

## تدوین الگوریتم دو مرحله ای بهینه سازی اقتصادی سیستم‌های آبیاری تحت فشار

بهنام آبابایی<sup>۱\*</sup> - تیمور سهرابی ملایوسف<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۸۹/۴/۲۶

### چکیده

از جمله روش‌های مرسوم طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار، می‌توان به روش افت بار واحد (حداکثر گرادیان هیدرولیکی)، روش حداکثر سرعت جریان و روش درصد افت بار اشاره کرد. در این مطالعه، یک الگوریتم دو مرحله‌ای برای طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار معرفی شده و در محیط برنامه نویسی LINGO توسعه داده شد. نتایج این مدل در یک سیستم آبیاری بارانی فرضی شامل سه لوله آبرسان (منیفولد) با روش‌های فوق مقایسه شد تا عملکرد این الگوریتم مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد که الگوریتم بهینه سازی، به کاهش هزینه‌های یک سیستم آبیاری کوچک تا بیش از ۳ درصد و حصول یکنواختی توزیع مطلوب منجر می‌شود. همچنین مشاهده گردید که طراحی براساس معیار حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $m.m^{-1}$   $0.1$ ، به بالاترین مقدار یکنواختی توزیع منجر شده و پس از آن به ترتیب مدل بهینه‌سازی اقتصادی، روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $m.m^{-1}$   $0.2$  و روش حداکثر سرعت مجاز قرار گرفتند. مقدار انحراف استاندارد دبی واقعی خروجی از هر آبپاش نسبت به دبی اسمی آبپاش‌های به کار رفته در سیستم، برای روش‌های طراحی بهینه سازی، حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $m.m^{-1}$   $0.1$ ، حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $m.m^{-1}$   $0.2$  و روش حداکثر سرعت مجاز، به ترتیب  $0.1$ ،  $0.03$ ،  $0.05$  و  $0.12$  لیتر در ثانیه برآورد شدند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه سازی اقتصادی، آبیاری تحت فشار، WaterGEMS، LINGO

### مقدمه

#### روش‌های طراحی

طراحی زیرواحدهای آبیاری، با توجه به نوع محصول و عملکرد مورد انتظار سیستم و براساس حداکثر اختلاف فشار (یا اختلاف دبی) مجاز در طول واحد آبیاری انجام می‌شود. به عنوان نمونه، در شرایطی که توان معادله دبی - فشار گسیلنده‌ها برابر  $0.5$  باشد، با قبول  $20$  درصد اختلاف فشار مجاز در طول واحد آبیاری، در حدود  $10$  درصد اختلاف دبی به عنوان اختلاف مجاز در طول واحد آبیاری پذیرفته و براین اساس، قطر مناسب لوله‌ها انتخاب می‌شود (۸). از جمله مهمترین و پرکاربردترین روش‌ها در طراحی لوله‌های اصلی عبارتند از: (الف) روش افت بار واحد (حداکثر گرادیان هیدرولیکی): محدود کردن افت بار در هر واحد از طول لوله. برای مثال،  $2$  واحد افت در  $100$  واحد طول لوله، (ب) روش حداکثر سرعت جریان: محدود کردن سرعت جریان، معمولاً بین  $1/5$  تا  $3$  متر در ثانیه و (ج) روش درصد

افت بار: محدود کردن تلفات اصطکاک در شبکه اصلی به درصدی از متوسط فشار کارکرد گسیلنده‌ها (۸). همانطور که مشخص است، در هیچیک از روش‌های فوق، معیار دقیقی برای طراحی لوله‌ها ارائه نشده و تنها به معرفی دامنه‌ای از معیارهای مرسوم بسنده گردیده است. انتخاب دقیق معیار طراحی، بستگی کامل به شرایط فیزیکی مسئله و لحاظ کردن پارامترهای اقتصادی داشته و لحاظ کردن معیارهایی مبتنی بر قضاوت شخصی، غالباً منجر به ضرر اقتصادی (بخصوص در بلند مدت) می‌شود.

هدف از این مطالعه، ارائه یک الگوریتم بهینه سازی برای طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار به منظور بهینه سازی اقتصادی اجزاء سیستم و مقایسه عملکرد این الگوریتم با روش‌های موجود می‌باشد.

#### بهینه سازی ریاضی

روش‌های بهینه سازی ریاضی در امور مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند. به عنوان نمونه از کاربرد این روش‌ها در مسائل مرتبط با مسائل آب می‌توان به توزیع بهینه آب در کانالهای آبیاری، طراحی و مدیریت بهینه سیستم‌های آبیاری قطره ای با استفاده از روش‌های برنامه ریزی خطی، مدیریت بهینه منابع آب با استفاده از الگوریتم

۱ و ۲ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(Email: behnam.ab@gmail.com)

\* - نویسنده مسئول:

(EAE(e): فاکتور ارزش سالانه افزایش هزینه‌های انرژی که ارزش پول را در طول زمان سرمایه گذاری در نظر می‌گیرد، و CRF: سری بازپرداخت یکنواخت (فاکتور بازگشت سرمایه) است که ارزش پول در طول زمان سرمایه گذاری و هزینه‌های استهلاک سرمایه را در نظر می‌گیرد. به دلیل در نظر گرفتن ضرایب اطمینان، نرخ بهره در حدود ۵ تا ۱۰ درصد بیش از مقداری که معمولاً در شرایط امنیت مالی بالا در نظر گرفته می‌شود، تعیین می‌گردد (۸).

### الگوریتم بهینه سازی اقتصادی

الگوریتم بهینه سازی پیشنهاد شده در این تحقیق، شامل دو زیرمدل می‌باشد: (الف) مدل بهینه سازی زیرواحد آبیاری و (ب) مدل بهینه سازی خط اصلی. دلیل تقسیم فرایند بهینه سازی به این شکل این است که بهینه سازی همزمان کل سیستم، با توجه به کثرت متغیرها، فرایندی بسیار پیچیده و شامل محاسبات فراوان است.

#### الف) مدل اول: مدل بهینه سازی زیر واحد آبیاری

تابع هدف: بهینه سازی با هدف کاهش مجموعه هزینه‌های ثابت سالانه انجام می‌شود. هزینه ثابت هر لوله شامل هزینه خرید لوله (به صورت تابعی از قطر) می‌باشد. بنابراین، تابع هدف در مدل اول، به صورت تابعی از قطر لاترال ها و آبرسان ها (منیفولدها)، به شکل زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$MIN : \sum_{m=1}^{N_m} \left[ \sum_{mp=1}^{N_{mp}(m)} L_{mp}(m) \times f(D_{mp}(m)) + \sum_{lp=1}^{N_{lp}(m)} L_{lp}(m) \times f(D_{lp}(m)) \right] \quad (4)$$

که در آن  $L_{mp}$  و  $L_{lp}$ : به ترتیب طول هر قطعه از آبرسان و لاترال (متر)،  $D_{mp}$  و  $D_{lp}$ : به ترتیب قطر انتخاب شده برای هر قطعه از آبرسان و لاترال،  $N_{mp}$  و  $N_{lp}$ : به ترتیب تعداد کل قطعات آبرسان و لاترال،  $N_m$ : تعداد آبرسان ها و (m): اندیس مربوط به شماره آبرسان . نماد  $f$ ، نشان دهنده تابعی از متغیر قطر لوله می‌باشد.

#### قیود

قید حداکثر و حداقل دبی گسیلنده ها: با توجه به یکنواختی مورد نظر در هر زیرواحد آبیاری، که خود براساس تحلیل‌های اقتصادی و ارزش نهایی محصول و کیفیت مورد نیاز سیستم آبیاری تعیین می‌شود، قید حداکثر و حداقل دبی گسیلنده ها برای هر یک از آبرسان ها به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\forall manifold : \begin{cases} QE_{ai} \leq 1.05 QE \\ QE_{ai} \geq 0.95 QE \end{cases} \quad (5)$$

که در آن  $QE_{ai}$ : دبی واقعی خارج شده از هر یک از گسیلنده ها و  $QE$ : دبی اسمی (مورد انتظار) هر یک از گسیلنده ها است.

معیار ۱۰ درصد اختلاف دبی مجاز در طول زیرواحد آبیاری، با

ژنتیک، بهینه سازی فرایند کنترل ایستگاه‌های پمپاژ در شبکه‌های آبیاری و زهکشی و طراحی بهینه شبکه‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک اشاره کرد (۴، ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) همچنین به منظور طراحی بهینه شبکه خطوط لوله ها، نرم افزار هایی نیز تدوین شده اند که از آن جمله می‌توان به نرم افزار  $WaterGems V8^1$  اشاره کرد. نتایج الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، با مقادیر شبیه سازی شده توسط نرم افزار  $WaterGEMS$  مورد مقایسه قرار گرفت.

### مواد و روش ها

#### عوامل مؤثر در برآورد هزینه

در سیستم‌های آبیاری تحت فشار، بهترین اندازه (یا بهترین ترکیب از اندازه ها) برای لوله در خطوط اصلی، نیمه اصلی و فرعی، اندازه یا ترکیبی می باشد که منجر به تعادل منطقی بین هزینه‌های ثابت سالانه و هزینه‌های سالانه پمپاژ گردد. این تعادل بستگی دارد به ساعات کارکرد سالانه سیستم، نرخ مورد انتظار افزایش قیمت سوخت، قیمت لوله ها، عمر مورد انتظار سیستم، مشخصات لوله ها و نرخ سود سالانه. برای بهینه کردن هزینه‌های سیستم باید ترکیبی از اندازه لوله ها را بیابیم که منجر به حداقل شدن مجموع هزینه‌های ثابت و هزینه‌های بهره برداری گردد. تحلیل هزینه‌های سیستم می‌تواند بر اساس ارزش فعلی یا هزینه‌های سالانه صورت گیرد. در هردو مورد، نرخ بهره (سود)، طول دوره مورد انتظار سرمایه گذاری، و برآورد نرخ سالانه افزایش هزینه‌های آب و انرژی، باید در نظر گرفته شوند. فاکتور ارزش فعلی افزایش هزینه‌های انرژی،  $PW(e)$ ، فاکتور ارزش سالانه افزایش هزینه‌های انرژی،  $EAE(e)$  و فاکتور بازگشت سرمایه،  $CRF$ ، از روابط زیر که توسط پیرسون ارائه شده‌اند قابل محاسبه می‌باشند (۱۱) ( $e \neq i$ ).

$$PW(e) = \left[ \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \left[ \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (1)$$

$$EAE(e) = \left[ \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \left[ \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (2)$$

$$CRF = \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (3)$$

که در آن  $e$ : نرخ سالانه افزایش هزینه‌های انرژی (اعشار)،  $i$ : نرخ بهره (اعشار)،  $n$ : تعداد سال‌های طول عمر سیستم (دوره سرمایه گذاری)،  $PW(e)$ : فاکتور ارزش فعلی افزایش هزینه‌های انرژی که ارزش پول را در طول زمان سرمایه گذاری در نظر می‌گیرد،

توجه به یکنواختی توزیع مورد انتظار قابل تغییر است.

قید قطر لوله ها: قطر هر لوله باید برابر یا کوچکتر از قطر لوله قبل از آن باشد.

$$\forall p_1, p_2 : D_{p1} \geq D_{p2} \quad (6)$$

یعنی هم در آبرسان ها و هم در لاترالها، قطر بخش بالادست باید برابر یا بزرگتر از قطر بخش پایین دست آن باشد. بعلاوه، قطر قسمت اول لاترالها باید کوچکتر از یا مساوی با قطر قسمت بالادست لاترال در آبرسان باشد.

قیود پیوستگی جریان: میزان دبی خارج شده از گسیلنده‌های هر لاترال باید برابر با دبی وارد شده به آن لاترال باشد. همچنین مجموع دبی وارد شده به تمامی لاترالها در هر آبرسان، باید با دبی وارد شده به آن آبرسان برابر باشد.

$$\sum_{i=1}^{N_{el}} QE_{ai} = Q_l \quad (7-الف)$$

$$\sum_{i=1}^{N_l} Q_l = Q_m \quad (7-ب)$$

که در آن  $N_{el}$ : تعداد خروجی روی هر لاترال،  $N_l$ : تعداد لاترالها در هر آبرسان،  $QE_{ai}$ : دبی واقعی خارج شده از گسیلنده  $i$  ام،  $Q_m$ : دبی وارد شده به هر آبرسان و  $Q_l$ : دبی وارد شده به هر لاترال.

قید حداکثر سرعت مجاز در لوله ها: حداکثر سرعت مجاز در لاترال ها به ۲ متر در ثانیه و در آبرسان ها به ۳ متر در ثانیه محدود می شود (۸).

محاسبه افت اصطکاک: در هر دو مدل، محاسبه افت اصطکاک با استفاده از رابطه هیزن-ویلیامز انجام می پذیرد (۲):

$$h_f = 1.22 \times 10^{10} \times L \times \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} \times D^{-4.871} \quad (8)$$

که در آن  $h_f$ : افت اصطکاک در لوله ها (متر)،  $L$ : طول هر قسمت از لوله (متر)،  $Q$ : دبی لوله (لیتر در ثانیه)،  $C$ : ضریب زبری هیزن ویلیامز، و  $D$ : قطر داخلی لوله (میلیمتر) می باشد. در تمامی گره ها (محل قرار گرفتن آبپاش ها، محل اتصال لاترال ها به آبرسان ها و محل اتصال آبرسان ها به خط اصلی)، میزان فشار برابر است با مقدار فشار در گره بالادست منهای میزان افت فشار بعلاوه تغییرات ارتفاع (۳).

$$H_d = H_u - h_f + \Delta E \quad (9)$$

که در آن  $H_d$ : فشار در گره پایین دست (متر)،  $H_u$ : فشار در گره بالادست (متر)،  $h_f$ : افت اصطکاک در لوله بالادست (متر) و  $\Delta E$ : اختلاف ارتفاع بین گره بالادست و پایین دست (متر) می باشد. شیب سرازیری منفی و شیب سربالایی مثبت در نظر گرفته شده است.

### ب) مدل دوم: مدل بهینه سازی خط اصلی

پس از اجرای مدل اول، با استفاده از فشار و دبی (بهینه) محاسبه شده هر زیرواحد، منحنی دبی-فشار بهینه برای هر آبرسان تعیین می شود. این منحنی کاملاً شبیه به منحنی دبی-فشار گسیلنده‌های به کار رفته بر روی لوله‌های فرعی (البته با ضریب بزرگتر) بوده و برای هر آبرسان به شکل رابطه ۱۰ نوشته می شود:

$$Q = A_m H^x \quad (10)$$

که در آن  $Q$ : دبی مورد نیاز آبرسان (از مدل اول، لیتر در ثانیه)،  $H$ : فشار در ابتدای آبرسان (از مدل اول، متر)،  $A_m$ : ثابت معادله، و  $x$ : توان معادله دبی-فشار گسیلنده‌های بکار رفته در هر زیرواحد می باشد. در اجرای مدل دوم، به جای هریک از آبرسان‌ها از رابطه ۱۰ برای در نظر گرفتن دبی و فشار مورد نیاز آن آبرسان استفاده می شود. تابع هدف: هزینه‌های ثابت سالانه هر لوله (بدون هزینه‌های نصب) را می توان به شکل رابطه زیر بیان نمود:

$$C_p = M_p \times CRF(n, i) \quad \text{ارزش سالانه} \quad (11-الف)$$

$$C_p = M_p \quad \text{ارزش فعلی} \quad (11-ب)$$

که در آن  $C_p$ : هزینه‌های ثابت سالانه لوله  $p$ ،  $M_p$ : هزینه‌های ثابت لوله  $p$ ، و  $CRF(n, i)$ : فاکتور بازگشت سرمایه با نرخ سود  $i$  و زمان سرمایه گذاری  $n$  سال می باشد. هزینه ثابت هر لوله شامل هزینه خرید لوله (بصورت تابعی از قطر) است.

$$M_p = L_p \times f(D_p) \quad (12)$$

که در آن  $L_p$ : طول لوله  $p$  و  $f(D_p)$ : قیمت هر واحد طول لوله به صورت تابعی از قطر لوله می باشد.

هزینه سوخت (انرژی) در هر سال از رابطه زیر محاسبه می شود:

(۱۳-الف) برای ارزش سالانه هزینه ها

$$En_s = \frac{HP_s \times QP_s \times k \times T \times PEN \times EAE(n, e, i)}{\eta_s}$$

(۱۳-ب) برای ارزش فعلی هزینه ها

$$En_s = \frac{HP_s \times QP_s \times k \times T \times PEN \times PW(n, e, i)}{\eta_s}$$

که در آن  $En_s$ : هزینه انرژی مصرفی پمپ در نوبت آبیاری  $s$  ام،  $HP_s$ : فشار مورد نیاز سیستم در نوبت آبیاری  $s$  ام،  $QP_s$ : شدت جریان مورد نیاز سیستم در نوبت آبیاری  $s$  ام،  $T$ : زمان کار سیستم در هر سال،  $PEN$ : هزینه تولید هر واحد توان،  $EAE(n, e, i)$ : فاکتور ارزش سالانه افزایش هزینه‌های انرژی با نرخ  $e$  و نرخ سود (بهره)  $i$  با در نظر گرفتن طول دوره سرمایه گذاری  $n$  سال،  $PW(n, e, i)$ : فاکتور ارزش فعلی افزایش هزینه‌های انرژی با نرخ  $e$  و نرخ سود (بهره)  $i$  با در نظر گرفتن طول دوره سرمایه گذاری  $n$  سال،  $\eta_s$ : راندمان پمپ در نوبت آبیاری  $s$  ام، و  $k$ : ثابت تبدیل واحد است. راندمان پمپ از رابطه

و کیفیت مورد انتظار سیستم می‌باشد. به عنوان یک پیشنهاد، از آنجایی که معمولاً مطلوب است که اختلاف دبی در طول واحد آبیاری، از ۱۰ درصد تجاوز نکند (۸)، در صورتیکه پس از اجرای مدل بهینه سازی زیر واحد آبیاری (مدل اول)، حداکثر اختلاف دبی در طول واحد آبیاری کمتر از ۵ درصد محاسبه شد، می‌توان میزان اختلاف فشار مجاز بر روی خطوط اصلی را تا حدود  $\pm 10\%$  درصد فشار مورد نیاز آبرسان‌ها (زمانیکه توان معادله آبرسان  $0.5$  باشد) در نظر گرفت. اما اگر حداکثر اختلاف دبی در طول زیر واحد آبیاری بیشتر از ۵ درصد بود، بهتر است که اختلاف فشار مجاز روی خطوط اصلی و در ابتدای آبرسان‌ها به  $\pm 5\%$  درصد فشار بهینه آنها محدود شود. قیود پیوستگی جریان: مجموع جریان ورودی به تمامی آبرسان‌ها، باید برابر با دبی خروجی از پمپ باشد.

$$\sum_{m=1}^{N_m} Q_m = \sum_{m=1}^{N_m} A_m H_m^x = QP_s \quad (18)$$

که در آن  $Q_m$ : دبی هر آبرسان (لیتر در ثانیه)،  $H_m$ : فشار موجود در ابتدای هر آبرسان (متر)، و  $QP_s$ : دبی پمپ در نوبت آبیاری  $s$  ام (لیتر در ثانیه) است. دبی هر یک از قسمت‌های لوله اصلی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{i,s} = \sum_{z=1}^{N_{zi}} Q_{z,s} + \sum_{m=1}^N Q_{m,s} \quad (19)$$

که در آن  $Q_{i,s}$ : دبی لوله اصلی  $i$  ام در نوبت آبیاری  $s$  ام،  $Q_{z,s}$ : دبی لوله پایین دست لوله  $i$  ام در نوبت آبیاری  $s$  ام،  $Q_{m,s}$ : دبی آبرسان‌های واقع در انتهای لوله اصلی  $i$  ام در نوبت آبیاری  $s$  ام،  $N_{zi}$ : تعداد لوله‌های اصلی که در شبکه آبیاری، از لوله  $i$  ام منشعب می‌شوند، و  $N$ : تعداد آبرسان‌هایی که در انتهای لوله اصلی  $i$  ام واقع شده و در نوبت آبیاری  $s$  ام، آبیاری می‌شوند.

کاربرد شیر کنترل فشار: فشار ورودی به هر آبرسان، تحت تأثیر وجود یا عدم وجود شیر کنترل فشار قرار دارد:

$$H_m = (1 - M_{valve})H + M_{valve} \times H_{valve} \quad (20)$$

که در آن  $M_{valve}$ : متغیر باینری (دودویی) که وجود یا عدم وجود شیر کنترل فشار در ابتدای آبرسان را نشان می‌دهد،  $H$ : فشار موجود در ابتدای آبرسان (روی خط اصلی)، و  $H_{valve}$ : فشار تنظیمی شیر کنترل فشار (ورودی به آبرسان) است. در صورت استفاده از شیر کنترل فشار ( $M_{valve} = 1$ )، فشار ورودی به آبرسان برابر با فشار شیر کنترل می‌باشد. در غیر این صورت، فشار ورودی به آبرسان همان فشار موجود در خط اصلی خواهد بود (۵). از افت‌های موضعی صرف نظر شده است.

رابطه فشار- دبی پمپ: فیتز با برازش رگرسیون چند جمله ای به منحنی پمپ، مشاهده کرد که چند جمله ای درجه ۳ معمولاً بهترین

۱۴ محاسبه می‌شود (۱).

$$\eta_s = A \times QP_s^2 + B \times QP_s + C \quad (14)$$

که در آن  $QP_s$ : شدت جریان پمپ (شدت جریان کل سیستم) در نوبت آبیاری  $s$  ام و  $A$  و  $B$  و  $C$ : ثابت‌های معادله می‌باشند که برای هر نوع پمپ توسط کارخانه سازنده اعلام می‌شوند.

**استفاده از شیر کنترل فشار:** بخش دیگری از هزینه‌های اولیه سیستم، شامل هزینه قراردادن شیرهای کنترل فشار در ابتدای آبرسان‌ها می‌باشد. مدل، در صورت نیاز، در ابتدای آبرسان‌هایی که نیاز به کاهش فشار دارند (یعنی فشار موجود در خط اصلی بیش از فشار بهینه محاسبه شده از رابطه ۱۰ است)، از این شیرها استفاده کرده، هزینه این شیرها را بر سایر هزینه‌های سیستم می‌افزاید. در نهایت، تابع هدف این مدل بهینه سازی را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود.

$$MIN : \sum_{s=1}^{N_s} En_s + \sum_{p=1}^{N_p} C_p + \sum_{m=1}^{N_m} CV_m \quad (15)$$

که در آن  $S$ : شماره نوبت آبیاری،  $P$ : شماره لوله اصلی،  $N_s$  و  $N_p$ : به ترتیب، تعداد نوبت آبیاری و تعداد لوله‌های اصلی سیستم آبیاری،  $En_s$ : هزینه انرژی مورد نیاز پمپ در نوبت آبیاری  $s$  ام در هر سال،  $C_p$ : هزینه‌های ثابت سالانه لوله  $p$  و  $CV_m$ : هزینه نصب شیرهای کنترل فشار در ابتدای آبرسان‌ها (در صورت نیاز).

#### قیود

قید قطر لوله‌ها: قطر هر لوله باید برابر با یا کوچکتر از قطر لوله قبل از آن باشد.

$$\forall p1, p2 : D_{p1} \geq D_{p2} \quad (16)$$

در رابطه بالا، لوله  $p1$  قبل از لوله  $p2$  قرار گرفته است. همچنین قطر قسمت اول هر آبرسان نیز باید از قطر لوله اصلی واقع در بالادست آبرسان کوچکتر یا مساوی با آن باشد.

قید فشار: انتخاب قطر لوله‌های اصلی به نحوی انجام می‌پذیرد که اختلاف بین فشار موجود در ابتدای هر آبرسان با فشار مورد نیاز آن (فشار بهینه محاسبه شده از مدل اول) کمتر از مقدار مشخصی (در اینجا  $\pm 5\%$  درصد از فشار بهینه) باشد.

$$\forall manifold : \begin{cases} H_m \leq 1.05 \times H_{reqm} \\ H_m \geq 0.95 \times H_{reqm} \end{cases} \quad (17)$$

که در آن  $H_m$ : فشار موجود در ابتدای آبرسان (متر)،  $H_{reqm}$ : فشار مورد نیاز آبرسان (متر) که از مدل بهینه سازی زیر واحد آبیاری (مدل اول) حاصل شده و  $\Delta H_{allow}$ : اختلاف فشار مجاز بین فشار موجود و فشار مورد نیاز آبرسان (متر) می‌باشد. تصمیم گیری در مورد اختلاف فشار یا دبی مجاز، یک تصمیمی مدیریتی و مبتنی بر تحلیل اقتصادی

لاترال و هر لاترال شامل ۴ آبپاش (شکل ۱) بررسی شده و نتایج هر روش با روش بهینه سازی اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفت (هر ۳ آبرسان همزمان آبیاری می‌شوند). از شیب زمین در هر دو جهت صرفنظر شده است. خلاصه مشخصات سیستم و شرایط مسئله در جدول ۱ آورده شده است.

### نتایج و بحث

برای تعیین قطر بهینه لوله‌ها در اولین مدل، از مشخصات لوله‌های تجاری موجود در بازار استفاده شد (جدول ۲). نتایج اجرای مدل بهینه سازی زیرواحد آبیاری (مدل اول) نشان می‌دهد که بهترین فشار برای دستیابی به یکنواختی مورد انتظار (حداکثر اختلاف دبی در طول واحد آبیاری کمتر از ۱۰ درصد)، ۳۴/۰۸۶ متر و دبی مورد نیاز آبرسان تحت این فشار، ۵۳/۷۵ لیتر در ثانیه خواهد بود. به این ترتیب می‌توان دریافت که ثابت معادله دبی - فشار آبرسان، برابر با ۹/۲۰۶ خواهد بود (توان معادله دبی، ۰/۵ است). از این مقادیر، در اجرای مدل دوم استفاده شد. نتایج حاصل از بهینه سازی خطوط اصلی (مدل دوم) نشان داد که برای دستیابی به یکنواختی توزیع مورد نظر، نیازی به نصب شیرهای کنترل (تنظیم) فشار در ابتدای واحدهای آبیاری نیست. لازم به یادآوری است که تمامی لاترال‌ها دارای ویژگی‌های فیزیکی مشابه هستند.

برازش را دارد (۴). لیکن، چسبون و دیویس مشاهده کردند که چند جمله ای درجه ۲ معمولاً در عمل مناسب و کافیست (۷). بنابراین، رابطه فشار - دبی پمپ در هر نوبت آبیاری به شرح زیر در مدل مورد استفاده قرار گرفت:

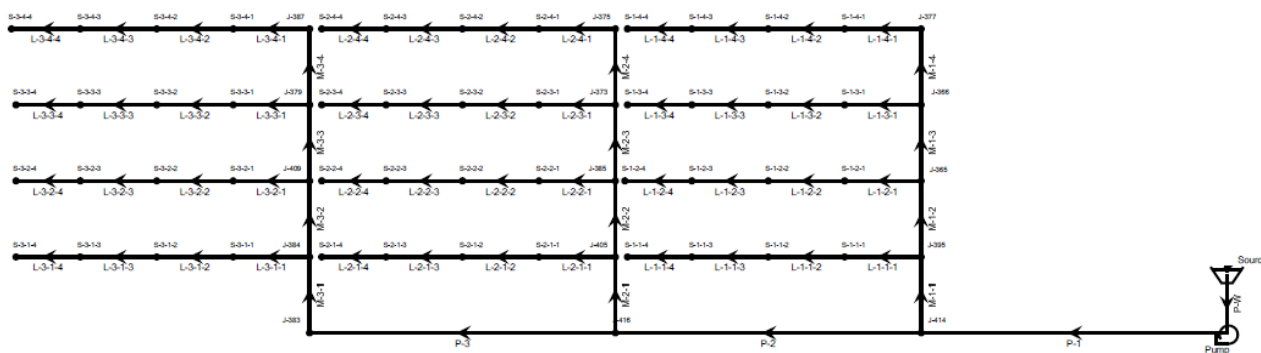
$$HP_s = H_o - A_o \times QP_s^2 \quad (21)$$

که در آن  $HP_s$ : فشار پمپ در نوبت آبیاری  $s$  ام (متر)،  $QP_s$ : دبی پمپ در نوبت آبیاری  $s$  ام (لیتر در ثانیه)، و  $H_o$  و  $A_o$ : ثابت‌های معادله می‌باشند.

### برنامه نویسی مدل، شبیه سازی سیستم و طرح آزمایش

برنامه نویسی مدل‌ها، با استفاده از امکانات محیط برنامه نویسی LINGO (ویرایش ۸) صورت پذیرفت. این نرم افزار، فرایند ایجاد و حل مسائل بهینه سازی ریاضی را ساده تر و مؤثرتر می‌سازد (۹). بنابراین، برای هریک از مدل‌های تشریح شده، یک مدل در نرم افزار LINGO ایجاد و برای اجرای مدل دوم، از نتایج مدل اول استفاده شد. شبیه سازی شرایط واقعی سیستم با استفاده از نرم افزار WaterGEMS (ویرایش ۸) انجام گرفت.

در این مقاله، کاربرد روش‌های طراحی شرح داده شده در بخش "روش‌های طراحی" در طراحی کلیه قسمت‌های یک سیستم آبیاری بارانی فرضی (طراحی تمام قسمتهای لوله‌های فرعی، آبرسان‌ها و لوله‌های اصلی) شامل لوله اصلی مرکب از ۳ لوله متوالی، ۳ آبرسان هریک در انتهای یکی از بخش‌های خط اصلی و هریک شامل ۴



شکل ۱ - نمایی از سیستم آبیاری مورد نظر شامل نام لوله‌ها و گره‌ها

جدول ۱ - پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی روش‌های مختلف (مقادیر فرضی)

مقدار	شرح پارامتر	مقدار	شرح پارامتر
۱۰٪	نرخ افزایش قیمت سوخت (e)	۲۰٪	نرخ بهره (i)
۲۰۰ واحد	قیمت سوخت	۱۰ سال	طول دوره سرمایه گذاری (n)
		۱۰۰۰ ساعت	زمان کار سیستم در سال (T)
۱/۳۸۶۰	EAE	۵/۸۱۰۹	PW
۳۰ متر	فشار اسمی آبپاشها	۳/۳۳۳ لیتر در ثانیه	دبی اسمی آبپاشها
		۰/۵	توان فشار در معادله آبپاشها
۲۰ متر	فاصله لاترالها روی آبرسان	۲۰ متر	فاصله آبپاشها روی لاترال

جدول ۲- مشخصات لوله‌های مورد بررسی

قطر خارجی (mm)	قطر داخلی (mm)	قیمت هر متر (واحد)
۶۳	۵۷	۱۳۷۶۰
۷۵	۶۷٫۸	۱۹۵۲۰
۹۰	۸۱٫۴	۲۷۸۰۰
۱۱۰	۹۹٫۴	۴۰۱۶۰
۱۲۵	۱۱۳	۵۳۵۹۰
۱۶۰	۱۴۴٫۶	۸۷۰۰۰
۲۰۰	۱۸۲٫۸	۱۰۸۷۵۰
۲۲۵	۲۰۷٫۸	۱۲۰۰۰۰
۲۵۰	۲۳۲٫۸	۱۳۶۰۰۰
۲۸۰	۲۶۲٫۸	۱۶۰۰۰۰

مجاز، حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  و حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.02 \text{ m.m}^{-1}$ ، به ترتیب به  $3/48$ ،  $0/64$  و  $1/15$  متر افت فشار منجر شده اند. توجه به میزان یکنواختی توزیع مورد انتظار، می‌توان پیش بینی کرد که روش حداکثر سرعت مجاز به بدترین طراحی آبرسان ها منجر شود.

در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در روش بهینه سازی اقتصادی، مجموع افت اصطکاک در خط اصلی،  $4/49$  متر است که در حدود ۱۵ درصد از فشار اسمی گسیلنده ها ( $4/5 \text{ m}$ ) می‌باشد. بنابراین، می‌توان پیش بینی کرد که استفاده از روش درصد افت مجاز (محدود کردن افت فشار در خطوط اصلی به درصد مشخصی، مثل ۱۵ درصد، از فشار کارکرد گسیلنده ها) از لحاظ رسیدن به بالاترین یکنواختی توزیع در سیستم و کمینه کردن اختلاف فشار بین آبرسان‌های سری، نسبت به سایر روش ها دارای نتایج مطلوب تری باشد. البته معمولاً از این روش تنها در طراحی خط اصلی استفاده می‌شود (۸). مجموع افت اصطکاک در بخش‌های مختلف خط اصلی (جدول ۵) در روش‌های بهینه سازی اقتصادی، حداکثر سرعت مجاز و روش‌های حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  و  $0.02 \text{ m.m}^{-1}$ ، به ترتیب برابر است با  $4/49$ ،  $6/81$  و  $1/62$  متر. با توجه به اینکه تأمین فشار مناسب در ابتدای آبرسان ها نقش تعیین کننده ای در میزان یکنواختی توزیع هر واحد آبیاری دارد، می‌توان چنین نتیجه گرفت که از این جنبه، روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  و پس از آن روش بهینه‌سازی اقتصادی، به بالاترین یکنواختی در توزیع فشار در خط اصلی (ابتدای واحدهای آبیاری) منجر می‌شوند.

هزینه سیستم آبیاری مورد نظر براساس روش‌های مختلف طراحی به شرح جدول ۶ می‌باشد. ارقام مندرج در این جدول مجموع هزینه‌های خرید لوله و هزینه‌های انرژی براساس ارزش فعلی و با توجه به پارامترهای اقتصادی ذکر شده در جدول ۱ را در بر می‌گیرند. با در نظر گرفتن طول دوره سرمایه گذاری و ارزش زمانی پول، روش بهینه سازی اقتصادی به کمترین مجموع هزینه سیستم منجر گردیده

شبیه‌سازی مدل WaterGEMS (نتایج به دلیل کمبود فضا ارائه نشده است) نشان می‌دهد که در روش بهینه‌سازی اقتصادی، سرعت جریان در لوله‌ها از  $1/23$  متر در ثانیه (قطعه لوله ۴-۳-۴) تا  $2/93$  متر در ثانیه (قطعه لوله اصلی P-1) متغیر و میزان گرادیان هیدرولیکی از  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  (قطعه لوله اصلی P-3) تا  $0.097 \text{ m.m}^{-1}$  (قطعه لوله ۴-۳-۱) متغیر است. بنابراین معیار حداکثر گرادیان هیدرولیکی یکسانی (به عنوان مثال، معیار  $1 \text{ m}/100 \text{ m}$  گرادیان هیدرولیکی مجاز) را نمی‌توان برای تمامی قسمت‌های سیستم مورد استفاده قرار داد. همچنین، روند تغییرات سرعت در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد که استفاده از یک معیار واحد برای حداکثر سرعت مجاز در تمام بخش‌های سیستم آبیاری، نمی‌تواند به طراحی مناسبی منجر گردد. جدول ۳، نتایج مربوط به روش‌های مختلف طراحی برای تمامی لاترال‌ها در روش بهینه‌سازی و لاترال بحرانی در سایر روش‌ها را نشان می‌دهد. آنچه جلب توجه می‌کند این است که در این الگوریتم، با توجه به توزیع واقعی فشار در آبرسان ها، قطرهای مختلفی برای لاترال‌های واقع بر روی آبرسان ها انتخاب شده است. حال آنکه در روش‌های سنتی (که می‌توان آنها را روش‌های استاتیک نامید)، چنین حالتی متصور نیست و معمولاً تنها به طراحی لاترال بحرانی توجه شده و از همین طراحی برای سایر لاترال‌ها نیز استفاده می‌شود. از ارقام جدول ۳ نتیجه گرفته می‌شود که در بین روش‌های فوق، روش حداکثر سرعت مجاز، به بیشترین افت ( $3/64$  متر، مجموع ارقام ردیف افت محاسبه شده در جدول ۳) و کمترین میزان یکنواختی در لاترال‌ها منجر شده و روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  ( $0/67$  متر)، کمترین افت را در لاترال‌ها ایجاد کرده و به بالاترین میزان یکنواختی توزیع منجر می‌گردد (تحلیل یکنواختی توزیع در ادامه ارائه می‌شود). روش بهینه‌سازی اقتصادی با متوسط  $3/39$  متر افت فشار در هر لاترال، در حد میانه روش‌های قبلی قرار می‌گیرد.

در طراحی آبرسان ها (جدول ۴)، روش بهینه‌سازی اقتصادی حداکثر منجر به  $2/84$  متر افت فشار شده و روش‌های حداکثر سرعت

است.

قدیمی تر، که در آنها دبی گسیلنده ها نسبت به فشار ثابت در نظر گرفته می شوند، از این مزیت بی بهره اند و همواره مقدار محاسبه شده یکنواختی توزیع و سایر پارامترهای هیدرولیکی سیستم، با مقادیر واقعی فاصله دارند.

مزیت اساسی الگوریتم ارائه شده در این مقاله این است که با در نظر گرفتن تغییرات واقعی فشار در طول لوله ها و با توجه به توزیع واقعی فشار در تمامی بخش های سیستم آبیاری، میزان یکنواختی توزیع را نزدیک به مقدار واقعی محاسبه می کند. حال آنکه، روش های

جدول ۳- مقایسه نتایج روش های مختلف (لاترالها)

مجموع	قسمت ۴	قسمت ۳	قسمت ۲	قسمت ۱		
	۵۷	۶۷/۸	۸۱/۴	۹۹/۴	قطر داخلی	
	۱/۳۲	۱/۸۸	۱/۹۷	۱/۷۸	حداکثر سرعت جریان <sup>۱</sup>	لاترال اول
۳/۳۴	۰/۶۹	۱/۰۸	۰/۹۵	۰/۶۲	حداکثر افت <sup>۱</sup>	
	۵۷	۸۱/۴	۸۱/۴	۹۹/۴	قطر داخلی	
	۱/۳۲	۱/۳	۱/۹۶	۱/۷۶	حداکثر سرعت جریان	لاترال دوم
۲/۷	۰/۶۹	۰/۴۴	۰/۹۵	۰/۶۲	حداکثر افت	
	۴۵/۲	۶۷/۸	۸۱/۴	۹۹/۴	قطر داخلی	
	۲	۱/۸۱	۱/۹	۱/۷۲	حداکثر سرعت جریان	لاترال سوم
۴/۴۳	۱/۹۴	۱/۰۱	۰/۸۹	۰/۵۹	حداکثر افت	
	۵۷	۶۷/۸	۸۱/۴	۹۹/۴	قطر داخلی	
	۱/۲۷	۱/۸۱	۱/۹	۱/۷۱	حداکثر سرعت جریان	لاترال چهارم
۳/۱۲	۰/۶۴	۱/۰۱	۰/۸۹	۰/۵۸	حداکثر افت	
	۵۷	۶۷/۸	۸۱/۴	۹۹/۴	قطر داخلی	
	۱/۳	۱/۸۴	۱/۹۲	۱/۷۲	سرعت جریان محاسبه شده	
۳/۴۴	۰/۷۲	۱/۱۲	۰/۹۷	۰/۶۳	افت محاسبه شده	همه لاترالها <sup>۲</sup>
	۱/۳۸	۱/۹۷	۲/۰۶	۱/۸۶	سرعت جریان شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
۳/۶۴	۰/۷۵	۱/۱۷	۱/۰۴	۰/۶۸	افت شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
	۶۷/۸	۹۹/۴	۹۹/۴	۱۱۳	قطر داخلی	
	۰/۹۲	۰/۸۶	۱/۲۹	۱/۳۳	سرعت جریان محاسبه شده	
۱/۱۹	۰/۳۱	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۴	افت محاسبه شده	همه لاترالها
	۰/۹۶	۰/۸۹	۱/۳۴	۱/۳۸	سرعت جریان شبیه سازی شده	
۱/۱۹	۰/۳۱	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۴	افت شبیه سازی شده	
	۸۱/۴	۹۹/۴	۱۱۳	۱۲۶/۶	قطر داخلی	
	۰/۶۴	۰/۸۶	۱/۰۱	۱/۰۶	سرعت جریان محاسبه شده	
۰/۶۹	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲	۰/۱۹	افت محاسبه شده	همه لاترالها
	۰/۶۵	۰/۸۸	۱/۰۲	۱/۰۸	سرعت جریان شبیه سازی شده	
۰/۶۷	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۱۹	افت شبیه سازی شده	

(بهینه سازی اقتصادی)

(حداکثر سرعت مجاز)

(حداکثر گرادیان هیدرولیکی  
(۲m/۱۰۰m)

(حداکثر گرادیان هیدرولیکی  
(۱m/۱۰۰m)

۱. حداکثر سرعت جریان و تلفات اصطکاکی شبیه سازی شده در بین لاترال های مختلف  
۲. در روشهای طراحی غیر از روش بهینه سازی، طراحی تمامی لاترال ها مشابه فرض می شود. اما در روش بهینه سازی، هر لاترال جداگانه طراحی می شود.

جدول ۴- مقایسه نتایج روش های مختلف (آبرسان ها)

مجموع	قسمت ۴	قسمت ۳	قسمت ۲	قسمت ۱		
	۹۹/۴	۱۱۳	۱۴۴/۶	۱۸۲/۸	قطر داخلی	
	۱/۷۱	۲/۶۵	۲/۴۵	۲/۰۶	حداکثر سرعت جریان <sup>۱</sup>	(بهینه سازی اقتصادی)
۲/۸۴	۰/۵۸	۱/۱۳	۰/۷۳	۰/۴	حداکثر افت <sup>۱</sup>	
	۹۹/۴ <sup>۲</sup>	۱۱۳	۱۴۴/۶	۱۶۲/۸	قطر داخلی <sup>۲</sup>	
	۱/۷۲	۲/۶۶	۲/۴۳	۲/۵۶	سرعت جریان محاسبه شده	
۳/۳۵	۰/۶۳	۱/۲۱	۰/۷۷	۰/۷۴	افت محاسبه شده	(حداکثر سرعت مجاز)
	۱/۸	۲/۸	۲/۵۸	۲/۷۴	سرعت جریان شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
۳/۴۸	۰/۶۴	۱/۲۵	۰/۸۱	۰/۷۸	افت شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
	۱۱۳	۱۴۴/۶	۱۸۲/۸	۲۰۷/۸	قطر داخلی	
	۱/۳۳	۱/۶۲	۱/۵۲	۱/۵۷	سرعت جریان محاسبه شده	
۱/۱۸	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۲۳	افت محاسبه شده	(حداکثر گرادیان هیدرولیکی ۲m/۱۰۰m)
	۱/۳۷	۱/۶۷	۱/۵۷	۱/۶۳	سرعت جریان شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
۱/۱۵	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۲۲	افت شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
	۱۲۶/۶	۱۶۲/۸	۲۰۷/۸	۲۳۲/۸	قطر داخلی	
	۱/۰۶	۱/۲۸	۱/۱۸	۱/۲۵	سرعت جریان محاسبه شده	
۰/۶۵	۰/۱۹	۰/۲	۰/۱۳	۰/۱۳	افت محاسبه شده	(حداکثر گرادیان هیدرولیکی ۱m/۱۰۰m)
	۱/۰۷	۱/۳	۱/۲	۱/۲۸	سرعت جریان شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
۰/۶۴	۰/۱۹	۰/۲	۰/۱۳	۰/۱۲	افت شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	

۱. حداکثر سرعت جریان و تلفات اصطکاکی در بین آبرسان های مختلف

۲. بزرگتر یا مساوی با قطر اولین قسمت لاترال

جدول ۵- مقایسه نتایج روش های مختلف (۳ قطعه خط اصلی)

نقطه طراحی پمپ	مجموع	قطعه ۳	قطعه ۲	قطعه ۱		
Q = ۱۵۹/۲۳ Lit/s H = ۳۶/۱۷ m	-----	۲۰۷/۸	۲۳۲/۸	۲۶۲/۸	قطر داخلی	
	-----	۱/۵۴	۲/۴۶	۲/۹۳	سرعت جریان	(بهینه سازی اقتصادی)
	۴/۴۹	۰/۸	۱/۶۸	۲/۰۱	افت	
Q = ۱۵۹/۸۴ Lit/s H = ۴۲/۱۲ m	-----	۲۳۲/۸	۲۶۲/۸	۲۶۲/۸	قطر داخلی	
	-----	۲/۵۶	۲/۵	۲/۹۵	سرعت جریان محاسبه شده	
	۷/۰۳	۲/۹۶	۱/۸۷	۲/۲	افت محاسبه شده	(حداکثر سرعت مجاز)
	-----	۲/۷۸	۲/۵۷	۳/۰۸	سرعت جریان شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
	۶/۸۱	۲/۷۸	۱/۸۳	۲/۲	افت شبیه سازی شده <sup>۱</sup>	
Q = ۱۵۹/۸۴ Lit/s H = ۳۴/۹۰ m	-----	۱۸۲/۸	۲۶۲/۸	۲۹۷/۸	قطر داخلی	
	-----	۱/۵۷	۱/۹۶	۲/۲۹	سرعت جریان محاسبه شده	
	۳/۱۳	۰/۹	۱/۰۴	۱/۱۹	افت محاسبه شده	(حداکثر گرادیان هیدرولیکی ۲m/۱۰۰m)
	-----	۱/۵۸	۱/۹۹	۲/۳۴	سرعت جریان شبیه سازی شده	
	۲/۹۸	۰/۸۵	۰/۹۸	۱/۱۵	افت شبیه سازی شده	
Q = ۱۵۹/۸۴ Lit/s H = ۳۲/۴۸ m	-----	۲۳۲/۸	۳۳۷/۸	۳۳۷/۸	قطر داخلی	
	-----	۱/۲۵	۱/۵۳	۱/۷۸	سرعت جریان محاسبه شده	
	۱/۷۳	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۶۵	افت محاسبه شده	(حداکثر گرادیان هیدرولیکی ۱m/۱۰۰m)
	-----	۱/۲۶	۱/۵۴	۱/۸	سرعت جریان شبیه سازی شده	
	۱/۶۲	۰/۴۸	۰/۵۳	۰/۶۱	افت	

۱. حداکثر سرعت جریان و تلفات اصطکاکی در بین لاترال های مختلف



جدول ۶- مقایسه مجموع هزینه‌های سیستم در روش‌های مختلف طراحی

روش طراحی	هزینه انرژی	هزینه لوله‌ها	مجموع هزینه‌های سیستم	اختلاف با روش بهینه سازی
روش بهینه سازی اقتصادی	۸۳,۹۴۴,۶۰۰	۷۷,۴۷۴,۴۰۰	۱۶۱,۴۱۹,۰۰۰	----
روش حداکثر سرعت مجاز	۹۸,۳۴۵,۷۸۸	۶۵,۱۳۱,۲۰۰	۱۶۳,۴۷۶,۹۸۸	٪۱/۳
روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی $0.1 \text{ m.m}^{-1}$	۷۶,۴۴۹,۰۷۰	۸۹,۷۵۴,۰۰۰	۱۶۶,۲۰۳,۰۷۰	٪۳/۰
روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی $0.2 \text{ m.m}^{-1}$	۸۱,۴۹۴,۳۲۲	۸۴,۹۸۲,۸۰۰	۱۶۶,۴۷۷,۱۲۲	٪۳/۱

سرعت مجاز، حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  و روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.2 \text{ m.m}^{-1}$  قرار می‌گیرند. اختلاف‌های مشاهده شده در هزینه سیستم آبیاری در روش‌های مختلف طراحی، در صورت بزرگ تر شدن سیستم، بارزتر می‌شوند.

در مجموع، با توجه به اینکه در بهینه سازی اقتصادی کلیه محاسبات براساس شرایط نزدیک به واقعی سیستم (و نه براساس محاسبات تقریبی) انجام می‌شود، طراحی با این روش همواره به عملکرد هیدرولیکی مورد نظر منجر می‌گردد. توجه به این نکته ضروریست که روش بهینه سازی اقتصادی یک روش هدفمند است و معیارهای هیدرولیکی سیستم پیش از طراحی تعیین و مورد نظر قرار می‌گیرند. حال آنکه، در روش‌های سنتی تا پایان طراحی، مقادیر دقیق پارامترهای هیدرولیکی سیستم نامشخص بوده و انتخاب قطر لوله برای قسمت‌های مختلف به صورت سعی و خطا صورت می‌پذیرد. در نهایت توصیه می‌شود که روش‌های طراحی نسبت به شرایط واقعی حاکم بر مسئله مانند مقادیر واقعی نرخ بهره، قیمت واقعی سوخت و لوله‌ها و نیازهای کشاورز مورد ارزیابی قرار گرفته و انتخاب روش نهایی با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر بر طراحی انجام پذیرد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها (جدول ارائه نشده‌اند) نشان می‌دهد که روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$ ، به بالاترین میزان یکنواختی توزیع در بین آبپاش‌ها منجر شده است. روش حداکثر گرادیان  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$ ، روش بهینه سازی اقتصادی (با هدف محدود کردن اختلاف دبی آبپاشها به  $\pm 5\%$  نسبت به دبی اسمی آبپاش) و روش حداکثر سرعت مجاز در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. مقدار انحراف استاندارد دبی واقعی خروجی از هر آبپاش نسبت به دبی اسمی آبپاش‌های به کار رفته در سیستم، برای روش‌های بهینه سازی، حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$ ، حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.2 \text{ m.m}^{-1}$  و حداکثر سرعت مجاز، به ترتیب  $0.1$ ،  $0.3$ ،  $0.5$  و  $0.12$  لیتر در ثانیه برآورد گردید.

## نتیجه گیری

مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌های سنتی (استاتیک) طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار در مورد یک سیستم آبیاری بارانی فرضی نشان داد که در بین روش‌های استاتیک، روش حداکثر گرادیان هیدرولیکی  $0.1 \text{ m.m}^{-1}$  دارای کمترین میزان افت اصطکاک و روش حداکثر سرعت مجاز دارای بیشترین مقدار افت اصطکاک می‌باشد. همچنین، روش بهینه سازی اقتصادی به کمترین میزان مجموع هزینه‌ها منجر می‌شود. پس از آن، روش حداکثر

## منابع

- ۱- تائبی ا. و چمنی م. ۱۳۸۴. شبکه‌های توزیع آب شهری. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان. ص ۶۲۲.
- ۲- سهرابی ت. و پایدار ز. ۱۳۸۴. اصول طراحی سیستم‌های آبیاری. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. ص ۴۰۶.
- ۳- علیزاده ا. ۱۳۸۴. طراحی سیستم‌های آبیاری. چاپ ششم (با تجدید نظر). دانشگاه امام رضا (ع). ص ۵۸۴.
- 4- Chen Y.M. 1997. Management of Water Resources Using Improved Genetic Algorithms. Computers and Electronics In Agriculture, 18(2):117-127.
- 5- Fietz T. 1973. Improved Head-Discharge Relations for Pipe Network Analysis by Loop Method. Hydraulic Researchm, 2(11):136-123.
- 6- Fietz T. 1977. Discussion of pressure reducing valves in pipe network analysis. Journal of Hydraulic Div, 103(5):578-580.
- 7- Jeppson R.W., Davis A.L. 1977. Closure to Pressure Reducing Valves in Pipe Network Analysis. Journal of Hydraulic Div., ASCE. 103(11):1362-1372.
- 8- Keller J., Bliesner R.D. 2001. Sprinkler and Trickel Irrigation. Van Nostrand Reinhold. pp 652.
- 9- Lingo User's Guide. 2008. Lindo System Inc.
- 10- Muspratt M.A. 1971. Optimal distribution of water to irrigation canals. Journal of Hydrology, 14(1):19-28.

- 11- Pearson G.F. 1974. Life-Cycle Costing in an Energy Crisis Area. *Professional Engineer*, July, 44(7):26-29.
- 12- Saad J., Frizzone J. 1996. Design and Management Optimization of Trickle Irrigation Systems Using Non-Linear Programming. *Agriculture Engineering*, 64(2):109-118.
- 13- Sabbagh E., Sinai G. 1988. A Model For Optimal Real-Time Computer Control of Pumping Stations in Irrigation Systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 3(2):119-133.
- 14- Sanchez G., Felici S., Pelechano J., Pelegri J., and Perez J. 1999. Optimal Design of Irrigation Networks Using a Genetic Algorithm. *7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 947-941.

## Development of a Two-Stage Economic Optimization Algorithm for Pressurized Irrigation Systems

B. Ababaei<sup>1\*</sup>- T. Sohrabi<sup>2</sup>

### Abstract

Some of common hydraulic methods for designing pressurized irrigation systems are: (i) unit head loss method, (ii) (maximum allowable) velocity method, and (iii) percent head loss method. In this research, a two-stage economic optimization algorithm was introduced to design pressurized irrigation systems and was developed in LINGO programming environment. Results obtained by this model were compared with the ones from the foregoing hydraulic methods for a hypothetical sprinkle irrigation system comprised of 3 manifolds to assess the performance of the new algorithm. The results showed that this optimization algorithm resulted in 3% lower costs for a small irrigation system and favorable distribution uniformity. Also it was concluded that system design according to unit head loss method with maximum  $0.01 \text{ m.m}^{-1}$  head loss resulted in the highest distribution uniformity in comparison to the other methods and the optimization algorithm, unit head loss method with maximum  $0.02 \text{ m.m}^{-1}$  head loss and maximum allowable velocity method followed it. The standard deviation of the sprinklers outflow values as compared to the namely outflow value were estimated 0.1, 0.03, 0.05 and  $0.12 \text{ lit.s}^{-1}$  for the optimization method, unit head loss method with maximum  $0.01 \text{ m.m}^{-1}$  head loss, unit head loss method with maximum  $0.02 \text{ m.m}^{-1}$  head loss, maximum allowable velocity method, respectively.

**Keywords:** Economic optimization algorithm, Pressurized irrigation, *LINGO*, *WaterGEMS*

---

1,2 - PhD Candidate student Irrigation and Drainage and Professor Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran  
(\* - Corresponding Author Email: behnam.ab@gmail.com)