



مدل شبیه‌ساز انتشار آلاینده‌ها با بهره‌گیری از ترکیب تکنیک واقعیت افزوده و دینامیک سیالات محاسباتی روی بستر تلفن همراه

الهام سلطانی میمند^۱، محمد کاظم مویدی^{۲*}، فرانک فتوحی^۱

۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه قم، قم، ایران
۲- آزمایشگاه پژوهشی توربولانس، دینامیک سیالات محاسباتی و احتراق، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰

کلمات کلیدی:

واقعیت افزوده
دینامیک سیالات محاسباتی
جریان هوا
انتشار آلاینده‌ها
آشکارسازی داده‌ها

خلاصه: مسائل مهندسی به طور کلی مدل ریاضی پدیده‌های فیزیکی هستند. راه حل مسئله فیزیکی را می‌توان با استفاده از فناوری‌های مهندسی و شبیه‌سازی نظیر محاسبات عددی پیدا کرد. تکنولوژی واقعیت افزوده محتوای مجازی ایجاد شده توسط کامپیوتر یا تلفن همراه را با دوربین به محیط فیزیکی کاربران اضافه می‌کند. با استفاده از سیستم مبتنی بر واقعیت افزوده، بعد از تجزیه و تحلیل مهندسی، می‌توان نتایج حاصل از شبیه‌سازی را به صورت مدل دو یا سه بعدی منطبق با مکان و ابعاد جسم فیزیکی مستقیماً بر روی اشیاء دنیای واقعی قرار داد تا سبب درک بهتر نتایج شود. در این پژوهش با بهره‌گیری از ترکیب تکنیک واقعیت افزوده و دینامیک سیالات محاسباتی، مدل شبیه‌ساز میدان جریان در محیط داخلی با آلاینده‌های مختلف توسعه داده شده است. برای این منظور، ابتدا به بیان مفاهیم پایه مربوط به واقعیت افزوده و بررسی تفاوت آن با واقعیت مجازی پرداخته شده است. پس از بررسی شیوه پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از شبیه‌ساز توسعه یافته برای آلاینده‌های دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن بدست آمده است. برای ارزیابی مدل پیشنهادی، داده‌های حاصل از نرم‌افزار موبایلی با نتایج مرجع مقایسه شده‌است و نتایج به‌دست آمده نشان دهنده دقت و توان محاسباتی قابل قبول می‌باشد.

۱- مقدمه

حرفه‌ای دشوار است. ادغام نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با واقعیت افزوده، این امکان را فراهم می‌کند که بعد از تجزیه و تحلیل مهندسی، نتایج شبیه‌سازی به صورت مدل دو بعدی مستقیماً بر روی دنیای واقعی قرار گیرد. علاوه بر این در تجزیه و تحلیل مهندسی و شبیه‌سازی بر تجربه و درک کاربر تأثیر می‌گذارد. واقعیت افزوده بر پایه شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بر روی دستگاه‌های سیار جهت درک و بحث راجع به محیط‌های حرارتی داخلی مهم است. فوکودا و همکاران [۱] با در نظر گرفتن الگوی دینامیک سیالات محاسباتی و واقعیت مختلط^۲، یک سیستم یکپارچه برای طراحی یا نوسازی ساختمان توسعه داده‌اند تا امکان طراحی همزمان ساختمان و محیط حرارتی فراهم شود. تجزیه و تحلیل به کمک شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی محیط حرارتی داخلی از جمله تغییرات دما و جریان هوا را امکان‌پذیر می‌کند و سیستم واقعیت مختلط نتایج شبیه‌سازی را به صورت بصری تجسم می‌کند. آن‌ها در پژوهشی دیگر به منظور طراحی یا نوسازی ساختمان، ابزاری را ارائه کرده‌اند تا کاربر توزیع

واقعیت افزوده^۱ در سال‌های اخیر به یک موضوع تحقیقاتی مهم در سراسر جهان تبدیل شده است. تکنولوژی واقعیت افزوده محتوای ایجاد شده توسط کامپیوتر مانند صدا، ویدئو و جلوه‌های گرافیکی را به محیط فیزیکی کاربران اضافه می‌کند. ادغام واقعیت افزوده با شبیه‌سازی عددی یک روش شناختی و علمی برای کاربران جهت تحلیل مسائل کاربردی فراهم می‌کند. با استفاده از تکنولوژی‌های تجسم سازی علمی، یک سیستم مبتنی بر واقعیت افزوده، تحلیل مهندسی و نتایج شبیه‌سازی مستقیماً بر روی اشیاء دنیای واقعی حاصل می‌شود. تجزیه و تحلیل مهندسی و شبیه‌سازی شامل انواع متنوعی از داده‌ها است که معمولاً با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری خاص پردازش می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی تولید شده برای جریان سیالات با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی^۲ داده‌های عددی گسترده‌ای را تولید می‌کند که به صورت دو بعدی است. درک این نتایج برای افراد غیر

- 1 Augmented Reality (AR)
- 2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

3 Mixed Reality (MR)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moayyedi@qom.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



در انرژی و سلامت ساکنان ساختمان‌ها و همچنین درک محیط حرارت داخلی در فرآیند طراحی توسط مالکان، ابزاری را توسعه داده‌اند که نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی را با استفاده از واقعیت افزوده بر روی تلفن همراه نمایش می‌دهد. برای بهبود عملکرد تجسم دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای واقعیت افزوده بر روی تلفن همراه و ارائه تعامل شهودی با محیط داخلی، یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر چارچوب کلاینت - سرور ایجاد شده‌است. در این رویکرد، یک فرمت داده ساده با پیچیدگی محاسباتی کم برای نمایش نتایج شبیه‌سازی عددی پیشنهاد شده‌است. در این رویکرد، پیش‌پردازش داده‌ها سمت سرور انجام شده تا توان محاسباتی و زمان مورد نیاز در سمت کلاینت کاهش یابد. معمولاً نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مجموعه داده‌های حجمی هستند و مشاهده سطح داخلی و خارجی آن‌ها در یک زمان دشوار است. بنابراین، روشی برای انتخاب برش خودکار مبتنی بر نقطه لمس برای حفظ قابلیت‌های تعامل بهتر پیشنهاد شده‌است. علاوه بر این کاربر می‌تواند نتایج شبیه‌سازی حرارتی داخلی (توزیع گرما و سرعت هوا) را در گام‌های زمانی متفاوت مشاهده کند. بنابراین، با توسعه نمونه اولیه بر روی تلفن همراه مبتنی بر واقعیت افزوده و سرور، تجسم نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مبتنی بر واقعیت افزوده، با ترکیب دنیای مجازی و واقعی، نمای کاملی را ارائه می‌دهد و درک تأثیر محیط دنیای واقعی بر روی الگوهای جریان هوا نیز آسان‌تر است. هیوولین و همکاران [۸] شبیه‌سازی جریان هوا را در فضای شهری با چارچوب کلاینت - سرور و تجسم آن را با کمک واقعیت‌افزوده بر روی تلفن همراه پیاده‌سازی کرده‌اند. تجسم نتایج عددی با واقعیت افزوده نیازمند پیش‌پردازش داده، شبیه‌سازی جریان هوا و تجسم نتایج در واقعیت افزوده است. پیش‌پردازش داده‌ها نیازمند مدل سه‌بعدی فضای شهری است و از پایگاه داده اطلاعات جغرافیایی شهری که شامل مدل‌های سه‌بعدی شهر و نزدیک به دنیای واقعی است، استفاده شده‌است. با توجه به بازخورد و تعامل کاربر با پارامترهای تجسم، تجسم ارائه شده به روز می‌گردد. لاکامپر و مالکاوای [۹] برای یکپارچه‌سازی واقعیت افزوده جهت نمایش داده‌های حرارتی داخلی با استفاده از ربات سیار برای تولید نقشه‌های محیط، مدلی ارائه کرده‌اند که شامل سه ماژول نقشه برداری ربات، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و نمایش با واقعیت افزوده است. ماژول نقشه‌برداری ربات مدل‌سازی هندسه مکانی را با استفاده از یک ربات سیار و با استفاده از بازخورد لیزر امکان پذیر می‌کند. شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی رفتار حرارتی سه‌بعدی در محیط‌های داخلی شامل دو مرحله اصلی، یعنی

محیط حرارتی و جریان هوا را با کمک واقعیت مجازی^۱ بر روی معماری دقیق ساختمان تجسم کند و امکان بازخورد توسط کاربر را فراهم کند [۲]. فوکودا و همکاران [۳] به منظور نوسازی ساختمان یک سیستم طراحی محیط حرارتی داخلی با استفاده از واقعیت افزوده توسعه داده‌اند و از فضای سبز در داخل ساختمان به عنوان یک روش نوسازی برای بهبود محیط حرارتی استفاده کرده‌اند. این سیستم طراحی محیطی، به طور همزمان هم محیط حرارتی و هم تأثیر گیاهان و محل قرارگیری آن‌ها را در بخش‌های مختلف محیط داخلی نمایش می‌دهد. آن‌ها توسعه سیستم را شامل پنج مرحله، یعنی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، تولید شبکه محاسباتی، تنظیم شرایط مرزی، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و نمایش نتایج با واقعیت افزوده معرفی کرده‌اند. مورلند و همکاران [۴] در پژوهشی واقعیت افزوده را با دینامیک سیالات محاسباتی ترکیب کرده‌اند و ابزاری را برای آموزش عملکرد دیگ بخار بزرگ یک نیروگاه ذغال سنگ ارائه کرده‌اند. در این ابزار از نرم‌افزارهای مختلف برای شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی و تجسم سه بعدی و واقعیت افزوده استفاده شده‌است. توضیحات فنی شبیه‌سازی و تجسم شامل یک سری مراحل و اجزای پیچیده، از جمله ادغام داده‌ها، ساخت هندسه و تجزیه و تحلیل خواص جریان درون دیگ بخار می‌باشد. مالکاوای و سرنیواسان [۵] برای تجسم و تعامل با فضای ساختمان‌ها و محیط‌های گرمایی یک مدل واقعیت افزوده مبتنی بر تشخیص گفتار و حرکات دست طراحی کرده‌اند. این مدل شامل چهار مؤلفه یعنی داده‌های حسگر بی‌سیم، آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی، تعامل انسان و کامپیوتر^۲ و نمایش واقعیت افزوده است. داده‌های سنسور تغییرات دما و سرعت را جمع‌آوری کرده و شرایط مرزی را برای شبیه‌سازی به روز رسانی می‌کند. مؤلفه تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی با شرایط مرزی جدید شبیه‌سازی را انجام می‌دهد و نتایج پردازش، به عنوان الگوی مدل‌سازی واقعیت مجازی ذخیره می‌شوند و به مؤلفه تعامل انسان و کامپیوتر انتقال داده می‌شوند. این مؤلفه، داده‌ها را برای نمایش واقعیت افزوده به روزرسانی و پردازش می‌کند در پژوهش دیگری فوکودا و همکاران [۶] به منظور بهبود محیط حرارتی داخلی، ابزار طراحی یکپارچه شامل دینامیک سیالات محاسباتی، واقعیت مجازی، واقعیت افزوده و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را برای یک منزل مسکونی دوبلکس ارائه داده‌اند. این ابزار از طریق شبیه‌سازی همراه با ویژگی بازخورد مناسب توسط کاربر سبب درک شهودی جریان هوا توسط او می‌شود. لین و همکاران [۷] به دلیل اهمیت صرفه‌جویی

1 Virtual Reality (VR)

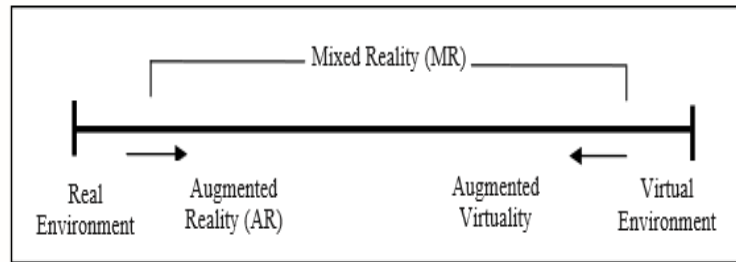
2 Human-Computer Interaction (HCI)

را قادر می‌سازد الگوهای جریان آشفته شبیه‌سازی شده توسط دینامیک سیالات محاسباتی را در یک محیط مجازی توسط نمایشگر سربند^۱ تجسم کند. یادگیری مفاهیم انتزاعی سخت و دشوار است و ترکیب فرآیند آموزش با تکنولوژی‌های جدیدی همانند واقعیت افزوده می‌تواند کیفیت و سرعت یادگیری را افزایش دهد [۱۴]. استفاده از واقعیت افزوده و مجازی آنلاین در بهره‌وری فرآیند آموزش بسیار مؤثر و کارآمد می‌باشد. استفاده از این فناوری در ایجاد کلاس‌ها و آزمایشگاه‌های مجازی سهولت در انجام آزمایش‌های خطرناک و مضر، عدم صرف هزینه جهت نگهداری و نصب تجهیزات، قابلیت انجام آزمایشات متنوع را در پی دارد. همچنین امکان ایجاد اتاق عمل مجازی از دیگر کاربردهای مفید این فناوری می‌باشد زیرا دانشجویان پزشکی به صورت مجازی جراحی‌های پرخطر بیماران را فرا می‌گیرند و این امر می‌تواند به کاهش خطرات جراحی کمک کند. همچنین معماران و مهندسان ساختمانی پیش از ساخت مجموعه طراحی شده می‌توانند نتیجه ایده‌های خود را قبل از ساخت به صورت سه بعدی مشاهده کنند و بخش‌های مختلف را تغییر دهند [۱۵].

در سال‌های اخیر تحلیل‌های مهندسی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به دنبال ارائه یک رابط کاربری آسان برای کاربران هستند. بخش پس‌پردازش در شبیه‌سازی از رفتار یک سیستم نقش مهمی در تبدیل داده‌های خام به مفاهیم معنادار برای طراحان و مهندسان دارد. در بخش پس‌پردازش امکان نمایش داده‌ها به صورت نمودارهای خطی و توزیعی بسیار پرکاربرد می‌باشد. ایجاد امکان نمایش داده‌ها در یک محیط واقعی‌تر به عنوان یک ویژگی شاخص در یک فرآیند پس‌پردازش محسوب می‌شود. تکنیک واقعیت افزوده در این زمینه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی آمده و امکاناتی را برای نمایش تغییرات کمیت‌های مهم میدان جریان حاصل از یک شبیه‌سازی عددی، روی بخش‌های مختلف سیستم موردنظر به صورت نمودارهای توزیعی و خطی فراهم کرده‌است. کاربردهای واقعیت افزوده در بسیاری از زمینه‌ها در حال افزایش است. یکی از مزایای اصلی استفاده از واقعیت افزوده این است که به کاربران اجازه تعامل با اشیاء واقعی علاوه بر محتویات مجازی در صحنه تقویت‌شده را می‌دهد و می‌تواند درک و شناخت انسان از دنیای واقعی را تقویت کند. در این پژوهش هدف توسعه یک بستر نرم‌افزاری روی دستگاه تلفن همراه به منظور شبیه‌سازی و نمایش داده‌های حاصل از آن با تکنیک واقعیت افزوده در همان فضای تلفن همراه روی بخش‌های مختلف محدوده موردنظر می‌باشد. انتقال محاسبات روی دستگاه تلفن

مدل‌سازی هندسه اتاق و تعیین شرایط اولیه و مرزی است، که هندسه اتاق با استفاده از نقشه برداری ربات مدل شده است. شرایط مرزی برای شبیه‌سازی عددی براساس سنسورهای بی‌سیم در زمان واقعی انجام می‌شود و تغییرات دما و سرعت در داخل اتاق را ردیابی می‌کنند. با تغییر محیط حرارتی داخلی، سنسورهای بی‌سیم شرایط مرزی ماژول شبیه‌سازی عددی را به روز می‌کنند. مجموعه داده‌های حاصل برای نمایش به ماژول واقعیت افزوده منتقل می‌شود. مورتریس و همکاران [۱۰] با استفاده از رایانش ابری یک برنامه کاربردی برای تجسم و تعامل با نتایج دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه واقعیت افزوده ارائه داده‌اند. برنامه کاربردی توسعه یافته شامل دو بخش است، بخش اول بر روی رایانه شخصی و برای شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی، دانلود مشخصات شبیه‌سازی و هندسه سه‌بعدی از فضای ابری توسعه داده شده است و بخش دوم با استفاده از دستگاه اندرویدی به نمایش نتایج با واقعیت افزوده می‌پردازد. به صورت موردی برنامه کاربردی توسعه یافته در کارخانه تولید کننده یخچال‌های صنعتی آزمایش شده‌است و میزان فشار و دمای هوا بر روی یکی از تجهیزات صنعتی این کارخانه توسط واقعیت افزوده تجسم یافته‌است. سولماز و ون گرون [۱۱] یک محیط یادگیری دیجیتال کاربرپسند را با شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی تعاملی برای آموزش عالی در مهندسی شیمی ارائه کرده‌اند. این محیط شامل یک شبکه کلاینت - سرور است. پیاده‌سازی چندین حل‌کننده معادلات دینامیک سیالات محاسباتی به طور همزمان توسط موتور بازی‌سازی، یک محیط شبیه‌سازی مشترک را تشکیل داده‌است. همین امر سبب شده‌است که در این شبکه چندین کاربر بتوانند هم‌زمان به هم متصل شده و با یکدیگر تعامل داشته‌باشند. بنابراین تمام کارهای پردازش سنگین در سمت سرور انجام می‌شود. کل شبکه توسط پنج ماژول اجرایی حفظ می‌شود. نرم افزار سمت کاربر، شبیه‌ساز دینامیک سیالات محاسباتی، مجموعه داده‌های شبیه‌سازی شده، نرم‌افزار پردازش داده و موتور بازی‌سازی یونیتی که در سمت کلاینت و توسط واقعیت مجازی نتایج را به کاربر نمایش می‌دهد. در نهایت سه برنامه کاربردی برای نمایش نتایج شبیه‌سازی شده توسط تلفن همراه، رایانه شخصی و نمایشگر سربند توسعه یافته‌است. سولماز و ون گرون [۱۲] در پژوهش دیگری دینامیک سیالات محاسباتی را با واقعیت افزوده مبتنی بر نشانگر ترکیب کرده‌اند و برنامه کاربردی برای آموزش فرآیند ترکیب و مخلوط شدن داخل مخزن را ارائه کرده‌اند. پائرس و همکاران [۱۳] در پژوهش خود بر روی استفاده از فناوری واقعیت مجازی به عنوان ابزار تجسم در یک تونل باد مجازی تمرکز کرده‌اند. این مطالعه کاربر

1 Head Mounted Display (HMD)



شکل ۱. طیف واقعیت افزوده میلگرام [۱۹].

Fig. 1. Milgram's augmented reality spectrum [19].

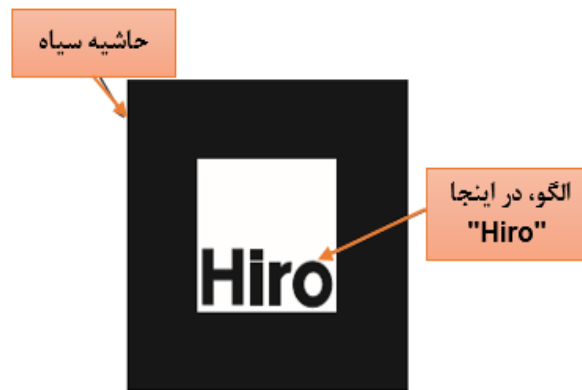
و محیط مجازی واقعیت مختلط نامیده می‌شود. واقعیت مختلط را می‌توان به عنوان محیطی تعریف کرد که دنیای واقعی و دنیای مجازی با یکدیگر در هم می‌آمیزند. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، واقعیت مختلط از دو عنصر اصلی تشکیل شده است: یک سوی آن واقعیت افزوده و در سوی دیگر مجازی افزوده قرار دارد. واقعیت افزوده ترکیبی از شیء واقعی و داده‌های مجازی است در حالی که مجازی افزوده مفهومی است که عناصر واقعیت به یک محیط مجازی اضافه می‌شوند و داده‌های دیجیتالی بیشتری دارد [۱۹]. در واقعیت افزوده یک همبستگی منطقی بین اشیاء واقعی و مجازی بر اساس رابطه هندسی آن‌ها مطرح است که امکان قرار گرفتن اشیاء مجازی در مکان مناسب نسبت به اشیاء واقعی به صورت سه بعدی را فراهم می‌کند. علاوه بر این کاربر باید بتواند با اشیاء سه‌بعدی تولیدشده ارتباط بلادرنگ برقرار کند و شیء مجازی نیز در اثر حرکات کاربر به صورت بلادرنگ تغییر وضعیت دهد. در رابطه با کارایی صحیح سیستم‌های واقعیت افزوده دو مسئله مهم را باید در نظر گرفت: ۱- گرفتن موقعیت و جهت ۲- تطبیق واقعیت با محتوای مجازی. این دو مسئله به ترتیب به عنوان ردیابی و ثبت در نظر گرفته می‌شود. در ردیابی هدف اندازه‌گیری موقعیت و جهت دستگاه و یا کاربر است. به منظور اینکه برنامه‌های واقعیت افزوده به درستی کار کنند، این فرآیند نیاز است با دقت و تا جایی که ممکن است در زمان آنی انجام شود. در مرحله ثبت، نگهداری واقعیت و تطبیق محتوای مجازی با آن صورت می‌گیرد. دقت فرآیند ثبت وابسته به دقت فرآیند ردیابی است [۲۰]. همچنین برنامه‌های واقعیت افزوده از لحاظ پیاده‌سازی به سه دسته مبتنی بر نشانگر، بدون نشانگر و مبتنی بر مدل دسته‌بندی می‌شوند. واقعیت افزوده مبتنی بر نشانگر که به آن تشخیص عکس هم گفته می‌شود، از دوربین و از نشانگر مانند رمزینه پاسخ سریع استفاده می‌کند. نشانگر (شکل ۲) یک

همراه و در نهایت نمایش نتایج روی جسم از نکات شاخص تحقیق حاضر می‌باشد. روشن است نرم‌افزار اندرویدی توسعه یافته می‌تواند جهت آموزش مفاهیم اساسی دینامیک سیالات، انتقال حرارت و جرم برای یادگیری بهتر دانشجویان مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله، ابتدا به تعریف واقعیت افزوده و انواع آن پرداخته شده است. سپس، معادله حاکم بر انتقال آلاینده‌ها بیان و روش حل عددی این معادله توضیح داده شده است. در ادامه هندسه مسئله مورد بررسی و شرایط مرزی مربوط به آن تعریف شده است. در نهایت نتایج بدست آمده توسط برنامه توسعه یافته بر روی محیط مورد بررسی ذکر شده است. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری حاصل از پژوهش بیان شده است.

۲- مفهوم واقعیت افزوده

واقعیت افزوده فناوری است که دنیای فیزیکی را با دنیای مجازی و با افزودن صدا، ویدئو و جلوه‌های گرافیکی ترکیب می‌کند. ویژگی مهم یک محیط واقعیت افزوده، همپوشانی داده‌های مجازی بر روی دنیای واقعی و تعامل با دنیای مجازی و واقعی همزمان در زمان واقعی است [۷]. واقعیت افزوده امکان تعامل بلادرنگ با اشیاء مجازی و واقعی را در زمان واقعی فراهم می‌کند، درک فرد از دنیای واقعی را بهبود می‌بخشد و دید کاربر از دنیای واقعی را توسعه می‌دهد. اشیاء مجازی اطلاعاتی را نشان می‌دهند که کاربر نمی‌تواند مستقیماً با حواس خود تشخیص دهد. اطلاعات منتقل شده توسط اشیاء مجازی به کاربر کمک می‌کند تا دنیای واقعی را بهتر درک کند و به طور همزمان پارامترهای متعددی را بررسی کرده و مشکل را به طور مؤثر تحلیل کند [۱۶ و ۱۷ و ۱۸].

میلگرام برای تعریف واقعیت افزوده طیفی را معرفی کرده که به طیف واقعیت افزوده میلگرام شهرت دارد. در این طیف، فضای بین محیط واقعی



شکل ۲. یک نمونه نشانگر که در محیط قرار می‌گیرد [۲۱].

Fig. 2. An indicator sample placed in the environment [21].

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (U \cdot \nabla)c = D \nabla^2 c + S \quad (1)$$

در این معادله، U سرعت، c غلظت، D ضریب نفوذ جرمی ماده و S ترم تولید جرم (مشخصات منبع در صورت وجود) است. معادله انتقال جرم ناپایا شامل عبارتهای مکانی و زمانی است که با حل آن، مقدار غلظت آلاینده هم نسبت به زمان و هم نسبت به مکان بدست می‌آید. بنابراین حل مسئله مورد نظر نیازمند الگوهای عددی برای گسسته‌سازی عبارتهای مکانی و زمانی برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده می‌باشد. برای گسسته‌سازی عبارتهای مکانی از الگوی گسسته‌سازی تفاضل مرکزی مرتبه دوم به صورت معادله (۲) برای مشتق مرتبه اول و معادله (۳) برای مشتق مرتبه دوم استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F_{i+1} - F_{i-1}}{2\Delta x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{F_{i+1} - 2F_i + F_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (3)$$

مربع سیاه و سفید با یک الگوی گرافیکی است که داخل مربع قرار می‌گیرد. حاشیه سیاه برای یافتن نشانگر از صحنه ضبط شده از محیط واقعی مورد نیاز است و رابطه مکانی بین نشانگر و دوربین را محاسبه می‌کند. الگوی داخل حاشیه سیاه برای هر نشانگر منحصر به فرد است که برای تمایز نشانگرها از یکدیگر استفاده می‌شود [۲۱]. در این حالت فقط زمانی که نشانگر توسط خوانشگر خوانده شود، نتیجه حاصل می‌شود. در این روش، تشخیص نشانگر از هر وسیله دیگری در فضای واقعی توسط دوربین انجام می‌شود [۲۲]. واقعیت افزوده بدون نشانگر به صورت دو تکنیک مبتنی بر حسگر و تطبیق الگو توسعه داده شده است. در روش مبتنی بر حسگر وقتی که دوربین و صفحه نمایش دستگاه تلفن در حال تغییر و دستگاه در حال حرکت است، استفاده می‌شود و محیط را به صورت ثابت مشاهده می‌کند. درحالی‌که در تطبیق الگو، از الگوهایی در یک تصویر منظم برای تشخیص موقعیت و جهت دربرگیرنده تصویر استفاده می‌شود. واقعیت افزوده مبتنی بر مدل بر اساس تشخیص اشیاء سه بعدی که از قبل شناخته شده است، کار می‌کند [۲۰]. پیاده‌سازی واقعیت افزوده در این پژوهش با روش مبتنی بر نشانگر انجام شده است.

۳- مدل شبیه‌ساز انتقال آلاینده‌ها

به منظور مدل‌سازی فرآیند انتقال آلاینده در گذر زمان با خصوصیات فیزیکی مختلف آلاینده، از معادله انتقال جرم ناپایا استفاده می‌شود. این معادله، معادله‌ای عمومی است و برای انتشار آلاینده در محیط یک سیال بکار می‌رود:

۴- هندسه مسئله و شرایط مرزی

مسئله مورد بررسی در این مقاله شبیه‌سازی انتقال آلاینده دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن در هوا با تغییرات سرعت در سه بعد است. محدوده مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها یک اتاق از منزل مسکونی می‌باشد. مدل سه بعدی اتاق مورد بررسی مطابق شکل ۳ است. از پنج پنجره‌ای که در این اتاق تعبیه شده فقط پنجره وسط قابلیت باز و بسته شدن دارد. در مدل مورد بررسی در این پژوهش، در طول انجام آزمایش علاوه بر پنجره‌ها هر دو در هم بسته می‌باشند. به منظور تعیین شرایط مرزی منطبق بر شرایط واقعی از شرط مرزی عدم نفوذ غلظت استفاده شده است. بنابراین دیوارها، درها، پنجره‌ها و سایر سطوح مرزی محدوده مورد نظر عایق هستند و هیچ‌گونه تبادل جرم نداشته و امکان انتشار آلاینده‌ها به خارج از این محدوده وجود ندارد. شروط مرزی تعریف شده به ازای هر وجه از محیط مورد بررسی مطابق جدول ۱ است. علاوه بر این برای شبیه‌سازی غلظت آلاینده‌ها با گذر زمان باید یک منبع نقطه‌ای تولید آلاینده، که انتشار آلاینده توسط آن صورت می‌گیرد، در نظر گرفته شود. به همین جهت منبع تولید آلاینده با غلظت مشخص و در کف محدوده مورد بررسی تعریف شده است. در واقع در کف محدوده مورد نظر در بخشی که منبع قرار دارد، غلظت برابر با مقدار مشخص و به ازای سایر نقاط مشتق غلظت در راستای عمود بر وجه مسامی با صفر می‌باشد. هندسه اتاق مورد بررسی که بر اساس ابعاد اندازه‌گیری شده در نرم‌افزار توسعه یافته ایجاد می‌شود، مشابه شکل ۳ است.

۵- نتایج

در پژوهش حاضر، به منظور مدل‌سازی انتشار آلاینده در محیط داخلی یک نرم‌افزار شبیه‌سازی در محیط اندروید نوشته شده است. طراحی نرم‌افزار موبایل شامل سه فرآیند پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش می‌باشد. فرآیند پیش‌پردازش اندازه‌گیری ابعاد محیط و تولید هندسه را انجام می‌دهد. ابتدا از طریق دوربین تلفن همراه از محیط مورد نظر تصویر برداری می‌شود و بر اساس نشانه‌هایی که کاربر بر روی تصویر وارد می‌کند، اندازه‌گیری ابعاد محیط و تولید هندسه صورت می‌گیرد. نمونه‌ای از اندازه‌گیری ابعاد محیط مورد نظر در شکل ۴ نمایش داده شده است. نمایی واضح از اندازه‌گیری ابعاد محیط و نمونه‌برداری توسط دوربین تلفن همراه در شکل ۵ قابل مشاهده است. سپس براساس هندسه تولید شده شبکه‌بندی مدل به منظور تولید شبکه محاسباتی بر روی تلفن همراه صورت می‌گیرد. بدین منظور مدل هندسی در سه بعد بنابر مقادیر ورودی توسط کاربر به تعدادی نقاط با فواصل

و برای انتگرال‌گیری زمانی از روش صریح رانگ-کوتای مرتبه چهارم مطابق روابط زیر استفاده شده است:

$$Q^0 = Q^n$$

$$\text{for } k=1 \dots N_{stage}$$

$$Q^k = Q^{k-1} + \alpha \Delta t R(Q^{k-1}); \quad (4)$$

$$Q^{n+1} = Q^{N_{stage}}$$

در معادله (۲) و (۳)، F تابع مورد نظر و Δx فاصله بین نقاط شبکه محاسباتی (فاصله مکانی) است. در معادله (۴) نیز n مرتبه مشتق، k تعداد گام‌های روش رانگ-کوتا، α ضریب ثابت رانگ کوتا، Δt تغییرات زمان و R نیز در واقع بیانگر سمت راست معادله‌ای است که با استفاده از روش رانگ کوتا انتگرال‌گیری زمانی می‌شود.

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} =$$

$$\left(\frac{C_{i+1,j,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \right.$$

$$\left. D \frac{C_{i,j+1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \right.$$

$$\left. \frac{C_{i,j,k+1} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} \right)$$

$$+ S_{i,j,k} - (U_{i,j,k} \frac{C_{i+1,j,k} - C_{i-1,j,k}}{2\Delta x} +$$

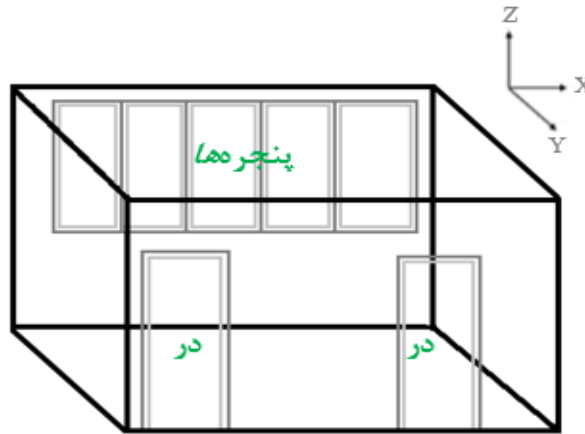
$$V_{i,j,k} \frac{C_{i,j+1,k} - C_{i,j-1,k}}{2\Delta y} + W_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k-1}}{2\Delta z}) \quad (5)$$

سپس در هر گام زمانی معادله انتقال جرم ناپایا با استفاده از روش رانگ کوتا حل شده و مقدار غلظت در تمام نقاط محدوده مورد بررسی در هر زمان و مکان محاسبه می‌شود.

جدول ۱. شرایط مرزی تعریف شده به ازای هر وجه از محدوده مورد بررسی

Table 1. Boundary conditions defined for each facet of the investigated range.

$\partial c/\partial x = 0$	دیوار سمت راست	$\partial c/\partial x = 0$	دیوار سمت چپ
$\partial c/\partial y = 0$	سقف	$\partial c/\partial y = 0$	کف
$\partial c/\partial z = 0$	دیوار پیش	$\partial c/\partial z = 0$	دیوار پشت



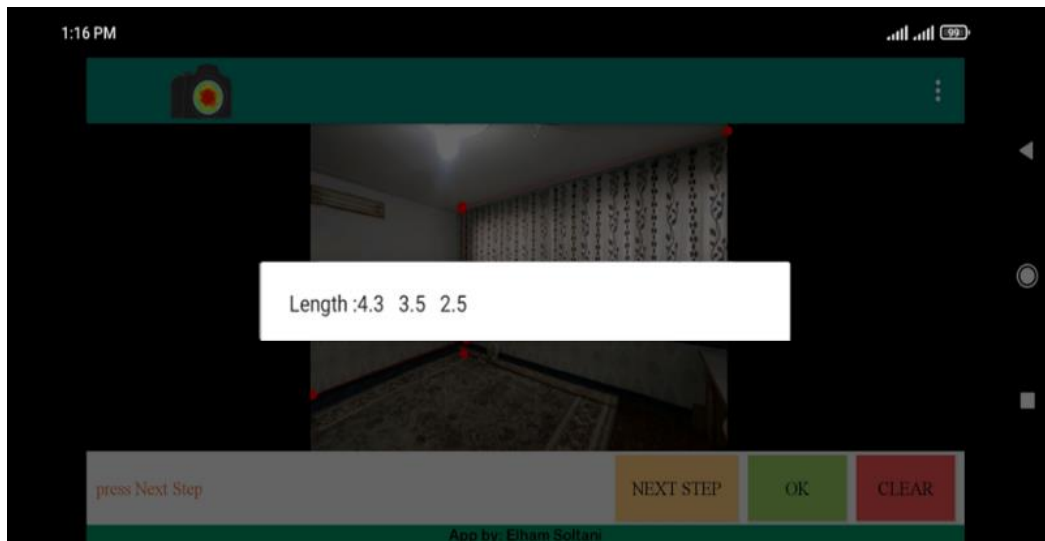
شکل ۳. شماتیک فضای مورد بررسی

Fig. 3. Schematic of the investigated space.

روی تمام نقاط شبکه در سه بعد توسط تلفن همراه انجام می‌شود. از آنجا که معادلات حاکم معادلات دیفرانسیلی می‌باشند، رسیدن به جواب خاص نیازمند تعریف و تعیین شرایط اولیه و مرزی می‌باشد که با اعمال شرایط مورد نیاز مسئله حل خواهد شد. علاوه بر این با توجه به مسئله مورد نظر که شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها در گذر زمان و در محیط داخلی است، برای شبیه‌سازی غلظت آلاینده‌ها باید یک منبع تولید آلاینده، که انتشار جرم توسط آن صورت می‌گیرد، در نظر گرفته شود.

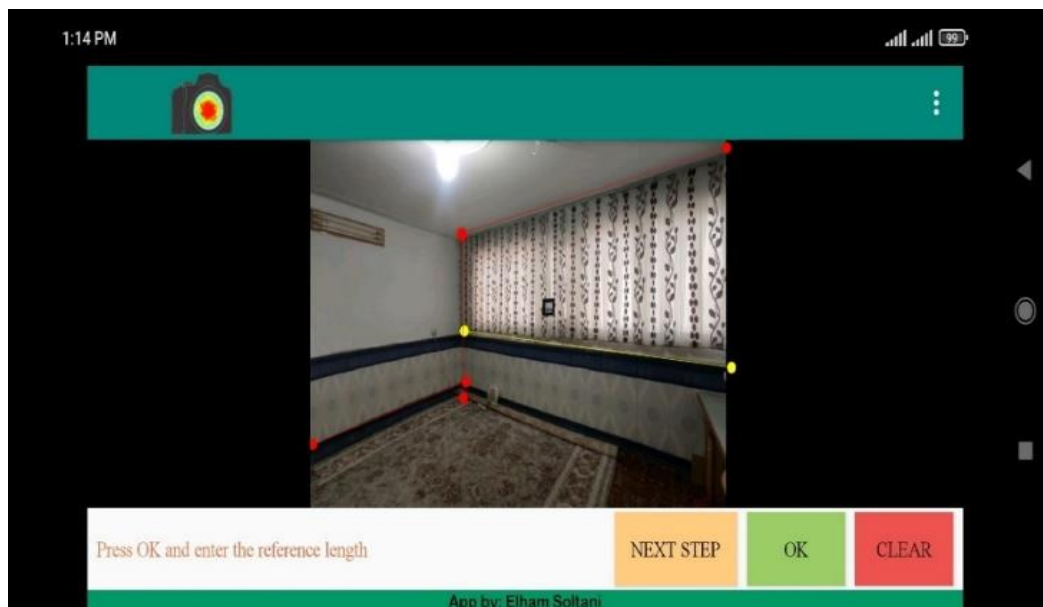
در این پژوهش، شبیه‌سازی انتقال آلاینده دی‌اکسید کربن و مونو اکسید کربن در محیط سه‌بعدی یک اتاق با ابعاد $2/5 \times 3/5 \times 4/3$ متر انجام شده‌است. تعداد نقاط شبکه در امتداد محورهای افقی و عمودی برابر ۳۰ و در راستای عرضی برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده‌است. منبع تولید آلاینده یک گرم‌کننده بوده که علاوه بر انتشار گرما، گاز دی‌اکسید کربن و مونو اکسید کربن را نیز در هوا پخش می‌کند. برای شروع فرآیند حل معادله وابسته

مشخص که با یکدیگر تداخل ندارند، تقسیم می‌شود. به این صورت که طول اندازه‌گیری شده هر محور با توجه به تعداد نقاط شبکه مشخص شده توسط کاربر تقسیم می‌شود. به این ترتیب فواصل و اندازه هر شبکه در هر راستا تعیین شده و در نهایت شبکه تولید می‌شود. با این شیوه شبکه‌هایی که در هر محور ایجاد می‌شوند، دو مزیت عدم تداخل شبکه‌ها با یکدیگر و مقدار دقیق به ازای هر شبکه را دارا می‌باشند. محاسبات این بخش روی پردازشگر تلفن همراه صورت گرفته و با توجه به محدودیت‌های محاسباتی تلفن همراه، کاربر یک تعداد حداکثری برای تعداد نقاط شبکه‌بندی را می‌تواند انتخاب کند. در نهایت برای تجزیه و تحلیل از روش مدل‌سازی عددی در محدوده محصور به مرزها استفاده می‌شود. برای مشخص کردن شرایط حل مسئله از شرایط اولیه و مرزی بهره برده می‌شود. در فرآیند پردازش، با استفاده از داده‌هایی که از مرحله قبل بدست آورده شده، حل معادلات حاکم بر مسئله یعنی معادله انتقال آلاینده‌ها توسط نرم‌افزار اندرویدی توسعه یافته بر



شکل ۴. اندازه‌گیری ابعاد محیط توسط دوربین تلفن همراه

Fig. 4. Measuring the dimensions of the environment by the mobile phone camera.



شکل ۵. نمونه واضح اندازه‌گیری و نمونه‌برداری ابعاد محیط توسط دوربین تلفن همراه

Fig. 5. A clear example of measuring and sampling the dimensions of the environment by a mobile phone camera.

جدول ۲. ضریب نفوذ جرمی

Table 2. Mass diffusion coefficient.

نام آلاینده	ضریب نفوذ جرمی (m^2/s)
دی اکسید کربن	$1/148 \times 10^{-5}$
مونواکسید کربن	$2/0.8 \times 10^{-5}$

به منظور نمایش نتایج شبیه‌سازی توسط کاربر یک برش از محیط سه‌بعدی به فاصله ۰/۲۷ متر از دیوار انتهایی با ابعاد $4/3 \times 2/5$ متر انتخاب شده‌است. کاربر می‌تواند با حرکت دادن لغزنده‌هایی که پس از اتصال به دوربین بخش واقعیت افزوده نرم افزار نمایان می‌شود، ابعاد توزیع میدانی غلظت را کاملاً با محیط واقعی انطباق دهد. چگونگی توزیع آلاینده‌ها را بر روی دنیای واقعی مشاهده کرده و به راحتی تجزیه و تحلیل کند. شکل ۶ و ۷ به ترتیب نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن را در محیط داخلی بر روی تلفن همراه و با بهره‌گیری از واقعیت افزوده نمایش می‌دهد. ضریب نفوذ جرمی دو آلاینده دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن مطابق جدول ۲ می‌باشد. مدت زمان و سرعت شبیه‌سازی‌ها برای آلاینده دی‌اکسید کربن مطابق با جدول ۳ و آلاینده مونواکسید کربن مطابق جدول ۴ می‌باشد. برای نمایش نتایج شبیه‌سازی شده در دنیا واقعی توسط واقعیت افزوده یک نشانگر با ابعاد 20×20 سانتی متر در محیط قرار گرفته است.

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از مدل ترکیبی واقعیت افزوده و دینامیک سیالات محاسباتی با داده‌های حاصل از حل مستقیم عددی روی رایانه شخصی مقایسه شده‌است [۲۳]. همانطور که واضح است نتایج بدست آمده در هر دو مورد کاملاً یکسان می‌باشد. برای اثبات این ادعا، داده حاصل از شبیه‌سازی در حالت (د) مطابق جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب برای آلاینده دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن، توسط نرم افزار توسعه‌یافته اندروید و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از کد اعتبارسنجی شده با نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی در شکل ۸ نمایش داده شده و همانطور که مشخص است نتایج تطابق خوبی با هم دارند.

به زمان، مقدار اولیه یک برای غلظت منبع تولید آلاینده‌ها در نظر گرفته شده‌است. با توجه به اینکه برای دیگر نقاط محدوده مورد بررسی مقدار اولیه صفر برای غلظت آلاینده در تمام نقاط محدوده مورد بررسی فرض شده‌است. همچنین افزایش مؤلفه افقی و عمودی سرعت آلاینده‌ها با گذر زمان نیز در نظر گرفته شده است.

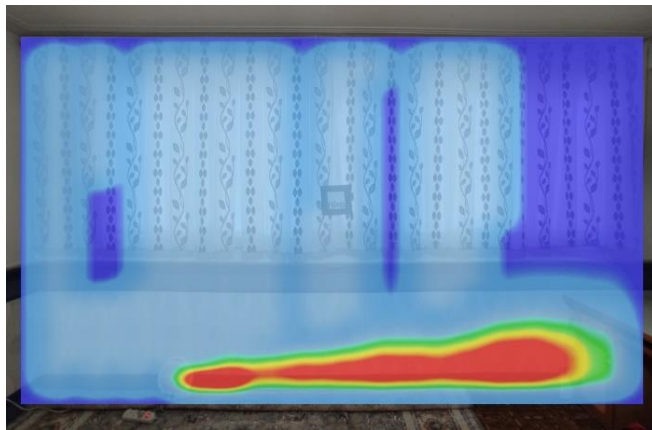
برای تعیین شرایط مرزی منطبق بر شرایط واقعی، از شرط مرزی عدم نفوذ غلظت روی دیوارها، درها، سقف، کف و پنجره اتاق که مرزهای محدوده مورد بررسی هستند، استفاده شده‌است. در نهایت با بهره‌گیری از شرایط اولیه و مرزی تعریف شده، معادله (۱) روی شبکه محاسباتی در زمان‌های مختلف در نرم‌افزار توسعه یافته و در بستر تلفن همراه حل می‌شود. شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌ها با گذر زمان به مدت ۲۰۰ تا ۵۰۰ ثانیه و با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه در زمان واقعی انجام گرفته‌است.

در فرآیند پس‌پردازش، توزیع میدانی غلظت که نشان‌دهنده نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال آلاینده است، تولید می‌شود. در واقع نتایج عددی حاصل از حل معادلات در فرآیند پردازش به صورت داده‌های گرافیکی و نقشه گرمایی نمایش داده می‌شوند. سپس با بهره‌گیری از تکنیک واقعیت افزوده و روش ردیابی مبتنی بر نشانگر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی گرافیکی بر روی محیط واقعی توسط دوربین تلفن همراه نمایش داده می‌شود. حل معادلات و شبیه‌سازی انتقال آلاینده بر روی هندسه سه بعدی تولید شده، انجام گرفته ولی نمایش تغییرات غلظت در صفحات دو بعدی بر روی دنیا واقعی صورت می‌گیرد. بدین منظور باید مقدار مختصات صفحه موردنظر در یک راستا ثابت باشد، یعنی برای نمایش دو بعدی، مؤلفه یک بعد باید ثابت و در بازه طول اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شود. در مسئله مورد بررسی در این پژوهش،

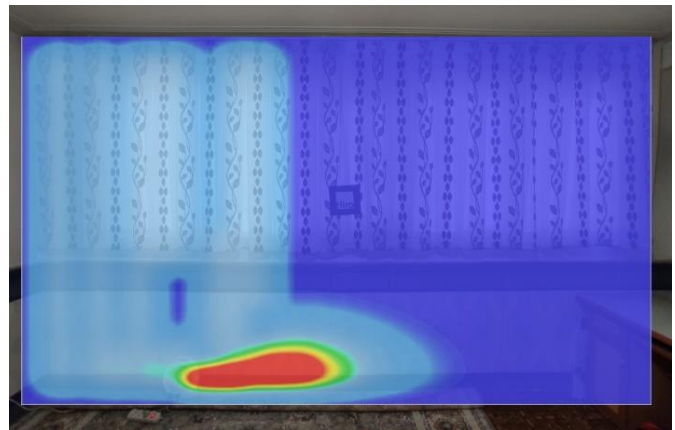
جدول ۳. خواص فیزیکی آلاینده دی‌اکسید کربن

Table 3. Physical properties of carbon dioxide pollutant.

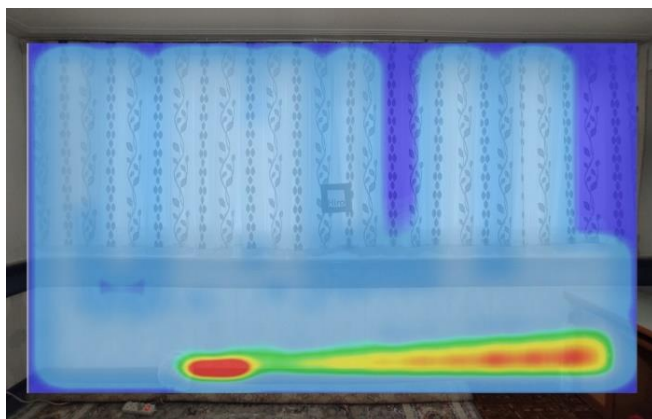
ردیف	زمان (s)	مؤلفه افقی سرعت (m/s)	مؤلفه عمودی سرعت (m/s)	مؤلفه سمتی سرعت (m/s)
(الف)	۲۰۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۱۵	۰
(ب)	۳۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰
(ج)	۴۰۰	۰/۰۱۵	۰/۰۰۲۵	۰
(د)	۵۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰



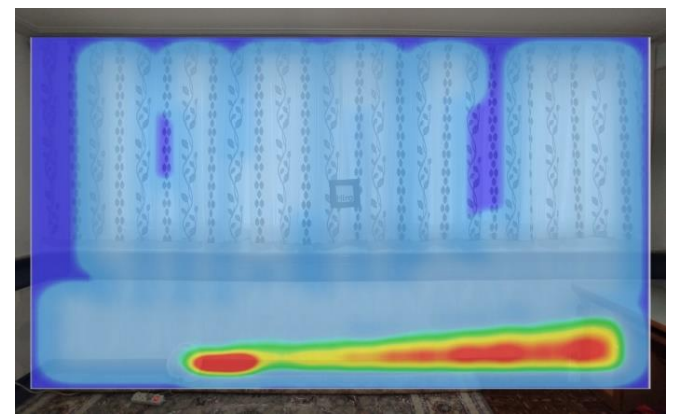
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

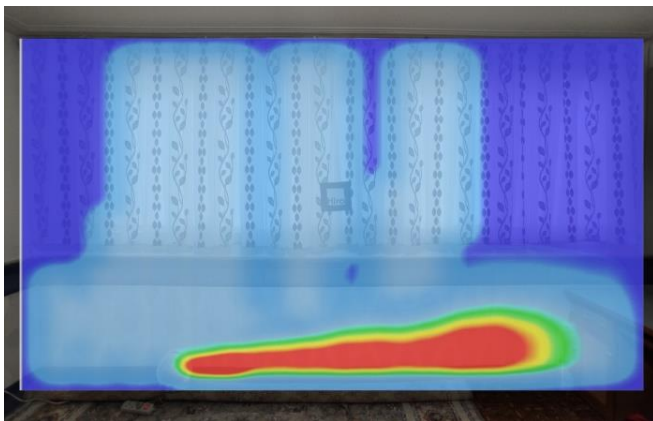
شکل ۶. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن در محیط داخلی بر روی تلفن همراه و با بهره‌گیری از واقعیت افزوده

Fig. 6. The results of simulation the emission of carbon dioxide pollutant in the indoor environment on a mobile phone and by using augmented reality.

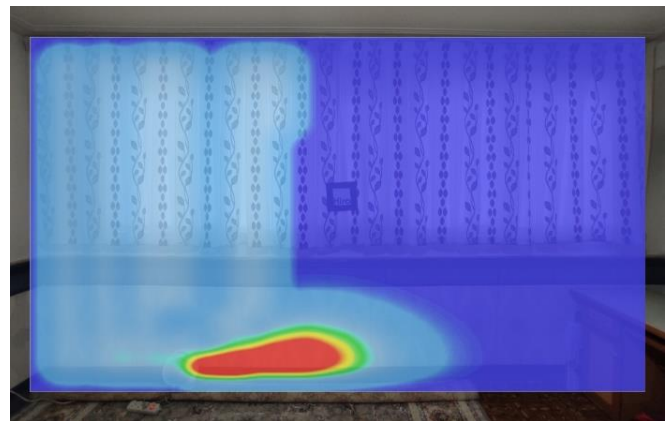
جدول ۴. خواص فیزیکی آلاینده مونواکسید کربن

Table 4. Physical properties of carbon monoxide pollutant.

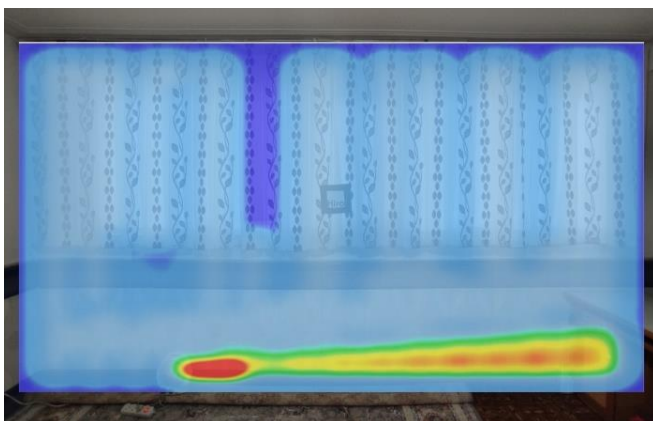
ردیف	زمان (S)	مؤلفه افقی سرعت (m/s)	مؤلفه عمودی سرعت (m/s)	مؤلفه سمتی سرعت (m/s)
(الف)	۲۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۸	۰
(ب)	۳۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۱	۰
(ج)	۴۰۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲۴	۰
(د)	۵۰۰	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲۷	۰



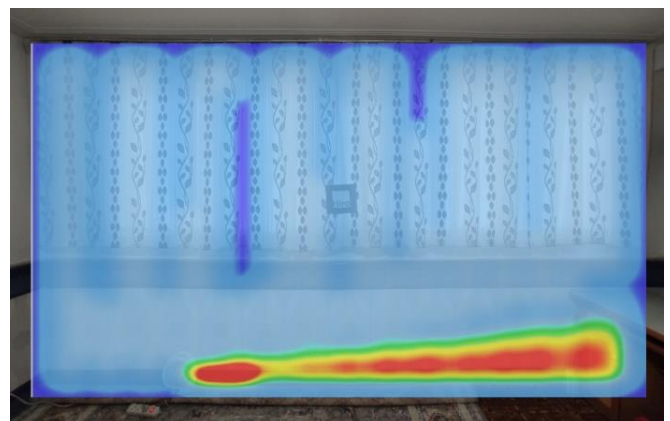
(ب)



(الف)



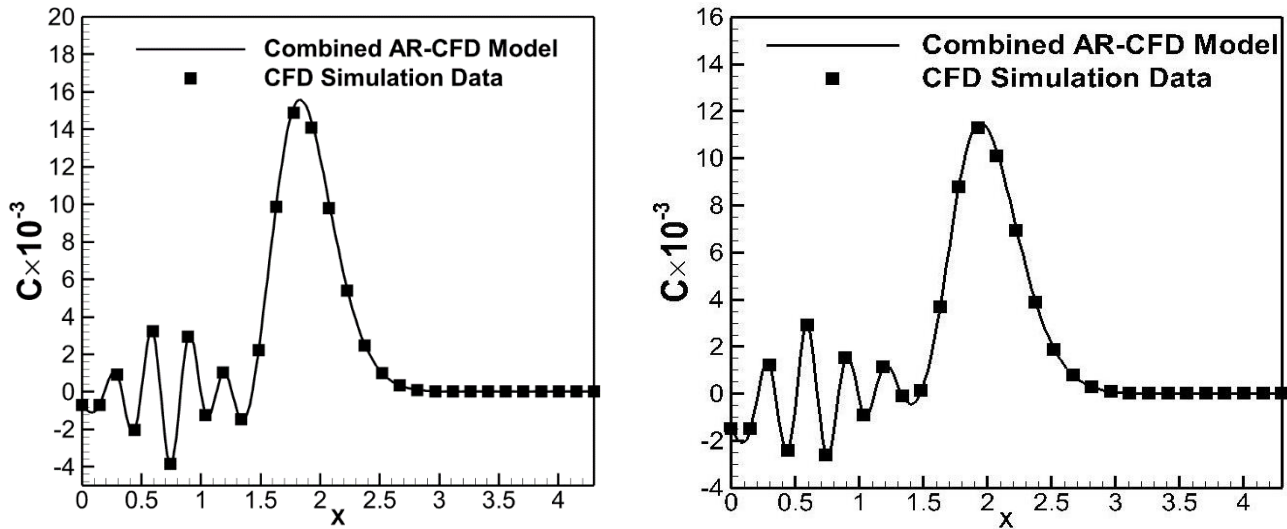
(د)



(ج)

شکل ۷. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار آلاینده مونواکسید کربن در محیط داخلی بر روی تلفن همراه و با بهره‌گیری از واقعیت افزوده

Fig. 7. The results of simulation the emission of carbon monoxide pollutant in the indoor environment on a mobile phone and by using augmented reality.



شکل ۸. مقایسه انتشار آلاینده شبیه‌سازی شده توسط مدل ترکیبی بر روی تلفن همراه و حل مستقیم عددی برای حالت (د) هر دو مورد، آلاینده دی اکسید کربن (راست) و آلاینده مونواکسید کربن (چپ)

Fig. 8. Comparison of pollutant emission simulated by hybrid model on mobile phone and direct numerical solution for case (d) of both cases, carbon dioxide pollutant (right) and carbon monoxide pollutant (left).

توسط دوربین تلفن همراه نمایش داده می‌شود. مسئله مورد بررسی در این پژوهش شبیه‌سازی انتقال آلاینده دی اکسید و مونواکسید کربن در هوا با تغییرات سرعت می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار توسعه یافته با داده‌های حاصل از کد اعتبار سنجی شده، نشان‌دهنده دقت و توان محاسباتی ماژول توسعه یافته برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها در محیط داخلی می‌باشد. بنابراین با توجه به قابلیت دسترسی تلفن همراه، نرم‌افزار توسعه یافته می‌تواند به‌عنوان آزمایشگاه سیار و در واقع ابزار آموزشی برای یادگیری بهتر دانشجویان ارائه گردد. از آن جا که قدرت محاسباتی و فضای ذخیره‌سازی تلفن همراه محدود است، به منظور توسعه این ماژول برای مسائل پیچیده‌تر و مدل‌های ترکیبی جریان سیال و انتقال آلاینده‌ها نیاز به استفاده از روش‌های محاسباتی سریع‌تر و کمک گرفتن از سرور پر قدرت برای انجام محاسبات می‌باشد.

منابع

- [1] Y. Zhu, T. Fukuda, N. Yabuki, SLAM-Based MR with Animated CFD for Building Design Simulation, Proceeding of the 23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRRIA), (2018), pp. 391–400.

۶- نتیجه‌گیری

به‌عنوان یک تکنولوژی رایج برای درک انتقال جرم و حرارت، دینامیک سیالات محاسباتی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولاً داده‌های زیادی برای پردازش و تجسم بیشتر تولید می‌کند. با فعال کردن تعامل بین دنیای مجازی و واقعی، واقعیت افزوده یک الگو جدید و رابط کاربری آسان برای درک پدیده‌های فیزیکی ایجاد می‌کند. برای این منظور در این پژوهش برای مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها در محیط داخلی از ترکیب تکنیک واقعیت افزوده و دینامیک سیالات محاسباتی برای توسعه نرم‌افزار تلفن همراه جهت شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها در گذر زمان استفاده شده است. پیاده‌سازی این نرم‌افزار شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش می‌باشد. در فرآیند پیش‌پردازش اندازه‌گیری ابعاد محیط و تولید هندسه انجام می‌شود. به منظور تولید شبکه محاسباتی بر روی تلفن همراه براساس هندسه تولید شده شبکه‌بندی مدل صورت می‌گیرد. در فرآیند پردازش، با استفاده از داده‌هایی که از مرحله قبل بدست آورده است، با توجه به شرایط اولیه و مرزی محاسبه معادلات حاکم بر مسئله بر روی تلفن همراه انجام می‌شود. در فرآیند پس‌پردازش توزیع میدانی کمیت که نشان‌دهنده نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها است، تولید شده است. در نهایت با بهره‌گیری از تکنیک واقعیت افزوده و با استفاده از روش ردیابی مبتنی بر نشانگر، نتایج شبیه‌سازی و حل معادلات بر روی محیط واقعی

- under the Framework of Industry 4.0, *Procedia CIRP*, 106 (2022) 215-220.
- [11] S. Solmaz, T. Van Gerven, Interactive CFD simulations with virtual reality to support learning in mixing, *Computers & Chemical Engineering*, 156 (2022) 107570.
- [12] S. Solmaz, T. Van Gerven, Integration of Interactive CFD Simulations with AR and VR for Educational Use in CRE, *Computer Aided Chemical Engineering*, 48 (2020) 2011-2016.
- [13] D. Paeres, J. Santiago, C.J. Lagares, W. Rivera, A.B. Craig, G. Araya, Design of a Virtual Wind Tunnel for CFD Visualization, in: *AIAA Scitech 2021 Forum*, (2021), pp. 1600.
- [14] N. Arulanand, A.R. Babu, P. Rajesh, Enriched learning experience using augmented reality framework in engineering education, *Procedia Computer Science*, 172 (2020) 937-942.
- [15] J. Ghazanfarian, E. Khavasi, H. Yousefi, M. Amiraslanpour, S. Teymouri, R. Bayat, Modern Online Learning Tools Over the Platform of Virtual/Augmented Reality, *Optimizing Student Engagement in Online Learning Environments*, (2018) 101-126.
- [16] M. Mekni, A. Lemieux, Augmented reality: Applications, challenges and future trends, *Applied computational science*, 20 (2014) 205-214.
- [17] W. Li, A.Y. Nee, S.-K. Ong, A state-of-the-art review of augmented reality in engineering analysis and simulation, *Multimodal Technologies, and Interaction*, 1(3) (2017) 17.
- [18] D. Koller, G. Klinker, E. Rose, D. Breen, R. Whitaker, M. Tuceryan, Automated camera calibration and 3D egomotion estimation for augmented reality applications, *Proceeding of International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, (1997), pp. 199-206.
- [19] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, F. Kishino, Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, *Telemicroscopy and telepresence technologies*, 2351 (1995) 282-292.
- [2] M. Hosokawa, T. Fukuda, N. Yabuki, T. Michikawa, A. Motamedi, Integrating CFD and VR for indoor thermal environment design feedback, *Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, (2016), pp. 663-672.
- [3] T. Fukuda, K. Yokoi, N. Yabuki, A. Motamedi, An indoor thermal environment design system for renovation using augmented reality, *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(2) (2019) 179-188.
- [4] J. Moreland, J. Wang, Y. Liu, F. Li, L. Shen, B. Wu, C. Zhou, Integration of augmented reality with computational fluid dynamics for power plant training, *Proceedings of the International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods (MSV)*, (2013).
- [5] A.M. Malkawi, R.S. Srinivasan, A new paradigm for Human-Building Interaction: the use of CFD and Augmented Reality, *Automation in construction*, 14(1) (2005) 71-84.
- [6] T. Fukuda, K. Mori, J. Imaizumi, Integration of CFD, VR, AR and BIM for design feedback in a design process - an experimental study, *Proceedings of the 33rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 33)*, 1 (2015), pp. 665-672.
- [7] J.R. Lin, J. Cao, J.-P. Zhang, C. van Treeck, J. Frisch, Visualization of indoor thermal environment on mobile devices based on augmented reality and computational fluid dynamics, *Automation in Construction*, 103 (2019) 26-40.
- [8] V. Heuveline, S. Ritterbusch, S. Ronnas, Augmented reality for urban simulation visualization, *Preprint Series of the Engineering Mathematics and Computing Lab*, (16) (2011).
- [9] R. Lakaemper, A.M. Malkawi, Integrating robot mapping and augmented building simulation, *Journal of computing in civil engineering*, 23(6) (2009) 384-390.
- [10] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, N. Panopoulos, Challenges and Opportunities for Integrating Augmented Reality and Computational Fluid Dynamics Modeling

- [22] R. Aggarwal, A. Singhal, Augmented Reality and its effect on our life, 9th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), (2019), pp. 510-515.
- [23] M.K. Moayyedi, Numerical Study of the Mass Transfer Effects on the Flow and Thermal Fields Structures under the Influence of Natural Convection, AUT J. Model. Simul, 51(2) (2019) 131-138.
- [20] V. Razavi Termeh, M. Malek, The augmented reality and its applications for spatial information and supporting environments, Geospatial Engineering Journal, 8(4) (2017) 1-10. (In Persian)
- [21] Y. Turkan, R. Radkowski, A. Karabulut-Ilgu, A.H. Behzadan, A. Chen, Mobile augmented reality for teaching structural analysis, Advanced Engineering Informatics, 34 (2017) 90-100.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Soltani Meymand, M. K. Moayyedi, F. Fotouhi, Pollutants Transfer Simulation Model Using Combination of Augmented Reality and Computational Fluid Dynamics Techniques on Cell Phone Platform, Amirkabir J. Mech Eng., 55(1) (2023) 143-156.

DOI: [10.22060/mej.2022.20989.7355](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20989.7355)

