo, 1: 1-17.
- [14]. Abbe O E, Grimes S M, Fowler G D, Boccaccini A R (2009) Novel sintered glass-ceramics from vitrified oil well drill cuttings, Journal of Materials Science, 44, 16: 4296-4302.
- [15]. Ahmaruzzaman M (2010) A review on the utilization of fly ash, Progress in Energy and Combustion Science, 36, 3: 327-363.
- [16]. Memon A H, Radin S S, Zain M F M, Trottier J F (2002) Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, Cement and Concrete Research, 32, 3: 373-377.
- [17]. Oner A D N A N, Akyuz S, Yildiz R (2005) An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, Cement and Concrete Research, 35, 6: 1165-1171.
- [18]. Isaia G C, GASTALDINI A L G, Moraes R (2003) Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete, Cement and Concrete Composites, 25, 1: 69-76.
- [19]. Kiattikomol K, Jaturapitakkul C, Tangpagasit J (2000) Effect of insoluble residue on properties of Portland cement, Cement and Concrete Research, 30, 8: 1209-1214.
- [20]. Wang A, Zhang C, Sun W (2004) Fly ash effects: III. The microaggregate effect of fly ash. Cement and concrete research, 34, 11: 2061-2066.
- [21]. Ma W, Brown P W (1997) Hydrothermal reactions of fly ash with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Cement and Concrete Research, 27, 8: 1237-1248.
- [22]. Qiang W, Mengxiao S, Dengquan W (2016) Contributions of fly ash and ground granulated blast-furnace slag to the early hydration heat of composite binder at different curing temperatures, Advances in Cement Research, 28, 5: 320-327.
- [23]. Hanehara S, Tomosawa F, Kobayakawa M, Hwang K (2001) Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste, Cement and Concrete Research, 31, 1: 31-39.
- [24]. Amnadnua K, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C (2013) Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash. Materials and Design, 51: 894-901.
- [25]. Han F, Liu R, Wang D, Yan P (2014) Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature, Thermochimica Acta, 586: 52-57.
- [26]. Behnood A, Ziari H (2008) Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement and Concrete Composites, 30, 2: 106-112.
- [27]. Poon C S, Kou S C, Lam L (2006) Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, Construction and Building Materials, 20, 10: 858-865.
- [28]. Liu B, Xie Y, Li J (2005) Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials, Cement and Concrete Research, 35, 5: 994-998.
- [29]. Huang X, El-Alawi Y, Donna M, Penrose B, Glick R, Bruce M (2005) A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils, Microchemical Journal, 81: 139-147.
- [30]. Heba A, Mohamed. 4 June 2011 . Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, Ain Shams Engineering Journal, 279-86.