شبیه‌سازی هیدرولیکی لوله‌های فرعی (لترال‌های) آبیاری بارانی

رضا شاه محمدی، سید مجید میرلطیفی و کورش محمدی[۱]

چکیده

یک برنامهٔ کامپیوتری (مدل) به نام SprinklerMod برای طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری بارانی تهیه گردید. در این مقاله به نحوهٔ شبیه‌سازی توزیع فشار و دبی آبپاش‌ها 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 آبپاش‌های ثابت و با آبپاش متحرک می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت جدول و یا نمودار روی صفحهٔ مانیتور قابل رؤیت است. این برنامهٔ 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 آبپاش‌ها به ازاء قطرهای داخلی مختلف لولهٔ فرعی توسط مدل قابل ترسیم است. از فرمول هیزن- ویلیامز برای انجام محاسبات مربوط به افت اصطکاکی استفاده شد. پارامترهای ورودی مدل شامل نوع لولهٔ فرعی، فشار و دبی متوسط کارکرد آبپاش‌ها، فواصل قرارگیری آبپاش‌ها، فاصلهٔ اولین آبپاش تا ابتدای لولهٔ فرعی، تعداد آبپاش‌ها، ارتفاع پایهٔ آبپاش، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز و شیب طولی یا رقوم ارتفاعی لولهٔ فرعی در محل هر آبپاش می‌باشد. شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ فرعی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که میانگین فشار و یا دبی آبپاش‌ها برابر با فشار و یا دبی متوسط کارکردی که توسط کاربر برای آبپاش‌ها تعیین شده، گردد. شبیه‌سازی لوله‌های فرعی با استفاده از روال‌های تکراری انجام پذیرفت. از روش حل عددی نیوتن- رافسون برای محاسبهٔ فشار هر یک از آبپاش‌ها در لوله‌های فرعی با آبپاش 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 آبپاش متحرک در منابع علمی ارائه نشده است، روابط مورد نیاز استخراج گردید. میانگین قدرمطلق درصد اختلاف نتایج محاسبهٔ فشار مورد نیاز در ابتدای لوله‌های فرعی با آبپاش‌های 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 آبپاش متحرک برابر با ۰/۱ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی هیدرولیکی، لولهٔ فرعی، آبیاری بارانی، آبپاش متحرک، SprinklerMod

مقدمه

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

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

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 لولهٔ 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 لولهٔ فرعی استفاده می‌شود به‌طوری‌که با جابه‌جایی تناوبی آن در طول لولهٔ فرعی آبیاری در سراسر آن صورت می‌گیرد، بدین ترتیب در یک زمان واحد فقط یک آبپاش بر روی لولهٔ فرعی قرار می‌گیرد. در هر دو نوع لوله‌های فرعی محاسبهٔ 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.

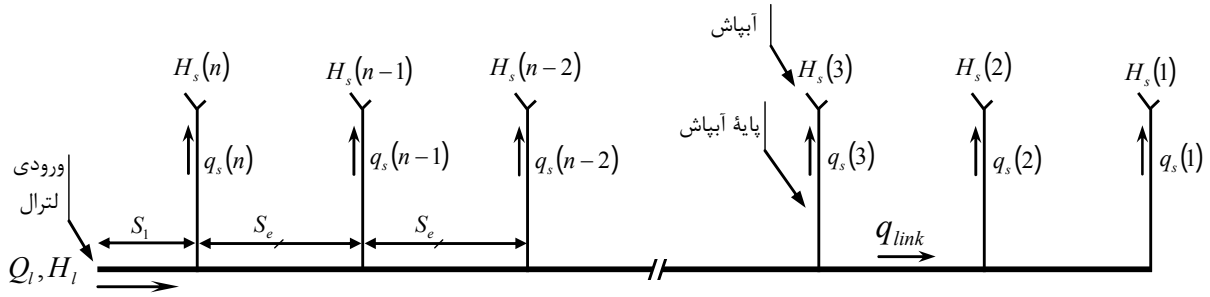
چندین مدل (۴، ۵، ۶، ۸، ۹ و ۱۲) برای طراحی و شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری بارانی ارائه شده است. مدل‌های دیگری (۷ و ۱۱) فقط به منظور طراحی و شبیه‌سازی لوله‌های فرعی سیستم‌های آبیاری بارانی ارائه شده است. مدل پِلبان و امیر (۱۱) قادر به تعیین توزیع فشار و دبی در طول لولهٔ فرعی با استفاده از روش تکراری نیوتن- رافسون، محاسبهٔ فشار در گره ورودی، تعیین قطر لولهٔ فرعی و معرفی ماکزیمم تعداد مجاز آبپاش روی لولهٔ فرعی است. این مدل محدود به حداکثر تعداد ۳۰ آبپاش در طول لولهٔ فرعی است و قادر به طراحی لوله‌های فرعی با دو قطر مختلف و طراحی لولهٔ 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 معادلهٔ دارسی- ویسباخ با ضرایب افت اصطکاکی متغیر برای محاسبهٔ 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 لولهٔ فرعی نیستند. SprinklerMod با ارائهٔ 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 لولهٔ فرعی داشته باشد و با قضاوت مهندسی خود قطر مناسب لولهٔ فرعی را انتخاب نماید. بر این اساس نیاز به تهیهٔ 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 ارائهٔ یک برنامهٔ 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 مشاهدهٔ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]



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

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 لولهٔ فرعی

برای انجام شبیه‌سازی، لولهٔ فرعی به مجموعه‌ای متشکل از گره‌ها و رابط‌ها تبدیل شد. گره‌ها نقاط اتصال پایه‌های آبپاش‌ها به لولهٔ فرعی می‌باشند. دو گره متوالی را یک رابط به هم متصل می‌کند. بدین ترتیب لولهٔ فرعی به مجموعه‌ای از n+۱ گره و n رابط تبدیل می‌شود (شکل ۱). در شکل ۱ گره‌ها از انتهای بستهٔ لولهٔ 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 لولهٔ فرعی (S_e) می‌باشد. در صورتی‌که لولهٔ فرعی از نوع لولهٔ فرعی با آبپاش‌های ثابت باشد در یک زمان واحد تمامی پایه‌های آبپاش‌ها در گره‌های مربوطه قرار گرفته و آبگیری می‌نمایند. چنانکه لولهٔ فرعی از نوع لولهٔ فرعی با آبپاش متحرک باشد در یک زمان واحد فقط یک پایهٔ آبپاش از یکی از گره‌ها آبگیری می‌کند که با توجه به هیدرولیک متفاوت آن با لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت الگوریتم‌های جداگانه‌ای برای شبیه‌سازی هر یک تهیه شد. در تهیهٔ الگوریتم‌ها تغییرات بار سرعت به دلیل ناچیز و قابل صرف نظر بودن ملحوظ نگردید.

شبیه‌سازی لولهٔ فرعی

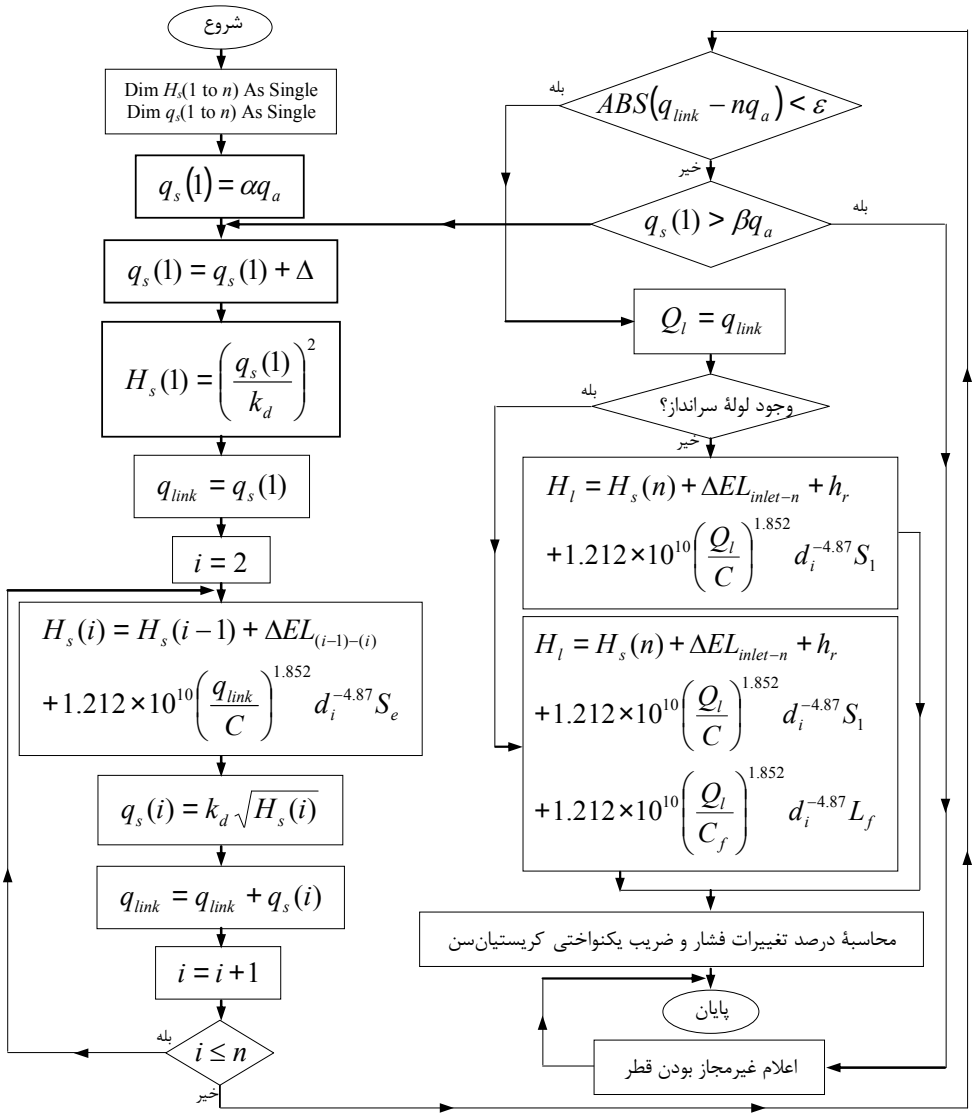
برای شبیه‌سازی لولهٔ فرعی ابتدا نوع لولهٔ فرعی، دبی متوسط کارکرد آبپاش‌ها (q_a)، فشار متوسط کارکرد آبپاش‌ها (H_a)، فواصل قرارگیری آبپاش‌ها روی لولهٔ فرعی (S_e)، فاصلهٔ ابتدای لولهٔ فرعی تا محل اولین آبپاش (S_1)، تعداد نقاط آبگیری آبپاش‌ها (n)، ارتفاع پایهٔ آبپاش (h_r)، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز لولهٔ فرعی (C) (افت‌های موضعی ناشی از اتصالات و انشعاب پایه‌های آبپاش‌ها نیز در این ضریب ملحوظ می‌شوند)، شیب طولی لولهٔ فرعی (S_o) (و یا در صورت وجود توپوگرافی غیریک‌نواخت رقوم ارتفاعی لولهٔ فرعی در محل هر آبپاش ($EL(i)$) باید به‌عنوان ورودی توسط طراح به مدل داده شوند. در صورتی‌که لولهٔ فرعی دارای لولهٔ سرانداز باشد طول (L_f) و ضریب هیزن- ویلیامز آن (C_f) نیز از کاربر دریافت می‌شود. در صورت طراحی لولهٔ فرعی با یک قطر ثابت، قطر داخلی مورد نظر (d_i) و در صورت طراحی با دو قطر مختلف اندازهٔ قطر داخلی مربوط به هر یک از لوله‌های بزرگ و کوچک ($d_{i_{Large}}$ و $d_{i_{Small}}$) و تعداد آبپاش روی هر یک (n_{Large} و n_{Small}) باید توسط طراح وارد شود. ضریب تخلیهٔ معادلهٔ فشار- دبی آبپاش (k_d) با استفاده از مقادیر q_a و H_a توسط مدل محاسبه می‌شود. عموماً ضریب k_d را در محدودهٔ کار اغلب آبپاش‌ها می‌توان ثابت فرض کرد (۱۰). در این تحقیق نیز مقدار k_d ثابت فرض گردید.

الف) شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ فرعی با آبپاش‌های ثابت

لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت مطابق فلوچارت ۱ شبیه‌سازی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]



فلوچارت ۱. الگوریتم شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ فرعی با آبپاش‌های ثابت

شدند. در این فلوچارت محاسبات از انتهای لولـهٔ فرعـی انجـام می‌پذیرد. محاسبات فلوچارت با توجه به شـکل ۱ بـه صـورت زیر است:

۱. در ابتدا دو آرایه به‌نام‌های q_s و H_s برای ذخیـرهٔ مقـادیر دبی و فشار آبپاش‌ها تعریف می‌شود. در آرایه‌های مـذکور مطابق شـکل ۱، $q_s(i)$ و $H_s(i)$ مقـادیر دبـی و فـشار در آبپاش iاُم از انتهای بستهٔ لولهٔ فرعی می‌باشند.

۲. یک مقدار پیش‌فرض بـرای $q_s(1)$ بـه صـورت مـضربی از q_a قرار داده می‌شود ($q_s(1) = \alpha \times q_a$) و توصیه می‌شـود که $\alpha = 0/8$ اعمال شود.

۳. برای ایجاد همگرایی لازم در تکرارهای متوالی برای رسـیدن به حالتی که میانگین دبی یا فشار آبپاش‌های لولهٔ فرعی برابـر با q_a یـا H_a باشـد مقـدار کوچـک Δ بـه $q_s(1)$ افـزوده می‌شود ($\Delta = 0/00001$). $H_s(1)$ متناظر با $q_s(1)$ با اسـتفاده از معادلهٔ فشار- دبی آبپاش محاسبه می‌شود. دبی رابط منتهی به آبپاش شمارهٔ ۱ برابر $q_s(1)$ می‌باشد که مقدار آن در متغیر q_{link} قرار داده می‌شود (از متغیر q_{link} برای محاسبهٔ افـت اصطکاکی در طول رابط استفاده می‌شود).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

۴. در این مرحله دبی و فشار سایر آبپاش‌ها محاسبه و به ترتیب در آرایه‌های q_s و H_s قرار داده می‌شوند. با استفاده از یک روال تکراری محاسبات از انتهای بستهٔ لولهٔ فرعی به سمت ورودی آن صورت می‌گیرد، بدین ترتیب که فشار در هر یک از آبپاش‌ها با استفاده از فشار آبپاش پایین‌دست و مقدار افت اصطکاکی و تغییرات رقوم ارتفاعی بین آنها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. با محاسبهٔ فشار در هر آبپاش دبی آن با استفاده از معادلهٔ آبپاش محاسبه می‌شود. با جمع مقادیر دبی آبپاش و دبی رابط پایین‌دست آن، دبی رابط بالادست آبپاش 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 آبپاش قرار گرفته بر روی قطر بزرگ‌تر) از دو روال تکراری برای محاسبهٔ فشار و دبی آبپاش‌ها بر روی هر یک از لوله‌ها استفاده شد.

۵. بعد از محاسبهٔ فشار و دبی هر یک از آبپاش‌ها و دبی رابط‌های بالادست هر یک، درصورتی‌که قدرمطلق تفاضل دبی لولهٔ فرعی (دبی لولهٔ فرعی برابر با دبی رابط بالادست آبپاش nاُم است) و مقدار $n\times q_a$ کوچک‌تر از ε (ε=۰/۰۰۱) باشد، نشان دهندهٔ آن است که میانگین دبی آبپاش‌ها برابر q_a است، در چنین حالتی به لحاظ این‌که مشخصات کنونی لولهٔ فرعی به صورتی است که دبی و فشار میانگین آبپاش‌ها با مقدار مورد نظر طراح برابر شده است، شبیه‌سازی پایان می‌پذیرد. در غیر این صورت مقدار $q_s(1)$ با مقدار $\beta\times q_a$ مقایسه می‌شود (توصیه می‌شود β=۱/۲ اعمال شود). اگر $q_s(1)>\beta q_a$ باشد نشان‌دهندهٔ آن است که شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ فرعی با این قطر مقدور نمی‌باشد (این حالت معمولاً زمانی‌که 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 دوبارهٔ Δ به $q_s(1)$ از سرگرفته می‌شود. بدین ترتیب محاسبات آن‌قدر ادامه می‌یابد تا لولهٔ فرعی شبیه‌سازی شود یا امکان ناپذیری آن اثبات شود.

۶. در صورت پایان پذیرفتن موفق شبیه‌سازی (قدرمطلق تفاضل دبی لولهٔ فرعی و مقدار $n\times q_a$ کوچک‌تر از ε باشد)، مقادیر فشار و دبی مورد نیاز در ورودی لولهٔ فرعی و مقادیر درصد تغییرات فشار و ضریب یک‌نواختی کریستیان‌سن دبی آبپاش‌ها محاسبه می‌شوند. دبی لولهٔ فرعی برابر با دبی رابط بالادست آبپاش nاُم قرار داده می‌شود و مقدار فشار موردنیاز در نقطهٔ ورودی لولهٔ فرعی با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$H_1 = H_s(n) + \Delta EL_{inlet-n} + h_r + h_{f_{inlet-n}} \qquad [۱]$$

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

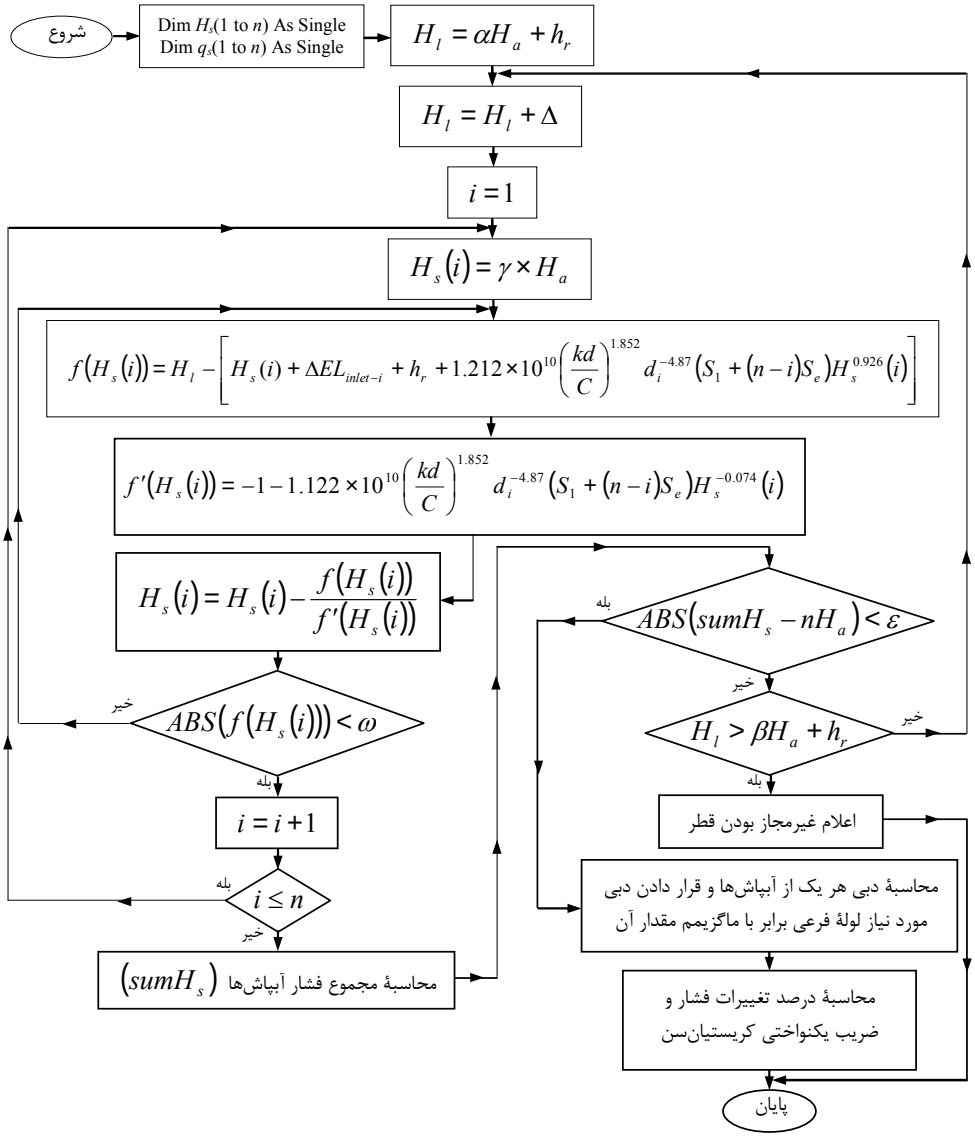
ب) شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ فرعی با آبپاش متحرک

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

۱. تعریف دو آرایه به نام‌های q_s و H_s برای ذخیرهٔ مقادیر دبی و فشار آبپاش‌ها (مطابق شکل ۱، $q_s(i)$ و $H_s(i)$ مقادیر دبی و فشار در آبپاش iاُم از انتهای بستهٔ لولهٔ فرعی است).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]



فلوچارت ۲. الگوریتم شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ فرعی با آبپاش متحرک

۲. تعیین یک فرض اولیه برای فشار مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی (توصیه می‌شود در فرض اولیه $H_1 = ۰/۷H_a + h_r$ اعمال شود).

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

۴. محاسبهٔ 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 لولهٔ فرعی متناسب با فشار آبپاش در حال کار است، بنابراین محاسبهٔ فشار آبپاش در حال کار به ازای مقدار فرضی فشار در ابتدای لولهٔ فرعی با حل تحلیلی میسر نمی‌باشد و نیازمند به‌کارگیری روش‌های حل عددی است. معادلهٔ انرژی بین نقطهٔ ورودی لولهٔ فرعی و آبپاش iاُم (هر آبپاش منفرد در حال کار) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$H_1 + EL_{inlet} = H_s(i) + EL(i) + h_r + ۱/۲۱۲ \times ۱۰^{۱۰} \left(\frac{q_s(i)}{C}\right)^{۱/۸۵۲} d_i^{-۴/۸۷} (S_۱ + (n-i)S_e) \qquad [۲]$$

که در آن $q_s(i)$ دبی آبپاش iاُم است. مجهول‌های معادلهٔ فوق

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

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

$$f(H_s(i)) = H_1 - \left[H_s(i) + \Delta EL_{inlet-i} + h_r + ۱/۲۱۲\times۱۰^{۱۰}\left(\frac{k_d}{C}\right)^{۱/۸۵۲} d_i^{-۴/۸۷}(S_۱ + (n-i)S_e)H_s^{۰/۹۲۶}(i)\right] = ۰ \quad [۳]$$

تنها متغیر تابع فوق $H_s(i)$ (فشار در آبپاش iاُم) می‌باشد. برای حل معادلهٔ 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:

$$f'(H_s(i)) = -۱-۱/۱۲۲\times۱۰^{۱۰}\left(\frac{k_d}{C}\right)^{۱/۸۵۲} d_i^{-۴/۸۷}(S_۱ + (n-i)S_e)H_s^{-۰/۰۷۴}(i) \quad [۴]$$

برای محاسبهٔ فشار هر یک از آبپاش‌ها در ابتدا یک مقدار اولیه برای $H_s(i)$ فرض می‌شود (توصیه می‌شود $۰/۷H_a$ 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:

$$H_s(i) = H_s(i) - \frac{f(H_s(i))}{f'(H_s(i))} \quad [۵]$$

برای هر آبپاش در صورتی‌که 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 محاسبهٔ 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 محاسبهٔ فشار تمامی آبپاش‌ها به ازای H_1 مربوطه مجموع فشار آبپاش‌ها محاسبه و در متغیر $SumH_s$ قرار داده می‌شود. در صورتی‌که قدرمطلق مقدار $SumH_s - nH_a$ از مقدار ε کوچک‌تر باشد، شبیه‌سازی پایان پذیرفته است، در غیر این صورت مقدار H_1 با مقدار $\beta H_a + h_r$ مقایسه می‌شود (توصیه می‌شود $\beta = ۱/۳$ اعمال شود). اگر $H_1 < \beta H_a + h_r$ باشد محاسبات از گام ۳ با افزودن مقدار کوچک Δ به H_1 از سر گرفته می‌شود، 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 $SumH_s - nH_a$ از مقدار ε کوچک‌تر باشد)، آخرین مقدار متغیر H_1 به عنوان فشار مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی قرار داده می‌شود. هم‌چنین دبی هر یک از آبپاش‌ها با استفاده از معادلهٔ فشار- دبی آبپاش محاسبه و مقدار حداکثر آن برابر دبی مورد نیاز لولهٔ فرعی در نظر گرفته می‌شود.

۷. در انتها درصد تغییرات فشار و ضریب یک‌نواختی کریستیان‌سن حاصل از مقادیر دبی‌های آبپاش‌ها به‌عنوان فاکتورهای نشان‌دهندهٔ نحوهٔ 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 لولهٔ فرعی به ازای قطرهای داخلی مختلف، لولهٔ فرعی به ازای مقادیر مختلف قطرهای داخلی شبیه‌سازی می‌شود و درصد تغییرات فشار به ازای هر یک از قطرها محاسبه و در یک آرایه ذخیره می‌شود. بدین ترتیب نمودار درصد تغییرات فشار با استفاده از مقادیر متناظر هر قطر در آرایهٔ مذکور، قابل ترسیم است. البته لازم به ذکر است که ممکن است امکان شبیه‌سازی هیدرولیکی لولهٔ 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 مقایسهٔ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

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

$$J_a = h_{f_a} / (L/۱۰۰) \qquad [۶]$$

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 (۱۰) برای شیب‌های مختلف لولهٔ فرعی بیان شده است) (m) و L: فاصلهٔ بین ابتدا و انتهای لولهٔ فرعی (m) است. برای لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک با فرض این‌که دبی هر آبپاش در حال کار برابر q_a می‌باشد (این فرض با توجه به این‌که معمولاً تغییرات دبی آبپاش‌ها در لوله‌های فرعی از ۱۰ درصد دبی متوسط کارکرد آبپاش‌ها تجاوز نمی‌کند فرض قابل قبولی است) رابطهٔ زیر برای محاسبهٔ قطر داخلی پیشنهادی لولهٔ فرعی ارائه گردید:

$$d_{i_a} = \left[k (q_a / C)^{۱/۸۵۲} J_a^{-۱}\right]^{(-۴/۸۷)} \qquad [۷]$$

که در آن d_{i_a}: قطر داخلی پیشنهادی لولهٔ فرعی (mm) و k: ضریب تبدیل واحد ($۱/۲۱۲\times۱۰^{۱۲}$) است. برای استخراج معادلهٔ مورد نیاز به منظور محاسبهٔ فشار مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی با آبپاش متحرک در ابتدا باید مقدار افت اصطکاکی از ابتدای لولهٔ فرعی تا نقطه‌ای که افت اصطکاکی متوسط در طول لولهٔ فرعی رخ می‌دهد محاسبه 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 آبپاش‌ها صورت پذیرفت (مانند فرض صورت گرفته در استخراج معادلهٔ بدون بعد افت اصطکاکی لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت (۱۰)). بر این اساس با توجه به یکسان بودن دبی لولهٔ فرعی به ازای قرارگیری هر یک از آبپاش‌ها، گرادیان افت اصطکاکی در طول لولهٔ فرعی همواره یکسان می‌باشد. اگر x فاصله از ابتدای لولهٔ فرعی باشد، افت اصطکاکی از ابتدای لولهٔ فرعی تا نقطهٔ x را با رابطهٔ زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$h_{f_x} = J\frac{x}{۱۰۰},\ h_f = J\frac{L}{۱۰۰} \Rightarrow \frac{h_{f_x}}{h_f} = \frac{x}{L} \qquad [۸]$$

که در آن x: فاصلهٔ هر نقطه 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 آبپاش 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 به‌دست می‌آید:

$$\left(\frac{h_{f_x}}{h_f}\right)_a = \frac{۱}{۱-۰}\int_{\frac{x}{L}=۰}^{\frac{x}{L}=۱} \frac{h_{f_x}}{h_f} d\left(\frac{x}{L}\right) = \int_{\frac{x}{L}=۰}^{\frac{x}{L}=۱} \frac{x}{L} d\left(\frac{x}{L}\right)$$
$$= \left[\frac{۱}{۱+۱}\left(\frac{x}{L}\right)^{۱+۱}\right]_{\frac{x}{L}=۰}^{\frac{x}{L}=۱} = \frac{۱}{۲} \Rightarrow \left(\frac{h_{f_x}}{h_f}\right)_a = \frac{۱}{۲} \qquad [۹]$$

که در آن $\left(h_{f_x}/h_f\right)_a$: 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 مستهلک 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 لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک قابل استخراج است:

$$H_1 = H_a + \frac{۱}{۲}h_f \pm \frac{۱}{۲}\Delta H_e + h_r \qquad [۱۰]$$

که در آن ΔH_e: اختلاف رقوم ارتفاعی ابتدا و انتهای لولهٔ فرعی (در صورتی‌که لولهٔ فرعی بر روی سربالایی باشد ΔH_e مثبت به‌کار برده می‌شود و بالعکس) (m) است.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، چندین لولهٔ فرعی با آبپاش‌های ثابت و متحرک با شیب‌های طولی ۱+ درصد (شیب مثبت)، ۱- درصد (شیب منفی ملایم) و ۴/۵- درصد (شیب منفی تند) با استفاده از طراحی کلاسیک و مدل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]



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

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 ۲/۳۸×۴/۳۶ میلی‌متر با فواصل ۱۲ متر بر روی لولهٔ فرعی استفاده شد. فشار متوسط کارکرد آبپاش‌ها ۳/۵ بار، جنس لوله‌های فرعی آلومینیوم، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز لولهٔ فرعی ۱۲۰، ارتفاع پایهٔ آبپاش یک متر، فاصلهٔ بین اولین آبپاش تا ابتدای لولهٔ 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 ۱۰×۶/۳×۳/۲ میلی‌متر با فواصل ۲۵ متر بر روی لولهٔ فرعی استفاده شد. فشار متوسط کارکرد آبپاش‌ها ۵ بار، جنس لوله‌های فرعی پلی‌اتیلن، ضریب افت اصطکاکی هیزن- ویلیامز لوله‌های فرعی ۱۳۵، ارتفاع پایهٔ آبپاش ۱/۷ متر، فاصلهٔ بین اولین آبپاش تا ابتدای لولهٔ فرعی ۱۲/۵ متر و تعداد نقاط آبگیری (تعداد نقاط اتصال پایهٔ آبپاش) از هر لولهٔ فرعی ۱۰ نقطه انتخاب شد.

نتایج و بحث

ارزیابی انتخاب قطر لولهٔ فرعی

برای تعیین قطر مورد نیاز لولهٔ 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 لولهٔ 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 مقایسهٔ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

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

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

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 به‌راحتی 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 این‌که در صورت استفاده از قطر ۷۵ میلی‌متر به‌جای 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 لولهٔ فرعی از ۵۶/۵ متر به ۵۳/۶ متر تغییر یافت قطر اسمی ۷۵ میلی‌متر انتخاب گردید.

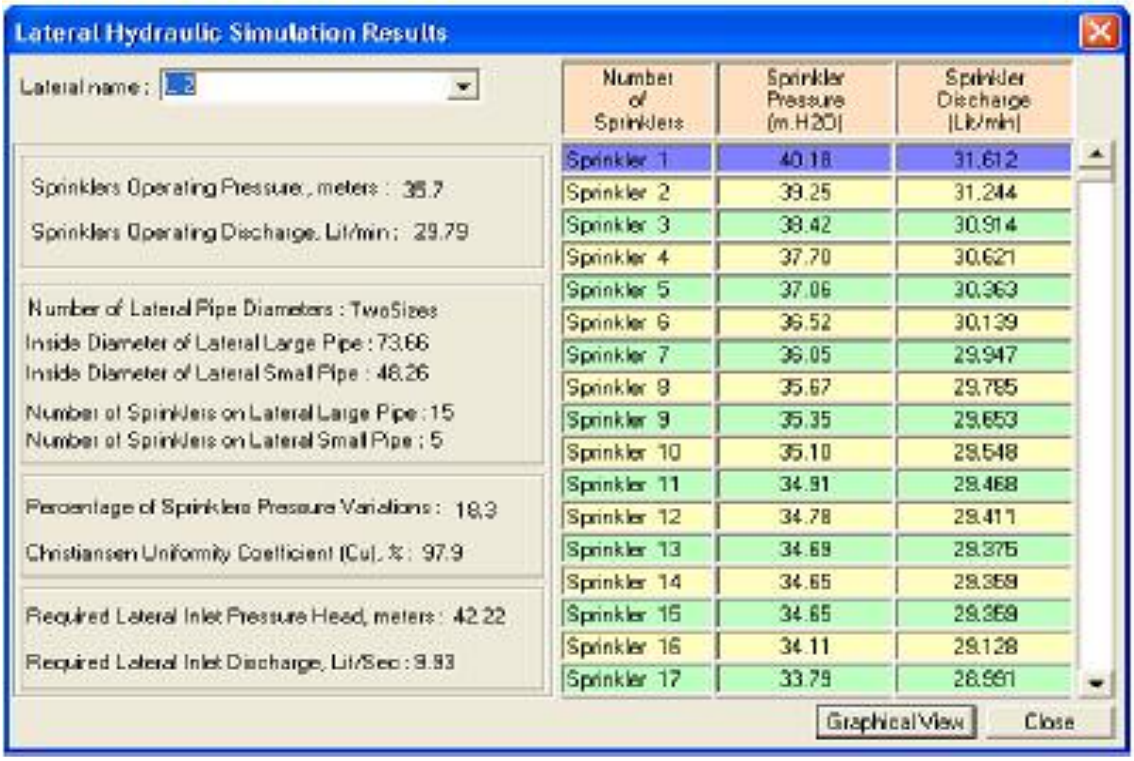
ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

با اجرای مدل برای هر یک از لوله‌های فرعی مقادیر درصد تغییرات فشار، ضریب یک‌نواختی کریستیان‌سن، فشار و دبی مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی و مقادیر فشار و دبی هر یک از 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 به‌دست 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 لولهٔ فرعی به مجموعه‌ای متشکل از گره‌ها و رابط‌ها تجزیه می‌شود و با استفاده از یک روال تکراری با تحلیل هیدرولیکی جزء به جزء لولهٔ فرعی، مقادیر فشار و دبی هر یک از آبپاش‌ها و مقدار فشار و دبی مورد نیاز در ابتدای لولهٔ فرعی شبیه‌سازی می‌شود. حال آن که در طراحی کلاسیک با استفاده از فرمول‌های ساده‌ای که لولهٔ فرعی را به صورت یک جزء واحد در نظر می‌گیرند محاسبات صورت می‌پذیرد. در طراحی کلاسیک برای محاسبهٔ افت اصطکاکی لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت از ضریب کاهندهٔ کریستیان‌سن استفاده می‌شود. افت اصطکاکی محاسبه شده با اعمال این ضریب نسبت به حالتی که محاسبات افت اصطکاکی به صورت جزء به جزء در فاصلهٔ میان آبپاش‌ها صورت گیرد،

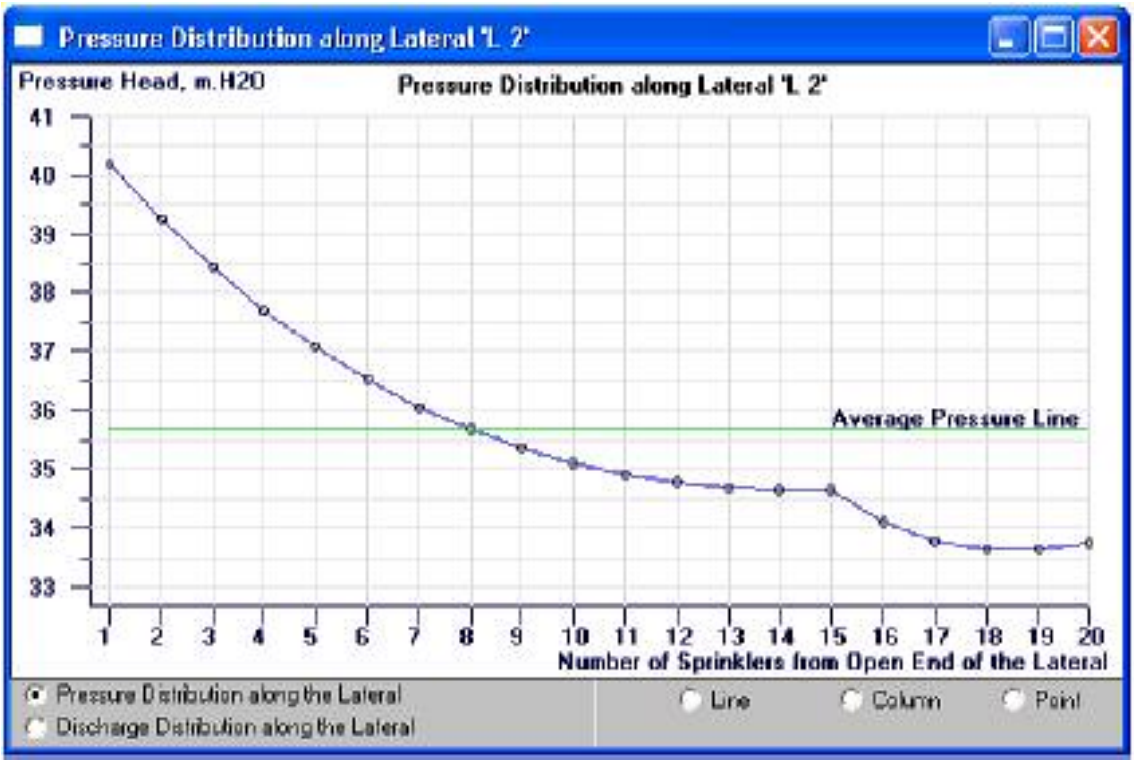
[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]



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	28.991

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



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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

جدول ۲. مقایسهٔ مقادیر فشار به‌دست آمده در ابتدای لوله‌های فرعی با نتایج طراحی کلاسیک

	لوله‌های فرعی با آبپاش‌های ثابت						لوله‌های فرعی با آبپاش متحرک		
	یک قطر ثابت			دو قطر مختلف			یک قطر ثابت		
شیب لولهٔ فرعی (٪)	+۱	−۱	−۴/۵	+۱	−۱	−۴/۵	+۱	−۱	−۴/۵
$(H_1)_M$ (متر)	۳۹/۵	۴۲/۰	۳۷/۷	۴۱/۲	۴۲/۲	۳۸/۵	۵۶/۱	۵۳/۶	۵۲/۳
$(H_1)_C$ (متر)	۳۹/۴	۴۲/۰	۳۷/۸	۴۱/۱	۴۱/۸	۳۸/۹	۵۶/۰	۵۳/۶	۵۲/۳
اختلاف نتایج (متر)	۰/۱	−۰/۱	−۰/۲	۰/۱	۰/۴	−۰/۳	۰/۱	۰/۰	۰/۰
قدرمطلق درصد اختلاف نتایج (٪)	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۱/۰	۰/۸	۰/۲	۰/۰	۰/۰

$(H_1)_M$: 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

می‌تواند دارای یک اختلاف جزئی باشد (۱۰). با بررسی مقادیر به‌دست 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 برنامهٔ 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 کاربردی به صورت کاربر پسند ارائه گردید. با مقایسهٔ نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی چند نمونه لولهٔ 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.

منابع مورد استفاده

۱. شاه‌محمدی، ر. ۱۳۸۴. مدل‌سازی طراحی سیستم آبیاری بارانی. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲. شاه‌محمدی، ر.، س. م. میرلطیفی و ک. محمدی. ۱۳۸۵. طراحی لوله‌های آبده سیستم‌های آبیاری بارانی در مدل SprinklerMod: الف، طراحی لوله‌های آبده با آبپاش‌های ثابت. مجموعهٔ مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۴-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۵. دانشکدهٔ مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲: ۱۱۳۱-۱۱۲۵.

۳. شاه‌محمدی، ر.، س. م. میرلطیفی، ک. محمدی، و م. قیصری. طراحی لوله‌های آبده سیستم‌های آبیاری بارانی در مدل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]

SprinklerMod: ب، طراحی لوله‌های آبده با آبپاش متحرک. مجموعهٔ مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۴-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۵، دانشکدهٔ 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.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.4.9]