بررسی امکان استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب در ساخت آجر

بابک حکیمی[1] حسین گنجی‌دوست[2] نادر مختارانی[3]

(دریافت ۹۱/۱۱/۳۰ پذیرش ۹۲/۸/۵)

چکیده

آبگیری و دفع لجن از جمله مهم‌ترین مراحل مدیریت تصفیه‌خانه‌های آب به‌شمار می‌رود. امروزه به‌دلیل بالا رفتن هزینه مواد اولیه و محدودیت در منابع، انتخاب روشهای استفاده از زائدات، بیش از پیش مورد توجه دست‌اندرکاران قرار گرفته است. هدف اصلی از انجام این پژوهش نیز بررسی امکان استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب در ساخت آجر فشاری بود. به این منظور با استفاده از درصدهای مختلف وزنی لجن نسبت به رس، نمونه‌های مختلف آجر تهیه شد و مشخصه‌های هر یک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش نسبت لجن به رس، میزان خلل و فرج و میزان درصد جذب آب توسط آجر افزایش و پارامترهای مقاومت فشاری، دانسیته و وزن آجر کاهش می‌یابد. در این خصوص بیشترین نسبت لجن به رس به‌منظور حفظ حداقل مقاومت فشاری (۸۰ Kg/m2) مطابق استاندارد به میزان ۴۲ درصد برآورد شد. این نسبت با لحاظ حداکثر میزان مجاز جذب آب (۲۰ درصد) توسط آجر به ۲۴ درصد محدود می‌شود. از آنجا که میزان جذب آب توسط آجر فقط در خصوص آجرهای نما دارای اهمیت است، لذا می‌توان از این پارامتر در برابر شاخص بسیار مهم مقاومت فشاری از لحاظ کاربرد آجر در دیوارهای باربر، چشم‌پوشی نمود. از نتایج دیگر این پژوهش می‌توان به کاهش وزن آجر و در نتیجه کاهش وزن سازه‌هایی که از این نوع آجر استفاده خواهند نمود، اشاره داشت. همچنین افزودن لجن به آجر باعث به‌وجود آمدن رنگهای متنوع در آجرهای تولیدی می‌شود و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان آجرنما را ممکن می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آجر، لجن تصفیه خانه آب، مقاومت فشاری، درصد جذب آب آجر

Investigating the Possibility of Using Water Treatment Plant Sludge in Brick Making

B. Hakimi[1] *H. Ganjidoust[2]* *N. Mokhtarani[3]*

(Received Feb. 18, 2013 Accepted Oct. 27, 2013)

Abstract

Sludge dewatering and disposal form important steps of water treatment processes. The rising costs of raw material and limitations in resources have led to increasing interest in waste reuse solutions. The main objective of this study was to investigate the feasibility of using water treatment plant sludge in brick making. For this purpose, samples of bricks with different sludge to clay ratios were prepared for analysis. Results show that higher sludge/clay ratios led to increasing number of bricks pores and enhanced water absorption capacity while the compressive strength, density, and brick weight reduced. The recommended minimum brick compressive strength of 80 Kg/m^2 was achieved with a sludge/clay ratio of 42%, which also led to a brick water absorption of 24% while its acceptable maximum limit is 20%. This rather small excess water absorption can be ignored in the case of load-bearing walls for the favorable compressive strength achieved although water absorption is an important parameter for face bricks. In another part of this study, different sludge/clay ratios were tested to obtain a variety of brick colors suitable for use as face bricks. A final advantage of the bricks made is the reduced brick weight and, thereby, building weight which.

Keywords: Brick, Water Treatment Plant Sludge, Compressive Strength, Brick Water Absorption.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده تربیت مدرس (نویسنده مسئول) ۸۲۸۸۳۳۳۲ (۰۲۱) h-ganji@modares.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

1. Grad. MSc. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University
2. Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University (Corresponding Author) (+98 21) 82883332 h-ganji@modares.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

۱- مقدمه

دسترسی به آب شرب سالم و بهداشتی یکی از نیازهای جوامع امروزی است که معمولاً با احداث تصفیه‌خانه‌های مختلف آب تأمین می‌شود. اما از طرفی با افزایش تولید آب شرب و بهداشتی، مشکلاتی نیز به‌وجود می‌آید که از آن جمله می‌توان به مشکل دفع لجن تصفیه‌خانه‌ها اشاره نمود [۱ و ۲]. مسئله دفع لجن یکی از اساسی‌ترین مشکلات در مدیریت تصفیه‌خانه‌های آب اعم از شهری و صنعتی است. حجم زیاد لجن تولیدی، درصد مواد جامد نسبتاً کم و خصوصیات نامطلوب آبگیری لجن، از علل اصلی بروز مشکل در این زمینه است. انتخاب روش بهینه دفع لجن و استفاده مجدد از آن نیز باید براساس دو دیدگاه رعایت مسائل محیط‌زیستی و شرایط فنی و اقتصادی صورت پذیرد. از طرفی نیز امروزه با توجه به روند رو به رشد صنعتی شدن کشورها و افزایش تولیدات کارخانه‌ها و کارگاه‌ها، کمبود منابع و مواد اولیه بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین یکی از راهکارهایی که در این مورد پیشنهاد می‌شود، استفاده از مواد قابل جایگزین به‌عنوان مواد اولیه صنعتی به‌ویژه در مصالح ساختمانی است [۳ و ۴].

آجر یکی از پرکاربردترین و شاید قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی است که از دیر باز در کشور مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر ایران، در سایر کشورها از جمله کشورهای غربی نیز از آجر به میزان وسیعی در صنعت ساخت‌وساز استفاده می‌شود.

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص تولید آجر سبک در دنیا انجام پذیرفته که از آن جمله می‌توان به تولید نوعی آجر سبک و عایق در برابر سرما و گرما با استفاده از فوم پلی استایرن اشاره نمود. در این تحقیق مقدار مواد افزودنی برای آنکه مقاومت فشاری و همچنین میزان جذب آب توسط آجر سبک در حد قابل قبول برای آجرنما باقی بماند، حدود یک درصد گزارش شده است [۵]. در تحقیقی دیگر در استان آذربایجان غربی از زغال سنگ‌های کم عیار در ساخت آجر استفاده شده است و در اجرای آن دو نمونه از زغال سنگ‌های کم عیار استان با درصد خاکستر متفاوت انتخاب و آجرهایی با صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی زغال سنگ تهیه و در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی مورد بحث قرار گرفته است. آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری تخلخل، وزن مخصوص، مقاومت فشاری تک محوری، تست برزیلی و مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها انجام شده و نشان داده است که با افزایش درصد زغال سنگ مصرفی در آجرها، تخلخل با روند ثابتی افزایش و مقاومت‌ها و وزن مخصوص کاهش می‌یابد. بررسی نتایج حاصل و مقایسه آنها با استانداردهای مربوطه نیز نشان داده است که می‌توان آجرهای تولیدی را در بخش‌های مختلف ساختمان به‌کار برد؛ ضمن اینکه زغال موجود در ترکیب آجر نیز به‌دلیل داشتن ارزش حرارتی قابل توجه، می‌تواند در کاهش مصرف سوخت کوره‌های آجرپزی مؤثر باشد [۶]. در پژوهشی دیگر، محققان کشورمان موفق به تولید آجر فوق سبک سلولزی از الیاف کاغذهای بازیافتی شدند. در این تحقیق از کاغذهای روزنامه و کارتن موجود در زباله خشک طی فرایندی نسبتاً ساده، نوعی آجر برای استفاده در دیوارهای غیر باربر، تیغه‌ها و بخش‌های درونی ساختمان تهیه شده است. این آجرها، ترکیبات فوق سبک با چگالی حدود ۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب‌اند که در احداث سازه‌های سبک، کاربرد خواهند داشت. از دیگر خصوصیات این آجرها می‌توان به مقاومت در برابر حرارت تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس اشاره نمود [۷].

در بحث‌های محیط‌زیستی همچنین موضوع استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌ها، به‌ویژه تصفیه‌خانه‌های آب در تولید مواد صنعتی دارای اهمیت است. این راهکار علاوه بر داشتن بهره اقتصادی در امر تولید، باعث جلوگیری از دفع مواد زاید و لجن‌های تولیدی در محیط شده و در هزینه مربوط به دفع بهداشتی و مطابق استاندارد این نوع زائدات صرفه جویی می‌شود [۸]. در تحقیقاتی که در نقاط مختلف دنیا نیز انجام پذیرفته، به امکان‌سنجی استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های آب در تهیه مصالح ساختمانی از جمله آجر پرداخته شده است.

در تحقیقی لجن حاصل از تصفیه آب توسط آلوم به‌عنوان ماده افزودنی در تولید آجر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، خواص آجر تولیدی از قبیل میزان جذب آب و مقاومت فشاری بررسی شده است و نتیجه نشان داده است که با افزودن لجن تا ۲۰درصد وزنی و پخت در ۸۵۰ درجه سلسیوس، امکان تولید آجر ساختمانی برای استفاده در دیوارهای باربر وجود دارد[۹].

در تحقیقی دیگر، لجن تصفیه‌خانه آب، خاکستر پوسته برنج و سیلیکات[1] حاوی ۹۷ درصد SiO_2 و ۱/۵ درصد آلومینا با نسبت‌های مختلف در تهیه آجر مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، نمونه آجر حاوی ۵۰ درصد لجن، ۲۵ درصد خاکستر و ۲۵ درصد سیلیکات دارای خصوصیات مورد نیاز آجرهای ساختمانی بوده است[۱۰].

تهیه آجر از مخلوط رس و رسوبات کف یک سد آب شرب نشان داد که دمای پخت آجر و میزان رس اضافه شده به رسوبات بر کیفیت آجر تولیدی اثر گذار است. در این مطالعه حداکثر دانسیته آجر به‌میزان ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب با استفاده از رسوبات تنها (بدون اضافه کردن رس) و در دمای پخت بالای ۱۰۵۰ درجه سلسیوس حاصل شده است. با این وجود آجرهای حاوی ۰ تا ۲۰ درصد رس با دمای پخت بالای ۱۰۵۰ درجه سلسیوس دارای

[1] Silica Fume

ویژگی‌های آجرهای ساختمانی مطابق استاندارد معرفی شده است. همچنین انجام آزمایش TCLP برای فلزات سرب، کادمیم، کروم، مس و روی، استفاده از رسوبات پشت سد به‌منظور تولید آجر ساختمانی را تأئید کرده است [۱۱]. در تولید آجر ساختمانی از لجن تصفیه‌خانه آب و رسوبات پشت سد تأمین آب شرب در کشور چین نیز دمای ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس و افزودن رس به میزان ۰ تا ۲۰ درصد به رسوبات به‌عنوان شرایط مورد نیاز برای تولید آجر مطابق استاندارد گزارش شده است[۱۲].

در تحقیقی دیگر از لجن مازاد تصفیه‌خانه فاضلاب کارخانه آلومینیوم‌سازی در ساخت آجر استفاده و نتایج قابل قبولی گزارش شده است[۱۳]. در سال ۲۰۰۳ در یک پروژه تحقیقاتی از لجن یک واحد تصفیه فاضلاب صنعتی برای ساخت آجر استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده با افزایش لجن در ترکیبات اولیه آجر، مقاومت فشاری کاهش و درصد جذب آب افزایش یافته است [۱۴]. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۹ لجن حاوی آرسنیک در ساخت آجرهای ماشینی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق همچنین اثر دمای کوره (۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سلسیوس) بر روی پخت و کیفیت آجر بررسی شده است و بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، با افزایش میزان لجن، مقاومت فشاری به تدریج کاهش و درصد جذب آب توسط آجر افزایش یافته است[۱۵].

با عنایت به موارد بالا و با توجه به نیاز به احداث تعداد قابل توجهی تصفیه‌خانه آب در سطح کشور و همچنین در نظر گرفتن مشکل دفع لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌های مذکور، هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی امکان استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های آب در ساخت آجر ساختمانی است. لازم به‌ذکر است که در مورد استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های آب در تولید آجر، تاکنون تحقیقات بسیار اندکی در سطح دنیا انجام پذیرفته است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مشخصات لجن مورد استفاده

در این تحقیق لجن مورد نیاز از یکی از تصفیه‌خانه‌های آب تهران که شامل لجن حاصل از حوض‌های زلال ساز(پولساتور) و پساب حاصل از شستشوی معکوس صافی‌ها بود، تأمین شد. لازم به توضیح است که در این تصفیه‌خانه از کلروفریک به‌عنوان منعقد کننده استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیز آزمایشگاهی لجن مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج آنالیز آزمایشگاهی لجن تصفیه خانه آب

پارامتر	واحد	مقدار
BOD_5	mg/L	۸
COD	mg/L	۱۴۷۰
TSS	mg/L	۵۶۸۰
pH	-	۷/۳۸
دما	درجه سلسیوس	۲۰
آلودگی میکربی	-	مثبت

۲-۲- نحوه تهیه آجر با استفاده از لجن تصفیه‌خانه

به‌منظور تهیه آجر ابتدا لجن به‌مدت ۲۴ ساعت در داخل آون و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. لجن خشک شده که به‌صورت کلوخه بود، پس از خنک شدن، خرد شده و به ذرات ریز تبدیل شد. در ادامه به‌منظور حذف ناخالصی‌ها و ذرات درشت دانه، رس و لجن تهیه شده به‌صورت جداگانه از الک نمره ۱۶ عبور داده شدند [۱۶]. نمونه‌ای از لجن خشک شده قبل و بعد از عبور از الک در شکل ۱ نشان داده شده است. سپس لجن و رس با نسبت‌های مختلف با یکدیگر مخلوط و با افزودن اندک اندک آب به مخلوط حاصل، گل قهوه‌ای رنگی تهیه شد. میزان آب اضافه شده به مخلوط باید به اندازه‌ای باشد که گل به‌دست آمده خاصیت انعطاف‌پذیری داشته و بتواند شکل قالب به‌خود بگیرد. در این تحقیق رطوبت گل مورد استفاده، در حدود ۱۱ درصد برآورد شد. برای شکل دهی به گل، از قالب‌های مخصوص آجر استاندارد از جنس فایبرگلاس به ابعاد ۲۱۰ × ۱۰۰ × ۵۵ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ای از قالب مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است. در این خصوص خشت خام به‌دست آمده به‌مدت یک روز در مقابل نور آفتاب قرار گرفت تا خشک شود. رطوبت اندازه‌گیری شده برای خشت خشک شده در حدود ۷ درصد برآورد شد. در ادامه، آجرها به‌مدت ۲۴ ساعت در داخل کوره‌ای با حداکثر دمای ۱۰۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند [۱۷].

شکل ۱- لجن خشک شده قبل و بعد از عبور از الک نمره ۱۶

شکل ۲- قالب‌های مخصوص آجر از جنس فایبرگلاس

لازم به‌ذکر است که برای اطمینان بیشتر در مراحل مختلف آزمایش، از هر نسبت اختلاط، حداقل دو نمونه آجر تهیه شد. در خاتمه نیز آجرهای آماده شده برای انجام آزمایش‌های مختلف به آزمایشگاه منتقل شدند.

۲-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

میزان مقاومت فشاری آجرهای تهیه شده مطابق استاندارد ASTM C1314 - 11a و با استفاده از دستگاه پلی استایرن مدل SCLP171 اندازه‌گیری شد. این دستگاه دارای نیرو سنج الکتریکی با دقت ۱۰ نیوتن و قابلیت نصب ضخامت‌سنج SCL عملکرد دستگاه، بر اساس استاندارد ملی ۱۱۱۰۸ بود. بر این اساس پس از اطمینان از صاف بودن سطح آجر، ابعاد آجر مورد نظر توسط کولیس اندازه‌گیری شد و سپس آجر در زیر جک فشاری قرار داده شد و تا زمانی که صدای ترک خوردن آن به گوش برسد، بر آن نیرو وارد شد. در ادامه، میزان فشار ثبت شده توسط دستگاه قرائت و با تقسیم آن بر سطح، مقاومت فشاری آجر محاسبه شد [۱۸].

در این تحقیق، آزمایش سایش آجرها مطابق استاندارد ASTM C704 / C704M - 09e1 و با استفاده از دستگاه لس آنجلس مدل AG 170 انجام شد. به این منظور ابتدا آجرها به‌مدت ۲۴ ساعت درون دستگاه آون با حرارت ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد تا کاملا خشک شوند. در مرحله بعد آجرها از دستگاه بیرون آورده شدند و با استفاده از ترازو (با دقت ۰/۱ گرم) وزن آنها به‌عنوان وزن اولیه اندازه‌گیری شد. در ادامه، دستگاه تمیز شده و نمونه‌های توزین شده به همراه ۱۱ عدد گوی فولادی (به قطر حدود ۴۶/۸ میلی‌متر و وزن ۳۹۰ تا ۴۴۵ گرم) در داخل دستگاه لس آنجلس قرار گرفت. پس از محکم کردن درب دستگاه به‌منظور جلوگیری از انتقال گرد و غبار به بیرون، دستگاه به‌مدت ۶ دقیقه و با سرعت ۳۳ دور در دقیقه (جمعاً ۲۰۰ دور) مورد استفاده قرار گرفت. پس از اتمام کار دستگاه، نمونه‌ها از دستگاه خارج و تمیز شد تا هیچ گونه گرد و غباری بر روی آن‌ها نباشد. در خاتمه نیز نمونه‌ها وزن شدند و سپس با استفاده از رابطه ۱، درصد سایش هر یک از آجرها محاسبه شد[۱۶ و ۱۸]

(۱) درصد سایش = (وزن اولیه آجر - وزن پس از سایش) / وزن اولیه ×۱۰۰

درصد جذب آب توسط آجر مطابق استاندارد ASTM C67-98 (1998) اندازه‌گیری شد. در این مورد ابتدا آجر مورد نظر به مدت ۲۴ ساعت درون آون و در حرارت ۱۱۰ درجه سلسیوس کاملاً خشک شد و سپس وزن آن به دقت اندازه‌گیری شد (Wd). در ادامه آجر خشک شده بدون اینکه هیچ‌گونه صدمه‌ای به آن وارد شود، درون یک ظرف آب قرار گرفت. پس از گذشت ۲۴ ساعت، آجر از آب بیرون آورده شد و آبهای اضافی (قطرات آب روی آجر) توسط یک پارچه خشک، از آن گرفته شد. در پایان نیز آجر به دقت وزن شده (Ww) و با استفاده از رابطه ۲، درصد جذب آب اندازه‌گیری شد [۱۹]

(۲) درصد جذب آب = ((Ww-Wd) /Wd) ×۱۰۰

دانسیته نیز یکی از پارامترهای شاخص و قابل اندازه‌گیری در آجر است. این پارامتر بر اساس استاندارد، برای آجر باید بین ۱/۸ تا ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد. در این تحقیق برای تعیین دانسیته، ابتدا ابعاد آجر با استفاده از کولیس مطابق استاندارد ملی شماره ۷ اندازه‌گیری و حجم آن برآورد شد [۱۹]. سپس آجر توسط ترازوی دقیق وزن شده و در نهایت با محاسبه نسبت وزن به حجم، میزان دانسیته آجر محاسبه شد.

برای محاسبه رطوبت بهینه[1] که جزء پارامترهای مهم در بررسی ویژگی های کیفی تولید آجر است، از آزمایش تست تراکم مطابق استاندارد AASHTO-T99 استفاده شد [۲۰].

۳- نتایج و بحث

غلظت برخی از فلزات سنگین لجن خشک مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان فلزاتی مانند منگنز و کادمیم در نمونه لجن خشک شده بیش از حد انتظار است. لازم به‌ذکر است که کیفیت لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌های آب، تابعی از کیفیت آب خام و مواد شیمیایی مصرفی است. همچنین بر اساس مستندات موجود در شرکت آب و فاضلاب استان تهران، میزان فلزات سنگین شامل کروم، کبالت، کادمیم، مس، سرب،

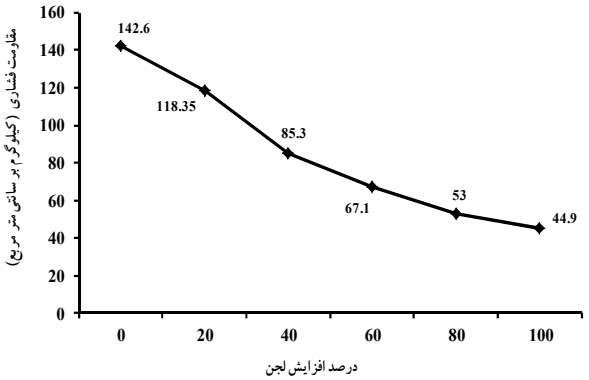
[1] Optimum Moisture Content (OMC)

نیکل، روی، آهن و منگنز در آب خام ورودی در حد ناچیز بوده است. بنابراین مواد مصرفی در تصفیه‌خانه عامل افزایش آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین در لجن تولیدی است. به‌عبارت دیگر، کلروفریک مصرفی در تصفیه‌خانه دارای استاندارد و مرغوبیت لازم نبوده و باعث شده تا غلظت برخی از عناصر در لجن افزایش یابد.

جدول ۲- برخی پارامترهای لجن خشک شده

پارامتر	مقدار در لجن خشک (mg/kg)
آهن (Fe)	۱۰/۹۷
منگنز (Mn)	۱۰/۹۱
کادمیم (Cd)	۰/۱۵
فسفات (PO_3)	۰/۲۰

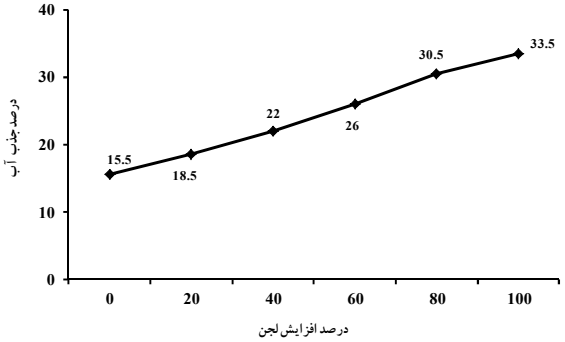
نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مختلف آجر در شکل ۳ آمده است. با بررسی این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت لجن از صفر به ۱۰۰درصد، میزان مقاومت فشاری آجر از ۱۴۲/۶ به ۴۴/۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به افزایش خلل و فرج آجر در اثر افزایش درصد وزنی لجن نسبت به رس ارتباط داد. در تحقیقی مشابه در سال ۲۰۱۱، کاهش مقاومت فشاری آجر در اثر افزایش نسبت لجن نیز گزارش شده است [۹ و ۱۲]. از آنجا که مطابق استاندارد ملی شماره ۷، حداقل مجاز مقاومت فشاری آجر دستی ۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است، لذا حداکثر نسبت وزنی لجن به رس به‌منظور تولید آجر به ۴۲ درصد محدود می‌شود.



شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

لازم به‌ذکر است که با افزایش نسبت لجن به رس، میزان قرمزی آجرها بیشتر می‌شود که دلیل آن را می‌توان به وجود اکسیدهای آهن در لجن که پس از قرار گرفتن در درجه حرارت بالا تغییر رنگ می‌دهند، ارتباط داد.

نتایج حاصل از آزمایش درصد جذب آب توسط آجر نیز در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که درصد جذب آب با افزایش نسبت لجن از صفر به ۱۰۰درصد، از ۱۵/۵ به ۳۳/۵ درصد افزایش می‌یابد، که علت آن نیز افزایش خلل و فرج آجر در اثر افزایش نسبت لجن به رس است. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ در تحقیقی مشابه رابطه مستقیم افزایش مقدار لجن با میزان جذب آب توسط آجر را گزارش نموده‌اند [۱۲]. از آنجا که مطابق استاندارد ملی شماره ۷ ایران، بیشترین میزان قابل قبول جذب آب توسط آجر فشاری ۲۰ درصد بود، بنابراین حداکثر نسبت لجن به رس به‌منظور رعایت استاندارد مذکور به ۲۸ درصد محدود می‌شود. اما از آنجایی که با افزودن نسبت لجن به ۴۲درصد، میزان جذب آب به ۲۳ درصد می‌رسد که تنها ۳ درصد بیشتر از حد مجاز است، لذا با درصدی اغماض و صرف نظر از استفاده از آجر به‌عنوان آجر نما، می‌توان ۴۲ درصد لجن را به‌عنوان میزان قابل قبول در این مورد در نظر گرفت.



شکل ۴- درصد جذب آب بر حسب درصد لجن

با در نظر گرفتن موارد بالا، در ادامه مجددا چند نمونه خشت خام با اختلاط ۴۲ درصد لجن نسبت به رس تهیه شد و پس از طی مراحل خشک شدن و پخت، برای انجام آزمایش تعیین درصد سایش به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج مربوط به آزمایش تعیین درصد سایش آجر در جدول۳ آورده شده است.

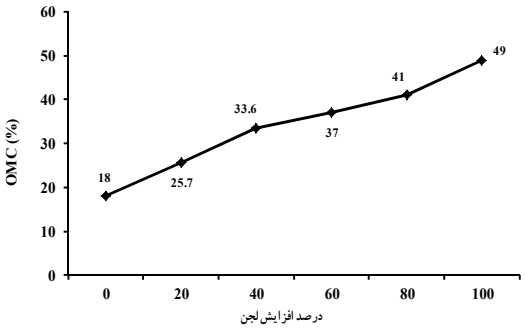
جدول ۳- نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین درصد سایش

متغیر	مقدار	واحد
مجموع وزن اولیه آجرها	۴۰۹۳	گرم
مجموع وزن آجرها پس از سایش	۳۰۰۴	گرم
اختلاف وزن	۱۰۸۹	گرم
میزان سایش	۲۶/۶	درصد

همانطور که ملاحظه می‌شود، آجرهای تهیه شده در این شرایط، دارای ۲۶/۶ درصد ساییدگی هستند که کمتر از حداکثر میزان

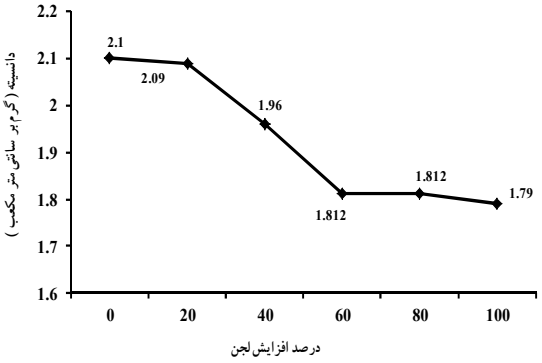
تعیین شده توسط استاندارد به میزان ۵۰ درصد است. بنابراین آجرهای تهیه شده با اختلاط ۴۲ درصد لجن با رس، دارای مقاومت لازم در برابر سایش بوده و از این لحاظ نیز در مورد استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب در تولید آجر مانعی وجود ندارد.

رطوبت بهینه نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم در بررسی ویژگی‌های کیفی تولید آجر است. نوسانات این متغیر برای درصدهای مختلف اختلاط لجن نسبت به خاک رس، در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رطوبت بهینه با افزایش نسبت لجن رابطه مستقیم دارد، که دلیل آن را می توان به بالا بودن میزان خلل و فرج و همچنین اصطکاک بین ذرات پودر لجن مورد استفاده در مقایسه با خاک رس نسبت داد.



شکل ۵- نمودار رطوبت بهینه بر حسب درصد لجن

میزان تغییرات دانسیته نمونه‌های آجر نسبت به افزایش درصد لجن نیز در شکل ۶ آورده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود، با افزایش درصد لجن، دانسیته نمونه‌های آجر کاهش می‌یابد که دلیل آن نیز، افزایش فضاهای خالی ایجاد شده در آجر، با افزایش نسبت لجن افزوده شده است. به‌عبارت دیگر، با افزایش تخلخل آجر در اثر افزودن لجن، میزان وزن و به تبع آن دانسیته آجر به‌علت ایجاد حفره‌های خالی کاهش می‌یابد. چیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز در تحقیقات خود به رابطه معکوس افزایش درصد لجن و میزان دانسیته اشاره نموده‌اند [۱۱].



شکل۶- تغییرات دانسیته بر حسب درصد لجن

لازم به‌ذکر است که کاهش دانسیته آجر، به شرط دارا بودن حداقل مورد نیاز سایر پارامترها مطابق استاندارد، به‌عنوان یک مزیت تلقی شده و باعث پایین آمدن وزن سازه و به تبع آن کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش خسارات و صدمات در هنگام وقوع زلزله می‌شود.

بنابراین به‌منظور تولید آجر فشاری و صرف نظر از استفاده از آجر به‌عنوان آجرنما، می‌توان تا حداکثر ۴۲درصد نسبت لجن به رس را افزایش داد. مطابق نتایج آزمایش‌ها، هر چه درصد لجن اضافه شده کمتر باشد، مقاومت فشاری و دانسیته آجر بیشتر و درصد جذب آب و OMC کمتر خواهد شد. لازم به‌ذکر است که میزان لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌های آب، در مقایسه با میزان آجر تولیدی در کشور، ناچیز است و به‌نظر می‌رسد با برنامه ریزی و اعمال مدیریت صحیح، به‌راحتی بتوان لجن مازاد تولیدی را با مقادیری کمتر از حداکثر میزان ذکر شده، در کارخانجات تولید آجر به مصرف رساند.

استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های آب، در تولید آجر نه تنها هیچ‌گونه هزینه اضافی به واحدهای مربوطه تحمیل نمی‌کند، بلکه از نظر محیط‌زیستی نیز اقدامی ارزشمند و کاملاً دوستدار محیط‌زیست ارزیابی می‌شود. لازم به‌ذکر است که در این راستا باید لجن آبگیری شده به‌جای حمل به مراکز دفع، به واحدهای تولید آجر منتقل شود تا مجدداً مورد استفاده قرار گیرد. اختلاف هزینه مربوط به حمل به کارخانجات تولید آجر در مقایسه با حمل به مراکز دفع، بستگی به فاصله واحدهای مذکور با تصفیه‌خانه داشته و در این خصوص نمی‌توان اظهار نظر قطعی نمود. اما آنچه مسلم است اینکه، استفاده مجدد از لجن تصفیه‌خانه آب در تولید آجر ساختمانی می‌تواند تا حد زیادی از انتشار آلاینده‌های مربوط به محیط زیست بکاهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان استفاده از مخلوط لجن حاصل از حوض‌های زلال‌ساز و پساب حاصل از شستشوی معکوس صافی‌های یکی از تصفیه‌خانه‌های آب کشور در ساخت آجر فشاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این کار تحقیقاتی نشان داد که استفاده از لجن در تهیه آجر یک راهکار عملی، مفید و اقتصادی برای دفع لجن تصفیه‌خانه‌های آب است. کم شدن وزن آجرهای ساخته شده از لجن، باعث پایین آمدن وزن سازه مربوطه شده که مزیت بزرگی در برابر حوادث ناشی از زلزله و همچنین کاهش هزینه‌های احداث سازه‌های آجری محسوب می‌شود. لازم به‌ذکر است که با افزایش درصد لجن حاوی فلز آهن نسبت به رس، میزان قرمزی رنگ آجرها نیز افزایش می‌یابد که این تنوع رنگ در آجرهای ساخته شده

از لجن برای استفاده در نمای ساختمان، یکی دیگر از مزیتهای این طرح به‌شمار می‌رود. همچنین ارزش حرارتی لجن موجود در آجر به عمل پخته شدن آجر در داخل کوره کمک می‌کند. بر اساس نتایج این تحقیق، بیشترین میزان لجن مورد استفاده در تهیه آجر با رعایت حداقل مقاومت فشاری مطابق استاندارد، به میزان ۴۲ درصد بود. همچنین بیشترین نسبت لجن به رس به‌منظور اجتناب از جذب بیش از حد آب توسط آجر ۲۸ درصد تعیین شد. از آنجا که میزان جذب آب توسط آجر فقط در خصوص آجرهای نما دارای اهمیت است، لذا می‌توان از این پارامتر در برابر شاخص بسیار مهم مقاومت فشاری در مورد کاربرد آجر در دیوارهای باربر اغماض نمود. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که با افزایش نسبت لجن به رس، دانسیته آجر کاهش و میزان رطوبت بهینه آن افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

1. Hoseinian, S. M. (2009). *Drinking water treatment plant design*, 1st Ed., Shahrab, Tehran. (In Persian)
2. Tarverdizadeh, E. (2009). "Optimization of sludge drying beds performance in wastewater treatment plant."MSc. Thesis, Tehran University, Iran. (In Persian)
3. Mirhosseini, G., Alavimoghaddam, M.R., and Maknon, R. (2007) "Investigation of application of Tehran municipal WWTPs' dried sludge in agriculture." *Environmental Sciences*, 4(4), 47-56.
4. Vaezi, F. (1980). "Recovery and reuse of iron salts as a coagulant in water treatment." MSc. Thesis, Tehran University of Medical Science, Iran. (In Persian)
5. Building and Housing Research Center Report. (2010). "Modification of consumption patterns." *Bazare Sakhteman and Tasisat*, 1(9), 4. (In Persian)
6. Shahdad, L. (2005). "Production of lightweight bricks using low grade coal." *1st Iranian Mining Engineering Conference*, Tarbiat Modares University, Iran.
7. Jamejam Online. (2010). "Production of lightweight bricks from waste paper." News No. 100867869101, < http://jamejamonline.ir/printable.aspx?newsnum=100867869101.> (May 2012).
8. Soltani Sarvestani, M.R. (2008). "Accelerate the dewatering of water treatment sludge in the context of conventional solar beds and reuse of sludge (case study: 3, 4 Tehranpars water treatment plant) ." MSc. Thesis, Abbaspour University of Technology, Iran. (In Persian)
9. Elangovan, C., and Subramanian, K. (2011). "Reuse of alum sludge in clay brick manufacturing." *Water Science and Technology*, 11(3), 333-341.
10. Hegazy, B.E.E., Fouad H.A., and Hassanain, A. M. (2012). "Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making." *Advances in Environmental Research*, 1(1), 83-96
11. Chiang, K.Y., Chien, K.L., and Hwang, S.J. (2008). "Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment." *J. of Hazardous Materials*, 159, 499-504
12. Huang, C., Pan, J.R., Sun, K.D., and Liaw, C.T. (2001). "Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making." *Water Science and Technology*, 44 (10), 273-277.
13. Khezri, S. M., Khalilzadeh Poshtegal, M., Khoramipour, S., and Ghafori, P. (2010). "Use of aluminum anodizing sludge cake in manufacture of bricks." *J. of Food, Agriculture and Environment (JFAE)*, 8 (3-4), 1158-1161.
14. Weng, C.H., Lin, D.F., and Chiang, P.C. (2003). "Utilization of sludge as brick materials." *Advances in Environmental Research*, 7 (3), 679-685.
15. Mahzuz, H.M.A., Alam, R., Alam, M.N., Basak, R., and Islam M.S. (2009). "Use of arsenic contaminated sludge in making ornamental bricks." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6(2), 291-298.
16. Braja, M., Das, G., and Ramana, V. (2010). *Principles of soil dynamics*, 2nd Ed., Cengage Learning Inc.
17. Tay, J.H., and Show, K.Y. (1999). "Constructive sludge disposal option converting sludge into innovative civil engineering materials." *7th International Association on Water Quality (IAWQ) Asia-Pacific Regional Conf.*, Taipei, Taiwan, 1023-1028.
18. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2009). *Clay brick- specification and test methods*, ISIRI No 7, 4th Revision. (In Persian)
19. ASTM. (1998). *ASTM C67 Standard test method for sampling and test brick and structural clay tile*, Annual book of ASTM standards, Sec.4, Construction, 04.08, 04.09, Soil and rock (I) and (II); West Conshohocken, PA.
20. AASHTO. (1982). *AASHTO T-99 Standard test methods for moisture relations of soils and soil-aggregate mixtures using 5.5 lb rammer and 12 in. drop*, Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing, Part II; Washington, D.C.