

## شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله‌های فرعی (لتراال‌های) آبیاری بارانی

رضا شاه محمدی، سید مجید میرلطیفی و کورش محمدی<sup>۱</sup>

### چکیده

یک برنامه کامپیوتری (مدل) به نام SprinklerMod برای طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری بارانی تهیه گردید. در این مقاله به نحوه شبیه‌سازی توزیع فشار و دبی آپیاش‌ها در طول لوله‌های فرعی پرداخته می‌شود. این مدل قادر به طراحی دو نوع لوله‌های فرعی (که استفاده از آنها در کشور متداول می‌باشد) شامل لوله‌های فرعی با آپیاش‌های ثابت و با آپیاش متغیر می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت جدول و یا نمودار روی صفحه مانیتور قابل رؤیت است. این برنامه کامپیوتری توانایی طراحی لوله‌های فرعی با یک قطر ثابت و یا دو قطر مختلف همراه با شبیط طولی یکنواخت و یا غیر یکنواخت را دارد. نمودار درصد تغییرات فشار آپیاش‌ها به ازاء قطرهای داخلی مختلف لوله فرعی توسط مدل قابل ترسیم است. از فرمول هیزن-ویلیامز برای انجام محاسبات مربوط به افت اصطکاکی استفاده شد. پارامترهای ورودی مدل شامل نوع لوله فرعی، فشار و دبی متوسط کارکرد آپیاش‌ها، فواصل قرارگیری آپیاش‌ها، فاصله اولین آپیاش تا ابتدای لوله فرعی، تعداد آپیاش‌ها، ارتفاع پایه آپیاش، ضریب افت اصطکاکی هیزن-ویلیامز و شبیط طولی یا رقوم ارتفاعی لوله فرعی در محل هر آپیاش می‌باشد. شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که میانگین فشار و یا دبی آپیاش‌ها برابر با فشار و یا دبی متوسط کارکردی که توسط کاربر برای آپیاش‌ها تعیین شده، گردد. شبیه‌سازی لوله‌های فرعی با استفاده از روالهای تکراری انجام پذیرفت. از روش حل عددی نیوتون-رافسون برای محاسبه فشار هر یک از آپیاش‌ها در لوله‌های فرعی با آپیاش متغیر استفاده گردید. برای ارزیابی مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج طراحی کلاسیک مورد مقایسه قرار گرفت. از آن جایی که معادلات لازم برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آپیاش متغیر در منابع علمی ارائه نشده است، روابط مورد نیاز استخراج گردید. میانگین قدرمطلق درصد اختلاف نتایج محاسبه فشار مورد نیاز در ابتدای لوله‌های فرعی با آپیاش‌های ثابت با شبیط‌های مختلف با یک قطر ثابت و دو قطر مختلف به ترتیب  $3/0\%$  و  $7/0\%$  درصد و در مورد لوله‌های فرعی با آپیاش متغیر برابر با  $1/0\%$  درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی هیدرولیکی، لوله فرعی، آبیاری بارانی، آپیاش متغیر، SprinklerMod

### مقدمه

(۹). لوله‌های فرعی جزء مهمی از یک سیستم آبیاری بارانی

محسوب می‌شوند و طراحی صحیح آنها از لحاظ یکنواختی توزیع آب در مزرعه و راندمان آبیاری اهتمام زیادی

یک سیستم آبیاری با طراحی ضعیف، حتی اگر خوب مدیریت شود اغلب منجر به کاهش محصول و راندمان آبیاری می‌شود

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیاران آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

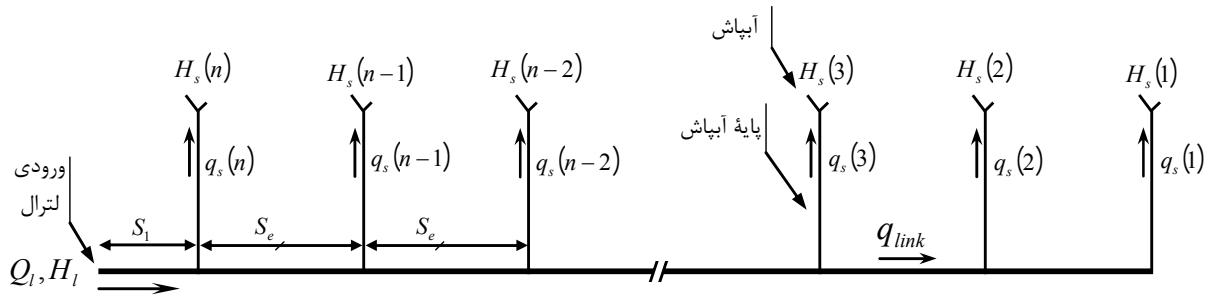
به طراحی لوله‌های فرعی با آپاش متحرک و طراحی با دو قطر مختلف و با شیب طولی غیر یکنواخت نمی‌باشد.

لوله‌های فرعی با آپاش‌های متحرک که در زمین‌های ناهموار با اشکال هندسی نامناسب به راحتی قابل اجرا بوده و تقریباً نیازمند نیروی انسانی بیشتری در مقایسه با سایر سیستم‌های آبیاری بارانی است در ایران به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و هیچ‌کدام از مدل‌های ارائه شده، به طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی آن نپرداخته‌اند (۳). هم‌چنین هیچ یک از مدل‌های ارائه شده قادر به ترسیم نمودار درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف لوله فرعی نیستند. SprinklerMod با ارائه این نمودار اطلاعات جامعی در رابطه با مقادیر درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف در اختیار کاربر قرار می‌دهد، بدین ترتیب طراح می‌تواند دید بهتری در رابطه با انتخاب قطر لوله فرعی داشته باشد و با قضاوت مهندسی خود قطر مناسب لوله فرعی را انتخاب نماید. بر این اساس نیاز به تهیه یک مدل کامپیوتری برای طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری بارانی که قادر به شبیه‌سازی هیدرولیکی هر دو نوع لوله‌های فرعی (با آپاش‌های ثابت و آپاش متحرک) باشد و قابلیت‌هایی چون امکان ترسیم نمودار درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف را دارا باشد، احساس می‌شود.

هدف از این تحقیق ارائه یک برنامه کامپیوتری برای طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله‌های فرعی سیستم‌های آبیاری بارانی می‌باشد. این مدل قابلیت طراحی دو نوع لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت و با آپاش متحرک به همراه شیب طولی یکنواخت و یا متغیر و با یک قطر ثابت و یا دو قطر مختلف را داراست و امکان ترسیم نمودار درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف را روی مانیتور و مشاهده نتایج حاصل از شبیه‌سازی را (به صورت جدول و یا نمودار) به کاربر می‌دهد. این کار بخشی از مدل SprinklerMod می‌باشد که برای طراحی سیستم‌های آبیاری بارانی در محیط برنامه نویسی ویژوال بیسیک به صورت کاربرپسند و قابل اجرا در سیستم

است (۲). در حالت کلی می‌توان سیستم‌های آبیاری بارانی را به دو نوع سیستم‌های ساکن و متحرک دائمی تقسیم کرد. در سیستم‌های ساکن از دو نوع لوله فرعی شامل لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت و آپاش متحرک استفاده می‌شود (۱). در لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت، آپاش‌ها در فواصل مساوی و به طور هم‌زمان آبیاری می‌کنند. در لوله‌های فرعی با آپاش متحرک فقط از یک آپاش بزرگ برای آبیاری با یک یا چند لوله فرعی استفاده می‌شود به‌طوری‌که با جابه‌جایی تناوبی آن در طول لوله فرعی آبیاری در سراسر آن صورت می‌گیرد، بدین ترتیب در یک زمان واحد فقط یک آپاش بر روی لوله فرعی قرار می‌گیرد. در هر دو نوع لوله‌های فرعی محاسبه توزیع فشار و دبی آپاش‌ها نیازمند روال تکراری است که امکان انجام آن با طراحی کلاسیک وجود ندارد و لزوماً باید از مدل‌های شبیه‌سازی استفاده نمود. مدل‌های شبیه‌سازی علاوه بر افزایش سرعت و دقت طراحی، امکان انجام محاسبات پیچیده و حجمی را نیز میسر می‌سازند.

چندین مدل (۴، ۵، ۶، ۷ و ۱۲) برای طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری بارانی ارائه شده است. مدل‌های دیگری (۷ و ۱۱) فقط به منظور طراحی و شبیه‌سازی لوله‌های فرعی سیستم‌های آبیاری بارانی ارائه شده است. مدل پلبان و امیر (۱۱) قادر به تعیین توزیع فشار و دبی در طول لوله فرعی با استفاده از روش تکراری نیوتن-رافسون، محاسبه فشار در گره ورودی، تعیین قطر لوله فرعی و معرفی ماکزیمم تعداد مجاز آپاش روی لوله فرعی است. این مدل محدود به حداقل تعداد ۳۰ آپاش در طول لوله فرعی است و قادر به طراحی لوله‌های فرعی با دو قطر مختلف و طراحی لوله فرعی با آپاش متحرک نمی‌باشد. هتوت و همکاران (۷) مدلی برای طراحی لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت با شیب طولی یکنواخت و با یک قطر ثابت ارائه نمودند. در مدل مذکور از معادله دارسی-ویسباخ با ضرایب افت اصطکاکی متغیر برای محاسبه افت‌های اصطکاکی استفاده شده است و تمامی افتهای موضعی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. این مدل نیز قادر



شکل ۱. تحلیل لوله فرعی به صورت مجموعه‌ای از گره‌ها و رابطه‌ها

### شبیه‌سازی لوله فرعی

برای شبیه‌سازی لوله فرعی ابتدا نوع لوله فرعی، دبی متوسط کارکرد آپاش‌ها ( $q_a$ )، فشار متوسط کارکرد آپاش‌ها ( $H_a$ )، فواصل قرارگیری آپاش‌ها روی لوله فرعی ( $S_e$ )، فاصله ابتدای لوله فرعی تا محل اولین آپاش ( $S_1$ )، تعداد نقاط آبگیری آپاش‌ها ( $n$ )، ارتفاع پایه آپاش ( $h_r$ )، ضریب افت اصطکاکی هیزن-ویلیامز لوله فرعی ( $C_f$ ) (افت‌های موضعی ناشی از اتصالات و انشعاب پایه‌های آپاش‌ها نیز در این ضریب ملحوظ می‌شوند)، شیب طولی لوله فرعی ( $S_0$ ) (و یا در صورت وجود توپوگرافی غیریکنواخت رقوم ارتفاعی لوله فرعی در محل هر آپاش ( $EL(i)$ ) باید به عنوان ورودی توسط طراح به مدل داده شوند. در صورتی که لوله فرعی دارای لوله سرانداز باشد طول ( $L_f$ ) و ضریب هیزن-ویلیامز آن ( $C_f$ ) نیز از کاربر دریافت می‌شود. در صورت طراحی لوله فرعی با یک قطر ثابت، قطر داخلی مورد نظر ( $d_i$ ) و در صورت طراحی با دو قطر مختلف اندازه قطر داخلی مربوط به هر یک از لوله‌های بزرگ و کوچک ( $d_{i_{large}}$  و  $d_{i_{small}}$ ) و تعداد آپاش روی هر یک ( $n_{large}$  و  $n_{small}$ ) باید توسط طراح وارد شود. ضریب تخلیه معادله فشار-دبی آپاش ( $k_d$ ) با استفاده از مقادیر  $q_a$  و  $H_a$  توسط اغلب آپاش‌ها می‌شود. عموماً ضریب  $k_d$  را در محدوده کار مدل محاسبه می‌شود. در این تحقیق نیز مقدار  $k_d$  ثابت فرض گردید.

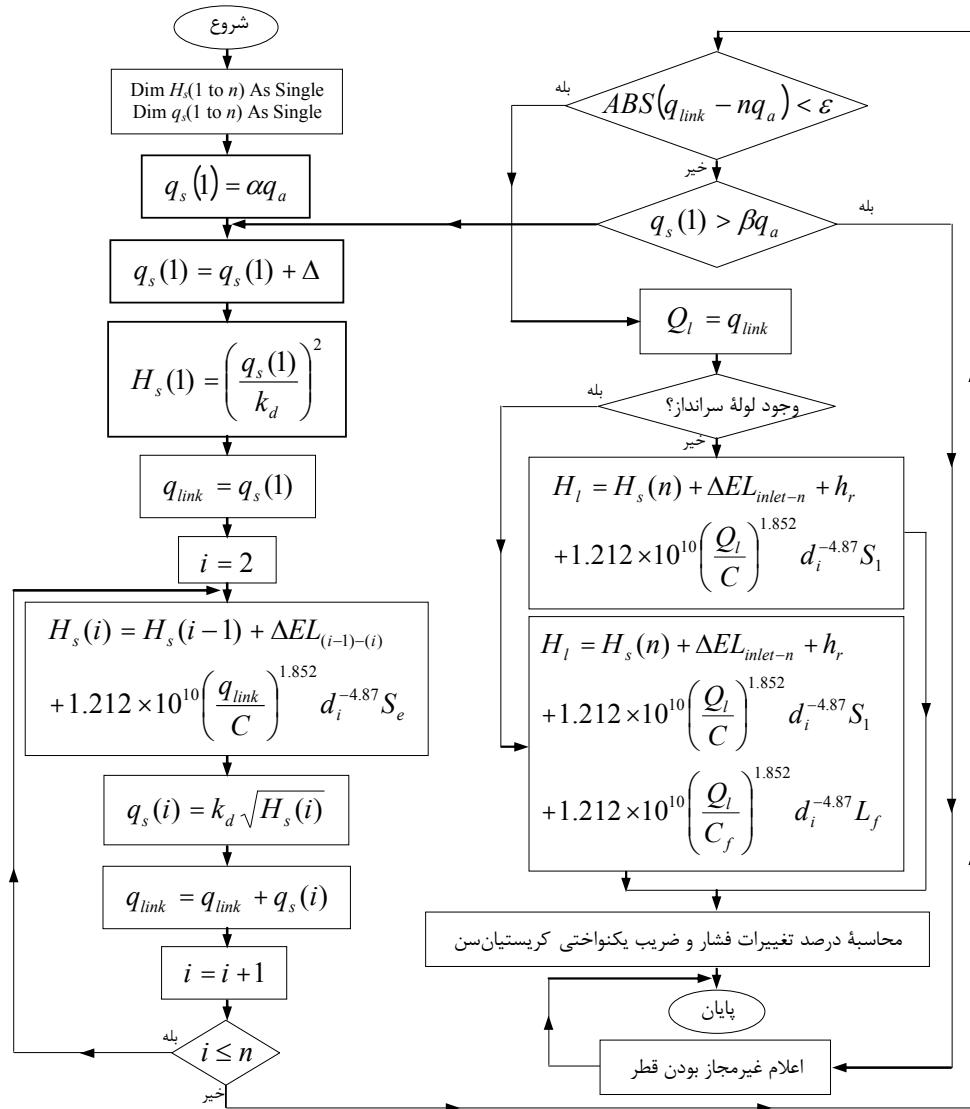
(الف) شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آپاش‌های ثابت لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت مطابق فلوچارت ۱ شبیه‌سازی

عامل ویندوز نوشته شد. هم‌چنین معادلات لازم برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آپاش متحرک (با توجه به عدم وجود معادلات مربوطه در منابع علمی) استخراج و ارائه گردید.

### مواد و روش‌ها

#### تحلیل لوله فرعی

برای انجام شبیه‌سازی، لوله فرعی به مجموعه‌ای متشکل از گره‌ها و رابطه‌ها تبدیل شد. گره‌ها نقاط اتصال پایه‌های آپاش‌ها به لوله فرعی می‌باشند. دو گره متوالی را یک رابط به هم متصل می‌کند. بدین ترتیب لوله فرعی به مجموعه‌ای از  $n+1$  گره و  $n$  رابط تبدیل می‌شود (شکل ۱). در شکل ۱ گره‌ها از انتهای بسته لوله فرعی شماره‌گذاری شده‌اند. طول رابط‌هایی که دو گره متوالی مربوط به نقاط اتصال پایه‌های آپاش‌ها را به هم وصل می‌نمایند یکسان و برابر با فواصل آپاش‌ها بر روی لوله فرعی ( $S_e$ ) می‌باشد. در صورتی که لوله فرعی از نوع لوله فرعی با آپاش‌های ثابت باشد در یک زمان واحد تمامی پایه‌های آپاش‌ها در گره‌های مربوطه قرار گرفته و آبگیری می‌نمایند. چنانکه لوله فرعی از نوع لوله فرعی با آپاش متحرک باشد در یک زمان واحد فقط یک پایه آپاش از یکی از گره‌ها آبگیری می‌کند که با توجه به هیدرولیک متفاوت آن با لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت الگوریتم‌های جداگانه‌ای برای شبیه‌سازی هر یک تهیه شد. در تهیه الگوریتم‌ها تغییرات بار سرعت به دلیل ناچیز و قابل صرف نظر بودن ملحوظ نگردید.



فلوچارت ۱. الگوریتم شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آپاش‌های ثابت

که  $\alpha = 0.8$  اعمال شود.

برای ایجاد همگرایی لازم در تکرارهای متوالی برای رسیدن به حالتی که میانگین دبی یا فشار آپاش‌های لوله فرعی برابر با  $q_a$  یا  $H_a$  باشد مقدار کوچک  $\Delta$  به ( $i$ )  $q_s$  افزوده می‌شود ( $\Delta = 0.0001$ ).  $H_s$  ( $i$ ) متناظر با ( $i$ )  $q_s$  با استفاده از معادله فشار-دبی آپاش محاسبه می‌شود. دبی رابط منتهی به آپاش شماره ۱ برابر ( $i$ )  $q_s$  می‌باشد که مقدار آن در متغیر  $q_{link}$  قرار داده می‌شود (از متغیر  $q_{link}$  برای محاسبه افت اصطکاکی در طول رابط استفاده می‌شود).

شدن. در این فلوچارت محاسبات از انتهای لوله فرعی انجام می‌پذیرد. محاسبات فلوچارت با توجه به شکل ۱ به صورت زیر است:

- در ابتدا دو آرایه به نام‌های  $q_s$  و  $H_s$  برای ذخیره مقادیر دبی و فشار آپاش‌ها تعریف می‌شود. در آرایه‌های مذکور مطابق شکل ۱، ( $i$ )  $q_s$  و ( $i$ )  $H_s$  مقادیر دبی و فشار در آپاش نام از انتهای بسته لوله فرعی می‌باشند.
- یک مقدار پیش‌فرض برای ( $i$ )  $q_s$  به صورت مضربی از  $q_a$  قرار داده می‌شود ( $q_s(i) = \alpha \times q_a$ ) و توصیه می‌شود

سرگرفته می‌شود. بدین ترتیب محاسبات آنقدر ادامه می‌یابد تا لوله فرعی شبیه‌سازی شود یا امکان ناپذیری آن اثبات شود.

۶. در صورت پایان پذیرفتن موفق شبیه‌سازی (قدرمطلق تفاضل دبی لوله فرعی و مقدار  $n \times q_a$  کوچکتر از ۴ باشد)، مقادیر فشار و دبی مورد نیاز در ورودی لوله فرعی و مقادیر درصد تغییرات فشار و ضربیت یکنواختی کریستیان سن دبی آپیاش‌ها محاسبه می‌شوند. دبی لوله فرعی برابر با دبی رابط بالادست آپیاش  $n^*$  قرار داده می‌شود و مقدار فشار موردنیاز در نقطه ورودی لوله فرعی با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$H_1 = H_s(n) + \Delta EL_{inlet-n} + h_r + h_{f_{inlet-n}} \quad [1]$$

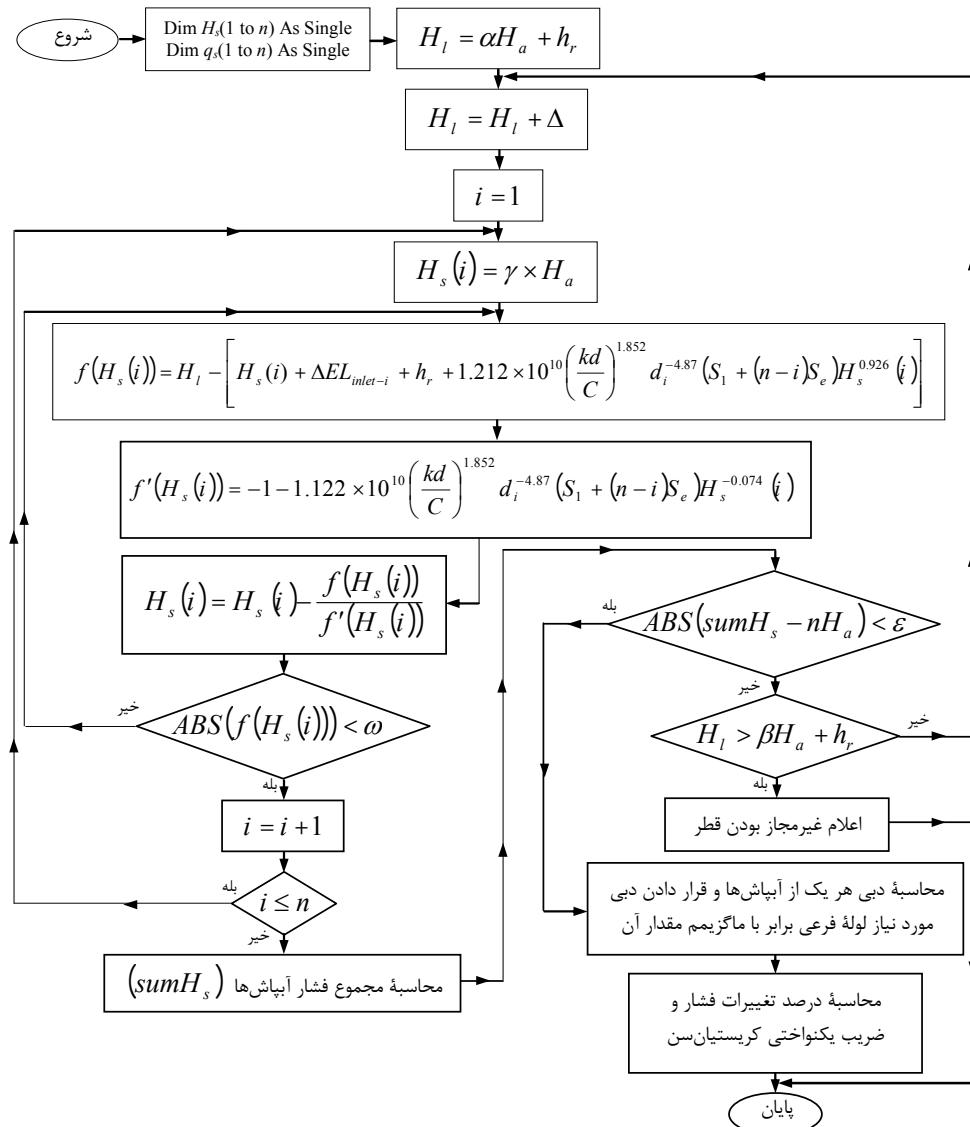
که در آن  $H_1$ : فشار مورد نیاز در ورودی لوله فرعی (m)،  $\Delta EL_{inlet-n}$ : افزایش رقوم ارتفاعی از ابتدای لوله فرعی تا محل آپیاش  $n^*$  (m)،  $h_r$ : ارتفاع پایه آپیاش (m)،  $h_{f_{inlet-n}}$ : افت اصطکاکی بین ابتدای لوله فرعی تا آپیاش  $n^*$  (در صورت استفاده از لوله سرانداز افت در لوله سرانداز نیز ملحوظ می‌شود) (m) است.

ب) شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آپیاش متحرک شبیه‌سازی لوله‌های فرعی با آپیاش متحرک مطابق فلوچارت ۲ صورت گرفت. با توجه به این که در این نوع لوله‌های فرعی در یک زمان واحد تنها یک آپیاش بر روی لوله فرعی قرار می‌گیرد الگوریتم خاصی برای شبیه‌سازی تهیه گردید. محاسبات از ابتدای لوله فرعی (برعکس لوله‌های فرعی با آپیاش‌های ثابت) با توجه به شکل ۱ انجام شد. برای کاستن از حجم بسیار زیاد محاسبات مورد نیاز از روش نیوتون-رافسون برای محاسبه فشار در محل هر آپیاش استفاده شد. مراحل کار فلوچارت به صورت زیر است:

۱. تعریف دو آرایه به نامهای  $q_s$  و  $H_s$  برای ذخیره مقادیر دبی و فشار آپیاش‌ها (مطابق شکل ۱، (i)  $q_s$  و (i)  $H_s$  مقادیر دبی و فشار در آپیاش  $n^*$  از انتهای بسته لوله فرعی است).

۴. در این مرحله دبی و فشار سایر آپیاش‌ها محاسبه و به ترتیب در آرایه‌های  $q_s$  و  $H_s$  قرار داده می‌شوند. با استفاده از یک روال تکراری محاسبات از انتهای بسته لوله فرعی به سمت ورودی آن صورت می‌گیرد، بدین ترتیب که فشار در هر یک از آپیاش‌ها با استفاده از فشار آپیاش پایین‌دست و مقدار افت اصطکاکی و تغییرات رقوم ارتفاعی بین آنها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. با محاسبه فشار در هر آپیاش دبی آن با استفاده از معادله آپیاش محاسبه می‌شود. با جمع مقادیر دبی آپیاش و دبی رابط پایین‌دست آن، دبی رابط بالادست آپیاش محاسبه و در متغیر  $q_{link}$  قرار داده می‌شود. لازم به ذکر است که در طراحی با دو قطر مختلف (با فرض ایجاد تغییر قطر دقیقاً بعد از آخرین آپیاش قرار گرفته بر روی قطر بزرگ‌تر) از دو روال تکراری برای محاسبه فشار و دبی آپیاش‌ها بر روی هر یک از لوله‌ها استفاده شد.

۵. بعد از محاسبه فشار و دبی هر یک از آپیاش‌ها و دبی رابط‌های بالادست هر یک، درصورتی که قدرمطلق تفاضل دبی لوله فرعی (دبی لوله فرعی برابر با دبی رابط بالادست آپیاش  $n^*$  است) و مقدار  $n \times q_a$  کوچکتر از ۴ باشد، نشان دهنده آن است که میانگین دبی آپیاش‌ها برابر  $q_a$  است، در چنین حالتی به لحاظ این‌که مشخصات کنونی لوله فرعی به صورتی است که دبی و فشار میانگین آپیاش‌ها با مقدار مورد نظر طراح برابر شده است، شبیه‌سازی پایان می‌پذیرد. در غیر این صورت مقدار  $q_s$  با مقدار  $q_a \times \beta$  مقایسه می‌شود (توصیه می‌شود  $0.1 < \beta < 0.5$ ) باشد نشان دهنده آن است که شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با این قطر محدود نمی‌باشد (این حالت معمولاً زمانی که قطر داخلی انتخابی بیش از حد کوچک انتخاب شده باشد ایجاد می‌شود). در این حالت با اعلام غیرقابل قبول بودن قطر انتخابی محاسبات پایان می‌یابد، در غیر این صورت محاسبات از گام ۳ با افزودن دوباره  $\Delta$  به  $(i)$  از



فلوچارت ۲. الگوریتم شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آپاش متعدد

فشار آپاش در حال کار به ازای مقدار فرضی فشار در ابتدای لوله فرعی با حل تحلیلی میسر نمی‌باشد و نیازمند به کارگیری روش‌های حل عددی است. معادله انرژی بین نقطه ورودی لوله فرعی و آپاش  $i^*$  (هر آپاش منفرد در حال کار) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$H_l + EL_{inlet} = H_s(i) + EL(i) + h_r + 1.212 \times 10^{10} \left( \frac{q_s(i)}{C} \right)^{1/852} d_i^{-4/87} (S_1 + (n-i)S_e) \quad [2]$$

که در آن ( $i$ ) دبی آپاش  $i^*$  است. مجھول‌های معادله فوق

۲. تعیین یک فرض اولیه برای فشار مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی (توصیه می‌شود در فرض اولیه  $H_l = 0$  و  $h_r = 0$ ).

۳. افزودن مقدار کوچک  $\Delta$  به  $H_l$  برای انجام شبیه‌سازی در تکرارهای متوالی.

۴. محاسبه فشار هر یک از آپاشها با استفاده از روش حل عددی نیوتون-رافسون. با توجه به این که دبی آپاش در حال کار و در نتیجه افت اصطکاکی در طول لوله فرعی متناسب با فشار آپاش در حال کار است، بنابراین محاسبه

در غیر این صورت به کاربر اعلام می‌شود که قطر انتخابی قابل قبول نمی‌باشد و محاسبات اتمام می‌باید.

۶. در صورت پایان پذیرفتن موفق شبیه‌سازی (قدرمطلق مقدار  $\text{SumH}_s - nH_a$  از مقدار  $\Delta H_s$  کوچکتر باشد)، آخرین مقدار متغیر  $H_1$  به عنوان فشار مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی قرار داده می‌شود. هم‌چنین دبی هر یک از آپاش‌ها با استفاده از معادله فشار-دبی آپاش محاسبه و مقدار حداکثر آن برابر دبی مورد نیاز لوله فرعی در نظر گرفته می‌شود.
۷. در انتها درصد تغییرات فشار و ضریب یکنواختی کریستیان سن حاصل از مقادیر دبی‌های آپاش‌ها به عنوان فاکتورهای نشان‌دهندهٔ نحوه توزیع فشار و دبی آپاش‌ها محاسبه می‌شوند.

رسم نمودار درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف به منظور ترسیم نمودار درصد تغییرات فشار در یک لوله فرعی به ازای قطرهای داخلی مختلف، لوله فرعی به ازای مقادیر مختلف قطرهای داخلی شبیه‌سازی می‌شود و درصد تغییرات فشار به ازای هر یک از قطرهای محاسبه و در یک آرایه ذخیره می‌شود. بدین ترتیب نمودار درصد تغییرات فشار با استفاده از مقادیر متناظر هر قطر در آرایه مذکور، قابل ترسیم است. البته لازم به ذکر است که ممکن است امکان شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی در برخی از قطرهای (در قطرهای خیلی کوچک به دلیل وجود افت اصطکاکی خیلی زیاد) محدود نباشد که مدل راهکار مناسب برای این موارد را دارد.

### طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی

روابط مورد نیاز برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت توسط محققین مختلفی ارائه شده است. در این تحقیق برای انجام طراحی کلاسیک (به منظور مقایسه نتایج مدل با نتایج طراحی کلاسیک) از روابط ارائه شده از سوی کلر و بلیسنر (۱۰) استفاده شد. با توجه به این که در هیچ منبع علمی روابط مورد نیاز برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آپاش متاخرک ارائه نشده است، روابط مورد نیاز استخراج گردید. در

(i) و  $H_s(i)$  می‌باشد. با جایگزینی  $H_s(i)$  به جای  $q_s$ ، معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$f(H_s(i)) = H_1 \\ - \left[ H_s(i) + \Delta E_{inlet-i} + h_r + 1/212 \times 10^5 \left( \frac{k_d}{C} \right)^{1/852} d_i^{-4/87} (S_i + (n-i)S_e) H_s^{1/924} \right] = 0 \quad [3]$$

تنها متغیر تابع فوق  $H_s(i)$  (فشار در آبپاش  $i$ ) می‌باشد. برای حل معادله فوق با استفاده از روش حل عددی نیوتون-رافسون تابع مشتق را با مشتق‌گیری از آن نسبت به متغیر  $H_s(i)$  به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$f'(H_s(i)) = -1/122 \times 10^5 \left( \frac{k_d}{C} \right)^{1/852} d_i^{-4/87} (S_i + (n-i)S_e) H_s^{-1/924} \quad [4]$$

برای محاسبه فشار هر یک از آپاش‌ها در ابتدای کوچکتر اولیه برای  $H_s(i)$  فرض می‌شود (توصیه می‌شود  $0.7 H_a$ ). اعمال مقدار به دست آمده برای آن در تکرار قبلی قابل محاسبه است:

$$H_s(i) = H_s(i) - \frac{f(H_s(i))}{f'(H_s(i))} \quad [5]$$

برای هر آپاش در صورتی که قدرمطلق مقدار تابع  $f(H_s(i))$  از عدد کوچک فرضی (۵) کوچک‌تر به دست آید، مقدار متغیر  $H_s(i)$  به عنوان فشار در آن آپاش پذیرفته می‌شود. بدین ترتیب مقدار فشار برای هر یک از آپاش‌ها محاسبه می‌شود. در طراحی با دو قطر مختلف از دو روای تکراری برای محاسبه فشار هر یک از آپاش‌ها بر روی هر قطر استفاده گردید (البته لازم به ذکر است که طراحی این نوع لوله‌های فرعی با دو قطر مختلف متداول نمی‌باشد).

۵. بعد از محاسبه فشار تمامی آپاش‌ها به ازای  $H_1$  مربوطه مجموع فشار آپاش‌ها محاسبه و در متغیر  $\text{SumH}_s$  قرار داده می‌شود. در صورتی که قدرمطلق مقدار  $\text{SumH}_s - nH_a$  از مقدار  $\Delta H_s$  کوچک‌تر باشد، شبیه‌سازی پایان پذیرفته است، در غیر این صورت مقدار  $H_1$  با مقدار  $\beta H_a + h_r$  مقایسه می‌شود (توصیه می‌شود  $\beta = 1/3$  اعمال شود). اگر  $H_1 < \beta H_a + h_r$  باشد محاسبات از گام ۳ با افزودن مقدار کوچک  $\Delta$  به  $H_1$  از سر گرفته می‌شود،

اصطکاکی از ابتدای لولهٔ فرعی تا نقطهٔ  $x$  را با رابطهٔ زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$h_{f_x} = J \frac{x}{100}, \quad h_f = J \frac{L}{100} \Rightarrow \frac{h_{f_x}}{h_f} = \frac{x}{L} \quad [8]$$

که در آن  $x$ : فاصلهٔ هر نقطهٔ بر روی لولهٔ فرعی از ابتدای لولهٔ فرعی (m)،  $h_{f_x}$ : افت اصطکاکی از ابتدای لولهٔ فرعی تا نقطهٔ  $x$  (m)،  $h_f$ : افت اصطکاکی کل طول لولهٔ فرعی (با استقرار آپاش در انتهای لولهٔ فرعی) (m) و  $J$ : گرادیان افت بار در طول لولهٔ فرعی ( $m/100m$ ) است. معادلهٔ ۸ معادلهٔ بدون بعد افت اصطکاکی در طول لولهٔ فرعی است. نسبت  $h_{f_x}/h_f$  در نقطه‌ای که متوسط افت اصطکاکی رخ می‌دهد با انتگرال‌گیری از معادلهٔ ۸ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \left( \frac{h_{f_x}}{h_f} \right)_a &= \frac{1}{100} \int_{\frac{x}{L}=0}^{\frac{x}{L}=1} \frac{h_{f_x}}{h_f} d\left(\frac{x}{L}\right) = \int_{\frac{x}{L}=0}^{\frac{x}{L}=1} \frac{x}{L} d\left(\frac{x}{L}\right) \\ &= \left[ \frac{1}{1+1} \left( \frac{x}{L} \right)^{1+1} \right]_{\frac{x}{L}=0}^{\frac{x}{L}=1} = \frac{1}{2} \Rightarrow \left( \frac{h_{f_x}}{h_f} \right)_a = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad [9]$$

که در آن  $\left( \frac{h_{f_x}}{h_f} \right)_a$ : نسبت  $h_{f_x}/h_f$  در نقطه‌ای است که متوسط افت اصطکاکی رخ می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تا محل افت اصطکاکی متوسط، نصف  $h_f$  مستهلك می‌گردد (می‌توان اثبات کرد که متوسط افت اصطکاکی در نقطهٔ میانی لولهٔ فرعی رخ می‌دهد). بدین ترتیب معادلهٔ زیر برای محاسبهٔ فشار مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی با آپاش متحرک قابل استخراج است:

$$H_1 = H_a + \frac{1}{2} h_f \pm \frac{1}{2} \Delta H_e + h_r \quad [10]$$

که در آن  $\Delta H_e$ : اختلاف رقوم ارتفاعی ابتداء و انتهای لولهٔ فرعی (در صورتی که لولهٔ فرعی بر روی سر بالایی باشد  $\Delta H_e$  مثبت به کار برده می‌شود و بالعکس) (m) است.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، چندین لولهٔ فرعی با آپاش‌های ثابت و متحرک با شبیه‌های طولی  $+1$ -درصد (شبیب مثبت)،  $-1$ -درصد (شبیب منفی ملایم) و  $-4/5$ -درصد (شبیب منفی تندر) با استفاده از طراحی کلاسیک و مدل

روابط مربوط به محاسبهٔ گرادیان افت اصطکاکی لوله‌های فرعی با آپاش متحرک با توجه به این‌که در یک زمان واحد فقط یک آپاش بر روی لولهٔ فرعی قرار می‌گیرد نیازی به استفاده از ضریب کریستیان سن (F) وجود ندارد. گرادیان افت بار مجاز در اثر اصطکاک برای لوله‌های فرعی با آپاش‌های متحرک را می‌توان با فرمول زیر محاسبه نمود:

$$J_a = h_{f_a} / (L/100) \quad [6]$$

که در آن  $J_a$ : گرادیان افت بار مجاز در اثر اصطکاک ( $m/100m$ )،  $h_{f_a}$ : افت بار مجاز در اثر اصطکاک (نحوهٔ محاسبهٔ این پارامتر از سوی کلر و بلیسنر ( $10$ ) برای شبیه‌های مختلف لولهٔ فرعی بیان شده است) (m) و  $L$ : فاصلهٔ بین ابتداء و انتهای لولهٔ فرعی (m) است. برای لوله‌های فرعی با آپاش متحرک با فرض این‌که دبی هر آپاش در حال کار برابر  $q_a$  می‌باشد (این فرض با توجه به این‌که معمولاً تغییرات دبی آپاش‌ها در لوله‌های فرعی از  $10$  درصد دبی متوسط کارکرد آپاش‌ها تجاوز نمی‌کند فرض قابل قبولی است) رابطهٔ زیر برای محاسبهٔ قطر داخلی پیشنهادی لولهٔ فرعی ارائه گردید:

$$d_{i_a} = [k(q_a/C)^{1/852} J_a^{-1}]^{(-4/87)} \quad [7]$$

که در آن  $d_{i_a}$ : قطر داخلی پیشنهادی لولهٔ فرعی (mm) و  $k$ : ضریب تبدیل واحد ( $1/212 \times 10^{12}$ ) است. برای استخراج معادلهٔ مورد نیاز به منظور محاسبهٔ فشار مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی با آپاش متحرک در ابتداء باید مقدار افت اصطکاکی از ابتدای لولهٔ فرعی تا نقطه‌ای که افت اصطکاکی متوسط در طول لولهٔ فرعی رخ می‌دهد محاسبهٔ گردد. این کار با استخراج معادلهٔ بدون بعد افت اصطکاکی در طول لولهٔ فرعی و انتگرال‌گیری از آن مقدور می‌باشد. استخراج این معادله نیز با فرض برابر بودن دبی خروجی از آپاش‌ها صورت پذیرفت (مانند فرض صورت گرفته در استخراج معادلهٔ بدون بعد افت اصطکاکی لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت ( $10$ )). بر این اساس با توجه به یکسان بودن دبی لولهٔ فرعی به ازای قرارگیری هر یک از آپاش‌ها، گرادیان افت اصطکاکی در طول لولهٔ فرعی همواره یکسان می‌باشد. اگر  $\Delta$  فاصلهٔ از ابتدای لولهٔ فرعی باشد، افت



شکل ۲. نمودار درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف لوله فرعی با آپیاش‌های ثابت با شیب ۱- درصد

## نتایج و بحث

### ارزیابی انتخاب قطر لوله فرعی

برای تعیین قطر مورد نیاز لوله فرعی درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف برای هر یک از لوله‌های فرعی مذکور توسط مدل ترسیم شد (شکل ۲). قطر داخلی پیشنهادی در شیب‌های منفی تنداً با توجه به ایجاد تعادل بین افت فشار ناشی از اصطکاک و افزایش فشار در اثر افزایش بار استاتیکی در طول لوله فرعی (در این حالت درصد تغییرات فشار مینیمم است) و در سایر موارد بر اساس ۲۰ درصد تغییرات فشار برای هر یک از لوله‌های فرعی تعیین شد و با نتایج طراحی کلاسیک مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۱).

با مقایسه مقادیر قطرهای داخلی پیشنهادی به دست آمده با استفاده از مدل و طراحی کلاسیک قدر مطلق درصد اختلاف نتایج ناچیز و قطرهای انتخابی برای لوله‌های فرعی با استفاده از مدل و طراحی کلاسیک یکسان به دست آمد که صحت محاسبات مدل را تأیید می‌کند. قطر مناسب هر یک از لوله‌های فرعی با استفاده از اطلاعات لوله‌های موجود در پایگاه داده

طراحی و شبیه‌سازی شدند و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفت. در رابطه با لوله‌های فرعی با آپیاش‌های ثابت شبیه‌سازی با یک قطر ثابت و نیز با دو قطر مختلف انجام پذیرفت. برای لوله‌های فرعی با آپیاش‌های ثابت از آپیاش VYR-60 با نازل  $4/36 \times 2/38$  میلی‌متر با فواصل ۱۲ متر بر روی لوله فرعی استفاده شد. فشار متوسط کارکرد آپیاش ۳/۵ بار، جنس لوله‌های فرعی آلومینیوم، ضریب افت اصطکاکی هیزن-ویلیامز لوله فرعی ۱۲۰، ارتفاع پایه آپیاش یک متر، فاصله بین اولین آپیاش تا ابتدای لوله فرعی ۱۲ متر و تعداد آپیاش‌های هر یک از لوله‌های فرعی ۲۰ عدد قرار داده شد. برای لوله‌های فرعی با آپیاش متحرک از آپیاش VYR-155 با نازل  $3/2 \times 3/6$  میلی‌متر با فواصل ۲۵ متر بر روی لوله فرعی استفاده شد. فشار متوسط کارکرد آپیاش ۵ بار، جنس لوله‌های فرعی پلی‌اتیلن، ضریب افت اصطکاکی هیزن-ویلیامز لوله‌های فرعی ۱۳۵، ارتفاع پایه آپیاش ۱/۷ متر، فاصله بین اولین آپیاش تا ابتدای لوله فرعی ۱۲/۵ متر و تعداد نقاط آبگیری (تعداد نقاط اتصال پایه آپیاش) از هر لوله فرعی ۱۰ نقطه انتخاب شد.

جدول ۱. مقایسه قطرهای داخلی پیشنهادی مدل برای لوله‌های فرعی با نتایج طراحی کلاسیک

لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت						شیب طولی لوله فرعی (%)
-۴/۵	-۱	+۱	-۴/۵	-۱	+۱	
۵۵	۵۲	۵۷	۶۹	۷۱	۸۰	حداقل قطر داخلی پیشنهادی مدل (میلی‌متر)
۵۵	۵۳	۵۹	۷۱	۷۲	۸۴	حداقل قطر داخلی پیشنهادی طراحی کلاسیک (میلی‌متر)
۰	۲	۲	-۱	-۲	-۳	اختلاف نتایج در قطر داخلی پیشنهادی (میلی‌متر)
۰	۳	۴	۲	۲	۴	قدرمطلق درصد اختلاف نتایج قطر داخلی پیشنهادی (%)
-	-	-	-	-	-	اختلاف نتایج در تعیین قطر اسمی لوله فرعی

آپاش‌ها شبیه‌سازی شد (شکل‌های ۳ و ۴). نتایج شبیه‌سازی با نتایج طراحی کلاسیک مورد مقایسه قرار گرفت و در هر مورد قدرمطلق درصد اختلاف نتایج کم و در حد قابل قبول به دست آمد که دلالت بر آن دارد که روش‌های اتخاذ شده برای محاسبات مدل صحیح می‌باشد (جدول ۲).

برای تشریح علت وجود اختلاف جزئی در مقادیر قدرمطلق درصد اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل با محاسبات کلاسیک باید به این نکته توجه شود که در روش‌های اتخاذ شده در شبیه‌سازی با استفاده از مدل نسبت به فرمول‌های طراحی کلاسیک، تفاوت‌هایی وجود دارد. همان‌گونه که در قسمت مواد و روش‌های نشان داده شد برای شبیه‌سازی هیدرولیکی با استفاده از مدل، ابتدا لوله فرعی به مجموعه‌ای متشکل از گره‌ها و رابط‌ها تجزیه می‌شود و با استفاده از یک روال تکراری با تحلیل هیدرولیکی جزء به جزء لوله فرعی، مقادیر فشار و دبی هر یک از آپاش‌ها و مقدار فشار و دبی مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی شبیه‌سازی می‌شود. حال آن که در طراحی کلاسیک با استفاده از فرمول‌های ساده‌ای که لوله فرعی را به صورت یک جزء واحد در نظر می‌گیرند محاسبات صورت می‌پذیرد. در طراحی کلاسیک برای محاسبه افت اصطکاکی لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت از ضریب کاهنده کریستیانسن استفاده می‌شود. افت اصطکاکی محاسبه شده با اعمال این ضریب نسبت به حالتی که محاسبات افت اصطکاکی به صورت جزء به جزء در فاصله میان آپاش‌ها صورت گیرد،

انتخاب گردید. در طراحی با دو قطر مختلف انتخاب تعداد مناسب آپاش روی هر قطر با اجرای مدل به ازای تعداد مختلف آپاش بر روی هر قطر به راحتی انجام پذیرفت. قطر اسمی برای لوله‌های فرعی با آپاش‌های ثابت در شیب‌های +۱ و -۴/۵ درصد در طراحی با یک قطر ثابت به ترتیب برابر ۱۰۰، ۷۵ و ۷۵ میلی‌متر و در طراحی با دو قطر مختلف به ترتیب قطرهای ۱۰۰ و ۷۵ میلی‌متر (۵ آپاش بر روی قطر بزرگ و ۱۵ آپاش بر روی قطر کوچک)، ۷۵ و ۵۰ میلی‌متر (۱۵ آپاش بر روی قطر بزرگ و ۵ آپاش روی قطر کوچک) و ۷۵ و ۵۰ میلی‌متر (۱۳ آپاش بر روی قطر بزرگ و ۷ آپاش بر روی قطر کوچک) انتخاب شد. قطر اسمی برای لوله‌های فرعی با آپاش متخرک در شیب‌های +۱ و -۴/۵ درصد به ترتیب برابر ۷۵ و ۶۳ میلی‌متر انتخاب شد و در شیب -۱ درصد با توجه به این که در صورت استفاده از قطر ۷۵ میلی‌متر به جای ۶۳ میلی‌متر، درصد تغییرات فشار از ۱۲/۸ درصد به ۳/۳ درصد، ضریب یکنواختی کریستیانسن دبی آپاش‌ها از ۹۸/۲ به ۹۹/۵ و فشار مورد نیاز در ورودی لوله فرعی از ۵۶/۵ متر به ۵۳/۶ متر تغییر یافت قطر اسمی ۷۵ میلی‌متر انتخاب گردید.

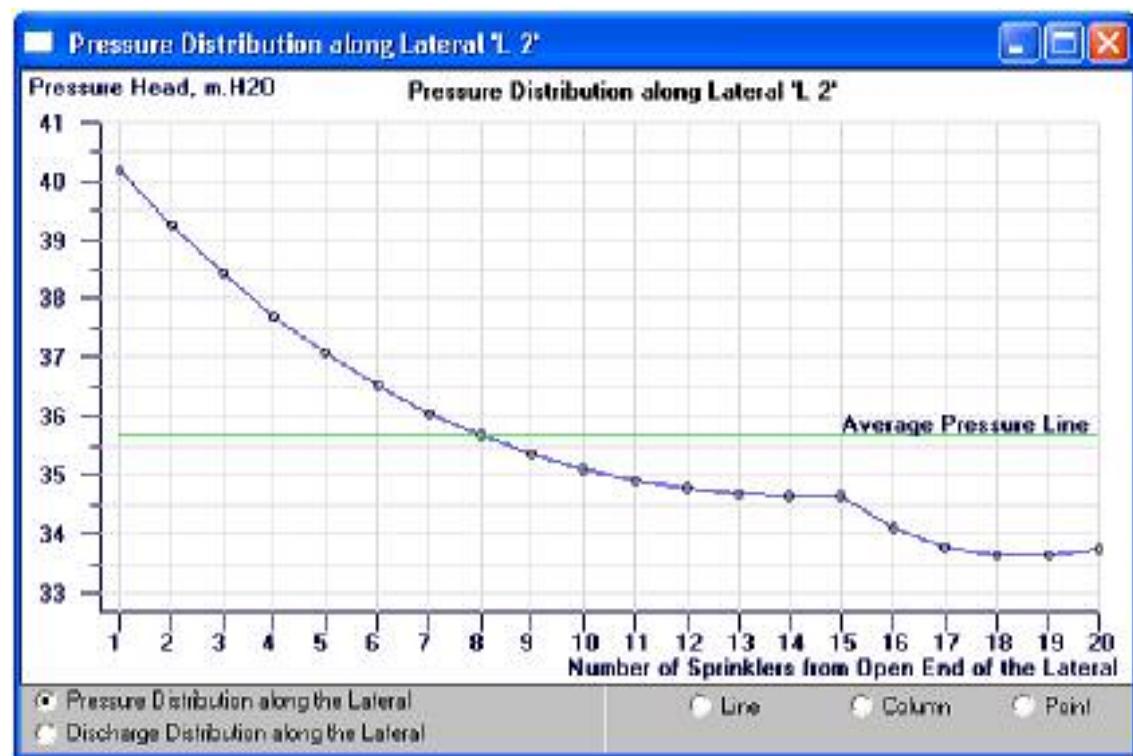
### ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

با اجرای مدل برای هر یک از لوله‌های فرعی مقادیر درصد تغییرات فشار، ضریب یکنواختی کریستیانسن، فشار و دبی مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی و مقادیر فشار و دبی هر یک از

Lateral Hydraulic Simulation Results		
Lateral name:	2	
<b>Sprinklers Operating Pressure, meters :</b> 35.7		
<b>Sprinklers Operating Discharge, Lit/min:</b> 29.79		
<b>Number of Lateral Pipe Diameters : Two Sizes</b>		
Inside Diameter of Lateral Large Pipe : 73.66		
Inside Diameter of Lateral Small Pipe : 48.26		
<b>Number of Sprinklers on Lateral Large Pipe :</b> 15		
<b>Number of Sprinklers on Lateral Small Pipe :</b> 5		
<b>Percentage of Sprinklers Pressure Variations :</b> 19.3		
<b>Christiansen Uniformity Coefficient (Cu), % :</b> 97.9		
<b>Required Lateral Inlet Pressure Head, meters :</b> 42.22		
<b>Required Lateral Inlet Discharge, Lit/Sec :</b> 9.83		
Number of Sprinklers	Sprinkler Pressure (m.H2O)	Sprinkler Discharge (Lit/min)
Sprinkler 1	40.18	31.612
Sprinkler 2	39.25	31.244
Sprinkler 3	38.42	30.914
Sprinkler 4	37.70	30.621
Sprinkler 5	37.06	30.363
Sprinkler 6	36.52	30.139
Sprinkler 7	36.05	29.947
Sprinkler 8	35.67	29.785
Sprinkler 9	35.35	29.653
Sprinkler 10	35.10	29.548
Sprinkler 11	34.91	29.468
Sprinkler 12	34.78	29.411
Sprinkler 13	34.69	29.375
Sprinkler 14	34.65	29.359
Sprinkler 15	34.65	29.359
Sprinkler 16	34.11	29.128
Sprinkler 17	33.79	28.681

[GraphicalView] [Close]

شکل ۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آپاش‌های ثابت با شیب ۱- درصد و با دو قطر مختلف



شکل ۴. نمودار مقادیر فشار آپاش‌های لوله فرعی با آپاش‌های ثابت با شیب ۱- درصد و با دو قطر مختلف

## جدول ۲. مقایسه مقادیر فشار بدست آمده در ابتدای لوله‌های فرعی با نتایج طراحی کلاسیک

لوله‌های فرعی با آپیش‌های ثابت			لوله‌های فرعی با آپیش‌های متحرک			لوله‌های فرعی با آپیش‌های ثابت			شیب لوله فرعی (%)
یک قطر ثابت			دو قطر مختلف			یک قطر ثابت			
-۴/۵	-۱	+۱	-۴/۵	-۱	+۱	-۴/۵	-۱	+۱	
۵۲/۳	۵۳/۶	۵۶/۱	۳۸/۵	۴۲/۲	۴۱/۲	۳۷/۷	۴۲/۰	۳۹/۵	$(H_1)_M$ (متر)
۵۲/۳	۵۳/۶	۵۶/۰	۳۸/۹	۴۱/۸	۴۱/۱	۳۷/۸	۴۲/۰	۳۹/۴	$(H_1)_C$ (متر)
۰/۰	۰/۰	۰/۱	-۰/۳	۰/۴	۰/۱	-۰/۲	-۰/۱	۰/۱	اختلاف نتایج (متر)
۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۸	۱/۰	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۱	قدرتمندی درصد اختلاف نتایج (%)

 $(H_1)_M$ : مقدار بدست آمده برای فشار مورد نیاز در ابتدای لوله‌های فرعی با استفاده از مدل $(H_1)_C$ : مقدار بدست آمده برای فشار مورد نیاز در ابتدای لوله‌های فرعی با استفاده از طراحی کلاسیک

کاربردی به صورت کاربر پسند ارائه گردید. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی چند نمونه لوله فرعی با نتایج طراحی کلاسیک، صحت محاسبات مدل مورد تأیید قرار گرفت. با توجه به این که روابط مورد نیاز برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آپیش متحرک در منابع علمی تاکنون ارائه نشده است، معادلات لازم برای طراحی کلاسیک این نوع لوله‌های فرعی استخراج گردید. مدل ارائه شده می‌تواند در طراحی و تحلیل‌های هیدرولیکی لوله‌های فرعی سیستم‌های آبیاری بارانی مورد استفاده قرار گیرد.

می‌تواند دارای یک اختلاف جزئی باشد (۱۰). با بررسی مقادیر بدست آمده از مدل برای دبی مورد نیاز لوله‌های فرعی، در این مورد نیز صحت محاسبات مدل مورد تأیید قرار گرفت.

**نتیجه‌گیری**

در این تحقیق یک برنامه کامپیوتری برای طراحی هر دو نوع لوله‌های فرعی با آپیش‌های ثابت و آپیش متحرک با قابلیت طراحی با یک قطر ثابت و یا دو قطر مختلف و در شیب‌های طولی یکنواخت و یا متغیر تهیه و در قالب یک نرمافزار

**منابع مورد استفاده**

- شاه‌محمدی، ر. ۱۳۸۴. مدل‌سازی طراحی سیستم آبیاری بارانی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- شاه‌محمدی، ر.، س. م. میرلطیفی و ک. محمدی. ۱۳۸۵. طراحی لوله‌های آبده سیستم‌های آبیاری بارانی در مدل SprinklerMod الف، طراحی لوله‌های آبده با آپیش‌های ثابت. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۴-۱۲. اردیبهشت ۱۳۸۵. دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲: ۱۱۳۱-۱۱۲۵.
- شاه‌محمدی، ر.، س. م. میرلطیفی، ک. محمدی، و م. قیصری. طراحی لوله‌های آبده سیستم‌های آبیاری بارانی در مدل

- SprinklerMod: ب، طراحی لوله‌های آبده با آپاش متحرک. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۴-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۵، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز: ۹۲۸-۹۲۱.
4. Abreu, V. M. and L. S. Pereira. 2002. Sprinkler irrigation systems design using ISADim. Proceedings of the ASAE Annual International Meeting. Chicago. Illinois. U.S.A. Paper No: 022254.
  5. Andrade, C. L. T. and R. G. Allen. 1999. SPRINKMOD— pressure and discharge simulation model for pressurized irrigation systems: 1. Model development and description. *Irrig. Sci.* 18: 141-148.
  6. Edwards, D. M. and B. Spencer. 1972. Design criteria for irrigation systems with complex pipe loops. *Trans. ASAE.* 15: 76-78.
  7. Hathoot, H. M., H. M. Abo-Ghobar, A. I. Al-Amound and F. S. Mohammad. 1994. Analysis and design of sprinkler irrigation laterals. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 120: 534-549.
  8. Hutchinson, G. P., P. Carran and I. McIndoe. 1993. IRRICAD— Computerized irrigation design. Proceedings of the ASCE National Conference on Irrigation and Drainage Engineering. Park City. Utah. U.S.A. 835-841.
  9. Jorge, J. and L. S. Pereira. 2003. Simulation and Evaluation of Set Sprinkler Systems with AVASPER. Proceedings of the 54th Executive Council of ICID and 20th European Regional Conference. Montpellier.
  10. Keller, J. and R. D. Bliesner. 1990. Sprinkler and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold. New York.
  11. Pleban, S. and I. Amir. 1981. Design procedure of sprinkling laterals: the mathematical background of a computerized aid. *Agric. Water Manag.* 3: 269-278.
  12. Zazueta, F. S., A. G. Smajstrla and D. Z. Haman. 1989. Computer-aided design of landscape irrigation systems. *Appl. Agric. Res.* 4: 280-284.