

ارزیابی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم فشار به کمک مدلسازی ریاضی و داده‌های آزمایشگاهی

محبوبه سادات ملائی، علی مهدوی مزده^۱* و علیرضا وطن‌خواه

کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

m.mollaei13@gmail.com

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

al.mahdavi@gmail.com

استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

Alireza_Vatankhah@yahoo.com

چکیده

در تحقیق حاضر هیدرولیک سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم فشار در لوله‌های لترال (جانبی) توسط مدل ریاضی و به کمک داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تست لوله‌های موجود در ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، دبی قطره‌چکان‌ها در ارتفاع‌های آبی مختلف از ۰/۴۵ تا ۱/۸ متر در لوله لترال به قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر و طول‌های ۱۶، ۳۰، ۶۰ و ۸۹ متر و همچنین لترال به طول ۱۶ متر و قطرهای خارجی ۱۶، ۲۰، ۲۵ و ۳۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. رابطه دبی-ارتفاع برای قطره‌چکانها به صورت $q=1/955h^{0.441}$ با ضریب همبستگی ۰/۹۳ بدست آمد. برای محاسبه افت موضعی نیز بر اساس نسبت قطر لترال به طول آن دو رابطه بر حسب عدد رینولدز با ضرایب همبستگی ۰/۹۵ و ۰/۷۵ ارائه گردید. بعلاوه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای برآورد افت اصطکاکی با دقت خوبی می‌توان از معادله کلبروک-وایت استفاده نمود. به کمک روابط و داده‌های استخراج شده از نتایج آزمایشگاهی مدل ریاضی واسنجی و صحت‌سنجی شد. از این مدل برای ارزیابی اثر قطر، ارتفاع آبی و طول‌های مختلف لوله لترال بر دبی قطره‌چکانها که به صورت آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست، استفاده گردید. نتایج نشان داد که محدوده طولی مناسب برای لترال به قطر خارجی ۱۶ میلیمتر که با ارتفاع آبی ۰/۴۵ تا ۱/۸ متر، بتواند یکنواختی بالای ۸۰ درصد را ایجاد کند، ۴۰ تا ۷۵ متر می‌باشد. این عدد برای قطر خارجی ۲۰، ۲۵ و ۳۲ میلیمتر، به ترتیب بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر، ۷۰ تا ۱۵۰ متر و ۸۰ تا ۱۸۰ متر می‌باشد. در پایان نیز یک نمودار و رابطه برای طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌فشار ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع آبی، طول و قطر لترال، مدل ریاضی، یکنواختی توزیع.

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

* - دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۳ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۳

مقدمه

هستند. گیاسی-آگی (۲۰۰۷) عدم قطعیت‌ها را در پارامترهای لوله‌های جانبی آبیاری قطره‌ای استخراج کرده و نشان داد که مقادیر ضریب تغییرات ساخت ارائه شده از سوی کارخانه ممکن است با مقادیر ضریب تغییرات در شرایط صحرائی (زمانی که سیستم بر روی زمین اجرا می‌شود)، متفاوت باشد. این تفاوت ناشی از اثر فاکتورهای دیگر به همراه تغییرات ساخت کارخانه می‌باشد. بررسی اثر ارتفاع‌های آبی یک تا سه متر بر یکنواختی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نشان داد که یکنواختی دبی قطره‌چکان‌ها با افزایش ارتفاع آبی، افزایش و با افزایش شیب، کاهش می‌یابد (الا و همکاران، ۲۰۰۸). تحقیق دیگری در این زمینه با بررسی اثر فشارهای کارکرد ۰/۲ تا ۱۰ متر بر سه نوع قطره‌چکان موجود در بازار نشان داد که مقادیر ضریب تغییرات نسبت به تغییرات فشار کارکرد کمتر از یک متر حساس‌تر می‌باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

به خوبی ثابت شده است که تلفات موضعی ایجاد شده توسط اتصال گسیلنده‌ها بر روی لترال، می‌تواند اثر قابل توجهی بر طراحی هیدرولیکی سیستم داشته باشد (پروونزانو و پومو، ۲۰۰۴؛ جوانا و همکاران، ۲۰۰۲). جوانا و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی انواع مختلف قطره‌چکان‌های روی خط و داخل خط، به این نتیجه دست یافتند که عواملی نظیر عدد رینولدز، فشار در ابتدای لوله لترال و فاصله بین قطره‌چکان‌ها کمترین تأثیر و ابعاد هندسی قسمتی از قطره‌چکان که در داخل لوله لترال قرار می‌گیرد، بیشترین تأثیر را بر افت ناشی از تیزه (Barb) گسیلنده‌ها دارند.

بیلدیریم (۲۰۰۷) نشان داد که تلفات جزئی ناشی از ورود گسیلنده‌ها با کاهش قطر لترال و افزایش طول لوله لترال افزایش می‌یابد و صرف نظر کردن از آنها، ممکن است منجر به ۲۵٪ خطا در طراحی قطر لترال و ۷٪ خطا در طراحی طول آن شود. ردی (۲۰۰۲) افت تیزه گسیلنده‌ی آبیاری قطره‌ای را برای انواع مختلف قطره‌چکان‌های روی خط با استفاده از لترال 12 mm ،

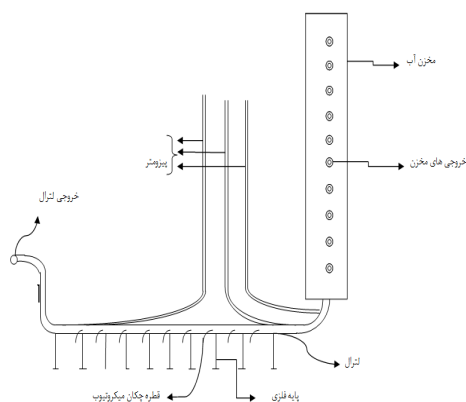
منابع محدود آب در کشور ایران از یک طرف و تقاضای روزافزون برای محصولات کشاورزی از طرف دیگر، سبب افزایش اهمیت شبکه‌ی لوله‌های آبیاری در توزیع آب مزرعه شده است. زیرا طراحی صحیح و بهینه سیستم‌های آبیاری سبب خواهد شد تا از برداشت بی‌رویه منابع آب جلوگیری شود و استفاده بهینه از آب میسر گردد.

آبیاری قطره‌ای مخصوصاً در مناطقی که آب دارای ارزش زیادی است، یکی از معمول‌ترین سیستم‌های آبیاری تحت فشار می‌باشد. تحقیقات زیادی در زمینه‌ی آبیاری قطره‌ای انجام شده است. به عنوان مثال، بیلدیریم و آگی‌الیوغلو (۲۰۰۴)، پروونزانو و همکاران (۲۰۰۵)، والیانتراس (۲۰۰۵)، صدرالدینی و همکاران (۱۳۸۸) و دوتا (۲۰۰۸) هر کدام به نوعی این سیستم را مورد ارزیابی قرار دادند.

در این روش آبیاری، میزان سرمایه گذاری اولیه در مقایسه با روش‌های آبیاری سطحی بسیار زیاد بوده و برای به‌کارگیری این روش نیاز به لوله، قطره‌چکان و دیگر تجهیزات گران‌قیمت می‌باشد. هزینه زیاد اجرا و کاربرد آبیاری قطره‌ای از یک طرف و پیچیدگی‌های فنی آن از طرف دیگر، سبب شده است که اجرای آن برای کشاورزان خرده مالک و جاهایی که تأمین برق در آن‌ها مشکل است، مقرون به صرفه نباشد و بعلاوه راندمان واقعی آنها بسیار کمتر از مقدار تئوریک خواهد بود. در این تحقیق به بررسی آبیاری قطره‌ای کم فشار که با استفاده از فشار کمتر و عدم نیاز به سیستم پمپاژ سبب کاهش چشمگیر هزینه‌ها و صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود، پرداخته خواهد شد.

وو و باراگان (۲۰۰۰) با بررسی روش‌های مختلف ارزیابی یکنواختی سیستم نشان دادند که استفاده از یکنواختی معادل مناسب‌ترین روش می‌باشد. بیلدیریم و آگی‌الیوغلو (۲۰۰۴) نشان دادند که مشخصات قطره‌چکان‌ها (گسیلنده‌ها) برای طراحی مهم

در این تحقیق به منظور تامین ارتفاع آبی و آب مورد نیاز از یک لوله به ارتفاع ۲/۵۶ متر و قطر ۱۹ سانتی‌متر از جنس پلی‌اتیلن استفاده گردید شکل (۱). مخزن مورد نظر ۱۰ خروجی به فواصل ۱۵ سانتی‌متر داشت که ارتفاع‌های آبی ۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۷۵، ۰/۹، ۱/۰۵، ۱/۲، ۱/۳۵، ۱/۵، ۱/۶۵ و ۱/۸ متر را تامین می‌کرد. جهت تامین آب مخزن و ایجاد گردش آب از میز هیدرولیکی استفاده گردید. بدین ترتیب که آب از داخل میز هیدرولیکی به مخزن پمپ شده و اضافه آن از خروجیهای تعبیه شده روی مخزن به میز هیدرولیکی باز گردانده می‌شد. به این ترتیب به کمک خروجی انتخاب شده برای بازگشت آب، ارتفاع آبی دلخواه روی لترال ایجاد گردید. لوله لترال توسط شیر رابط به زیر مخزن آب متصل می‌گردید. به منظور اندازه‌گیری افت ارتفاع آب در طول لترال، از پیزومترهایی که در ابتدا و انتهای آن نصب شده بودند، استفاده شد.



شکل ۱- نمای شماتیک از تجهیزات آزمایشگاه

قطره‌چکان‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع میکروتیوب به قطر خارجی سه میلی‌متر و قطر داخلی یک میلی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر می‌باشند که در فواصل یک متری به لوله لترال متصل شده به طوری که ۲۰ سانتی‌متر آن‌ها در داخل لترال و ۵۰ سانتی‌متر آن‌ها بیرون لترال قرار گیرد. برای ارتفاع‌های آبی مختلف، با قرار دادن ظرف‌های مدرج در زیر هر قطره‌چکان، دبی قطره‌چکان‌ها به روش حجمی اندازه‌گیری گردید.

برای محاسبه ضریب یکنواختی قطره‌چکان‌ها

ارزیابی نمود. وی برای هر قطره‌چکان یک رابطه خطی افزایشی بین سرعت جریان و افت تیزه قطره‌چکان به‌دست آورد. تامپسون (۲۰۱۰) در تحقیق روی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم فشار، دریافت که برای میکروتیوب‌هایی که به طول ۵ و ۱۰ سانتی‌متر در داخل لترال قرار گرفتند، افت تیزه قطره‌چکان تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین، در این تحقیق، میکروتیوب‌ها یکنواختی عالی نشان دادند، اما از آنجاییکه سرعت جریان در آنها نسبتاً زیاد است، حساسیتشان نسبت به تغییرات فشار نسبت به دیگر گسیلنده‌ها بیشتر است.

در تحقیقی که ملایی و همکاران (۱۳۹۲) در زمینه آبیاری قطره‌ای کم‌فشار به صورت آزمایشگاهی انجام دادند، نشان داده شد که در ارتفاع‌های آبی ۰/۵ تا ۱/۸ متر در طول‌های مختلف لترال از ۱۶ متر تا طول ۸۹ متر و در قطرهای مختلف لترالی به طول ۱۶ متر، سیستم دارای یکنواختی مطلوب و بیش از ۸۸٪ حتی در کمترین ارتفاع آبی بود، اما از آنجایی که افزایش طول لترال به اندازه‌ی دلخواه در شرایط آزمایشگاهی به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاه به بیشتر از ۸۹ متر امکان‌پذیر نبود، بنابراین نتایج به طول لترال حداکثر تا ۸۹ متر (آن هم فقط برای قطر ۳۲ میلی‌متر) محدود گردید.

با توجه به اهمیت و جدید بودن آبیاری قطره‌ای کم فشار و نیز با توجه به اینکه در تحقیقات انجام شده برآورد حداکثر طول لترال انجام نشده است، لذا در این تحقیق سعی خواهد شد تا این سیستم با توجه به لوازم موجود در ایران مورد ارزیابی قرار گیرد. چون این برآورد به صورت آزمایشگاهی مشکل است، بنابراین ترکیبی از دو روش آزمایشگاهی و مدل ریاضی انجام خواهد شد. همچنین، سعی خواهد شد تا نمودگرافی ارائه شود که به کمک آن طراحی با یکنواختی مورد نظر را آسان سازد.

مواد و روش‌ها

مواد و روش آزمایشگاهی

اندازه‌گیری دبی در لوله لترال در قطرهای مختلف و در ارتفاع‌های آبی مختلف (۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۷۵، ۰/۹، ۱/۰۵، ۱/۲، ۱/۳۵، ۱/۵، ۱/۶۵ و ۱/۸ متر) به روش حجمی و با سه بار تکرار انجام گردید.

پس از انجام آزمایش‌های فوق، مقادیر ضریب افت اصطکاک (f) با استفاده از رابطه تجربی داریسی ویسباخ برای ۱۰ بار آبی مختلف و در چهار قطر متفاوت لترال محاسبه شد.

$$h_f = \frac{fL V^2}{D 2g} \quad (3)$$

که در آن:

L طول لترال بر حسب متر، f ضریب اصطکاک، h_f اختلاف ارتفاع آب در پیژومترهای اول و آخر بر حسب متر، V سرعت جریان در لوله لترال بر حسب متر بر ثانیه و D قطر داخلی لترال بر حسب متر می‌باشد. سرعت جریان آب در لوله، با استفاده از رابطه $V = Q / A$ به دست آمد.

سپس به منظور مقایسه روابط تئوری با f حاصل از آزمایش، مقدار ضریب اصطکاک با استفاده از روابط تئوری به صورت زیر، بدست آمد:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad R_e < 2000 \quad (4)$$

$$f = \frac{0.316}{R_e^{0.25}} \quad R_e > 2000 \quad (5)$$

در رابطه فوق R_e ، عدد رینولدز است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

که در آن:

ν ، عبارتست از لزوجت سینماتیک آب که به دمای آب بستگی دارد. به همین منظور در هر مرحله از آزمایش دمای آب اندازه‌گیری شد.

($C_v U$) از رابطه زیر استفاده شد: (کلر و کلر، ۲۰۰۳):

$$C_v U = 100(1 - C_v) \quad (1)$$

$$C_v = \frac{S}{Q_{avg}} \quad (2)$$

که در آن:

S انحراف معیار حاصل از دبی قطره‌چکان‌ها و Q_{avg} دبی متوسط قطره‌چکان‌ها می‌باشد. کلر و کلر (۲۰۰۳) سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم هزینه در زمین‌های با ابعاد کوچک را بر اساس مقادیر $C_v U$ بیش از ۸۸٪، از ۸۰ تا ۸۸٪، از ۶۸ تا ۸۰٪ و کمتر از ۶۸٪ به ترتیب به صورت عالی، خوب، قابل قبول و غیر قابل قبول طبقه‌بندی نمود. در مجموع، تعداد ۱۵۰ آزمایش در دو سری انجام گردید. آزمایش‌های سری اول به منظور تعیین روابط لازم برای برآورد افت اصطکاک در لوله لترال با انتهای باز و بدون قطره‌چکان انجام گردید. نتایج آزمایش‌های سری دوم برای تعیین روابط دبی-ارتفاع در میکروتیوب‌ها، برآورد افت موضعی حاصل از میکروتیوب‌ها و همچنین صحت‌سنجی مدل استفاده گردید.

تعیین ضرایب اصطکاک تئوری و تجربی

در آزمایش‌های سری اول، از لوله لترال با انتهای باز و بدون قطره‌چکان استفاده شد. در این سری از آزمایش‌ها از لترال به قطر ۳۲ میلی‌متر (طول ۸۹ متر) و لوله لترال به قطرهای ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر (طول ۱۶ متر) استفاده گردید. لترال‌ها بر روی پایه‌هایی با ارتفاع قابل تنظیم قرار گرفته و تراز شدند. سپس توسط لوله‌ی رابط به قسمت انتهای مخزن متصل شدند. ارتفاع آبی اولیه نیز توسط پیژومتری که در ابتدای لوله نصب شده بود قرائت گردید.

برای محاسبات مربوط به افت اصطکاک ایجاد شده در سیستم و همچنین بررسی صحت انجام آزمایش‌ها، به مقایسه ضرایب اصطکاک تجربی و تئوری پرداخته شد. بدین منظور لوله لترال به تنهایی (بدون قطره‌چکان) و با انتهای باز مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش‌های سری دوم

ارتفاع کل، افت مربوط به اتصال قطره‌چکان‌ها حاصل شد که با تقسیم آن بر تعداد قطره‌چکان‌ها افت هر قطره‌چکان نیز به دست آمد. ضریب افت قطره‌چکان‌ها از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\lambda = \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

که در آن:

λ ، افت ناشی از اتصال هر قطره‌چکان، α ، ضریب افت قطره‌چکان، V ، سرعت جریان در لوله بر حسب متر بر ثانیه و g ، شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه است. در این تحقیق مقدار این ضریب با فرض اینکه افت موضعی تمام قطره‌چکانها در طول لترال با یک هد ثابت یکسان است به دست آمده است. برای برآورد دقیق تر ضریب افت نیاز به تحقیقات بیشتر می باشد.

محاسبه رابطه دبی ارتفاع

در هر آزمایش سری دوم، با داشتن ارتفاع آبی اولیه، دبی هر قطره‌چکان، افت اصطکاکی در هر قطعه لوله و افت موضعی هر قطره‌چکان، می‌توان ارتفاع آب پشت هر قطره‌چکان را محاسبه نمود.

فرم کلی رابطه دبی-ارتفاع به صورت زیر می‌باشد:

$$q = kH^x \quad (8)$$

که در آن:

q ، دبی هر قطره‌چکان بر حسب لیتر بر ساعت و H ، ارتفاع آبی آب در پشت قطره‌چکان بر حسب متر می‌باشد.

مدلسازی ریاضی

یک مدل ریاضی در محیط اکسل توسعه داده شد که بتواند با داشتن طول، قطر و ارتفاع آبی، دبی هر قطره‌چکان را حساب نماید. دبی میکروتیوب‌ها با یک فرآیند سعی و خطا بر روی مجموع دبی میکروتیوب‌ها بدست خواهد آمد. بدین ترتیب که ابتدا با فرض صفر بودن افت‌های موضعی و اصطکاکی، با نسبت دادن ارتفاع هیدرولیکی ابتدا به کلیه میکروتیوب‌ها، از رابطه دبی-

در این سری از آزمایش‌ها، میکروتیوب‌ها به لوله لترال متصل شد و انتهای لترال مسدود گردید. ابتدا لترال به طول ۸۹ متر و قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر در زیر مخزن آب توسط شیر رابط متصل گردید. دبی میکروتیوب‌ها به روش ذکر شده برای تمامی ارتفاع‌های آب اندازه‌گیری شد. افت ایجاد شده در طول لترال نیز در هر ارتفاع آب توسط پیزومترها قرائت گردید. سپس لوله لترال به طول‌های ۶۰، ۳۰ و ۱۶ متر کاهش داده شد و در تمامی این طول‌ها نیز دبی قطره‌چکان‌ها در ۱۰ ارتفاع آبی اندازه‌گیری و افت ارتفاع آب در لترال نیز قرائت شد.

سپس قطر لترال را تغییر داده و برای انجام آزمایش از لوله‌های لترال به طول ۱۶ متر و قطرهای خارجی ۳۲، ۲۵، ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر استفاده گردید. قطر داخلی متوسط آنها با اندازه‌گیری‌های متعدد در قسمت‌های مختلف لوله به ترتیب برابر ۲۷/۶، ۲۱/۷، ۱۶ و ۱۳/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. دبی قطره‌چکان‌ها و افت ارتفاع آب در طول لترال نیز برای تمامی ارتفاع‌ها و در هر قطر لترال اندازه‌گیری شد. از آزمایش‌های مربوط به قطر ۳۲ میلی‌متر با طول ۸۹ متر برای صحت‌سنجی مدل و از بقیه برای تعیین ضریب افت قطره‌چکان‌ها و برآورد رابطه دبی-ارتفاع آب استفاده گردید.

تعیین ضریب افت قطره‌چکان‌ها

افت ارتفاع کل حاصل از قرائت پیزومترها که در طول لترال ایجاد می‌شود، ناشی از افت اصطکاکی لوله لترال و افت حاصل از اتصال قطره‌چکان‌ها به لترال می‌باشد. برای محاسبه‌ی افت مربوط به لوله لترال همان طور که در قبل ذکر شد از رابطه‌ی (۳) (دارسی-وایسباخ) استفاده شده است که حاصل مجموع افت اصطکاکی ایجاد شده در تمامی قطعه لوله‌ها می‌باشد. با داشتن دبی هر قطره‌چکان می‌توان دبی هر قطعه لوله و در نتیجه افت اصطکاکی هر قطعه لوله را به کمک رابطه (۳) محاسبه نمود. با تفاضل افت اصطکاکی لترال از افت

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

\bar{O} میانگین داده‌های مشاهده شده می‌باشد.

همچنین از شاخص CRM نیز استفاده گردید.

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

ضریب EF بین یک (مدلسازی ایده‌آل) تا $-\infty$

تغییر می‌کند. آماره CRM منفی نشان‌دهنده این است که مدل بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. و مقادیر CRM مثبت نشان‌دهنده این است که مدل کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

نتایج و بحث

بررسی ضرایب اصطکاک تئوری و تجربی

مقادیر ضرایب افت تئوری و آزمایشگاهی برای لترال به قطرهای خارجی ۳۲، ۲۵، ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر در مقابل عدد رینولدز در شکل (۲) آورده شده است. مشاهده می‌شود که ضرایب اصطکاک تئوری و آزمایشگاهی به طور تقریبی بر هم منطبق بوده و می‌توان برای محاسبات افت اصطکاک از روابط تئوری ذکر شده استفاده نمود.

محاسبه رابطه دبی ارتفاع

شکل (۳) تغییرات دبی در مقابل ارتفاع آب برای قطره‌چکان‌ها را در تمامی آزمایش‌ها (جز لترال ۸۹ متری) نشان می‌دهد. با برازش رابطه (۸) به داده‌ها، مقدار ضریب و توان رابطه به ترتیب برابر ۱/۹۵۵ و ۰/۸۴۲۱ به دست آمد. در این شکل، R^2 ضریب تبیین رابطه به دست آمده و n تعداد داده‌های آزمایش می‌باشند.

ارتفاع، دبی میکروتیوب‌ها حساب می‌شود. بدین ترتیب دبی هر قطعه لوله نیز به دست خواهد آمد. حال با داشتن دبی قطعه لوله‌ها، افت اصطکاک هر لوله و همچنین افت موضعی هر قطره‌چکان تعیین می‌شود. با داشتن ارتفاع آبی اولیه، افت اصطکاک و افت موضعی، ارتفاع آبی پشت هر قطره‌چکان محاسبه می‌شود و در نتیجه از روی آن دبی هر قطره‌چکان تعیین می‌گردد. مجموع دبی قطره‌چکان‌ها بایستی با دبی مجموع میکروتیوب‌ها در فرض اولیه برابر باشد. اگر برابر نبود با فرض دیگری برای مجموع دبی‌ها این کار تکرار خواهد شد. این فرآیند سعی و خطا توسط solver در نرم افزار Excel انجام گردید.

برای اینکه مدل به درستی کار کند لازم است تا رابطه‌ی دبی-ارتفاع، افت اصطکاک و افت موضعی به درستی برآورد شود که این کار باید توسط آزمایش انجام گردد. بدین منظور بخش آزمایشگاهی طراحی گردید و به کمک داده‌های آن، کالیبراسیون و صحت‌سنجی انجام شد. بدین ترتیب که آزمایش‌های مربوط به طول‌های ۱۶، ۳۰ و ۶۰ متر برای کالیبراسیون و از آزمایش‌های لترال به طول ۸۹ متر برای صحت‌سنجی استفاده شده است.

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی مدل، از داده‌های لترال ۸۹ متری که قطر ۳۲ میلی‌متر داشت و در واسنجی مدل (برآورد افت موضعی و رابطه ارتفاع-دبی قطره‌چکان‌ها) به کار نرفته بود، استفاده شد. برای مقایسه داده‌های تئوری و آزمایشگاهی از شاخص‌های زیر استفاده می‌شود.

مجموع مربعات خطا (SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \quad (9)$$

که در آن:

O_i داده‌های مشاهده شده (اندازه‌گیری شده) و P_i داده‌های حاصل از برآورد مدل می‌باشد.

راندمان مدل‌سازی (Modeling efficiency)

بررسی ضریب افت قطره چکان

شکل (۴) تغییرات ضریب افت میکروتیوب‌ها را در مقابل عدد رینولدز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روند کاهشی α در مقابل عدد رینولدز تا حدود رینولدز ۷۰۰ با شیب تند می‌باشد، اما از آن به بعد شیب آن کاهش می‌یابد و از ۱۵۰۰ به بعد، شیب کاهش بسیار کند می‌گردد. بعلاوه، توجه به شکل (۴) نشان می‌دهد که در محدوده کم‌تر از رینولدز ۱۵۰۰ داده‌ها به دو قسمت تقسیم شده‌اند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که این مسئله را می‌توان به نسبت قطر به طول لترال نسبت داد.

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب برای حالتی که نسبت قطر خارجی لترال به طول لترال کوچکتر از $1/1 \times 10^{-3}$ و حالتی که این نسبت بزرگتر از مقدار مذکور باشد، رسم شده است. برای شرایطی که نسبت قطر خارجی لترال به طول آن کوچکتر از $1/1 \times 10^{-3}$ باشد رابطه زیر برای محاسبه‌ی ضریب افت قطره‌چکان‌ها به دست آمد:

$$\alpha = 1E + 06 R_e^{-1.954} \quad (12)$$

همچنین برای حالتی که نسبت مذکور بزرگتر از $1/1 \times 10^{-3}$ باشد رابطه به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha = 27103 R_e^{-1.629} \quad (13)$$

که در آن:

α ضریب افت قطره‌چکان است.

صحت سنجی مدل

شکل‌های (۷) و (۸) دبی برآورده شده‌ی میکروتیوب‌ها توسط مدل، در مقابل نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. داده‌های شکل (۷) مربوط به آزمایش‌هایی است که مدل به کمک آن‌ها واسنجی شده است. اما داده‌های شکل (۸) مربوط به آزمایش‌های انجام شده در ارتفاع‌های آبی مختلف در طول ۸۹ متر است که در واسنجی دخالت نداشته‌اند.

مقادیر آماره‌های R^2 ، SSE، EF و CRM در

شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانایی پیش‌بینی دبی قطره‌چکان‌ها در طول لترال را دارد.

اثر طول لترال بر یکنواختی

به منظور بررسی اثر طول لترال بر درصد یکنواختی، مدل در دو قطر خارجی ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر برای طول‌ها و ارتفاع‌های آبی مختلف اجرا گردید. در هر حالت به کمک رابطه (۱) درصد یکنواختی برای لترال محاسبه شد. شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات درصد یکنواختی در مقابل افزایش طول را برای ارتفاع‌های آبی مختلف به ترتیب در قطرهای ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشخص است در هر دو قطر و در هر ارتفاع هیدرولیکی با افزایش طول ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد. شیب کاهش در قطر ۱۶ میلی‌متر به دلیل افت اصطکاکی بیشتر، از قطر ۳۲ میلی‌متر بیشتر است. اما افزایش ارتفاع در هر دو قطر باعث کاهش این شیب می‌شود. بعلاوه اثر ارتفاع بر ضریب یکنواختی با افزایش ارتفاع هیدرولیکی در هر دو قطر کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در طول ۶۰ متر و قطر ۱۶ میلی‌متر، با افزایش ارتفاع هیدرولیکی از ۰/۴۵ به ۰/۶ متر، میزان افزایش یکنواختی حدود ۱۰٪ است. اما با افزایش ارتفاع هیدرولیکی از ۰/۶ به ۰/۷۵ متر، یکنواختی ۵٪ افزایش می‌یابد.

اثر توام طول و قطر لترال بر یکنواختی

اثر طول لترال بر درصد یکنواختی در قطرهای مختلف برای ارتفاع‌های آبی ۰/۴۵، ۱/۰۵ و ۱/۸ متر به ترتیب در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود. در هر چهار قطر و در هر ارتفاع هیدرولیکی، با افزایش طول، ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد. شیب این کاهش با افزایش قطر کاهش می‌یابد. نکته بسیار مهمی که با دقت در این شکل‌ها مشخص می‌شود این است که تأثیر قطر بر درصد یکنواختی با افزایش قطر کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در ارتفاع آبی ۰/۴۵ متر و طول ۶۰ متر، با

$$\eta = \frac{H^{0.1} D^{0.3}}{L^{0.4}} \quad (14)$$

$$U_{CV} = \frac{100.5 - 0.00004\eta^{-4.38}}{1 + 1.16\eta^4} \quad (15)$$

معادله فوق و داده‌های حاصل از مدل در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

نمودار خطای نسبی نیز به صورت شکل (۱۷) می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، ۹۰٪ داده‌ها خطایی کمتر از ۱۴٪ دارند. خطای نسبی در این تحقیق از حاصل تقسیم خطای ایجاد شده بین مقادیر محاسباتی و اندازه گیری شده به مقدار اندازه گیری شده بر حسب درصد بدست آمد.

از نمودار شکل (۱۶) و رابطه‌ی حاصل از آن به راحتی می‌توان در طراحی چنین سیستمی استفاده نمود و با قرار دادن پارامترهای مورد نظر در رابطه‌ی (۱۶)، پارامتر مجهول را محاسبه نمود.

نتیجه گیری

در این تحقیق، با توجه به کارایی آبیاری قطره‌ای کم‌فشار در کاهش هزینه‌ها و انرژی به بررسی این سیستم توسط مدل ریاضی و به کمک داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج نشان داد که:

توان و ضریب معادله دبی- ارتفاع برای میکروتیوب به طول ۷۰ سانتی‌متر و قطر داخلی یک میلی‌متر به ترتیب برابر ۰/۸۴۲۱ و ۱/۹۵۵ محاسبه شد.

برای محاسبه‌ی ضریب افت قطره‌چکان‌های استفاده شده در این آزمایش دو رابطه برای شرایط مختلف طول و قطر لترال به دست آمد. این سیستم در کمترین قطر و با ارتفاع هیدرولیکی ۰/۴۵ متر تا طول ۴۰ متر می‌تواند یکنواختی ۸۰٪ را تأمین کند. اثر افزایش ارتفاع آبی و قطر بر بهبود یکنواختی با افزایش ارتفاع آبی و قطر کاهش می‌یابد. این مسئله در طراحی اقتصادی حائز اهمیت خواهد بود. دو نمودار طراحی، یکی برای یکنواختی ۸۰٪ و دیگری برای یکنواختی دلخواه، ارائه شد.

افزایش قطر از ۱۶ به ۲۰ میزان یکنواختی حدود ۱۵٪ افزایش می‌یابد و از ۶۱/۷ به ۷۶/۷ می‌رسد. اما با افزایش قطر از ۲۰ به ۲۵ و از ۲۵ به ۳۲ میزان یکنواختی به ترتیب ۱۲ و ۵ درصد افزایش یافت.

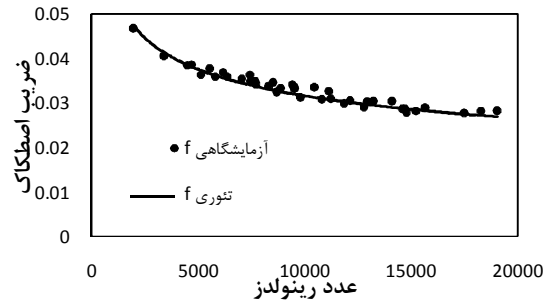
حداکثر طول با یکنواختی ۸۰٪ به بالا

حداکثر طول لترال که یکنواختی بیش از ۸۰٪ را تأمین می‌کند، در مقابل قطرهای مختلف لترال و ارتفاع‌های آبی متفاوت به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شوند.

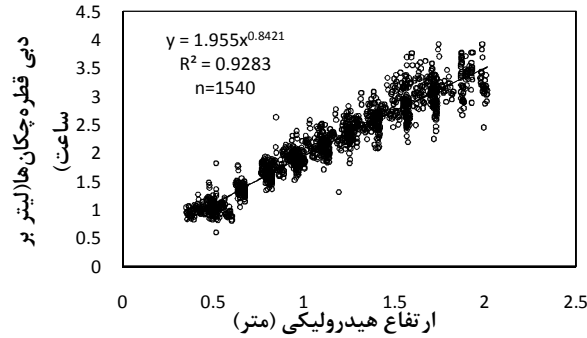
با توجه به شکل (۱۴) محدوده تغییرات طول ماکزیمم برای یکنواختی ۸۰٪ در دامنه ارتفاعی ۰/۴۵ تا ۱/۸ متر مشخص می‌گردد. مشاهده می‌شود بیشترین طول لترال که یکنواختی مناسب را تأمین کند، در تمامی قطرهای در محدوده مناسبی برای طراحی می‌باشد. در نتیجه، سیستم با ارتفاع هیدرولیکی کم جوابگوی یکنواختی بوده و از لحاظ هیدرولیکی قابل طراحی و اجرا در زمین‌های کشاورزی می‌باشد. شکل (۱۵) می‌تواند به عنوان نموداری برای طراحی با یکنواختی ۸۰٪ به بالا مورد استفاده قرار گیرد. زیرا به کمک آن با توجه با معلوم بودن دو پارامتر از بین ارتفاع هیدرولیکی، قطر و طول، پارامتر سوم قابل محاسبه خواهد بود. به عنوان مثال با معلوم بودن طول و قطر می‌توان محاسبه نمود حداقل ارتفاع هیدرولیکی لازم در ابتدای لترال چه مقدار باید باشد تا یکنواختی بالای ۸۰٪ تأمین گردد.

ارائه نمودار طراحی

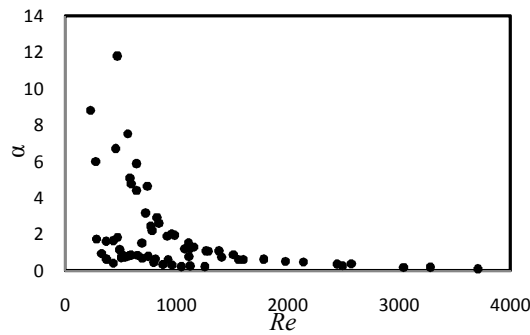
به منظور ارائه یک نمودار برای طراحی سیستم با یکنواختی دلخواه، مدل برای دامنه وسیعی از ارتفاع آبی (۰/۴۵ تا ۱/۸ متر)، طول و قطر لترال اجرا گردید و درصد یکنواختی برای لترال در هر حالت محاسبه گردید. با تعریف پارامتر بدون بعد η به صورت زیر با استفاده از روش برازش منحنی، برای دامنه کاربرد $0.04 \leq \eta \leq 0.12$ معادله ۱۵ به دست خواهد آمد:



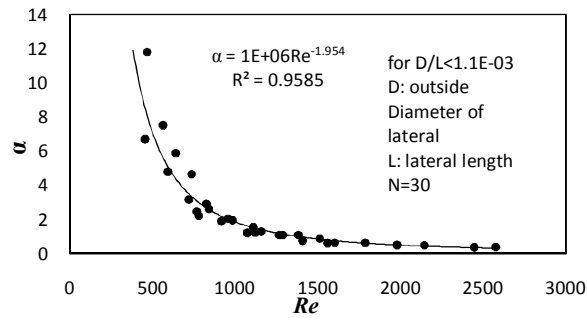
شکل ۲- ضریب اصطکاک تئوری و تجربی در مقابل عدد رینولدز برای تمامی قطرهای لوله‌های لترال مورد آزمایش



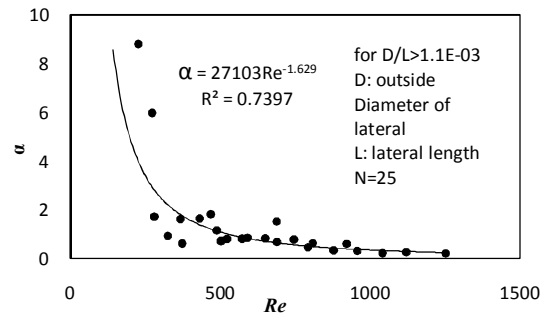
شکل ۳- نمودار دبی-ارتفاع برای لترال‌های مورد آزمایش



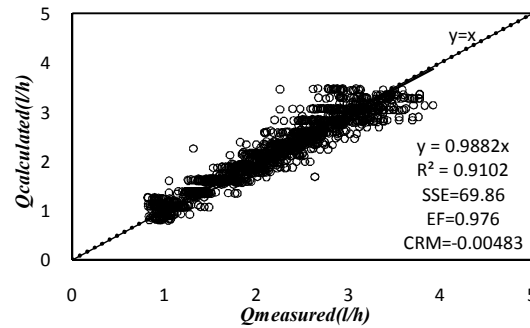
شکل ۴- نمودار ضریب افت قطرچه‌چکان در مقابل عدد رینولدز



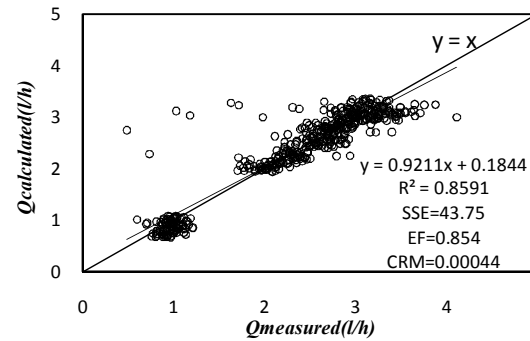
شکل ۵- رابطه‌ی ضریب افت قطرچه‌چکان بر مبنای عدد رینولدز



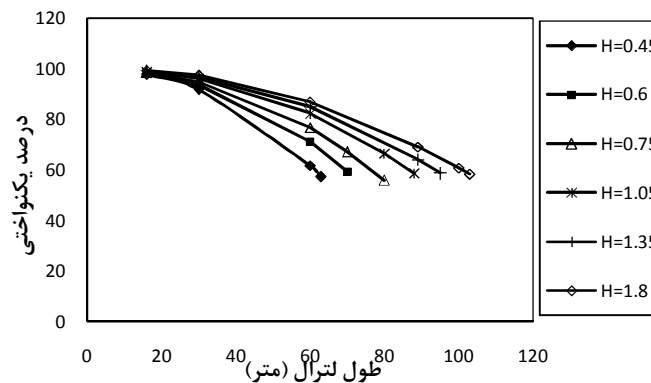
شکل ۶- رابطه‌ی ضریب افت قطره‌چکان بر مبنای عدد رینولدز و نسبت قطر خارجی لترال به طول آن



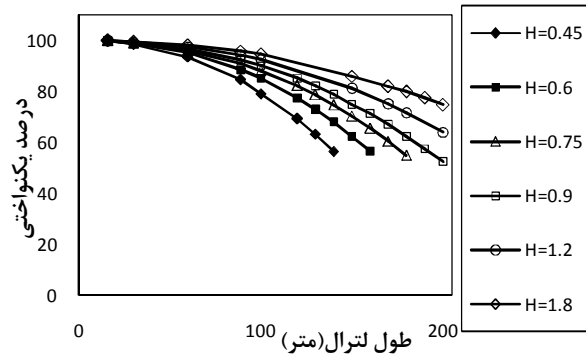
شکل ۷- نمایش دبی میانگین حاصل از مدل در مقابل دبی میانگین حاصل از داده‌های آزمایشگاهی



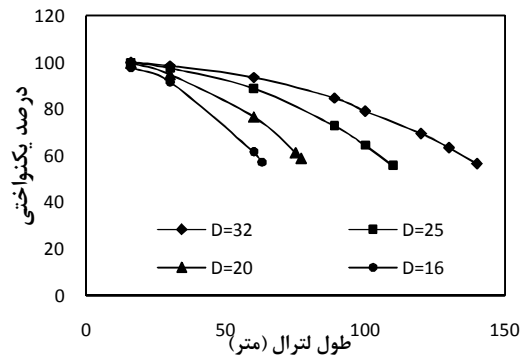
شکل ۸- نمایش دبی میانگین حاصل از مدل در مقابل دبی میانگین حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برای لترال ۸۹متری



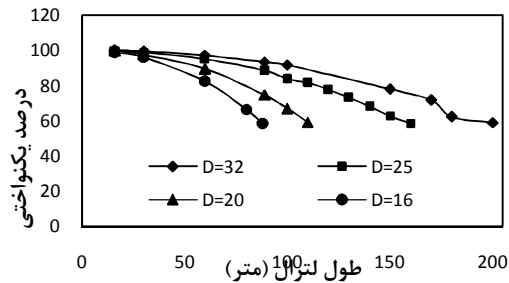
شکل ۹- اثر طول لترال بر درصد یکنواختی در ارتفاع‌های آبی مختلف برای لوله با قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر



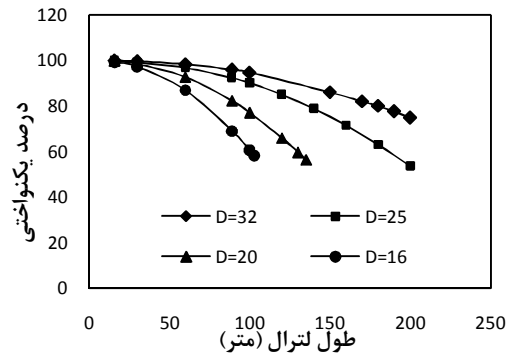
شکل ۱۰- اثر طول لترال بر درصد یکنواختی در ارتفاع‌های آبی مختلف برای لوله با قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر



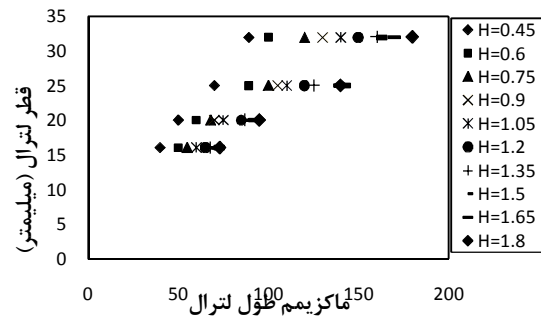
شکل ۱۱- اثر طول لترال بر یکنواختی قطره‌چکان‌ها در قطرهای مختلف (مربوط به ارتفاع هیدرولیکی ۰/۴۵ متر)



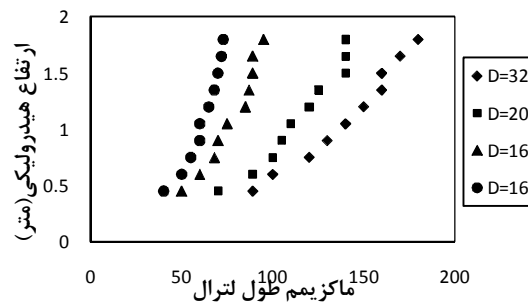
شکل ۱۲- اثر طول لترال بر یکنواختی قطره‌چکان‌ها در قطرهای مختلف (مربوط به ارتفاع هیدرولیکی ۱/۰۵ متر)



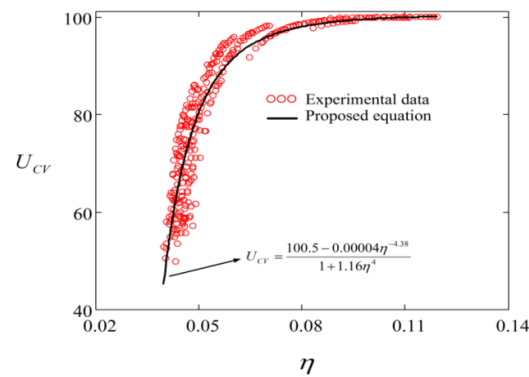
شکل ۱۳- اثر طول لترال بر یکنواختی قطره‌چکان‌ها در قطرهای مختلف (مربوط به ارتفاع هیدرولیکی ۱/۸ متر)



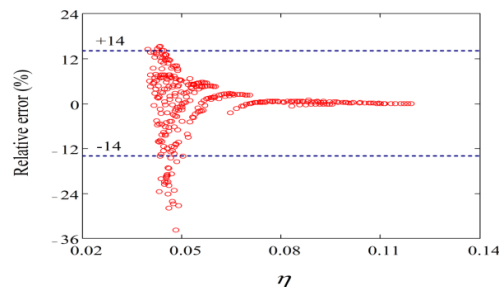
شکل ۱۴- نمودار حداکثر طول لترال در مقابل قطر خارجی مربوط به راندمان بیش از ۸۰٪



شکل ۱۵- نمودار حداکثر طول لترال در مقابل ارتفاع هیدرولیکی مربوط به راندمان بیش از ۸۰٪



شکل ۱۶- اثر توأم ارتفاع هیدرولیکی، طول و قطر لترال بر یکنواختی سیستم



شکل ۱۷- نمودار خطای نسبی مربوط به رابطه‌ی به دست آمده در شکل

فهرست منابع

۱. ملایی، م.س. مهدوی، ع. وطن خواه، ع.ر. ۱۳۹۳. مطالعه آزمایشگاهی مشخصات هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم فشار. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۱): ۳۷-۴۵.
۲. صدرالدینی، ع.ا. دلیر حسن نیا، ر. فعالیان، ا. صیادی، ح. فاخری فرد، ا. ۱۳۸۸. افت بار ناشی از اتصال چهار نوع قطره‌چکان روی خط آبیاری قطره‌ای متداول در ایران. مجله دانش آب و خاک. ۱۹(۱): ۳۹-۴۹.
3. Dutta, D.P. 2008. Characterization of drip emitters and computing distribution uniformity in a drip irrigation system at low pressure under uniform land slopes. MSc Thesis, Biological and Agricultural Eng. Dept., Texas A&M University. Ella, V.B., Reyes, M.R. and Yoder, R. 2008. Effect of hydraulic head and slope on water distribution uniformity of a low-cost drip irrigation system. ASABE Paper No. 083748, St. Joseph, Mich., USA.
4. Gyasi-Agyei, Y. 2007. Field-scale assessment of uncertainties in drip irrigation lateral parameters. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133(6): 512-519.
5. Juana, L., Rodriquez-Sinobas, L. and Losada, A. 2002. Determining minor head losses in drip irrigation laterals: Methodology. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 128(6): 376-384.
6. Keller, J. and Keller, A.A. 2003. Affordable drip irrigation for small farms in developing countries. Paper prepared for International Irrigation Show, San Diego, Calif., November.
7. Provenzano, G., Pumo, D. 2004. Experimental analysis of local pressure losses for micro irrigation laterals. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130(4): 318-324.
8. Provenzano, G., Pumo, D., and Di Dio, P. 2005. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation laterals. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131(6): 525-532.
9. Reddy, K.Y. 2002. Evaluation of on-line trickle irrigation emitter barb losses. *J. Agric. Eng.*, 83(2): 42-46.
10. Thompson, E.J., Merkley, G.P., Keller, A.A., and Barfuss, S.L. 2010. Experimental determination of the hydraulic properties of low-pressure, lay-flat drip irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137(1): 37-48.
11. Valiantzas J.D. 2005. Modified Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals. *J. Irrig. Drain. Eng., ASCE.*, 131(4): 342-350.
12. Wu, I.P., and Barragan, J. 2000. Design criteria for micro-irrigation systems. *Trans. ASAE*, 43(5): 1145-1154.
13. Yildirim, G., and Agiralioğlu, N. 2004. Comparative analysis of hydraulic calculation methods in design of micro-irrigation laterals. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130(3): 201-217.
14. Yildirim, G. 2007. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 56(4): 399-421.
15. Zhang, C., Kang, Y., Jiang, S., Wan, S., and Liu, S. 2011. Assessment of hydraulic performance of drip irrigation emitters at low head pressures. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137(11): 730-734.