

شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله‌های فرعی (لترال‌های) آبیاری بارانی

رضا شاه محمدی، سید مجید میرلطیفی و کورش محمدی^۱

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 آبیاری‌ها 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 آبیاری ثابت و با آبیاری متحرک 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 شیب طولی یک‌نواخت و یا غیر یک‌نواخت را داراست. نمودار درصد تغییرات فشار آبیاری‌ها 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 آبیاری‌ها، فواصل قرارگیری آبیاری‌ها، فاصله اولین آبیاری تا ابتدای لوله فرعی، تعداد آبیاری‌ها، ارتفاع پایه آبیاری، ضریب افت اصطکاکی هیزن-ویلیامز و شیب طولی یا رقوم ارتفاعی لوله فرعی در محل هر آبیاری می‌باشد. شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که میانگین فشار و یا دبی آبیاری‌ها برابر با فشار و یا دبی متوسط کارکردی که توسط کاربر برای آبیاری تعیین شده، گردد. شبیه‌سازی لوله‌های فرعی با استفاده از روال‌های تکراری انجام پذیرفت. از روش حل عددی نیوتن-رافسون برای محاسبه فشار هر یک از آبیاری‌ها در لوله‌های فرعی با آبیاری متحرک 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 آبیاری متحرک 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 آبیاری‌های ثابت با شیب‌های مختلف با یک قطر ثابت و دو قطر مختلف به ترتیب ۰/۳ و ۰/۷ درصد و در مورد لوله‌های فرعی با آبیاری متحرک برابر با ۰/۱ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی هیدرولیکی، لوله فرعی، آبیاری بارانی، آبیاری متحرک، 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 دارای اهمیت 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

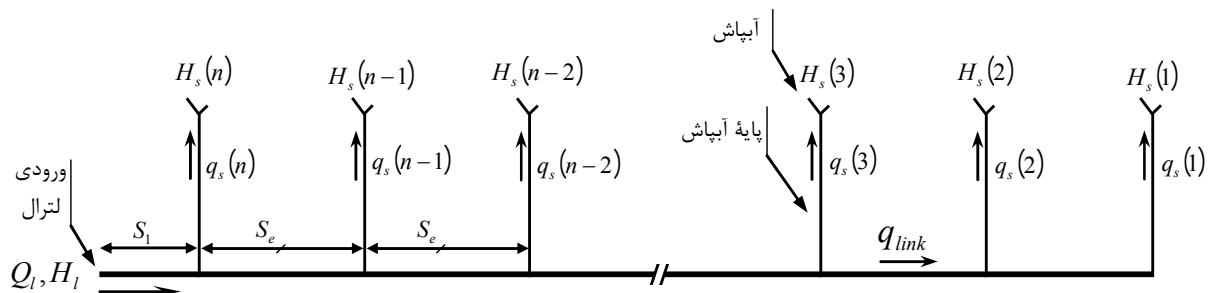
است (۲). در حالت کلی می‌توان سیستم‌های آبیاری بارانی را به دو نوع سیستم‌های ساکن و متحرک دائمی تقسیم کرد. در سیستم‌های ساکن از دو نوع لوله فرعی شامل لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت و آبپاش متحرک استفاده می‌شود (۱). در لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت، آبپاش‌ها در فواصل مساوی و به طور هم‌زمان آبیاری می‌کنند. در لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک فقط از یک آبپاش بزرگ برای آبیاری با یک یا چند لوله فرعی استفاده می‌شود به طوری که با جابه‌جایی تناوبی آن در طول لوله فرعی آبیاری در سراسر آن صورت می‌گیرد، بدین ترتیب در یک زمان واحد فقط یک آبپاش بر روی لوله فرعی قرار می‌گیرد. در هر دو نوع لوله‌های فرعی محاسبه توزیع فشار و دبی آبپاش‌ها 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 حجیم را نیز میسر می‌سازند.

چندین مدل (۴، ۵، ۶، ۸، ۹ 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 پلبن 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 آبپاش روی لوله فرعی است. این مدل محدود به حداکثر تعداد ۳۰ آبپاش در طول لوله فرعی است و قادر به طراحی لوله‌های فرعی با دو قطر مختلف و طراحی لوله فرعی با آبپاش متحرک نمی‌باشد. هتوت و همکاران (۷) مدلی برای طراحی لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت با شیب طولی یک‌نواخت و با یک قطر ثابت ارائه نمودند. در مدل مذکور از معادله داریسی-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

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

لوله‌های فرعی با آبپاش‌های 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 آبپاش‌های ثابت و آبپاش 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 آبپاش‌های ثابت و با آبپاش 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



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

شبیه‌سازی لوله فرعی

برای شبیه‌سازی لوله فرعی ابتدا نوع لوله فرعی، دبی متوسط کارکرد آبپاش‌ها (q_a)، فشار متوسط کارکرد آبپاش‌ها (H_a)، فواصل قرارگیری آبپاش‌ها روی لوله فرعی (S_e)، فاصله ابتدای لوله فرعی تا محل اولین آبپاش (S_l)، تعداد نقاط آبیگری آبپاش‌ها (n)، ارتفاع پایه آبپاش (h_f)، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز لوله فرعی (C) (افت‌های موضعی ناشی از اتصالات و انشعاب پایه‌های آبپاش‌ها نیز در این ضریب ملحوظ می‌شوند)، شیب طولی لوله فرعی (S_o) (و یا در صورت وجود توپوگرافی غیریک‌نواخت رقوم ارتفاعی لوله فرعی در محل هر آبپاش ($EL(i)$) باید به‌عنوان 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 ($d_{i, \text{Small}}$ و $d_{i, \text{Large}}$) و تعداد آبپاش روی هر یک (n_{Small} و n_{Large}) باید توسط طراح وارد شود. ضریب تخلیه معادله فشار- دبی آبپاش (k_d) با استفاده از مقادیر q_a و H_a توسط مدل محاسبه می‌شود. عموماً ضریب k_d را در محدوده کار اغلب آبپاش‌ها می‌توان ثابت فرض کرد (۱۰). در این تحقیق نیز مقدار k_d ثابت فرض گردید.

الف) شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آبپاش‌های ثابت

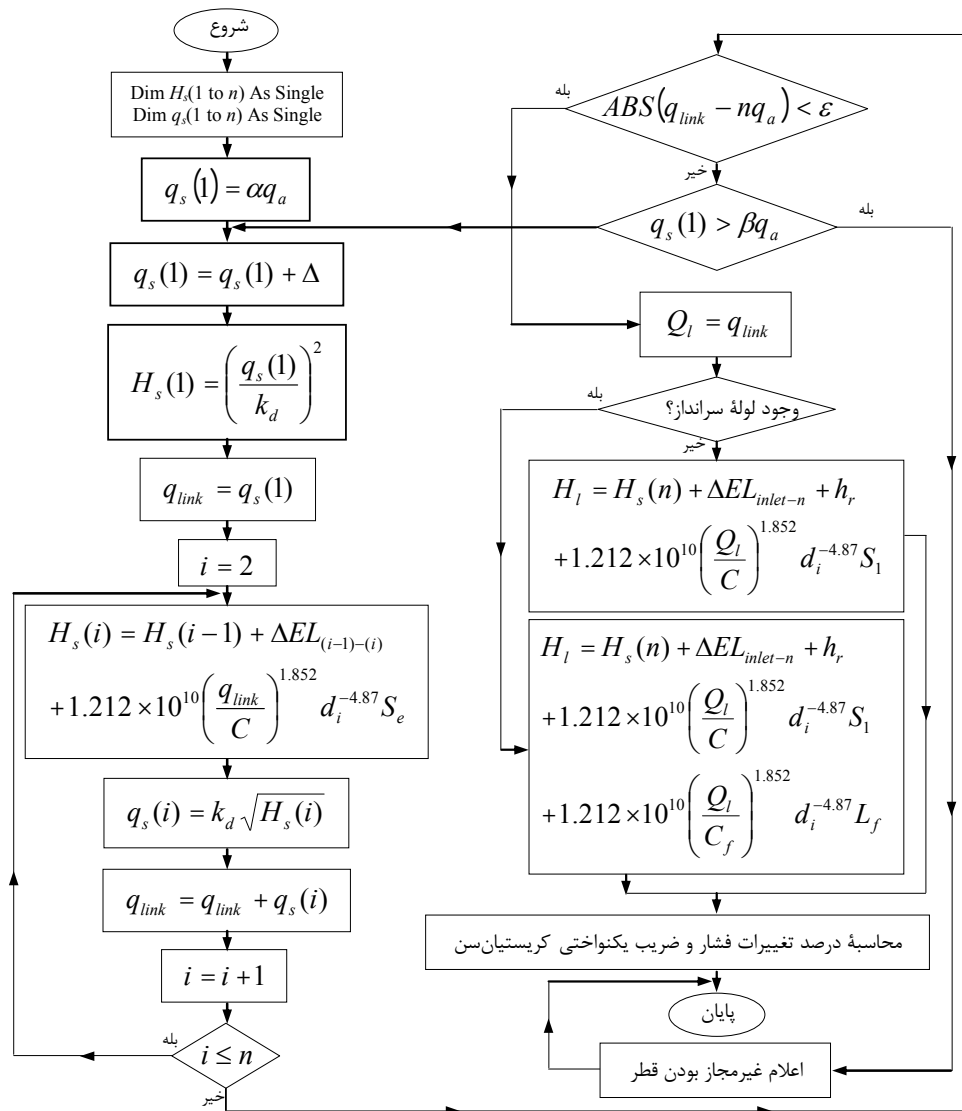
لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت مطابق فلوجارت ۱ شبیه‌سازی

عامل ویندوز نوشته شد. هم‌چنین معادلات لازم برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آبپاش 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 رابط‌ها تبدیل شد. گره‌ها نقاط اتصال پایه‌های آبپاش‌ها 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 آبپاش‌ها را به هم وصل می‌نمایند یکسان و برابر با فواصل آبپاش‌ها بر روی لوله فرعی (S_e) می‌باشد. در صورتی که لوله فرعی از نوع لوله فرعی با آبپاش‌های ثابت باشد در یک زمان واحد تمامی پایه‌های آبپاش‌ها در گره‌های مربوطه قرار گرفته و آبیگری می‌نمایند. چنانکه لوله فرعی از نوع لوله فرعی با آبپاش متحرک باشد در یک زمان واحد فقط یک پایه آبپاش از یکی از گره‌ها آبیگری می‌کند که با توجه به هیدرولیک متفاوت آن با لوله‌های فرعی با آبپاش‌های 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.

۳. 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 Δ به $q_s(i)$ افزوده می‌شود ($\Delta = 0.00001$). $H_s(i)$ متناظر با $q_s(i)$ با استفاده از معادله فشار-دبی آپاش محاسبه می‌شود. دبی رابط منتهی به آپاش شماره ۱ برابر $q_s(i)$ می‌باشد که مقدار آن در متغیر q_{link} قرار داده می‌شود (از متغیر q_{link} برای محاسبه افت اصطکاکی در طول رابط استفاده می‌شود).

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

۱. 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، $q_s(i)$ و $H_s(i)$ مقادیر دبی و فشار در آپاش i ام از انتهای بسته لوله فرعی می‌باشند.
۲. یک مقدار پیش‌فرض برای $q_s(i)$ 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 ε باشد، مقادیر فشار و دبی مورد نیاز در ورودی لوله فرعی و مقادیر درصد تغییرات فشار و ضریب یک‌نواختی کریستیان‌سن دبی آبیاری محاسبه می‌شوند. دبی لوله فرعی برابر با دبی رابط بالادست آبیاری n قرار داده می‌شود و مقدار فشار مورد نیاز در نقطه ورودی لوله فرعی با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

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

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

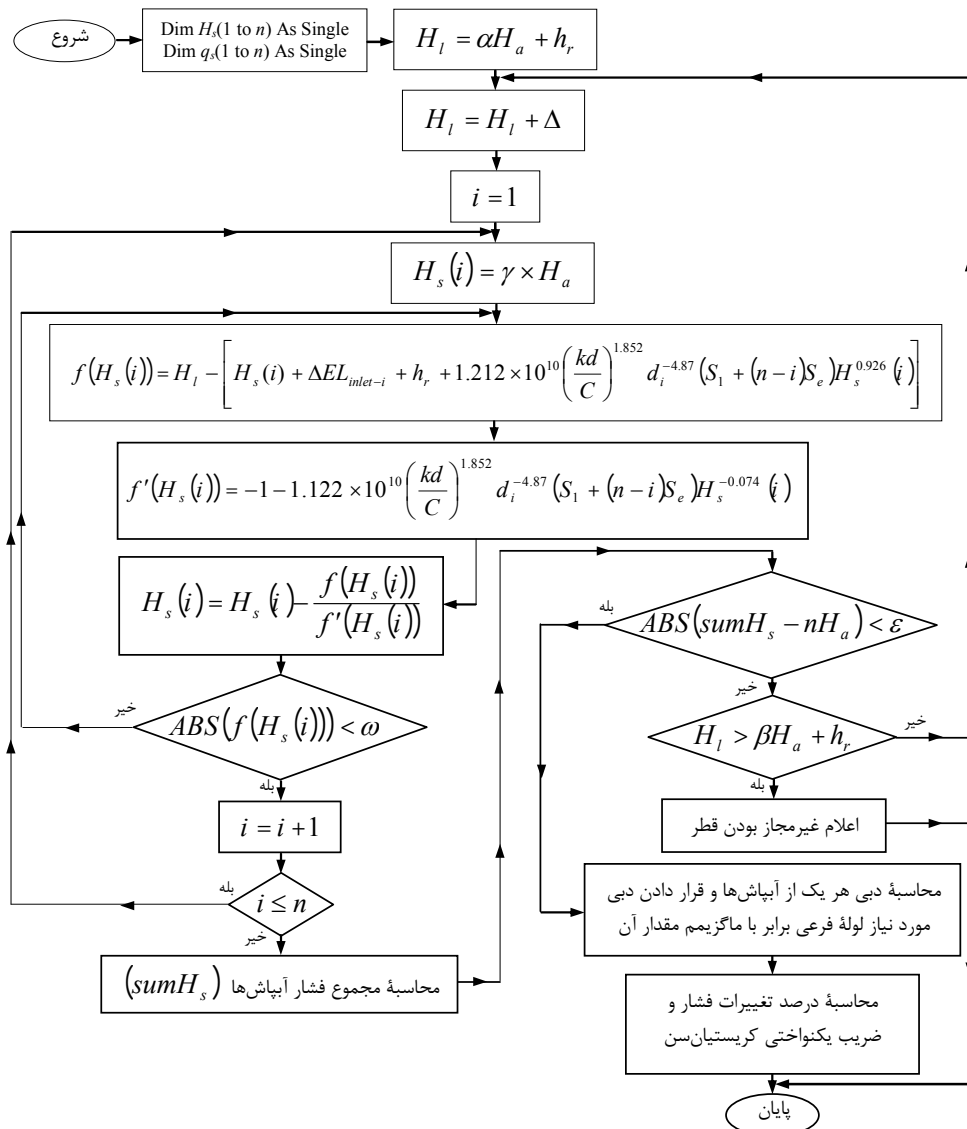
ب) شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آبیاری متحرک

شبیه‌سازی لوله‌های فرعی با آبیاری متحرک مطابق فلوچارت ۲ صورت گرفت. با توجه به این‌که در این نوع لوله‌های فرعی در یک زمان واحد تنها یک آبیاری بر روی لوله فرعی قرار می‌گیرد الگوریتم خاصی برای شبیه‌سازی تهیه گردید. محاسبات از ابتدای لوله فرعی (برعکس لوله‌های فرعی با آبیاری‌های ثابت) با توجه به شکل ۱ انجام شد. برای کاستن از حجم بسیار زیاد محاسبات مورد نیاز از روش نیوتن-رافسون برای محاسبه فشار در محل هر آبیاری 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 آبیاری‌ها (مطابق شکل ۱، $q_s(i)$ و $H_s(i)$ مقادیر دبی و فشار در آبیاری i از انتهای بسته لوله فرعی است).

۴. در این مرحله دبی و فشار سایر آبیاری‌ها 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 آبیاری‌ها با استفاده از فشار آبیاری پایین‌دست و مقدار افت اصطکاکی و تغییرات رقوم ارتفاعی بین آنها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. با محاسبه فشار در هر آبیاری دبی آن با استفاده از معادله آبیاری محاسبه می‌شود. با جمع مقادیر دبی آبیاری و دبی رابط پایین‌دست آن، دبی رابط بالادست آبیاری 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 آبیاری قرار گرفته بر روی قطر بزرگ‌تر) از دو روال تکراری برای محاسبه فشار و دبی آبیاری‌ها بر روی هر یک از لوله‌ها استفاده شد.

۵. بعد از محاسبه فشار و دبی هر یک از آبیاری‌ها و دبی رابط‌های بالادست هر یک، در صورتی که قدرمطلق تفاضل دبی لوله فرعی (دبی لوله فرعی برابر با دبی رابط بالادست آبیاری n است) و مقدار $n \times q_a$ کوچک‌تر از ε ($\varepsilon = 0/001$) باشد، نشان دهنده آن است که میانگین دبی آبیاری‌ها برابر q_a است، در چنین حالتی به لحاظ این‌که مشخصات کنونی لوله فرعی به صورتی است که دبی و فشار میانگین آبیاری‌ها با مقدار مورد نظر طراح برابر شده است، شبیه‌سازی پایان می‌پذیرد. در غیر این صورت مقدار $q_s(i)$ با مقدار $\beta \times q_a$ مقایسه می‌شود (توصیه می‌شود $\beta = 1/2$ اعمال شود). اگر $q_s(i) > \beta q_a$ باشد نشان دهنده آن است که شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با این قطر مقدور 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 Δ به $q_s(i)$ از



فلوچارت ۲. الگوریتم شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله فرعی با آبپاش متحرک

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

$$H_1 + EL_{inlet} = H_s(i) + EL(i) + h_r + 1/2 \times 10^{10} \left(\frac{q_s(i)}{C} \right)^{1.852} d_i^{-4.87} (S_1 + (n-i)S_e) \quad [2]$$

که در آن $q_s(i)$ دبی آبپاش i ام است. مجهول‌های معادله فوق

۲. تعیین یک فرض اولیه برای فشار مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی (توصیه می‌شود در فرض اولیه $H_1 = \alpha H_a + h_r$ اعمال شود).

۳. افزودن مقدار کوچک Δ به H_1 برای انجام شبیه‌سازی در تکرارهای متوالی.

۴. محاسبه فشار هر یک از آبپاش‌ها با استفاده از روش حل عددی نیوتن-رافسون. با توجه به این‌که دبی آبپاش در حال کار و در نتیجه افت اصطکاکی در طول لوله فرعی متناسب با فشار آبپاش در حال کار است، بنابراین محاسبه

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

۶. در صورت پایان پذیرفتن موفق شبیه‌سازی (قدرمطلق مقدار $\text{Sum}H_s - nH_a$ از مقدار ε کوچک‌تر باشد)، آخرین مقدار متغیر H_1 به عنوان فشار مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی قرار داده می‌شود. هم‌چنین دبی هر یک از آبپاش‌ها با استفاده از معادله فشار-دبی آبپاش محاسبه و مقدار حداکثر آن برابر دبی مورد نیاز لوله فرعی در نظر گرفته می‌شود.
۷. در انتها درصد تغییرات فشار و ضریب یک‌نواختی کریستیان‌سن حاصل از مقادیر دبی‌های آبپاش‌ها به‌عنوان فاکتورهای نشان‌دهنده نحوه توزیع فشار و دبی آبپاش‌ها 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 قطرها (در قطرهای خیلی کوچک به دلیل وجود افت اصطکاکی خیلی زیاد) مقدور نباشد که مدل راه‌کار مناسب برای این موارد را داراست.

طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی

روابط مورد نیاز برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آبپاش‌های 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 کِلر و بلیسنر (۱۰) استفاده شد. با توجه به این‌که در هیچ منبع علمی روابط مورد نیاز برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک ارائه نشده است، روابط مورد نیاز استخراج گردید. در

$q_s(i)$ و $H_s(i)$ می‌باشند. با جایگزینی $k_d \sqrt{H_s(i)}$ به جای $q_s(i)$ ، معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$f(H_s(i)) = H_1 - \left[H_s(i) + \Delta E_{\text{inlet-}i} + h_f + \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} \left(\frac{k_d}{C} \right)^{1.852} d_i^{-4.75} (S_1 + (n-i)S_e) H_s^{-0.75}(i) \right] = 0 \quad [3]$$

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

$$f'(H_s(i)) = -1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} \left(\frac{k_d}{C} \right)^{1.852} d_i^{-4.75} (S_1 + (n-i)S_e) H_s^{-1.75}(i) \quad [4]$$

برای محاسبه فشار هر یک از آبپاش‌ها در ابتدا یک مقدار اولیه برای $H_s(i)$ فرض می‌شود (توصیه می‌شود $0.7H_a$ اعمال شود). بدین ترتیب در هر تکرار مقدار $H_s(i)$ با استفاده از مقدار به‌دست 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 آبپاش در صورتی که قدرمطلق مقدار تابع $f(H_s(i))$ از عدد کوچک فرضی ω کوچک‌تر به‌دست آید، مقدار متغیر $H_s(i)$ به‌عنوان فشار در آن آبپاش پذیرفته می‌شود. بدین ترتیب مقدار فشار برای هر یک از آبپاش‌ها محاسبه می‌شود. در طراحی با دو قطر مختلف از دو روال تکراری برای محاسبه فشار هر یک از آبپاش‌ها 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 آبپاش‌ها به ازای H_1 مربوطه مجموع فشار آبپاش‌ها محاسبه و در متغیر $\text{Sum}H_s$ قرار داده می‌شود. در صورتی که قدرمطلق مقدار $\text{Sum}H_s - nH_a$ از مقدار ε کوچک‌تر باشد، شبیه‌سازی پایان پذیرفته است، در غیر این صورت مقدار H_1 با مقدار $\beta H_a + h_f$ مقایسه می‌شود (توصیه می‌شود $\beta = 1/3$ اعمال شود). اگر $H_1 < \beta H_a + h_f$ باشد محاسبات از گام ۳ با افزودن مقدار کوچک Δ به H_1 از سر گرفته می‌شود،

اصطکاک از ابتدای لوله فرعی تا نقطه x را با رابطه زیر می توان 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 : فاصله هر نقطه بر روی لوله فرعی از ابتدای لوله فرعی (m)، h_{f_x} : افت اصطکاک از ابتدای لوله فرعی تا نقطه x (m)، h_f : افت اصطکاک کل طول لوله فرعی (با استقرار آبش در انتهای لوله فرعی) (m) و J : گرادیان افت بار در طول لوله فرعی ($m/100m$) است. معادله ۸ معادله بدون بعد افت اصطکاک در طول لوله فرعی است. نسبت h_{f_x}/h_f در نقطه ای که متوسط افت اصطکاک رخ می دهد با انتگرال گیری از معادله ۸ به دست می آید:

$$\left(\frac{h_{f_x}}{h_f}\right)_a = \frac{1}{1-\frac{x}{L}} \int_{\frac{x}{L}=0}^{\frac{x}{L}=1} \frac{h_{f_x}}{h_f} d\left(\frac{x}{L}\right) = \int_{\frac{x}{L}=0}^{\frac{x}{L}=1} \frac{x}{L} d\left(\frac{x}{L}\right) \quad [9]$$

$$= \left[\frac{1}{1+\frac{x}{L}}\right]_{\frac{x}{L}=0}^{\frac{x}{L}=1} = \frac{1}{2} \Rightarrow \left(\frac{h_{f_x}}{h_f}\right)_a = \frac{1}{2}$$

که در آن $\left(h_{f_x}/h_f\right)_a$: نسبت h_{f_x}/h_f در نقطه ای است که متوسط افت اصطکاک رخ می دهد. همان طور که ملاحظه می شود تا محل افت اصطکاک متوسط، نصف h_f مستهلک می گردد (می توان اثبات کرد که متوسط افت اصطکاک در نقطه میانی لوله فرعی رخ می دهد). بدین ترتیب معادله زیر برای محاسبه فشار مورد نیاز در ابتدای لوله های فرعی با آبش متحرک قابل استخراج است:

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

که در آن ΔH_e : اختلاف رقوم ارتفاعی ابتدا و انتهای لوله فرعی (در صورتی که لوله فرعی بر روی سربالایی باشد ΔH_e مثبت به کار برده می شود و بالعکس) (m) است.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی مدل، چندین لوله فرعی با آبش های ثابت و متحرک با شیب های طولی $+1$ درصد (شیب مثبت)، -1 درصد (شیب منفی ملایم) و $-4/5$ درصد (شیب منفی تند) با استفاده از طراحی کلاسیک و مدل

روابط مربوط به محاسبه گرادیان افت اصطکاک لوله های فرعی با آبش متحرک با توجه به این که در یک زمان واحد فقط یک آبش بر روی لوله فرعی قرار می گیرد نیازی به استفاده از ضریب کریستیان سن (F) وجود ندارد. گرادیان افت بار مجاز در اثر اصطکاک برای لوله های فرعی با آبش های متحرک را می توان 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 (نحوه محاسبه این پارامتر از سوی کلر و بلیسنر (۱۰) برای شیب های مختلف لوله فرعی بیان شده است) (m) و L : فاصله بین ابتدا و انتهای لوله فرعی (m) است. برای لوله های فرعی با آبش متحرک با فرض این که دبی هر آبش در حال کار برابر q_a می باشد (این فرض با توجه به این که معمولاً تغییرات دبی آبش ها در لوله های فرعی از ۱۰ درصد دبی متوسط کارکرد آبش ها تجاوز نمی کند فرض قابل قبولی است) رابطه زیر برای محاسبه قطر داخلی پیشنهادی لوله فرعی ارائه گردید:

$$d_{i_a} = \left[k (q_a / C)^{0.852} J_a^{-1} \right]^{(-4/87)} \quad [7]$$

که در آن d_{i_a} : قطر داخلی پیشنهادی لوله فرعی (mm) و k : ضریب تبدیل واحد ($1/212 \times 10^{12}$) است. برای استخراج معادله مورد نیاز به منظور محاسبه فشار مورد نیاز در ابتدای لوله فرعی با آبش متحرک در ابتدا باید مقدار افت اصطکاک از ابتدای لوله فرعی تا نقطه ای که افت اصطکاک متوسط در طول لوله فرعی رخ می دهد محاسبه گردد. این کار با استخراج معادله بدون بعد افت اصطکاک در طول لوله فرعی و انتگرال گیری از آن مقدور می باشد. استخراج این معادله نیز با فرض برابر بودن دبی خروجی از آبش ها صورت پذیرفت (مانند فرض صورت گرفته در استخراج معادله بدون بعد افت اصطکاک لوله های فرعی با آبش های ثابت (۱۰)). بر این اساس با توجه به یکسان بودن دبی لوله فرعی به ازای قرارگیری هر یک از آبش ها، گرادیان افت اصطکاک در طول لوله فرعی همواره یکسان می باشد. اگر x فاصله از ابتدای لوله فرعی باشد، افت



شکل ۲. نمودار درصد تغییرات فشار به ازای قطرهای داخلی مختلف لوله فرعی با آبپاش‌های 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 تند 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 به‌دست آمده با استفاده از مدل و طراحی کلاسیک قدرمطلق درصد اختلاف نتایج ناچیز و قطرهای انتخابی برای لوله‌های فرعی با استفاده از مدل و طراحی کلاسیک یکسان به‌دست 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 آبپاش‌های ثابت شبیه‌سازی با یک قطر ثابت و نیز با دو قطر مختلف انجام پذیرفت. برای لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت از آبپاش VYR-60 با نازل $2/38 \times 4/36$ میلی‌متر با فواصل ۱۲ متر بر روی لوله فرعی استفاده شد. فشار متوسط کارکرد آبپاش‌ها $3/5$ بار، جنس لوله‌های فرعی آلومینیوم، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز لوله فرعی ۱۲۰، ارتفاع پایه آبپاش یک متر، فاصله بین اولین آبپاش تا ابتدای لوله فرعی ۱۲ متر و تعداد آبپاش‌های هر یک از لوله‌های فرعی ۲۰ عدد قرار داده شد. برای لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک از آبپاش VYR-155 با نازل $10 \times 6/3 \times 3/2$ میلی‌متر با فواصل ۲۵ متر بر روی لوله فرعی استفاده شد. فشار متوسط کارکرد آبپاش‌ها ۵ بار، جنس لوله‌های فرعی پلی‌اتیلن، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز لوله‌های فرعی ۱۳۵، ارتفاع پایه آبپاش $1/7$ متر، فاصله بین اولین آبپاش تا ابتدای لوله فرعی $12/5$ متر و تعداد نقاط آبدگیری (تعداد نقاط اتصال پایه آبپاش) 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 آبپاش متحرک			لوله‌های فرعی با آبپاش‌های 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

آبپاش‌ها 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 روش‌ها نشان داده شد برای شبیه‌سازی هیدرولیکی با استفاده از مدل، ابتدا لوله فرعی به مجموعه‌ای متشکل از گره‌ها و روابط تجزیه می‌شود و با استفاده از یک روال تکراری با تحلیل هیدرولیکی جزء به جزء لوله فرعی، مقادیر فشار و دبی هر یک از آبپاش‌ها 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 آبپاش‌های 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 آبپاش‌ها صورت گیرد،

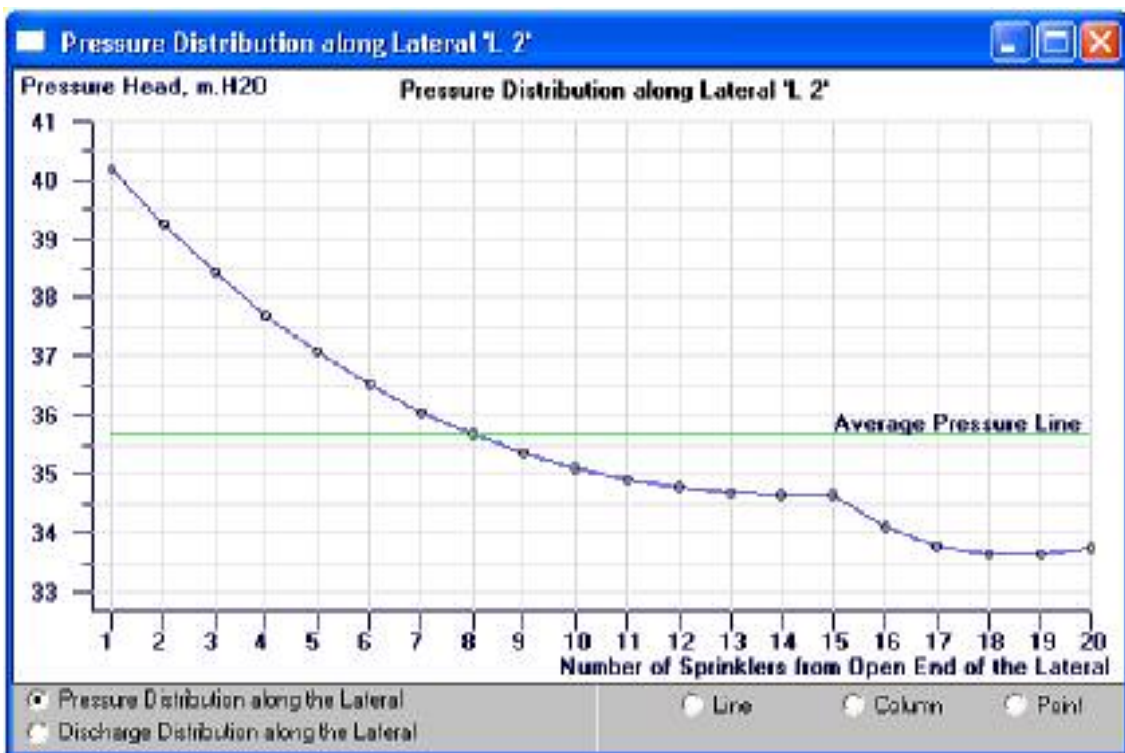
انتخاب گردید. در طراحی با دو قطر مختلف انتخاب تعداد مناسب آبپاش روی هر قطر با اجرای مدل به ازای تعداد مختلف آبپاش بر روی هر قطر به راحتی انجام پذیرفت. قطر اسمی برای لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت در شیب‌های +۱، -۱ و -۴/۵ درصد در طراحی با یک قطر ثابت به ترتیب برابر ۱۰۰، ۷۵ و ۷۵ میلی‌متر و در طراحی با دو قطر مختلف به ترتیب قطرهای ۱۰۰ و ۷۵ میلی‌متر (۵ آبپاش بر روی قطر بزرگ و ۱۵ آبپاش بر روی قطر کوچک)، ۷۵ و ۵۰ میلی‌متر (۱۵ آبپاش بر روی قطر بزرگ و ۵ آبپاش روی قطر کوچک) و ۷۵ و ۵۰ میلی‌متر (۱۳ آبپاش بر روی قطر بزرگ و ۷ آبپاش بر روی قطر کوچک) انتخاب شد. قطر اسمی برای لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک 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 آبپاش‌ها 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: L 2			
	Number of Sprinklers	Sprinkler Pressure (m.H2O)	Sprinkler Discharge (Lit/min)
Sprinklers Operating Pressure, meters : 35.7	Sprinkler 1	40.18	31.612
Sprinklers Operating Discharge, Lit/min : 29.79	Sprinkler 2	39.25	31.244
Number of Lateral Pipe Diameters : Two Sizes	Sprinkler 3	38.42	30.914
Inside Diameter of Lateral Large Pipe : 73.66	Sprinkler 4	37.70	30.621
Inside Diameter of Lateral Small Pipe : 48.26	Sprinkler 5	37.06	30.363
Number of Sprinklers on Lateral Large Pipe : 15	Sprinkler 6	36.52	30.139
Number of Sprinklers on Lateral Small Pipe : 5	Sprinkler 7	36.05	29.947
Percentage of Sprinklers Pressure Variations : 18.3	Sprinkler 8	35.67	29.785
Christiansen Uniformity Coefficient (Cu), % : 97.9	Sprinkler 9	35.35	29.653
Required Lateral Inlet Pressure Head, meters : 42.22	Sprinkler 10	35.10	29.548
Required Lateral Inlet Discharge, Lit/Sec : 9.93	Sprinkler 11	34.91	29.468
	Sprinkler 12	34.78	29.411
	Sprinkler 13	34.69	29.375
	Sprinkler 14	34.65	29.358
	Sprinkler 15	34.65	29.358
	Sprinkler 16	34.11	29.128
	Sprinkler 17	33.79	28.561

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



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

جدول ۲. مقایسه مقادیر فشار به دست آمده در ابتدای لوله‌های فرعی با نتایج طراحی کلاسیک

لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک			لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت						
یک قطر ثابت			دو قطر مختلف			یک قطر ثابت			
-۴/۵	-۱	+۱	-۴/۵	-۱	+۱	-۴/۵	-۱	+۱	شیب لوله فرعی (%)
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	قدرمطلق 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 این‌که روابط مورد نیاز برای طراحی کلاسیک لوله‌های فرعی با آبپاش 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 به دست 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 آبپاش‌های ثابت و آبپاش 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

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

SprinklerMod: ب، طراحی لوله‌های آبدۀ با آبپاش متحرک. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۴-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۵، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز ۲: 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.