

## آنالیز ابعادی الگوی خیسیدگی خاک از کپسول‌های رسی متخلخل

حجت قربانی واقعی<sup>۱\*</sup> و حسین علی بهرامی<sup>۲</sup> و فرزین نصیری صالح<sup>۳</sup>

### چکیده

کپسول رسی نوعی لوله تراوا در آبیاری زیرسطحی است که توانایی تأمین هوشمندانه رطوبت ظرفیت زراعی را در ناحیه رشد ریشه دارد. شکل پیاز رطوبتی این قطعات در خاک تحت تأثیر هدایت‌هیدرولیکی اشباع خاک، تخلخل خاک، حجم آب مصرفی، فشار هیدروستاتیک و زمان آبیاری قرار دارد. در این مقاله، شعاع و عمق پیاز رطوبتی خاک در بافت لوم رسی، بعد از ۲۴ ساعت آبیاری زیرسطحی از منبع تغذیه نقطه‌ای در دو نوع کپسول رسی GBN (قطر ۳/۵ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر) و GN (قطر ۳/۵ و ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر) به روش آنالیز ابعادی با تئوری باکینگهام شبیه‌سازی شد. برای ارزیابی اعتبار نمونه‌ها از تحلیل خطاهای باقیمانده استفاده شد. نتایج تحلیل خطاهای باقیمانده نشان داد که متوسط مقادیر ME، RRMSE و  $R^2$  در تخمین شعاع و عمق خیسیدگی کپسول‌های رسی GBN و GN به ترتیب ۹/۸۲، ۲۳/۷۸، ۸۹/۴۸ و ۱۰/۹۲، ۵۷/۹۷، ۹۰/۴ است. پس روش آنالیز ابعادی در هر دو نوع کپسول رسی توانسته است شعاع و عمق خیسیدگی را با دقت خوبی برآورد کند. همچنین نتایج نشان داد که قطعات GN در فشار هیدروستاتیک ۱۰۰ کیلوپاسکال قادر به تولید شعاع و عمق خیسیدگی مشابه قطعات GBN تا فشار هیدروستاتیک ۵۰ کیلوپاسکال هستند.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل خطاهای باقیمانده، تئوری باکینگهام، توزیع رطوبت، شبیه‌سازی، لوله‌های تراوا.

**ارجاع:** قربانی واقعی ح. بهرامی ح. ع. و نصیری صالح ف. ۱۳۹۵. آنالیز ابعادی الگوی خیسیدگی خاک از کپسول‌های رسی متخلخل. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۷۷-۸۵.

۱- استادیار گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس.

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

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

\* نویسنده مسئول [ghorbani169@yahoo.com](mailto:ghorbani169@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۱

## مقدمه

روش‌های آبیاری زیرسطحی از فناوری‌های جدیدی هستند که آب را به میزان کم و با فشار کم به طور مستقیم در محیط ریشه رها می‌کنند. این عمل سبب رشد ریشه‌های موئین و تقویت رشد ریشه‌های اصلی در لایه‌های آبدار زیرین می‌شود (پلوت و همکاران، ۱۹۹۶). این روش به دلیل کاهش تبخیر آب از سطح خاک علاوه بر کاهش میزان آب مصرفی سبب افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود (سیال و همکاران، ۲۰۱۱).

کپسول رسی نوعی لوله‌ی تراوا در آبیاری زیرسطحی با توانایی تأمین هوشمندانه رطوبت در حد ظرفیت زراعی است. در قدیم این قطعات به شکل کوزه‌های خمره‌ای و بزرگ ساخته می‌شدند و آب باران از طریق مجرای وارد آن می‌شد. امروزه روش آبیاری با قطعات سفالی نه به دلیل مشکلات فنی، بلکه به دلیل کاربرد راحت و ارزان‌تر لوله‌های پلی‌اتیلن و تنوع قطره‌چکان‌ها به دست فراموشی سپرده شده است (باستانی، ۱۳۷۳ و بینبرج، ۲۰۰۱). در سال‌های اخیر رویکرد گسترده‌ای به سمت استفاده دوباره از سفال برای طراحی روش‌های بهینه در تأمین رطوبت خاک در کشورهای در حال توسعه و اراضی کوچک مقیاس جهان ایجاد شده است. بررسی نتایج پژوهش‌های انجام شده در ایران و جهان نشان می‌دهد که میزان آبدهی قطعات سفالی علاوه بر ترکیب مواد (بینبرج، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲)، رطوبت محیط (ابوزریگ و آتوم، ۲۰۰۴؛ ابوزریگ و همکاران، ۲۰۰۶ و سیال و اسکگر، ۲۰۰۹) و دمای پخت (بینبرج، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ و قربانی واقعی و همکاران، ۱۳۹۰)، تحت تأثیر فشار هیدروستاتیک (بهینیا و عرب‌فرد، ۱۳۸۴؛ ابوزریگ و همکاران، ۲۰۰۶ و سیال و اسکگر، ۲۰۰۹)، ضخامت دیواره (ابوزریگ و آتوم، ۲۰۰۴؛ ابوزریگ و همکاران، ۲۰۰۶ و قربانی واقعی و همکاران، ۱۳۹۰)، و تخلخل قطعات (بینبرج، ۲۰۰۱؛ سیال و اسکگر، ۲۰۰۹ و قربانی واقعی و همکاران، ۱۳۹۰) قرار دارد. واسوداوان و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که میزان آبدهی قطعات سفالی در فشار هیدروستاتیکی ثابت تحت تأثیر میزان رطوبت تغییر می‌کند. به طوری که میزان تراوش در هوا بیشتر از خاک و در خاک بیشتر از آب است.

به طور کلی، در طراحی و اجرای سامانه‌های آبیاری، اطلاع از چگونگی شکل‌گیری پیاز رطوبتی خاک‌ها و ابعاد آن‌ها ضروری است. ابعاد پیاز رطوبتی خاک تحت تأثیر

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، دبی خروجی نازل‌ها و زمان آبیاری است (پلنگی و آخوندعلی، ۱۳۸۷؛ کیاوشنگ و همکاران، ۲۰۰۷ و سیال و اسکگر، ۲۰۰۹). برای به دست آوردن ویژگی هیدرولیکی خاک از معادله حاکم بر حرکت آب در خاک در حالت غیراشباع (معادله ریچاردز) استفاده می‌شود. امروز به علت عدم دسترسی آسان به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌ها در شرایط غیراشباع، طراحان سامانه‌های آبیاری تمایل به استفاده از روش‌های تجربی دارند (کشاورز و صادق‌زاده، ۱۳۷۹؛ میرزایی، ۱۳۸۶ و پلنگی و آخوندعلی، ۱۳۸۷).

در مستندات علمی بینبرج (۲۰۰۱) آمده است که شوارتزمان و زور (۱۹۸۶) اولین کسانی بودند که توانستند رابطه نیمه‌تجربی بین عمق خیسیدگی، قطر خیسیدگی، هدایت هیدرولیکی اشباع و دبی قطره‌چکان‌ها را برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی به ازای منبع تغذیه نقطه‌ای و خطی به کمک آنالیز ابعادی به دست آورند. میرزایی (۱۳۸۶) با دخالت عوامل فیزیکی مؤثر بر حجم خاک مرطوب شده در منبع تغذیه نقطه‌ای و خطی و با استفاده از قضیه  $\pi$  باکینگهام و آنالیز ابعادی، معادلاتی شبیه شوارتزمان و زور (۱۹۸۶) ارائه داد. با این تفاوت که معادله وی تابعی از زمان است و محاسبه قطر و عمق خیسیدگی را در هر زمان ممکن می‌کند. کیاوشنگ و همکاران (۲۰۰۷) برای لوله‌های متخلخل زیرسطحی معادله‌ای بر اساس آنالیز ابعادی ارائه کردند:

$$W = (q \times D / k)^{0.5} \times [0.60 \times \ln(V \times k / q \times D) + 2.21] \quad (1)$$

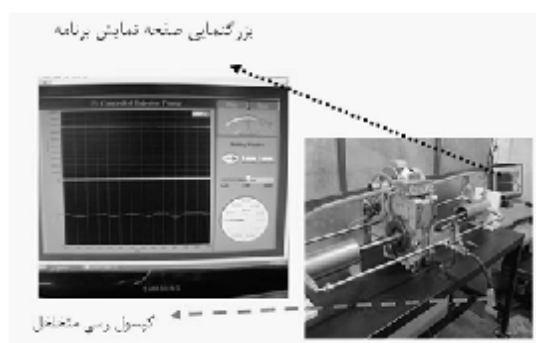
در این معادله، به ازای قطر خیسیدگی، عمق خیسیدگی قابل محاسبه خواهد بود و در آن  $W$  پهنای خیسیدگی (متر)،  $k$  هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)،  $q$  حاصل‌ضرب دبی در طول لوله (مترمکعب بر متر لوله در هر ثانیه)  $V$  حجم آب مصرفی (مترمکعب) و  $D$  عمق خیسیدگی (متر) است.

بررسی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در خاک‌های شنی دشت قائم کرمان برای قطره‌چکان‌های با آبدهی ۴، ۸ و ۲۴ لیتر در ساعت نشان داد که به ازای حجم ثابت آب، با افزایش آبدهی قطره‌چکان، شعاع خیسیدگی نسبت به عمق خیسیدگی افزایش بیشتری یافته و گسترش پیاز رطوبتی در قطره‌چکان‌های با آبدهی بالاتر بیشتر بود. (نصیری و همکاران، ۱۳۹۰). در این بررسی، معادلات تجربی حاکم

## مواد و روش‌ها

### تهیه کپسول‌های رسی متخلخل

کپسول‌های رسی متخلخل از کارگاه ساخت و تولید قطعات سفالی گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس تهیه شد. در این کارگاه دو نوع کپسول رسی متخلخل (جدول ۱) با ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی متفاوت به نام‌های GN و GBN تولید می‌شود. کپسول‌های رسی GN و GBN به ترتیب استوانه‌هایی یک سر باز به طول ۳/۵ و ۱۲ سانتی‌متر با ضخامت دیواره یک سانتی‌متر و قطر خارجی ۳/۵ سانتی‌متر است (شکل ۱). ویژگی‌های هیدرولیکی این قطعات متفاوت از هم است و تحت تأثیر فشار هیدروستاتیکی، میزان آبدهی آن‌ها تغییر می‌کند.



شکل ۱- دستگاه اتوماسیون دبی- فشار

بر ابعاد پیاز رطوبتی تابعی نمایی و وابسته به زمان آبیاری بود.

عمده بررسی‌های الگوی توزیع رطوبت خاک روی قطره‌چکان‌های سطحی و زیرسطحی یا لوله‌های متخلخل زیرسطحی انجام شده است و تاکنون بررسی‌های جامع و قابل استنادی در ایران برای نمونه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی قطعات سفالی از منبع تغذیه نقطه‌ای در راستای تأمین رطوبت بهینه خاک در منطقه ریشه و در مقیاس کلان (ماکروسکوپی) انجام نشده است.

این پژوهش به دنبال آن است تا با برقراری رابطه ریاضی از نوع آنالیز ابعادی در پارامترهای حاکم بر الگوی توزیع رطوبت خاک از کپسول‌های رسی متخلخل بتواند راه‌کاری کاربردی در طراحی فاصله و عمق کارگذاری نازل‌ها متناسب با توزیع مکانی ریشه گیاهان ارائه دهد. مسأله دیگر، شناخت شرایط استفاده از کپسول‌های رسی کوچک‌تر به جای کپسول‌های رسی بزرگ‌تر است. زیرا هرچه نازل‌ها کوچک‌تر و سبک‌تر باشند، حمل و نقل و کارگذاری آن‌ها در سامانه‌های آبیاری راحت‌تر انجام می‌شود.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی کپسول‌های رسی متخلخل

فشار ۱۰۰ (kPa)	فشار ۸۰ (kPa)	فشار ۵۰ (kPa)	فشار ۲۵ (kPa)	جرم ویژه ظاهری (kg.m <sup>-3</sup> )	رطوبت وزنی (%)	طول قطعه (cm)	زیرکد	کد	توان آبدهی (لیتر بر ساعت)
۱۵/۰	۱۲/۰	۶/۸	۳/۹	۱۳۶۰	۴۲	۱۲	۱۰		
۳/۵	۲/۵	۱/۳	۰/۸	۱۴۹۰	۳۸	۱۲	۱۵	GBN	
۳/۱	۲/۱	۱/۳	۰/۶	۱۴۴۰	۳۲	۱۲	۲۰		
۵/۷۵	۴/۵۹	۲/۳۵	۱/۴۸	۱۳۶۰	۴۲	۳/۵	۱۰		
۱/۲۹	۰/۸۸	۰/۵۱	۰/۴۷	۱۴۹۰	۳۸	۳/۵	۱۵	GN	
۱/۲۵	۰/۸۳	۰/۴۷	۰/۱۸	۱۴۴۰	۳۲	۳/۵	۲۰		

اعداد "زیرکد" نشان‌دهنده نسبت ماده متخلخل کننده به خاک است به طور مثال GN<sub>10</sub> بیان‌گر قطعات سفالی با ۱۰ نسبت خاک و یک نسبت ماده متخلخل کننده است. به عبارت دیگر کد و زیرکد مشخصه نوع قطعات سفالی و توان آبدهی آن را نشان می‌دهد.

$$r = m h (K_s \cdot \frac{t}{h})^\alpha \cdot (\frac{V_m}{h^3})^\beta \quad (5)$$

در این رابطه  $m$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  ضریب‌های تجربی معادله است. به کمک داده‌های مربوط به اندازه‌گیری شعاع خیسیدگی (داده‌های مشاهده‌ای) و با استفاده از رگرسیون غیرخطی، مقادیر  $m$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  به کمک نرم‌افزار استات گرافیک (Stat Graphic) (نسخه ۷) برای کپسول‌های رسی GN و GBN محاسبه شد.

معادله ابعادی عمق خیسیدگی ( $Z$ )، مشابه معادله ابعادی شعاع خیسیدگی است. معادله ابعادی  $Z$  به صورت زیر است:

$$Z = n h (K_s \cdot \frac{t}{h})^\lambda \cdot (\frac{V_m}{h^3})^\gamma \quad (6)$$

که در آن پارامترهای  $n$ ،  $\gamma$  و  $\lambda$  ضریب‌های تجربی معادله هستند. لازم به ذکر است، معادله (۶) تشابه ساختاری با معادله شعاع خیسیدگی دارد و تفاوت عمده آن در مقدار عددی توان‌ها و ضریب‌های معادله است. در گام بعد، به کمک داده‌های مشاهده‌ای و با استفاده از رگرسیون غیرخطی، مقادیر  $n$ ،  $\gamma$  و  $\lambda$  به کمک نرم‌افزار استات گرافیک (نسخه ۷) برای کپسول‌های رسی GN و GBN محاسبه شد.

#### ارزیابی اعتبار نمونه‌های شعاع و عمق خیسیدگی

برای ارزیابی اعتبار نمونه‌ها، از تحلیل خطاهای باقیمانده (اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده) استفاده شد. آماره‌های مورد نیاز عبارتند از: حداکثر خطا (Maximum Error)، آماره‌ی نسبی ریشه دوم میانگین خطا (Relative Root Mean Square Error)، ضریب تبیین (Coefficient of Determination)، کارایی مدل‌سازی (Modeling Efficiency) و ضریب جرم باقیمانده (Coefficient of Residual Mass). تعریف ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (7)$$

$$RRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{O} \quad (8)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

#### مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی خاک به روش آنالیز ابعادی

در مدل‌سازی شعاع و عمق خیسیدگی به روش آنالیز ابعادی با تئوری  $\pi$ -باکینگهام از پارامترهایی چون حجم آب مصرفی (لیتر)، مدت زمان آبیاری (ساعت)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (سانتی‌متر بر ساعت)، جرم ویژه ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و فشار هیدروستاتیکی در واحد وزن (سانتی‌متر) استفاده شد. بر اساس تئوری  $\pi$ -باکینگهام، رابطه شعاع خیسیدگی و پارامترهای بالا به صورت زیر است:

$$r = f(K_S, \rho_b, h, v_m, t) \quad (2)$$

در این رابطه  $n=6$  متغیر وجود دارد و  $h$  بار فشار هیدروستاتیکی (سانتی‌متر)،  $K_S$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (سانتی‌متر بر ساعت)،  $t$  مدت زمان آبیاری (ساعت)  $\rho_b$  جرم ویژه ظاهری خاک و  $v_m$  حجم آب مصرفی (لیتر) است و تعداد کمیت‌های اصلی (زمان، حجم آب مصرفی و شعاع خیسیدگی)  $k=3$  است. بنابراین سه پارامتر بدون بعد ( $n-k$ ) مطرح است که با  $\pi_1$ ،  $\pi_2$  و  $\pi_3$  نشان داده می‌شوند. در تشکیل پارامترهای بدون بعد، سه مشخصه  $K_S$ ،  $\rho_b$  و  $h$  به عنوان متغیرهای مستقل و تکرار شونده و سه پارامتر  $r$ ،  $t$  و  $v_m$  به عنوان متغیرهای وابسته انتخاب شدند. رابطه هر یک از پارامترهای بدون بعد به صورت زیر است:

$$\pi_1 = f(K_S, \rho_b, h, t) \quad (3-الف)$$

$$= K_S^{a_1} \times \rho_b^{b_1} \times h^{c_1} \times t$$

$$\pi_2 = f(K_S, \rho_b, h, v_m)$$

$$= K_S^{a_2} \times \rho_b^{b_2} \times h^{c_2} \times v_m \quad (3-ب)$$

$$\pi_3 = f(K_S, \rho_b, h, r) =$$

$$K_S^{a_3} \times \rho_b^{b_3} \times h^{c_3} \times r \quad (3-ج)$$

از طرفی، رابطه کلی بین هر یک از پارامترهای بدون بعد به شکل زیر است:

$$\pi_3 = f(\pi_1, \pi_2) \quad (4)$$

که در آن،  $\pi_3$  تابعی از  $\pi_1$  و  $\pi_2$  است و در آن  $r$  به عنوان تابعی از حجم آب مصرفی و زمان آبیاری به تصویر کشیده شده است. با جای‌گذاری معادله (۳-الف)، (۳-ب) و (۳-ج) در معادله (۴) و حل آن، تابع  $r$  به شکل زیر به دست آمد:

کارگذاری آن‌ها در سامانه‌های آبیاری راحت‌تر انجام می‌شود. پس اگر این قطعات با تغییر عوامل زودیافت همچون افزایش فشار آب مزرعه یا حجم آب مصرفی بتوانند پیاز رطوبتی مشابه با قطعات بزرگ‌تر ایجاد کنند، اجرای سامانه‌های آبیاری زیر سطحی سفالی با صرفه‌تر خواهد شد. مقایسه شعاع و عمق خیسیدگی خاک در کپسول‌های رسی GBN و GN (جدول ۲) نشان داد که شعاع و عمق خیسیدگی کپسول‌های رسی GN<sub>10</sub> مشابه کپسول‌های رسی GBN<sub>20</sub> است یا این که اگر دو قطعه GN<sub>10</sub> با فاصله عمودی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر کار گذاشته شوند، توانایی ایجاد الگوی پیاز رطوبتی مشابه قطعات GBN را دارند. به نظر می‌رسد تحت شرایط خاص، با ابزارهایی چون فشار هیدروستاتیک و تغییر فرمول ساخت قطعات سفالی، می‌توان از قطعات کوچک‌تر به جای قطعات بزرگ‌تر در اجرای سامانه آبیاری زیرسطحی سفالی استفاده کرد.

از آن‌جا که کپسول‌های رسی GBN<sub>10</sub> و GN<sub>10</sub> نسبت به سایر قطعات سفالی هم نوع خود متخلخل‌تر هستند (به جدول ۱ رجوع شود)، انتظار می‌رود که مقادیر شعاع و عمق خیسیدگی آن‌ها بیشتر از کپسول‌های رسی هم نوع خود باشد و با افزایش فشار هیدروستاتیکی بر مقادیر آن‌ها افزوده شود. نتایج جدول ۲ مؤید این مطلب است. شکل‌های ۲ و ۳ بیان دیگری از تأثیرپذیری حجم آب مصرفی، شعاع و عمق خیسیدگی متناسب با تغییر فشار هیدروستاتیک در کپسول‌های رسی است. با افزایش فشار هیدروستاتیک، حجم آب مصرفی نیز در هر دو نوع کپسول رسی افزایش یافته است. در آبیاری با کپسول رسی، حجم آب آبیاری در زمان‌های اولیه تحت تأثیر ویژگی‌های هیدرولیکی قطعه قرار دارد. اما با گذشت زمان، مقدار آن تحت تأثیر خصوصیات خاک (تخلخل و هدایت هیدرولیکی خاک) قرار می‌گیرد. اما تغییرات حجم آب مصرفی از کپسول‌های رسی با گذر زمان به نسبت ثابت می‌شود. زیرا خاک پس از مرطوب شدن دارای پتانسیل ماتریک کمتری است و تمایل چندانی برای جذب آب از کپسول‌های رسی نشان نمی‌دهد.

اطلاع از شکل پیاز رطوبتی امکان کارگذاری بهتر و دقیق‌تر نازل‌های زیرسطحی را در محیط اطراف ریشه‌های اصلی و یا فرعی فراهم می‌آورد. بررسی نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مقادیر عمق خیسیدگی (z) با شعاع

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (11)$$

که در آن‌ها  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده)،  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده (داده‌های مشاهده‌ای)، n تعداد نمونه‌های به کار رفته و علامت «-» در بالای O نشانگر مقادیر متوسط آن است. حداقل مقدار ME و RRMSE صفر و حداکثر مقدار EF برابر یک هستند. مقدار زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است، در حالیکه مقدار زیاد RRMSE نشان دهنده برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات است. از سوی دیگر، آماره CD نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. آماره EF، مقادیر پیش‌بینی‌ها را با میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند و مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، برآوردی بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده دارد. آماره CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌هاست. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی این آماره‌ها برابر  $CRM=0$ ,  $EF=1$ ,  $CD=1$ ,  $RRMSE=0$ ,  $ME=0$  خواهد شد (لوگو و گرین، ۱۹۹۱ و همایی و همکاران، ۲۰۰۲). در این پژوهش، از مجموع ۷۲ داده پیاز رطوبتی ۴۵ داده برای واسنجی نمونه‌ها استفاده شده است.

## نتایج و بحث

جرم ویژه ظاهری در اجسام سرامیکی شاخصی از تخلخل آن جسم به حساب می‌آید. هرچه جسم سرامیکی متخلخل‌تر باشد، حجم آب بیشتری در واحد زمان از آن عبور خواهد کرد. کپسول‌های رسی GBN<sub>10</sub> و GN<sub>10</sub> نسبت به سایر قطعات، جرم ویژه ظاهری کمتری دارند (جدول ۱) و انتظار می‌رود دارای آبدهی بیشتری باشند. نتایج جدول ۱ مؤید این مطلب است. همچنین نتایج این جدول نشان می‌دهد که میزان آبدهی قطعات GBN بیشتر از قطعات GN است، در حالیکه فرمول ساخت قطعات GBN<sub>i</sub> مشابه GN<sub>i</sub> است و میزان آبدهی در واحد سطح آن‌ها یکسان است. پس به نظر می‌رسد اختلاف مقدار آبدهی قطعات GBN<sub>i</sub> و GN<sub>i</sub> در یک فشار هیدروستاتیک مشخص ناشی از اختلاف طول قطعات است. قطعات کوچک‌تر سبک‌ترند و حمل و نقل و

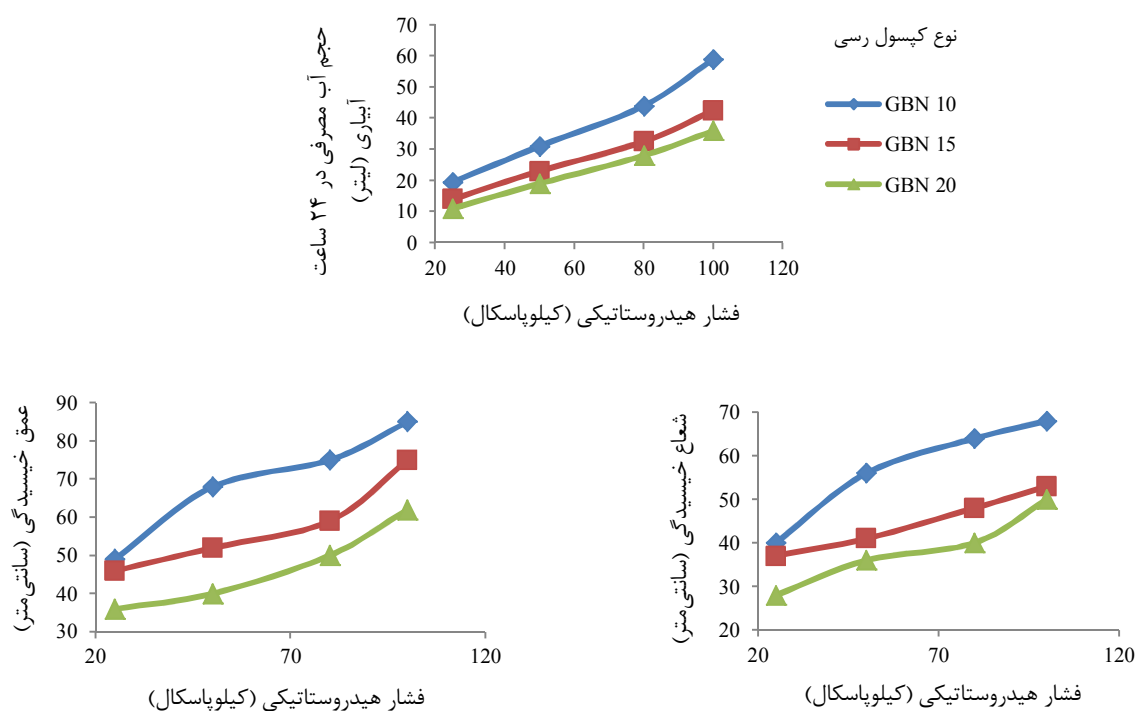
افزوده شده است. در حالی که در قطره‌چکان‌ها با توانایی آبدهی بیشتر از ۲ لیتر بر ساعت نسبت عمق خیسیدگی به شعاع خیسیدگی در بافت‌های متنوع خاک کوچک‌تر از واحد گزارش شده است (میرزایی، ۱۳۸۶؛ پلنگی و آخوند علی، ۱۳۸۷ و نصیری و همکاران، ۱۳۹۰).

خیسیدگی (Z) متناظر خود در بافت خاک لوم رسی اختلاف چندانی ندارند و نسبت  $Z/t$  به طور متوسط برابر  $1/2$  است و می‌توان پیازهای رطوبتی را به نسبت کروی فرض کرد (شکل ۴). البته با افزایش فشار هیدروستاتیکی بر میزان عمق خیسیدگی بیشتر از شعاع خیسیدگی

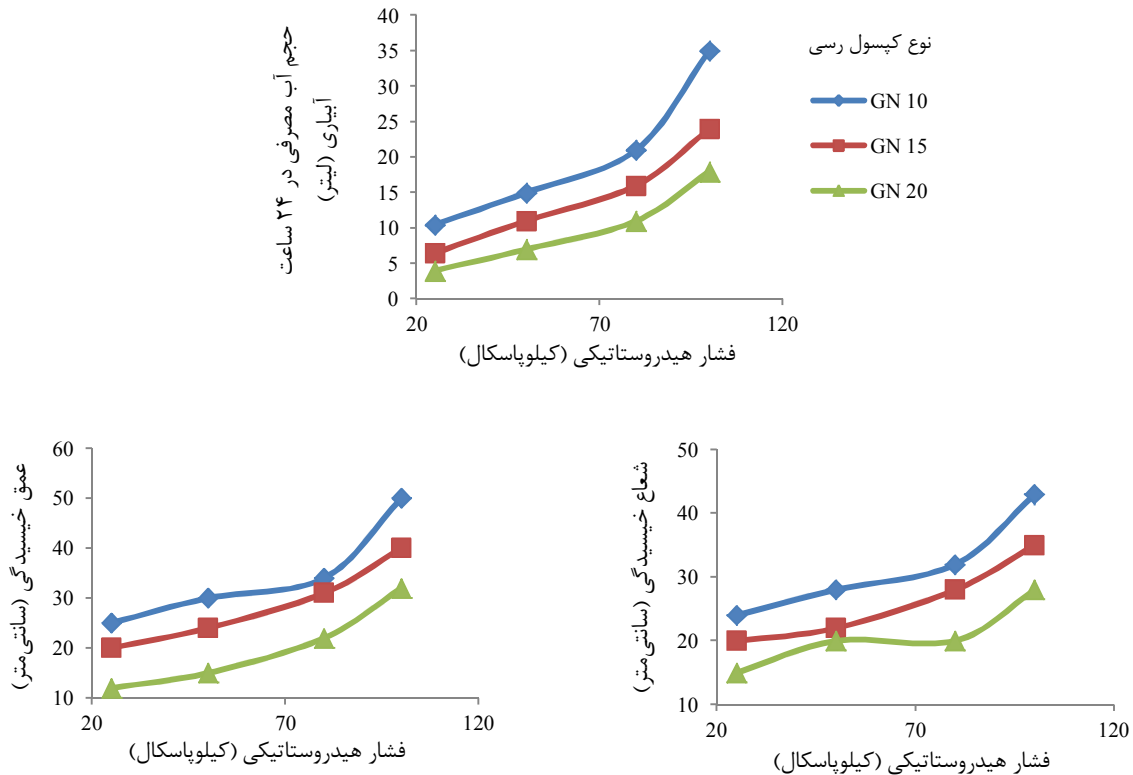
جدول ۲- میانگین شعاع و عمق خیسیدگی کپسول‌های رسی متخلخل در خاک بعد از ۲۴ ساعت آبیاری

کد	زیرکد	شعاع خیسیدگی (سانتی‌متر)				عمق خیسیدگی (سانتی‌متر)			
		فشار ۲۵ (kPa)	فشار ۵۰ (kPa)	فشار ۸۰ (kPa)	فشار ۱۰۰ (kPa)	فشار ۲۵ (kPa)	فشار ۵۰ (kPa)	فشار ۸۰ (kPa)	فشار ۱۰۰ (kPa)
GBN	۱۰	۴۰	۵۶	۶۴	۶۸	۴۹	۶۸	۷۵	۸۵
	۱۵	۳۷	۴۱	۴۸	۵۳	۴۶	۵۲	۵۹	۷۵
	۲۰	۲۸	۳۶	۴۰	۵۰	۳۶	۴۰	۵۰	۶۲
GN	۱۰	۲۴	۲۸	۳۲	۴۳	۲۵	۳۰	۳۴	۵۰
	۱۵	۲۰	۲۲	۲۸	۳۵	۲۰	۲۴	۳۱	۴۰
	۲۰	۱۵	۲۰	۲۰	۲۸	۱۲	۱۵	۲۲	۳۲

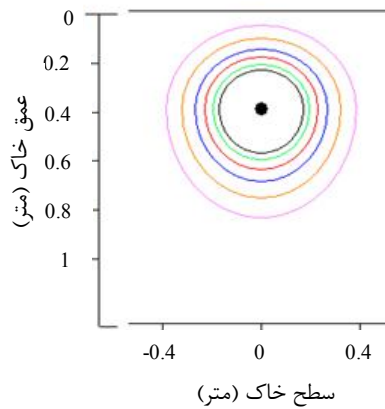
اعداد "زیرکد" نشان‌دهنده نسبت ماده متخلخل کننده به خاک است به طور مثال GN<sub>10</sub> بیانگر قطعات سفالی با ۱۰ نسبت خاک و یک نسبت ماده متخلخل کننده است. به عبارت دیگر کد و زیرکد مشخصه نوع قطعات سفالی و توان آبدهی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تغییرات حجم آب مصرفی، شعاع و عمق خیسیدگی در مقابل تغییر فشار هیدروستاتیکی در کپسول‌های رسی GBN



شکل ۳- تغییرات حجم آب مصرفی، شعاع و عمق خیسیدگی در مقابل تغییر فشار هیدروستاتیکی در کپسول های رسی GN



شکل ۴- الگوی پیاز رطوبتی کپسول رسی GBN<sub>15</sub> در فشار هیدروستاتیکی ۲۵ کیلوپاسکال در خاکی با بافت لوم رسی

جدول ۳- معادله ابعادی شعاع و عمق خیسیدگی کپسول های رسی متخلخل در خاک لوم رسی

عمق خیسیدگی یا d (سانتی متر)	شعاع خیسیدگی یا r (سانتی متر)	کد کپسول رسی
$527.37 \times h \times (K_s \times \frac{t}{h})^{-0.64} (\frac{V_m}{h^3})^{0.60}$	$127.90 \times h \times (K_s \times \frac{t}{h})^{-0.45} (\frac{V_m}{h^3})^{0.51}$	GBN
$106.40 \times h \times (K_s \times \frac{t}{h})^{-0.62} (\frac{V_m}{h^3})^{0.52}$	$46.81 \times h \times (K_s \times \frac{t}{h})^{-0.35} (\frac{V_m}{h^3})^{0.45}$	GN

جدول ۴- آماره‌های مهندسی ارزیابی اعتبار نمون‌های شعاع و عمق خیسیدگی

R <sup>2</sup>	CRM	EF	CD	RRMSE	ME	نمون	نوع کپسول رسی
۹۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۹۷	۰/۶۱	۲۷/۱۷	۱۰/۰۸	شعاع خیسیدگی	GBN
۸۸/۹۳	۰/۰۴	۰/۹۸	۱/۲۱	۲۰/۳۸	۹/۵۶	عمق خیسیدگی	
۸۹/۹۰	-۰/۱۳۶	۰/۹۱	۰/۱۸	۶۳/۳۵	۱۱/۵۱	شعاع خیسیدگی	GN
۹۰/۹۰	۰/۱۳۸	۰/۹۲	۰/۱۸	۵۲/۵۹	۱۰/۳۴	عمق خیسیدگی	

رطوبت در کپسول‌های رسی از مدل فازی استفاده کرده بودند. در مدل آن‌ها عامل زمان وجود نداشت و برای بسیاری از کاربران کار با چنین مدلی که تحت نرم‌افزار مطلب کار می‌کند دشوار است. در حالیکه در مدل ابعادی شعاع و عمق خیسیدگی کپسول‌های رسی متخلخل GBD و GN عامل زمان به کار رفته است و طراحان و مجریان سامانه‌های آبیاری زیرسطحی با قرار دادن مقادیر عددی پارامترها در معادله قادر به تعیین شعاع و عمق خیسیدگی در زمان‌های مختلف خواهند بود. از سوی دیگر با مشخص بودن ابعاد پیاز رطوبتی قطعات سفالی در زمان‌های مختلف آبیاری، امکان تأمین پیاز رطوبتی متناسب با شکل توسعه ریشه در دوره‌های مختلف زمانی رشد گیاه به کمک این نوع از سامانه آبیاری فراهم خواهد شد.

#### نتیجه‌گیری

کاربران تمایل بیشتری به استفاده از مدل‌های تجربی (ساده) به جای مدل‌های ریاضی دارند. برقراری رابطه تجربی بین پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل پیاز رطوبتی به روش آنالیز ابعادی نشان داد که این نمونه همانند نمونه‌های پیچیده ریاضی و یا حل عددی که برای تخمین شعاع و عمق خیسیدگی قطره‌چکان‌ها ارائه شده است دارای دقت کافی بود. استفاده معادلات شعاع و عمق خیسیدگی ارائه شده در این پژوهش فقط برای کپسول‌های رسی GBN و GN و آن هم در زمان‌های آبیاری کمتر از ۴۸ ساعت و برای خاک‌های با بافت لوم رسی غیر شور با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بر ساعت و تا فشار هیدروستاتیکی ۱۰۰ کیلوپاسکال صادق است. از طرفی مقایسه شعاع و عمق خیسیدگی خاک در کپسول‌های رسی GBN و GN نشان داد که با افزایش فشار هیدروستاتیک بر میزان ابعاد پیاز رطوبتی افزوده شد. همچنین نتایج نشان داد که می‌توان

#### تخمین ابعاد پیاز رطوبتی به روش آنالیز ابعادی

مقادیر  $m$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $n$ ،  $\lambda$  و  $\gamma$  در معادلات (۵) و (۶) به کمک نرم‌افزار استات گراف نسخه ۷ و با روش رگرسیون غیر خطی برای کپسول رسی GBN به ترتیب برابر ۱۲۷/۹۰، ۰/۴۵، -۰/۵۱، ۰/۵۱/۳۷، ۵۲۷/۳۷، -۰/۶۴ و ۰/۶۰ و برای کپسول رسی GN به ترتیب برابر ۴۶/۸۱، -۰/۳۵، ۰/۴۵، ۰/۴۰، ۱۰۶/۴۰، -۰/۶۲ و ۰/۵۲ محاسبه شد. پس از جای‌گذاری ضریب‌ها و توان‌ها در معادلات (۵) و (۶)، معادلات شعاع ( $r$ ) و عمق خیسیدگی ( $Z$ ) هر نوع کپسول رسی بر اساس جدول زیر به دست آمد. استفاده از این معادلات فقط در زمان‌های کمتر از ۴۸ ساعت و برای خاک‌های با بافت لوم رسی غیرشور با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بر ساعت و تا فشار هیدروستاتیکی ۱۰۰ کیلوپاسکال صادق است.

بررسی آماره‌های مهندسی در ارزیابی اعتبار این مدل‌ها (جدول ۴) نشان می‌دهد که مدل آنالیز ابعادی به روش تئوری باکینگهام در برآورد عمق خیسیدگی دارای دقت عمل بیشتری نسبت به شعاع خیسیدگی است. همچنین بررسی آماره‌های مهندسی ارزیابی اعتبار بین مدل عمق خیسیدگی در دو نوع کپسول رسی GBN و GN نشان می‌دهد که با کوچک‌تر شدن اندازه قطعه از دقت برآورد مدل کاسته شده است. این مسئله برای مدل شعاع خیسیدگی نیز صادق است.

نتیجه کلی آن که در اجرای پروژه‌های آبیاری استفاده از مدل برآورد عمق و شعاع خیسیدگی به روش تئوری باکینگهام اختلاف زیادی در تعیین فاصله و عمق کارگذاری قطعات سفالی نخواهد داشت. پس با چشم‌پوشی از خطای محاسباتی می‌توان از این نمونه‌ها بر حسب نیاز و صلاحیت در طراحی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی استفاده کرد. پیش از این بهرامی و همکاران (۲۰۱۰) برای برقراری رابطه ریاضی بین پارامترهای مؤثر بر الگوی توزیع



8. 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.
9. Abu-Zreig M. M. and Atoum M. F. 2004. Hydraulic characteristics and seepage modeling of clay pitchers produced in Jordan, *Canadian Biosystems Engineering*. 46: 1.15-1.20.
10. Bahrami H. A. Ghorbani Vaghei H. Alizadeh P. Nasiri F. and Mahallati Z. 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.
11. Bainbridge D. A. 2001. Buried clay pot irrigation a little known but a very efficient traditional method of irrigation. *Agricultural Water Management*. 48: 79-88.
12. Bainbridge D. A. 2002. Alternative irrigation systems. *Ecological Restoration*. 20(1): 23-30.
13. Homae M. Direksen C. and Feddes R. A. 2002. Simulation of root water uptake 1-Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*. 57: 89-109.
14. Loague K. and Green R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal Contaminant Hydrology*. 7: 51-73.
15. Plaut Z. Carmi A. and Grava P. 1996. Cotton root and shoot responses to subsurface drip irrigation and partial wetting of the upper soil profile. *Irrigation Science*. 16: 107-113.
16. Qiaosheng S. Zouxin L. Zhenying W. and Hijung L. 2007. Simulation of the soil wetting shape under porous pipe sub-irrigation using dimensional analysis. *Irrigation and Drainage*. 56: 389-398.
17. Siyal A. A. Siyal A. G. and Hasini M. Y. 2011. Crop production and water use efficiency under subsurface porous clay pipe irrigation. *Pakistan Journal of Agricultural Engineering*. 27 (1): 39-50.
18. 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.
19. Vasudevan P. Thapliyal A. Sen P. K. Dastidar M. G. and Davis P. 2011. Buried clay pot efficient and controlled water delivery. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 70: 645-652.

از کپسول‌های رسی GN<sub>10</sub> به جای کپسول‌های رسی GBN<sub>20</sub> برای تأمین رطوبت خاک استفاده کرد و اینکه اگر دو قطعه GN<sub>10</sub> با فاصله عمودی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر کار گذاشته شوند توانایی ایجاد الگوی پیاز رطوبتی مشابه قطعات GBN را دارند.

### سپاس‌گزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس بابت حمایت‌های مالی و تجهیز کارگاه ساخت و تولید قطعات سفالی دانشکده کشاورزی آن دانشگاه تقدیر و تشکر می‌شود.

### منابع

۱. باستانی ش. ۱۳۷۳. آبیاری زیرزمینی با لوله‌های کوزه‌ای. هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۳۱ مرداد-۲ شهریور، تهران. شماره ۲۶: ۱-۲۲.
۲. بهنیا ع. و عرب‌فرد م. ۱۳۸۴. تعیین رابطه دبی- فشار در کوزه‌های مورد استفاده در آبیاری کوزه‌ای. *مجله علوم و صنایع کشاورزی*. ۱۹(۱): ۱-۱۲.
۳. پلنگی ج. ع. و آخوندعلی ع. م. ۱۳۸۷. یک مدل نیم‌تجربی به منظور تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع نقطه‌ای. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی* ۴۴: ۸۵-۹۷.
۴. قربانی واقعی ح. بهرامی ح. ع. علیزاده پ. و نصیری صالح ف. ۱۳۹۰. ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های رسی متخلخل و تأثیر آن بر توزیع رطوبت خاک. *مجله پژوهش آب ایران*. ۵(۹): ۱۳۱-۱۴۰.
۵. کشاورز ع. و صادق‌زاده ک. ۱۳۷۹. کم آبیاری بهینه و تجزیه و تحلیل ریاضی و اقتصادی آن. *مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی*. ۵(۱۷): ۱-۲۶.
۶. میرزایی ف. ۱۳۸۶. یک مدل ساده برای برآورد سطح خیس شده در آبیاری قطره‌ای با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی. اولین سمینار طرح ملی آبیاری تحت فشار و توسعه پایدار. ۳۰ شهریور، کرج. ۳۰۵-۳۱۳.
۷. نصیری ش. نشاط ع. و کهنوجی م. ۱۳۹۰. تعیین معادله‌های تجربی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای در خاک‌های متوسط- شنی (مطالعه موردی دشت قائم آباد، کرمان). *مجله مهندسی منابع آب*. ۴: ۸۷-۹۰.

