

## (علمی-ترویجی)

# نحوه تشکیل قطرات ناشی از تنفس، سرفه و عطسه در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ و نقش پوشیدن ماسک در کنترل شیوع آن

گسترش ناگهانی کووید-۱۹ در جهان توجه همگان را به خود جلب نموده است. به علاوه، به دلیل ناشناخته بودن و عدم وجود روش‌های درمانی قطعی، توصیه سازمان جهانی بهداشت و سایر نهادهای درمانی مبنی بر ارائه راهکارهای غیردارویی جهت کنترل این ویروس می‌باشد. در همین راستا، یکی از روش‌های پیشنهادی استفاده از ماسک در طول دوران این همه‌گیری جهانی به عنوان ابزاری جهت کنترل پخش قطرات تنفسی می‌باشد. بنابراین، در این مقاله ابتدا به بررسی فرآیندهای تنفسی مانند تنفس، صحبت، سرفه و عطسه از دیدگاه مهندسی و نقش آن در انتشار ویروس پرداخته شده است. به علاوه، با کمک علم مکانیک سیالات عددی نحوه تشکیل قطرات تنفسی و عملکرد آنها در انتقال بیماری‌های واگیردار تنفسی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، به ضرورت استفاده از ماسک و نقش آن در کاهش انتقال ویروس پرداخته شده است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان جت آشفته چندفازی، فرآیندهای تنفسی، آیروسل، کووید-۱۹، ماسک

سیده کوکب گوهریان<sup>۱\*</sup> و محمد طیبی  
رهنی<sup>۱\*\*</sup>

۱- دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف،  
تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴

\* دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:  
goharian@ae.sharif.edu

\*\* استاد

## The Formation of Respiratory Droplets Caused by Breathing, Coughing, and Sneezing in Patients with COVID-19 and the Role of Wearing a Mask in Controlling Its Spread

The sudden spread of Covid-19 in the world has attracted everyone's attention. In addition, due to the unknown and lack of definitive treatment methods, the World Health Organization and other medical institutions recommend non-pharmacological solutions to control the virus. In this regard, one of the proposed methods is to use masks during this global epidemic as a tool to control the spread of respiratory droplets. Therefore, in this paper, we first examine respiratory events such as breathing, talking, sneezing, and coughing from an engineering perspective and their role in the spread of the virus. In addition, with the help of numerical fluid mechanics, the formation of respiratory droplets and their function in the transmission of infectious respiratory diseases have been studied. Then, the necessity of using a mask and its role in reducing the transmission of the virus is discussed.

**Keywords:** Turbulent Jet Flow, Respiratory Events, Aerosol, COVID-19, Mask

S.K. Goharian<sup>1\*</sup> and M. Taeibi  
Rahni<sup>1\*\*</sup>

1- Department of Aerospace  
Engineering, Sharif University of  
Technology, Postal Code:  
1458889494, Tehran, IRAN

\* Ph.D. Student (Corresponding  
Author): Email:

goharian@ae.sharif.edu

\*\* Professor

## (علمی-ترویجی)

سیده کوبک گوهریان و محمد طیبی رهنی

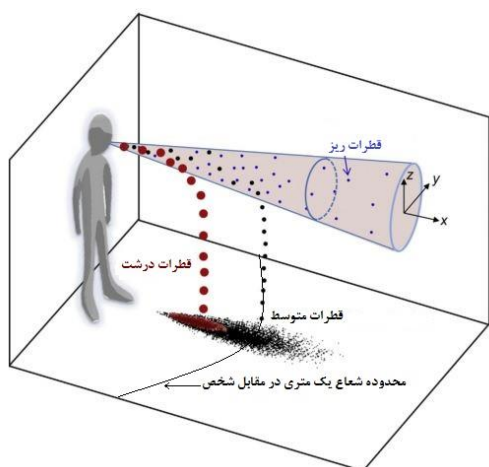
## ۱- مقدمه

با وجود پیشرفت چشم‌گیر در عرصه پزشکی و افزایش کیفیت بهداشت فردی، ظهور ناگهانی کووید-۱۹ باعث شد تا علم پزشکی به ضعف خود در کنترل و غلبه بر بیماری‌های ناشناخته واگردار تنفسی پی‌برد. به علاوه، رفتار این ویروس که منشأ آن در شهر ووهان چین می‌باشد، غیرقابل پیش‌بینی است و جهش آن درون بدن انسان در برخی از کشورها مرگبارتر بوده که همین امر موجب بروز نگرانی و سردرگمی پزشکان شده است [۱]. به منظور رویارویی و درک بهتر رفتار کووید-۱۹، دانشمندان به پیش‌بینی این همه‌گیری جهانی بر مبنای اطلاعات بدست آمده از سایر کشورها پرداخته‌اند [۲]. همچنین، برخی از محققان مدل ریاضی مناسبی را ارائه داده‌اند که به کمک آن می‌توان خطر انتقال ویروس را توسط ذرات تنفسی آلوده پیش‌بینی کرد [۳]. با بررسی‌های تجربی انجام‌شده، محققان دریافته‌اند که ماندگاری کووید-۱۹ روی سطوح مختلف با توجه به جنس آن متفاوت می‌باشد [۴-۵]. به طور مثال، طول عمر ویروس کرونا روی سطوح پلاستیکی، فلزی و ماسک‌ها به مدت ۷ روز، روی پارچه و لباس ۲ روز و روی اسکناس ۱ روز است. همچنین، ذرات این ویروس در هوا با طول عمر سه ساعت باقی می‌ماند. بنابراین، آبروسل‌های تنفسی معلق در هوا می‌توانند نقش مؤثری در انتقال بیماری‌های واگردار تنفسی ایفا کنند [۶]. با توجه به مطالعات اخیر، تعداد زیادی از مبتلایان به کووید-۱۹ توسط اشخاصی که هیچ‌گونه علائم ظاهری مانند عطسه یا سرفه نداشته‌اند این ویروس را دریافت کرده‌اند [۷-۸]. در واقع، کووید-۱۹ قادر است تنها به وسیله صحبت عادی و یا حتی تنفس، از فرد مبتلا به شخص مستعد دریافت این ویروس منتقل شود [۹]. مطالعات نشان می‌دهند که در حدود ۳۵٪ مبتلایان بدون علائم ظاهری هستند [۱۰] و می‌توانند بیماری را بدون آگاهی انتقال دهند. در نتیجه، حرف یا سخنرانی معمولی منجر به تولید مقدار زیاد ذرات آبروسلی می‌شود که با چشم قابل رؤیت نیستند و از طرفی به اندازه‌ای بزرگ هستند که می‌توانند ویروس‌های متعدد را روی سطح خود حمل کنند. شدت صوت در هنگام صحبت بر روی توزیع مقدار ذرات آبروسل تنفسی تأثیر می‌گذارد. با توجه به میزان بلندی صدا نرخ انتشار ذرات تنفسی متفاوت است، یعنی مستقل از زبان گفتاری، صدای بلند منجر به تولید مقدار بیشتری از ذرات آبروسل می‌شود [۱۱]. بنابراین، دانش مربوط به پارامترهای فیزیکی و بیولوژیکی که روی مسیرهای انتقال پاتوژن‌های تنفسی اثر می‌گذارند، جهت طراحی راهکارهای مؤثر غیردارویی بسیار مهم است [۱۲]. همچنین، مطالعاتی هم روی منبع ذرات

تنفسی [۱۳] و میدان جریان هوا در نواحی بالایی دستگاه تنفس [۱۴] انجام شده است. فرآیندهایی مانند صحبت، خنده، سرفه، عطسه و یا بازدم حاصل از تنفس، منجر به تولید جریان جت می‌شوند. سرفه و عطسه باعث تولید ابرهای گازی آشفته چندفازی می‌شوند که می‌توانند از قطرات تنفسی در مقابل تبخیر محافظت کنند. در حین فرآیند عطسه یا سرفه، قطرات تنفسی موجود در بازدم که ابعادی بزرگتر از ۵ میکرومتر دارند، می‌توانند ویروس را روی سطح خود حمل کنند و بر افراد مستعد دریافت بیماری تأثیر بگذارند. همچنین، فرد مستعد قادر است ذرات آبروسل میکروسکوپی را به درون بدن خود فرو برد. این ذرات، شامل اجزای جامد باقی‌مانده از یک قطره آبروسل تنفسی تبخیر شده هستند و به قدری کوچکند که می‌توانند تا ساعت‌ها در هوا معلق بمانند [۷]. آبروسل‌های تنفسی می‌توانند به دو طریق مستقیم و غیرمستقیم بدون هیچ‌گونه تماس فیزیکی بین فرد مبتلا و مستعد منتقل شوند. روش مستقیم به حالتی گفته می‌شود که فرد مستعد در مجاورت جریان جت حاصل از فرآیندهای تنفسی (عطسه، سرفه و یا تنفس) فرد بیمار قرار بگیرد. در روش غیر مستقیم، شخص مستعد تحت تأثیر آبروسل‌های به جا مانده از فرد بیمار که در هوا به صورت معلق باقی مانده‌اند قرار می‌گیرد. در واقع، مطالعات بسیاری در زمینه قطرات تنفسی و نحوه پراکندگی آن در هوا به صورت دقیق توسط علم مکانیک سیالات مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به نتایج بدست‌آمده قوانین وضع شده توسط سازمان جهانی بهداشت را تصحیح می‌کند [۱۵].

با توجه به توصیه‌های جهانی مبنی بر تأثیر مثبت ماسک در طول این همه‌گیری برخی از این مقالات به بررسی تأثیر ماسک بر پخش ذرات تنفسی نیز پرداخته‌اند. با توجه به یافته‌ها، جنس و نوع ساختار ماسک در کارایی آن بسیار مؤثر می‌باشد [۱۰]. زیرا، هنگام فرآیندهای تنفسی ذرات آبروسل با ابعاد بزرگتر روی سطح ماسک می‌چسبند [۱۶]. در حالی که، بخشی از آبروسل‌ها از میان بافت ماسک عبور و یا از فضای خالی اطراف آن نشت می‌کنند (شکل ۱). بنابراین، پوشیدن ماسک به تنهایی مانع از انتقال ذرات نمی‌شود و حفظ رعایت فاصله‌گذاری اجتماعی حتی با پوشش ماسک نیز ضروری است [۱۷]. در این مقاله، ابتدا به بررسی ابعاد قطرات تنفسی پرداخته شده و مروری کوتاه بر عوامل مؤثر در شکل‌گیری آنها شده است. سپس، به کمک مطالعات تجربی و عددی انجام شده نقش ماسک در جلوگیری از انتشار بیماری‌های واگردار تنفسی تحلیل می‌شود.

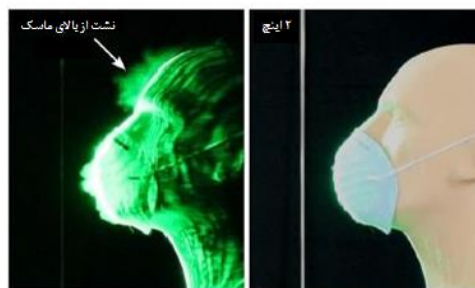
میکرومتر تا ۱۰۰۰ میکرومتر قرار می‌گیرد [۱۱ و ۲۸-۲۷]. همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود، تعداد ذرات ریزتر ( $d \leq 50\mu m$ ) در فرآیند عطسه و سرفه بیشتر از صحبت عادی می‌باشد و از این رو می‌توانند تا شعاع وسیع‌تری در محیط اطراف پراکنده شوند. همچنین، تعداد قطرات تنفسی ناشی از عطسه بسیار بیشتر از سرفه بوده و در نتیجه می‌تواند ویروس بیشتری را منتقل کند. در فرد ناقل فاقد علائم ظاهری، اهمیت عطسه از سرفه بیشتر می‌باشد. زیرا، عطسه یک فرآیند طبیعی و عادی بوده که به صورت متوسط برای هر شخص در طول روز حدوداً چهار مرتبه اتفاق می‌افتد [۲۹].



شکل (۲): چگونگی جابه‌جایی و ته‌نشینی ذرات تنفسی با توجه به ابعاد آنها [۳۰].

جدول (۱): توزیع ابعاد ذرات تنفسی در فرآیند عطسه، سرفه و صحبت [۲۷].

محدوده قطر قطرات تنفسی ( $\mu m$ )	عطسه	سرفه	صحبت
۰-۵	۰	۰	۰
۵-۱۰	۳۶	۲۴	۲۰
۱۰-۱۵	۹۴	۱۱۹	۸۴
۱۵-۲۰	۲۶۷	۳۳۷	۲۰۰
۲۰-۲۵	۳۱۲	۳۴۶	۲۲۴
۲۵-۵۰	۸۰۷	۷۶۷	۵۹۷
۵۰-۷۵	۵۹۳	۴۶۸	۵۳۱
۷۵-۱۰۰	۲۶۰	۲۸۵	۳۵۲
۱۰۰-۱۲۵	۱۴۴	۱۶۰	۲۶۰
۱۲۵-۱۵۰	۱۰۵	۱۲۵	۲۱۴
۱۵۰-۲۰۰	۱۱۵	۱۱۵	۱۷۹
۲۰۰-۲۵۰	۸۲	۹۶	۹۹
۲۵۰-۵۰۰	۱۱۸	۱۱۳	۱۹۷
۵۰۰-۱۰۰۰	۵۹	۴۰	۴۱
۱۰۰۰-۲۰۰۰	۰	۵	۲



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل (۱): نشت جریان سرفه از ماسک، (الف) تصویر ماسک روی سر مانکن، (ب) ۰/۲ ثانیه، (ج) ۰/۹۷ ثانیه و (د) ۳/۷ ثانیه پس از سرفه [۱۰].

## ۲- فرآیندهای تنفسی

مطالعات عددی در فهم عمیق‌تر مکانیزم انتقال ویروس، وخامت شرایط حاصل از همه‌گیری جهانی کووید-۱۹ و توسعه و به‌روزرسانی مقررات و قوانین بهداشت عمومی بسیار مؤثر می‌باشد. در همین راستا، به منظور شناخت صحیح‌تر فرآیندهای تنفسی، مطالعات تجربی و عددی متعددی جهت درک بهتر رفتار قطره [۱]، شبیه‌سازی فرآیندهایی مانند عطسه و سرفه [۲۳-۱۹] و یا تحلیل جریان خروجی ناشی از تنفس یا صحبت معمولی [۲۴] انجام شده است. با توجه به داده‌های تجربی [۲۵] و عددی [۱۶]، ابرهای آشفته حاصل از فرآیندهای تنفسی، قطرات کوچک را تا فاصله‌ای مشخص (حدوداً ۵ الی ۸ متر) جابه‌جا می‌کنند. قطرات تنفسی، محدوده متفاوتی از ذرات با ابعاد مختلف را شامل می‌شوند. به علاوه، ابعاد این قطرات روی نحوه ته‌نشینی آن چه در محیط خارجی و چه در داخل سیستم تنفسی انسان تأثیر می‌گذارد. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ذرات درشت‌تر تا حدود شعاع یک متری فرد روی زمین می‌افتند در صورتی که قطرات ریزتر تا فواصل دورتری همچنان در هوا معلق می‌مانند. همچنین، درون دستگاه تنفسی قطرات ریزتر می‌توانند تا نقاط عمیق‌تری نفوذ کنند [۲۶]. بنابراین، نحوه انتقال ویروس توسط آبروسل‌های تنفسی بسته به ابعاد آنها متفاوت است. با توجه به مطالعات انجام شده، قطر قطرات تنفسی در محدوده ۰/۵

## (علمی-ترویجی)

سیده کوکب گوهریان و محمد طیبی رهنی

در انتهای دستگاه تنفسی قرار دارند و روی سطح داخلی آنها را یک فیلم مایع پوشانده است. با در نظر گرفتن تنفس به عنوان یک فرآیند موجی (دم و بازدم) می‌توان گفت، هنگام بازدم هوا به محیط بیرون، نایژه‌ها جمع می‌شوند و در هنگام دم، این لوله‌ها دوباره باز شده و حین فاصله گرفتن دیواره آنها از یکدیگر، فیلم مایع تشکیل قطرات ریز با ابعاد  $d \leq 1\mu m$  را می‌دهد.

## ۳-۲- بویانسی

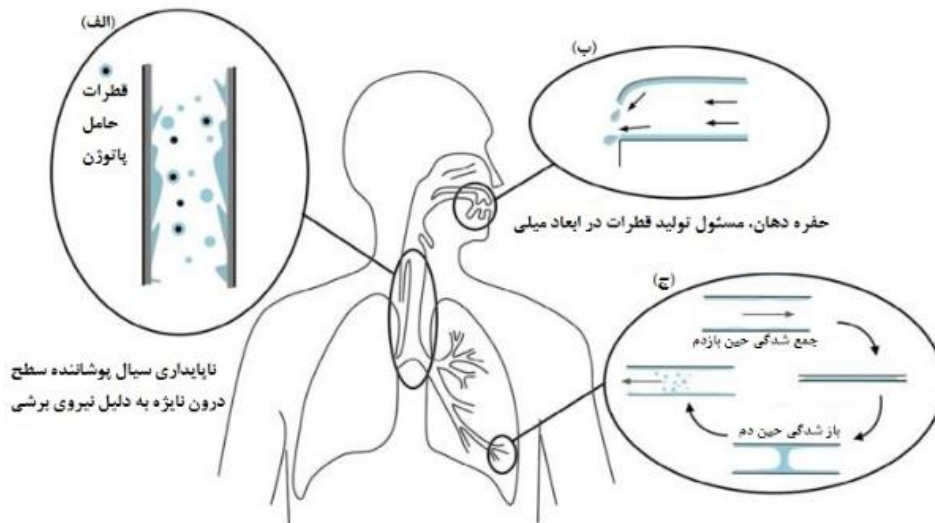
جریان بازدمی که از مجاری تنفسی به بیرون بدن منتقل می‌شود رطوبت و دمایی معادل با بدن انسان دارد. به دلیل اختلاف دما و رطوبت نسبی میان بدن انسان و محیط اطراف، تأثیر بویانسی بر روی قطرات تنفسی غیرقابل چشم‌پوشی می‌باشد. بنابراین، با حرکت ابر آشفته حاصل از بازدم به سمت پائین دست، هوای محیط به داخل آن تزریق می‌شود و سرعت آن کاهش می‌یابد. از این رو، پس از طی مسیری کوتاه به سمت بالا منحرف می‌شود [۱۹]. با توجه با مطالعات اخیر، این جریان می‌تواند تا ارتفاع حدوداً ۶ متر بالا رفته و در مکان‌های سر بسته در صورت حضور سیستم تهویه به درون آن نفوذ کند [۳۹].

## ۳- نحوه تشکیل قطرات تنفسی

عوامل مؤثر در تشکیل قطرات و جابه‌جایی آن بعد از خروج از مجاری تنفسی مواردی همچون: اینرسی، جاذبه، نیروی درگ، نیروی برشی، تبخیر و تبادل جرم و دمای مربوط به محیط برای ترکیب شیمیایی قطرات [۳۱]، رطوبت، جابه‌جایی، تهویه هوا [۳۲] و بویانسی ناشی از ابر آشفته دوفازی بازدم [۱۹] می‌باشد.

## ۳-۱- نیروی برشی

یکی از مکانیزم‌های مهم برای تولید قطرات تنفسی، ناپایداری و درهم شکستن مخاط بر اثر تنش برشی ناشی از جریان هوا است [۳۳-۳۴]. برخی از ناپایداری‌هایی که در تولید قطرات تنفسی نقش دارند شامل ناپایداری رایلی-تیلور [۳۵]، ناپایداری کلین-هلمهولتز [۳۶] و ناپایداری پلاتو-رایلی [۳۷] است. مطابق شکل ۳، هنگامی که هوا با سرعت بسیار زیاد (بعنوان مثال هنگام سرفه) از مجرای تنفسی عبور کند، نیروی برشی ناشی از آن باعث ناپایداری فیلم مایعی می‌شود که روی سطح داخلی مجرا را پوشانده و منجر به تشکیل قطرات تنفسی می‌شود. همچنین، در دهان و بینی نیز، سرعت بالای هوای بازدم باعث اتمیزاسیون بزاق دهان و مخاط گلو شده و باعث تولید قطرات می‌شوند [۳۸]. نایژه‌ها لوله‌های باریکی هستند که



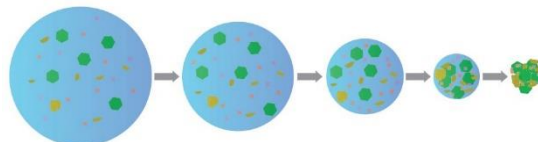
شکل (۳): تولید قطرات درون دستگاه تنفسی (الف) ناپایداری سیال پوشاننده سطح مجرای تنفسی، (ب) اتمیزاسیون در دهان و (ج) گسیختگی فیلم سیال در نایژه [۴۰].

می‌شود، قطرات ریز پس از تبخیر تبدیل به هسته‌های ریزی می‌شوند که هسته قطره نام دارند. در حقیقت، به دلیل وجود نمک در ذرات تنفسی فرآیند تبخیر تا جایی ادامه می‌یابد که قطر ذره به اندازه حدوداً ۳۰ تا ۲۰ درصد قطر اولیه آن باشد

## ۳-۳- جاذبه و تبخیر

به منظور توضیح نقش جاذبه، باید یادآور شد که قطرات بزرگتر، تحت تأثیر وزن خود و قبل از اینکه تبخیر شوند به روی سطوح اطراف می‌افتند. قطرات کوچکتر سبک‌تر هستند، به همین دلیل، پیش از اینکه روی زمین بیافتند، سریع‌تر از قطرات درشت‌تر، تبخیر می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده

[۴۱]. در نتیجه، اندازه هسته قطره یک سوم اندازه واقعی قطرات بوده و نرخ تبخیر آن به تفاوت فشار بخار اشباع سطح قطره و فشار بخار محیط، ضریب پخش جرم و سرعت نسبی میان قطره و هوای اطراف بستگی دارد [۴۲] و تحت تأثیر دما و رطوبت محیط می‌باشد [۴۳]. همچنین، وابستگی فرآیند تبخیر به دما و رطوبت محیط اطراف منجر به تفاوت نرخ انتقال آيروسول‌ها در آب و هوای مختلف در نواحی گوناگون جغرافیایی می‌شود [۴۴].



شکل (۴): تبخیر قطره تنفسی (سمت چپ) و تبدیل آن به هسته قطره (سمت راست) [۴۵].

### ۳-۵- جریان هوا

علاوه بر سایر عوامل، جریان هوای محیط نیز می‌تواند روی ذرات تنفسی به صورت مستقیم اثر بگذارد. برخی از مطالعات با در نظر گرفتن اثر باد، تأثیر آن را بر فاصله‌گذاری اجتماعی بررسی کرده‌اند. طبق یافته‌ها، در صورت وزش باد ذرات تنفسی ناشی از سرفه تا فاصله‌ای به مراتب دورتر (در مقایسه با هوای ساکن) پخش می‌شوند [۴۶]. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که افزایش سرعت هوا منجر به انتقال ذرات تنفسی تا فواصل دورتر می‌شود و در نتیجه مناطق بیشتری را آلوده می‌کند [۴۷]. این امر باعث می‌شود تعداد افراد بیشتری در معرض آيروسول‌های تنفسی قرار بگیرند. همچنین، سرعت جریان هوا باعث بروز آشفستگی شده و بنابراین موجب پراکندگی بیشتر ذرات در محدوده وسیع‌تر می‌شود و از این رو شانس ابتلا را افزایش می‌دهد [۷]. در نتیجه، موضوع انتقال ذرات در فضاهای بسته در حضور سیستم‌های تهویه می‌تواند از مسائل چالش برانگیز در حوزه دانش آيروسول‌ها باشد. زیرا، در محیط‌های داخلی حضور افراد و اثرات دمای بدن آنها بر حرکت ذرات تنفسی و در نتیجه انتقال بیماری تأثیر می‌گذارد [۴۸].

### ۴- اهمیت استفاده از ماسک‌ها

علاوه بر تهویه هوا به عنوان یک عامل مهم در جابه‌جایی ویروس [۴۹]، ماسک‌ها هنگام فرآیندهای تنفسی نقش مؤثری در کنترل پخش ذرات دارند. طبق گزارشات، خطر ابتلا به ویروس آنفلوآنزا، سارس و کرونا با پوشیدن ماسک به ترتیب به اندازه ۴۵، ۷۴ و ۹۶ درصد کاهش می‌یابد [۵۰]. مهم‌ترین وظیفه ماسک کاهش انتقال ذرات خارجی به دستگاه تنفس و یا انتشار قطرات از مجاری تنفسی به محیط بیرون

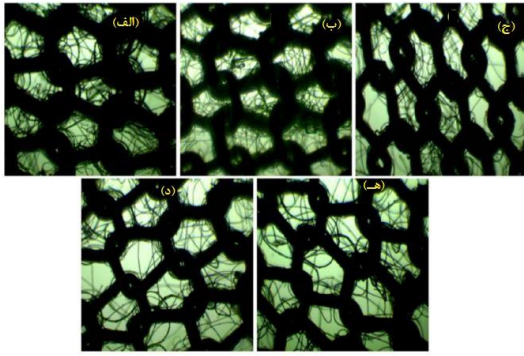
است. محققان به کمک یک مدل ریاضی دریافتند که پوشیدن ماسک (حتی از نوع غیر استاندارد) در کنترل شیوع کووید-۱۹ و کاهش میزان مرگ و میر روزانه ناشی از آن بسیار مؤثر است [۵۱]. به همین علت، استفاده از ماسک حتی نوع غیراستاندارد آن به همراه رعایت موارد بهداشتی مانند شستشوی دائمی دست‌ها تأثیر بسزایی در کاهش انتقال بیماری‌های واگیردار تنفسی دارد. از طرف دیگر، استفاده از ماسک در محیط بیرون به خصوص هنگام استفاده از وسایل نقلیه عمومی نیز به کنترل شیوع کووید-۱۹ کمک بسیاری می‌کند [۵۲]. زیرا، این کار موجب کاهش انتشار قطرات تنفسی و ترشحات بزاق دهان از فرد بیمار به محیط بیرون می‌شود. همانگونه که گفته شد، افراد مبتلا با علائم خفیف یا خاموش، سهم مهمی در انتقال کووید-۱۹ دارند زیرا این گروه قرنطینه نمی‌شوند و بدون آگاهی مسبب انتشار ویروس در محیط اطراف خود هستند [۵۳]. در نتیجه، استفاده از ماسک توسط این افراد خطر پراکندگی و انتقال کووید-۱۹ به افراد مستعد را کاهش می‌دهد. با توجه به یافته‌های جدید، پوشیدن ماسک توسط مردم به میزان چشم‌گیری مانع از گسترش ویروس‌های تنفسی شده و خطر ابتلا به بیماری را در خارج از محیط خانه به اندازه ۵۶ درصد کاهش داده است [۵۰]. میزان کارایی ماسک‌ها با توجه به کارخانه سازنده و رعایت استانداردهای لازم در فرآیند ساخت آن می‌تواند متغیر باشد. همچنین، عملکرد مناسب یک ماسک در فیلترسازی ذرات، علاوه بر موارد مذکور به نحوه قرارگیری آن روی صورت و پوشانندگی مناسب در محدوده دهان و بینی نیز وابسته است.

### ۴-۱- انواع ماسک‌ها

ویروس سارس-کرونا شکل نامنظمی دارد و قطرش بین ۰/۰۶ الی ۰/۲ میکرومتر متغیر بوده و می‌تواند در خارج از میزبان (موجودی که برای رشد و تکثیر آن مناسب است) به مدت ۲۴ ساعت زنده بماند [۵۴]. در این صورت، بعضی از ویروس‌ها که کوچکتر از فواصل میان الیاف ماسک‌ها باشند، ممکن است در ماسک نفوذ یا از آن عبور کنند. در نتیجه، بررسی عملکرد ماسک‌های گوناگون در مقابل ویروس جهت حفظ سلامت افراد امری بسیار مهم تلقی می‌شود. ماسک‌ها به عنوان مانعی در برابر ورود ذرات خارجی به سیستم تنفسی اشکال مختلفی دارند و به صورت کلی به سه دسته پارچه‌ای (محافظت ضعیف اما قیمت ارزان)، جراحی (محافظت محدود و قیمت متوسط) و تنفسی (محافظت قوی و قیمت بالا) تقسیم می‌شوند [۵۵]. در اوایل شیوع کووید-۱۹ و نیاز همگانی به ماسک‌ها، بسیاری از کشورها

## (علمی-ترویجی)

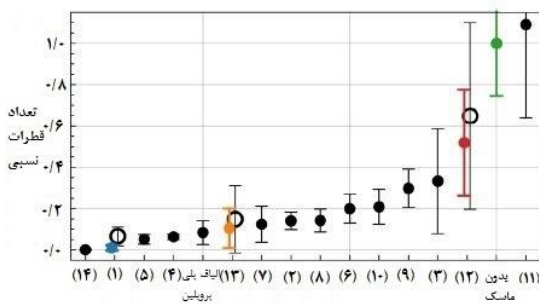
سیده کوکب گوهریان و محمد طیبی رهنی



شکل (۶): تغییر درصد کارایی یک ماسک پارچه‌ای دولایه پس از هر مرتبه شستشو [۵۹].



شکل (۷): ماسک‌های مورد آزمایش به منظور بررسی تعداد نسبی قطرات منتشر شده از روی آنها [۵۹].

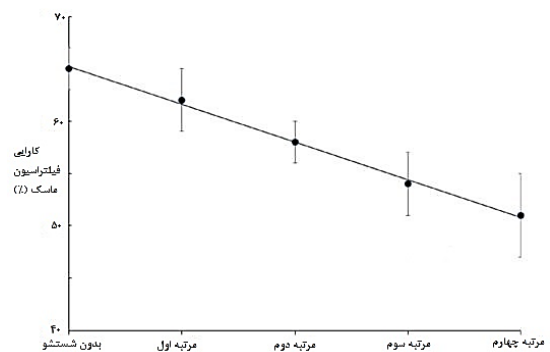


شکل (۸): تعداد ذرات تنفسی منتشر شده از دهان و بینی به هنگام صحبت و در حضور ماسک‌های مختلف [۶۰].

به منظور مقایسه دقیق ماسک‌ها با یکدیگر، تعداد قطرات خارج‌شده از مجاری تنفسی به صورت بی‌بعد ارائه شده است. به همین دلیل، ابتدا با ادای یک جمله خاص، ذرات تنفسی منتشرشده در حضور ماسک‌های مختلف به صورت جداگانه اندازه‌گیری شد و این مقادیر بر تعداد ذرات منتشرشده با ادای همان جمله اما این بار بدون وجود ماسک، تقسیم گردید. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، صحبت کردن به

با کمبود ماسک مواجه شدند [۵۶]. بنابراین، برخی کشورها دستگاهی طراحی کردند که می‌تواند با صرف زمان و هزینه اندک، ماسک‌های مختلف را تست و میزان آبروسل‌های عبوری از آن را در دم و بازدم اندازه‌گیری کند [۵۷] و بدین وسیله سرعت تولید را افزایش دهد. اما در این میان به دلیل کمبود ماسک‌های استاندارد مانند ماسک‌های جراحی و N95، استفاده از انواع ماسک‌های پارچه‌ای خانگی به شدت افزایش یافت. البته، طبق اعلام سازمان کنترل و پیشگیری از بیماری‌های واگیردار ایالات متحده آمریکا، استفاده از ماسک‌های غیراستاندارد و یا استفاده مجدد از آنها باید با احتیاط و رعایت نکات بهداشتی همراه باشد [۵۸]. از این‌رو، استفاده از ماسک‌های خانگی باید با دقت و رعایت اصول دقیق بهداشتی باشد.

درواقع، این نوع از ماسک‌ها کارایی کمتری نسبت به ماسک‌های طبی دارند اما قابل شستشو بوده و می‌توانند به دفعات متعددی مصرف شوند. یکی از معایب ماسک‌های پارچه‌ای این است که پس از هر بار شستشو میزان عملکرد مؤثر آن کاهش می‌یابد [۵۹]. با توجه به شکل ۵، می‌توان دید که به ازای هر چهار مرتبه شستشوی یک ماسک پارچه‌ای دولایه، کارایی آن به میزان ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. زیرا مطابق شکل ۶، شستن ماسک باعث می‌شود به تدریج فواصل میان الیاف ماسک بیشتر و قطر متوسط الیاف کم شود. به منظور مقایسه بهتر عملکرد ماسک‌های طبی و ماسک‌های خانگی همانگونه که در شکل ۸ (سمت راست) مشاهده می‌شود، چند نوع ماسک موجود در بازار به صورت تجربی تحت آزمایش [۶۰] و کارایی هریک از آنها مورد بررسی قرارگرفت. اطلاعات دقیق نوع و جنس هریک از ماسک‌های موجود در شکل ۷ در مرجع [۶۰] ذکر شده است.



شکل (۵): تغییر درصد کارایی یک ماسک پارچه‌ای دولایه پس از هر مرتبه شستشو [۵۹].

می‌تواند از افراد در مقابل بیماری‌های تنفسی واگیردار مانند سارس و آنفلوآنزا بهتر محافظت کند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ماسک‌هایی با راندامان ۹۹ درصد می‌توانند بین ۹۲/۳ تا ۹۹/۵ درصد از ذرات تنفسی را روی سطح خود گیر بیندازند و در نتیجه حدود ۰/۵ تا ۷/۷ درصد از قطرات می‌توانند از سطح ماسک عبور کنند. بنابراین، اگر یک محافظ بین مجاری تنفسی و سطح آلوده ماسک قرار گیرد کارایی یک ماسک معمولی جراحی را می‌تواند تا ۹۸/۹ الی ۹۹/۹ درصد ارتقاء دهد [۶۲].

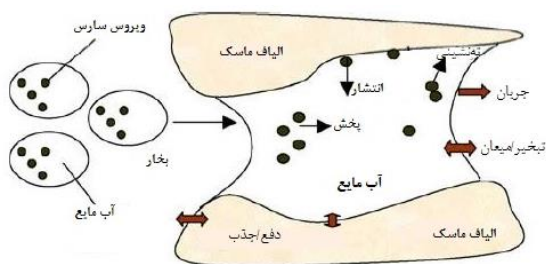
هنگام استفاده از بعضی ماسک‌ها مانند دستمال گردن (شماره ۱۱ در شکل ۷) منجر به شکست قطرات درشت‌تر به قطرات ریزتر می‌شود. این قطرات ریز از میان بافت دستمال گردن عبور کرده و در محیط بیرون پراکنده می‌شوند. بنابراین، دستمال گردن در هنگام صحبت روی ذرات تنفسی تأثیر معکوس می‌گذارد و تعداد آنها را بیشتر از حالتی می‌کنند که شخص گوینده چیزی در مقابل دهان ندارد. در این میان، ماسک‌های جراحی و N95 (که کاملاً محدوده دهان و بینی را می‌پوشاند) بهترین عملکرد را دارند.

#### ۲-۴- بهبود کارایی ماسک‌ها

به دلیل نقش مهم ماسک‌ها به عنوان یک روش غیردارویی در کنترل انتقال ویروس، بهبود عملکرد آن در برابر فیلترسازی قطرات تنفسی یکی از مسائل مطرح شده در زمینه افزایش تأثیر آنها است. به دلیل پخش مایع بر اثر مویبندی، ویروس درون بافت ماسک نفوذ و یا از روی آن عبور می‌کند. علاوه بر آن، بازدم فرد نیز موجب ترشدهگی سطح داخلی ماسک می‌شود. رطوبت بالای هوای بازدم و تفاوت دمای میان هوا و ماسک باعث می‌شود بخار آب درون ماسک میعان شود. قطراتی که هنگام صحبت کردن از دهان خارج می‌شود فرآیند ترشدهگی را شتاب می‌دهند. همچنین، عمل تنفس به صورت فیزیکی و با اعمال نیرو نفوذ ذرات به درون الیاف را تسریع می‌بخشد. با تکرار تنفس، ماسک در واقع محل تجمع ویروس‌ها می‌شود. به خصوص، وقتی که سطح خارجی آن در معرض قطرات آلوده قرارگیرد. این یک فرآیند فیزیکی ناشی از کوپل انتقال جرم و حرارت در یک محیط متخلخل است. شکل ۹ مکانیزم پخش ویروس درون الیاف ماسک در چرخه تنفس را نشان می‌دهد. قطرات آلوده به ویروس توسط نیروی کشش سطحی و عمل تنفس به سمت جلو پیش رانده می‌شوند. مطابق شکل ۱۰، در حین اثر مویبندی و تنفس، فرآیند جذب و دفع، تبخیر و میعان، ته‌نشینی و انتشار آب به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد [۶۱]. به دلیل رطوبت و گرمای دائمی سطح ماسک، ویروس روی سطح آن به مدت طولانی زنده و فعال می‌ماند. به منظور کاهش خطر بهتر است جنس ماسک به گونه‌ای باشد که ویروس و باکتری روی سطح آن غیرفعال شوند. یکی از کارهای انجام شده بهبود کارایی ماسک در ابعاد نانو است تا الیاف آن به گونه‌ای باشند که آبریز و در نتیجه آنتی‌باکتریال شوند. این روش، درواقع فواصل میان الیاف ماسک را با مواد نانو مقیاس می‌پوشاند تا نفوذ ویروس را به حداقل برساند [۵۴]. یکی دیگر از راه‌های پیشنهادی به منظور کارایی بهتر ماسک‌ها، جداسازی مجاری تنفسی (دهان و بینی) از سطح آلوده ماسک است. زیرا، این کار



شکل (۹): نشت جریان بازدم از اطراف ماسک [۱۷].



شکل (۱۰): تصویری شماتیک از چگونگی نفوذ ویروس به درون الیاف ماسک [۶۱].

#### ۳-۴- معایب استفاده نادرست از ماسک‌ها

استفاده طولانی مدت از ماسک اثرات مخربی بر روی سلامت انسان می‌گذارد. زیرا تنفس مداوم با ماسک موجب افزایش کربن‌دی‌اکسید درون آن شده و باعث بروز سرگیجه، مشکلات تنفسی ناشی از کمبود هوای تمیز و ضربان نامنظم قلب می‌شود. اگر ماسک به مدت طولانی‌تری پوشیده شود، سطح آن به سبب تعریق صورت (به خصوص در فصول گرم سال و یا مناطق گرم و مرطوب) خیس و درون ماسک هم به دلیل تنفس مداوم، بخار تشکیل می‌شود و این عوامل باعث جذب و انباشته‌گی ذرات روی سطح ماسک می‌شوند [۶۳]. همچنین، مطابق شکل ۱۰، به دلیل نشت جریان از ماسک به محیط بیرون، هوای بازدم روی پوست صورت نیز تأثیر گذاشته و باعث گرم و مرطوب شدن آن می‌شود که محیط مناسبی برای بقای

## (علمی-ترویجی)

سیده کوکب گوهریان و محمد طیبی رهنی

شد، عواملی چون جاذبه، بویانسی، نیروی برشی، تبخیر و جریان هوا در تشکیل و انتقال قطرات تنفسی نقش دارند. بر اساس یافته‌ها، قطرات تنفسی ناشی از عطسه، سرفه و صحبت در محدوده ۰/۵ تا ۱،۰۰۰ میکرومتر بوده و قادر به حمل کووید-۱۹ روی سطح خود هستند. بخشی از این قطرات تحت تأثیر نیروی جاذبه روی سطوح ته‌نشین می‌شوند و بسته به جنس آنها، تا مدت‌های طولانی زنده می‌مانند و مابقی که سبکتر هستند به مدت چند ساعت در هوا معلق می‌مانند. بنابراین، به منظور جلوگیری از ابتلا به بیماری، در کنار شستشوی دائمی دست‌ها و رعایت فاصله‌گذاری اجتماعی باید از ماسک‌های مناسب جهت جلوگیری از نفوذ ویروس به مجاری تنفسی استفاده نمود. از آنجاکه تعداد زیادی از افراد بیمارانی با علائم خاموش هستند و بدون آگاهی خود می‌توانند سایر افراد را درگیر بیماری‌های واگیردار تنفسی کنند، استفاده از ماسک در اماکن عمومی به منظور کنترل انتقال ویروس تأثیر بسزایی دارد. با توجه به یافته‌ها، ماسک‌های جراحی و N95 در فرآیند فیلترسازی قطرات تنفسی بهتر عمل می‌کنند. اما در حالت کلی، استفاده از هرگونه پوششی در مقابل دهان و بینی بهتر از حضور بدون ماسک در خارج از محیط خانه است. به دلیل افزایش ناگهانی تقاضای ماسک در سطح عمومی، راهکارهایی جهت تسریع در تولید و بهبود کیفیت ماسک‌های تولیدی ارائه شده است. در کنار کلیه فوایدی که ماسک‌ها در کاهش انتقال ویروس‌های تنفسی دارند، استفاده از آنها به صورت مداوم و طولانی مدت و همچنین در هنگام فعالیت‌های شدید بدنی به هیچ وجه توصیه نمی‌شود. البته، نه تنها پوشیدن ماسک برای افراد بیمار (حتی با علائم خفیف) به جهت جلوگیری از انتشار ویروس مفید است بلکه افراد سالم هم برای جلوگیری از ابتلا باید از ماسک‌های مناسب استفاده کنند. البته، با توجه به وضعیت آمار روزانه شیوع کووید-۱۹ در کشور ایران، پس از اجباری شدن استفاده از ماسک در اماکن و وسایل نقلیه عمومی می‌توان دریافت که ماسک تنها راه چاره جهت ممانعت از ابتلا به کووید-۱۹ نیست، بلکه در مسأله سلامت عمومی جامعه، ماسک به عنوان یک مکمل عمل می‌کند که در کنار رعایت بهداشت فردی و حفظ فاصله‌گذاری اجتماعی می‌تواند در کاهش انتقال بیماری مؤثر باشد.

ویروس آنفلوآنزا و کرونا است [۶۴]. به همین علت، از دست زدن به صورت باید پرهیز نمود و پس از هربار استفاده از ماسک آن را به خوبی شستشو داد. یکی دیگر از موارد استفاده نادرست از ماسک هنگام ورزش است. با توجه به مطالعات اخیر [۶۴]، افرادی که با ماسک ورزش می‌کنند دچار ناراحتی، احساس خستگی، تنگی نفس، سردرد و ضعف عضلانی می‌شوند که این علائم مشابه با بیماران مبتلا به انسداد ریه است. زیرا، ماسک‌ها به عنوان مانعی روی دهان و بینی باعث محبوس شدن دم و بازدم در محیط داخل و به گردش درآمدن هوای درون خود می‌شوند. بنابراین، تنفس مجدد هوای بازدم باعث افزایش کربن‌دی‌اکسید و در نتیجه، ایجاد محیطی اسیدی درون ماسک می‌شود. از این‌رو، استفاده از ماسک در هنگام ورزش‌های سنگین به هیچ وجه توصیه نمی‌شود. در حقیقت، ورزش با ماسک منجر به بیماری‌هایی از قبیل مشکلات ریوی و قلبی و عروقی می‌شود. در نتیجه، هنگام ورزش در اماکن ورزشی عمومی مانند باشگاه‌ها، پوشیدن ماسک تنها در صورتی توصیه می‌شود که آن ورزش‌ها بسیار سبک باشند. بنابراین، ورزش به صورت انفرادی در یک محیط ایزوله مناسب بسیار بهتر از ورزش کردن با ماسک در مکان‌های عمومی می‌باشد.

## ۵- نتیجه گیری

به دلیل شیوع ناگهانی کووید-۱۹ در سرتاسر جهان و مختل نمودن بسیاری از فعالیت‌های صنعتی، تجارتي و اقتصادی، توجه سایر علوم به این بیماری جهانی برای کشف و دستیابی راه حل‌هایی جهت غلبه بر آن جلب شده است. در این راستا، مهندسان می‌کوشند تا با بکارگیری دانش خود بخشی از جنبه‌های ناشناخته ویروس را شناسایی کنند و روش‌هایی جهت تسریع در بازگشت جهان به شرایط قبل از پیدایش کووید-۱۹ ارائه دهند. در این زمینه، نقش علم مکانیک سیالات و دینامیک سیالات محاسباتی بسیار پررنگ بوده تا جایی که به کمک سازمان بهداشت جهانی آمده و مقررات وضع شده توسط این سازمان را به‌روز رسانی می‌کند. در این مقاله، مرور کوتاهی بر شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی انجام گرفته در زمینه تولید قطرات تنفسی و گستره ابعاد آنها شده است. همانطور که گفته



## ۶- مراجع

- [1] Yao, H., Xiangyun, L., Chen, Q., Xu, K., Chen, Y., Cheng, L., Liu, F., Wu, Z., Wu, H., Jin, C., Zheng, M., Wu, N., Jiang, C., and Li, L., "Patient-Derived Mutations Impact Pathogenicity of SARS-CoV-2", *CELL-D-20-01124*, 2020.
- [2] Faranda, D., Castillo, I.P., Hulme, O., Jézéquel, A., Lamb, J., and Thompson, E., "Asymptotic Estimates of SARS-CoV-2 Infection Counts and Their Sensitivity to Stochastic Perturbation", *Chaos an Interdiscip. J. Nonlinear Sci.*, Vol. 30, No. 5, p. 51107, 2020.
- [3] Mittal, R., "The COVID-19 Airborne Transmission (CAT) Inequality: A Simple Mathematical Framework for Estimating Airborne Transmission of COVID-19", arXiv Prepr. arXiv2008.00973, 2020.
- [4] Goel, S., Hawi, S., Goel, G., Thakur, V.K., Pearce, O., Hoskins, C., Hussain, T., Agrawal, A., Upadhyaya, H., Cross, G. and Barber, A., "Resilient and Agile Engineering Solutions to Address Societal Challenges such as Coronavirus Pandemic", *Mater. Today Chem.*, Vol. 17, p. 100300, 2020.
- [5] van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D.H., Holbrook, M.G., Gamble, A., Williamson, B.N., Tamin, A., Harcourt, J.L., Thornburg, N.J., Gerber, S.I., Lloyd-Smith, J.O., de Wit, E., and Munster, V.J., "Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1", *N. Engl. J. Med.*, Vol. 382, No. 16, pp. 1564-1567, 2020.
- [6] Booth, T.F., Kournikakis, B., Bastien, N., Ho, J., Kobasa, D., Stadnyk, L., Li, Y., Spence, M., Paton, S., and Henry, B., "Detection of Airborne Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) Coronavirus and Environmental Contamination in SARS Outbreak Units", *J. Infect. Dis.*, Vol. 191, No. 9, pp. 1472-1477, 2005.
- [7] Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S., Bouvier, N.M., and Ristenpart, W.D., "The Coronavirus Pandemic and Aerosols: Does COVID-19 Transmit via Expiratory Particles?", *Sci. Rep.*, Vol. 9, No.1, pp. 2348-2368, 2019.
- [8] Ruiyun, L., Sen, P., Chen, B., Song, Y., Zhang, T., Yang, W., Shaman, J., "Substantial Undocumented Infection Facilitates the Rapid Dissemination of Novel Coronavirus (SARS-CoV-2)", *Science*, Vol. 368, No. 6490, pp. 489-493, 2020.
- [9] Yan, J., Grantham, M., Pantelic, J., De Mesquita, P.J.B., Albert, B., Liu, F., Ehrman, S., and Milton, D.K., "Infectious Virus in Exhaled Breath of Symptomatic Seasonal Influenza Cases from a College Community", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 115, No. 5, pp. 1081-1086, 2018.
- [10] Verma, S., Dhanak, M., and Frankenfield, J., "Visualizing the Effectiveness of Face Masks in Obstructing Respiratory Jets", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 6, p. 61708, 2020.
- [11] Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S.; Bouvier, N.M., and Ristenpart, W.D., "Aerosol Emission and Superemission During Human Speech Increase with Voice Loudness", *Sci. Rep.*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-10, 2019.
- [12] Drossinos, I. and Stilianakis, N., "What Aerosol Physics Tells Us about Airborne Pathogen Transmission", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 54, No. 6, pp. 639-643, 2020.
- [13] Guo, Y., Wei, J., Ou, C., Liu, L., Sadrizadeh, S., Jin, T., Tang, L., Zhang, Y., and Li, Y., "Deposition of Droplets from the Trachea or Bronchus in the Respiratory Tract during Exhalation: A Steady-State Numerical Investigation", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 54, No. 8, pp. 869- 879, 2020.
- [14] Cui, X., Wu, W., and Ge, H., "Investigation of Airflow Field in the Upper Airway Under Unsteady Respiration Pattern Using Large Eddy Simulation Method", *Respir. Physiol. Neurobiol.*, p. 103468, 2020.
- [15] Feng, S., Shen, C., Xia, N., Song, W., Fan, M., and Cowling, B.J., "Rational Use of Face Masks in the COVID-19 Pandemic", *Lancet Respir. Med.*, Vol. 8, No. 5, pp. 434-436, 2020.
- [16] Kumar, V., Nallamothu, S., Shrivastava, S., Jadeja, H., Nakod, P., Andrade, P., Doshi, P., and Kumaraswamy, G., "On the Utility of Cloth Facemasks for Controlling Ejecta During Respiratory Events", arXiv Prepr. arXiv2005.03444, 2020.
- [17] Dbouk, T. and Drikakis, D., "On Respiratory Droplets and Face Masks", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 6, p. 63303, 2020.
- [18] Cummins, C.P., Ajayi, O.J., Mehendale, F.V., Gabl, R., and Viola, I.M., "The Dispersion of Spherical Droplets in Source--Sink Flows and Their Relevance to The COVID-19 Pandemic", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 8, p. 83302, 2020.
- [19] Bourouiba, L., Dehandschoewercker, E., and Bush, J.W., "Violent Expiratory Events: On Coughing and Sneezing", *J. Fluid Mech.*, Vol. 745, pp. 537-563, 2014.
- [20] Weiss, P., Giddey, V., Meyer, D.W., and Jenny, P., "Evaporating Droplets in Shear Turbulence", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 7, p. 73305, 2020.
- [21] Busco, G., Yang, S.R., Seo, J., and Hassan, Y.A., "Sneezing and Asymptomatic Virus Transmission", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 7, p. 73309, 2020.
- [22] Diwan, S.S., Ravichandran, S., Govindarajan, R. and Narasimha, R. "Understanding Transmission Dynamics of COVID-19-Type Infections by Direct Numerical Simulations of Cough/Sneeze Flows", *Trans. Indian Natl. Acad. Eng.*, Vol. 5, No. 39, pp. 1-7, 2020.
- [23] Dudalski, N., Mohamed, A., Mubareka, S., Bi, R., Zhang, C., and Savory, E., "Experimental Investigation of Far-Field Human Cough Airflows from Healthy and Influenza-infected Subjects", *Indoor Air*, Vol. 30, No. 5, 2020.
- [24] Abkarian, M., Mendez, S., Xue, N., Yang, F., and Stone, H.A., "Puff Trains in Speaking Produce Long-Range Turbulent Jet-Like Transport Potentially Relevant to Asymptomatic Spreading of Viruses", arXiv Prepr. arXiv2006.10671, 2020.
- [25] Bourouiba, L., "Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19", *JAMA - J. Am. Med. Assoc.*, Vol. 323, No. 18, pp. 1837-1838, 2020.

- [26] Guzman, M.I., "Bioaerosol Size Effect in COVID-19 Transmission", *Int. J. Health Plann. Mgmt.*, Vol. 2020, pp. 1-7, 2020.
- [27] Duguid, J., "The Size and the Duration of Air-carriage of Respiratory Droplets and Droplet-Nuclei", *Epidemiol. Infect.*, Vol. 44, No. 6, pp. 471-479, 1946.
- [28] Gupta, J.K., Lin, C.-H., and Chen, Q., "Characterizing Exhaled Airflow from Breathing and Talking", *Indoor Air*, Vol. 20, No. 1, pp. 31-39, 2010.
- [29] Hansen, B. and Mygind, N., "How Often Do Normal Persons Sneeze and Blow the Nose?", *Rhinology*, Vol. 40, No. 1, pp. 10-12, 2002.
- [30] Wei, J. and Li, Y., "Enhanced Spread of Expiratory Droplets by Turbulence in a Cough Jet", *Build. Environ.*, Vol. 93, No. P2, pp. 86-96, 2015.
- [31] Parienta, D., Morawska, L., Johnson, G., Ristovski, Z., Hargreaves, M., Mengersen, K., Corbett, S., Chao, C., Li, Y., and Katoshevski, D., "Theoretical Analysis of the Motion and Evaporation of Exhaled Respiratory Droplets of Mixed Composition", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 42, No. 1, pp. 1-10, 2011.
- [32] Chen, C. and Zhao, B., "Some Questions on Dispersion of Human Exhaled Droplets in Ventilation Room: Answers from Numerical Investigation", *Indoor Air*, Vol. 20, No. 2, pp. 95-111, 2010.
- [33] Moriarty, J.A. and Grotberg, J., "Flow-induced Instabilities of a Mucus-serous Bilayer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 397, pp. 1-22, 1999.
- [34] Malashenko, A., Tsuda, A., and Haber, S., "Propagation and Breakup of Liquid Menisci and Aerosol Generation in Small Airways", *J. Aerosol Med. Pulm. Drug Deliv.*, Vol. 22, No. 4, pp. 341-353, 2009.
- [35] Joseph, D.D., Beavers, G.S., and Funada, T., "Rayleigh-Taylor Instability of Viscoelastic Drops at High Weber Numbers", *J. Fluid Mech.*, Vol. 453, pp. 109-132, 2002.
- [36] Kataoka, I., Ishii, M., and Mishima, K., "Generation and Size Distribution of Droplet in Annular Two-phase Flow", *J. Fluids Eng.*, Vol. 105, No. 2, 1983.
- [37] Romano, F., Fujioka, H., Muradoglu, M., and Grotberg, J., "Liquid Plug Formation in an Airway Closure Model", *Phys. Rev. Fluids*, Vol. 4, No. 9, p. 93103, 2019.
- [38] Morawska, L., "Droplet Fate in Indoor Environments, or Can We Prevent the Spread of Infection?", *Indoor Air*, Vol. 16, No. 5, pp. 335-347, 2006.
- [39] Renzi, E. and Clarke, A., "Life of a Droplet: Buoyant Vortex Dynamics Drives the Fate of Micro-particle Expiratory Ejecta", *Physics of Fluids*, Vol. 32, No. 12, 2020.
- [40] Wei, J. and Li, Y., "Airborne Spread of Infectious Agents in the Indoor Environment", *Am. J. Infect. Control*, Vol. 44, No. 9, pp. S102-S108, 2016.
- [41] Chaudhuri, S., Basu, S., Kabi, P., Unni, V.R., and Saha, A., "Modeling the Role of Respiratory Droplets in Covid-19 Type Pandemics", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 6, p. 63309, 2020.
- [42] Mittal, R., Ni, R., and Seo, J.-H., "The Flow Physics of COVID-19", *J. Fluid Mech.*, Vol. 894, 2020.
- [43] Liu, L., Li, Y., Nielsen, P.V. Wei, J., and Jensen, R.L., "Short-range Airborne Transmission of Expiratory Droplets Between Two People", *Indoor Air*, Vol. 27, No. 2, pp. 452-462, 2017.
- [44] Ma, Y., Zhao, Y., Liu, J., He, X., Wang, B., Fu, S., Yan, J., Niu, J., Zhou, J., and Luo, B., "Effects of Temperature Variation and Humidity on the Death of COVID-19 in Wuhan, China", *Sci. Total Environ.*, p. 138226, 2020.
- [45] Verreault, D., Moineau, S., and Duchaine, C., "Methods for Sampling of Airborne Viruses", *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, Vol. 72, No. 3, pp. 413-444, 2008.
- [46] Dbouk, T. and Drikakis, D., "On Coughing and Airborne Droplet Transmission to Humans", *Phys. Fluids*, Vol. 32, No. 5, p. 53310, 2020.
- [47] Feng, Y., Marchal, T., Sperry, T., and Yi, H., "Influence of Wind and Relative Humidity on the Social Distancing Effectiveness to Prevent COVID-19 Airborne Transmission: A Numerical Study", *J. Aerosol Sci.*, p. 105585, 2020.
- [48] Berrouk, A.S., Lai, A.C.K., Cheung, A.C.T., and Wong, S.L., "Experimental Measurements and Large Eddy Simulation of Expiratory Droplet Dispersion in a Mechanically Ventilated Enclosure with Thermal Effects", *Build. Environ.*, Vol. 45, No. 2, pp. 371-379, 2010.
- [49] Peng, S., Chen, Q., and Liu, E., "The Role of Computational Fluid Dynamics Tools on Investigation of Pathogen Transmission: Prevention and Control", *Sci. Total Environ.*, Vol. 746, p. 142090, 2020.
- [50] Liang, M., Gao, L., Cheng, C., Zhou, Q., Uy, J.P., Heiner, K., and Sun, C., "Efficacy of Face Mask in Preventing Respiratory Virus Transmission: A Systematic Review and Meta-Analysis", *Travel Med. Infect. Dis.*, Vol. 36, p. 101751, 2020.
- [51] Eikenberry, S.E., Mancuso, M., Iboi, E., Phan, T., Eikenberry, K., Kuang, Y., Kostelich, E., and Gumel, A.B. "To Mask or Not to Mask: Modeling the Potential for Face Mask Use by the General Public to Curtail the COVID-19 Pandemic", *Infect. Dis. Model.*, Vol. 5, pp. 293-308, 2020.
- [52] Schwartz, K.L., Murti, M., Finkelstein, M., Leis, J.A., Fitzgerald-Husek, A., Bourns, L., Meghani, H., Saunders, A., Allen, V., and Yaffe, B., "Lack of COVID-19 Transmission on an International Flight", *Cmaj*, Vol. 192, No. 15, p. E410, 2020.
- [53] Cheng, V.C.-C., Wong, S.-C., Chuang, V.W.-M., So, S.Y.-C., Chen, J.H.-K., Sridhar, S., To, K.K.-W., Chan, J.F.-W., Hung, I.F.-N., Ho, P.-L., and Yuen, K.-Y., "The Role of Community-Wide Wearing of Face Mask for Control of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Epidemic Due to Sars-Cov-2", *J. Infect.*, Vol. 81, No. 1, pp. 107-114, 2020.
- [54] Li, Y., Wong, T., Chung, J., Guo, Y.P., Hu, J.Y., Guan, Y.T., Yao, L., Song, Q.W., and Newton, E., "In Vivo Protective Performance of n95 Respirator and Surgical Facemask", *Am. J. Ind. Med.*, Vol. 49, No. 12, pp. 1056-1065, 2006.

- [55] Ahmed, J., Harker, A., and Edirisinghe, M., "Covid-19: Facemasks, Healthcare Policies and Risk Factors in the Crucial Initial Months of a Global Pandemic", *Med. Devices Sensors*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-18, 2020.
- [56] Wu, H.L., Huang, J., Zhang, C.J.P., He, Z., and Ming, W.K., "Facemask Shortage and the Novel Coronavirus Disease (COVID-19) Outbreak: Reflections on Public Health Measures", *EclinicalMedicine*, Vol. 21, pp. 1-20, 2020.
- [57] Amendola, L., Saurini, M.T., Di Girolamo, F., and Arduini, F., "A Rapid Screening Method for Testing the Efficiency of Masks in Breaking Down Aerosols", *Microchem. J.*, Vol. 157, p. 104928, 2020.
- [58] Abd-Elsayed, A. and Karri, J. "Utility of Substandard Face Mask Options for Health Care Workers During the COVID-19 Pandemic", *Anesth. Analg.*, Vol. 131, No. 1, pp. 4-6, 2020.
- [59] Neupane, B.B., Mainali, S., Sharma, A., and Giri, B., "Optical Microscopic Study of Surface Morphology and Filtering Efficiency of Face Masks", *PeerJ*, Vol. 2019, No. 6, pp. 1-14, 2019.
- [60] Fischer, E.P., Fischer, M.C., Grass, D., Henrion, I., Warren, W.S., and Westman, E., "Low-cost Measurement of Face Mask Efficacy for Filtering Expelled Droplets During Speech", *Sci. Adv.*, Vol. 6, No. 36, pp. 2-7, 2020.
- [61] Yi, L., Fengzhi, L., and Qingyong, Z., "Numerical Simulation of Virus Diffusion in Facemask During Breathing Cycles", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, No. 19-20, pp. 4229-4242, 2005.
- [62] Li, Y., Guo, Y.P., Wong, K.C.T., Chung, W.Y.J., Gohel, M.D.I., and Leung, H.M.P., "Transmission of Communicable Respiratory Infections and Facemasks", *J. Multidiscip. Healthc.*, Vol. 1, pp. 17-27, 2008.
- [63] Kumar, S. and Lee, H.P., "The Perspective of Fluid Flow Behavior of Respiratory Droplets and Aerosols Through the Facemasks in Context of SARS-CoV-2", *Physics of Fluids*, Vol. 32, pp. 111301, 2020.
- [64] Przekwas, A. and Chen, Z., "Washing Hands and the Face May Reduce COVID-19 Infection", *Med. Hypotheses*, Vol. 144, p. 110261, 2020.
- [65] Chandrasekaran, B. and Fernandes, S., "Exercise with Facemask; Are We Handling a Devil's Sword? -A Physiological Hypothesis", *Med. Hypotheses*, Vol. 144, p. 110002, 2020.