

ارزیابی مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی جریان خروجی از قطره‌چکان‌ها

مهدی دلقندی^{۱*}، سید حسین حسینی^۲، زهرا گنجی نوروژی^۳

۱. استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰)

چکیده

قطره‌چکان وسیله‌ای برای کاهش فشار و خروج آب با مقدار ثابت از درون مجاری باریک و طولانی مسیر (که آب تحت فشار درون آن‌ها جاری است) می‌باشد. از این رو مهمترین بخش سیستم آبیاری قطره‌ای محسوب می‌شود. از طرفی دیگر، تولید قطره‌چکان مناسب زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌تواند ابزار مفیدی برای کاهش هزینه و زمان ساخت قطره‌چکان‌ها محسوب گردد. با این هدف، در مطالعه حاضر سه نوع قطره‌چکان با هندسه مجاری متفاوت انتخاب و ابعاد مجاری آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) اندازه‌گیری گردید. میزان دبی خروجی قطره‌چکان‌ها با استفاده از مدل جریان آرام و ۴ مدل آشفتگی ($k-\epsilon$ استاندارد، $k-\omega$ استاندارد، RNG $k-\epsilon$ و Realizable $k-\epsilon$) شبیه‌سازی شد و با نتایج حاصل از آزمایشگاه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که به طور کلی تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌های مختلف آشفتگی و آرام وجود دارد، اما در بین مدل‌های مورد بررسی، $k-\omega$ استاندارد و $k-\epsilon$ استاندارد به ترتیب بهترین و بدترین نتایج را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه نمودند به طوری که میانگین NRMSE سه قطره‌چکان، برای دو مدل $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\omega$ استاندارد، به ترتیب ۷/۵۷ و ۳/۵۶ درصد تعیین گردید. همچنین با توجه به پایین بودن اعداد رینولدز، مدل آرام نیز نتایج خوبی ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: آرام، آشفته، قطره‌چکان، مدل، هیدرولیک محاسباتی

مقدمه

قطره‌چکان به منظور کاهش فشار داخل لوله لترال و خروج یکنواخت آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین کیفیت قطره‌چکان، مهمترین عامل مؤثر در بالا رفتن کارایی یک سیستم آبیاری قطره‌ای محسوب می‌شود. ساخت قطره‌چکان مناسب و کارا فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد (Zhang et al., 2007). از طرف دیگر مطالعه رفتار جریان در حین عبور از مجاری قطره‌چکان‌ها به خاطر اندازه کوچک و ساختار پیچیده آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) به دلیل هزینه پایین، سرعت بالا و در اختیار قرار دادن اطلاعات کامل می‌تواند گزینه مناسبی برای کمک به کاهش روند تولید و مطالعه هیدرولیک جریان در قطره‌چکان‌ها باشد (Delghandi et al., 2010). در مطالعه هیدرولیک جریان در مجاری قطره‌چکان‌ها توسط CFD، با توجه به نوع جریان از مدل‌های آرام و

آشفته می‌توان استفاده نمود. مدل‌های آشفته (اغتشاش) برای سادگی کار و جلوگیری از حل جریان با در نظر گرفتن نوسانات در تمامی ابعاد به کار می‌روند. اما تاکنون یک مدل اغتشاش جامع که بتوان برای تمام جریان‌ها و دماها و کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی با اطمینان و دقت بالا از آن استفاده کرد وجود ندارد. به طور کلی می‌توان مدل‌های اغتشاش را به دو دسته کلی مدل‌های بر پایه لزجت گردابه‌ای و مدل‌های بر پایه تنش رینولدزی تقسیم نمود. مدل‌های بر پایه لزجت گردابه‌ای خود به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های دو معادله‌ای مانند $k-\epsilon$ و $k-\omega$ اشاره کرد. در مدل‌های دو معادله‌ای در واقع از دو معادله جهت مدل‌سازی لزجت گردابه‌ای استفاده می‌شود (Celik, 1999). بررسی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که نمی‌توان از یک مدل اغتشاش برای تمامی مسائل مهندسی و تمامی کاربردها استفاده کرد و انتخاب مدل اغتشاش به عوامل زیادی از جمله فیزیک جریان (تراکم‌پذیری، میزان اغتشاشات، وجود یا عدم وجود چرخش، گرادپان شدید و ...) امکان یا عدم امکان استفاده از توابع دیواره، میزان دقت مورد نیاز و ... بستگی دارد (Saadati and Zeinolabedini, 2015).

* نویسنده مسئول: delghandi@gmail.com

1. Computational Fluid Dynamics

می‌باشند، نتیجه گرفتند که اگر زوایای انحنای مجاری قطره-چکان بیشتر باشد خطر گرفتگی کمتر خواهد بود. Lu *et al.* (2013) در تحقیقی جریان درون قطره‌چکان‌ها را با سه مدل $k-\varepsilon$ ، $k-\omega$ و مدل تنش رینولدز^۲ (RSM) شبیه‌سازی نمودند و نتیجه گرفتند که هر سه مدل دبی قطره‌چکان‌ها را بیشتر از مقدار مشاهداتی (۴ تا ۱۴ درصد) برآورد نمودند ولی نتایج مدل $k-\varepsilon$ نسبت به دو مدل دیگر خطای بیشتری را نشان داد و دو مدل $k-\omega$ و RSM نتایج تقریباً مشابهی را ارائه کردند ولی با این وجود دقت نتایج مدل RSM حدود نیم درصد از مدل $k-\omega$ بالاتر بود. Fang *et al.* (2015) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل $k-\varepsilon$ جریان داخل مجاری یک قطره‌چکان را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند هر چه زاویه داخلی انحنای مجاری کمتر باشد قطره‌چکان از نظر اتلاف انرژی دارای کارایی بیشتری می‌باشد، ولی از نظر گرفتگی، حساسیت بیشتری خواهد داشت. در مطالعه‌ای دیگر Wu *et al.* (2013) برای شبیه‌سازی جریان درون مجاری قطره‌چکان‌ها از دو مدل $k-\varepsilon$ استاندارد و گردابه‌های بزرگ (LES) استفاده نمودند و عنوان کردند که نتایج حاصل از مدل LES^۳ نسبت به مدل $k-\varepsilon$ دارای دقت بالاتری می‌باشد. همچنین Wei *et al.* (2012) برای شبیه‌سازی جریان از مدل $k-\varepsilon$ RNG و مدل آرام استفاده کرده و بیان نمودند مدل $k-\varepsilon$ RNG نتایج منطقی‌تری ارائه می‌دهد. Celik *et al.* (2011) برای طراحی قطره‌چکان از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی کمک شایانی به کاهش هزینه و تسریع ساخت قطره‌چکان‌ها می‌نماید. در بیشتر این مطالعات، شبیه‌سازی جریان درون قطره‌چکان‌ها با استفاده از مدل آرام و یا یک مدل آشفتگی صورت پذیرفته است و اکثراً مدل $k-\varepsilon$ استاندارد را برای مطالعه خود انتخاب نمودند. از این رو این مطالعه با هدف بررسی کارایی مدل‌های مختلف آشفتگی و جریان آرام در شبیه‌سازی جریان در میکرو مجاری صورت پذیرفت که برای این منظور از مدل‌های موجود در نرم‌افزار FLUENT 6.3 استفاده شد.

مواد و روش‌ها

انتخاب قطره‌چکان‌ها

در این تحقیق با بررسی انواع مختلف قطره‌چکان‌های موجود در بازار یک نوع قطره‌چکان نوار تیپ (A) و دو نوع قطره‌چکان

تعدادی از محققان مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند. Qingsong *et al.* (2006) در تحقیقی به شبیه‌سازی جریان درون قطره‌چکان‌های گردابه‌ای پرداختند و عنوان نمودند که افت فشار عمدتاً در حفره‌های مخروطی شکل مجاری اتفاق می‌افتد. Wang *et al.* (2006) در تحقیقی با استفاده از مدل ناپایدار و چند فازی حجم سیال^۱ (VOF) به شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار در مجاری قطره‌چکان‌ها پرداختند. و نتیجه گرفتند که مدل ناپایدار جزئیات بیشتری از جریان سه‌بعدی و پیچیده جریان درون مجاری قطره‌چکان را ارائه می‌دهد. Zhang *et al.* (2007) تحقیقی در مورد هیدرولیک جریان در مجاری مارپیچ قطره‌چکان‌ها انجام دادند. در این تحقیق که برای شبیه‌سازی جریان از یک مدل فیزیکی با بزرگ‌نمایی ۱۵ برابر استفاده شده بود رابطه بین سرعت جریان و فشار در مجراهای مارپیچ و کوچک قطره‌چکان‌ها توسط دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) تعیین شد. نتایج این تحقیقات نشان داد که در فشارهای ۴۰ تا ۱۶۰ کیلو پاسکال، مدل آشفته نسبت به مدل جریان آرام نتایج بهتر و دقیق‌تری ارائه می‌دهد. Dazhuang *et al.* (2007) برای آنالیز تأثیر پارامترهای هندسی قطره‌چکان‌ها از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد زوایای بزرگتر دندان‌ها، تأثیر زیادی روی افزایش کارایی هیدرولیکی (میزان افت مناسب فشار) قطره‌چکان‌ها دارد. Li *et al.* (2008) تحقیقی در رابطه با ردیابی ذرات درون مجاری مارپیچ قطره‌چکان با استفاده از CFD انجام دادند و عنوان نمودند که اختلاف بین دبی‌های حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کم (۱۰ درصد) بوده است. Delghandi, *et al.* (2010) کارایی نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT را در شبیه‌سازی جریان در مجاری ریز و مارپیچ مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند FLUENT نرم‌افزاری کارا جهت شبیه‌سازی جریان درون مجاری قطره‌چکان‌های مورد بررسی می‌باشد. Fan *et al.* (2014) برای طراحی یک قطره‌چکان جدید از دینامیک سیالات محاسباتی کمک گرفتند ایشان برای شبیه‌سازی جریان درون مجاری قطره‌چکان‌ها از معادله $k-\varepsilon$ استفاده کردند و ابعاد بهینه مجاری قطره‌چکان را از نظر اتلاف حداکثر انرژی و عدم گرفتگی تعیین کردند. ایشان برای بررسی تعیین ابعاد بهینه مجاری از نظر عدم گرفتگی، زوایای انحنای قطره‌چکان‌ها را افزایش داده و با شبیه‌سازی مجدد مشاهده نمودند منطقه‌ای که در آن گردابه‌ها تشکیل می‌شوند کوچکتر شده و از آنجایی که گردابه‌ها محل ته‌نشین شدن ذرات معلق

2. Reynolds Stress Model
3. Large Eddy Simulation

1. Volume of Fluid

واحد بار به متر ارتفاع آب می‌باشد. برای اعمال فشارهای ۲ و ۴ متر از سیستم فشار ثابت (متشکل از یک بالابر هیدرولیکی مجهز به یک مخزن آب که توانایی ایجاد فشار تا ۵ متر ارتفاع آب را دارد) و برای بقیه فشارها از یک الکتروپمپ استفاده گردید که تصویر آن در شکل (۱) ارائه شده است. هر آزمایش در سه تکرار انجام و هر تکرار به مدت ۳۰ دقیقه به طول انجامید. مقدار آب خروجی از قطره‌چکان‌ها توسط بشرهای مدرج اندازه‌گیری و دبی قطره‌چکان‌ها در فشارهای مختلف، با میانگین‌گیری از نتایج سه تکرار تعیین گردید.

تیپ پلاک‌دار (B و C) برای مطالعه انتخاب گردید طول مجرای عبور آب با اندازه‌گیری، برای قطره‌چکان A برابر ۱۸ سانتی‌متر، برای قطره‌چکان‌های B و C بسیار کوتاهتر و به ترتیب برابر با ۲۷ و ۲۹ میلی‌متر تعیین گردید.

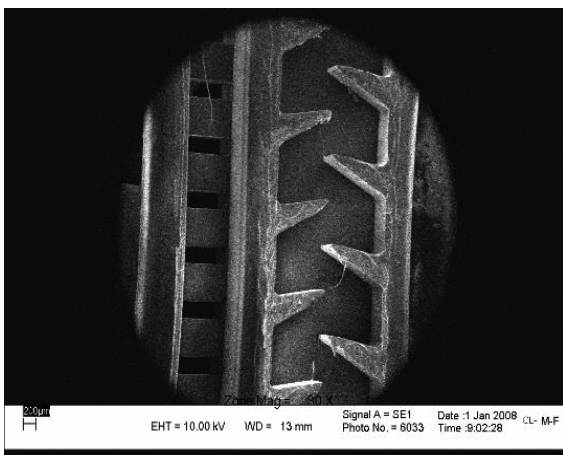
تعیین دبی قطره‌چکان‌ها در آزمایشگاه

برای تعیین دبی قطره‌چکان‌ها در فشارهای مختلف، تعدادی آزمایش بر اساس ضوابط ارائه‌شده در استاندارد ISO9261 صورت گرفت (ISO, 2004). بر اساس این استاندارد، ۶ فشار ۲، ۴، ۶/۱، ۹/۲، ۱۲/۲۵ و ۱۶/۳۳ متر ارتفاع آب برای انجام آزمایش انتخاب شدند؛ اعشاری بودن اعداد نیز به دلیل تبدیل



شکل ۱

در شکل‌ها (۳) تا (۸) و جدول (۱) ارائه گردیده است؛ که در شکل‌های (۶، ۷ و ۸)، d عمق جریان و w عرض جریان می‌باشد.



شکل ۲. تصویر پلان قطره‌چکان B توسط SEM

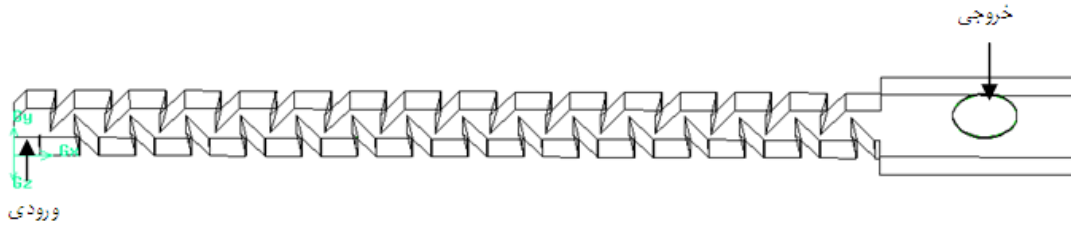
تعیین اندازه مجاری قطره‌چکان‌ها

بعد از تعیین دبی قطره‌چکان‌ها (تحت فشارهای مختلف) در آزمایشگاه، نمونه‌های قطره‌چکان‌های انتخابی تخریب و چندین برش طولی و عرضی از مجاری عبور آب در آن‌ها تهیه گردید. برای تعیین اندازه مجاری، از برش‌های تهیه شده عکس‌برداری شد. بدین منظور از میکروسکوپ الکترونی^۱ (SEM) استفاده گردید. تصاویر تهیه‌شده توسط SEM دارای بزرگ‌نمایی بین ۳۰ تا ۷۰ برابر بودند که یک نمونه از این تصاویر در شکل (۲) نمایش داده شده است. با میانگین‌گیری از ابعاد تصاویر مربوط به مجاری هر قطره‌چکان، اندازه مجاری آن‌ها تعیین گردید. پس از تعیین اندازه مجاری، شکل و هندسه آن‌ها توسط نرم‌افزار Solid work ترسیم شد که تصویر و اندازه‌های مربوط به مجاری

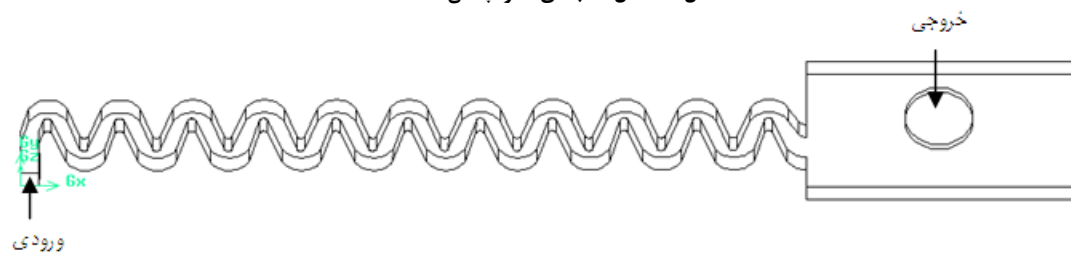
1. Scanning Electronic Microscope



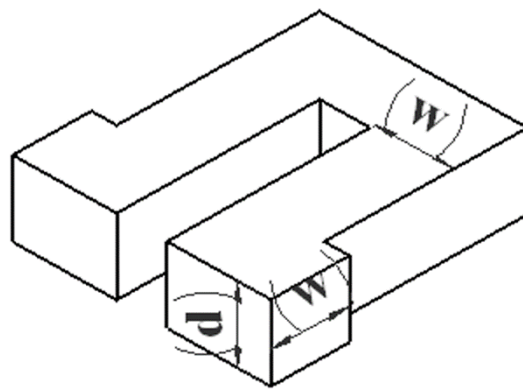
شکل ۳. شکل دوبعدی قطره چکان A



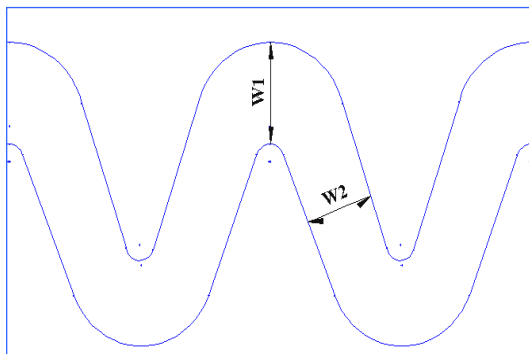
شکل ۴. شکل سه بعدی قطره چکان B



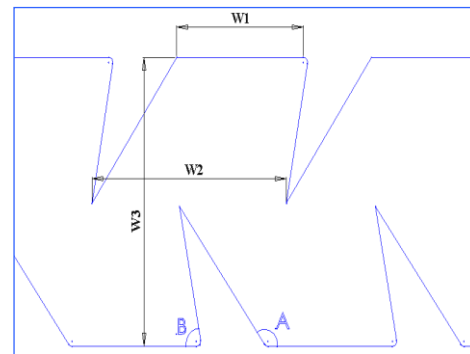
شکل ۵. شکل سه بعدی قطره چکان C



شکل ۶. شکل سه بعدی از یک واحد قطره چکان A ترسیم شده توسط نرم افزار Solid work



شکل ۸- شکل دوبعدی از یک واحد قطره چکان B



شکل ۷- شکل دوبعدی از یک واحد قطره چکان A

جدول ۱. ابعاد قطره‌چکان‌ها

B (deg)	A (deg)	W3(mm)	W2(mm)	W1(mm)	W (mm)	d(mm)	نوع قطره‌چکان
—	—	—	—	۰/۹۳۰	۱/۰۱۴	۰/۴۹۱	A
۸۲	۱۲۴	۱/۷۴۷	۱/۳۸۶	۰/۹۳۰	—	۰/۶۵۸	B
—	—	—	۰/۵۶۰	۰/۵۱۴	—	۰/۶۲۷	C

تشخیص رژیم جریان

برای شروع مدل‌سازی بهتر است در ابتدا عدد رینولدز محاسبه و نوع جریان از نظر وضعیت آشفتگی مشخص گردد. برای تشخیص رژیم جریان، از عدد رینولدز استفاده می‌شود. با تعیین شعاع هیدرولیکی قطره‌چکان‌ها، مقدار عدد رینولدز با فرض مقدار 998 Kg/m^3 برای جرم مخصوص و 0.01003 kg/m.s برای لزجت در دبی‌های مختلف، بین ۵۱ تا ۴۰۱ متغیر می‌باشد. بر طبق هیدرودینامیک سنتی، برای این بازه از عدد رینولدز، جریان آرام می‌باشد، اما تعدادی از مطالعات از جمله *Pfahler et al.* (1990) *al.*، *Harley et al.* (1995) و *Kandilkar et al.* (2003) نشان دادند که تبدیل جریان آرام به آشفتگی در چنین مجاری کوچک و زیگزاکی می‌تواند در عدد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۷۰۰ رخ دهد. بنابراین در این مقاله، شبیه‌سازی جریان با هر دو فرض آرام و آشفتگی بودن جریان درون قطره‌چکان‌ها صورت می‌گیرد.

معادلات حاکم بر جریان آرام

جریان آرام به جریان‌های با عدد رینولدز پایین اطلاق می‌شود که با معادلات ناویر-استوکس مدل می‌شوند. در این جریان‌ها انتقال انرژی توسط اندرکنش مولکولی یا پخش انجام می‌شود. در این جریان نیز تحریکات خارجی یا اغتشاشات وجود دارند؛ اما پایین بودن عدد رینولدز که نشان از غلبه نیروهای ویسکوز بر نیروهای اینرسی دارد موجب می‌شود که این تحریکات توسط نیروهای ویسکوز میرا شده و جریان به حالت آرام باقی بماند. تنش برشی دیواره و انتقال حرارت در این رژیم جریان کم بوده و در صورت وجود گرادیان فشار معکوس، مستعد جدایش می‌باشد.

برای حل جریان آرام از دو معادله پیوستگی و مومنتم استفاده می‌گردد.
معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

معادله مومنتم

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu_e (\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j})] \quad (\text{رابطه ۲})$$

معادلات حاکم بر جریان آشفتگی

برای جریان‌های آشفتگی، علاوه بر معادلات پیوستگی و مومنتم، از معادلات کمکی دیگری نیز استفاده می‌گردد. از جمله مهمترین این معادلات می‌توان به مدل‌های دو معادله‌ای آشفتگی اشاره نمود (Fluent, 2005).

مدل‌های دو معادله‌ای

پرکاربردترین مدل‌های اغتشاشی، مدل‌های دو معادله‌ای هستند که اساس کار آن‌ها در ایجاد ارتباط بین لزجت اغتشاشی با مقیاس طولی و سرعت اغتشاشی است. دو معادله انتقال جداگانه برای محاسبه این دو مقیاس نوشته می‌شود. تمام این مدل‌ها از انرژی جنبشی اغتشاشی K به عنوان اولین متغیر استفاده می‌کنند. بسته به اینکه معادله انتقال دوم برای چه متغیری نوشته شود، مدل‌ها با یکدیگر تفاوت دارند (Bredberg, 2001). مدل‌های دو معادله‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند عبارتند از:

مدل‌های k-ε

در این مدل‌ها فرض بر این است که جریان به شدت مغشوش بوده و اثر لزجت گردابه‌ای به لزجت مولکولی غالب است. این مدل در نرم‌افزار FLUENT شامل سه زیر مدل می‌باشد. در هر سه حالت این مدل، دو معادله انتقال، یکی برای k که معیاری از نوسانات سرعت است و دیگری ϵ که معرف نرخ اتلاف نوسانات سرعت است نوشته می‌شود. تفاوت عمده سه زیر مدل در روش محاسبه لزجت گردابه‌ای، عدد پرانتل اغتشاشی که پخش k و ϵ را کنترل می‌کند و ترم‌های تولید اتلاف در معادله انتقال ϵ می‌باشد. این مدل شروع جدایش را دیر و مقدار آن را کم تخمین می‌زند.

مدل Standard k-ε

استفاده از این مدل در جریان‌های کاملاً مغشوش پیشنهاد می‌شود و در برخی شرایط نظیر جریان با گرادیان فشار زیاد و یا جریان‌های چرخشی و دورانی توصیه نمی‌شود. دقیق نبودن معادله انتقال، ترم تلفات اغتشاشی (ϵ) و همچنین افزایش آن در نزدیکی مرزهای جامد (در مناطق با اعداد رینولدز پایین) از دیگر مشکلات این مدل است. در حقیقت مقدار k در نزدیکی

می‌کند؛ بنابراین مدل RNG در جریان‌هایی که اثرات کرنش شدید و انحنای خطوط جریان وجود دارد عملکرد بهتری نسبت به مدل k-ε استاندارد نشان می‌دهد.

(رابطه ۸)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] +$$

(رابطه ۹)

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon$$

تفاوت اصلی بین مدل RNG و مدل استاندارد، در ترم اضافی در معادله انتقال ε است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3 k} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$$

α_k و α_ε معکوس اعداد پیرانتل اغتشاشی برای k و ε می‌باشند و $C_{3\varepsilon}$ عددی ثابت می‌باشد.

ضرایب مدل $k-\varepsilon$ RNG به شرح زیر می‌باشد:

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, \alpha_s = 0.07, C_{2\varepsilon} = 1.68, C_\mu = 0.0845, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012$$

مدل Realizable K-ε

این مدل نیز در مواردی که جریان تحت چرخش و انحنای شدید قرار دارد عملکرد بهتری نسبت به مدل استاندارد از خود نشان می‌دهد. همچنین در شرایط وجود جریان برگشتی پیچیده و یا جریان با لایه مرزی تحت گرادیان فشار معکوس یا جدایش، نتایج بهتری از سایر مدل‌های K-ε ارائه می‌دهد. دقت نتایج این مدل نیز مانند مدل RNG در جریان‌های شامل جدایش، از مدل‌های K-ω کمتر است این مدل نیز مانند K-ε استاندارد مشکلات مربوط به استفاده در مناطق با اعداد رینولدز پایین را دارد. معادله انتقال این مدل مشابه مدل استاندارد بوده اما ضرایب آن متفاوت است. معادله انتقال ε نیز که در آن C_1 یک ضریب است به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] +$$

(رابطه ۱۱)

$$\rho C_1 S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

دیواره به نحوی به سمت صفر میل می‌کند که شبیه‌سازی در نزدیکی دیواره به وسیله شبکه موجود ممکن نخواهد شد و برای غلبه بر آن باید از توابع دیواره یا توابع میرا کننده استفاده نمود. نیاز به استفاده از توابع دیواره در این مدل و دقت کم این مدل در نزدیکی دیواره، از مشکلات این مدل به حساب می‌آید. استفاده از تابع دیواره نیز در حضور جدایش، خود باعث ایجاد خطا می‌گردد. لازم به ذکر است که مشکلات بوجود آمده برای k و ε ، در مجاورت دیواره با شرط عدم لغزش بوجود می‌آید. معادلات حاکم برای این جریان عبارتند از: (Meneveau and Katz, 2000)

معادله K

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_K - \rho \varepsilon \quad (\text{رابطه ۳})$$

معادله ε

(رابطه ۴)

$$\rho \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} G_K - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$$

$$\mu_\varepsilon = \mu + \mu_t \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho K^2}{\varepsilon} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$G_K = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این معادلات (ν تا γ)، k : انرژی سینتیک آشفتگی، ε : سرعت اتلاف انرژی، u : سرعت جریان، p : فشار، x : بردار مکان، ρ : دانسیته سیال، μ : لزجت سیال، C_μ ، $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، C_K و σ_ε ضرایب تصحیح هستند. ضرایب فوق بنا به پیشنهاد Launder and Spalding (1974) به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند. $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ، $C_\mu = 0.09$ ، $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ، $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ، $\sigma_k = 1.0$

مدل RNG K-ε

این مدل تا حد زیادی شبیه مدل k-ε استاندارد می‌باشد. در این مدل ساختارهای اغتشاشی بزرگ‌مقیاس، بیشتر از ساختارهای کوچک‌مقیاس در حل جریان تأثیر دارند. در جریان‌های با اعداد رینولدز پایین و یا جریان‌های پیچیده مانند جریان‌هایی که شامل کرنش (کشیدگی) شدید، چرخش، انحنای زیاد خطوط جریان، جدایش، جریان‌های ثانویه، توسعه یا پخش جریان جت روی سطح هستند دقت این مدل نسبت به مدل استاندارد بالاتر است که دلیل آن اضافه شدن ترم زیر در معادله انتقال ε می‌باشد. این مدل برای شرایطی که جریان به شدت تحت کرنش قرار دارد و یا انحنای خطوط جریان شدید است با ارائه لزجت اغتشاشی کمتر، نتایج بهتری نسبت به مدل k-ε استاندارد ارائه

(رابطه ۱۴)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{ob}$$

در روابط فوق G_ω و Y_ω به ترتیب ترم تولید و اتلاف ω به دلیل اغتشاشات می‌باشند. G_{ob} ترم تولید ω به دلیل نیروی بویانسی و S_ω تابع چشمه‌ای است که می‌تواند توسط کاربر وارد شود. پارامترهای معادله انتقال k همانند مدل $k-\varepsilon$ می‌باشد. Γ_k و Γ_ω به ترتیب پخش مؤثر k و ω بوده که توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند:

(رابطه ۱۵)

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \sigma_k = \sigma_\omega = 2.00, \mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$$

در این مطالعه با توجه به کمی تأثیر وزن آب در مقایسه با فشار آب، تأثیر وزن آب نادیده گرفته شد. به علاوه آب ماده‌ای تراکم ناپذیر و جریان به صورت دایمی فرض شد و از تأثیر کشش سطحی آب صرف نظر گردید. بردارهای سرعت در جدارها صفر در نظر گرفته شد و فرض عدم لغزش در دیواره‌ها نیز لحاظ گردید.

شبیه‌سازی جریان درون مجاری قطره‌چکان‌ها

برای شبیه‌سازی جریان توسط مدل‌های مذکور از نرم‌افزار FLUENT 6.3 استفاده گردید. بدین منظور هندسه مجاری عبور آب توسط نرم‌افزار Solid work ترسیم شده و جهت شبکه‌بندی وارد نرم‌افزار GAMBIT گردید که برای شبکه‌بندی از شبکه‌های چهار وجهی غیر منتظم استفاده شد و به عنوان نمونه شبکه‌بندی قطره‌چکان در شکل (۹) ارائه گردید. در حل مدل، اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی مورد بررسی قرار گرفت که مشخص گردید تفاوت معنی‌داری بین نتایج حاصل از شبکه‌های ریز و متوسط وجود ندارد و انتخاب شبکه ریز تنها مدت زمان اجرای برنامه را افزایش می‌دهد. بنابراین برای تمام قطره‌چکان‌ها ابعاد شبکه‌ای انتخاب شد که تا حد متوسط ریز و یکنواخت باشد. تعداد سلول‌های شبکه‌بندی بسته به نوع قطره‌چکان بین ۱۸۰ هزار تا ۳۰۰ هزار سلول متغیر بود و ضریب زبری برای تمام قطره‌چکان‌های مورد آزمایش، ضریب زبری پلاستیک، یعنی عدد 0.003 سانتیمتر در نظر گرفته شد. FLUENT 6.3 از روش حجم محدود برای حل معادلات استفاده می‌کند. شرایط مرزی مورد استفاده در نرم‌افزار عبارت بودند از: ۱- فشار در ورودی قطره‌چکان‌ها ثابت در نظر گرفته شد. ۲- فشار در خروجی قطره‌چکان‌ها به دلیل تخلیه آب به اتمسفر برابر با صفر فرض شد. ۳- بردارهای سرعت در جدارها صفر در نظر گرفته شد. برای حل مدل از ۶ فشار اعمالی به قطره‌چکان‌ها در

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

ضرایب این مدل به شرح زیر می‌باشد:

$$C_{2\varepsilon} = 1.9, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

مدل k- ω

مدل‌های آشفتگی مبتنی بر معادله ε شروع جدایش را خیلی دیر و مقدار آن را کمتر پیش‌بینی می‌کنند. برای رفع این مشکل می‌توان از مدل‌های خانواده K- ω استفاده نمود که تخمین دقیقی از پدیده جدایش را ارائه می‌کنند. مدل‌های K- ω ذاتاً مدل‌های اعداد رینولدز پایین بوده و برای محدوده وسیعی از جریان‌های لایه مرزی شامل گرادیان فشار، دقیق و پایدار می‌باشند. در این مدل به جای ε به تحلیل $\omega = \frac{\varepsilon}{k} \approx \frac{1}{\text{time}}$ که به آن نرخ ویژه اتلاف گفته می‌شود و مقیاسی از معکوس زمان اغتشاشات (فرکانس اغتشاشات) در نزدیکی مرز جامد است، پرداخته می‌شود. مزیت این روش، بهبود محاسبات در نزدیکی دیواره برای اعداد رینولدز پایین است. به علاوه این مدل فاقد تابع میرا کننده غیرخطی پیچیده در نزدیکی دیواره (که برای مدل K- ε نیاز بود) می‌باشد؛ بنابراین دقت و پایداری بالاتری خواهد داشت (Bates et al., 2005)

مدل k- ω استاندارد

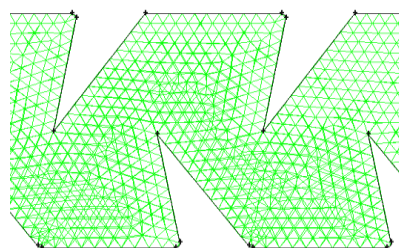
مزیت این مدل در بهبود محاسبات و نزدیکی دیواره برای اعداد رینولدز پایین (زیر لایه لزج) بدون نیاز به اعمال تابع دیواره می‌باشد. عملکرد این مدل در لایه مرزی جریان‌های محصور بر دیواره، وجود گرادیان فشار معکوس و جریان‌های با اعداد رینولدز پایین، بهتر از مدل‌های k- ε می‌باشد. مشکل اصلی مدل k- ω استاندارد حساسیت بیش از حد آن به شرایط جریان آزاد است. به علاوه بسته به مقدار ω تعیین شده در ورودی، نتایج مدل می‌تواند متفاوت باشد. در نظر نگرفتن انتقال تنش برشی و اغتشاشی در این مدل باعث تخمین بیش از حد لزجت گردابه‌ای شده و باعث می‌گردد شروع جدایش و مقدار آن اندکی زودتر و بیشتر تخمین زده شود. از این مدل برای جریان‌های لایه مرزی پیچیده استفاده می‌شود. این مدل نسبت به مدل k- ε با دقت بیشتری نقطه شروع و مقدار جدایش جریان در حضور گرادیان فشار نامطلوب را پیش‌بینی می‌کند. همچنین از این مدل برای پیش‌بینی گذار نیز استفاده می‌شود.

این مدل بر پایه دو معادله انتقال برای k و ω بنا شده است که این معادلات در زیر آورده شده است.

(رابطه ۱۳)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k + S_k + G_b$$

آزمایشگاه استفاده گردید. اطلاعات کامل تر در مورد حل عددی، در مقاله (Delghandi et al. (2010 ارائه گردیده است.



شکل ۹. شبکه ایجاد شده برای قطره چکان B

ارزیابی مدل

برای مقایسه نتایج حاصل از مدل های مختلف با نتایج آزمایشگاه از برازش رگرسیونی (رابطه ۲۱) و آماره های میانگین ریشه دوم خطا^۱ (RMSE)، (RMSE) نرمال شده (NRMSE) و ضریب تعیین^۳ (R²)، استفاده گردید.

$$Y = \lambda X \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

که در رابطه (۱۶)، X و Y به ترتیب مقادیر حاصل از آزمایشگاه و مدل های مختلف و λ شیب بهترین خط برازش داده شده می باشد. $\lambda < 1$ نشان دهنده مقادیر کمتر Y نسبت به X و $\lambda > 1$ نشان دهنده مقادیر بیشتر Y نسبت به مقادیر X می باشد. بر اساس برازش رگرسیونی فوق، مقدار درصد متوسط خطای نسبی (E_r) توسط رابطه ۱۷ بیان می گردد (Esfandiari

1. Root Mean Square Error
2. Normalized RMSE
3. Coefficient of determination

and Maheshwari, 2001)

$$E_r = |(1 - \lambda)| \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

که در آنها P_i مقادیر شبیه سازی شده، O_i مقادیر اندازه گیری شده (مشاهداتی)، n تعداد و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری ها نشان می دهد. RMSE با نشان دادن مقدار خطا دقت مدل را مورد بررسی قرار می دهد. حداقل مقدار RMSE صفر می باشد که نشان دهنده کارایی عالی و یا خوب مدل در شبیه سازی متغیر مورد بررسی می باشد. RMSE همچنین می تواند با تقسیم شدن به مقدار میانگین داده های مشاهداتی به عنوان RMSE نرمال شده (NRMSE) که ضریبی بدون بعد است تعریف شود (Mattar and Alamoud, 2017).

نتایج و بحث

دبی به دست آمده از آزمایشگاه و مدل های مختلف برای سه قطره چکان های A، B و C به ترتیب در جدول های (۲)، (۳) و (۴) ارائه شده است. مقایسه نتایج مدل های مختلف با نتایج حاصل از آزمایشگاه نیز در جدول (۵) ارائه گردیده است.

جدول ۲. دبی اندازه گیری شده در آزمایشگاه و تخمین زده شده با مدل های مختلف برای قطره چکان A (L/h)

standard k- ω	مدل آرام	standard K- ϵ	RNG K- ϵ	Realizable K- ϵ	آزمایشگاه	فشار (mH ₂ O)
۰/۵۲۶	۰/۵۳۴	۰/۵۲۶	۰/۵۲۶	۰/۵۲۶	۰/۵۶۰	۲
۰/۸۱۶	۰/۸۴۳	۰/۸۲۸	۰/۸۳۴	۰/۸۳۴	۰/۸۲۸	۴
۱/۰۵۸	۱/۰۸۹	۱/۰۸۵	۱/۰۸۷	۱/۰۸۶	۱/۰۲۴	۶/۱
۱/۳۴۲	۱/۳۶۰	۱/۳۷۹	۱/۳۷۷	۱/۳۷۳	۱/۲۹۲	۹/۲
۱/۵۷۰	۱/۵۶۰	۱/۶۱۱	۱/۶۱۰	۱/۶۰۰	۱/۵۷۰	۱۲/۲۵
۱/۸۱۴	۱/۷۷۸	۱/۸۷۱	۱/۸۶۵	۱/۸۴۹	۱/۸۸۳	۱۶/۳۳

جدول ۳. دبی اندازه گیری شده در آزمایشگاه و تخمین زده شده با مدل های مختلف برای قطره چکان B (L/h)

standard k- ω	مدل آرام	standard K- ϵ	RNG K- ϵ	Realizable K- ϵ	آزمایشگاه	فشار (mH ₂ O)
۰/۶۲۷	۰/۶۳۷	۰/۶۶۸	۰/۶۶۳	۰/۶۲۷	۰/۶۴۴	۲
۰/۸۸۵	۰/۸۹۶	۰/۹۴۸	۰/۹۳۴	۰/۹۲۳	۰/۹۱۵	۴
۱/۱۰۳	۱/۱۱۹	۱/۱۷۸	۱/۱۶۱	۱/۱۵۴	۱/۱۰۹	۶/۱
۱/۳۶۴	۱/۳۸۷	۱/۴۵۰	۱/۴۲۳	۱/۳۶۴	۱/۳۳۱	۹/۲
۵۸۵۱	۱/۶۰۵	۱/۶۸۸	۱/۶۴۳	۱/۶۵۹	۱/۵۵۴	۱۲/۲۵
۱/۸۴۳	۱/۸۷۴	۱/۹۴۶	۱/۹۰۰	۱/۹۳۰	۱/۷۳۵	۱۶/۳۳

جدول ۴. دبی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و تخمین زده شده با مدل‌های مختلف برای قطره‌چکان C (L/h)

standard k- ω	مدل آرام	standard K- ϵ	RNG K- ϵ	Realizable K- ϵ	آزمایشگاه	فشار (mH ₂ O)
۱/۱۰۰	۱/۱۲۰	۱/۱۷۰	۱/۱۶۱	۱/۱۴۴	۱/۱۵۰	۲
۱/۵۸۰	۱/۵۸۵	۱/۷۲۳	۱/۷۰۳	۱/۶۷۲	۱/۶۸۸	۴
۱/۹۵۸	۱/۹۵۷	۲/۱۶۵	۲/۱۳۰	۲/۰۹۵	۲/۰۵۴	۶/۱
۲/۴۰۱	۲/۴۱۴	۲/۶۷۷	۲/۶۱۴	۲/۵۸۲	۲/۳۹۰	۹/۲
۲/۷۸	۲/۸۱	۳/۱۰	۳/۰۱	۲/۹۹	۲/۸۴۶	۱۲/۲۵
۳/۲۱۰	۳/۲۵۸	۳/۵۹۰	۳/۴۶۱	۳/۴۶۰	۳/۳۱۲	۱۶/۳۳

جدول ۵. مقایسه نتایج مدل‌های مختلف با نتایج حاصل از آزمایشگاه

مدل آرام	مدل				standard k- ω	
	standard K- ϵ	RNG K- ϵ	Realizable K- ϵ	standard k- ω		
۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	RMSE (l/h)	
۴/۹۴	۴/۰۹	۴/۰۸	۴/۰۰	۳/۳۸	NRMSE	
۰/۷۰	۲/۰۰	۱/۹۰	۱/۴۰	۰/۶۰	E _r	A
۰/۹۹	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۱	۰/۹۹	λ	
۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	R ²	
۰/۰۶۴	۰/۱۱۷	۰/۰۸۸	۰/۰۹۳	۰/۰۴۵	RMSE (l/h)	
۵/۲۷	۹/۶۹	۷/۲۹	۷/۷۱	۴/۱۱	NRMSE	
۳/۸	۸/۸	۶/۵	۶/۱	۲/۴	E _r	B
۱/۰۴	۱/۰۹	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۲	λ	
۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	R ²	
۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۰۸	RMSE (l/h)	
۲/۹۱	۸/۹۳	۵/۹۲	۵/۲۰	۳/۶۲	NRMSE	
۱/۹۰	۸/۰۰	۵/۱۰	۴/۲۰	۲/۹۰	E _r	C
۰/۹۸	۱/۰۸	۱/۰۵	۱/۰۴	۰/۹۷	λ	
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	R ²	

اختلاف ناچیز بین RMSE و NRMSE و همچنین E_r و λ ناشی از گرد کردن رقم سوم اعشار می‌باشد

می‌باشد که دلیل آن بیشتر بر خطای اندازه‌گیری و ترسیم هندسه جریان در این قطره‌چکان بر می‌گردد. در این قطره‌چکان به دلیل پیچیدگی هندسه جریان نسبت به دو قطره‌چکان دیگر، تهیه برش‌های دقیق و زیاد برای ترسیم هندسه جریان مقدور نبود؛ لذا این عامل باعث ایجاد انحراف بیشتر نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی این قطره‌چکان در مقایسه با دو قطره‌چکان دیگر گردید. با توجه به آماره RMSE، NRMSE و E_r می‌توان گفت که در قطره‌چکان A مقادیر خطای همه مدل‌ها نزدیک به هم و در دو قطره‌چکان دیگر اختلاف نتایج مدل‌های مختلف بیشتر می‌باشد. بر اساس مقادیر NRMSE، برای قطره‌چکان‌های A و B مدل k- ω بهترین نتیجه را داشته است و در مورد قطره-

با توجه به جدول‌های (۲) تا (۴) با افزایش فشار، دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها افزایش می‌یابد و دبی دو قطره‌چکان A و B تقریباً مشابه، ولی قطره‌چکان C دارای دبی بالاتری نسبت به دو قطره‌چکان دیگر می‌باشد. با توجه به مقادیر λ ذکر شده در جدول (۵) می‌توان گفت که هر سه مدل K- ϵ دبی را بیشتر از مقدار واقعی و دو مدل آرام و k- ω مقدار دبی را کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی نمودند. مقادیر R² نیز نشان از همبستگی بسیار بالای بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دارد. نتایج مربوط به مقایسه دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج حاصل از آزمایشگاه (جدول ۵) نشان می‌دهد مقدار خطا در قطره‌چکان B نسبت به دو قطره‌چکان دیگر بالاتر

آشفته بودن، اغتشاش جریان کم می‌باشد). ثانیاً این مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان‌های با انحنای زیاد دقت قابل قبولی ندارند در حالی‌که در مجاری قطره‌چکان‌های مورد بررسی انحنای جریان زیاد می‌باشد. دقت این مدل در جریان‌های نزدیک جدار (مناطق با عدد رینولدز پایین) پایین است و مدل‌سازی آن‌ها با خطا همراه است. در بین مدل‌های $k-\varepsilon$ عملکرد مدل‌های $K-\varepsilon$ قابل‌توجه است. در بین مدل‌های $k-\varepsilon$ عملکرد مدل‌های $K-\varepsilon$ Standard و $K-\varepsilon$ RNG realizable به ترتیب کاهش می‌یابد. این مدل‌ها در مقایسه با یکدیگر در واقع مشکلات مذکور را تا حدودی رفع کرده‌اند. برای مثال مدل RNG با اضافه کردن یک ترم به معادله ε ، جریان‌هایی را که دارای انحنای شدید خطوط جریان هستند بهتر مدل نموده و بدین ترتیب عملکرد این مدل نسبت به مدل استاندارد بهتر شده است. عملکرد مدل $K-\varepsilon$ realizable نسبت به $K-\varepsilon$ RNG بهتر است زیرا در این مدل ضریب اغتشاشی C_μ به صورت متغیر در نظر گرفته شده است در حالی‌که در مدل $K-\varepsilon$ RNG ثابت در نظر گرفته می‌شود. این قابلیت، عملکرد مدل را در تخمین نقطه جدایش افزایش می‌دهد البته مشکل شبیه‌سازی اعداد رینولدز پایین برای تمام این مدل‌ها همچنان وجود دارد.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل‌های دو معادله‌ای آشفتگی و مدل آرام در شبیه‌سازی جریان در میکرو مجاری صورت پذیرفت. بدین منظور سه نوع قطره‌چکان با هندسه مجاری متفاوت انتخاب گردید و دبی خروجی از آنها توسط مدل‌های مدل $k-\varepsilon$ استاندارد، مدل $K-\varepsilon$ RNG، مدل $K-\varepsilon$ Realizable، مدل $k-\omega$ استاندارد و مدل جریان آرام شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که هر سه مدل $K-\varepsilon$ دبی را بیشتر از مقدار واقعی و دو مدل آرام و $k-\omega$ مقدار دبی را کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی نمودند. مقادیر R^2 نیز نشان از همبستگی بسیار بالای بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دارد. به طور کلی تفاوت فاحشی بین نتایج مدل‌های مختلف دیده نشد ولی مدل $k-\omega$ و بعد از آن مدل آرام نسبت به سایر مدل‌ها نتایج دقیق‌تری ارائه نموده است و در هر سه قطره‌چکان بیشترین خطا مربوط به مدل $K-\varepsilon$ استاندارد تعیین گردید. با این وجود در مورد مجاری سینوسی شکل (نسبت به مجاری با زاویه‌های تند و قائم) و دبی‌های پایین که جریان می‌تواند آرام باشد عملکرد مدل‌های $k-\varepsilon$ بهتر شده و حتی بهتر از دو مدل $k-\omega$ و آرام می‌باشد. در مورد دو قطره‌چکان دیگر عملکرد دو مدل $k-\omega$ و آرام بهتر از مدل‌های $k-\varepsilon$ می‌باشد که دلیل آن زوایای تیز قطره‌چکان‌هاست که نهایتاً

چکان C نیز بعد از مدل آرام، مدل $k-\omega$ بهترین برآورد دبی را داشته است. در هر سه قطره‌چکان نیز مدل‌های $K-\varepsilon$ استاندارد نسبت به دیگر مدل‌ها نتایج نامطلوب‌تری ارائه نموده است. تنها در قطره‌چکان A مدل آرام دبی را نسبت به مدل $K-\varepsilon$ استاندارد با خطای بیشتری شبیه‌سازی نموده است که همان‌گونه که ذکر شد خطای همه مدل‌ها برای این قطره‌چکان پایین می‌باشد. این نتایج و همچنین نتایج حاصل از جدول‌های (۱) تا (۳) را این‌گونه می‌توان تفسیر نمود که اصولاً مدل‌های $k-\varepsilon$ برای مدل‌سازی جریان‌هایی مناسب هستند که انحنای خطوط جریان در آن‌ها کم است، به عبارتی با کاهش انحنای خطوط جریان عملکرد آن‌ها افزایش می‌یابد تا جایی‌که برای قطره‌چکان با مقطع سینوسی (قطره‌چکان C) و در فشارهای پایین عملکرد مدل‌های $k-\varepsilon$ بهتر شده و حتی بهتر از دو مدل $k-\omega$ و آرام می‌شود. در مورد دو قطره‌چکان دیگر عملکرد دو مدل $k-\omega$ و آرام بهتر از مدل‌های $k-\varepsilon$ می‌باشد که دلیل آن زوایای تیز قطره‌چکان‌ها است که نهایتاً انحنای شدید خطوط جریان را به دنبال دارد. علاوه بر آن، دو مدل $k-\omega$ و آرام عملکردی تقریباً مشابه را نشان می‌دهند که دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که مدل آرام اصولاً برای اعداد رینولدز پایین مناسب است با توجه به اینکه در این آزمایش‌ها عدد رینولدز پایین است. بنابراین جواب حاصل از این مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است. در منبع *Delghandi et al.* (2010) مقایسه بین نتایج مدل آرام و مدل آشفته $K-\varepsilon$ صورت گرفته است؛ اگر چه در این مدل فقط از معادلات اصلی استفاده شده و معادلات مربوط به مدل‌سازی لزجت گردابه‌ای وجود ندارد. مدل $k-\omega$ که علاوه بر معادلات اصلی از دو معادله k و ω برای شبیه‌سازی لزجت گردابه‌ای استفاده می‌کند قابلیت بالایی در تخمین دقیق پدیده جدایش دارد که در مدل‌های قطره‌چکان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین این مدل برای اعداد رینولدز پایین در نزدیکی دیواره، محاسبات را با دقت بالایی انجام می‌دهد. در اعداد رینولدز پایین اگر چه جریان به عنوان آرام شناخته می‌شود اما در واقع جریان در درون خود اغتشاشاتی کوچک دارد. مدل $k-\omega$ مقدار این اغتشاشات را شبیه‌سازی می‌کند به همین دلیل نتایج آن به واقعیت نزدیک‌تر است. از طرفی با توجه به اینکه مقدار این اغتشاشات ناچیز است مدل جریان آرام نیز که آن‌ها را نادیده می‌گیرد نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد؛ البته نتایج مدل $k-\omega$ دقیق‌تر می‌باشد. عملکرد مدل $k-\varepsilon$ به این دلیل پایین است که اولاً این مدل‌ها برای جریان مغشوش مناسب هستند که در این تحقیق با توجه به نتایج عدد رینولدز، جریان درون مجاری قطره‌چکان‌ها بیشتر آرام می‌باشد (حتی در صورت

بین مدل‌های $k-\varepsilon$ نیز عملکرد مدل‌های RNG, $K-\varepsilon$ و $K-\varepsilon$ Standard به ترتیب کاهش می‌یابد.

انحنای شدید خطوط جریان را به دنبال دارد. علاوه بر آن، دو مدل $k-\omega$ و آرام عملکردی تقریباً مشابه را نشان می‌دهند. در

REFERENCES

- Bates, P.D., Lane, S.N. and Ferguson, R.I. (2005). *Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics*. John Wiley & Sons, England.
- Bredberg, j. (2001). *On two-equation eddy-viscosity Models*. Internal Report 01/8, Goteborg, Sweden.
- Celik, H.K., Karayel, D., Caglayan, N., Rennie, A.E.W. and Akinci, I., (2011). Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: Case study for a sample in-line drip emitter. *Virtual Phys. Prototyp*, 6, 47–56.
- Celik, I. B. (1999). *Introductory turbulence modeling*. Mechanical and Aerospace Engineering. Dept west Virginia university.
- Dazhuang, Y., Peiling, Y., Shumei, R., Yunkai, L. and Tingwu, X. (2007). Numerical study on flow property in dentate path of drip emitters. *New Zeal. J. Agric. Res.* 50, 705–712.
- Delghandi, M., Behzad, M. and Broomandnasab, S. (2010). Analysis of Hydraulic Flow Characteristics in Small Emitter Channels by Using FLUENT Software. *Journal of Water and Soil*, 24 (4), 699-714. (In Farsi).
- Esfandiari, M., Maheshwari, B.L. (2001). Field evaluation of furrow irrigation models. *Journal of agricultural engineering research*. 79(4), 459-479.
- Fan, J., Jiajie, O., Yijun, W. and Zhongmin. X. (2014). Emitter design and numerical simulation based on the extenics theory. *Adv J Food Sci Technol*, 6, 568–573.
- Fang, B., Qi, S., Wu, S., Wang, Z. and Li, R. (2015). Study on the structure and hydraulic performance of the hydraulic pressure emitter of reverse gear, in: *Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*, 12-13 Dec., Xi'an, China, pp. 1954-1961. Atlantis Press, Paris, France.
- Harley, J.C., Huang, Y.F. and Bau, H. (1995). Gas flow in micro channels. *Fluid Mech.* 284, 257–274.
- ISO. (2004), *Agricultural irrigation equipment – emitters –specification and test methods [N]*. International Standards Organization (ISO). p.9261.
- Kandilkar, S.D., Joshi, S. and Tian, S. (2003). Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow character at low Reynolds numbers in small diameter tubes. *Heat Transfer Eng.* 24(3), 4–16.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flow. *Comput. Meth. Appl. Mech.* 3, 269-289.
- Li, Y., Yang, P., Xu, T., Ren, S., Lin, X., Wei, R. and Xu, H. (2008). CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter. *Irrig. Sci.* 26, 427–438.
- Lu, G., Yan, Q.S., Lu, B.P., Xu, S. and Li, K. (2013). The Effect of Different Turbulence Models on the Emitter Discharge by Using Computational Fluid Dynamics. *Adv. Mater. Res.* 662, 586–590.
- Mattar, M. A., Alamoud, A.I. (2017). Gene expression programming approach for modeling the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and Electronics in Agriculture*. 142(A), 450-460.
- Meneveau, C. and Katz, J. (2000). Scale-invariance and turbulence models for Large-Eddy-Simulation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32, 1-32.
- Pfahler, J.N., J. Harley and Bau, H. (1990). Liquid and gas transport in small channels. *ASME DSC*. 19, 149–157.
- Qingsong, W., Yusheng, S., Gang, L., Wenchu, D., Shuhuai, H. (2006). Study of hydraulic performance of the eddy channel for drip emitters. *Irrig. Drain.* 55, 61–72.
- Saadati, E and Zeinolabedin, m. (2015). *Principles of Elementary and Advanced Simulation of Computational Fluid Dynamics Using Fluent and Cfx Soft wares*. Pardad Petro Danesh Company.
- Wang, w., Wang, F., Zhao, F. (2006). Simulation of unsteady flow in labyrinth emitter of drip irrigation system. in: *Proceedings of Computers in Agriculture and Natural Resources*, 23-25 Jul, Orlando Florida, American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
- Wei, Z., Cao, M., Liu, X., Tang, Y., Lu, B. (2012). Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. *Chinese J. Mech. Eng.* 25, 729–737.
- Wu, D., Li, Y., Liu, H., Yang, P., Sun, H., Liu, Y. (2013). Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods. *Math. Comput. Model.* 58, 497–506.
- Zhang, J., Zhao, W., Wei, Z., Tang, Y., Lu, B. (2007). Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels. *Comput. Electron. Agric.* 56, 120–129.