



Experimental, Numerical, and Analytical Study of a Droplet Impact on Parallel Fibers

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Safavi M.¹ MSc,
Nourazar S.S.*¹ PhD

How to cite this article

Safavi M, Nourazar S.S. Experimental, Numerical, and Analytical Study of a Droplet Impact on Parallel Fibers. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1645-1653.

ABSTRACT

The statics of droplet hanging from the parallel fibers and the dynamics of droplet impact on the parallel fibers are investigated using high-speed imaging and volume of fluid numerical simulation. Experimental results show for the parallel fibers, the maximum volume of the droplet, which is able to hang statically from the fibers is measured to vary between 1.85 to 1.9 times of the one measured for a single fiber. The dynamics of droplet impact have been studied by varying the radius of the impacting droplet, the fibers radius, and the distance between the fibers. The threshold velocity of droplets by fibers has been obtained both experimentally and numerically with the fluid volume method. The results show that by increasing the impacting droplet radius and decreasing the fibers radius, the threshold velocity of droplet capture decreases. The maximum threshold velocity of droplet capture with parallel fibers varies in the range of 1.5 to 1.8 times of the threshold velocity of capture with a single fiber. The maximum threshold capture velocity of droplets occurs where the distance between fibers is in the range of 0.35 to 0.5 times of impacting droplet diameter. The threshold capture velocity on parallel fibers is also obtained analytically, using the energy balance method. The results of the analytical solution are in a fair agreement with experimental data and numerical simulation results.

Keywords Droplet Impact; Parallel Fibers; Fibrous Filters; Liquid Aerosol; Iso-Advector Scheme

¹Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

icp@aut.ac.ir

Article History

Received: November 29, 2018

Accepted: January 07, 2019

ePublished: July 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Fine mist filtration by ... [2] Measurement and modeling of ... [3] Filtration of liquid aerosols on ... [4] Influence of processing parameters ... [5] 3-Fibrous filtration of liquid ... [6] Nanofiber coating of surfaces for ... [7] Preparation of TiO₂-coated polyester ... [8] Superhydrophobic and oleophobic fibers by ... [9] Consecutive filtration of solid particles and ... [10] Filtration model for polydisperse aerosols ... [11] Antimicrobial nanoparticle-coated ... [12] The equilibrium of liquid drops on ... [13] Global geometry and the equilibrium ... [14] Droplet on a fiber: Geometrical shape ... [15] Wetting of liquid droplets on two ... [16] The gravitational effect on the geometric ... [17] Droplet adhesion to hydrophobic fibrous ... [18] Experimental investigation of the impaction ... [19] Dripping phenomena of water droplets impacted ... [20] Simulating droplet impact on a substrate ... [21] Special phenomena from a single liquid ... [22] Liquid sheet behaviors during a drop impact ... [23] Capturing drops with a thin ... [24] Off-centre impact on a horizontal ... [25] Off-centered impact of water droplets on a ... [26] Drops impacting inclined ... [27] Drop impact on a flexible ... [28] Drop impact on a ... [29] Experimental, analytical, and numerical study ... [30] Droplet coalescence on ... [31] Effect of fiber orientation on fiber ... [32] Liquid drop growth on a ... [33] Contact angle and wetting ... [34] Numerical simulation and investigation ... [35] A study of the advancing interface ... [36] Dynamic contact angle of spreading droplets ... [37] The spreading of silicone oil drops on ... [38] The dynamics of the spreading of liquids on ... [39] Wettability ... [40] Isoadvector: Free, fast and accurate vof on arbitrary ... [41] A new volume-of-fluid method in ... [42] The stability of axisymmetric ...

بررسی تجربی، عددی و تحلیلی برخورد قطرات بر فیبرهای موازی

محمد صفوی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سیدسلیمان نورآذر* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه ابتدا استاتیک قطرات و دینامیک برخورد قطرات سیال به فیبرهای موازی بررسی شده است. نتایج تجربی در حالت استاتیک نشان می‌دهند بیشترین حجم قطره‌ای که به فیبر متصل می‌ماند حدود ۱.۸۵ تا ۱.۹ برابر بیشینه حجم متصل به تک فیبر مشابه است. دینامیک برخورد قطرات با تغییر شعاع قطره برخوردکننده، شعاع فیبر و فاصله بین فیبرها مورد مطالعه قرار گرفته است. سرعت حد جذب قطره توسط فیبرها هم به صورت تجربی و هم به کمک مدل‌سازی عددی به روش حجم سیال به دست آمده است. نتایج مشاهدات تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند که با افزایش شعاع قطره برخوردکننده و کاهش شعاع فیبر، سرعت حد جذب قطره کاهش می‌یابد. بیشینه سرعت جذب قطره در محدوده ۱.۵ تا ۱.۸ برابر سرعت حد جذب تک فیبر است که در محدود فاصله محور فیبرها برابر ۰.۳۵ تا ۰.۵ برابر قطر قطره برخوردکننده اتفاق می‌افتد. حل تحلیلی نیز مبتنی بر قضیه کار و انرژی برای سرعت حد جذب قطرات بر فیبرهای موازی ارائه شده است که دقت نسبتاً مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی و عددی دارد.

کلیدواژه‌ها: برخورد قطرات، فیبرهای موازی، فیلتر فیبری، کلویید مایع در گاز، روش ایزوداکتور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

*نویسنده مسئول: icp@aut.ac.ir

۱- مقدمه

جداسازی قطرات مایع معلق در جریان گاز، فرآیندی مهم در فناوری‌های صنعتی نظیر تصفیه گاز طبیعی^[1] و سامانه‌های تهویه است^[2, 3]. برای تصفیه جریان ذرات معلق مایع در گاز عموماً از فیلترهای فیبری بهره می‌گیرند. در این نوع فیلترها قطرات پس از برخورد با فیبرهای داخلی، متوقف شده و از جریان گاز جدا می‌شوند^[4, 5]. علاوه بر این، برخورد قطرات با فیبرها در خنک‌سازی فیبرهای فلزی و غیرفلزی^[6] و رنگ‌رزی و پوشش‌دهی سطوح استوانه‌ای کوچک کاربرد دارد^[7, 8].

مطالعات انجام شده بر جداسازی ذرات معلق مایع در فیلترهای فیبری بسیار کمتر از پژوهش‌های انجام شده در مورد فیلترنمودن ذرات معلق جامد است^[9-11]. اولین مطالعات در مورد همکنش فیبرها و قطرات مایع، بر استاتیک قطرات روی فیبرها متمرکز است. کرول^[12] با استفاده از بالانس فشار مویینگی و زاویه تماس، به بررسی حالت تعادل قطرات بر فیبرهای صاف و زبر با زبری مشخص پرداخت. او نشان داد حتی در زاویه تماس صفر درجه، برای فیبرهای صاف، قطره نمی‌تواند در کل سطح پخش شود و هنگامی که سطح زبر باشد، رفتار سیال با هندسه زبری‌ها تعیین می‌شود. مک‌هییل و نیوتون^[13] به بررسی دو شکل ممکن قطرات روی فیبرها پرداختند. آنها دو شکل کلی بشکه‌ای‌گونه و پوسته صدفی را با استفاده از حل تحلیلی و روش المان محدود برای حالت تعادل قطرات روی فیبرها ارائه نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد، هنگامی که زاویه تماس سطح، کوچک باشد یا حجم قطره بزرگ باشد، قطره، شکل بشکه‌ای‌گونه متقارن محوری می‌گیرد، اما هر چه حجم کاهش یابد و زاویه تماس بیشتر شود، شکل پوسته صدفی که انرژی سطحی کمتری نیاز دارد نمایان می‌شود. وو و درینس^[14] با

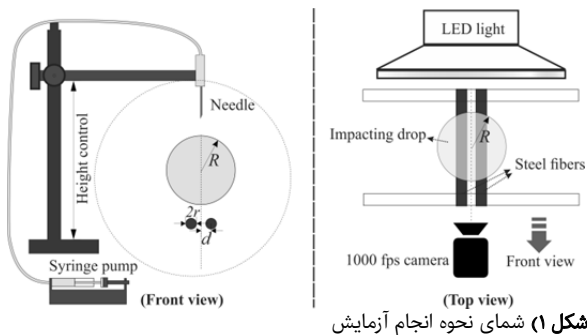
کمک روش تغییر انرژی آزاد، شکل هندسی، طول خیسش و زاویه تماس استاتیک قطره روی فیبر را به صورت نیمه‌تحلیلی به دست آوردند. *بدرکار* و همکاران^[15] حالت تعادل قطره روی فیبرهای موازی با روش المان محدود را مطالعه نمودند. آنها با تغییر پارامترهای قطر فیبر، فاصله فیبرها، حجم قطره و زاویه تماس، شکل قطره روی فیبر را بررسی نمودند. در مطالعه آنها دو شکل مختلف بشکه‌ای‌شکل و پل سیال وابسته به پارامترهای مختلف ذکر شده مشاهده می‌شود. نتایج آنها نشان می‌دهد که طول خیسش قطره روی فیبر، با کاهش فاصله بین دو فیبر، کاهش زاویه تماس و افزایش حجم قطره، افزایش می‌یابد. همچنین وابستگی طول خیسش به زاویه تماس، در رژیم پل سیال حساس به فاصله بین فیبرها بوده، در حالی که در رژیم بشکه‌ای‌شکل حساسیت به زاویه تماس کم است. می و همکاران^[16] مشاهده نمودند که ارتفاع قطره تحت تأثیر گرانش بر فیبر، با افزایش قطر فیبر کاهش می‌یابد. *جمالی* و همکاران^[17] نیروی لازم برای جدایش قطره از سطح آب‌دوست فیبری را به دست آورده‌اند. آنها مشاهده کردند که افزایش فاصله فیبرها، نیروی جدایش را اندکی کاهش می‌دهد.

اولین مطالعات روی دینامیک برخورد قطرات با فیبرها توسط *هونگ* و *یاوو*^[18] به صورت تجربی انجام شد. آنها دو حالت کلی فروپاشی قطره و حالت چکیدن از فیبر به صورت قطره یکپارچه را برای قطره عبورکننده مشاهده نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که رژیم عبور قطره از فیبر، تابع عدد وبر قطره برخوردکننده و نسبت شعاع قطره به فیبر است. همچنین *هونگ* و *یاوو*^[19] دینامیک برخورد قطرات با شبکه فیبری را بررسی کرده‌اند. آنها دریافتند که رژیم برخورد قطرات روی شبکه فیبری، تابع فاصله فیبرها از هم و سرعت اولیه برخورد قطرات است. *پسنیده‌فرد* و همکاران^[20] برخورد قطره‌ای ۲ میلی‌متری با سرعت یک‌متر بر ثانیه را بر استوانه‌هایی با قطرهای مختلف مطالعه نمودند. مشاهدات آنها نشان می‌دهد که فیبرهای قطورتر، قطره برخوردکننده را جذب می‌کنند. حال آنکه در برخورد قطره با فیبرهای نازک‌تر، به اندازه کافی سطح برای مایع موجود نیست که به سطح بچسبد و قطره پس از برخورد از فیبر جدا می‌شود. *لیانگ* و همکاران^[21] به بررسی برخورد قطرات بوتانول روی استوانه‌های خیس پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که دینامیک برخورد، کاملاً به انحای سطح سیلندر وابسته است. آنها همچنین نشان دادند که نسبت انحنا و عدد وبر برخورد، بر شکل ورقه سیال تشکیل شده هنگام برخورد^[22] موثر است.

لورنسیو و همکاران^[23] دینامیک برخورد مرکز به مرکز قطرات با فیبرهای افقی را مطالعه نمودند. آنها سرعت بحرانی عبور را بر اساس کشش سطحی، شعاع قطره و شعاع فیبر به دست آوردند. در مقاله‌ای دیگر *لورنسیو* و همکاران^[24] اثر خروج از مرکز بر میزان حجم جذب شده از قطرات توسط فیبرها را بررسی کردند. نتایج آنها کاملاً غیرمنتظره بود و نشان می‌داد که خروج از مرکز هنگام برخورد قطرات به فیبر، سبب افزایش حجم جذب شده قطره توسط فیبر می‌شود. *شر* و همکاران^[25] پارامترهای مؤثر بر حجم قسمتی از قطره که در برخورد خروج از مرکز با فیبر جذب می‌شود را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که خروج از مرکز بحرانی که در آن بیشینه جذب اتفاق می‌افتد، تابعی از پارامترهای مختلفی همچون سرعت برخورد، اندازه فیبر، شعاع قطره و کشش سطحی است. *پیروید* و همکاران^[26] به بررسی برخورد قطرات به فیبرهای مایل پرداختند. آنها دریافتند که افزایش زاویه بین قطره برخوردکننده و خط عمود بر فیبر به شدت سرعت حد جذب قطره را افزایش می‌دهد. *درسایره* و

بین سرنگ و فیبرها به گونه‌ای است که مسیر حرکت قطره رها شده از سرنگ، از مرکز فاصله بین دو فیبر می‌گذرد. فاصله هر فیبر از خط مرکزی (d) در فواصل ۰.۵، ۰.۶، ۰.۶۵، ۰.۷ و ۰.۸۵ میلی‌متر متغیر است. این فواصل به صورت دقیق توسط برش لیزر در دو سطح متقابل پلکسی‌گلس حاصل شده‌اند.

دوربینی با سرعت ضبط تصاویر در ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه در امتداد خط مرکزی فیبرها قرار دارد و پدیده برخورد را ضبط می‌کند (شکل ۱). برای به دست آوردن تصاویر با وضوح مناسب، میزان نوردهی در هر فریم حدود ۷۸ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. نوردهی برای ضبط تصاویر توسط یک لامپ ال‌ای دی ۵۰ وات انجام می‌شود که در مقابل دوربین قرار دارد. با تغییر شعاع قطره برخوردکننده و شعاع فیبرها، سرعت حد عبور قطره از فیبر برای فواصل مختلف بین فیبرها اندازه‌گیری می‌شود. سرعت قطرات برخوردکننده با کمک پردازش تصاویر در فریم‌های قبل از برخورد به دست آمده است. برای به دست آوردن حجم قطرات، وزن آنها توسط میکروبالانس ساتاریوس اس‌ای ۲ با دقت یک‌دهم میکروگرم اندازه‌گیری شده است. برای به دست آوردن هر داده، آزمایش در شرایط مشابه، سه بار تکرار شده است.



شکل ۱) شمای نحوه انجام آزمایش

۳- معادلات حاکم و نحوه شبیه‌سازی عددی

هرچند که آزمایش می‌تواند اطلاعات مفیدی را از پدیده برخورد حاصل کند، اما بسیاری از جزئیات به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی همچون سرعت فریم دوربین، محدودیت در ایجاد قطرات بدون نوسان در سرعت‌های کم و محدودیت در تغییر فواصل فیبرها در فواصل خیلی کم قابل استنتاج نیستند. بنابراین شبیه‌سازی عددی در کنار آزمایش می‌تواند بسیاری از این جزئیات را نشان دهد و قابلیت اطمینان نتایج حاصل را افزایش دهد. در این مطالعه، دینامیک برخورد قطرات و سرعت حد عبور قطرات از فیبر در حالات مختلف توسط شبیه‌سازی عددی نیز حاصل شده‌اند و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است. از آنجا که قطرات تولید شده پس از جدا شدن از سوزن نوسان می‌کنند، در سرعت‌های برخورد کمتر از ۰.۱۸ متر بر ثانیه، تنها از حل عددی برای یافتن سرعت حد عبور استفاده شده است. گام تغییر سرعت برای یافتن سرعت عبور از فیبر برابر ۰.۰۲ متر بر ثانیه است.

شبیه‌سازی عددی دوفاز حاضر با استفاده از روش حجم سیال (VOF) انجام شده است. جریان سیال سه‌بعدی، آرام، بدون انتقال حرارت و بدون تغییر فاز در نظر گرفته شده است. معادلات پیوستگی و مومنتوم همچون هر مساله سیالاتی در اینجا نیز می‌بایست حل شوند. این معادلات به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = (\nabla P - \mu \nabla^2 v) + \rho g + \frac{1}{\rho} S_{sf} \quad (2)$$

همکاران [27] نشان دادند که با افزایش قابلیت انعطاف فیبرها، سرعت حد جذب قطرات بزرگ برخوردکننده به فیبر افزایش می‌یابد. کیم و کیم [28] با انجام آزمایش و ارائه مدلی برای حجم باقیمانده قطرات روی فیبرها در برخورد مرکز به مرکز، دریافتند که حجم قطره باقیمانده پس از برخورد روی فیبر، بیشتر تابع قطر فیبر است تا سرعت اولیه برخورد. صفوی و نورآذر [29] حل تحلیلی جامعی را برای تغییر سرعت حد جذب قطرات به وسیله فیبرها، با تغییر خروج از مرکز ارائه دادند. رابطه ارائه شده توسط آنها با نتایج تجربی و عددی همخوانی خوبی دارد.

بریسکو و همکاران [30] به مطالعه تجربی و تئوری تجمع قطرات در اثر برخورد با یک فیبر آزمایشی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که رشد و به هم پیوستن قطرات منجر به الگوی خودمشابه آماری در طول فیبر می‌شود. مولینز و همکاران [31] اثر جهت‌گیری فیبرها بر فرآیند خیسش آنها در جریان قطرات مایع در امتداد الیاف فیلتر فیبری را بررسی نمودند. آنها با مطالعه نحوه تجمع قطرات جذب شده در حالات مختلف بر زیر میکروسکوپ، زاویه قرارگیری مطلوب برای ساختار داخلی فیلترهای فیبری را پیشنهاد دادند. یارین و همکاران [32] مدلی کمی را برای رشد قطرات روغن در فیلترهای فیبری، بر اثر به هم پیوستن قطرات بر یک نانوفیبر، به دست آوردند. آنها نشان دادند که مکانیزم‌های رهگیری و حرکت براونی قطره، عامل اصلی رشد قطرات روی نانوفیبرها است.

همان‌طور که ملاحظه شد، مطالعات محدودی اغلب به صورت تجربی روی همکنش قطرات با فیبرها به صورت تجربی انجام شده است. این مطالعات عمدتاً در دو دسته‌اند. در دسته اول، مطالعات برخورد قطره روی یک فیبر تنها را در نظر می‌گیرند و در دسته دوم، جذب قطرات روی مجموعه فیبرهای فیلتر به صورت آماری بررسی شده است. حال آنکه با توجه به فاصله اندک فیبرها در فیلترهای فیبری، اغلب برخورد قطرات با دو یا چند فیبر به طور هم‌زمان اتفاق می‌افتد [30]. بنابراین مطالعه دینامیک برخورد قطرات روی دسته فیبرها در فهم مکانیزم جذب فیلترهای فیبری اهمیت دارد. این مطالعه، حالت خاص برخورد قطرات به میان فاصله بین محور فیبرهای موازی را در نظر می‌گیرد. به وسیله آزمایش به روش تصویربرداری سرعت بالا و شبیه‌سازی عددی، سرعت حد عبور و دینامیک برخورد قطرات با فیبرهای موازی را به دست آورده‌ایم. به علاوه، رابطه‌ای تحلیلی نیز برای سرعت حد عبور قطرات ارائه شده است که همخوانی مناسبی با نتایج عددی و تجربی دارد.

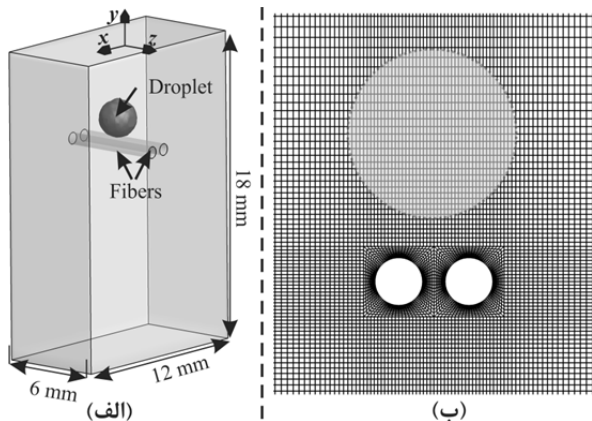
۲- نحوه انجام آزمایش

چگونگی انجام آزمایش در شکل ۱ نمایش داده شده است. قطره برخوردکننده با شعاع R تحت تأثیر گرانش از سرنگ رها می‌شود. جریان به درون سرنگ توسط پمپ سرنگی جی‌ام‌اس مدل اس-پی ۵۰۰ تأمین می‌شود. سرعت اولیه قطره برخوردکننده توسط تغییر ارتفاع سرنگ تغییر می‌کند. قطره از نوع سیال آب مقطر با مشخصات چگال ۹۹۸ کیلوگرم بر لیتر، لزجت ۰.۰۹۱ پاسکال ثانیه و کشش سطحی ۰.۰۷۲ نیوتون بر متر در شرایط آزمایشگاهی است. شعاع قطره برخوردکننده بر فیبر متغیر و برابر ۱، ۱.۳ و ۱.۴ میلی‌متر است که با تغییر اندازه سرنگ حاصل می‌شود. فیبرها از جنس استیل ضدزنگ با شعاع‌های ۰.۱۵، ۰.۳ و ۰.۳۴ میلی‌متر هستند. زاویه تماس فیبرها و آب به وسیله روش صفحه ویلهلمی [33] اندازه‌گیری شده است. مقدار زاویه تماس پیشرو برابر ۱۲۸ درجه و زاویه تماس پس‌رو ۳۰ درجه به دست آمده و زاویه تماس در حالت ایستایی برابر ۵۵ درجه اندازه‌گیری شده است. تنظیم فاصله افقی

است. Ca نیز عدد بی بعد کپیلاری ($Ca = \mu U_{cl} / \sigma$) است که براساس سرعت خط تماس (U_{cl}) بیان می شود. تابع F رابطه تجربی هافمن است [36] و به صورت زیر است:

$$F = \arccos \left\{ 1 - 2 \tanh \left[5.16 \left(\frac{x}{1 + 1.31x^{0.99}} \right)^{0.0706} \right] \right\} \quad (12)$$

شبکه مورد استفاده در شکل ۲-ب نشان داده شده است. این شبکه شامل یک میلیون و دویست و سی هزار سلول شش وجهی منظم بوده که در نزدیکی فیبر ریز شده است. تعداد سلول های شبکه با مطالعه استقلال حل از شبکه برای دینامیک شکل قطره در هنگام برخورد فیبر حاصل شده است.



شکل ۲ دامنه حل عددی و شبکه بندی حل روی صفحه xy : (الف) دامنه حل عددی، (ب) شبکه بندی حل روی صفحه xy

معادلات گسسته شده روی شبکه سازمان یافته با استفاده از الگوریتم پیپزو (PISO) و با کمک حلگر اینترفوم در کد متن باز این فوم حل شده است. برای گسسته سازی زمان از روش اولر مرتبه اول استفاده شده است. گرادیان سرعت به کمک روش حداقل مربعات و ترم های کانوکتیو به کمک روش بادسوی مرتبه دوم گسسته شده اند. برای بازسازی سطح آزاد از روش جدید ایزوادوکتور که توسط رونبی و همکاران [40, 41] معرفی شده، استفاده شده است. زمان حل عددی برای هر مساله در حدود ۲ ساعت روی ۸ هسته با سیستم مبتنی بر پردازنده اینتل i7-6900k با فرکانس ۳.۲ گیگاهرتز و میزان رم ۱۲۸ گیگابایت است.

۴- نتایج

در ابتدا حالت ایستایی قطرات روی فیبرهای موازی را بررسی می نماییم. حالت ایستایی قطرات روی تک فیبر پیش تر توسط لورنسیو و همکاران [23] بررسی شده است. آنها بیان کردند که قطرات در حجم بزرگ تر از حجم بیشینه بحرانی به صورت چکنده از فیبر جدا می شوند. این حجم بیشینه برای تک فیبر (V_{ms}) تابعی از طول موینگی (κ^{-1}) به صورت زیر است [23, 25, 42]:

$$V_{ms} = 4\pi r \kappa^{-2} \quad (13)$$

در رابطه فوق طول موینگی برابر است با:

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\sigma / \rho g} \quad (14)$$

که در این رابطه σ کشش سطحی، ρ چگالی و g ثابت گرانش است. مقادیر V_{ms} برای مقایسه پذیر بودن نتایج حالت ایستای قطرات بر فیبرهای موازی با حالت تک فیبر، در شعاع فیبرهای مختلف به صورت تجربی اندازه گیری شده است. نتایج این اندازه گیری در جدول ۱ ذکر شده است. همان طور که ملاحظه می شود حجم بحرانی اندازه گیری شده اندکی کمتر از مقدار تئوری

که بردار سرعت، P بیانگر فشار، μ لزجت سیال، ρ چگالی، g شتاب گرانش و S_{sf} بیانگر نیروی معادل حجمی ناشی از کشش سطحی است. این مجموعه از معادلات جریان در سراسر سیال حل می شوند. خواصی همانند چگالی و ویسکوزیته با کسر حجمی هر فاز (α_i) در هر سلول به صورت زیر وزن داده می شوند:

$$\rho = \sum_i \alpha_i \rho_i = \alpha_a \rho_a + \alpha_w \rho_w \quad (3)$$

$$\mu = \sum_i \alpha_i \mu_i = \alpha_a \mu_a + \alpha_w \mu_w \quad (4)$$

که زیر نویس (a) نشان دهنده فاز هوا و زیر نویس (w) نشان دهنده فاز آب است. برای القای اثر کشش سطحی، نیروی سطحی پیوسته (CSF) [34] به صورت ترم منبع به معادله مومنتوم اضافه می شود. این نیرو را در حالت دوفازی به صورت زیر داریم:

$$S_{sf} = \sigma kn \left(\frac{\rho}{0.5(\rho_a + \rho_w)} \right) \quad (5)$$

که در آن σ کشش سطحی، n بردار نرمال سطح و k انحنا سطح است. بردار نرمال و انحنا سطح به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$n = \frac{\nabla \alpha_w}{|\nabla \alpha_w|} \quad (6)$$

$$k = -\nabla \cdot n \quad (7)$$

در حل دوفازی به روش حجم سیال VOF، معادله انتقال برای یک فاز حل می شود. از آنجا که میزان فاز آب نسبت به فاز هوا در دامنه حل کمتر بوده، برای کاهش زمان محاسبات، معادله انتقال برای کسر حجمی فاز آب حل شده است.

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + v \cdot \nabla (\alpha_w) = 0 \quad (8)$$

میزان کسر حجمی فاز هوا نیز به سادگی از تعریف کسر حجمی قابل محاسبه است:

$$\alpha_a = 1 - \alpha_w \quad (9)$$

دامنه حل مورد استفاده برای حل عددی در شکل ۲ نمایش داده شده است. شرط اولیه مساله شامل قطره ای کروی با شعاع معلوم R و سرعت برخورد U_i در لحظه صفر است. دامنه حل شامل مکعب مستطیلی $6 \times 18 \times 12$ سانتی متر است که دو دیواره فیبر در آن قرار دارد. روی دیواره های این مکعب مستطیل، شرط مرزی جریان آزاد برقرار است (شکل ۲-الف). روی فیبرها شرط دیواره با عدم لغزش برقرار است. همچنین زاویه تماس فیبر و قطره به صورت دینامیکی براساس رابطه هافمن [35, 36] به صورت شرط مرزی به دیواره فیبر اعمال شده است. اثر چسبندگی سیال به دیواره جامد، توسط تعریف زاویه تماس قابل بیان است. اثر زاویه تماس توسط اعمال بردار یکه عمود بر سطح سیال n_i در سلول مجاور دیواره اعمال می شود.

$$n_i = n_w \cos \theta_d + n_t \sin \theta_d \quad (10)$$

که n_w و n_t به ترتیب بردار یکه عمود و مماس بر سطح دیواره و θ_d زاویه تماس دینامیکی سطح و مایع است. زاویه تماس دینامیکی، تابعی از سرعت خط تماس سیال و سطح است. روابط تجربی بسیاری برای بیان وابستگی زاویه تماس دینامیکی، با سرعت خط تماس وجود دارد. بسیاری از آنها به شکل قانون هافمن-ترنر-وینوو [37] یا در شکل کلی تر توسط کاکس [38] به دست آمده است. در این مطالعه، از رابطه کیستلر برای محاسبه زاویه تماس، برای هر گام زمانی بهره می گیریم [39]. این رابطه، زاویه تماس را به صورت زیر تعریف می کند.

$$\theta_d = F(Ca + F^{-1}(\theta_s)) \quad (11)$$

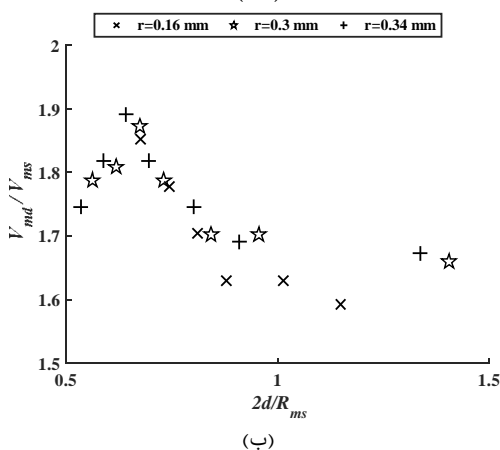
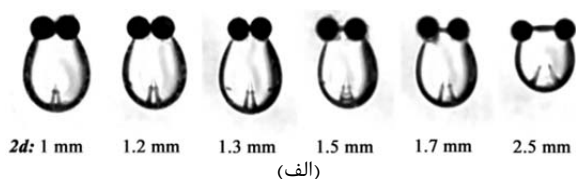
در این رابطه θ_s زاویه تماس است که در حالت زاویه تماس پیش رو برابر ۱۲۸ درجه و در حالت پس رو برابر ۳۰ درجه اندازه گیری شده

جدول ۱) حجم بحرانی قطره متصل به تک‌فیبر برحسب میکرولیتر در شعاع فیبرهای مختلف

شعاع فیبر	$r=0.16mm$	$r=0.3mm$	$r=0.34mm$
حجم بحرانی تجربی (میکرولیتر)	۲۳/۵	۲۳/۵	۲۷/۵
حجم بحرانی تئوری (میکرولیتر)	۲۸/۰	۱۴/۹	۳۱/۷

تغییر بیشینه حجم متصل به فیبرهای موازی (V_{md}) حاصل از اندازه‌گیری تجربی، در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشینه حجم قطره متصل به فیبر با افزایش فاصله بین فیبرها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در بازه تغییر فواصل فیبرها در مطالعه حاضر میزان بیشینه حجم متصل به فیبرهای موازی در حدود ۱.۸۵ تا ۱.۹ برابر بیشینه حجم متصل به تک‌فیبر است. بیشینه حجم متصل به فیبرهای موازی در حدود فاصله بین دو فیبر برابر $2d \sim 0.65R_{ms}$ اتفاق می‌افتد که R_{ms} شعاع معادل قطره کروی با حجم V_{ms} است.

دینامیک برخورد مرکزی قطرات بر فیبرهای موازی با تغییر شعاع فیبر، شعاع قطره و فاصله بین فیبرها مطالعه شده است. برای مقایسه پذیر بودن نتایج با حالت تک‌فیبر، در ابتدا برخورد مرکز به مرکز قطره با تک‌فیبر را بررسی می‌نماییم. سرعت حد جذب قطرات در برخورد با تک‌فیبر در شعاع‌های مختلف فیبر و قطره در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت حد جذب با افزایش شعاع قطره برخوردکننده و کاهش شعاع فیبر، کاهش می‌یابد روش آزمایش برای سرعت حد عبور قطرات از تک‌فیبر در مقاله دیگری از نویسندگان [29] صحت‌سنجی شده است.



نمودار ۱) تغییرات بیشینه حجم قطرات متصل به فیبرهای موازی با فاصله فیبرها؛ الف) شمای تغییر شکل قطره روی فیبر با شعاع ۰.۳۴ میلی‌متر، ب) تغییرات حجم بیشینه بی‌بعد برحسب فاصله در فیبرها با شعاع‌های مختلف

جدول ۲) سرعت حد برخورد قطرات با تک‌فیبر در برخورد مرکز به مرکز

شعاع قطره برخوردکننده (R)	$r=0.16mm$	$r=0.3mm$	$r=0.34mm$
۰.۱ میلی‌متر	۰/۴۵m/s	۰/۵۵m/s	۰/۶۵m/s
۰.۳ میلی‌متر	۰/۱۸m/s	۰/۴۲m/s	۰/۴۸m/s
۰.۴ میلی‌متر	۰/۱۲m/s	۰/۳۲m/s	۰/۴m/s

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، هنگامی که قطره به فیبرهای موازی برخورد می‌کند، وابسته به شرایط برخورد توسط فیبر تماماً جذب می‌شود یا مقداری از آن از فیبر عبور می‌کند. هنگامی که قطره با سرعت کم به فیبر موازی قطورتر برخورد کند، نیروی پسا و مویبندی بر اینرسی اولیه سیال و گرانش غلبه می‌کند و مانع جدایش قطره از فیبرهای موازی می‌شود (شکل ۳-الف). با افزایش سرعت برخورد و در نتیجه افزایش نیروی اینرسی سیال، قطره برخوردکننده از فیبر جدا می‌شود. جدایش قطره از فیبر در سرعت‌های بالاتر از سرعت حد جذب می‌تواند از قسمت پیرامونی فیبرها (شکل ۳-ب) یا از قسمت مرکزی بین دو فیبر (شکل ۳-ج) یا از هر دو قسمت هم‌زمان (شکل ۳-د) اتفاق افتد. در واقع در هنگام برخورد جریان، سیال به جریان میان فیبرها و جریان در قسمت بیرونی فیبرها تقسیم می‌شود (شکل ۴). برای متوقف کردن قطره نیروی مقاوم در هر دو جریان (نیروی پسا و مویبندی) می‌بایست بر نیروی محرک (اینرسی و گرانش) غلبه کنند. برای تحلیل بیشتر این موضوع فرض می‌کنیم که جدایش جریان در فاصله d از خط مرکزی دو فیبر اتفاق افتد. بنابراین دو جریان سیال، یکی در فاصله مرکز بین فیبرها تا فاصله d به حجم V_1 و دیگری از فاصله d تا شعاع قطره (R) به حجم V_2 داریم (شکل ۵). برای هر دو جریان سیال انرژی جنبشی و کار نیروی گرانش در حالت حدی جذب می‌بایست با کار نیروی مقاوم که شامل نیروهای پسای وارده از فیبر W_d و نیروی مویبندی سطح W_c است، برابر شود. بنابراین برای حجم‌های ۱ و ۲ در حالت حدی داریم:

$$0.5\rho V_1 u_{c1}^2 + \rho V_1 g = W_{d1} + W_{c1} \quad (15)$$

$$0.5\rho V_2 u_{c2}^2 + \rho V_2 g = W_{d2} + W_{c2} \quad (16)$$

که در رابطه فوق، حجم‌های V_1 و V_2 به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_1 = \int_0^d \pi(R^2 - x^2) dx, \quad (17)$$

$$V_2 = \int_d^R \pi(R^2 - x^2) dx$$

با فرض افزایش فشار ناشی از برخورد با سرعت u_i برابر فشار دینامیک سیال بر سطح فوقانی فیبر کار نیروی پسا بر هر المان سیال قطره به طول L_{vi} و سطح دیفرانسیلی dA برابر است با:

$$\begin{aligned} W_d &= 0.5\rho u_i^2 \int L_{vi} dA \rightarrow W_{d1} \\ &= 0.5\rho u_{c1}^2 \int_{d-r}^d \pi(R^2 - x^2) dx, W_{d2} \\ &= 0.5\rho u_{c2}^2 \int_d^{d+r} \pi(R^2 - x^2) dx \end{aligned} \quad (18)$$

با در نظر گرفتن طول خیسش L_{h1} و L_{h2} به‌ترتیب برای حجم‌های V_1 و V_2 روی سطح فیبر کار نیروی مویبندی برابر است با:

$$W_{c1} = \sigma L_{h1} (\cos(\theta_r) - \cos(\theta_a)) \pi r, W_{c2} = \sigma L_{h2} (\cos(\theta_r) - \cos(\theta_a)) \pi r \quad (19)$$

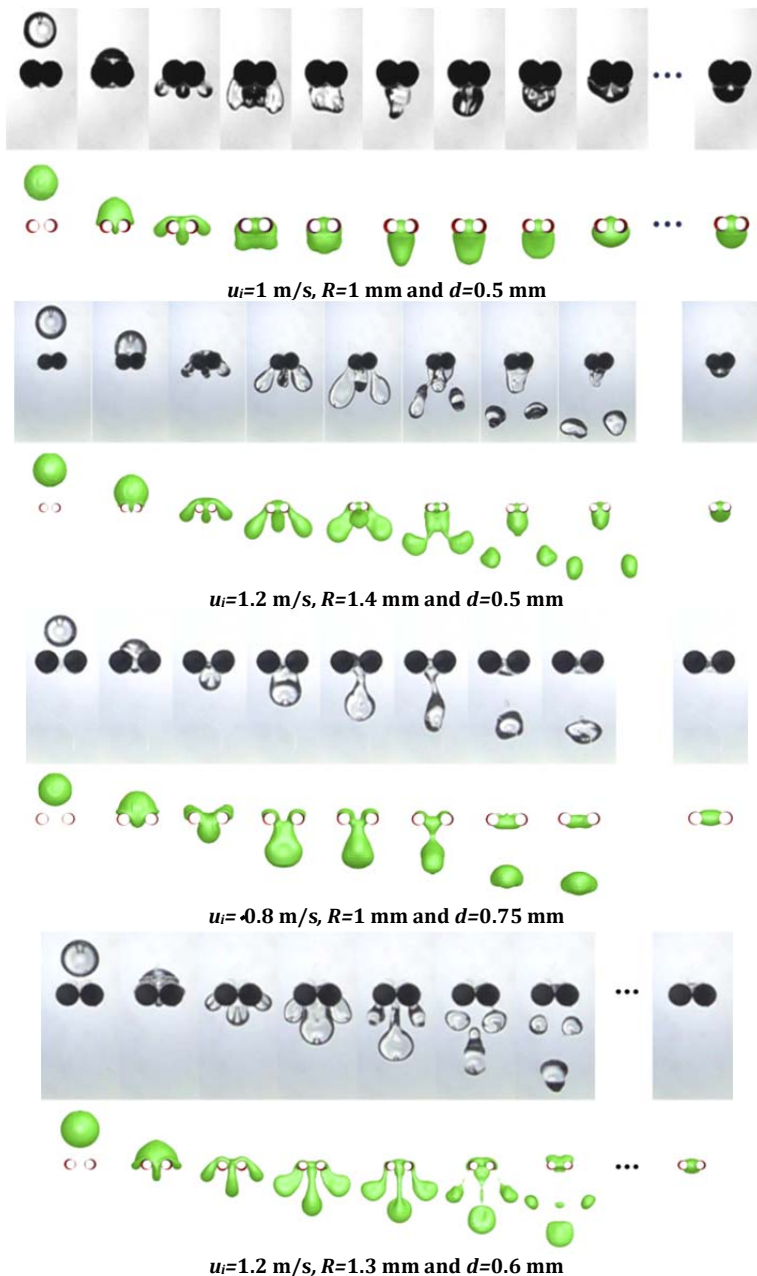
طول خیسش برای هر قسمت به‌صورت متوسط به‌وسیله سطح افقی تصویرشده هر حجم روی فیبرها حاصل می‌شود. با فرض سطح تصویرشده حجم V_1 برابر A_1 و حجم V_2 برابر A_2 طول خیسش برابر است با:

$$L_{h1} = \frac{A_1}{r}, L_{h2} = \frac{A_2}{r} \text{ for } (d < R - r) \text{ and } \quad (20)$$

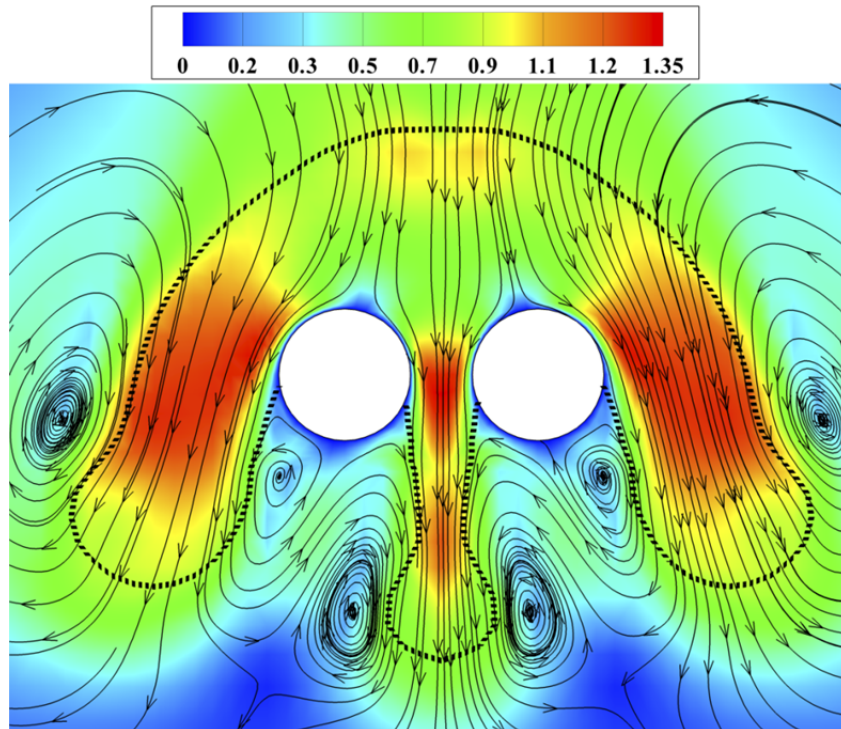
$$L_{h2} = \frac{A_2}{R - d} \text{ for } (d > R - r)$$

بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد، هرچند اندکی سرعت حد را در مواردی بیشتر تخمین می‌زنند. حل تحلیلی ارائه شده نیز با دقت نسبتاً مناسبی می‌تواند سرعت حد جذب را در شرایط مختلف تخمین بزند. با این حال، در حل تحلیلی سرعت حد جذب بیشینه، در فواصل بین فیبر کمتر نسبت به داده‌های تجربی حاصل می‌شود. این اختلاف می‌تواند ناشی از تخمین جدایش جریان در نقطه d باشد که در عمل، جدایش جریان مرکزی و پیرامونی در فاصله کمتر از d اتفاق می‌افتد. به علاوه، نیروی پسای وارد به جریان مرکزی بین دو فیبر به دلیل انقباض جریان به فضای میان فیبرها بیش از نیروی پسای وارده به جریان پیرامونی خواهد بود. حال آنکه در حل تحلیلی، ضریب نیروی پسای برای هر دو جریان یکسان در نظر گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی جریان، این حل همچنان دقت قابل قبولی را در بیشتر موارد دارد و می‌تواند به عنوان تخمین اولیه مورد استفاده قرار گیرد.

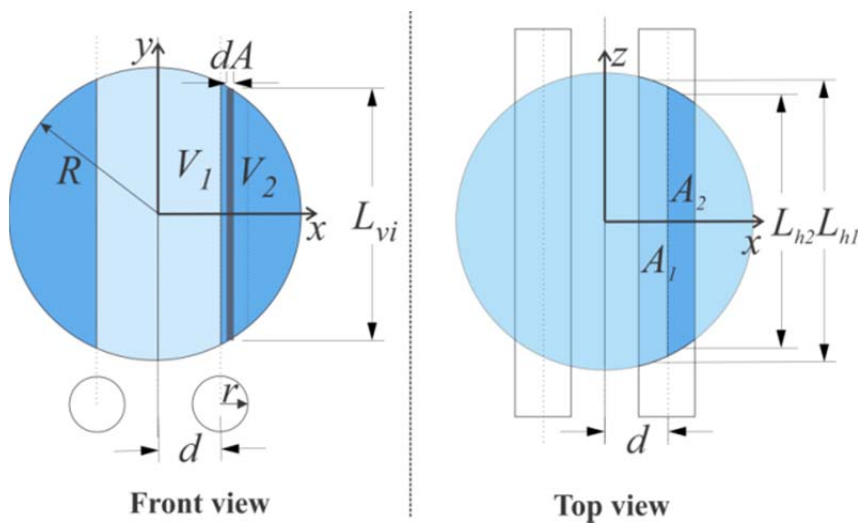
با مشخص شدن کار نیروهای موینگی و پسا که از طرف فیبر به قطره وارد می‌شوند، سرعت حد عبور هر حجم توسط روابط ۱۵ و ۱۶ قابل محاسبه است. سرعت حد جذب قطره برخوردکننده برابر با کمینه سرعت u_{c1} و u_{c2} است. میزان سرعت حد جذب فیبرهای موازی در شعاع‌های مختلف قطره و فیبر برحسب فاصله بی‌بعد بین دو فیبر $(d^* = d/R)$ در نمودار ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سرعت حد جذب با افزایش فاصله بین فیبرها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشینه سرعت حد جذب هنگامی اتفاق می‌افتد که سرعت حد جذب جریان مرکزی میان فیبرها و سرعت حد جذب جریان پیرامونی برابر شود. بیشینه سرعت حد جذب فیبرهای موازی در بازه ۱.۵ تا ۱.۸ برابر سرعت حد جذب تک فیبر مشابه است. این سرعت جذب در فاصله d برابر ۰.۳۵ تا ۰.۵ شعاع قطره برخوردکننده اتفاق می‌افتد. سرعت‌های حد جذب محاسبه شده توسط شبیه‌سازی عددی در اکثر موارد، همخوانی



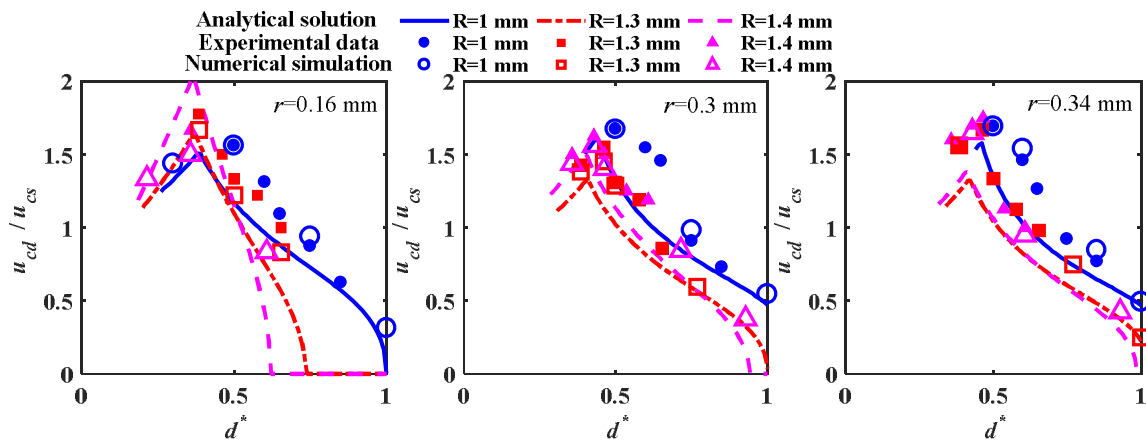
شکل ۳ (الف) توالی برخورد قطرات با فیبرهای موازی؛ (ب) جذب کامل، (ج) جدایش قطره از فضای پیرامون فیبرها، (د) جدایش هم‌زمان از مرکز و پیرامون فیبرها؛ فاصله زمانی بین هر شکل به جز شکل آخر برابر ۲ میلی‌ثانیه است و شکل آخر پس از سکون قطره فیبر گرفته شده است. شرایط برخورد در زیر هر تصویر ذکر شده است.



شکل ۴) خطوط مسیر و کانتور سرعت بر صفحه دوبعدی در برخورد قطره با شعاع ۰.۴ میلی‌متر بر فیبر با شعاع ۰.۳۵ میلی‌متر با سرعت برخورد یک‌متر در ثانیه؛ فاصله بین مرکز دو فیبر برابر یک میلی‌متر است.



شکل ۵) شمای ابعاد مشخصه در حل تحلیلی



نمودار ۲) سرعت حد جذب قطرات بر فیبرهای موازی نسبت به تک‌فیبر با شعاع مشابه برحسب فاصله بی‌بعد میان فیبرها

2009;52(25-26):5814-5826.

7- Han Z, Chang VW, Zhang L, Tse MS, Tan OK, Hildemann LM. Preparation of TiO₂-coated polyester fiber filter by spray-coating and its photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde. *Aerosol and Air Quality Research*. 2012;12:1327-1335.

8- Han D, Steckl AJ. Superhydrophobic and oleophobic fibers by coaxial electrospinning. *LANGMUIR*. 2009;25(16):9454-9462.

9- Gac JM, Jackiewicz A, Werner Ł, Jakubiak S. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. *Separation and Purification Technology*. 2016;170:234-240.

10- Kolakaluri R, Murphy E, Subramaniam S, Brown RC, Fox RO. Filtration model for polydisperse aerosols in gas-solid flow using granule-resolved direct numerical simulation. *AIChE Journal*. 2015;61(11):3594-3606.

11- Sim KM, Park HS, Bae GN, Jung JH. Antimicrobial nanoparticle-coated electrostatic air filter with high filtration efficiency and low pressure drop. *Science of The Total Environment*. 2015;533:266-274.

12- Carroll BJ. The equilibrium of liquid drops on smooth and rough circular cylinders. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1984;97(1):195-200.

13- McHale G, Newton MI. Global geometry and the equilibrium shapes of liquid drops on fibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2002;206(1-3):79-86.

14- Wu XF, Dzenis YA. Droplet on a fiber: Geometrical shape and contact angle. *Acta Mechanica*. 2006;185(3-4):215-225.

15- Bedarkar A, Wu XF, Vaynberg A. Wetting of liquid droplets on two parallel filaments. *Applied Surface Science*. 2010;256(23):7260-7264.

16- Mei M, Fan J, Shou D. The gravitational effect on the geometric profiles of droplets on horizontal fibers. *Soft Matter*. 2013;9(43):10324-10334.

17- Jamali M, Moghadam A, Vahedi Tafreshi H, Pourdeyhi B. Droplet adhesion to hydrophobic fibrous surfaces. *Applied Surface Science*. 2018;456:626-636.

18- Hung LS, Yao SC. Experimental investigation of the impaction of water droplets on cylindrical objects. *International Journal of Multiphase flow*. 1999;25(8):1545-1559.

19- Hung LS, Yao SC. Dripping phenomena of water droplets impacted on horizontal wire screens. *International Journal of Multiphase Flow*. 2002;28(1):93-104.

20- Pasandideh-Fard M, Bussmann M, Chandra S, Mostaghimi J. Simulating droplet impact on a substrate of arbitrary shape. *Atomization and Sprays*. 2001;11(4):397-414.

21- Liang G, Guo Y, Yang Y, Guo S, Shen S. Special phenomena from a single liquid drop impact on wetted cylindrical surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;51:18-27.

22- Liang G, Guo Y, Yang Y, Shen S. Liquid sheet behaviors during a drop impact on wetted cylindrical surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014;54:67-74.

23- Lorenceau É, Clanet C, Quéré D. Capturing drops with a thin fiber. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;279(1):192-197.

24- Lorenceau E, Clanet C, Quéré D, Vignes-Adler M. Off-centre impact on a horizontal fibre. *The European Physical Journal Special Topics*. 2009;166(1):3-6.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، حالت استاتیک و دینامیک برخورد قطرات بر فیبرهای موازی را بررسی کرده‌ایم و نتایج با حالت برخورد مرکزی قطره با تک‌فیبر مقایسه شده است. سرعت حد جذب قطرات توسط فیبرهای موازی با تغییر شعاع قطره برخوردکننده، شعاع فیبر و فاصله بین محور فیبرها به صورت تجربی و مدل‌سازی عددی حاصل شده است و نتایج با حل تحلیلی مقایسه شده‌اند. دسته‌بندی نتایج به صورت موارد زیر است:

۱- بیشینه حجم قطره‌ای که می‌تواند متصل به فیبرهای موازی به صورت استاتیک باقی بماند، حدود ۱.۸۵ تا ۱.۹ برابر حجم بیشینه قطره متصل به تک‌فیبر است.

۲- با افزایش شعاع قطره برخوردکننده و کاهش شعاع فیبرهای موازی، سرعت حد جذب قطره روی فیبرهای موازی کمتر می‌شود.

۳- با افزایش فاصله بین محور فیبرهای موازی، سرعت حد جذب قطرات در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۴- بیشینه سرعت حد جذب فیبرهای موازی در بازه ۱.۵ تا ۱.۸ برابر سرعت حد جذب تک‌فیبر، مشابه است.

۵- مدل‌سازی عددی صورت‌گرفته با روش حجم سیال با استفاده از روش جدید ایزوادکتور در بازسازی سطح آزاد و به‌کارگیری زاویه تماس دینامیکی سیال، با دقت خوبی می‌تواند سرعت حد جذب را تخمین بزند و دینامیک برخورد را نشان دهد.

۶- حل تحلیلی ارائه‌شده براساس قضیه کار و انرژی، تخمین مناسبی از سرعت حد جذب ارائه می‌دهد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: محمد صفوی (نویسنده اول) نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ سیدسلیمان نورآذر (نویسنده دوم) روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪) **منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- Liew TP, Conder JR. Fine mist filtration by wet filters—I. Liquid saturation and flow resistance of fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*. 1985;16(6):497-509.
- Bourrous S, Bouilloux L, Ouf FX, Lemaitre P, Nerisson P, Thomas D, et al. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. *Powder Technology*. 2016;289:109-117.
- Agranovski IE, Braddock RD. Filtration of liquid aerosols on nonwetttable fibrous filters. *AIChE Journal*. 1998;44(12):27754-2783.
- Liu Z, Ji Z, Zhang J, Li L. Influence of processing parameters on gas-liquid filtration performance of fibrous filter cartridge. *Procedia Engineering*. 2015;102:911-920.
- Mead-Hunter R, King AJC, Mullins BJ. 3-Fibrous filtration of liquid aerosols. *Fibrous Filter Media*. 2017 Jun: 51-93.
- Srikanth R, Gambaryan-Roisman T, Steffes C, Stephan P, Tropea C, Yarin AL. Nanofiber coating of surfaces for intensification of drop or spray impact cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

slopes using VOF-PLIC method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(11):29-36.

35- Hoffman RL. A study of the advancing interface: II. Theoretical prediction of the dynamic contact angle in liquid-gas systems. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1983;94(2):470-486.

36- Šikalo Š, Wilhelm HD, Roisman IV, Jakirlić S, Tropea C. Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations. *Physics of Fluids*. 2005;17(6):062103.

37- Tanner LH. The spreading of silicone oil drops on horizontal surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1979;12(9):1473.

38- Cox RG. The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1. Viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986;168:169-194.

39- Berg J, editor. *Wettability*. Boca Raton: CRC Press; 1993

40- Roenby J, Bredmose H, Jasak H. Isoadvector: Free, fast and accurate vof on arbitrary meshes. The 4th OpenFOAM User Conference 2016, Cologne - Germany. Paris: ESI Group; 2016.

41- Roenby J, Eltard-Larsen B, Bredmose H, Jasak H. A new volume-of-fluid method in openfoam. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. Nantes: International Center for Numerical Methods in Engineering; 2017.

42- Padday JF, Pitt AR. The stability of axisymmetric menisci. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*. 1973;275(1253):489-528.

25- Sher E, Haim LF, Sher I. Off-centered impact of water droplets on a thin horizontal wire. *International Journal of Multiphase Flow*. 2013;54:55-60.

26- Piroird K, Clanet C, Lorenceau É, Quéré D. Drops impacting inclined fibers. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009;334:70-74.

27- Dressaire E, Sauret A, Boulogne F, Stone HA. Drop impact on a flexible fiber. *Soft Matter*. 2016;12(1):200-208.

28- Kim SG, Kim W. Drop impact on a fiber. *Physics of Fluids*. 2016;28(4):042001.

29- Safavi M, Nourazar SS. Experimental, analytical, and numerical study of droplet impact on a horizontal fiber. *International Journal of Multiphase Flow*. 2019;113:316-324.

30- Briscoe BJ, Galvin KP, Luckham PF, Saeid AM. Droplet coalescence on fibres. *Colloids and Surfaces*. 1991;56:301-312.

31- Mullins BJ, Agranovski IE, Braddock RD, Ho CM. Effect of fiber orientation on fiber wetting processes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;269(2):449-458.

32- Yarin AL, Chase GG, Liu W, Doiphode SV, Reneker DH. Liquid drop growth on a fiber. *AIChE Journal*. 2006;52(1):217-227.

33- Yuan Y, Lee TR. Contact angle and wetting properties. *Surface Science Techniques*. 2013;51:3-34.

34- Ansari MR, Salimi E, Habibpour B, Adibi P. Numerical simulation and investigation of bubble velocity and deformation in inclined channel with two consecutive