

ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های رسی متخلخل و تاثیر آن بر توزیع رطوبت خاک

حجت قربانی واقعی^۱، حسینعلی بهرامی^{۲*}، پروین علیزاده^۳ و فرزین نصیری صالح^۴

چکیده

یکی از روش‌های سنتی تأمین رطوبت خاک در مزارع کوچک و متوسط مقیاس مناطق خشک و نیمه خشک استفاده از کپسول‌های رسی متخلخل است. ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های رسی متخلخل تحت تاثیر نوع رس، درصد رس، درصد شن، میزان آهک، ضخامت دیواره کپسول‌های رسی، دمای پخت، زمان پخت و فشار هیدروستاتیکی قرار دارد. تحقیق حاضر به ارزیابی هدایت هیدرولیکی و آبدهی اشباع کپسول‌های رسی متخلخل متأثر از دمای پخت، زمان پخت و فشار هیدروستاتیکی پرداخته است. ماده اولیه در ساخت کپسول‌های رسی متخلخل، از خاک آهکی روستای نصرآباد گرگان تهیه شده است و با افزودن ۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ گرم شن نرم در هر کیلوگرم این خاک به ترتیب کپسول‌های رسی متخلخل گرگان-۰، گرگان-۲۰۰، گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ ساخته شد. نتایج تحقیق نشان داد که زمان بهینه پخت کپسول‌های رسی متخلخل با افزایش دمای پخت کاهش یافت. همچنین آبدهی کپسول‌های رسی با افزایش دمای پخت افزایش نشان داد. رابطه بین فشار هیدروستاتیکی و آبدهی قطعات سفالی پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که این رابطه برای کپسول‌های رسی گرگان-۰ و گرگان-۲۰۰ خطی و برای گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ غیر خطی است. در حالی که شکل خیسیدگی در خاک از چنین قطعاتی به علت آبدهی کم تقریباً کروی است.

واژه‌های کلیدی: خاک آهکی، دمای پخت، زمان پخت، فشار هیدروستاتیکی، کپسول رسی متخلخل.

ارجاع: قربانی واقعی ح. بهرامی ح. علی‌زاده پ و نصیری صالح ف. ۱۳۹۰. ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های رسی متخلخل و تاثیر آن بر توزیع رطوبت خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۹): ۱۳۱-۱۴۰.

۱- استادیار گروه منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی کنبد کاووس

۲- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانشیار گروه سرامیک، دانشگاه تربیت مدرس

۴- استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسئول: bahramih@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۰۷

مقدمه

عمده نیاز آبی گیاهان در کشور ایران که در منطقه خشک و نیمه خشک واقع شده است از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. عدم مدیریت صحیح در مصرف منابع آب زیرزمینی موجب کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش تجمع نمک در سطح خاک و شور شدن بسیاری از خاک‌های کشور شده است. ایجاد رطوبت بهینه و جلوگیری از هدرروی آب به طریق نفوذ عمقی و همچنین کاهش تلفات آب ناشی از تبخیر از سطح خاک از جمله مسایلی است که دانشمندان را بر آن داشته است تا به ارایه روش‌های جدید و مقرون به صرفه در مدیریت صحیح آب آبیاری دست بزنند (سیال و سکیچ، ۲۰۰۹؛ جیشنگ و همکاران، ۲۰۰۴). بدین منظور، در سالیان اخیر رویکرد گسترده‌ای به سمت استفاده مجدد از سفال به صورت منبع تغذیه نقطه‌ای و یا خطی برای طراحی روش‌های بهینه در تأمین رطوبت خاک ایجاد شده است (بینبرج ۲۰۰۱). سابقه استفاده از سفال‌های خمره‌ای در تأمین آب مورد نیاز گیاه در ایران به بیش از ۱۰۰۰ سال بر می‌گردد (باستانی، ۱۳۸۲). در حال حاضر استفاده از قطعات سفالی برای تأمین رطوبت مورد نیاز گیاهان در برخی از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه خشک همچون ایران، پاکستان، هند، اردن و چند کشور آفریقای جنوبی به صورت انفرادی و یا سیستماتیک به صورت محدود استفاده می‌شود (بینبرج، ۲۰۰۱). وزن زیاد، اندازه بزرگ، شرایط حمل و نقل و کارگذاری نسبتاً وقت‌گیر و سخت آن در اراضی زراعی از دلایل عمده‌ی عدم تمایل کشاورزان و مسئولان در استفاده و ترویج این روش مطرح می‌شود (ابوذریک و همکاران، ۲۰۰۶).

روش تأمین رطوبت خاک با قطعات سفالی کوچک (کپسول‌های رسی متخلخل) یکی از روش‌هایی است که می‌تواند در مزارع کوچک و متوسط مقیاس مناطق خشک و نیمه خشک مورد استفاده قرار گیرد که البته در ایران مطالعه چندانی روی آن صورت نگرفته است (باستانی، ۱۳۸۲). بهرامی و همکاران (۲۰۱۰) با طراحی مدل فازی توزیع رطوبت خاک به مطالعه توزیع رطوبت خاک از کپسول‌های رسی متخلخل استوانه‌ای شکل در خاک لوم رسی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مدل فازی توزیع

رطوبت خاک با فازی گر سینگلتون، موتور استنتاج حداقل ممدانی و فازی زدای مرکز ثقل قادر است به طور نسبتاً دقیقی عمق و شعاع خیسیدگی را محاسبه کند. همچنین نتایج آنها نشان داد که نسبت عمق خیسیدگی به شعاع خیسیدگی در فشار هیدروستاتیکی ۲۵ کیلوپاسکال با آبدهی کم (۶۰ تا ۲۲۰ سانتی‌متر مکعب بر ساعت) برابر ۱/۶۳ است در حالی که این نسبت برای آبدهی بالا (۳۰۰ تا ۶۵۰ سانتی‌متر مکعب بر ساعت) برابر ۳/۲۱ بود. در نتیجه، با افزایش نرخ آبدهی قطعات سفالی در یک فشار هیدروستاتیکی ثابت، عمق خیسیدگی افزایش نشان داده است. درحالی که مستندات علمی موید آن است که در قطره چکانها با افزایش نرخ آبدهی بر میزان شعاع خیسیدگی افزوده می‌شود (نیلم و راجپوت، ۲۰۰۸). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قطعات سفالی در خاک رفتار هیدرولیکی متفاوتی نسبت به قطره چکانها دارند (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۰).

تحقیقات نشان داده است که هدایت هیدرولیکی لوله‌های رسی متخلخل یکی از فاکتورهای مهم در تعیین شعاع و عمق خیسیدگی خاک است (سیال و سکیچ، ۲۰۰۹). عوامل زیادی در میزان تراوایی قطعات سفالی نقش دارند. نوع رس، ضخامت دیواره قطعات سفالی، درصد رس، درصد شن، درجه حرارت پخت، میزان آهک و زمان پخت در قطر خلل و فرج و محیط متخلخل قطعات سفالی موثر است و در نتیجه بر میزان تراوش قطعات سفالی نیز موثر خواهند بود (الامیره، ۲۰۰۶؛ فریبرگ و شوارتز، ۲۰۰۷؛ کالترن، ۲۰۰۴). افزون بر این عوامل، فشار هیدروستاتیکی و تبخیر و تفرق نیز میزان تراوش قطعات سفالی را تحت تاثیر قرار می‌دهند (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۰؛ نیک و همکاران، ۲۰۰۸؛ لیانگ، ۲۰۰۹). در تحقیق حاضر با طراحی و ساخت قطعات سفالی کوچک استوانه‌ای شکل با قابلیت تراوایی متفاوت امکان احیای مجدد سیستم آبیاری سفالی در راستای تأمین رطوبت بهینه خاک در حد ظرفیت زراعی فراهم شده است. به عبارت دیگر برای کاربردی کردن آبیاری سفالی یا به روز رسانی این تکنیک در مزارع و درختان بوته‌ای و جلوگیری از مصرف زیاد آب در هر بار آبیاری لازم است با تغییر عوامل موثر بر آبدهی قطعات سفالی، قطعاتی با آبدهی‌های متفاوت تولید شود. لذا بررسی توزیع رطوبت از

گرم شن ریز در هر کیلوگرم خاک آهکی روستای نصرآباد گرگان مخلوط گردید. با این روش، ۵ نوع مواد اولیه جدید برای ساخت ۵ نوع کپسول رسی متخلخل به ترتیب به نام‌های گرگان-۰، گرگان-۲۰۰، گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ فراهم شد. هر یک از مواد، جداگانه در داخل دستگاه خمیرگیر (شکل ۱) با آب همآوری شدند. سپس گل‌ها در داخل نایلون به مدت ۳-۵ روز در دمای ۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. این امر به همآوری بهتر گل کمک می‌کند. کپسول‌های رسی متخلخل (شکل ۲)، استوانه‌ای به طول ۶ سانتی‌متر، قطر خارجی ۳/۵ سانتی‌متر و ضخامت دیواره‌ی یک سانتی‌متر است. برای تولید کپسول‌های رسی متخلخل از دستگاه پرس گل استفاده شد (شکل ۳).

برای تعیین بهترین دمای پخت، تغییرات افت وزنی و جرم ویژه‌ی ظاهری نسبت به دماهای پخت مورد بررسی قرار گرفت. خروج آب هیدروکسیدی از دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد با تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات رس شروع می‌شود (نیومن، ۱۹۸۷). لذا دمای پخت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای پایه پخت برای بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های رسی انتخاب شد. بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های رسی در دماهای پخت بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل پدیده سینترینگ ذرات خاک و کاهش تخلخل جسم (بینبریج، ۲۰۰۱؛ باستانی، ۱۳۸۲) مورد بررسی قرار نگرفت. برای تعیین زمان بهینه پخت، از منحنی درصد افت وزنی کپسول‌های رسی نسبت به دمای پخت استفاده شد. لذا میزان افت وزنی کپسول‌های رسی متخلخل در زمان‌های ۲، ۶، ۸، ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ساعت بررسی شد.

کپسول‌های رسی با آبدی‌های متفاوت یکی دیگر از اهداف مورد نظر در این تحقیق است.

مواد و روشها

ویژگی خاک زراعی

برای بررسی نحوه توزیع رطوبت، به میزان مورد نیاز، خاک با بافت لوم رسی از مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهیه شد. جرم ویژه‌ی ظاهری، درصد ماده آلی، و بافت این خاک در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و بودر، ۱۹۸۶)، جرم ویژه‌ی ظاهری به روش سیلندری (کولی، ۱۹۹۳) و مقدار ماده آلی به روش سوزاندن تر (نلسون و سامرز، ۱۹۸۲) تعیین شد.

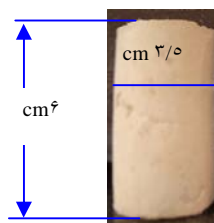
مقدار ۴۵۰ کیلوگرم از این خاک در کیسه‌های نایلونی ۳۰ کیلوگرمی به آزمایشگاه انتقال یافت. خاک‌ها پس از هوا - خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری به داخل سطل بزرگی به قطر ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر انتقال داده شد. جرم ویژه‌ی ظاهری خاک هوا خشک به کمک کوبه فلزی معادل ۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب شد. توزیع رطوبت از کپسول‌های رسی در عمق ۱۰ سانتی‌متری چنین خاکی و با اعمال فشارهای هیدروستاتیکی ۲۵، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال بررسی شد.

ساخت و تولید کپسول‌های رسی متخلخل

ماده اولیه برای تولید کپسول‌های رسی متخلخل، خاک آهکی روستای نصرآباد گرگان با بافت لوم رسی سیلتی است. برای تولید کپسول‌های رسی متخلخل با ویژگی‌های هیدرولیکی متفاوت، مقادیر ۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰



شکل ۳- خروجی دستگاه پرس گل



شکل ۲- کپسول رسی متخلخل



شکل ۱- دستگاه خمیرگیر

ارزیابی تغییرات آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل در هریک از فشارهای هیدروستاتیکی ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال از عامل ضریب تغییرات (CV) استفاده شد. رابطه آن به صورت زیر است:

$$C.V.(%) = (S/\bar{Q}) \times 100 \quad (1)$$

که در این معادله S انحراف معیار آبدهی کپسول‌های رسی در یکی از فشارهای هیدروستاتیکی ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ کیلوپاسکال و \bar{Q} متوسط آبدهی کپسول‌های رسی در ۳۰ نمونه می‌باشد. این ضریب نشان دهنده‌ی کیفیت تولید کپسول‌های رسی است و هر چه مقدار آن کمتر باشد یکنواختی آبدهی قطعات سفالی را در زمان‌های کوتاه نشان می‌دهد. از آنجا که زمان‌های آبیاری به وسیله این قطعات طولانی مدت و به ۴۸ ساعت می‌سد، لذا از میزان حساسیت این پارامتر در تعیین درجه کیفی کپسول‌های رسی متخلخل نسبت به قطره چکان‌ها کاسته می‌شود و در عمل ضریب تغییرات آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل که کمتر از ۱۲ درصد است برای تأمین رطوبت مورد نیاز گیاهان در خاک مناسب قلمداد می‌شود. شایان ذکر است قطره چکان‌ها در مدت زمان کم میزان آب زیادتری از خود عبور می‌دهند. لذا یکنواختی توزیع آب آنها در کوتاه مدت از اهمیت بیشتری برخوردار است و این ضریب برای آنها به کمتر از ۴ مطلوب است.

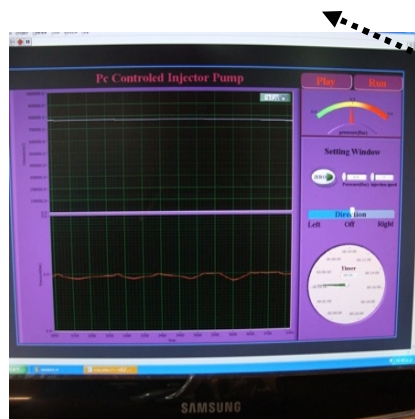
اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی کپسول‌ها

آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل، پس از سه روز غوطه‌ور ماندن آنها در آب به کمک دستگاه اتوماسیون آبدهی-فشار در فشارهای هیدروستاتیکی ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد (شکل ۴). این دستگاه نرخ آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل را به روش حجمی و با ثبت زمان با استفاده از سیستم رایانه و با استفاده از دو سیلندر تزریق آب اندازه‌گیری می‌کند. سیلندرها تزریق آب امکان بررسی توزیع رطوبت خاک در بازه‌های زمانی طولانی را فراهم می‌کند. شایان ذکر است آب شرب دانشکده کشاورزی برای ساخت قطعات سفالی و یا تزریق در دستگاه اتوماسیون دبی فشار، با هدایت الکتریکی کمتر از ۲ دسی زیمنس بر متر و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار گرفت. تعیین شکل پیاز رطوبتی خاک لوم رسی، به کمک این دستگاه در آزمایشگاه انجام شد. همچنین اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع کپسول‌های رسی متخلخل با مشخص بودن آبدهی کپسول‌ها و به روش بار ثابت (ابودریک و همکاران، ۲۰۰۶) صورت گرفت.

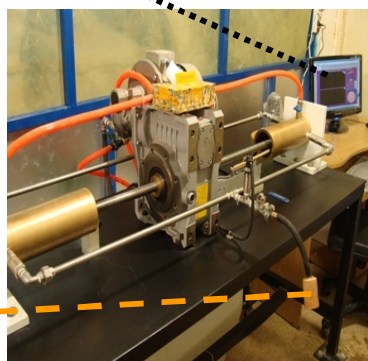
ضریب تغییرات آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل

در ارزیابی کمی آبدهی قطره چکان‌ها و لوله‌های متخلخل از ضریب تغییرات آبدهی استفاده می‌شود (تیلاک و سوتون، ۱۹۹۸؛ سلیم و همکاران، ۲۰۰۲). بنابراین برای

بزرگنمایی صفحه نمایش برنامه



کپسول رسی متخلخل



شکل ۴- دستگاه اتوماسیون دبی- فشار .

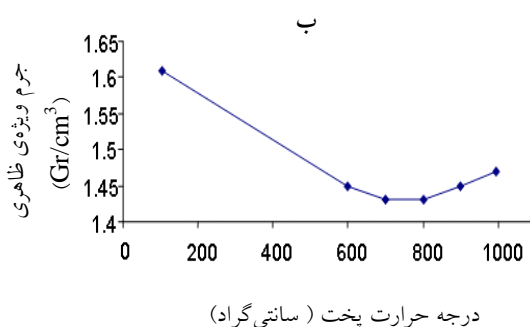
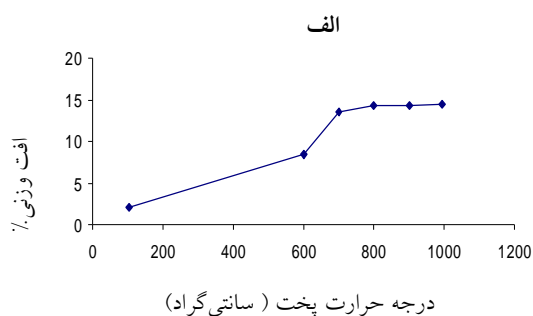
از ۲۴ ساعت پخت نشان داد که با افزایش دمای پخت بر میزان افت وزنی قطعات سفالی افزوده شد. همچنین جرم ویژه ظاهری کپسول‌ها از دماهای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد روند کاهشی و از ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد روند افزایشی داشت. شکل ۵- الف نشان می‌دهد مناسب‌ترین دمای پخت برای بررسی چگونگی تغییر ساختار ماده اولیه ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد بود. زیرا در این دما منحنی افت وزنی با افزایش درجه حرارت به یک ثبات نسبی نزدیک شده است. بررسی نتایج درصد افت وزنی کپسول‌ها در تعیین زمان بهینه پخت نشان داد که بهترین زمان پخت کپسول‌های رسی متخلخل در دو دمای ۶۰۰ و ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۲ و ۸ ساعت می‌باشد (شکل ۶).

شایان ذکر است مدت زمان انجام این تحقیق به دلیل تعیین نوع خاک مناسب برای ساخت کپسول‌های رسی متخلخل، ساخت، پخت کپسول‌های رسی و نیز اندازه‌گیری آبدهی کپسول‌ها با دستگاه اتوماسیون دبی- فشار به مدت ۲/۵ سال (تیرماه ۱۳۸۷ تا بهمن ۱۳۸۹) به طول انجامید. شبیه‌سازی و ساخت دستگاه اتوماسیون دبی فشار در این بازه شش ماه طول کشید.

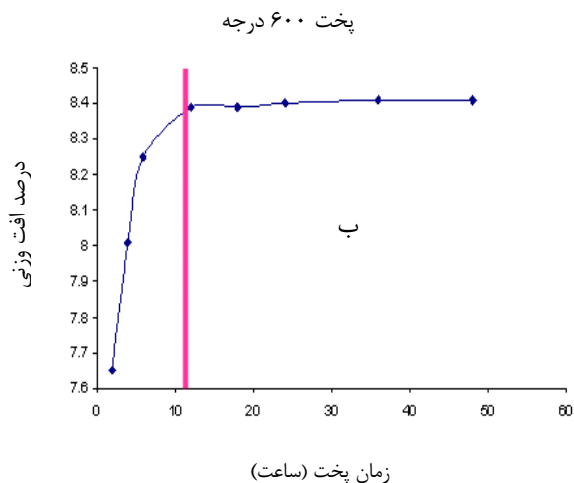
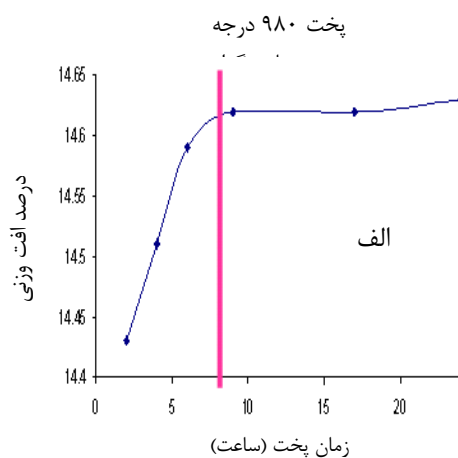
نتایج و بحث

تعیین دمای پخت و زمان بهینه پخت کپسول

دما و زمان پخت در تغییر ساختار شیمیایی کانی‌ها و ذرات ثانویه خاک و متعاقباً بر ویژگی‌های فیزیکی کپسول‌های رسی متخلخل موثر است. نتایج تست افت وزنی در دماهای بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بعد



شکل ۵- تغییرات درصد افت وزنی (الف) و جرم ویژه ظاهری (ب) کپسول‌های رسی متخلخل در برابر درجه حرارت.



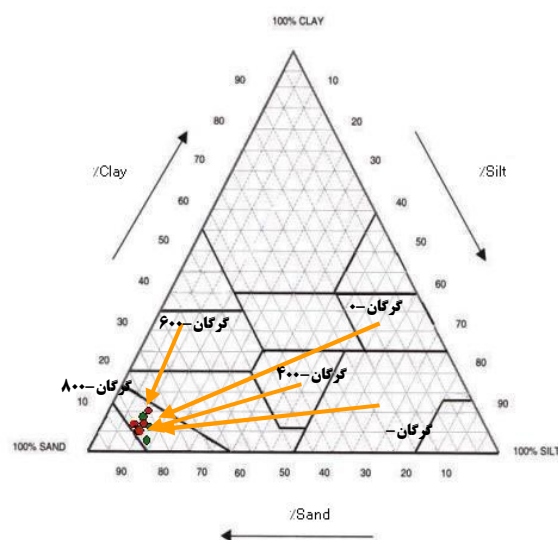
شکل ۶- زمان بهینه پخت کپسول‌های رسی متخلخل در دو دمای ۹۸۰ (الف) و ۶۰۰ (ب) درجه سانتی‌گراد.

نتایج آنالیز شیمیایی خاک‌های پخته شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که خاک پخت شده، فاقد ماده آلی است ولی دارای آهک می‌باشد. درحالی که خاک‌های پخته شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد، علاوه بر فقدان ماده آلی، فاقد آهک نیز می‌باشند. به نظر می‌رسد مواد آلی و آهک در این دما از شکل طبیعی خود خارج شده‌اند یعنی ماده آلی به صورت گاز دی‌اکسید کربن از ترکیب خاک خارج شده است (کالترون، ۲۰۰۴). میزان آهک و ماده آلی در گرگان-۰ خام به ترتیب تقریباً معادل ۲۰ و ۰/۵ درصد است. آهک در دمای بالا می‌تواند در تشکیل فازهای جدید و یا تبدیل به اکسید کلسیم مشارکت کند. اگر کلسیم در تشکیل فازهای جدید مشارکت کند موجب افزایش استحکام کپسول‌های رسی می‌شود. نتیجه آنالیز XRD نشان داد که کلسیم در تشکیل فاز جدیدی بنام دیوپساید $[CaMg(SiO_3)_2]$ مشارکت داشته است.

مواد معدنی در کپسول‌ها قبل و بعد از پخت

نسبت اکسید سیلیس به اکسید آلومینیوم و میزان اکسید کلسیم موجود در مواد خام از جمله مهمترین پارامترهای موثر بر تغییر ویژگی‌های خاک بعد از پخت می‌باشند. نتایج آنالیز XRF نشان می‌دهد که نسبت اکسید سیلیس به اکسید آلومینیوم در گرگان-۰ خام، کمتر از سایر ترکیبات است (جدول ۱).

بافت خاک، ماده آلی و آهک قبل و بعد از پخت
بافت خاک گرگان-۰، گرگان-۲۰۰، گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰، گرگان-۸۰۰ قبل از پخت به ترتیب لوم رسی سیلتی، لوم سیلتی، لوم شنی و شن لومی می‌باشد. بافت همه‌ی این خاک‌ها بعد از پخت در کوره الکتریکی به مدت ۱۲ و ۸ ساعت به ترتیب در دمای ۶۰۰ و ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تغییر خصوصیات رس، به شن لومی تغییر ماهیت داده است (شکل ۷). انتهای پیکان در شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی جایگاه بافت خاک قبل از پخت و نوک پیکان نشان‌دهنده‌ی بافت مواد بعد از پخت می‌باشد. نتایج آنالیز بافت خاک نشان می‌دهد که ذرات



شکل ۷- نمایش بافت خاک قبل و بعد از پخت.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد خام مورد استفاده در ساخت قطعات سفالی کپسولی (درصد)

ترکیبات	شن نرم	گرگان-۰	گرگان-۲۰۰	گرگان-۴۰۰	گرگان-۶۰۰	گرگان-۸۰۰
L.O.I	۸/۰۱	۱۴/۰۷	۱۲/۳۲	۱۲/۱۵	۱۰/۳۰	۹/۲
MgO	۲/۴۲	۲/۷۸	۲/۷۳	۲/۵۳	۲/۴۶	۲/۳۵
Al ₂ O ₃	۱۲/۴۹	۱۲/۴۴	۱۲/۴۱	۱۲/۴۷	۱۲/۴۷	۱۲/۴۸
SiO ₂	۵۵/۰۸	۵۱/۸۸	۵۲/۵۲	۵۳/۱۶	۵۳/۸۰	۵۴/۶۹
CaO	۷/۹۸	۱۱/۲۴	۱۰/۵۹	۹/۹۴	۹/۲۵	۸/۶۲
Fe ₂ O ₃	۵/۷۸	۴/۷۹	۴/۵۵	۴/۳۹	۴/۲۶	۴/۱۶
K ₂ O	۲/۵۹	۲/۳۷	۲/۳۳	۲/۴۳	۲/۶۲	۲/۷۱
Na ₂ O	۲/۳۵	۱/۴۱	۱/۵۱	۱/۷۶	۲/۰۲	۲/۱۱
TiO ₂	-	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۵۴

L.O.I به معنی کاهش وزن ناشی از هضم مواد در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت می‌باشد.

هرچه این نسبت کمتر باشد معرف مقاومت بیشتر قطعات در برابر شکستن خواهد بود. زیرا هرچه این نسبت کمتر باشد مقدار درصد رس بیشتر خواهد بود. این نسبت برای گرگان-۰، برای گرگان-۲۰۰، گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ به ترتیب برابر ۴/۱۶، ۴/۲۳، ۴/۲۶، ۴/۳۱ و ۴/۳۸ می باشد. جدول ۲ نمایانگر درصد فازهای معدنی

موجود در خاک در دو دمای پخت ۶۰۰ و ۹۸۰ درجه سانتی گراد است. مقدار درصد افت وزنی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد با افزایش دمای پخت کاهش می یابد. علت آن را می توان به هضم برخی مواد همچون فیلوسیلیکات ها به اکسید آلومنیوم و یا کربنات کلسیم به اکسید کلسیم و دی اکسید کربن نسبت داد.

جدول ۲- درصد ترکیبات شیمیایی قطعات سفالی کپسولی بعد از پخت در دو دمای ۶۰۰ و ۹۸۰ درجه سانتی گراد

ترکیبات	گرگان-۰		گرگان-۲۰۰		گرگان-۴۰۰		گرگان-۶۰۰		گرگان-۸۰۰	
	۹۸۰	۶۰۰	۹۸۰	۶۰۰	۹۸۰	۶۰۰	۹۸۰	۶۰۰	۹۸۰	۶۰۰
L.O.I	۰/۸	۹/۴	۰/۴	۱۰/۵	۰/۳	۸/۳	۰/۳	۶/۷	۱	۵/۹
MgO	۳/۱۴	۲/۹	۲/۹۷	۲/۷۰	۲/۹۴	۲/۶۹	۲/۹۴	۲/۶۲	۲/۷۴	۲/۵۳
Al ₂ O ₃	۱۴/۳۹	۱۲/۸۹	۱۴/۴۳	۱۲/۶۱	۱۳/۸۰	۱۲/۷۹	۱۳/۸۰	۱۲/۶۹	۱۴/۱۵	۱۳/۶۰
SiO ₂	۵۸/۴۴	۵۴/۲۷	۵۸/۵۹	۲۲/۵۳	۵۶/۳۷	۵۶/۳۷	۶۰/۶۸	۵۸/۱۹	۶۱/۲۹	۵۹/۵۷
CaO	۱۲/۴۲	۱۱/۴۰	۱۲/۵۶	۱۱/۵۲	۱۰/۷۹	۱۰/۷۹	۱۱/۴۰	۹/۷۱	۹/۶۶	۸/۶۵
Fe ₂ O ₃	۴/۸۲	۴/۸۰	۵/۰۱	۴/۷۷	۴/۷۹	۴/۷۹	۵/۰۵	۴/۷۵	۴/۸	۴/۸۱
K ₂ O	۲/۷۶	۲/۴۵	۲/۷۵	۲/۵۷	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۹۲	۲/۹۰	۲/۹۱	۲/۸۵
Na ₂ O	۱/۵۵	۱/۳۴	۱/۷۷	۱/۵۲	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۹۸	۱/۹۰	۲/۱۴	۲/۰۷
TiO ₂	-	-	۰/۶۱۶	۰/۵۶۵	۰/۵۳۷	۰/۵۳۷	۰/۶۳۷	۰/۵۷۳	۰/۶۲۵	۰/۵۳۷

برای مناطق شور مناسب نیست. این امر موجب بر همکنش مواد محلول در آب شور و خاک پخته شده می شود. لذا بکارگیری کپسول های رسی متخلخل پخت شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد تنها برای آن دسته از گیاهانی که نیاز آبی و تغذیه ای کمی دارند و خاک زراعی شور نیست، قابل توصیه است. با توجه به آهکی بودن بسیاری از خاک های کشور و شوری آب، کاربرد کپسول های رسی متخلخل پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی گراد از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا میزان متوسط آبدهی، انحراف معیار و ضریب تغییرات آنها در جدول ۳ آمده است. آماره های توصیفی در این جدول نشان می دهد که با افزایش آبدهی، ضریب تغییرات آبدهی کپسول های رسی متخلخل (CV) بطور نسبی کاهش می یابد و همچنین افزایش فشار هیدروستاتیکی، موجب افزایش آبدهی قطعات سفالی می شود.

آبدهی کپسول های رسی متخلخل

نتایج نشان داد میزان آبدهی کپسول های رسی متخلخل در دمای پخت ۶۰۰ و ۹۸۰ درجه سانتی گراد با افزایش فشار هیدروستاتیکی افزایش می یابد. روند افزایش آبدهی نسبت به فشار هیدروستاتیکی کپسول های رسی متخلخل گرگان-۰ و گرگان-۲۰۰ پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی گراد خطی بود (شکل ۸). درحالی که در این دما روند آبدهی کپسول های رسی متخلخل گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ غیر خطی و از نوع سهمی بود. بررسی نتایج آبدهی کپسول های رسی متخلخل پخت شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد نشان داد که آبدهی قطعات پخت شده گرگان-۰، گرگان-۲۰۰ و گرگان-۴۰۰ از روند خطی و افزایشی پیروی می کند. درحالی که در این دما کپسول های رسی متخلخل گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ دارای روند غیرخطی هستند. استفاده از کپسول های رسی که در دمای پایین پخت شده اند

جدول ۳- بررسی آماره‌های توصیفی آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد و تاثیر فشار هیدروستاتیکی بر آن.

تیمار	مشخصات آماری	فشار هیدروستاتیکی (کیلوپاسکال)			
		۱۰۰	۸۰	۵۰	۲۵
گرگان-۰	میانگین آبدهی (سانتی‌مترمکعب بر ساعت)	۲۸۲/۳۰	۲۱۷/۶۹	۱۲۶/۳۱	۵۹/۵۵
	انحراف معیار آبدهی	۶/۵۱	۱۱/۴۴	۱۰/۰۱	۶/۲۹
	درصد ضریب تغییرات آبدهی	۲/۳۱	۵/۲۶	۷/۹۲	۱۰/۵۶
گرگان-۲۰۰	میانگین آبدهی (سانتی‌مترمکعب بر ساعت)	۳۲۵/۱۲	۲۶۰/۷۹	۱۵۷/۶۵	۷۶/۲۳
	انحراف معیار آبدهی	۱۱/۱۲	۸/۰۱	۹/۲۷	۶/۴۵
	درصد ضریب تغییرات آبدهی	۳/۴۲	۳/۰۷	۵/۸۸	۸/۴۶
گرگان-۴۰۰	میانگین آبدهی (سانتی‌مترمکعب بر ساعت)	۸۹۷/۹۸	۴۸۱/۹۸	۱۹۴/۴۷	۱۰۰/۱۳
	انحراف معیار آبدهی	۷۹/۴۹	۲۷/۶۴	۱۶/۹۷	۱۱/۱۱
	درصد ضریب تغییرات آبدهی	۸/۸۵	۵/۷۴	۸/۷۳	۱۱/۰۹
گرگان-۶۰۰	میانگین آبدهی (سانتی‌مترمکعب بر ساعت)	۱۱۱۳	۶۲۱/۲۳	۲۵۹/۳۳	۱۲۳/۸۲
	انحراف معیار آبدهی	۱۳۷/۲۷	۴۸/۷۶	۳۳/۸۱	۱۶/۸۱
	درصد ضریب تغییرات آبدهی	۶/۷۳	۷/۳۹	۸/۸۵	۱۳/۳۶
گرگان-۸۰۰	میانگین آبدهی (سانتی‌مترمکعب بر ساعت)	-	۵۷۲۲/۷۱	۲۷۷۵/۵۸	۱۱۰۳/۷۴
	انحراف معیار آبدهی	-	۱۱۰/۳۴	۲۶۱/۳۱	۱۵۷/۶۵
	درصد ضریب تغییرات آبدهی	-	۴/۸۹	۹/۴۱	۱۴/۲۸

توزیع رطوبت خاک از کپسول‌های رسی متخلخل

شکل پیاز رطوبتی و مدت زمان شکل‌گیری آن، مدت زمان آبدهی کپسول‌های رسی، آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل و نیز میزان نیاز آبی گیاهان در مدیریت بهینه مصرف آب از کپسول‌های رسی متخلخل نقش به‌سزایی دارند. خاک زراعی که آزمایش توزیع رطوبت در آن انجام شد دارای ۱۷٪ کربنات کلسیم (آهک)، ۰/۴۴٪ مواد آلی و ظرفیت زراعی خاک آن ۲۲٪ است. این خاک دارای قابلیت نفوذ آب ۷ سانتی‌متر بر ساعت است. جدول ۴ آنالیز خصوصیات شیمیایی آب دانشگاه کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس-بکار رفته در دستگاه اتوماسیون دبی فشار و توزیع رطوبت در خاک- را نشان می‌دهد. بررسی توزیع رطوبت با اندازه‌گیری شعاع و عمق خیسیدگی پیاز رطوبتی خاک انجام شد. نتایج نشان داد که بزرگترین پیاز رطوبتی در خاک لوم رسی از کپسول‌های

رسی متخلخل گرگان-۸۰۰ و کمترین مقدار آن مربوط به گرگان-۰ می‌باشد (جدول ۵).

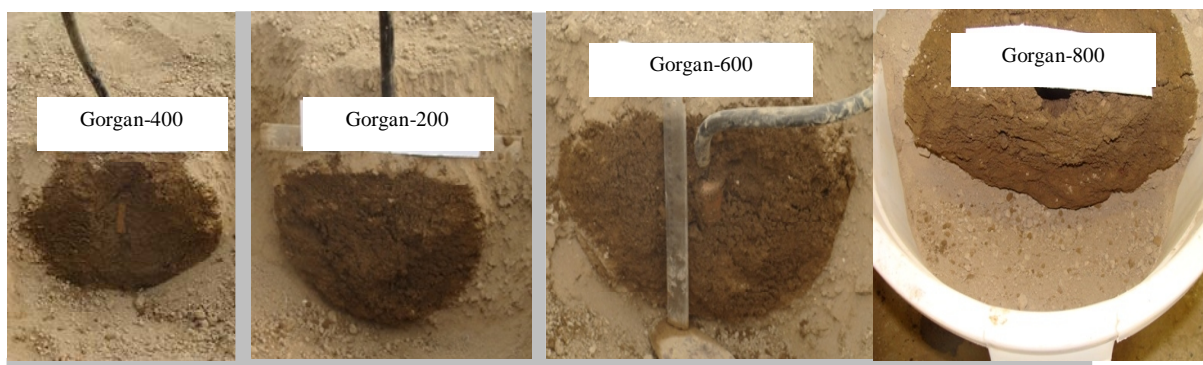
نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش فشار هیدروستاتیکی، پیاز رطوبتی در مدت زمان کمتری به شکل نهایی در خاک نزدیک می‌شود. شایان ذکر است شکل پیازهای رطوبتی انواع کپسول‌های رسی متخلخل در آزمایش‌های طولانی مدت در خاک لوم رسی تقریباً کروی بدست آمد (شکل ۸). تغییر شعاع و عمق خیسیدگی قطعات گرگان-۰ و گرگان-۲۰۰ بعد از گذشت ۴۸ ساعت آبیاری که در آن پیاز رطوبتی کامل شده است، چندان ملموس نمی‌باشد. در این حالت با گذشت زمان تنها به عمق خیسیدگی به صورت محدود افزوده شد. در حالی که تغییر شعاع و عمق خیسیدگی قطعات گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ بعد از گذشت ۲۴ ساعت چندان محسوس نیست.

جدول ۴- خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده

PH	EC (µS/cm)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	Mg ⁺⁺ (mg/L)
۷/۹۹	۶۶۰	۲۴/۴۸	۰/۳۷	۱۲۱۱/۳۸	۱۲۸۲/۵۶	۴۳۱۷/۴۴

جدول ۵- شعاع و عمق خیسیدگی کپسول‌های رسی پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد

کپسول‌های رسی	فشار (kPa)	شعاع خیسیدگی (cm)	عمق خیسیدگی (cm)	زمان آبدهی (ساعت)
گرگان-۰	۲۵	۸/۱	۱۰/۰	۴۸/۰
	۱۰۰	۱۷/۲	۱۸/۰	۴۸/۴
گرگان-۲۰۰	۲۵	۱۱/۳	۱۲/۹	۴۸/۰
	۱۰۰	۱۷/۶	۱۹/۰	۴۸/۰
گرگان-۴۰۰	۲۵	۱۲/۴	۱۴/۰	۴۶/۹۴
	۱۰۰	۱۸/۲	۲۳/۰	۳۸/۶۵
گرگان-۶۰۰	۲۵	۱۸/۳	۲۲/۵	۴۸/۰
	۱۰۰	۲۶/۱	۳۲/۳	۲۷/۱۴
گرگان-۸۰۰	۲۵	۱۸	۲۲/۵	۴۸/۰
	۸۰	۲۰/۵	۳۰/۰	۲۶/۲۵



شکل ۸- پیاز رطوبتی خاک از کپسول‌های رسی متخلخل گرگان پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد.

ساختار خاک آهکی گرگان مناسب‌تر است. در این دما و مدت زمان پخت، منحنی افت وزنی با افزایش درجه حرارت به یک ثبات نسبی می‌رسد. فشار هیدروستاتیکی بر میزان آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل موثر است. به طوری که منحنی آبدهی - فشار هیدروستاتیکی قطعات پخت شده گرگان-۰ و گرگان-۲۰۰، در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد از روند افزایشی - خطی پیروی می‌کند. درحالی که در این دما قطعات گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ و گرگان-۸۰۰ از روند غیرخطی و از نوع سهمی برخوردارند. تغییر شعاع و عمق خیسیدگی خاک ناشی از قطعات گرگان-۰ و گرگان-۲۰۰ بعد از گذشت ۴۸ ساعت آبیاری و قطعات گرگان-۴۰۰، گرگان-۶۰۰ بعد از گذشت ۲۴ ساعت چندان ملموس نمی‌باشد. در این حالت با گذشت زمان تنها به عمق خیسیدگی به صورت محدود افزوده می‌شود. از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که پیاز رطوبتی تولید شده از کپسول‌های رسی متخلخل

کپسول‌های رسی متخلخل گرگان-۸۰۰ دارای آبدهی خود تنظیمی در فشارهای هیدروستاتیکی ۲۵ تا ۵۰ کیلوپاسکال می‌باشند و در فشارهای بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال به دلیل آبدهی بالا (۳ تا ۷ لیتر بر ساعت) بعد از ۲ روز به خود تنظیمی قابل قبول می‌رسند. شعاع خیسیدگی قطعات سفالی گرگان-۸۰۰ از ۲۵-۲۰ سانتی‌متر تجاوز می‌کند (شکل ۸). اما در سایر قطعات قطر ناحیه اشباع در پیاز رطوبتی تا فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بالغ می‌شود. شکل ۸ پیاز رطوبتی انواع کپسول‌های رسی گرگان پخت شده در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد در فشار هیدروستاتیکی ۲۵ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

دمای پخت ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای پخت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای بررسی چگونگی تغییر

- Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 10- Jiusheng Li. Zhang J. and Rao M. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management* 67: 89–104.
- 11- Liang H. Zouxin L. Qiaosheng S. and Guanghua Y. 2009. Effects of operating pressure on the discharge characteristics of porous pipes as micro-irrigation laterals. *Transactions of the CSAE* 25 (2) 1-5.
- 12- Al-Amireh M. 2006. Improving the physical and thermal properties of the fire clay refractory bricks produced from Bauxite. *Journal of Applied Sciences* 6(12): 2605-2610.
- 13- Monteiro S.N. and Vieira C.M.F. 2004. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science* 27 229–234.
- 14- Naik B.S. Panda R.K. Nayak S.C. and Sharm S.D. 2008. Hydraulics and salinity profile of pitcher irrigation in saline water condition. *Agricultural water management* 95: 1129 – 1134.
- 15- Nelson D. W. and Sommers L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539–579. In A.L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- 16- Newman A.C.D. 1987. *Chemistry of clays and clay minerals. Mineralogical Society Monograph NO.6. Longman Scientific & Technical, 574 pages.*
- 17- Teeluck M. and Sutton B.G. 1998. Discharge characteristics of a porous pipe microirrigation lateral. *Agricultural Water Management* 38:123-134.
- 18- Qiasheng S. Zouxin L. Zhenying W. and Hijung L. 2007. Simulation of the soil wetting shape porous pipe sub-irrigation using dimensional analysis. *Irrig. And Drain* 56:389-398.
- 19- Salem A. Robert Horton Al-Jabri and Jaynes Dan B. 2002. A Point-source method for rapid simultaneous estimation of soil hydraulic and chemical transport properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:12–18.
- 20- Siyal A. A. and Skaggs T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management* doi:10.1016/j.agwat. 11.013
- در خاک لوم رسی قابلیت تأمین رطوبت گیاهانی با عمق توسعه ریشه کمتر از ۳۰ سانتی‌متر مانند آلوتهورا، توت فرنگی را دارد. برای پاسخ علمی لازم است توان تأمین رطوبت این قطعات بر روی چنین گیاهانی بررسی شود. در صورت مثبت بودن پاسخ فوق، پیاز رطوبتی این قطعات بر روی ۱۱ کلاس بافت خاکی دیگر بررسی شود. همچنین بهتر است تحقیقات بیشتری بر روی کوچک‌سازی قطعات با حفظ توان تأمین رطوبت صورت گیرد. این امر امکان رقابت اقتصادی این قطعات در برابر قطره چکان‌های سطحی و زیر سطحی افزایش می‌دهد.

منابع

- ۱- باستانی ش. ۱۳۸۲. طرح آبیاری زیرزمینی با لوله‌های سفالی. هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۲۶: ۱-۲۲
- 2- Abu-Zerig M.M. and Atoum M.F. 2004. Hydraulic characteristics and seepage Modeling of clay pitchers produced in Jordan, *Canadian Biosystems Engineering, Canada*,46(1):15–20.
- 3- Abu-Zreig M.M. Abe Y. and Isoda H. 2006. The auto-regulative capability of pitcher irrigation system. *Agricultural Water Management* 85 (3):272–278.
- 4- Bahrami H.A. Ghorbani Vaghei H. Alizadeh P. Nasiri F. and Z. Mahallati. 2010. Fuzzy modeling of soil water distribution using buried porous clay capsule irrigation from a subsurface point source. *Journal of sensor letters.* 8 :75-80.
- 5- Bainbridge D. 2001. Buried clay pot irrigation a little known but a very efficient traditional method of irrigation. *Agriculture Water Management*, 48:79-88.
- 6- Culley J.L.B. 1993. Density and comperssibility. p. 529-540. In M. R. Carter (ed.) *soil sampling and methods of analysis.* Lewis published in United State of America.
- 7- Cultrone G. Sebastian E. Elert K. Josede la Torre M. Cazalla O. and Rodriguez-Navarro C. 2004. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society* 24: 547–564.
- 8- Freyburg S. and Schwarz A. 2007. Influence of the clay type on the pore structure of structural ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 27:1727–1733.
- 9- Gee G.W. and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383–411. In A. Klute (ed.),