

## مطالعه آزمایشگاهی مشخصات هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌فشار

محبوبه سادات ملائی<sup>۱</sup>، علی مهدوی مزده\*<sup>۲</sup>، علیرضا وطن‌خواه<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

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

۳. استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۲/۱)

### چکیده

هیدرولیک سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌فشار به صورت آزمایشگاهی و توسط لوله‌های موجود در ایران بررسی شد. بدین منظور اثر بارهای آبی مختلف از ۰/۴۵ تا ۱/۸ متر در لوله لترال به قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر (طول‌های ۱۶، ۳۰، ۶۰ و ۸۹ متر) و همچنین لوله‌های لترال به طول ۱۶ متر (قطرهای خارجی ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۲ میلی‌متر) بر متوسط دبی گسیلنده‌ها، ضریب تغییرات، درصد یکنواختی و همچنین افت ارزیابی شد. نتایج نشان داد که سیستم آبیاری قطره‌ای کم‌فشار، دبی مورد نیاز را با یکنواختی مناسبی در طول لترال تأمین می‌کند. توان و ضریب ارتفاع هیدرولیکی در رابطه دبی-ارتفاع، به ترتیب برابر ۰/۸۱۹ و ۱/۹۷۵ برآورد شد. به علاوه نتایج نشان داد که یکنواختی بالای ۸۸ درصد در لوله لترال به طول ۸۹ متر (قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر) و همچنین لترال به طول ۱۶ متر (قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر)، در کمترین ارتفاع هیدرولیکی (۰/۵ متر) به دست می‌آید.

**کلیدواژگان:** افت اصطکاکی، بار آبی، طول و قطر لترال، یکنواختی توزیع

### مقدمه

امروزه اهمیت آب و کمبود آن سبب شده است استفاده بهینه و مطلوب از آب در کشورها به خصوص کشورهای در حال توسعه و مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار مورد توجه قرار گیرد. به علت آنکه در تولید محصولات کشاورزی آب یکی از عمده اقلام هزینه است، قیمت تمام‌شده تولیدات کشاورزی با مصرف آب اضافی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد، بنابراین، سیستم‌های سنتی به دلیل هدررفت زیاد آب، نمی‌توانند جوابگوی نیاز روزافزون کشور به آب باشند. امروزه سیستم‌های مختلف آبیاری تحت فشار برای شرایط مختلف توپوگرافی، آب و هوایی و نوع محصول ارائه شده‌اند که راندمان مصرف آب را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده‌اند. یکی از سیستم‌های مهم و مؤثر در افزایش راندمان آبیاری، سیستم آبیاری قطره‌ای است. با توجه به اهمیت آبیاری قطره‌ای پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است (مثلاً: Yildirim et al., 2004; Provenzano et al., 2005; Hezarjaribi et al., 2008; Sadraddini et al., 2009). اگرچه سیستم آبیاری قطره‌ای تحت فشار به طور مؤثری برای زمین‌های

زراعی بزرگ و تپه‌ماهوری مناسب است، هزینه زیاد اجرا، پیچیدگی و نیازمند بودن به انرژی برق سبب می‌شود که اجرای آن را برای کشاورزان خرده‌مالک و همچنین جاهایی که تأمین برق مشکل باشد، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. بنابراین، برای چنین شرایطی توجه پژوهشگران به سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌فشار با بار آبی کمتر از دو متر جلب شده است (Thompson et al., 2010). با توجه به اینکه این سیستم به بار آبی کمتری نیاز دارد (زیر ۲ متر)، می‌توان در آن‌ها از لوله‌های با ضخامت کمتر استفاده کرد. این امر به همراه حذف سیستم‌های فیلتراسیون پیشرفته، سبب کاهش هزینه‌های اجرا خواهد شد. صرفه‌جویی در مصرف انرژی، ساده‌سازی و کاهش هزینه‌های اجرای سبب می‌شود که این سیستم در مزارع کوچک و نسبتاً هموار که دسترسی کمی به برق دارند، جایگزین مناسبی برای آبیاری قطره‌ای پرفشار باشد. در این پژوهش به بررسی آبیاری قطره‌ای کم‌فشار پرداخته خواهد شد.

تأمین دبی لازم و یکنواختی آن در سراسر سیستم دو فاکتور مهم در کارایی یک سیستم آبیاری قطره‌ای است. Wu و Barragan (2000) با بررسی روش‌های مختلف ارزیابی یکنواختی سیستم نشان دادند که استفاده از ضریب یکنواختی تغییرات ( $C_vU$ ) مناسب‌ترین روش است.

\* نویسنده مسئول: al.mahdavi@eng.ikiu.ac.ir

قطر آن به طور توأم با ارتفاع پرداخته شده است، بنابراین، در این پژوهش با توجه به اهمیت این سیستم جدید و توجیه اقتصادی آن، سعی خواهد شد تا این سیستم با توجه به لوازم موجود در ایران ارزیابی هیدرولیکی شود. بدین منظور اثر پارامترهای مختلف نظیر بار آبی، طول و قطر لوله لتراال، بر مشخصات هیدرولیکی گسیلنده‌ها شامل افت ناشی از اصطکاک، دبی گسیلنده‌ها و یکنواختی سیستم بررسی شد. همچنین به کمک آزمایش‌های انجام‌شده، رابطه دبی- ارتفاع برای میکروتیوب‌های با قطر داخلی ۱ میلی‌متر ارائه می‌شود.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش‌ها نتیجه مطالعات آزمایشگاهی روی مشخصات هیدرولیکی آبیاری قطره‌ای کم‌فشار است که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. از یک لوله پلی‌اتیلنی به قطر ۱۹ سانتی‌متر و طول ۲/۵۶ متر به‌عنوان مخزن تأمین هد ثابت استفاده شد. مخزن مورد نظر شامل ده خروجی به فواصل ۱۵ سانتی‌متر بود که ارتفاع آن‌ها از کف مخزن ۰/۴۵ متر تا ۱/۸ متر است. آب از میز هیدرولیکی به این مخزن پمپ می‌شد، سپس آب خارج‌شده از خروجی مورد نظر دوباره به مخزن میز هیدرولیکی هدایت می‌شد. بدین ترتیب تانک تهیه‌شده ارتفاع‌های هیدرولیکی ۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۷۵، ۰/۹، ۱/۰۵، ۱/۲، ۱/۳۵، ۱/۵، ۱/۶۵ و ۱/۸ متر را تأمین می‌کرد. لوله لتراال، توسط یک شیر رابط به زیر مخزن آب متصل شده بود که با باز و بسته کردن آن، جریان از مخزن به داخل لتراال برقرار و همچنین قطع می‌شد. به‌منظور اندازه‌گیری افت ارتفاع آب در طول لتراال از پیزومترهایی که در نقاط مختلف لتراال نصب شده بودند، استفاده شد. پیزومترها، در لتراال ۸۹ متری در ابتدا، فواصل ۳۰ و ۶۰ متری و در انتهای لوله، در لتراال ۶۰ متری در ابتدا، فواصل ۲۰ و ۴۰ متری و در انتها، در لتراال‌های ۳۰ و ۱۶ متری نیز در ابتدا و انتهای لوله نصب شد. گسیلنده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از نوع میکروتیوب به قطر خارجی ۳ میلی‌متر، قطر داخلی ۱ میلی‌متر و به طول ۷۰ سانتی‌متر بود. این میکروتیوب‌ها به فواصل ۱ متری به‌گونه‌ای روی لوله لتراال متصل شده بودند که ۲۰ سانتی‌متر از آن‌ها در داخل لتراال و ۵۰ سانتی‌متر از آن‌ها در خارج لتراال قرار می‌گرفت. گسیلنده‌های استفاده‌شده در این آزمایش، به دلیل اینکه از یک لوله باریک تشکیل شده‌اند نسبت به تغییرات فشار حساس‌اند اما در برابر گرفتگی مشکلی ایجاد نمی‌کنند، ساده و ارزان قیمت‌اند و به نگهداری خاصی نیاز ندارند (Ibrahim, 1989). در این

یکنواختی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای تحت‌تأثیر عوامل مختلفی نظیر طول، قطر، ارتفاع، مشخصات قطره‌چکان‌ها و فاصله آن‌ها است (Thompson *et al.*, 2010). بررسی مشخصات هیدرولیکی گسیلنده‌ها نشان داد که یکنواختی پخش بستگی به اندازه گسیلنده‌ها دارد به طوری که گسیلنده‌های با اندازه کوچک‌تر نسبت به تغییرات فشار کارکرد حساس‌تر هستند و منجر به یکنواختی پخش کمتری می‌شوند. (Al-Amoud and Dutta, Abo-Ghobar, 1994). عملکرد پنج نوع سیستم آبیاری قطره‌ای مختلف شامل Toro, T-Tape, Mister-Ls, Mister-Ps, Netafim را ارزیابی کرد. وی در آزمایش‌های خود شدت پخش را در دمای آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و تحت فشارهای ۰ تا ۳۴۴/۷۴ کیلوپاسکال مشخص کرد. یکنواختی متوسط قطره‌چکان‌ها در محدوده ۹۱ تا ۹۷ درصد به دست آمد که در واقع یکنواختی عالی را نشان داد و به این نتیجه دست یافت که قطره‌چکان‌های Netafim (Techline cv 560 050) (نتافیم) در فشارهای کمتر از ۵/۹۷ تا ۲۴/۱۳ کیلوپاسکال کار نمی‌کنند، ولی سایر گسیلنده‌ها عملکرد خوبی دارند. بررسی سه نوع قطره‌چکان در فشار کم در لتراال‌های مسطح و به طول ۱۸/۴ متر در شرایط آزمایشگاهی نشان داد که میکروتیوب‌ها یکنواختی بهتری در این‌گونه سیستم‌ها دارند (Thompson *et al.*, 2010).

در پژوهش دیگری ثابت شد که فاصله گسیلنده‌ها و تغییرات ساخت آن‌ها اثر بسیار بیشتری از طراحی هیدرولیکی بر یکنواختی سیستم دارند (Wu, 1997). (Gyasi-Agyei, 2007) بر بررسی عدم قطعیت‌های موجود در عوامل مؤثر بر یکنواختی نشان دادند که مقادیر ضریب تغییرات اندازه‌گیری‌شده در مزرعه به دلیل نقش عوامل مؤثر مختلف بر آن با ضریب تغییرات ارائه‌شده از سوی کارخانه متفاوت خواهد بود. بررسی اثر بار آبی و شیب زمین بر یکنواختی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نشان داد که یکنواختی دبی گسیلنده‌ها با افزایش بار آبی و شیب زمین، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد (Ella *et al.*, 2008). Zhang *et al.* (2011) اثر بار آبی (از ۰/۲ تا ۱۰ متر) بر یکنواختی سیستم برای سه نوع گسیلنده موجود در بازار را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که یکنواختی در بارهای آبی کمتر از یک متر به تغییرات بار آبی حساس‌تر است.

با توجه به اینکه مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی سیستم آبیاری قطره‌ای، دبی قطره‌چکان‌ها و یکنواختی آن‌هاست و نیز اکثر کارهای انجام‌شده در زمینه اثر بار آبی و نوع قطره‌چکان بر یکنواختی سیستم بوده است و کمتر به بررسی اثر طول لتراال و

ارتفاع آب در پیزومتر اول و آخر برحسب متر؛  $V$  سرعت جریان در لوله لترال برحسب متر بر ثانیه و  $D$  قطر داخلی لترال برحسب متر است. سپس مقدار ضریب اصطکاک با استفاده از روابط تئوری حاصل از معادله بلایوس برای جریان‌های آرام و آشفته که به صورت زیر طبقه‌بندی شده‌اند، به دست آمد تا با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شود:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad R_e < 2000 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$f = \frac{0.316}{R_e^{0.25}} \quad R_e > 2000 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در مرحله دوم آزمایش‌ها انتهای خروجی لترال، بسته و میکروتیوب‌ها روی آن نصب شدند. برای ارتفاع‌های مختلف آب و قطرهای مختلف لترال (طول ۱۶ متر)، دبی میکروتیوب‌ها به وسیله روش حجمی اندازه‌گیری شدند و افت ایجاد شده نیز به کمک پیزومترها تعیین شد. در قطر ۳۲ میلی‌متر به منظور بررسی اثر طول این کار برای طول‌های ۸۹،۶۰، ۳۰ و ۱۶ متر تکرار شد. شکل ۱ نمای شماتیک از سیستم استفاده شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

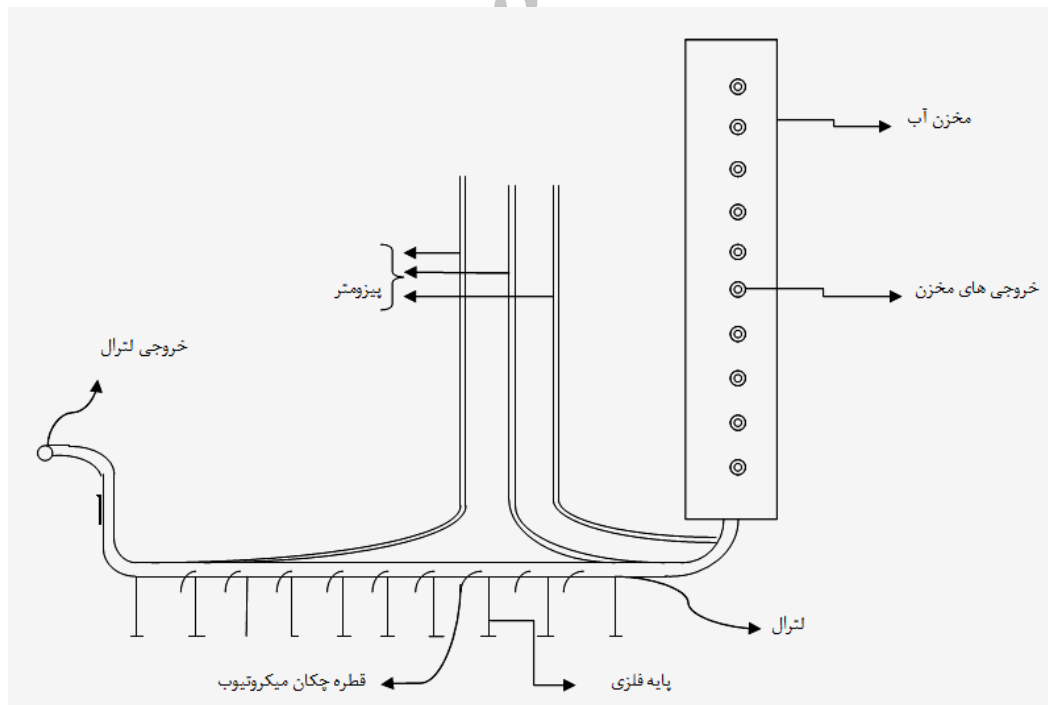
پژوهش از لترال با قطرهای خارجی ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۲ که به ترتیب قطرهای داخلی ۲۷/۶، ۲۱/۷، ۱۶ و ۱۳/۱ میلی‌متر داشتند استفاده شد.

با توجه به اینکه در این پژوهش برآورد دقیق افت اصطکاک از اهمیت زیادی برخوردار است بنابراین، در مرحله اول آن به منظور بررسی صحت انجام آزمایش‌ها به مقایسه ضرایب اصطکاک تجربی و تئوری پرداخته شد. بدین منظور در آزمایش‌های سری اول لوله لترال به تنهایی (بدون گسیلنده) و با انتهای باز استفاده شد. در این آزمایش‌ها انتهای لوله لترال توسط زانویی بالا آورده شد تا جریان آب در داخل لترال همواره به صورت پر برقرار باشد. اندازه‌گیری دبی در لوله لترال در هدهای مختلف به روش حجمی و با سه بار تکرار انجام شد. این کار برای قطرهای مختلف تکرار شد.

پس از انجام آزمایش‌های فوق، مقادیر ضریب افت اصطکاک ( $f$ ) با استفاده از رابطه تجربی داری و سیساک برای ده ارتفاع مختلف و در چهار قطر متفاوت لترال محاسبه شد.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$L$  طول لترال برحسب متر؛  $f$  ضریب اصطکاک؛  $h_f$  اختلاف



شکل ۱. نمای شماتیک از تجهیزات آزمایشگاه

$$C_v = \frac{S}{Q_{avg}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در روابط فوق  $C_v U$ ، ضریب یکنواختی،  $S$  انحراف

برای محاسبه ضریب یکنواختی گسیلنده‌ها از رابطه زیر استفاده شد: (Keller and Keller, 2003)

$$C_v U = 100(1 - C_v) \quad (\text{رابطه ۴})$$

SSE از روابط زیر تعیین خواهد شد.

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$SSE = (q_{i,cal.} - q_{i,meas.})^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن n و p به ترتیب تعداد داده‌ها و متغیرها در مدل برازش داده شده است. همچنین  $q_{i,cal.}$  و  $q_{i,meas.}$  به ترتیب مقدار پارامتر محاسبه شده و اندازه گیری شده است.

### نتایج

#### بررسی ضرایب اصطکاک تئوری و تجربی

به منظور مقایسه ضرایب افت تئوری و آزمایشگاهی در شکل‌های ۲ الف، ب، ج و د مقادیر ضرایب افت تئوری و آزمایشگاهی به ترتیب برای لترال به قطرهای خارجی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متر در مقابل عدد رینولدز آورده شده است. طول لوله استفاده شده برای قطرهای ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر برابر ۱۶ متر و برای قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر برابر ۸۹ متر بوده است.

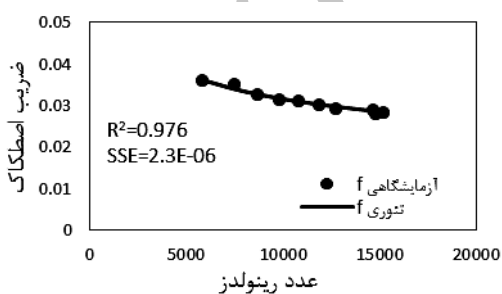
همان‌طور که مشاهده می‌شود و همچنین با توجه به ضرایب تبیین به دست آمده، ضرایب افت اصطکاک تئوری و آزمایشگاهی به‌طور خوبی بر هم منطبق بوده است و می‌توان برای محاسبات افت اصطکاک از روابط تئوری ذکر شده استفاده کرد. این مسئله همچنین نشان‌دهنده صحت انجام آزمایش‌ها و محاسبات مربوط به افت اصطکاک است.

معیار حاصل از دبی قطره‌چکان‌ها (لیتر بر ساعت) و  $Q_{avg}$ ، دبی متوسط گسیلنده‌ها (لیتر بر ساعت) است. ضوابط عملکرد  $C_p U$  برای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌هزینه در زمین‌های با ابعاد کوچک بدین شرح است: بالای ۸۸ درصد عالی، از ۸۰ تا ۸۸ درصد خوب، از ۶۸ تا ۸۰ درصد قابل قبول و کمتر از ۶۸ درصد غیرقابل قبول (Keller and Keller, 2003). در هر آزمایش دبی کل قطره‌چکان‌های روی لوله لترال اندازه‌گیری می‌شد و از همه آن‌ها برای محاسبه روابط فوق، استفاده می‌شد. دبی قطره‌چکان‌ها در هر آزمایش به احتمال ۹۵ درصد در محدوده  $Q_{avg} \pm 1.96S/n^{0.5}$  خواهد بود (Miller and Miller, 2000) که در آن S انحراف معیار و n تعداد قطره‌چکان‌ها است.

در هر آزمایش با داشتن بار آبی اولیه و دبی هر گسیلنده، می‌توان با محاسبه افت اصطکاک در هر قطعه لوله، بار آبی پشت هر گسیلنده (در ابتدای میکروتیوب) را محاسبه کرد. با ترسیم دبی گسیلنده‌ها در مقابل بار آبی آن‌ها، رابطه دبی ارتفاع مشخص خواهد شد. فرم کلی رابطه دبی ارتفاع به صورت زیر است.

$$q = kH^x \quad (\text{رابطه ۶})$$

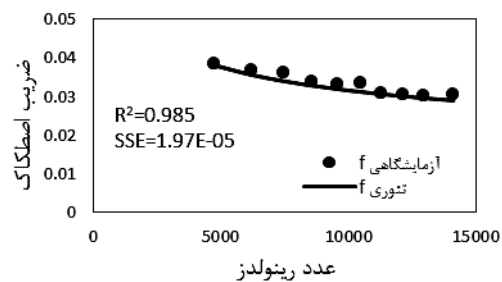
که در آن q، دبی هر گسیلنده بر حسب لیتر بر ساعت و H ارتفاع هیدرولیکی آب در پشت هر گسیلنده بر حسب متر است. برای مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و روابط تئوری از پارامترهای آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب تبیین تصحیح شده ( $R_a^2$ ) و مجموع مربعات خطا (SSE) استفاده شد.  $R_a^2$  و



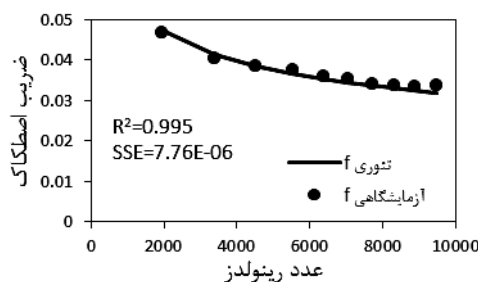
(ب)



(الف)



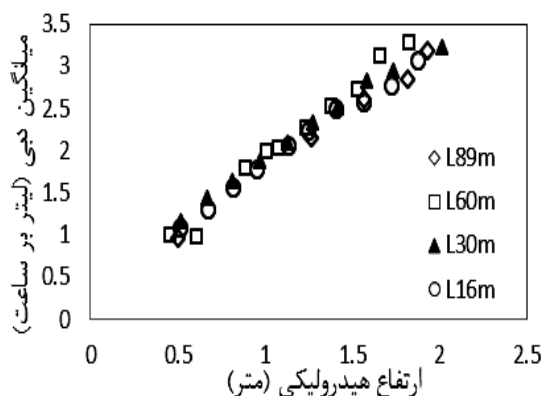
(د)



(ج)

شکل ۲. ضرایب اصطکاک تئوری و تجربی در مقابل عدد رینولدز، لترال با قطر خارجی (الف) ۳۲ میلی‌متر، (ب) ۲۵ میلی‌متر، (ج) ۲۰ میلی‌متر و (د) ۱۶ میلی‌متر

لترال برای طول‌های مختلف ترسیم شده است. بنابراین، یک نقطه در شکل ۴ نشان‌دهنده دبی متوسط گسیلنده‌ها روی یک لترال به طول و هد مشخص است. میانگین دبی گسیلنده‌ها با شیب تقریباً ثابتی با افزایش ارتفاع هیدرولیکی افزایش می‌یابند. درواقع این‌گونه استنباط می‌شود که افزایش طول لترال تا طول ۸۹ متر تأثیر قابل توجهی بر میانگین دبی گسیلنده‌ها نداشته است. درواقع نشان می‌دهد که افت اصطکاکی در طول لوله لترال به حدی نبوده است که با توجه به رابطه دبی ارتفاع میکروتیوب‌ها سبب کاهش معنادار متوسط دبی در طول‌های مختلف لترال شود. اما تغییرات ارتفاع هیدرولیکی بر میزان دبی گسیلنده‌ها تأثیر قابل توجهی داشته است. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های قبلی هماهنگی دارد (Ella, 2008).

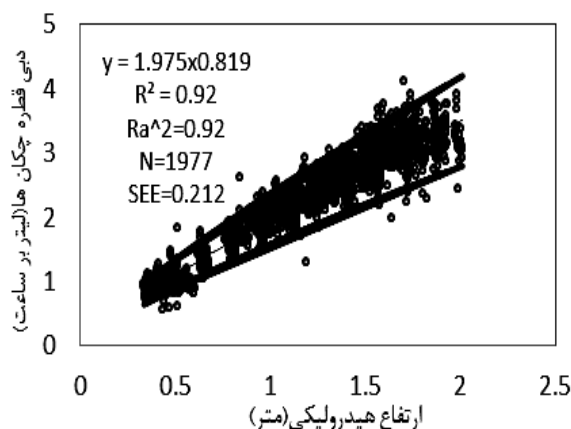


شکل ۴. اثر افزایش ارتفاع هیدرولیکی بر افزایش دبی گسیلنده‌ها در طول‌های مختلف لترال

به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثر طول لترال بر میانگین دبی گسیلنده‌ها، میانگین دبی آن‌ها به همراه محدوده تغییرات آن در ارتفاع‌های هیدرولیکی مختلف و برای ۴ طول محاسبه شد. به‌عنوان نمونه برای بار آبی ۱/۲۵ متر در شکل ۵ مقادیر متوسط دبی به همراه محدوده تغییرات در ۴ طول مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر دبی تفاوت چندانی با هم ندارند و درصد اختلافشان نسبت به متوسط آن‌ها (۲/۲۴۲ لیتر بر ساعت)، به‌ترتیب برای طول‌های ۱۶، ۳۰، ۶۰ و ۸۹ متر برابر با ۰/۵۵، ۳/۹، ۱/۲ و ۴/۵ درصد است. آزمون t نشان می‌دهد که این درصد اختلاف‌ها با توجه به انحراف معیار آن‌ها و با مقدار p-value برابر ۰/۹۹ تفاوت معناداری با هم ندارند و درواقع افزایش طول تغییر معناداری بر دبی متوسط گسیلنده‌ها در هر طول نداشته است. محاسبات فوق برای سه ارتفاع هیدرولیکی دیگر نیز به‌صورت تصادفی انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۱

### برآورد رابطه دبی ارتفاع در گسیلنده‌ها

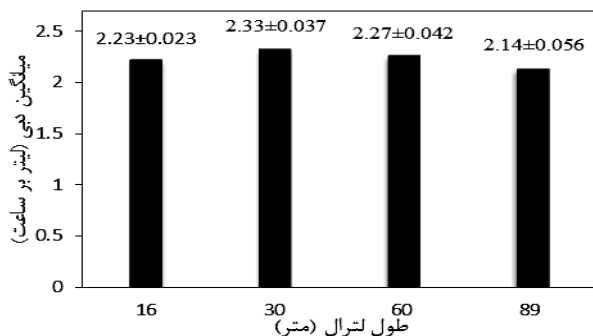
با داشتن بار آبی اولیه در هر آزمایش و دبی هر گسیلنده، می‌توان با محاسبه افت اصطکاکی در هر قطعه لوله، بار آبی در ابتدای هر گسیلنده را محاسبه کرد. شکل ۳ تغییرات دبی در مقابل ارتفاع هیدرولیکی در ابتدای گسیلنده‌ها را در تمامی آزمایش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود برای نشان‌دادن محدوده تغییرات داده‌ها و بررسی دقیق‌تر میزان خطا، دو باند در محدوده ۲۰ درصد  $\pm$  داده‌ها رسم شده و مشخص شده است که ۹۸ درصد داده‌ها در این محدوده قرار گرفته‌اند. ضریب یکنواختی متوسط برای این گسیلنده‌ها در محدوده فشار ۰/۵ تا ۲ متر برابر ۹۲/۷ درصد به دست آمد. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های قبلی هماهنگی دارد (Thompson *et al.*, 2010). آن‌ها ضریب یکنواختی متوسط را برای محدوده فشار ۱ تا دو متر برابر ۹۲/۸ درصد به دست آوردند. با برازش رابطه ۶ به داده‌ها مقدار ضریب و توان این رابطه به‌ترتیب برابر ۱/۹۷۵ و ۰/۸۱۹ به دست آمد. متوسط ضریب و توان در رابطه دبی-ارتفاع در پژوهش‌های قبلی به‌ترتیب ۶/۹۶ و ۰/۷ به دست آمده است (Thompson *et al.*, 2010). بیشتر بودن ضریب در رابطه آن‌ها را می‌توان به بزرگ‌تر بودن قطر داخلی میکروتیوب استفاده‌شده در پژوهش آن‌ها نسبت داد. آن‌ها از میکروتیوب‌هایی به قطر داخلی ۱/۵ تا ۱/۸ میلی‌متر و قطر خارجی ۳ میلی‌متر استفاده کرده بودند.



شکل ۵. نمودار دبی-ارتفاع میکروتیوب به قطر داخلی یک میلی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر

### بررسی اثر طول لترال بر متوسط دبی

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد از لترال به قطر ۳۲ میلی‌متر برای بررسی اثر توأم ارتفاع هیدرولیکی و طول بر متوسط دبی گسیلنده‌ها استفاده شد. در شکل ۴ دبی متوسط گسیلنده‌ها در هر آزمایش در مقابل ارتفاع هیدرولیکی اول لوله



شکل ۵. اثر طول لترال بر دبی متوسط گسیلنده‌ها در ارتفاع هیدرولیکی متوسط ۱/۲۵ متر

ارائه شده است. در این جدول برای هر طول در سه ارتفاع مختلف ۰/۴۹۶، ۱/۵۶ و ۱/۸۳ متر به ترتیب از راست به چپ مقادیر دبی متوسط گسیلنده‌ها، درصد اختلاف متوسط دبی آن طول نسبت به متوسط کل طول‌ها و محدوده تغییرات دبی آن طول آورده شده است. آزمون نشان داد که تغییرات دبی بر اثر افزایش طول معنادار نیست. البته این نتایج مربوط به قطر ۳۲ میلی‌متر است. ممکن است در قطرهای کمتر به دلیل افزایش افت اصطکاکی، اثر طول معنادار شود. این مسئله به پژوهش‌های بیشتری نیاز دارد.

جدول ۱. نتایج حاصل از دبی متوسط گسیلنده‌ها و تغییرات آن در ۴ طول مختلف از لترال

ارتفاع هیدرولیکی (متر)	طول لترال (متر)			
	۸۹	۶۰	۳۰	۱۶
۰/۴۹۶	۰/۰۲۳، ۸/۳۴، ۰/۹۶۲	۰/۰۱۷، ۵/۰۴۸، ۹۹۱	۰/۰۲۶، ۱/۰۸۲، ۱۶۲	۰/۰۳، ۲/۹، ۱۱۰۷۹
۱/۵۶	۰/۰۶۴، ۲/۵۱، ۲/۶۱	۰/۰۳۶، ۱/۱۸۲، ۲/۷۲	۰/۰۶۲، ۵/۲۵، ۲/۸۲	۰/۰۲۶، ۴/۵۶، ۲/۵۵
۱/۸۳	۰/۰۷۲، ۵/۹۴، ۲/۸۴	۰/۰۵، ۸/۰۹، ۳/۲۷	۰/۰۹۴، ۱/۷۵، ۳/۰۸	۰/۰۱، ۳/۱۸۹، ۲/۹۱

از راست به چپ: دبی متوسط گسیلنده‌ها، درصد اختلاف متوسط دبی آن طول نسبت به متوسط دبی کل طول‌ها و محدوده تغییرات دبی آن طول

شد که در شکل ۷ به عنوان نمونه نمودار مربوط به بار آبی ۰/۴۹۶ متر آورده شده است. مقادیر دبی تفاوت چندانی با هم ندارند و درصد اختلافشان نسبت به متوسط آن‌ها که مقدار آن برابر ۱/۰۳۴ است، به ترتیب برای قطرهای ۳۲، ۲۵، ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر برابر با ۴/۳۱، ۰/۳۵، ۳/۰۸ و ۱/۵۸ درصد است. آزمون نشان داد که این اختلاف با مقدار  $p$  value برابر یک معنادار نیست و در واقع تغییر قطر اثری بر متوسط دبی لترال نگذاشته است. در اینجا نیز محاسبات مذکور برای سه ارتفاع هیدرولیکی دیگر که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، انجام شده و نتایج مربوط به آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۲ برای هر قطر در ارتفاع ۰/۹۶۲، ۱/۵۷ و ۱/۸۹ متر به ترتیب از راست به چپ مقادیر دبی متوسط آن قطر، درصد اختلاف دبی متوسط آن قطر با متوسط دبی قطرهای دیگر و محدوده تغییرات دبی گسیلنده‌ها در آن قطر آورده شده است. آزمون درباره این داده‌ها نشان داد که مقادیر میانگین دبی مربوط به قطرهای مختلف در هیچ یک از ارتفاع‌ها اختلاف معناداری ندارند.

#### اثر قطر لترال بر متوسط دبی

به منظور بررسی اثر توأم قطر و ارتفاع هیدرولیکی بر متوسط دبی گسیلنده‌ها، مقادیر متوسط دبی گسیلنده‌ها در هر ارتفاع هیدرولیکی و برای چهار قطر مختلف لترال به طول ۱۶ متر محاسبه شده و تغییرات آن در مقابل ارتفاع هیدرولیکی در شکل ۶ رسم شده است. میانگین دبی گسیلنده‌ها با شیب تقریباً ثابتی با افزایش ارتفاع هیدرولیکی افزایش می‌یابند. در واقع کاهش قطر لترال تأثیر قابل توجهی بر میانگین دبی گسیلنده‌ها نداشته است. این مسئله نشان‌دهنده این است که در طول ۱۶ متر، کاهش قطر لترال، اصطکاک را به حدی افزایش نمی‌دهد که سبب کاهش دبی متوسط لترال شود. مقدار این شیب نیز نشان‌دهنده این است که تغییرات ارتفاع هیدرولیکی بر میزان دبی گسیلنده‌ها تأثیر قابل توجهی دارد.

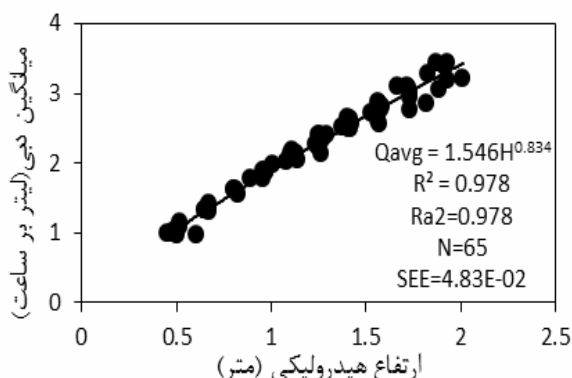
به منظور بررسی دقیق‌تر اثر قطر لترال بر میانگین دبی گسیلنده‌ها، میانگین دبی گسیلنده‌ها به همراه محدوده تغییرات آن در ارتفاع‌های هیدرولیکی مختلف و برای چهار طول محاسبه

جدول ۲. نتایج حاصل از دبی متوسط گسیلنده‌ها و تغییرات آن در ۴ قطر لترال

ارتفاع هیدرولیکی (متر)	قطر خارجی لترال (میلی‌متر)			
	۳۲	۲۵	۲۰	۱۶
۰/۹۶۲	۰/۰۴۳، ۴/۱۱، ۱/۷۷	۰/۰۵۵، ۰/۵۵، ۱/۸۷	۰/۰۵۲، ۲/۲۲، ۱/۹	۰/۰۳۷، ۱/۶۸، ۱/۸۹
۱/۵۷	۰/۰۶۱، ۷/۵۵، ۲/۵۵	۰/۰۱، ۰/۲۵، ۲/۷۷	۰/۰۵۲، ۲/۱۹، ۲/۸۴	۰/۰۵۵، ۴/۴۱، ۲/۸۸
۱/۸۹	۰/۱۲، ۸/۱، ۳/۰۵	۰/۱۴، ۳/۰۷، ۳/۴۳	۰/۱، ۳/۱۶، ۳/۴۳	۰/۰۶۴، ۱/۱۸۷، ۳/۴

از راست به چپ: دبی متوسط گسیلنده‌ها، درصد اختلاف متوسط دبی آن طول نسبت به متوسط دبی کل طول‌ها و محدوده تغییرات دبی آن طول

به‌علاوه احتمال صحت‌نداشتن پارامترها به کمک نرم‌افزار data fit برابر صفر برآورد شد.



شکل ۸. نمودار متوسط دبی گسیلنده‌ها در تمامی آزمایش‌ها در مقابل ارتفاع هیدرولیکی

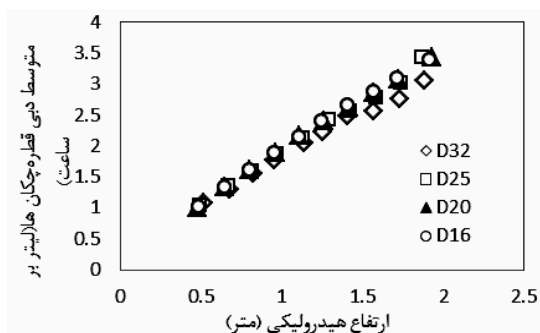
### بررسی طول لترال بر یکنواختی

برای نشان‌دادن اثر طول لترال بر یکنواختی سیستم، متوسط یکنواختی در ده ارتفاع هیدرولیکی مختلف برای هر طول لترال محاسبه شد که در شکل ۹ به همراه محدوده تغییرات آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی طول‌های آزمایش‌شده یکنواختی مورد نظر مطابق ضوابط عملکرد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌فشار تأمین شده است.

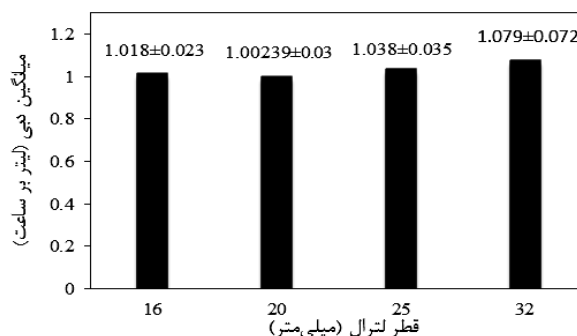
### بررسی قطر لترال بر یکنواختی

برای نشان‌دادن اثر قطر لترال بر یکنواختی سیستم، متوسط یکنواختی در ده ارتفاع هیدرولیکی مختلف برای هر قطر لترال محاسبه شد که در شکل ۱۰ به همراه محدوده تغییرات آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی قطرهای آزمایش‌شده یکنواختی مورد نظر مطابق ضوابط عملکرد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کم‌فشار تأمین شده است. با استفاده از آزمون ثابت شد که این مقادیر میانگین یکنواختی از لحاظ آماری اختلاف معنادار ندارند.

ضریب یکنواختی در کلیه آزمایش‌های این پژوهش در مقابل عدد بی بعد HD/Ln در شکل ۱۱ رسم شده است. در این عدد بدون بعد H، ارتفاع آب در ابتدای لترال، D و L به ترتیب قطر و طول لترال و n تعداد گسیلنده‌ها روی لترال در هر آزمایش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط ضریب تغییرات در حدود ۹۲/۷ درصد است. با افزایش مقدار HD/Ln ضریب یکنواختی از حدود ۸۷ درصد شروع به افزایش می‌کند و به سرعت به حدود ۹۲/۷ درصد می‌رسد و مقدار آن ثابت می‌ماند. این نتایج برای لوله به قطر ۳۲ میلی‌متر (طول‌های ۱۶، ۳۰، ۶۰ و ۸۹ متر) و همچنین لوله به قطرهای خارجی ۱۶، ۲۰ و ۲۵



شکل ۶. اثر افزایش ارتفاع هیدرولیکی بر افزایش دبی گسیلنده‌ها در قطرهای مختلف لترال



شکل ۷. اثر قطر لترال بر دبی متوسط گسیلنده‌ها در ارتفاع هیدرولیکی متوسط ۰/۴۹۴ متر

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تغییر طول لترال تا ۸۹ متر در قطر ۳۲ میلی‌متر، و قطرهای مختلف لترال در طول ۱۶ متر تأثیر معناداری بر میانگین دبی گسیلنده‌ها بر روی لترال ندارد. شکل ۸ نتایج تمامی آزمایش‌ها را که مربوط به طول‌های مختلف و قطرهای مختلف است به صورت دبی متوسط گسیلنده‌های روی یک لترال در هر آزمایش در مقابل ارتفاع هیدرولیکی اول لترال، نشان می‌دهد. معادله به‌دست‌آمده برای میانگین دبی گسیلنده‌ها به صورت  $Q_{avg} = 1.546H^{0.834}$  با  $R^2 = 0.978$  است. شایان توضیح است که این رابطه متفاوت با رابطه دبی ارتفاع برای گسیلنده‌هاست. زیرا در رابطه دبی ارتفاع، میزان دبی به ارتفاع پشت میکروتیوب نسبت داده می‌شود، اما در این رابطه متوسط دبی گسیلنده‌ها در روی یک لترال به ارتفاع آب در ابتدای لترال نسبت داده می‌شود.

مجموع مربعات خطا برابر ۰/۰۴۸۳ به دست آمد و همچنین کمینه، بیشینه و متوسط درصد خطای نسبی مقادیر حاصل از آزمایش از مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه به ترتیب برابر ۰/۱۶، ۲۶/۷ و ۳/۶ درصد محاسبه شدند. به‌علاوه مشخص شد که ۸۰ درصد داده‌ها زیر ۵ درصد و ۹۷ درصد داده‌ها زیر ۱۰ درصد خطا دارند و این نشان‌دهنده دقت رابطه به‌دست‌آمده برای لترال تا طول ۸۹ متر و قطرهای خارجی ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متر است.

دبی گسیلنده‌ها در طول لترال دارد، ارتفاع هیدرولیکی در ابتدای لترال است. به طوری که با افزایش ارتفاع هیدرولیکی دبی گسیلنده‌ها افزایش می‌یابد.

- میانگین دبی گسیلنده‌ها از نوع میکروتیوب در قطرهای خارجی لترال شامل ۳۲، ۲۵، ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر تحت تأثیر قطر قرار نگرفته و در اینجا نیز مؤثرترین پارامتر ارتفاع هیدرولیکی است.

- توان و ضریب معادله دبی ارتفاع برای میکروتیوب به طول ۷۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱ میلی‌متر به ترتیب برابر ۰/۸۱۹ و ۱/۹۷۵ محاسبه شد.

- همچنین با افزایش طول لترال تا ۸۹ متر برای لوله با قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر، دبی میکروتیوب‌ها از ابتدا تا انتهای لترال کاهش چشمگیری نداشته و تقریباً روند ثابتی داشته است.

- به علاوه نتایج نشان داد که گسیلنده‌های میکروتیوب در ارتفاع‌های هیدرولیکی کم (۵/۰ متر) یکنواختی بالای ۸۸ درصد را در سیستم در لترال تا طول ۸۹ متر و قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر و همچنین در هر چهار قطر لترال به طول ۱۶ متر تأمین می‌کنند (متوسط ۹۲/۷ درصد).

- براساس این نتیجه‌گیری که قطر و طول لترال‌های آزمایش‌شده تأثیر قابل توجهی بر میانگین دبی گسیلنده‌ها نداشته و عامل اصلی در تغییر دبی ارتفاع هیدرولیکی است، تمامی دبی‌های مربوط به طول و قطر لترال در مقابل ارتفاع هیدرولیکی رسم شدند و یک رابطه کلی برای دبی و ارتفاع فشار کارکرد به دست آمد (رابطه شکل ۸).

### سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای قزوین به شماره قرارداد ۹۱/۱۱۰۶۴/۱۰۱ با کد GZI-۹۰۳۹ است.

نمادها:

$C_v$ : ضریب تغییرات

$C_v U$ : یکنواختی سیستم

D: قطر لترال

f: ضریب افت اصطکاک

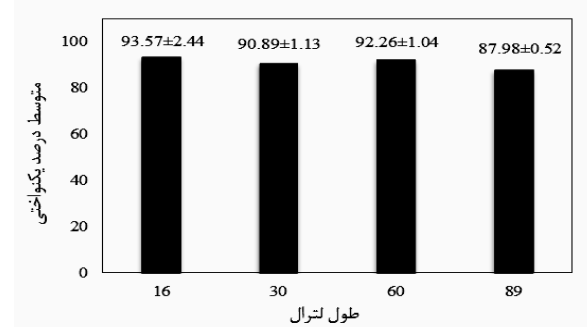
g: شتاب جاذبه

H: ارتفاع هیدرولیکی

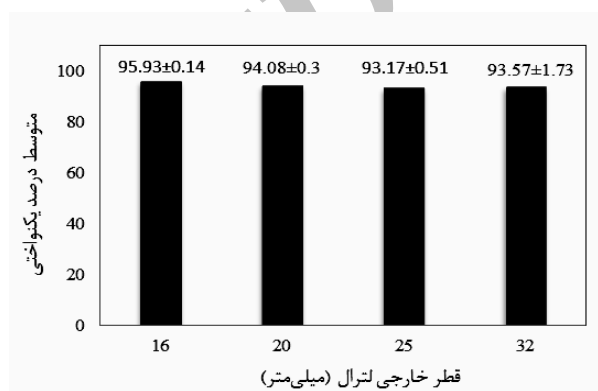
$h_f$ : اختلاف ارتفاع آب

k: ضریب ارتفاع هیدرولیکی در قطره‌چکان

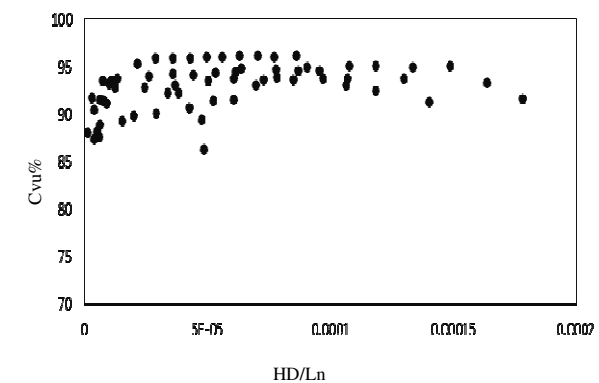
میلی‌متر (طول ۱۶ متر) است. ممکن است با افزایش طول برای قطرهای کوچک‌تر ضرایب یکنواختی کاهش یابد. برای بررسی این مسئله نیاز به پژوهش‌های بیشتر است.



شکل ۹. نمودار اثر طول لترال بر میانگین یکنواختی



شکل ۱۰. نمودار اثر قطر لترال بر میانگین یکنواختی



شکل ۱۱. نمودار درصد یکنواختی در مقابل نسبت حاصل ضرب تغییرات ارتفاع هیدرولیکی در قطر لترال به حاصل ضرب طول در تعداد گسیلنده‌ها

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توجه به کارایی آبیاری قطره‌ای کم‌فشار در کاهش هزینه و انرژی به بررسی این سیستم با استفاده از لوازم موجود در ایران پرداخته شد. نتایج نشان داد که:

- میانگین دبی گسیلنده‌ها از نوع میکروتیوب در طول‌های ۱۶ تا ۸۹ متر و قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر تحت تأثیر طول قرار نگرفته است و عاملی که بیشترین تأثیر را بر میانگین



عدد رینولدز : $R_e$	L : طول لترال
انحراف معیار : S	n : تعداد داده‌ها
SEE : خطای برآورد شده استاندارد	q : دبی قطره‌چکان
V : سرعت جریان	$Q_{avg}$ : دبی متوسط
x : توان ارتفاع هیدرولیکی	$R^2$ : ضریب تبیین نسبی

## REFERENCES

- Al-Amoud A.I, and H.M Abo-Ghobar. (1994). Evaluation of hydraulic characteristics of some locally available emitters. *Journal of King Saud Univ.* 6(1),15-26.
- Dutta, D.P. (2008). Characterization of drip emitters and computing distribution uniformity in a drip irrigation system at low pressure under uniform land slopes. MS thesis, Biological and Agricultural Engineering. *Texas A&M University.*
- Ella V.B, M.R Reyes, and R Yoder. (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.: ASABE.
- Gyasi-Agyei, Y. (2007). Field-scale assessment of uncertainties in drip irrigation lateral parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 133(6), 512-519.
- Hezarjaribi, A., Dehghani, A.A., Meftah Helghi, M., Kiani, A.(2008). Hydraulic performances of various trickle irrigation emitters. *Journal of Agronomy*, 7(3), 265-271.
- Ibrahim, M. A. (1989). *Use of Microtubes in the Design of Optimized Trickle Irrigation Network.* MSc. Dissertation, King Fahd University of Petroleum & Minerals Dhahran, Saudi Arabia.
- Keller J, and A.A Keller. (2003). Affordable drip irrigation for small farms in developing countries. *Paper prepared for International Irrigation Show, San Diego, Calif.* November.
- Miller J.N and Miller J.C. (2000) *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (4<sup>th</sup> ed.). Prentice Hal: England.
- Provenzano, G., and Pumo, D., and Di Dio, P. (2005). Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(6), 525-532.
- Sadraddini, AA., Delirhasannia, R., Faalian, A., Sayyadi, H., and Fakhri Fard, A. (2010). Barb Losses of Four Common Types of On-Line Trickle Irrigation Drippers in Iran. *Journal of science of water and soil*, 19(1), 39-49. (In Farsi)
- Thompson E.J, G.P Merkley, A.A Keller, S.L Barfuss. (2010). Experimental determination of the hydraulic properties of low-pressure, lay-flat drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 137(1), 37-48.
- Wu I.P, and J Barragan. (2000). Design criteria for micro-irrigation systems. *Trans. ASAE.* 43(5), 1145-1154.
- Wu I.P. (1997). An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. *Agricultural Water Manage.* 32(3), 275-284.
- Yildirim G, and N Agiralioglu. (2004). Comparative analysis of hydraulic calculation method in design of micro-irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(3), 201-217.
- Zhang Ch, Kang, Yaohu, Sh Jiang, Sh Wan, and Sh Liu. (2011). Assessment of hydraulic performance of drip irrigation emitters at low head pressure. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 137(11), 730-734.