

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی آب

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی آبیاری و زهکشی

عنوان

مشخصه‌های هیدرودینامیکی آب خروجی از آبپاش با استفاده از

مدل بالستیک و CFD

استاد راهنما

دکتر سید علی اشرف صدرالدینی

اساتید مشاور

دکتر رضا دلیر حسن نیا

دکتر امیر حسین ناظمی

پژوهشگر

سید مهدی عالی نژاد

نام خانوادگی: عالی نژاد	نام: سید مهدی
عنوان پایان نامه: مشخصه‌های هیدرودینامیکی آب خروجی از آبپاش با استفاده از مدل بالستیک و CFD	
استاد راهنما: دکتر سید علی اشرف صدرالدینی	
استادان مشاور: دکتر امیرحسین ناظمی، دکتر رضا دلیر حسن نیا	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی آب
گرایش: آبیاری و زهکشی	گرایش: آبیاری و زهکشی
دانشگاه: تبریز	دانشکده: کشاورزی
تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۹۰	تعداد صفحه: ۱۰۳
کلید واژه‌ها: الگوی توزیع، مدل بالستیک، مدل حجم سیال، فلونت، CFD	
چکیده:	
<p>شبیه سازی الگوی توزیع آبپاش‌ها در آبیاری بارانی، تحت شرایط کنترل شده و نیز شرایط واقعی یکی از موضوعات مورد علاقه محققین و مهندسین آبیاری در سه دهه گذشته بوده است. مدل‌های شبیه سازی که امکان پیش بینی الگوی توزیع آب را در یک سیستم آبیاری بارانی در شرایط طبیعی میسر می سازند، برای اجتناب از آزمایشات میدانی و همچنین برای طراحی و بهبود سیستم‌های آبیاری بسط یافته‌اند. در این تحقیق از ترکیب روش حل عددی و مدل بالستیک برای مدل سازی الگوی توزیع آبپاش منفرد سیستم سنتریپوت در شرایط بدون باد استفاده شد. آزمایشات میدانی در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام گرفت و الگوی توزیع آبپاش منفرد سیستم سنتریپوت با مارک تجاری D3000 ساخت شرکت Nelson در دو فشار کارکرد رایج مورد آزمایش قرار گرفت. جهت انجام مدل سازی در شرایط آزمایشی مختلف، با توجه به معلوم بودن مشخصه‌های هندسی مجاری جریان در آبپاش، مقادیر فشار و سرعت جریان در مسیر عبوری از نازل تا برخورد به پد مقابل و در ادامه تا لحظه جدا شدن از پد توسط نرم افزار فلونت شبیه سازی شد. بدین منظور پس از تعیین بهترین شبکه از لحاظ تعداد المان، ۴ مدل آشفستگی برای هر دو حالت آزمایشی مورد شبیه سازی قرار گرفت. سپس با استفاده از روش عکسبرداری دیجیتال، مشخصات هیدرودینامیکی قطرات پخش شده در هوا شامل قطر، سرعت و زاویه قطره در فواصل مختلف نسبت به آبپاش تعیین گردید. با استفاده از این مشخصات و حل عددی معادلات بالستیک، مسیر پرتابی قطرات مذکور و نیز سرعت اولیه و زاویه اولیه حاصل گردید. در نهایت با استفاده از مشخصه‌های جریان حاصل از مدل بالستیک، نتایج حاصل از مدل فلونت مورد ارزیابی قرار گرفت که به طور متوسط مقدار خطای نسبی کمتر از ۲ درصد را نشان می دهند. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل بالستیک در مدل سازی مسیر پرتابی از قابلیت بالایی برخوردار بوده و نیز مدل عددی CFD در شبیه سازی جریان آزاد بر روی پد دقت بالایی داشته که از ترکیب این دو مدل می توان در مدل سازی آبپاش‌های مشابه بهره برد.</p>	

فهرست مطالب

۱	مقدمه و بررسی منابع.....
۱-۱	مقدمه.....
۲	۲-۱ اهداف تحقیق
۳	۳-۱ بررسی منابع.....
۵	۱-۳-۱ الگوی توزیع آبپاش.....
۵	۱-۱-۳-۱ مدل‌های بالستیک.....
۱۷	۲-۱-۳-۱ مدل‌های نیمه تجربی.....
۱۹	۳-۱-۳-۱ مدل‌های آماری.....
۲۲	۲-۳-۱ مدل عددی.....
۲۴	۱-۲-۳-۱ مراحل کاری.....
۲۴	۱-۱-۲-۳-۱ مدل‌سازی هندسی مسأله.....
۲۴	۲-۱-۲-۳-۱ تولید شبکه مناسب برای حل.....
۲۵	۳-۱-۲-۳-۱ انتخاب معادلات مناسب جهت حل.....
۲۵	۴-۱-۲-۳-۱ تعریف شرایط مرزی.....
۲۵	۵-۱-۲-۳-۱ گسسته‌سازی معادلات حاکم.....
۲۵	۶-۱-۲-۳-۱ اجرای برنامه.....
۲۶	۷-۱-۲-۳-۱ نتایج آماری و نموداری.....
۲۶	۲-۲-۳-۱ معرفی و کاربرد نرم افزار <i>FLUENT</i>
۲۹	۳-۲-۳-۱ مدل‌های شبیه‌سازی جریان چند فازی.....
۳۰	۱-۳-۲-۳-۱ مدل حجم سیال.....
۳۱	۲-۳-۲-۳-۱ محدودیت‌های مدل حجم سیال.....
۳۲	۳-۳-۲-۳-۱ معادله پیوستگی در مدل نسبت حجمی.....
۳۳	۴-۳-۲-۳-۱ معادله مومنتوم در مدل نسبت حجمی.....
۳۴	۵-۳-۲-۳-۱ معادله انرژی در مدل نسبت حجمی.....
۳۵	۶-۳-۲-۳-۱ میانابایی در سطح مشترک سیال‌ها.....
۳۸	۴-۲-۳-۱ مدل‌های آشفتگی موجود در <i>FLUENT</i>

۴۰	..... مدل $k-\varepsilon$ ۱-۴-۲-۳-۱
۴۳	..... مدل $k-\omega$ (SST) ۲-۴-۲-۳-۱
۴۵	..... ۳-۳-۱ مروری به تحقیقات انجام یافته با کاربرد CFD (خصوصاً مدل حجم سیال)
۴۹	..... مواد و روش‌ها
۵۰	..... ۱-۲ آزمایش‌های میدانی
۵۰	..... ۱-۱-۲ مکان انجام آزمایش
۵۰	..... ۲-۱-۲ نحوه انجام آزمایش
۵۰	..... ۱-۲-۱-۲ مشخصات آبپاش مورد استفاده
۵۱	..... ۲-۲-۱-۲ تجهیزات استقرار یافته
۵۳	..... ۳-۲-۱-۲ عکس برداری از قطرات
۵۳	..... ۴-۲-۱-۲ شبکه ظروف جمع آوری آب
۵۵	..... ۲-۲ مدل بالستیک
۵۷	..... ۳-۲ مدل فلوئنت
۶۲	..... نتایج و بحث
۶۳	..... ۱-۳ استخراج مشخصات فنی اسپری مورد آزمایش
۶۳	..... ۲-۳ استخراج نتایج آزمایشات عکسبرداری
۶۵	..... ۳-۳ استخراج نتایج مدل بالستیک
۷۷	..... ۴-۳ نتایج شبکه ظروف جمع آوری آب
۷۹	..... ۵-۳ استخراج نتایج مدل عددی
۷۹	..... ۱-۵-۳ تعیین بهترین شبکه
۸۰	..... ۲-۵-۳ تعیین مشخصه‌های جریان
۹۴	..... ۶-۳ مقایسه نتایج مدل بالستیک و مدل عددی
۹۶	..... ۷-۳ نتیجه‌گیری
۹۷	..... ۸-۳ پیشنهادات
۹۶	..... فهرست منابع
۱۰۱	..... ضمیمه

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) تئوری بالستیک و نیروهای مؤثر بر قطره در هوا (کاریون و همکاران، ۲۰۰۱)..... ۶
- شکل (۲-۱) شمای کلی و نحوه قرارگیری تجهیزات مورد استفاده در روش عکاسی با سرعت پایین. ۱۲
- شکل (۳-۱) ظهور قطرات در عکس‌ها با مشخصات قابل اندازه‌گیری..... ۱۳
- شکل (۱-۲) اسپری Nelson D3000..... ۵۱
- شکل (۲-۲) تجهیزات استقرار یافته جهت انجام آزمایش..... ۵۲
- شکل (۳-۲) نحوه چینش ظروف جمع‌آوری آب در فواصل ۴۰ سانتی متری..... ۵۴
- شکل (۴-۲) نحوه چینش ظروف جمع‌آوری آب در فواصل ۳۰ سانتیمتری..... ۵۵
- شکل (۵-۲) شمای کلی از آزمایشات مدل بالستیک..... ۵۶
- شکل (۶-۲) قسمتی از مدل با استفاده از المان‌های *Tri* (مثلی) الف) دید از جانب که شامل فضای مدل می‌شود ب) قطاعی از پد با دید از مرکز پد..... ۵۸
- شکل (۷-۲) شمای مورد استفاده در مدل عددی..... ۵۹
- شکل (۱-۳) ظهور قطرات در عکس گرفته شده از قطرات حاصل از آبپاش با فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای در فاصله ۵ متری..... ۶۴
- شکل (۲-۳) مشخصات قطرات در هنگام پرتاب باز اسپری نازل با فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای..... ۶۷
- شکل (۳-۳) مشخصات قطرات در هنگام پرتاب از اسپری نازل با فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای..... ۶۸
- شکل (۴-۳) هیستوگرام فراوانی قطر قطرات در فواصل افقی مختلف از محل نصب اسپری نازل برای فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای..... ۶۹
- شکل (۵-۳) هیستوگرام فراوانی سرعت قطرات در فواصل افقی مختلف از محل نصب اسپری نازل برای فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای..... ۷۰
- شکل (۶-۳) هیستوگرام فراوانی زاویه قطرات در فواصل افقی مختلف از محل نصب اسپری نازل برای فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای..... ۷۱
- شکل (۷-۳) هیستوگرام فراوانی قطر قطرات در فواصل افقی مختلف از محل نصب اسپری نازل برای فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای..... ۷۲

- شکل (۸-۳) هیستوگرام فراوانی سرعت قطرات در فواصل افقی مختلف از محل نصب اسپری نازل برای فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای ۷۳
- شکل (۹-۳) هیستوگرام فراوانی زاویه قطرات در فواصل افقی مختلف از محل نصب اسپری نازل برای فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای ۷۴
- شکل (۱۰-۳) مسیر پرتابه‌های برای اسپری نازل ۱۵ پی اس ای ۷۵
- شکل (۱۱-۳) مسیر پرتابه‌های برای اسپری نازل ۲۰ پی اس ای ۷۵
- شکل (۱۲-۳) الگوی توزیع بارش در فشار کارکرد الف) ۱۵ پی اس ای ب) ۲۰ پی اس ای ۷۸
- شکل (۱۳-۳) نمودار مربوط به بهترین تعداد مش ۷۹
- شکل (۱۴-۳) توزیع فاز جریان در صفحه $y=0$ ۸۰
- شکل (۱۵-۳) توزیع فشار (فشار کل) در صفحه $y=0$ ۸۱
- شکل (۱۶-۳) توزیع سرعت در صفحه $y=0$ ۸۱
- شکل (۱۷-۳) بردارهای سرعت جریان بر اساس توزیع فاز جریان در صفحه $y=0$ ۸۲
- شکل (۱۸-۳) خطوط جریان بر اساس توزیع فاز جریان در صفحه $y=0$ ۸۲
- شکل (۱۹-۳) توزیع سرعت با مدل $Standard\ k-\epsilon$ در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای الف) در $x=9.5\ mm$ ب) در $x=12.78\ mm$ یا خروجی ۸۴
- شکل (۲۰-۳) توزیع سرعت با مدل $RNG\ k-\epsilon$ در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای الف) در $x=9.5\ mm$ ب) در $x=12.78\ mm$ یا خروجی ۸۴
- شکل (۲۱-۳) توزیع سرعت با مدل $Realizable\ k-\epsilon$ در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای الف) در $x=9.5\ mm$ ب) در $x=12.78\ mm$ یا خروجی ۸۵
- شکل (۲۲-۳) توزیع سرعت با مدل $SST\ k-w$ در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای الف) در $x=9.5\ mm$ ب) در $x=12.78\ mm$ یا خروجی ۸۵
- شکل (۲۳-۳) منحنی تغییرات سرعت در سطح آب در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای الف) در $x=9.5\ mm$ ب) در $x=12.78\ mm$ ۸۷
- شکل (۲۴-۳) منحنی تغییرات سرعت به ازای عمق آب در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای الف) در $x=9.5\ mm$ ب) در $x=12.78\ mm$ ۸۸
- شکل (۲۵-۳) توزیع سرعت با مدل $Standard\ k-\epsilon$ در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای

- الف) در $x=9.5 \text{ mm}$ (ب) در $x=12.78 \text{ mm}$ یا خروجی ۸۹
- شکل (۳-۲۶) توزیع سرعت با مدل $k-\varepsilon$ RNG در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای
- الف) در $x=9.5 \text{ mm}$ (ب) در $x=12.78 \text{ mm}$ یا خروجی ۸۹
- شکل (۳-۲۷) توزیع سرعت با مدل $k-\varepsilon$ Realizable در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای
- الف) در $x=9.5 \text{ mm}$ (ب) در $x=12.78 \text{ mm}$ یا خروجی ۹۰
- شکل (۳-۲۸) توزیع سرعت با مدل $k-w$ SST در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای
- الف) در $x=9.5 \text{ mm}$ (ب) در $x=12.78 \text{ mm}$ یا خروجی ۹۰
- شکل (۳-۲۹) منحنی تغییرات سرعت در سطح آب در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای
- الف) در $x=9.5 \text{ mm}$ (ب) در $x=12.78 \text{ mm}$ ۹۲
- شکل (۳-۳۰) منحنی تغییرات سرعت به ازای عمق آب در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای
- الف) در $x=9.5 \text{ mm}$ (ب) در $x=12.78 \text{ mm}$ ۹۳
- شکل (۳-۳۱) خطای نسبی مدل‌های آشفتگی و مدل بالستیک در فشار کارکرد
- الف) ۱۵ پی اس ای (ب) ۲۰ پی اس ای ۹۵

فهرست جداول

- جدول (۳-۱) مشخصات اسپری نازل Nelson D3000 ۶۳
- جدول (۳-۲) متوسط مقادیر سرعت، ارتفاع، مسافت و زاویه در نقطه اوج ۷۶
- جدول (۳-۳) متوسط مقادیر سرعت اولیه ۷۷
- جدول (۳-۴) نسبت توزیع سرعت در مقاطع مختلف در فشار کارکرد ۱۵ پی اس ای ۸۶
- جدول (۳-۵) نسبت توزیع سرعت در مقاطع مختلف در فشار کارکرد ۲۰ پی اس ای ۹۱

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

آب ماده‌ای با ارزش و حیاتی است و تلاش برای مصرف بهینه و کاهش تلفات آن از مهم‌ترین وظایف مصرف‌کننده‌های آب می‌باشد. در بسیاری از کشورها بخش کشاورزی به عنوان بزرگترین مصرف‌کننده آب شناخته می‌شود. یکی از راه‌های کاهش تلفات آب در این بخش بالا بردن راندمان سیستم‌های آبیاری است. آبیاری سنتر پیوت یکی از سیستم‌های متداول در آبیاری بارانی است که به دلیل داشتن مزایای فراوان، استفاده از آن در دنیا در حال گسترش است. برای ارزیابی سیستم سنتر پیوت اطلاع از نحوه پخش آب زیر دستگاه ضروری است و چون الگوی توزیع سراسری در نتیجه‌ی ترکیب الگوهای منفرد آبپاش حاصل می‌گردد، لذا یکی از عوامل مهم در ارزیابی و طراحی سیستم‌های آبیاری بارانی الگوی توزیع حاصل از آبپاش منفرد می‌باشد.

اگر آبپاش بتواند الگوی توزیع مناسبی تولید نماید، از ترکیب بهینه الگوهای توزیع آبپاش‌ها می‌توان به الگوی توزیع سراسری مطلوبی دست یافت. شناخت الگوی توزیع حاصل از یک آبپاش منفرد مهم‌ترین عامل جهت دستیابی به ترکیب بهینه مذکور است. الگوی توزیع حاصل از آبپاش نیز به نوبه‌ی خود تحت تأثیر نحوه ساخت و مشخصات فیزیکی و هندسی آبپاش، فشار سیستم و عوامل محیطی یا وضعیت آب و هوایی که مهمترین آن عامل باد می‌باشد، است.

الگوی توزیع آبپاش منفرد و اثرات باد بر روی آن را می‌توان با انجام آزمایشات میدانی در مزرعه بدست آورد ولی انجام این آزمایشات نیاز به زمان طولانی داشته و پرهزینه می‌باشند. در سال‌های اخیر محققین زیادی تلاش نموده‌اند تا الگوی توزیع آب حاصل از آبپاش و تغییرات آن را با توجه به شرایط متفاوت باد شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمایند و مدل‌های مختلفی برای این منظور ارائه نموده‌اند.

یکی از این مدل‌های ارائه شده مدل بالستیک می‌باشد که در آن با استفاده از حل معکوس، توزیع قطرات آب حاصل می‌شود. نظر به اینکه روش مذکور از قوانین حرکت پرتابه پیروی می‌کند و حرکت پرتابه نیز تابع سرعت اولیه و زاویه اولیه می‌باشد، پس یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در مدل بالستیک سرعت اولیه می‌باشد. تحقیقات متعددی جهت تشخیص سرعت اولیه با دقت بالا صورت پذیرفته است که هزینه بالای این روش‌ها یکی از عیوب آنها می‌باشد. در این راستا با توجه به دقت بالای روش‌های حل عددی و هزینه کم اجرایی این روش‌ها، در این تحقیق سعی شده است تا با ترکیب دو روش مدل بالستیک و مدل عددی، برآورد دقیقی از میزان سرعت اولیه به عمل آید تا بتوان از روش مذکور در مدل‌سازی آبپاش اسپری سنتریپوت بهره جست.

۱-۲ اهداف تحقیق

با توجه به توانایی‌های روش‌های حل عددی در مدل نمودن انواع جریان‌های پیچیده هیدرولیکی و کاربرد آن در محدوده وسیعی از مسائل هیدرولیکی و نیز قابلیت مدل بالستیک در مدل‌سازی مسیر-های پرتابه‌ای و با توجه به ماهیت اطلاعات حاصل از آزمایشات میدانی برای تعیین الگوی توزیع، در تحقیق حاضر سعی بر آن شده است تا با استفاده از ترکیب روش حل عددی و مدل بالستیک، مدل کارآمدی با دقت بالا از الگوی توزیع آبپاش منفرد سنتریپوت ارائه گردد.

با در نظر گرفتن مطالب ذکر شده، موارد زیر بعنوان اهداف تحقیق مد نظر قرار گرفته‌اند:

۱- ارائه روشی جدید برای تعیین مشخصه‌های هیدرولیکی جریان خروجی از نازل آبپاش با

استفاده از معادلات هیدرولیکی حاکم و با کاربرد CFD

۲- بررسی قابلیت و دقت نرم افزار فلوننت در شبیه‌سازی جت آب خروجی از نازل آبپاش

۳- بررسی دقت روش بالستیک

۳-۱ بررسی منابع

۱-۳-۱ الگوی توزیع آبپاش

پیش‌بینی و مدل‌سازی الگوی توزیع آبپاش‌های آبیاری بارانی، تحت شرایط کنترل شده و نیز شرایط اقلیمی واقعی، در دو دهه‌ی گذشته یکی از موارد مورد علاقه‌ی محققین و مهندسين آبیاری بوده است. مدل‌های شبیه‌سازی آبیاری که امکان پیش‌بینی توزیع آب را از یک سیستم آبیاری در شرایط طبیعی میسر می‌سازند، برای اجتناب از آزمایشات میدانی و همچنین برای طراحی و بهبود سیستم‌های آبیاری بسط یافته‌اند.

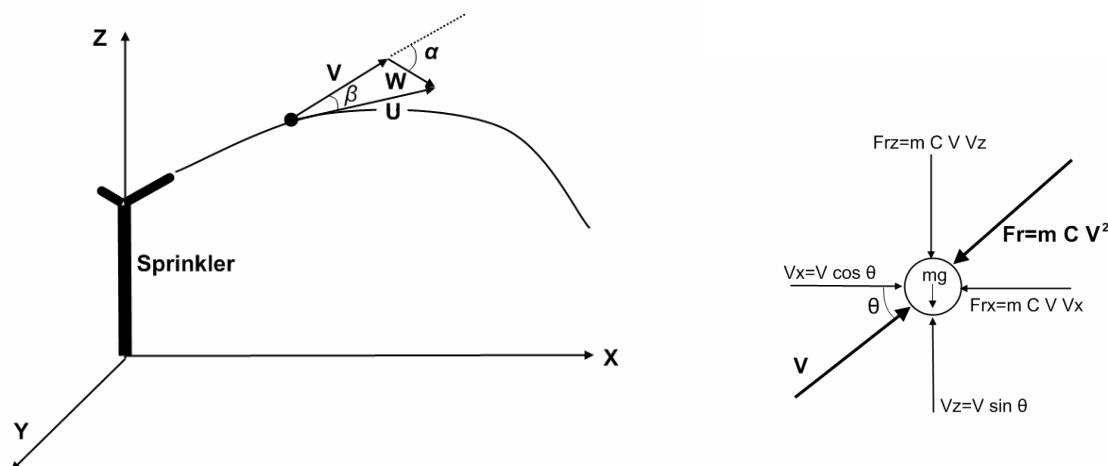
روش‌های مختلفی برای این منظور بکار گرفته شده است که هر کدام از آنها دارای شرایط و محدودیت‌های مخصوص به خود می‌باشند. این مدل‌ها را می‌توان بر اساس روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی در سه گروه کلی نیمه تجربی^۱، آماری^۲ و بالستیک^۳ تقسیم بندی نمود.

۱-۳-۱-۱ مدل‌های بالستیک

مدل‌های بالستیک یک از روش‌های متداول برای شبیه‌سازی الگوی توزیع آبپاش منفرد می‌باشند. در این مدل‌ها آبپاش به عنوان ابزاری که آب را به صورت قطراتی با قطرهای مختلف به بیرون پخش می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که قطرات در خروج از نازل آبپاش شکل می‌گیرند و تا رسیدن به زمین بصورت مجزا در هوا حرکت می‌کنند. در غیاب باد و برای مشخصات معین یک آبپاش، فاصله‌ی افقی بین محل فرود قطره و نازل آبپاش تابعی از اندازه‌ی قطره می‌باشد. تئوری

1 . Semi-Empirical
2 . Statistic
3 . Ballistic

بالستیک برای تعیین مسیر پرتاب قطرات آب دارای اندازه‌های متفاوت که تحت تاثیر بردار سرعت اولیه قطره و بردار باد موازی با سطح زمین قرار دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیروی ثقل در جهت عمود و نیروی مقاومت در جهت عکس مسیر نیروهای دیگر موثر بر قطره‌ی آب می‌باشند. سرعت قطره نسبت به زمین برابر با سرعت قطره در هوا به اضافه‌ی بردار سرعت باد در نظر گرفته می‌شود (پلایان و همکاران، ۲۰۰۶). در شکل (۱-۱) نمای شماتیک مربوط به قطره‌ای در هوا و نیروهای موثر بر آن بر مبنای تئوری بالستیک نشان داده شده است.



شکل (۱-۱) تئوری بالستیک و نیروهای موثر بر قطره در هوا (کارپون و همکاران، ۲۰۰۱)

روابط پایه برای شبیه‌سازی الگوی توزیع با استفاده از مدل بالستیک توسط فوکوئی و همکاران (۱۹۸۰) ارائه شده است. در تحقیق مذکور روشی برای ارزیابی میزان پخش آب و ضرایب یکنواختی (CU) برای آبپاش‌های هم‌پوشان در شرایط طبیعی با در نظر گرفتن تلفات باد بردگی ارائه شده است. ورودی‌های مدل عبارتند از آرایش آبپاش‌ها، زاویه‌ی پخش آب از نازل آبپاش که توسط

روابط حرکت محاسبه می‌شود و پروفیل توزیع آب از یک آبپاش منفرد که بصورت تجربی و در شرایط بدون باد اندازه‌گیری می‌شود. برای پیش‌بینی الگوی توزیع حاصل از آبپاش، جت خروجی از نازل آبپاش بصورت جریان قطرات کروی آب با قطرهای مختلف فرض شده و پروفیل پخش آبپاش با استفاده از مسیر پرتابه‌ی قطرات آب و توزیع حجمی آنها تعیین شده است. معادلات حرکت برای قطرات آب بصورت زیر نشان داده می‌شود:

$$A_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{3\rho_a C}{4\rho_w D} V(U_x - W_x) \quad (1-1)$$

$$A_y = \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{3\rho_a C}{4\rho_w D} V(U_y - W_y) \quad (2-1)$$

$$A_z = \frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{3\rho_a C}{4\rho_w D} V(U_z) - g \quad (3-1)$$

که در این روابط A_x ، A_y و A_z مؤلفه‌های شتاب قطرات آب در امتداد محورهای x ، y و z ، V سرعت حرکت قطرات در هوا $[LT^{-1}]$ ، W_x و W_y سرعت باد در جهات x و y $[LT^{-1}]$ ، U_x ، U_y و U_z سرعت نهایی قطرات تحت تأثیر باد $[LT^{-1}]$ ، ρ_a دانسیته هوا $[ML^{-3}]$ ، ρ_w دانسیته آب $[ML^{-3}]$ ، D قطر قطرات کروی $[L]$ و C ضریب دراگ یا همان ضریب نیروی مقاوم که بصورت تابعی از عدد رینولدز و با استفاده از روابط زیر تخمین زده می‌شود:

$$R_e \leq 100, \quad C = \frac{33.3}{R_e} - 0.0033R_e + 1.2$$

$$100 \leq R_e \leq 1000, \quad C = \frac{72.2}{R_e} - 0.0000556R_e + 0.48 \quad (4-1)$$

$$R_e \geq 1000 \quad C = 0.45$$

که در این روابط $R_e = VD/v$ (عدد رینولدز) می باشد که v لزوجت سینماتیکی هوا با بعد $[L^2T^{-1}]$ است.

مسیرهای پرتاب و نقاط تماس (نقاطی که قطرات آب با سطح زمین برخورد می کنند) قطرات پخش شده از آبپاش با استفاده از حل عددی روابط (۱-۱) تا (۴-۱) با روش رانگ- کوتای مرتبه چهارم بدست می آیند.

برای شبیه سازی الگوی توزیع حاصل از آبپاش منفرد، این روابط باید برای زاویه های افقی مختلف آبپاش و قطرهای مختلف قطرات حل گردد. بطور معمول، در مدل از 180° زاویه افقی آبپاش و 180° قطر مختلف قطره که بطور یکنواخت بین 0.2 تا 7 میلی متر تقسیم بندی می شود، استفاده می شود. پس از ترکیب مختصات محل فرود هر یک از قطرها با نسبتی از دبی آبپاش که در این اندازه ی قطره صورت گرفته است، می توان الگوی توزیع آبپاش را محاسبه نمود.

تعیین اندازه قطرات معمولاً با استفاده از روش های غیرمستقیم و مستقیم صورت می گیرد که برخی از این روش ها به شرح زیر می باشد:

روش زنگ زدن یا لکه گذاری^۱: این روش که توسط مگاروی^۲ در سال ۱۹۵۶ معرفی شد (نقل از پلایان و همکاران، ۲۰۰۶)، بر این فرض پایه ریزی شد که قطرات پخش شده ای که بر روی یک صفحه آهنی فرود می آیند، باعث زنگ زدگی آن صفحه می شوند. اندازه نقاط زنگ زده متناسب با اندازه قطرات آب پخش شده از آبپاش می باشند. برای تعیین تناسب بین اندازه نقاط زنگ زده و اندازه قطرات، چند قطره با اندازه های مشخص از ابزارهایی مانند قطره چکان تهیه و محل زنگ زدگی آنها اندازه گیری می -

1 . Stain method
2 . Magarvey

شد. سگینر در سال ۱۹۶۳ (نقل از سادھیر و پاندا، ۲۰۰۰) با انجام آزمایش‌هایی نشان داد که استفاده کنندگان از این روش باید دقت کافی را در تعیین فاصله صفحه آهنی با نازل داشته باشند تا صفحه به اندازه‌ای نزدیک نباشد که ذرات به سرعت حرکت واقعی خود نرسند اما حتی در این صورت نیز با برخورد قطرات و پراکنده شدن آنها بر روی صفحه امکان بروز خطا در اندازه‌گیری‌ها به شدت افزایش می‌یابد.

روش آرد^۱: موقعی که قطرات آب با لایه نازکی از آرد برخورد می‌کنند گوی‌های کوچکی (متشکل از آب و آرد) به وجود می‌آورند که توده آنها و یا قطرشان از نظر آماری به قطر قطرات آب وابسته است. (نقل از پلایان و همکاران، ۲۰۰۶).

عکاسی با دوربین‌های اپتیکی معمولی: هافمن در سال ۱۹۷۷ (نقل از لیلیساند و کیفر، ۱۹۸۷) کاربرد دوربین‌های معمولی را برای اندازه‌گیری قطرات در عکس‌های گرفته شده از آب پخش شده در هوا را پیشنهاد نمود. روش مذکور این مزیت را داشت که امکان اندازه‌گیری مستقیم قطر قطرات را فراهم می‌آورد. اما این روش نیاز به مهارت زیاد عکاسی داشته و عکس‌های حاصل، دارای وضوح کافی برای تفسیر و اندازه‌گیری نمی‌باشند.

روش گاز فلور: کوهل و دی بوئر (۱۹۸۳) روش فلور را ابداع نمودند. در این روش گاز فلور در مسیر حرکت قطرات پخش می‌شود و قطرات آب به آن آغشته شده و بر روی سطحی فرود می‌آیند. سپس این سطح در گرمخانه (آون) خشک شده و قطر ذره حاصل اندازه‌گیری می‌شود. برای این روش‌ها، نیاز به واسنجی نتایج بر اساس قطراتی با قطر معلوم وجود دارد. بر اساس آزمایش‌های انجام

یافته مشخص شده است که منحنی‌های واسنجی از یک بسته گاز فلور نسبت به بسته‌ای دیگر حتی با علامت تجاری یکسان، متفاوت است. از عیب‌های دیگر این روش این است که منحنی‌های واسنجی برای ذراتی با قطر کوچک بسیار مشکل است.

روش مومنتوم^۱: این روش شامل مجموعه‌ای از روش‌هاست که بر اساس کاربرد القا کننده‌های فشاری و سنسورهای پیزوالکتریک انرژی جنبشی حاصل از قطرات را اندازه‌گیری و با توجه به میزان مومنتوم وارده بر سطح، اندازه قطره تعیین می‌شود. این روش، اغلب برای بارندگی‌های طبیعی به کار می‌رود (جوز و والدوگل، ۱۹۶۷). عیب عمده‌ای که بر این روش وارد شده این است که در برخورد چند قطره به یک محدوده کوچک، در اندازه‌گیری مومنتوم خطا ایجاد شده و اندازه یک قطره بزرگ تشخیص داده می‌شود (سالوادور و همکاران، ۲۰۰۹).

به دام اندازی قطرات در روغن^۲: تیت در سال ۱۹۶۱ (نقل از ایگل و مور، ۱۹۸۳)، روشی برای جمع کردن (محبوس کردن) قطرات آب در مایعی با چگالی کافی و غیرقابل اختلاط (روغن) با آب ابداع نمود. روغن، قطرات آب را در بر می‌گیرد، هم مانع تبخیر آنها و هم از پیوستن آنها جلوگیری می‌کند. با توجه به نیروی کشش سطحی بالای آب، قطرات شکل دایره‌ای خود را حفظ کرده و با ابزاری مانند میکروسکوپ اندازه قطرات تعیین می‌شود. ایگل و مور (۱۹۸۳) نیز برای اندازه‌گیری قطرات باران از همین روش استفاده نمودند. این روش، روشی پر زحمت است و نیاز به ابزارهای گران قیمت و مهارت در عمل دارد.

1 . Momentum method

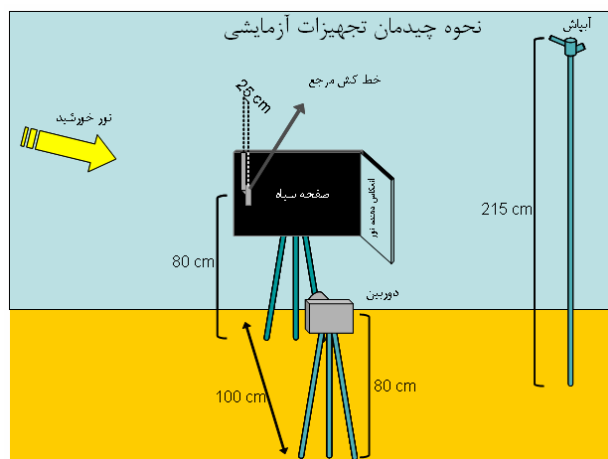
2 . Oil immersion method

روش پرتو لیزر: این روش توسط کین کید و همکاران (۱۹۹۶) معرفی شد. مبنای این روش پراکنش پرتو لیزر در برخورد با قطرات آب است. هنگامی که پرتو لیزر از میان مجموعه‌ای از قطرات آب عبور می‌کند از مسیر خود منحرف می‌شود، میزان این انحراف با اندازه قطره‌ای که پرتو با آن برخورد کرده متناسب است. با ثبت این انحراف و استفاده از منحنی سنجه اندازه قطرات تعیین می‌شود. حسن این روش این است که به صورت خودکار مقادیر انحراف و حتی اندازه قطرات را تعیین می‌کند. همچنین قادر است در زمان کوتاهی تعداد زیادی اندازه‌گیری انجام دهد. عیب اصلی روش مذکور خطایی است که در هنگام همپوشانی یا حرکت دو یا چند قطره در کنار هم است. در این حالت سیستم به جای چند قطره یک قطره بزرگ اندازه‌گیری می‌کند. از عیب‌های دیگر این روش گران بودن تجهیزات، نیاز به مهارت در راه اندازی سیستم و خطرات احتمالی پرتو لیزر در صورت سهل انگاری در زمان آزمایش می‌باشد.

ظرف جمع آوری آب مجهز به چشمی اپتیک مادون قرمز: این وسیله که توسط مونتر و همکاران (۲۰۰۳) معرفی شد، بر این مبنا طراحی شده است که پرتو مادون قرمز هنگام عبور از میان قطرات آب ضعیف‌تر می‌شود. بنابراین اگر یک چشمه تولیدکننده پرتو مادون قرمز در یک طرف و حسگر یا نشانگر نور مادون قرمز در طرف دیگر قرار گیرد، اگر قطره‌ای از میان این دو عبور کند با توجه به میزان کاهش شدت نور مادون قرمز می‌توان اندازه (قطر) قطره را تعیین نمود.

روش عکاسی با دوربین دیجیتالی معمولی^۱: این روش توسط سالوادور و همکاران (۲۰۰۹) معرفی شد. در این روش از قطرات پخش شده از آبپاش‌ها عکس برداری با سرعت پایین (یک صدم

ثانیه) انجام و با استفاده از اندازه‌گیری‌های حاصل بر روی تصاویر مشخصات قطرات تعیین می‌شود. یک دوربین دیجیتال حرفه‌ای برای این منظور کافی است. به عنوان نمونه ابداع کنندگان این روش از دوربین نیکون مدل D80 برای این منظور استفاده نمودند. مطابق شکل (۲-۱)، یک صفحه سیاه و مات در فاصله ۸۰ سانتی‌متری قرار گرفت و دوربین به فاصله ۵۵ سانتی‌متری فوکوس نمود. یعنی جایی که یک خط کش میلی‌متری توسط دسته‌ای ۲۵ سانتی‌متری به صفحه سیاه متصل شده بود تا به عنوان مرجعی برای اندازه‌گیری طول‌های مورد نظر در داخل تصاویر بکار رود.



شکل (۲-۱) شمای کلی و نحوه قرارگیری تجهیزات مورد استفاده در روش عکاسی با سرعت پایین

در عکاسی با سرعت پایین قطرات آب به صورت استوانه‌هایی ظاهر می‌شوند (شکل (۳-۱)). پس از انجام تغییراتی در کتراست و میزان روشنایی تصاویر مشخصات قطرات از جمله قطر، طول، و زاویه آنها نسبت به افق تعیین می‌شود. سرعت قطرات از تقسیم طول ظاهر شده قطرات در تصاویر (طول استوانه‌ها) به سرعت شاتر دوربین (سرعت عکس برداری) به دست می‌آید.