



داخل کوره به آرامی و به صورت طبیعی خنک شود، اما در روش سریع بلافاصله پس از اتمام احتراق، خاکستر از کوره خارج و در مجاورت هوای آزاد خنک می‌شود. محققان روش منتخب تهیه خاکستر پوسته برنج با کیفیت بالا را احتراق در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت و به روش خنک کردن سریع معرفی کرده‌اند (Nair et al., 2008).

در مراحل مختلف آسیاب کردن روندهای متفاوتی از تغییر در سطح مخصوص خاکستر پوسته برنج (RHA) مشاهده می‌شود. نگوین (Nguyen, 2011) نشان داد که با آسیاب کردن در ابتدا سطح مخصوص خاکستر افزایش می‌یابد تا متوسط اندازه ذرات به حدود ۶ نانومتر برسد و پس از آن سطح مخصوص کاهش می‌یابد. انوان و همکاران (An Van et al., 2013) تأثیر مدت زمان آسیاب کردن خاکستر پوسته برنج بر کیفیت آن را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که خاکستر پوسته برنج آسیاب شده به مدت ۴۵ دقیقه بیشترین واکنش پذیری را داراست. با توجه به بررسی به عمل آمده بیشترین مطالعات راجع به نحوه تهیه خاکستر مناسب پوسته برنج (خاکستر با واکنش پذیری بالا) و بررسی تأثیر آن در خصوصیات مقاومتی خاک متمرکز بوده و منبع معتبری در رابطه با مطالعه تأثیر خاکستر پوسته برنج در آبگذری خاک مشاهده نگردید؛ در تحقیق حاضر این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی، در منابع مختلف در ارتباط با تأثیر افزودن آهک بر نفوذپذیری خاک به وضوح سخن گفته نشده است. در برخی از مطالعات مانند راجاسکاران و ناراسیما (Rajasekaran & Narasimha, 2002)، سینگ و همکاران (Singh et al., 2008) افزایش نفوذپذیری در اثر تیمار خاک با آهک نتیجه‌گیری شده هر چند محققان دیگر مانند اونیت سوکا و همکاران (Onitsuka et al., 2001)، میلبرن و پارسونز (Milburn & Parsons, 2004)، تدسکو (Tedesco, 2006) و الحسن (Alhassan, 2008) می‌گویند

ماده به عنوان ضایعات و آلوده کننده محیط زیست شناخته می‌شود (Ramezani pour et al., 2009) و بنابراین یافتن راهی برای استفاده کامل از آن دارای اهمیت است. پوسته برنج شامل حدود ۵۰ درصد سلولز، ۲۵ تا ۳۰ درصد لیگنین و ۱۰ تا ۲۰ درصد سیلیس است. در خلال سوزاندن پوسته، سلولز و لیگنین حذف می‌شوند و خاکستر پوسته برنج<sup>۱</sup> حاوی درصد بالایی از سیلیس باقی می‌ماند. کنترل دما و شرایط احتراق موجب بالاتر رفتن کیفیت این خاکستر می‌شود (Ramezani pour et al., 2009). کیفیت خاکستر تابع مقدار سیلیس آمورف و ساختار متخلخل آن است و به معنی میزان شرکت فعال در واکنش های پوزولانی است. مهتا (Mehta, 1987) پوزولان را ماده‌ای سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی تعریف می‌کند که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان می‌دهد و ترکیباتی به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند. با توجه به این تعریف، افزودن خاکستر پوسته برنج به تنهایی به خاک واکنشی در برنخواهد داشت و لازم است جهت ایجاد واکنش های پوزولاتی آهک نیز همراه خاکستر به نمونه اضافه شود.

مهتا (Mehta, 1987) نشان داد که سوزاندن پوسته برنج در شرایط کنترلی دما و زمان، باعث افزایش سیلیس به شکل آمورف می‌شود. طبق بررسی های این محقق، تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس، سیلیس به شکل آمورف باقی خواهد ماند و فرم کریستالی با افزایش دما و مدت زمان حرارت دهی افزایش می‌یابد. نیر و همکاران (Nair et al., 2008) تأثیر دما، مدت زمان احتراق و اثر نحوه خنک کردن نمونه در ساختار و واکنش پذیری خاکستر برنج تولید شده را بررسی کردند. برای این منظور دو روش خنک کردن آهسته و سریع معرفی شد. در روش خنک کردن آهسته، به خاکستر فرصت داده می‌شود تا در

قانون داری در شرایطی معتبر است که جریان در محیط متخلخل آرام<sup>۱</sup> (ورقه‌ای  $Re < 1$ ) باشد زیرا در جریان‌های متلاطم<sup>۲</sup> انرژی در اثر تلاطم هدر می‌رود و این موضوع در قانون داری لحاظ نشده است.

$$Re = \frac{\rho V d_{10}}{\mu} \quad (2)$$

که در آن،

$Re$  = عدد رینولدز [-]؛  $\rho$  = جرم مخصوص سیال [ $ML^{-3}$ ];  
 $V$  = سرعت داری [ $LT^{-1}$ ];  $d_{10}$  = قطر مؤثر ذرات خاک  
 $[L]$ ; و  $\mu$  = لزوجت دینامیکی سیال [ $ML^{-1}T^{-1}$ ].

### طراحی و ساخت مدل فیزیکی

در این تحقیق، با استفاده از روش آزمایشگاهی ضریب آبگذری اندازه‌گیری شد. مدل ساخته شده با سطح مقطع مربع از جنس پلاکسی گلاس، دارای سه جعبه مجزا به ابعاد  $20 \times 20 \times 30$  سانتی‌متر است (شکل ۱- الف). این سه جعبه شامل جعبه ورودی متصل به مخزن تأمین تراز آب، جعبه مرکزی که مصالح در آن متراکم شده است (شکل ۱- ج) و جعبه خروجی است که دبی عبوری از آن اندازه‌گیری می‌شود. این سه قسمت به صورت نر و ماده روی پایه‌ای قرار گرفته‌اند که با توجه به شاسی طراحی شده و استفاده از گریس سیلیکونی کاملاً آب‌بندی و محکم شدند. منبع تأمین ارتفاع آب (شکل ۱- ب)، مخزنی با قطر ۵۵ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر است که به واسطه نصب شناور سطح آب در آن ثابت می‌ماند. این منبع قابلیت تغییر ارتفاع را دارد و ۳ تراز مختلف آب (۰/۴ و ۰/۸،  $h=1/2$  متر) را روی محور مدل تأمین می‌کند. برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های ناشی از فشار آب، خاک متراکم بین دو قاب توری فلزی قرار داده شد. برای این منظور در ورودی جعبه میانی لبه‌ای به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر برای قرار گرفتن قاب توری تعبیه شد. همچنین

که آبگذری خاک با افزایش مقداری آهک به شکلی چشمگیر کاهش می‌یابد. محققانی مانند کسیم و چو (Kassim & Chow, 2000)، گالوانو و همکاران (Galvao et al., 2004) و خطاب و همکاران (Khattab et al., 2008) بر این باورند که آبگذری با افزایش آهک تا درصد مشخصی (یا سن مشخصی از تیمار) زیاد می‌شود و پس از آن کاهش می‌یابد؛ هدف دیگر مقاله حاضر بررسی تأثیر رفتاری آهک بر ضریب آبگذری اشباع نمونه غیرچسبنده است.

نکته با اهمیت دیگر در این مقاله، اندازه‌گیری ضریب آبگذری اشباع افقی است. گفتنی است که در منابع ضریب آبگذری اشباع با آزمایش بار افتان اندازه‌گیری شده که در واقع ضریب آبگذری عمودی نمونه‌هاست، در صورتی که در این مطالعه با توجه به نحوه ساخت مدل فیزیکی و تراکم نمونه‌ها، اندازه‌گیری ضریب آبگذری افقی مانند آنچه در واقعیت مثلاً در ساخت یک سد اتفاق می‌افتد مدنظر خواهد بود. نتایج این تحقیق را می‌توان در طراحی بهینه، سازه‌هایی مانند سدهای زیرزمینی که برای ذخیره و بالا آوردن جریان زیرسطحی آب در بستر رودخانه‌ها اجرا می‌شوند، به کار برد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق جهت تخمین ضریب آبگذری اشباع از رابطه داری به صورت رابطه ۱ استفاده شد:

$$Q = Aki \quad (1)$$

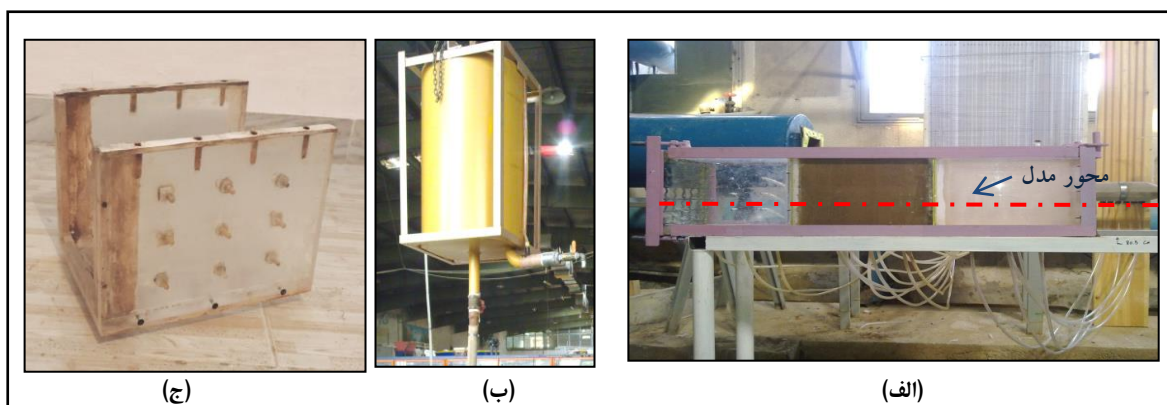
که در آن،

$Q$  = دبی عبوری [ $L^3T^{-1}$ ];  $A$  = سطح مقطع عمود بر جریان [ $L^2$ ];  $k$  = ضریب هدایت هیدرولیکی (ضریب آبگذری) [ $LT^{-1}$ ]; و  $i = \frac{h_1}{L}$  = گرادیان هیدرولیکی [-] (Shamsaei, 2012).

نمونه بگذرد؛ برای اصلاح این وضعیت، با چسباندن ماسه بادی به دیواره داخلی جعبه میانی، مقطع کنترل‌کننده‌ای به شکل نوار به پهنای ۳ سانتی‌متر ایجاد شد. نوار ایجاد شده زبری دیواره را افزایش و عبور جریان را از بین دیواره و مصالح متراکم شده کاهش می‌دهد.

یک عدد قاب توری فلزی نیز در انتهای نمونه (جعبه) قرار داده شد که به کمک زبانه ایجاد شده در جعبه سوم خاک متراکم را در محل خود ثابت می‌کند.

قالب‌های با جنس پلاگسی‌گلاس سطحی صاف و زبری آنها بسیار کم است و از این‌رو ممکن است بخشی از جریان به‌جای عبور از داخل نمونه از حد فاصل دیواره و



شکل ۱- اجزای مدل فیزیکی

(الف) مدل فیزیکی، (ب) منبع تأمین ارتفاع آب و (ج) جعبه میانی مدل فیزیکی

یک عدد قاب توری فلزی نیز در انتهای نمونه (جعبه) قرار داده شد که با زبانه ایجاد شده در جعبه انتهایی خاک متراکم را در محل خود ثابت می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱- ج مشخص است، در دیواره و کف این جعبه ۹ پیژومتر به‌صورت شبکه  $3 \times 3$  با فواصل  $7/5$  سانتی‌متر در طول و  $5$  سانتی‌متر در عرض جهت اندازه‌گیری فشار تعبیه شده است. در کف جعبه ورودی و خروجی نیز هریک ۳ پیژومتر به فاصله  $7/5$  سانتی‌متر قرار دارد. گرادیان افت فشار حد فاصل پیژومترهای موجود در فاصله  $37/5$  و  $52/5$  سانتی‌متر از ابتدای مدل اندازه‌گیری شد.

با توجه به اینکه دما بر خصوصیات فیزیکی آب (لزوجت) و در نتیجه ضریب آبگذری تأثیرگذار است، تمام آزمایش‌ها در دمای  $20$  درجه سلسیوس انجام گرفت. در این تحقیق یک نمونه خاک درشت‌دانه با آبگذری نسبتاً بالا به‌عنوان شاهد انتخاب و تأثیر افزودن مقادیر مختلف (۲، ۴

از آنجا که در واقعیت برای لایه‌های متراکم، تقریباً در راستای جهت جریان است، برای ایجاد شرایط مشابه، نمونه مورد آزمایش از بخش فوقانی جعبه میانی (شکل ۱- ج) وارد و متراکم گردید. برای این منظور قسمت فوقانی جعبه مزبور به‌صورت متحرک با قابلیت باز و بسته شدن طراحی شد. برای متراکم کردن مصالح، قسمت فوقانی برداشته شد و با توجه به وزن مخصوص مورد نیاز، نمونه در جعبه متراکم شد. پس از اتمام عملیات تراکم، مجدداً قسمت فوقانی جعبه به کمک هشت عدد پیچ روی مدل ثابت و برای جلوگیری از نشت آب به خارج مدل این بخش به کمک درز انبساط و گریس سیلیکونی آب‌بندی شد.

برای جلوگیری از جابه‌جایی ناشی از فشار آب، در قسمت ورودی جعبه میانی لبه‌ای به ضخامت  $1/5$  سانتی‌متر برای قرار گرفتن قاب توری تعبیه شد. همچنین،

تأثیر مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب...

و ۶ درصد) آهک و مخلوط آهک و خاکستر پوسته برنج بر نفوذپذیری آن پس از تیمار ۲۸ روزه بررسی شد. اطلاعات مربوط به نمونه شاهد در جدول ۱ آورده شده است. همچنین آهک مورد استفاده در این تحقیق از نوع آهک آبدیده بوده که پس از عبور از الک نمره ۴۰ استفاده شده است.

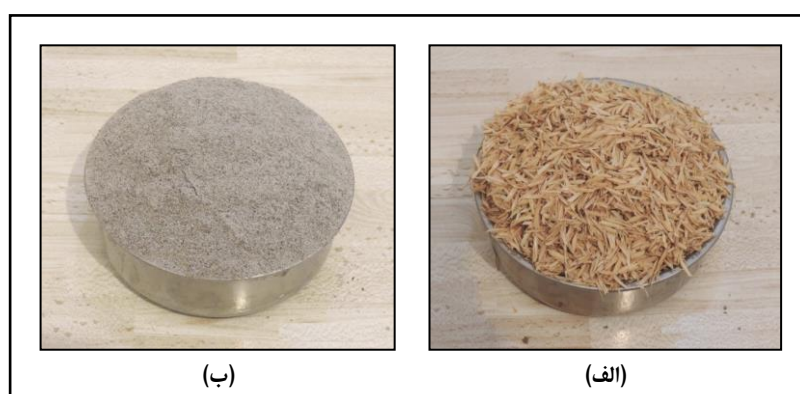
جدول ۱- خصوصیات نمونه شاهد

مقدار/توصیف	خصوصیت
۷۰	درصد ماسه
۲۰/۳	درصد سیلت
۹/۷	درصد رس
ایلیت-کلریت	نوع کانی رس
SM	بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید
شنی- لومی	بافت (USDA)
۲/۶۵	Gs
۲/۰۱	وزن واحد حجم خشک بیشینه نمونه (pdmax) (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱۰/۳	رطوبت بهینه تراکم Wopt (درصد)

#### تهیه خاکستر پوسته برنج

شرایط هوادهی با اختلاط مداوم پوسته در حال احتراق بهبود داده شد. احتراق پوسته برنج در ۵۰۰ درجه سلسیوس و به مدت ۱۲ ساعت ادامه داد شد و خاکستر تولید شده بلافاصله از کوره خارج و در مجاورت هوای آزاد خنک گردید (Nair et al., 2008). خاکستر تولید شده به مدت یک ساعت به صورت دستی آسیاب شد زیرا آسیاب کردن نمونه بر افزایش سطح مخصوص و واکنش پذیری پوزولانی مؤثر است (An Van et al., 2013). شکل ۲ پوسته برنج و خاکستر تولیدی را نشان می‌دهد.

پوسته مورد استفاده از برنج نوع طارم است که از موسسه تحقیقات برنج ایران تهیه شد. به منظور دستیابی به خاکستر پوسته برنج با فعالیت پوزولانی بالا، کوره‌ای استوانه‌ای به قطر ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۲ متر ساخته شد. برای ورود اکسیژن کافی در محیط کوره، چند سوراخ هریک به قطر یک سانتی‌متر و به فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر تعبیه شد. برای رسیدن به حرارت مورد نظر، از یک مشعل با شعله قابل تنظیم استفاده و دما در مرکز کوره با ترموکوپل دیجیتال اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- الف) پوسته برنج مورد استفاده و ب) خاکستر تولیدی از آن

می‌توان گفت که ساختمان خاک را تغییر می‌دهد (Osinubi, 1998). از آنجا که میزان انرژی تراکم در آبدگری تأثیرگذار است (Benson *et al.*, 1994)، سعی شده انرژی تراکم برای ساخت تمام نمونه‌ها یکسان باشد. در این راستا با توجه به اینکه هدف متراکم کردن تمام نمونه‌ها در ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم پروکتور استاندارد (۹۰ درصد  $RC \approx$ ) است، لازم است نمونه‌ها در رطوبتی بیشتر از مقدار بهینه متراکم شوند. لازم است گفته شود که هر نمونه حاوی درصدی خاص از مواد افزودنی، دارای منحنی تراکم منحصر به فردی است.

با توجه به رطوبت و جرم مخصوص مورد نیاز هر نمونه در ۱۰ لایه (هر لایه به ضخامت ۲ سانتی‌متر) در جعبه میانی مدل به‌طور یکنواخت متراکم گردید. شکل ۳ جعبه میانی مدل در حین تراکم و پس از تراکم نمونه را نشان می‌دهد. طبق تحقیقات اسینابی (Osinubi, 1998)، تمام نمونه‌های تولید شده ۲۸ روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۱۰۰ درصد تیمار شدند.

نمونه‌ها به روشی تهیه شدند که اسینابی (Osinubi, 1998) ارائه داده است. برای این منظور مواد افزودنی به طور دقیق به میزان ۲، ۴ و ۶ درصد وزن خاک خشک وزن و به‌صورت خشک استفاده گردید و پس از اختلاط کامل در کیسه‌های نایلونی در بسته نگهداری شد. برای تست تراکم و متراکم کردن نمونه‌ها در مدل از این مخلوط استفاده شد. یادآوری می‌شود که طرح اختلاط مورد استفاده با توجه به تحقیقات میلبرن و پارسونز (Milburn & Parsons, 2004) و الحسن (Alhassan, 2008) در نظر گرفته شده است. میلبرن و پارسونز (Milburn & Parsons 2004)، مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و الحسن (Alhassan, 2008) مقادیر ۲، ۴ و ۶ مخلوط آهک و خاکستر پوسته برنج را به‌صورت خشک استفاده کردند.

### متراکم کردن نمونه‌های حاوی مواد افزودنی در مدل فیزیکی

افزودن مواد تثبیت‌کننده به خاک باعث تغییر در خصوصیات آن از جمله خصوصیات تراکمی می‌شود و



شکل ۳- تصویر جعبه میانی مدل فیزیکی

روی محور مدل قرار گرفت و حجم آب خروجی هر ۶ ساعت یک بار تا رسیدن به مقداری ثابت اندازه گیری شد.

پس از برپاسازی مدل، ارتفاع مخزن تأمین آب تنظیم و با باز کردن شیر ورودی، خاک متراکم تحت هد ۰/۴ متر

تأثیر مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب...

پس از ثبات دبی خروجی و اطمینان از اشباع شدن نمونه، ارتفاع بالاتر آب (۰/۸ و ۱/۲ متر) تنظیم و مراحل فوق حجم (دبی) آب خروجی از مدل و تراز آب در پیژومترهای تکرار شد. مطابق جدول ۲ در این تحقیق مجموعاً ۲۱ نصب شده قرائت شد. پس از آن، تراز مخزن برای تأمین آزمایش اجرا شده است.

جدول ۲- تعداد آزمایش‌های اجرا شده

نمونه	ماده افزودنی	درصد افزودنی	تراز بالادست	تعداد آزمایش
حالت ۱ -	حالت ۲ (آهک و مخلوط آهک و خاکستر)	حالت ۳ (۲، ۴ و ۶ درصد)	حالت ۳ (۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ متر)	۱۸
۱ (شاهد)	-	-	حالت ۳ (۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ متر)	۳
مجموع				۲۱

### نتایج و بحث

سیلیس است. نتایج حاصل از آزمایش پراش پرتو ایکس<sup>۲</sup> روی خاکستر (شکل ۴) نشان می‌دهد که ۹۲/۴ درصد سیلیس موجود در آن به صورت آمورف است و قابلیت شرکت در واکنش پوزولانی را داراست. تعیین درصد کربن به روش آنالیز شیمیایی نشان داد خاکستر پوسته برنج حاوی ۲/۶ درصد کربن است.

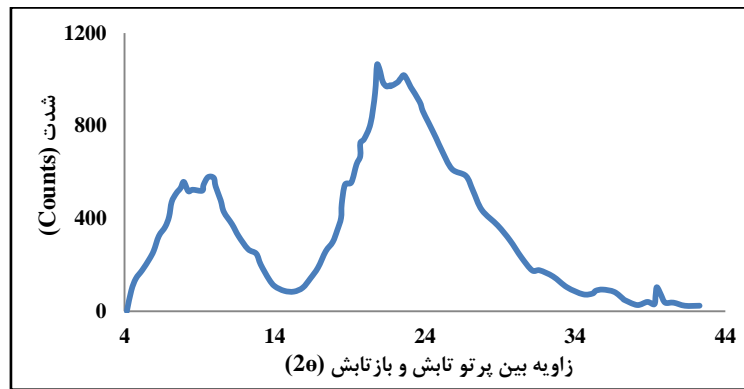
جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس<sup>۱</sup> را روی نمونه شاهد، آهک مورد استفاده و خاکستر تولیدی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است آهک مورد استفاده حاوی ۶۹/۸ درصد اکسید کلسیم و خاکستر تولیدی حاوی ۷۸/۷ درصد

جدول ۳ - ترکیب شیمیایی نمونه شاهد، آهک و خاکستر پوسته برنج به روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس

ترکیب	نمونه شاهد	آهک آبدیده	خاکستر پوسته برنج
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۵۳	۰/۰۳	۱/۴
SiO <sub>2</sub>	۶۹/۸	۲/۶	۷۸/۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶/۳	۰/۶۶	۰/۲۶
MgO	۲/۰	۳/۱	۰/۸۴
CaO	۹/۳	۶۹/۸	۲/۱
K <sub>2</sub> O	۱/۷	۰/۴۲	۳/۴
Cl	۰/۴۱	۰/۳	۱/۴
SO <sub>3</sub>	۰/۲۶	۰/۸۱	۱/۱
TiO <sub>2</sub>	۰/۶۶	۰/۰۴	۰/۰۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶/۴	۰/۴۸	۰/۶۴

1- X-Ray Fluorescence (XRF)

2- X-Ray Diffraction (XRD)



شکل ۴- نتایج حاصل از آزمایش پراش پرتو ایکس روی خاکستر پوسته برنج تولید شده

### تأثیر مواد افزودنی بر خصوصیات تراکمی خاک

مطابق شکل‌های ۵ و ۶، تأثیر افزودنی‌های آهک و مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک به نسبت (۱:۱) بر خصوصیات تراکمی روند مشابهی را نشان می‌دهد.

آهک: بررسی آماری توسط نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد که ضریب همبستگی پیرسون بین درصد آهک اضافه شده با جرم مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه تراکم به ترتیب  $0/96-$  و  $0/97+$  است و همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین آنها وجود دارد (جدول ۴). همان‌طور که از نمودارهای خط چین در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است افزودن آهک موجب افزایش جرم مخصوص خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه تراکم به دست آمده از آزمایش تراکم پروکتور استاندارد گردید. این تغییرات با روندی مشابه را اسینابی (Osinubi, 1998)، ماللا و همکاران (Mallela et al., 2004) و جایمن (Geiman, 2005)، بیان کرده‌اند. افزایش ۶ درصد آهک، جرم مخصوص خشک

بیشینه را به  $1/81$  گرم بر سانتی‌متر مکعب معادل ۹۰ درصد مقدار اولیه کاهش می‌دهد و موجب تغییر در رطوبت بهینه تراکم می‌شود و آن را به  $11/83$  درصد معادل  $1/16$  برابر مقدار اولیه می‌رساند.

افزودن آهک به علت واکنش تبادل کاتیونی و فلوکوله شدن ذرات باعث افزایش اندازه منافذ بین توده‌های خاک و افزایش تخلخل می‌شود (Tran et al., 2014) به همین دلیل نیروی بیشتری برای تراکم نیاز است تا جرم مخصوص خشک بیشینه کاهش یابد. از طرفی در اثر به وجود آمدن ذرات منعقد، تراکم سخت‌تر می‌شوند و همین عامل موجب می‌شود که ذرات برای جابه‌جایی روی یکدیگر به آب بیشتری احتیاج داشته باشند. در نتیجه رطوبت بهینه افزایش خواهد یافت. می‌توان علت افزایش رطوبت بهینه را نگهداشت آب مازاد در ساختمان فلوکوله خاک و نیاز به آب اضافی جهت تجزیه آهک به یون‌های  $Ca^{2+}$  و  $OH^-$  نسبت داد.

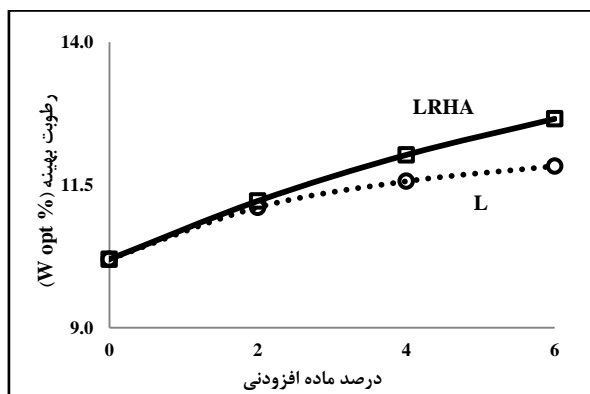
جدول ۴ - ضریب همبستگی بین درصد آهک و مولفه های تراکم

W <sub>opt</sub>	ρ <sub>d max</sub>	آهک آبدیده
* $0/965$	* $-0/956$	ضریب همبستگی پیرسون
$0/035$	$0/044$	Sig. (2-tailed)
۴	۴	تعداد

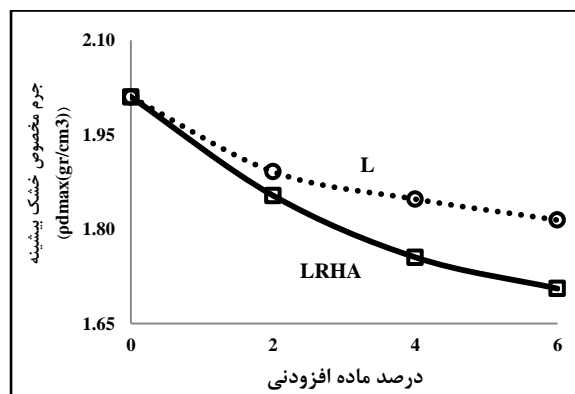
\* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد



تأثیر مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب...



شکل ۶- تأثیر مواد افزودنی بر درصد رطوبت بهینه تراکم



شکل ۵- تأثیر مواد افزودنی بر جرم مخصوص خشک بیشینه تراکم

مقایسه با ترکیب خاک و آهک ( $G_s=2/64$ )، نسبت داد. این روند با روند حاصل از مطالعات الحسن، Alhassan (2008) و چوببستی و همکاران (Choobbasti et al., 2010) هماهنگی دارد. همین طور با اضافه کردن مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (LRHA) به ترکیب خاک، درصد رطوبت بهینه با شدت بیشتری نسبت به حالتی که فقط آهک به نمونه اضافه شده افزایش می‌یابد (شکل ۶). ممکن است این امر ناشی از واکنش پوزولانی آهک و خاکستر پوسته برنج و نیاز به آب اضافی باشد.

#### تأثیر مواد افزودنی بر نفوذپذیری نمونه شاهد

جدول ۶ خصوصیات تراکمی نمونه‌ها در مدل فیزیکی را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است تراکم نسبی (RC) برای تمام نمونه‌ها ۹۰ درصد است.

#### مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (LRHA)

مطابق جدول ۵، ضریب همبستگی پیرسون بین درصد مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (LRHA) اضافه شده با جرم مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه تراکم به ترتیب  $-0/97$  و  $0/99$  است و همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین آنها وجود دارد. و افزودن ۶ درصد مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (LRHA) موجب کاهش  $14/9$  درصدی جرم مخصوص خشک بیشینه و افزایش  $24/11$  درصدی رطوبت بهینه تراکم می‌شود. پیشتر گفته شد که با افزودن آهک، به علت فلوکوله شدن ذرات خاک، حداکثر جرم مخصوص خشک کاهش می‌یابد. این روند کاهشی با افزودن خاکستر پوسته برنج شدیدتر می‌شود که علت آن را می‌توان به جرم مخصوص کمتر خاکستر پوسته برنج ( $G_s=1/83$ )، در

جدول ۵- ضریب همبستگی بین درصد LRHA و مولفه‌های تراکم

$W_{opt}$	$\rho_d \max$	مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک
$0/994^{**}$	$-0/97^*$	ضریب همبستگی پیرسون
$0/006$	$0/030$	Sig. (2-tailed)
۴	۴	تعداد

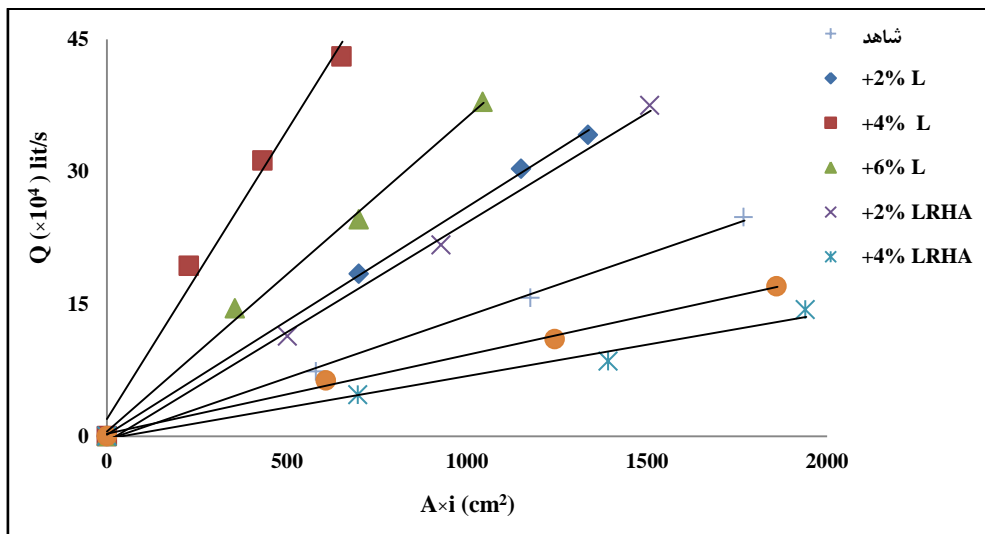
\*\* معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد؛ \* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

جدول ۶- خصوصیات نمونه‌های متراکم در مدل فیزیکی

ماده افزودنی	درصد	مقدار رطوبت وزنی نمونه (درصد)	جرم مخصوص خشک (گرم بر سانتی مترمکعب)	جرم مخصوص خشک بیشینه (گرم بر سانتی مترمکعب)	$RC = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}}$
- (نمونه شاهد)	۰	۱۳/۲	۱/۸۱	۲/۰۱	۰/۹۰
(L)	۲	۱۴/۷	۱/۷۱	۱/۸۹	۰/۹۰
	۴	۱۵/۵	۱/۶۶	۱/۸۵	۰/۹۰
	۶	۱۶/۱	۱/۶۳	۱/۸۱	۰/۹۰
(LRHA)	۲	۱۵/۸	۱/۶۶	۱/۸۵	۰/۹۰
	۴	۱۷/۷	۱/۵۸	۱/۷۶	۰/۹۰
	۶	۱۸/۴	۱/۶۳	۱/۷۱	۰/۹۰

پیروی می‌کنند. همچنین، عدد رینولدز برای تمام آزمایش‌ها بسیار کوچک‌تر از یک است ( $2 \times 10^{-6} < Re < 8 \times 10^{-3}$ ) که آرام بودن جریان را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۷، برای هر نمونه نمودار دبی خروجی (Q) در مقابل حاصل ضرب گرادیان در سطح مقطع جریان (A×i) خطی با شیب منحصر به فرد است که نشان می‌دهد آزمایش‌ها از قانون دارسی

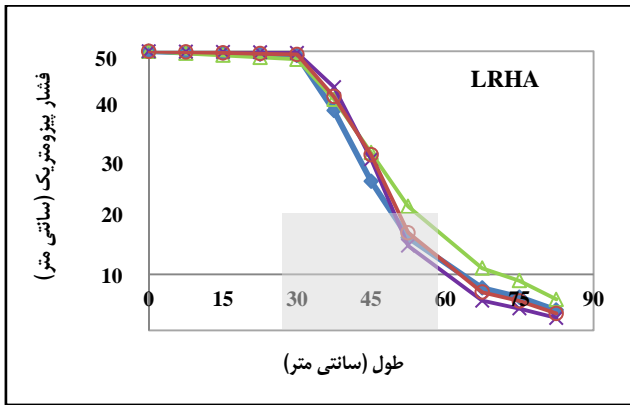


شکل ۷- دبی در مقابل A×i برای نمونه‌های مختلف

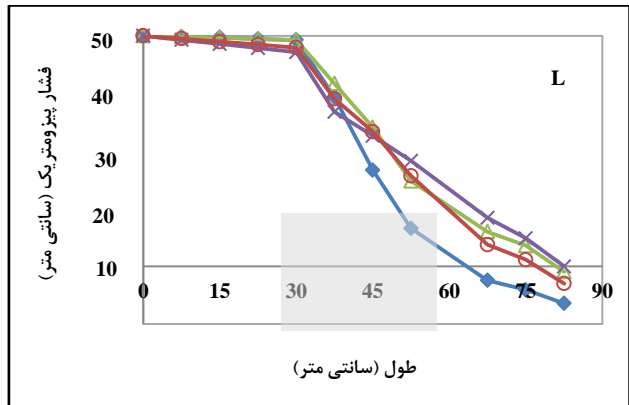
مشخص است در برخی از آزمایش‌ها مقطع به صورت کاملاً پر عمل نمی‌کند، از این رو برای این آزمایش‌ها از میانگین سطح مقطع در رابطه دارسی استفاده شد. در این تحقیق خروج آب فاقد ماسه و ذرات ریزدانه در حین آزمایش برای تمام نمونه‌ها، روی ندادن فرسایش داخلی را تایید می‌کند.

شکل‌های ۸ تا ۱۳ تراز پیزومتریک را برای افزودن ۲، ۴ و ۶ درصد آهک (L) و مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (LRHA) نشان می‌دهد. در این شکل‌ها قسمت خاکستری رنگ، حد فاصل ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر از ابتدای مدل روی محور افقی، نمونه متراکم است. همان‌طور که

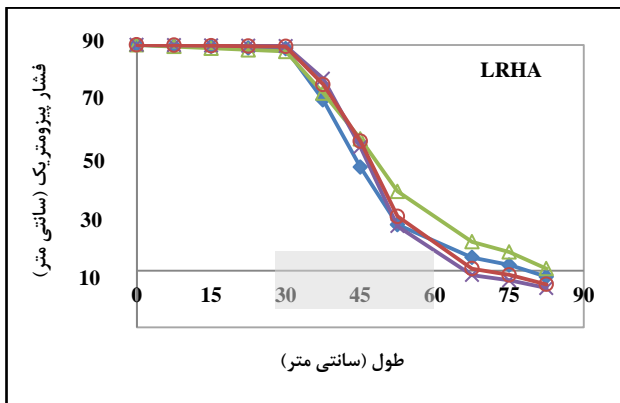
تأثیر مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب...



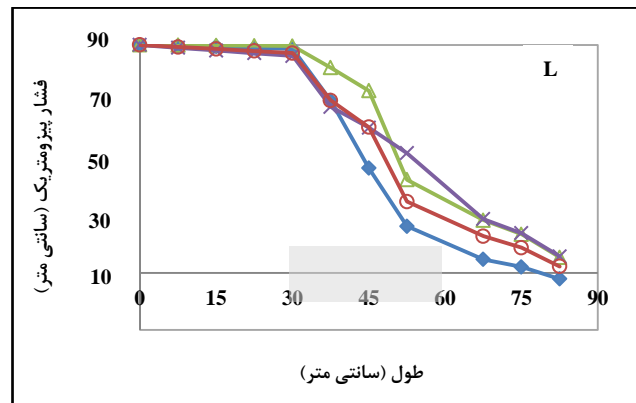
شکل ۹- فشار پیزومتريک در مقابل درصدهای مختلف مخلوط آهک و خاکستر تحت تراز ۰/۴ متر



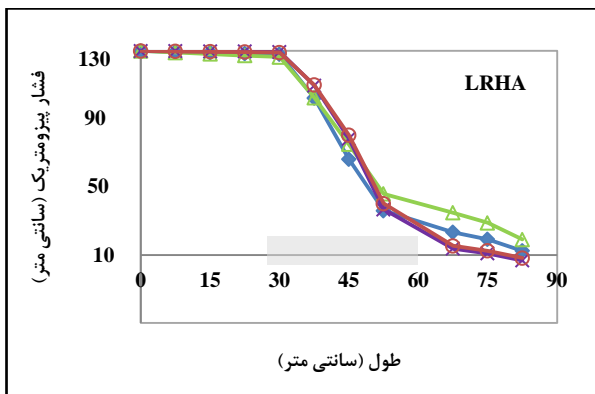
شکل ۸- فشار پیزومتريک در مقابل درصدهای مختلف آهک تحت تراز ۰/۴ متر



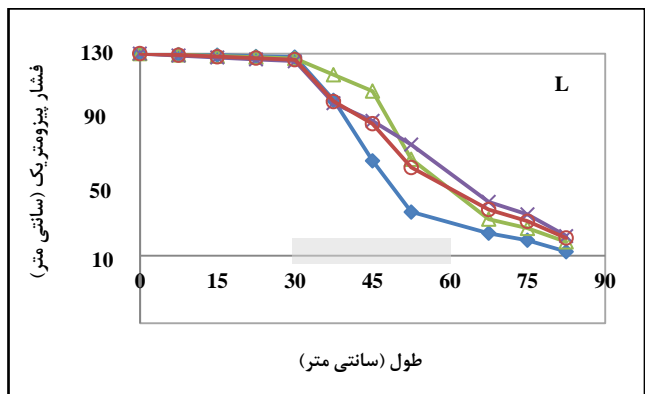
شکل ۱۱- فشار پیزومتريک در مقابل درصدهای مختلف مخلوط آهک و خاکستر تحت تراز ۰/۸ متر



شکل ۱۰- فشار پیزومتريک در مقابل درصدهای مختلف آهک تحت تراز ۰/۸ متر



شکل ۱۳- فشار پیزومتريک در مقابل درصدهای مختلف مخلوط آهک و خاکستر تحت تراز ۱/۲ متر



شکل ۱۲- فشار پیزومتريک در مقابل درصدهای مختلف آهک تحت تراز ۱/۲ متر

راهنما	درصد افزودنی	نماد	نمونه متراکم
۰ (شاهد)	۰	◆	
۲	۲	△	
۴	۴	×	
۶	۶	○	

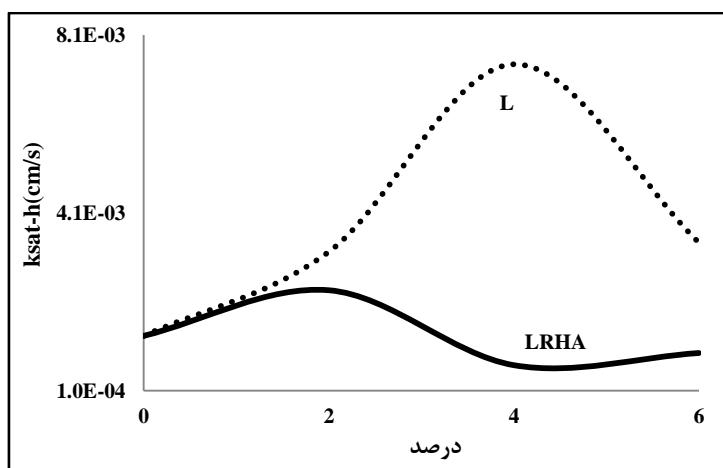
برای هر تراز ورودی مقادیر ضریب آبگذری و میانگین آن به عنوان ضریب آبگذری اشباع در جدول اشباع افقی به کمک رابطه داری محاسبه ۷ آورده شده است.

جدول ۷- ضریب آبگذری افقی اشباع ( $k_{sat-h}$ ) برای درصدهای مختلف مواد افزودنی

$(k_{sat-h})$ ( $\times 10^4$ ) (سانتی‌متر بر ثانیه)	هد آب (متر)			درصد	ماده افزودنی
	۱/۲	۰/۸	۰/۴		
۱۳/۳۳	۱۴/۰۵	۱۳/۳۰	۱۲/۶۴	۰	- (نمونه شاهد)
۳۲/۲۳	۲۵/۵۹	۲۸/۹۳	۴۲/۱۸	۲	(L)
۷۴/۴۳	۶۵/۹۰	۷۲/۰۶	۸۵/۳۴	۴	
۳۴/۳۲	۳۶/۳۸	۲۵/۹۴	۴۰/۶۳	۶	
۲۳/۵۹	۲۴/۸۷	۲۳/۳۳	۲۲/۵۸	۲	(LRHA)
۶/۷۳	۷/۳۸	۶/۱۰	۶/۷۱	۴	
۹/۴۷	۹/۱۴	۸/۸۳	۱۰/۴۴	۶	

بر ثانیه). با افزایش میزان آهک از ۴ تا ۶ درصد نفوذپذیری کاهش می‌یابد و به مقدار ۰/۰۰۳۴۳ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد، اما همچنان بیشتر از ضریب آبگذری شاهد است و از این رو می‌توان این گونه بیان کرد که افزودن آهک تا ۶ درصد وزن خاک خشک مشاهده می‌شود (از ۰/۰۱۳۳ سانتی‌متر بر ثانیه به ۰/۰۰۷۷۴ سانتی‌متر اشباع دارد.

در شکل ۱۴ منحنی خط چین بالا، تغییرات ضریب آبگذری اشباع را نسبت به میزان آهک اضافه شده را نشان می‌دهد. در این نمودار افزایش قابل توجهی در ضریب آبگذری نمونه با افزایش آهک به میزان ۴ درصد وزن خاک خشک مشاهده می‌شود (از ۰/۰۱۳۳ سانتی‌متر بر ثانیه به ۰/۰۰۷۷۴ سانتی‌متر



شکل ۱۴- تأثیر مقدار مواد افزودنی بر ضریب آبگذری اشباع افقی

مقدار ۴ درصد آهک است (شکل ۱۴). برای مقادیر بیشتر، کاهش آبگذری می‌تواند متأثر از مقادیر اضافی آهک موجود در خاک جهت واکنش‌های بلندمدت پوزولانی

با افزودن آهک به خاک در مدت‌زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی ایجاد می‌شود که نتیجه آن افزایش تخلخل بین توده‌ای خاک و افزایش اولیه ضریب آبگذری اشباع تا

برخی از منافذ خاک می شود و تا حدی تخلخل را کاهش می دهد. با افزودن ۲ درصد ماده LRHA، دو فرآیند ذکر شده در خلاف هم عمل می کنند که نتیجه آن افزایش ضریب آبگذری است. با توجه به مقایسه دو منحنی برای ۲ درصد وزنی ماده افزودنی، آبگذری در حالتی که آهک به تنهایی به نمونه افزوده شده بیشتر از حالتی است که آهک و خاکستر توأم با هم اضافه می شود زیرا در حضور آهک، فقط واکنش تبادل کاتیونی (واکنش اول) رخ می دهد و به علت پایین بودن مقدار رس واکنش پوزولانی (واکنش دوم) رخ نمی دهد. طبق تحقیقات بنت (Bengt, 1993)، حد پایین درصد رس برای ایجاد واکنش های پوزولانی ۲۰ درصد می باشد. از این رو، فلوکوله شدن فرایندی است تأثیرگذار که در جهت افزایش آبگذری عمل می کند، اما در حالتی که آهک و خاکستر توأم به نمونه اضافه می شود واکنش پوزولانی تأثیر فلوکوله شدن ذرات را تعدیل می کند و در نتیجه آبگذری نسبت به نمونه شاهد مقدار کمتری افزایش می یابد.

در مقادیر بیشتر LRHA، واکنش پوزولانی، ژل CSH بیشتری تولید می شود که نتیجه آن کاهش آبگذری است. از طرفی، وجود مقادیر اضافی خاکستر و آهک ممکن است به پر شدن منافذ و کاهش آبگذری کمک کند. لذا می توان نتیجه گرفت افزودن مخلوط ۴ درصد وزنی از آهک و خاکستر پوسته برنج، بیشترین تأثیر در کاهش ضریب آبگذری اشباع را دارد.

### نتیجه گیری

در سازه های ذخیره آب ضریب آبگذری از مهم ترین مؤلفه های موثر در عملکرد است. در این تحقیق با تراکم تحت ۳ تراز ثابت آب در بالادست، تأثیر افزودن آهک و مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (با نسبت ۱:۱) در آبگذری نمونه بررسی شد. نتایج بررسی نشان می دهد که افزودن آهک و مخلوط پوسته برنج و آهک موجب کاهش

باشد. در واقع تیمار خاک با آهک بیش از این مقادیر باعث می شود آهک اضافی منافذ خاک را اشغال کند و با گذشت زمان در صورت مساعد بودن شرایط (دما، کیفیت کلسیم، خصوصیت بازی و اسیدی محیط (pH) و درصد سیلیکات و آلومینات در کانی خاک) در واکنش پوزولانی شرکت کند. وجود آهک اضافه به علت اشغال کردن منافذ کاهش آبگذری را در بر داشته است. همچنین، از آنجا که مقدار رس در نمونه کم است، کاهش در آبگذری می تواند به علت واکنش کربناته شدن و رسوب کربنات کلسیم در منافذ خاک اتفاق بیفتد. در این واکنش، آهک آزاد با گاز کربنیک هوا ترکیب و موجب بازگشت آهک به حالت غیرفعال سنگ آهک می شود که برخی منافذ خاک را اشغال خواهد کرد. لازم است گفته شود که روند مشاهده شده تغییر ضریب آبگذری اشباع در برابر مقدار آهک آبدیده با روند اعلام شده در تحقیقات کسیم و چو (Kassim & Chow, 2000)، گالوانو و همکاران (Galvao et al., 2004) و خطاب و همکاران (Khattab et al., 2008) هم خوانی دارد.

### مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک (LRHA)

در شکل ۱۴ (خط پیوسته پایین) تأثیر افزودن مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب آبگذری اشباع را نشان می دهد. با افزودن ۲ درصد LRHA، آبگذری به بیشترین حد خود یعنی ۰/۰۲۴ سانتی متر ثانیه، می رسد؛ با افزایش مقدار LRHA، آبگذری روندی کاهشی نشان می دهد. در ارتباط با تأثیر توأم آهک و خاکستر پوسته برنج دو فرایند را می توان دید:

۱- واکنش تبادل کاتیونی که منجر به فلوکوله شدن، افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش آبگذری است.

۲- واکنش پوزولانی به علت افزودن توأم آهک و خاکستر پوسته برنج در حضور رطوبت و تشکیل ماده سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH). این ماده ژل مانند باعث انسداد

اما افزودن ۴ درصد خاکستر پوسته برنج به آهک، آبگذری را تا حدی کاهش می‌دهد و بر اساس هدف پروژه قادر است نفوذناپذیری مناسبی را تأمین نماید. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، زمانی که منابع قرضه مناسبی برای ساخت دیواره آبنند سدهای زیرزمینی در دسترس نیست، افزودن ۴ درصد مخلوط آهک و خاکستر پوسته برنج (با نسبت ۱:۱) به مواد آبرفتی موجود، آبگذری بدنه سد زیر زمینی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. پیشنهاد می‌شود تأثیر استفاده از مواد جدیدتر مانند مواد نانو شامل (نانو رس، نانو سیلیس و نانو منگنز و ...)، خاکستر لجن فاضلاب و ... در آبگذری خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده به همراه تأثیرات زیست‌محیطی آنها بررسی شود.

حداکثر جرم مخصوص خشک و افزایش رطوبت بهینه تراکم می‌گردد. همچنین افزودن آهک، آبگذری نمونه غیرچسبنده را افزایش می‌دهد و برای درصدهای متفاوت آهک همواره آبگذری بیشتر از مقداری است که در شاهد دیده می‌شود. افزودن خاکستر پوسته برنج به آهک مانند کاتالیزور عمل می‌کند و موجب ایجاد واکنش پوزولانی می‌شود. در این تحقیق، کمترین مقدار آبگذری ناشی از افزودن مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک در مقدار ۴ درصد وزنی اتفاق افتاده و ۵۰ درصد مقدار اولیه است. بر اساس نتایج این تحقیق، افزودن آهک به عنوان تثبیت‌کننده به خاک غیرچسبنده در مواردی که پایین بودن آبگذری دارای اهمیت بالایی است توصیه نمی‌شود.

## قدردانی

از مدیریت و کارشناسان محترم دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به دلیل همکاری‌های ارزشمندی که برای اجرای این پروژه پژوهشی مبذول نمودند، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

## مراجع

- Adama, F., Nelson, J. and Iqbalb, A. 2012. The utilization of rice husk silica as a catalyst. Catal. Today. 190(1): 2-14.
- Alhassan, M. 2008. Permeability of lateritic soil treated with lime and rice husk ash. Assumption University J. Thai. 12(2): 115-120.
- An Van, V. T., Robler, C., Bui, D. D. and Ludwig, H. M. 2013. Mesoporous structure and pozzolanic reactivity of rice husk ash in cementitious system. Constr. Build. Mater. 43, 208-216.
- Bengt, B. 1993. Ground Improvement. John Wiley & Sons Pub.
- Benson, C. H., Zhai, H. and Wang, X. 1994. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. ASCE J. Geotech. Eng. 120(2): 366-387.
- Choobbasti, A. J., Ghodrat, H., Vahdatirad, M. J., Firouzian, S., Barari, A., Torabi, M. and Bagherian, A. 2010. Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime. Front. Earth Sci. China. 4(4): 471-480.
- Galvao, T. C., Elsharief, A. and Simoes, G. F. 2004. Effects of lime on permeability and compressibility of two tropical residual soils. J. Environ. Eng. 130(8): 881-885.

- Geiman, C. M. 2005. Stabilization of soft clay sub grades in Virginia phase I laboratory study. M. Sc. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.
- Kassim, K. A. and Chow, S. H. 2000. Consolidation characteristics of lime stabilised soil. J. Kejuruteraan Awam. 12(1): 31-42.
- Khattab, S. A. A., Al-Juari, K. A. K. and Al-Kiki, I. 2008. Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime. Al-Rafidain Eng. 16(1): 102-116.
- Mallela, J., Harold Von Quintus, P., Smith, K. L. and Consultants, E. 2004. Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. The National Lime Association. Arlington, Virginia, USA.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. P. and Bussiere, B. 2002. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. Geotech. Geol. Eng. 20(3): 235-259.
- Mehta, P. K. 1987. Natural Pozzolans: Supplementary Cementing Materials in Concrete. CANMET Special Pub.
- Milburn, J. P. and Parsons, R. 2004. Performance of soil stabilization agents. Report KU-01-8. Kansas Department of Transportation. Topeka, KS.
- Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. A. K. and Kentgens, A. P. M. 2008. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. Cement Concrete Res. 38(6): 861-869.
- Nguyen, V. T. 2011. Rice husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete. Ph. D. Thesis. University of Delft. The Netherlands.
- Onitsuka, K., Modmoltin, C. and Kouno, M. 2001. Investigation on microstructure and strength of lime and cement stabilized Ariake clay. Rep. Fac. Sci. Eng. Saga Univ. 30(1): 49-63.
- Osinubi, J. 1998. Permeability of lime-treated lateritic soil. J. Transport. Eng-J. ASCE. 124, 465-469.
- Rajasekaran, G. and Narasimha, R. S. 2002. Compressibility behavior of lime-treated marine clay. Ocean Eng. 29(5): 545-559.
- Ramezani-pour, A. A., Mahdikhani, M. and Ahmadibeni, Gh. 2009. The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes. Int. J. Civil Eng. 7(2): 83-91.
- Shamsaei, A. 2012. Hydraulic of Flow in Porous Media (Vol. II). Amirkabir University Press. (in Persian)
- Singh, J., Kumar, A., Jain, R. and Khullar, N. 2008. Effect of lime on properties of soil. Proceeding of the 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Anjuran Goa, India.
- Tedesco, D. V. 2006. Hydro-mechanical behavior of lime-stabilised soils. Ph. D. Thesis. University of Cassino. Cassino, Italy.
- Tran, T., Cui, Y., Tang, A., Audiguier, M. and Cojean, R. 2014. Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Hericourt clay. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 6(5): 399-404.

## **Mixture of Lime and Rice Husk Ash influence on Saturated Hydraulic Conductivity of Soil with SM Classification**

**M. Tajbakhsh<sup>\*</sup>, M. Fathi-Moghadam and N. Ebrahimi**

<sup>\*</sup> Corresponding Author: Graduated Student, Collage of Water Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. Current Adress: Regional Water Authority, Kermanshah, Iran. Email: tajbakhsh-md@yahoo.com  
Received: 13 November 2016, Accepted: 13 March 2016

One of the most widely used geotechnical parameters is hydraulic permeability, which is affected by pore distribution and surface area of soil particles and any parameters cause a major change in hydraulic permeability. In the present study the effect of adding hydrated lime and mixture of rice husk ash and hydrated lime at the ratio of 1:1 on horizontal saturated hydraulic conductivity was examined by using of sample physical model. Mixtures of lime and rice husk namely: 2, 4 and 6 % by weight of dry soil) were added to a non-cohesive sample, and hydraulic permeability was tested after 28 days. The results showed that addition of lime to the soil increased its hydraulic conductivity. Addition of 4 % mixtuer yielded the maximum hydraulic conductivity. Addition of more lime decreased the hydraulic conductivity, although greater than hydraulic conductivity of control sample. Results showed that rice husk ash and lime mixture acts as a catalyst and accelerates the pozzolanic reaction, which in turn causes a partial decrease in the hydraulic conductivity of sample. These results are attributed to effects of two processes of cation exchange and pozzolanic reaction between lime and rice husk ash on the hydraulic conductivity.

**Keywords:** Conductivity Horizontal Saturated Hydraulic, Lime, Non-Cohesive Soil, Rice Husk Ash