

## مطالعه عددی رفتار تراورس کوهان‌دار در طوفان شن با مدل‌سازی جریان دوفازی گاز- جامد

مجید ملکانه، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

محمدرضا طلایی، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: mrtalae@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴

### چکیده

هر ساله طوفان شن مشکلات متعددی را در بیابان بوجود می‌آورد، لذا بایستی راه‌حل کامل و مناسبی برای این مساله ارائه شود. تراورس کوهان‌دار یکی از راه‌های جلوگیری از نشست شن در بستر خط می‌باشد. مدل‌سازی طوفان شن و تعیین نشست شن در میان ریل‌ها و روی خط راه‌آهن به صورت سه بُعدی در این مقاله بررسی شده است. خط راه‌آهن متشکل از ۴ ردیف تراورس کوهان‌دار همراه ریل مدل‌سازی شده است. جریان ورودی بصورت دوفازی هوا-شن بصورت گاز-جامد به صورت همگن به روش اویلری با نرم‌افزار STAR-CCM<sup>+</sup> ایجاد شده و در هر شبیه‌سازی به نوبت از سه قطر ۱۲۵ و ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومتر بر مبنای توزیع ذرات شن در بیابان‌های ایران استفاده شده است. عملکرد تراورس کوهان‌دار در مقابل پارامترهای غلظت طوفان، شدت طوفان و ماهیت ناحیه کویری طوفان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه افزایش ارتفاع کوهان در این مدل تراورس مورد توجه قرار گرفته و شبیه‌سازی جریان با سه ارتفاع کوهان ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان می‌دهد که هرچه قطر ذرات بزرگتر باشد، ذرات مسافت کمتری را معلق هستند و کسر حجمی شن باقی مانده در پشت کوهان‌ها بیشتر شده و خطر انسداد خطوط بالاتر می‌رود، لذا در مناطقی که قطر ذرات شن بزرگتر است، احتمال انسداد خطوط راه‌آهن بیشتر می‌باشد. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از تراورس کوهان‌دار می‌تواند در طوفان‌های با سرعت بالاتر از ۲۰ m/s کارآمد باشد و در مقادیر زیر این محدوده، تجمع شن کماکان در روی خط وجود خواهد داشت.

کلمات کلیدی: انسداد خطوط راه‌آهن، طوفان شن، تراورس کوهان‌دار، مدل جریان دوفازی گاز-جامد

## ۱. مقدمه

نشست شن روی ریل یکی از مسائل روز راه آهن ایران و جزو هزینه‌برترین مشکلات ریلی کشور و جهان است. لذا لازم است تدابیر پیش‌گیرانه برای این موضوع اندیشیده شود. مهم‌ترین مشکلات مناطق کویری برای خطوط ریلی، طوفان‌های شن است که با جابجایی تپه‌های شنی، باعث پوشیده شدن خطوط ریلی توسط شن می‌گردد و این پدیده باعث بسته شدن مسیر، تقلیل سرعت قطار و یا خروج قطار از خطوط می‌شود. انسداد خطوط ریلی به وسیله شن از گذشته تاکنون برای کشورهای مختلف جهان مشکل ساز بوده است. برای مثال کشور چین که دارای بیابان‌های بزرگ است و یا در سال‌های اخیر، کشورهای حوزه خلیج فارس مانند عراق، امارات و عربستان در این حوزه سرمایه‌گذاری‌های وسیعی انجام داده‌اند. انواع ایرادات روی داده در بستر خطوط راه آهن در اثر طوفان شن در «شکل ۱» قابل مشاهده است:

کشور ایران یکی از سرزمین‌های دارای مناطق وسیع بیابانی است. بر اساس آمار سازمان حفاظت محیط زیست،  $7/43$  میلیون هکتار از مساحت کشور در اکو سیستم بیابانی و معرض شن‌های روان قرار دارد. حدود ۵۵ درصد از وسعت ایران را مناطق بیابانی و نیمه بیابانی فراگرفته است [۱] و این عامل، یعنی بیابان، نقش موثری در حمل و نقل بین شهرها و استان‌ها ایفا می‌کند و غفلت از آثار زیان‌بار آن، می‌تواند مشکلات متعددی برای صنعت حمل و نقل ایجاد نماید. با توجه به آمار، حدود ۳۰۰ کیلومتر از شبکه خطوط راه آهن و بخش قابل توجهی از خطوط در دست احداث در مناطق بیابانی و در معرض هجوم شن‌های روان قرار گرفته است و موجب مشکلات زیادی از جمله مسدود شدن خطوط، تقلیل سرعت قطار، فرسودگی پیش از موعد اتصالات خط، تراورس‌ها و ریل می‌شود.



ب - ناخالص سازی بالاست



الف - انسداد کامل مسیر



د - گرفتگی سوزن یا جعبه دنده‌های قطار



ج - گرفتگی سیستم‌های الکتریکی

شکل ۱- انواع مشکلات خطوط ریلی در اثر طوفان شن

این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این راه حل ها در «شکل ۲» مشاهده می شود.

راه حل های این موضوع در دو دسته کلی راه حل هایی برای جلوگیری از دسترسی شن به ریل و راه حل هایی به منظور کاهش اثر شن روی ریل تقسیم بندی می شوند. در این قسمت برخی از سناریوهای موجود در



ب - عبور مسیر از درون گالری



الف - ماشین آلات ماسه روب جهت حذف شن از مسیر



د - مالچ پاشی



ج - استفاده از مسیرهای بتنی مرتفع



و - استفاده از حصار در اطراف ریل



ه - کاشت گیاه در کناره مسیر

شکل ۲ - برخی روش ها برای کاهش نشست شن روی ریل

مناطق بحرانی، بالاست های اضافی زیر ریل و اطراف تراورس ها بصورت آزمایشی جمع آوری و مسیر جریان

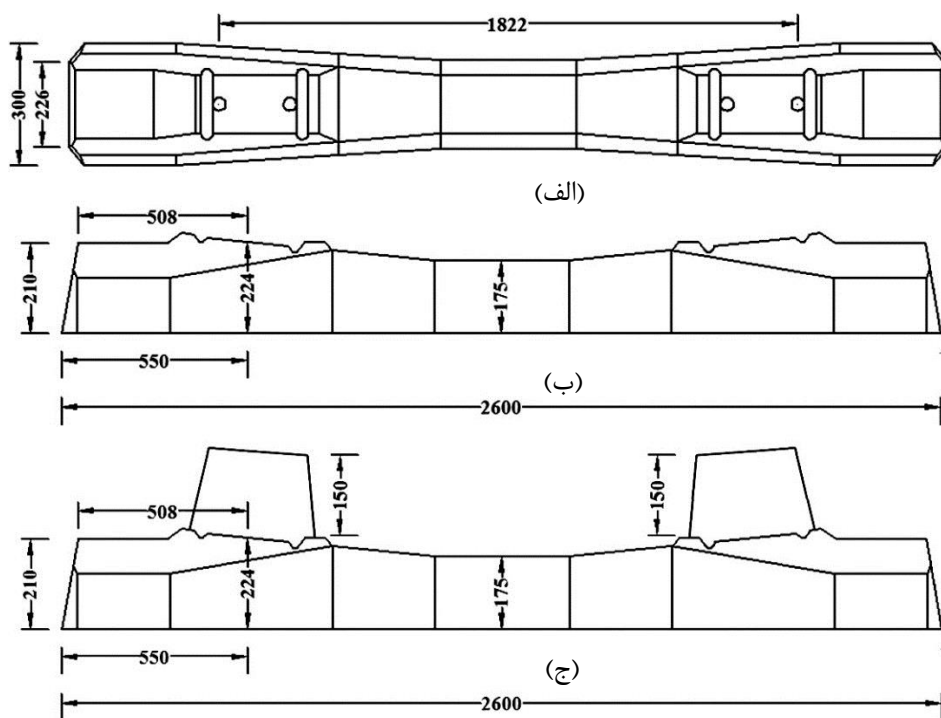
یکی از بهترین راه حل هایی که می توان برای مقابله با نشست شن روی ریل استفاده کرد این است که در

صورت گرفت. تصویر نمونه واقعی از این نوع تراورس در «شکل ۳» و تصویر مدل دو بعدی از تراورس معمولی و تراورس کوهاندار به همراه ابعاد در «شکل ۴» قابل مشاهده است.

باد از زیر ریل آزاد شود که این امر می‌تواند با جایگزینی تراورس‌های بتنی کوهاندار که مسیر جریان باد و عبور شن‌های روان در زیر آن آزاد است، اجرا گردد. [۲]  
این طرح نیز در سال ۱۳۹۰ با استفاده از دال خط کوهاندار در طول ۳۶ متر در ایران به طور آزمایشی



شکل ۳- نمونه‌ای تست شده از تراورس کوهاندار [2]



شکل ۴ - مقایسه ابعاد تراورس‌های معمولی و کوهاندار بر حسب میلی‌متر:

الف) نمای تراورس معمولی از بالا، ب) نمای تراورس معمولی از کنار، ج) نمای تراورس کوهاندار از کنار [۲]

عبوری شن و ماسه در ارتفاع های پایین، می توان دریافت که تاثیر گرد و غبار در ارتفاع های پایین تر به خصوص بر روی مسیرهای ریلی ناچیز می باشد.

در خصوص بررسی شن و ماسه نیز شبیه سازی های متعددی صورت گرفته است. بخشی از تحقیقات به بررسی رفتار شن و ماسه در درون لوله های خمیده پرداخته است، مانند مقالات ونگ<sup>۹</sup> در سال ۲۰۱۴ [۱۲] یا مقاله مازومبر<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۱۶ [۱۳]. بخش دیگر تحقیقات به بررسی رفتار ذرات روی سطوح در معرض جریان آزاد و ایجاد حالتی شبیه طوفان شن پرداخته اند. از جمله این مقالات می توان به مقاله کانگ<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد [۱۴] که برای سرعت ذرات در ارتفاع های مختلف معادلات پیش بینی کننده پیشنهاد می دهد. همچنین کانگ در مقاله ای در سال ۲۰۱۰ به بررسی جهش ناگهانی ذرات در طوفان شن پرداخته است [۱۵]. در این تحقیقات حرکات شن و ماسه به خوبی شبیه سازی شده است. دیگر مقالات در این زمینه، تحقیقات در زمینه تاثیر حصار به منظور جلوگیری از جابجایی ذرات در بیابان است. در این زمینه می توان به مقاله لواسانی در سال ۲۰۱۶ [۱۶] اشاره کرد که عملکرد حصار را در کاهش نشست شن روی خطوط ریلی بررسی کرده است و نتایج حاصله نشان می دهد که استفاده از دیواره شنی در فاصله یک و متری و به ارتفاع یک متری، می تواند تاثیر چشم گیری در کاهش شار شن عبوری از مانع داشته باشد.

در زمینه مدل سازی طوفان شن به وسیله روش های عددی تحقیقات متعددی صورت گرفته است. تحقیقات موجود در این زمینه به دو دسته اصلی تحقیقات در مورد ذرات گرد و غبار و تحقیقات در خصوص ذرات شن و ماسه دسته بندی می شود.

در میان تحقیقات تونل باد در این زمینه، می توان به مقاله دونگ<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۴ [۳] اشاره کرد. وی در این مقاله نمودارهایی برای شار جرمی شن برای سرعت های مختلف بر حسب ارتفاع به دست آورده است. از میان تحقیقات تست میدانی نیز می توان به مقالات شوای لی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۴ [۴]، چنگ<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۴ [۵] و [۶] و رالی<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۸ [۷] اشاره کرد که به بررسی شار جرمی و میزان تمرکز شن در ارتفاع های مختلف پرداخته اند. در نمودارهای حاصل از این تحقیقات نیز پاسخ هایی مشابه پاسخ های دونگ به دست آمده است که به جهت سحت سنجی مدلسازی نرم افزار در کار حاضر مرود استفاده قرار گرفته اند.

از جمله مدل سازی های موجود در زمینه رفتار گرد و غبار می توان به مقالات ژاوهوی لین<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۲ [۸]، کن لو<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۶ [۹] استورن<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۴ [۱۰] و نواک<sup>۸</sup> در سال ۲۰۱۵ [۱۱] اشاره کرد. در این تحقیقات، تاثیر گرد و غبار در حوزه های وسیع مانند یک منطقه از شهر و یا حتی یک کشور بررسی شده است که نشان می دهد ذرات گرد و غبار در ارتفاع های تا ۱۰۰ متر از سطح زمین قابل مشاهده است، ولی با مقایسه با شارهای

<sup>۱</sup> Dong  
<sup>۲</sup> Shuai Li  
<sup>۳</sup> Cheng  
<sup>۴</sup> Raleigh  
<sup>۵</sup> Zhaohui Lin  
<sup>۶</sup> Kun Luo  
<sup>۷</sup> Stovern  
<sup>۸</sup> Novak  
<sup>۹</sup> Wong  
<sup>۱۰</sup> Mazumder  
<sup>۱۱</sup> Kang

و قطر ذرات یکسان و برابر  $500\mu\text{m}$ ، سرعت ورودی برای شن برابر  $10\text{ m/s}$  و گام زمانی برابر  $10^{-5}\text{ s}$  در نظر گرفته شده است.

در مقاله پیش‌رو به مدل‌سازی بستر خط به همراه ۴ تراورس کوهان‌دار در جریان دوفاز باد و شن با هدف رفع ایرادات مدل‌های گذشته پرداخته می‌شود. در ابتدا شرایط توزیع ذرات در مدل دوفاز با منابع موجود صحت‌سنجی می‌گردد و در ادامه به مطالعه پارامتریک متغیرهای مختلف مانند سرعت باد، غلظت طوفان شن، قطر ذرات شن و ارتفاع کوهان در مسئله تجمیع ذرات روی خط پرداخته می‌شود. نتایج کلی حول اصل کارایی تراورس کوهان‌دار در خطوط ریلی به منظور جلوگیری از تجمیع شن در خط در طوفان شن می‌باشد. ایده این مقاله این است که طوفان شن را با سه عامل زیر بصورت پارامتریک مورد بررسی قرار داده است. شدت طوفان که با پارامتر سرعت باد شناخته می‌شود، غلظت طوفان که با پارامتر کسر حجمی ذرات در مدل دوفازی طوفان شناخته می‌شود و ماهیت طوفان شن که با پارامتر قطر ذرات شن موجود در بیابان شناخته می‌شود. نتایج مطالعه پارامتریک فوق نشان دهنده آن است که عملکرد تراورس کوهان‌دار در عدم تجمیع شن در خطوط ریلی در طوفان‌های با شدت بالاتر از  $20\text{ m/s}$  و غلظت زیر کسر حجمی  $0.2$  می‌تواند مناسب باشد.

## ۲- معادلات حاکم بر جریان دوفاز

در این مساله از معادلات روش اویلری استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان دوفازی گاز - جامد به روش اویلری به صورت زیر می‌باشد. معادله (۱) معادله پیوستگی جریان دوفازی در دیدگاه اویلری (مخصوص هر فاز سیال به صورت جداگانه)، معادله (۲) معادله مومنتوم جریان دوفازی در دیدگاه اویلری و معادله (۳) معادله انرژی جریان دوفازی در دیدگاه اویلری می‌باشد.

از جمله محدود تحقیقات شبیه‌سازی موجود در زمینه بررسی تراورس کوهان‌دار در طوفان شن، تحقیقات دکتر ذاکری در دانشکده راه آهن دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. در یکی از این تحقیقات، ذاکری به همراه فتحعلی مساله استفاده از طرحی نوین به نام دال خط کوهان‌دار را در سال ۱۳۸۹ [۱۷] به صورت کلی مورد بررسی قرار داده است. البته در این مقاله از جریان دوفازی استفاده نشده و جریان به دو صورت دو ورودی تک فاز جداگانه از هوا و شن در نظر گرفته شده است. همچنین در شبیه‌سازی دیگری که در همین مقاله به انجام رسیده است، توده شن به صورت یک تپه به جنس سیال مدل‌سازی شد که توسط باد جابجا می‌گردد. ذاکری در این تحقیقات دریافته است که استفاده از تراورس کوهان‌دار با کوهان‌های به ارتفاع  $25\text{ cm}$  می‌تواند به خوبی باعث عبور جریان شن از میان کوهان‌ها شود و از انسداد مسیر جلوگیری نماید. ذاکری محدوده‌ای از کسرحجمی شن را به عنوان پارامتر مسدودی خط معرفی می‌کند که برابر است با منطقه‌ای که در آن  $0.75$  از کسرحجمی کل را شن تشکیل داده باشد. در این مقاله برای نخستین بار جریان جابجایی شن روی ریل راه آهن به صورت شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین در مقاله‌ای که در سال ۱۳۹۶ به چاپ رسید، دکتر ذاکری به همراه فتحی شبیه‌سازی ذرات شن در فلوننت را این بار به صورت جریان دوفازی گاز جامد مدل‌سازی کرده است [۱۸]. این مقاله به صورت مفصل‌تر به بررسی ابعاد و اشکال مختلف کوهان پرداخته شده و برخی از مشکلات مدل‌سازی مقاله سال ۱۳۸۹ مرتفع شده است، از جمله اینکه ابعاد و اشکال مختلف کوهان مورد بررسی قرار گرفته شده و همچنین ورودی به صورت دوفاز است و گام زمانی کاهش پیدا کرده ولی کماکان مشکلاتی نظیر عدم تاثیر سرعت‌های مختلف جریان ورودی، عدم بررسی قطرهای مختلف شن و عدم بررسی کسرحجمی‌های مختلف ورودی به قوت خود باقیست. ضریب فشردگی برابر 1 و چگالی و ویسکوزیته

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \varepsilon_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \varepsilon_i \vec{v}_i) = & \quad (5) \\ \nabla \cdot \left[ \alpha_i \left( \mu_i + \frac{\mu_{t,i}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \\ \alpha_i \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon,i} - \\ \alpha_i C_{\varepsilon 2} f_2 \rho_i \left( \frac{\varepsilon_i}{T_{e,i}} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + \\ \alpha_i (S_{\varepsilon,i} + S_{\varepsilon r,i}) + \\ \frac{1}{V} \sum_{i \neq j} (m_{ij} \varepsilon_j^{(ij)} - m_{ji} \varepsilon_i) \end{aligned}$$

که  $\mu_t$  لزجت اغتشاشی،  $S$  ضریب نرخ کرنش میانگین،  $k$  انرژی جنبشی اغتشاشی،  $\varepsilon$  نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی،  $v$  سرعت سیال،  $P$  ترم تولید،  $f$  تابع استهلاک،  $\sigma$  و  $C$  ضرایب مدل،  $T$  مقیاس زمان اغتشاشی،  $m$  نرخ شارجرمی سیال و  $i$  شماره فاز موردنظر می‌باشد.

### ۱-۲- معادلات نیروهای موثر بر فازها

نیروهای میان فازی و بین فازی در این مساله به شرح زیر می‌باشد:

نیروی درگ: این نیرو در اثر اختلاف سرعت میان ذرات یک فاز و یا دو فاز نسبت به یکدیگر رخ می‌دهد و طبق رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$F_{ij}^D = A_{ij}^D (v_j - v_i) \quad (6)$$

که در اینجا  $A_{ij}^D$  ضریب درگ خطی سازی شده است.

نیروی جرم مجازی: این نیرو به دلیل اینرسی مایع موجود در اطراف ذره جامد رخ می‌دهد و باعث افزایش شتاب ذره ای می‌شود که در جریان است و مانند نیروی ارشمیدس، به اندازه جرم مقدار سیال کاهش یافته توسط ذره جامد، بر فاز جامد وارد می‌شود و از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$F_{ij}^{VM} = C_{ij}^{VM} \rho_c \alpha_d (a_j - a_i) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f u) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u u) \\ = \nabla \cdot (\alpha_f P_f) + \alpha_f \rho_f g \\ - \alpha_p \rho_p F \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f u^2) \\ + \frac{1}{2} \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u^2 u) \\ = u \nabla \cdot (\alpha_f P_f) + \alpha_f \rho_f g \cdot u \\ - \alpha_p \rho_p F \cdot u + \dot{E}_w \end{aligned} \quad (3)$$

که  $F$  برابر نیروی برآیند بین دو فاز،  $g$  شتاب جاذبه زمین،  $\alpha_p$  و  $\alpha_f$  کسر حجمی فازهای جامد و سیال ( $\alpha_f = 1 - \alpha_p$ )،  $\rho_g$  و  $\rho_f$  چگالی جرمی سیال و جامد،  $u$  سرعت سیال،  $\dot{E}_w$  نرخ تولید انرژی توربولانسی به دلیل وجود ذرات جامد و  $P_f$  ترم تولید انرژی مربوط به فاز سیال است. معادلات توربولانسی حاکم بر جریان در این دیدگاه به روش  $k-\varepsilon$  realizable حل می‌گردد. دو معادله برای روابط انتقالی در مدل  $k-\varepsilon$  وجود دارد که این معادلات برای هر یک از فازها به صورت جداگانه حل می‌گردد. یکی برای انرژی جنبشی اغتشاشی  $k$  و دیگری برای نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی  $\varepsilon$  که از روابط (۴) و (۵) حاصل می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i k_i) + \nabla \cdot \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (\alpha_i \rho_i k_i \vec{v}_i) = \nabla \cdot \left[ \alpha_i \left( \mu_i + \frac{\mu_{t,i}}{\sigma_k} \right) \nabla k_i \right] + \alpha_i P_{k,i} - \\ \alpha_i \rho_i (\varepsilon_i - \varepsilon_0) + \alpha_i (S_{k,i} + S_{kr,i}) + \frac{1}{V} \sum_{i \neq j} (m_{ij} k_j^{(ij)} - m_{ji} k_i) \end{aligned}$$

تنظیم می‌شود. در ادامه به بررسی مدل‌های شبیه‌سازی شده توسط این نرم افزار پرداخته می‌شود.

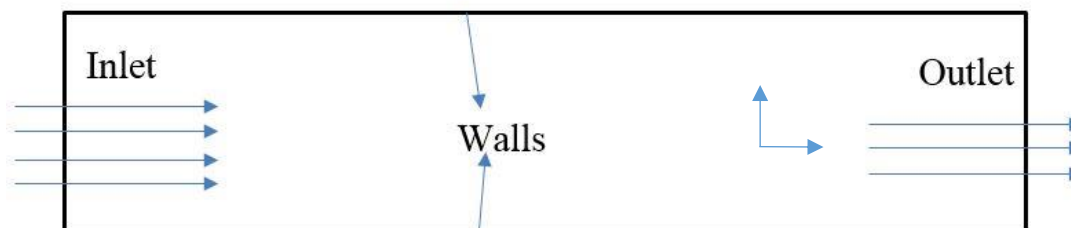
که  $C$  نماد فاز پیوسته،  $d$  نماد فاز گسسته،  $C_{ij}^{VM}$  ضریب جرم مجازی و  $a_k$  شتاب فاز  $k$  می‌باشد.

### ۳-۱- مدل طوفان شن

در این مساله ابتدا باید طوفان شن به تنهایی مدل‌سازی شود. مدل طوفان در یک مقطع سه بعدی به صورت دوفازی اوپلری صورت گرفته است. شماتیک دو بعدی از مدل و شرایط مرزی ورودی در «شکل ۵» مشاهده می‌شود. عرض مدل برابر ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. در این مدل‌سازی از سرعت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه برای سرعت فاز هوا و از سرعت‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ متر بر ثانیه برای فاز ذرات شن در ورودی استفاده شده است. قطر ذرات شن برابر ۱۲۵، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومتر و چگالی ذرات ثابت و برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. جریان در ورودی به صورت یکنواخت و همگن وارد می‌شود.

### ۳- مدل سازی مسئله

حال بایستی با توجه به نقاط ضعف موجود در مقالات مطرح شده، مدل‌سازی برای رفع آن‌ها صورت گیرد. در این مقاله در ابتدا به بررسی و مدل‌سازی طوفان شن در نرم افزار پرداخته شده و سپس مدل تراورس کوهان‌دار به جهت بررسی عملکرد در تجمیع ذرات شن در معرض طوفان شن قرار داده می‌شود. در این مدل‌سازی‌ها از نرم افزار STAR CCM+ به عنوان یک نرم افزار تحلیل سیالاتی استفاده شده است. این نرم افزار برخلاف نرم افزار Ansys Fluent، قابلیت ایجاد مدل و مش بندی مدل را نیز علاوه بر دریافت مدل مش بندی شده، داراست. در این نرم افزار در روش اوپلری، شرایط مرزی ورودی‌های جریان و ذرات به صورت جداگانه



شکل ۵ - شماتیک دو بعدی از شرایط مرزی حاکم بر مساله

جدول شرایط مدل در نرم افزار STAR CCM+ در «جدول ۱» قابل مشاهده است. تعداد سول‌های محاسباتی در حدود ۳۰۰ هزار سلول و گام زمانی ۰/۰۰۱ S در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- شرایط حلگر و مدل در نرم افزار STAR-CCM+

تنظیمات مدل	نوع مدل انتخابی
ابعاد	Three-Dimentional
روش حل	Implicit Unsteady
نوع جریان	Eulerian Multiphase Mixture (Gas-Paricle)
مدل دوفاز	Multiphase Segrated Flow
معادله حالت	Constant Density
رژیم جریان	Turbulent

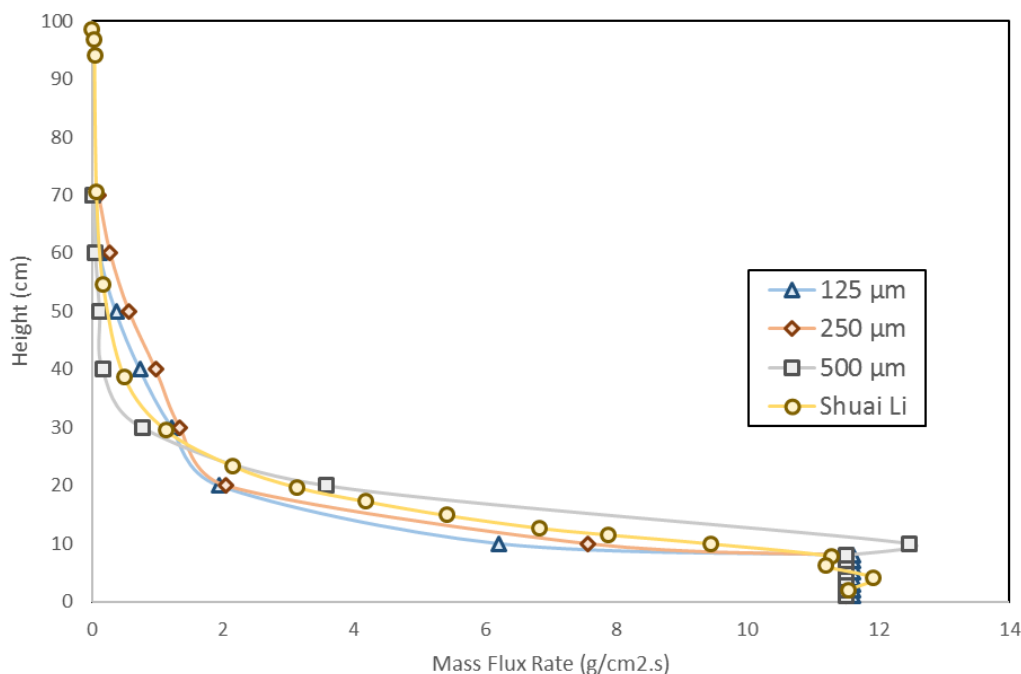


## ۱-۱-۳- صحت سنجی مدل طوفان شن

در این مقاله برای صحت سنجی از نتایج مقاله شوای لی در سال ۲۰۱۴ [۴] استفاده شده است. او نتایج تحقیقات میدانی خود در بیابان‌های کشور چین در زمینه جابجایی شن مورد بررسی قرار داده است. سرعت باد در این تحقیقات که با سنسورهای مخصوص اندازه‌گیری شده، در اعداد ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ متر بر ثانیه ثبت شده است.

البته برای مقایسه این مدل با مدل شوای لی، بایستی شرایط در ورودی با شرایط شوای لی کاملاً یکسان باشد لذا سرعت جریان باد در ورودی بر حسب ارتفاع یکنواخت و همگن فرض شده و برای این تحقیق با توجه به سرعت متوسط باد گزارش شده در بیابان‌های مورد

اندازه‌گیری مقاله شوای لی، برابر  $10 \text{ m/s}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه ذرات موجود در بیابان ابعاد متفاوتی دارند، لذا برای سه قطر متفاوت این مقایسه صورت گرفته است تا ثابت شود رفتار ذرات به اندازه آن‌ها وابسته نمی‌باشد. چگالی ذرات نیز برابر متوسط چگالی ذرات بیابان یعنی  $2650 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است. در خصوص نسبت والیوم فرکشن ورودی نیز کسر حجمی طوفان برابر  $0/4$  در نظر گرفته شد. تمامی نتایج در صفحه میانی مسیر در هندسه مدل «شکل ۵» به دست آمده است. نتایج این مقایسه در «شکل ۶» مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که رفتار ذرات انطباق خوبی با نمودار شوای لی دارد، پس به این ترتیب صحت کارایی مدل اثبات شده و لذا طوفان با این شرایط برای مدل اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۶- مقایسه نتایج به دست آمده در تحقیق پیش رو با مقاله شوای لی [۴]

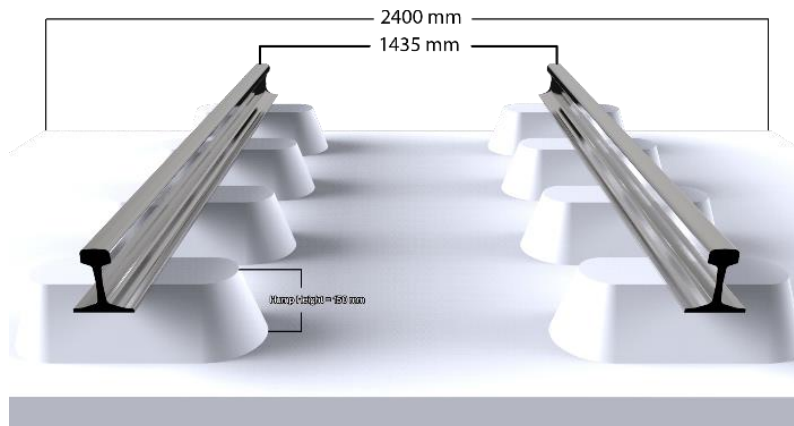
این مساله بر اساس پارامترهایی که در «شکل ۷-الف» مشخص شده، شبیه‌سازی شده است. در این مدل یک تکه از خط با  $4$  ردیف تراورس مدل شده است. همچنین

## ۲-۳- مدل تراورس کوهاندار

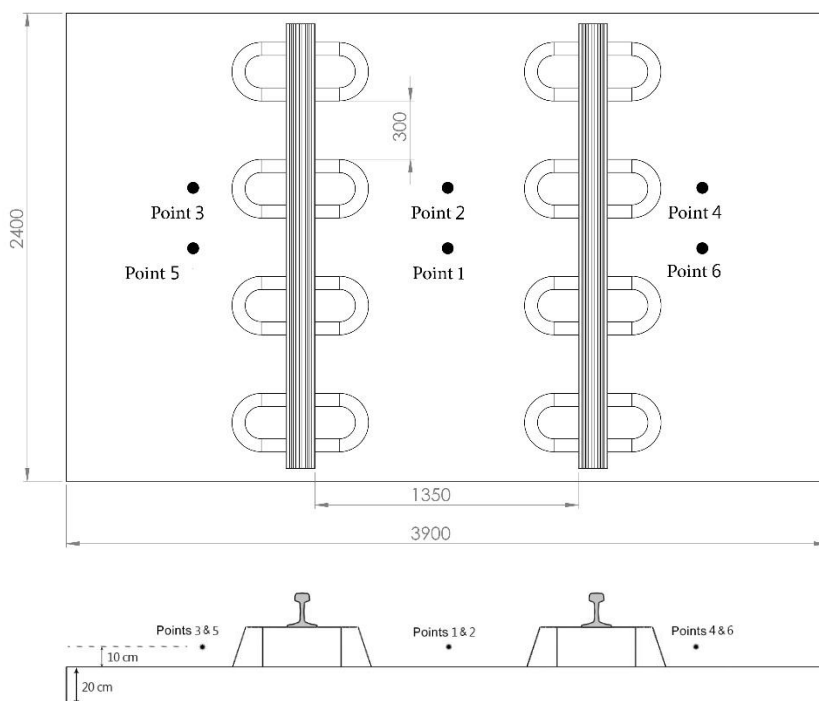
حال باید مدل اصلی یعنی تراورس کوهاندار در جریان طوفان شن مورد بررسی قرار گیرد. مدل‌های اولیه

این مدل به همراه نقاط داده‌برداری در «شکل ۷-ب» مشاهده می‌شود. این نقاط داده‌برداری در ادامه برای بررسی نرخ شن عبوری از این مناطق مورد استفاده قرار خواهد گرفت. اختلاف ارتفاع بین نقاط متوالی و بین پایین‌ترین نقطه تا کف ۱۰ cm می‌باشد.

ابعاد محیط در این مدل به این صورت می‌باشد: طول برابر ۳۹۰ سانتی‌متر، عرض برابر ۲۴۰ سانتی‌متر، ارتفاع برابر ۸۰ سانتی‌متر. فاصله میان دو ریل ۱۴۳۵ میلی‌متر و فاصله بین هر دو کوهان متوالی برابر ۶۰۰ میلی‌متر بر اساس استاندارد در نظر گرفته شده است. نمای دوبعدی



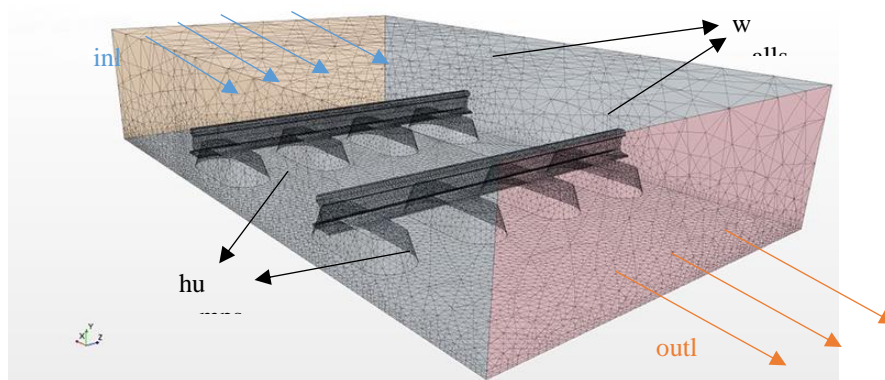
الف - مدل سه بعدی شبیه‌سازی شده از تراورس کوهان‌دار به همراه ابعاد



ب - نمای بالا و بغل از مدل دوبعدی به همراه نقاط داده‌برداری و ابعاد

شکل ۷- نمای سه بعدی و دوبعدی به همراه نقاط داده‌برداری بر حسب mm

نمایی از مدل مش بندی شده و شرایط ورودی در «شکل ۸» قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۸ - نمایی از مدل مش بندی شده در نرم افزار Ansys ICEM

نکرده است و از حدود ۱۰ متر بر ثانیه نیز کمتر نشده است. از آنجا که برای شار عبوری از بیابان در ارتفاع های زیر ۲۰cm اطلاعاتی بر حسب کسرحجمی شن موجود نمی باشد، لذا بر اساس اطلاعات فرض شده در بخش صحت سنجی، از دو کسرحجمی در ورودی استفاده می شود. بر این اساس، مطالعه پارامتریک در نظر گرفته شده در این مساله عبارت است از ترکیب ۴ حالت برای کسرحجمی ها، ۳ حالت برای سرعت جریان ورودی هوا و ذرات شن، ۳ حالت برای قطر ذرات شن و ۳ حالت برای ارتفاع کوهان ها. این ترکیب در «جدول ۳» مشاهده می شود.

بر اساس نتایج به دست آمده از نمونه برداری میدانی و غربال گری صورت گرفته در یک تحقیق دکترای دانشکده راه آهن دانشگاه علم و صنعت، طیف قطرهای شن در یکی از بیابان های شرق ایران در منطقه تل حمید، راه آهن ناحیه شرق کشور، از قطرهای ۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر می باشد. همچنین بر اساس تحقیقات حمیدیان پور در سال ۹۴ بر روی اقلیم سیستان و بلوچستان [۱۹]، نمودارهای میزان متوسط و یا میزان دقیق سرعت باد در این منطقه طی یک دوره ۱۰ ساله از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ در ساعات مختلف به دست آمده است. بر طبق این تحقیقات هیچ گاه سرعت باد از ۳۰ متر بر ثانیه تجاوز

جدول ۲ - دسته بندی شرایط اولیه مدل های شبیه سازی شده

پارامتر مورد مطالعه	پارامتر مشخصه مدل سازی	مقادیر متغیر پارامتر مشخصه	سایر پارامترهای مسئله
شدت طوفان	سرعت باد	$V_{wind} = 10m/s$	$VF=0.4$
		$V_{wind} = 20m/s$	قطر ذرات
		$V_{wind} = 30m/s$	ارتفاع کوهان ها
غلظت طوفان	کسرحجمی طوفان	$VF = 0.1$	$D = 500\mu m$
		$VF = 0.2$	سرعت باد
		$VF = 0.3$	$H=15cm$
ماهیت طوفان	قطر ذرات	$VF = 0.4$	$V_{wind} = 10m/s$
		$D = 125\mu m$	ارتفاع کوهان ها
		$D = 250\mu m$	کسرحجمی طوفان
ارتفاع کوهان ها	ارتفاع کوهان ها	$D = 500\mu m$	$V_{wind} = 10m/s$
		$H=10cm$	سرعت باد
		$H=15cm$	ارتفاع کوهان ها
		$H=20cm$	$VF=0.4$
			قطر ذرات
			سرعت باد

#### ۴- نتایج مدل تراورس کوهان‌دار

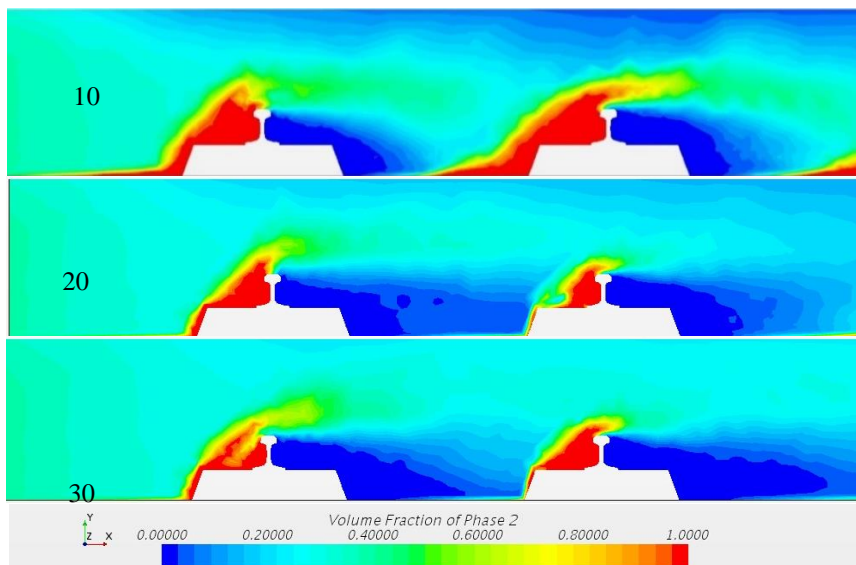
در بررسی پارامتریک عملکرد تراورس کوهان‌دار در طوفان شن، ۴ پارامتر اصلی وجود دارد که ۳ پارامتر مربوط به طوفان و یک پارامتر مربوط به تراورس می‌باشد. در این قسمت این چهار پارامتر به همراه مقایسه نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

##### ۴-۱- بررسی اثر شدت طوفان

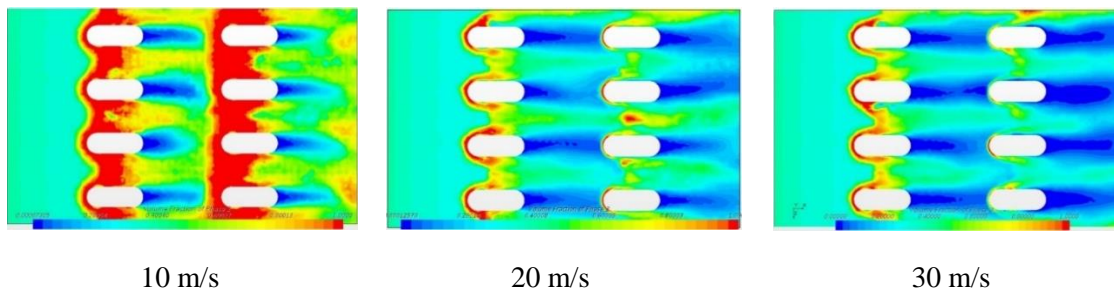
یکی از مهمترین مولفه‌های یک طوفان، شدت طوفان است و مهمترین پارامتر موثر در آن، سرعت جریان است. طوفان‌هایی با سرعت باد زیاد، تاثیرات کاملا متفاوتی نسبت به طوفان‌های با سرعت کم دارند. با توجه به نتایج به دست آمده، میزان تاثیر و روند تاثیر این پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این منظور، نتایج شبیه‌سازی برای

۳ سرعت جریان هوا برابر  $10\text{ m/s}$ ،  $20\text{ m/s}$  و  $30\text{ m/s}$  و سرعت ذرات شن برابر  $4\text{ m/s}$ ،  $8\text{ m/s}$  و  $12\text{ m/s}$  در شرایطی که نرخ کسرحجمی شن ورودی برای این مساله برابر  $0.4$  و قطر ذرات شن برابر  $500\text{ }\mu\text{m}$  و ارتفاع کوهان‌ها برابر  $15\text{ cm}$  است انجام می‌گیرد. این نتایج در «شکل‌های ۹ - ۱۱» مشاهده می‌شود.

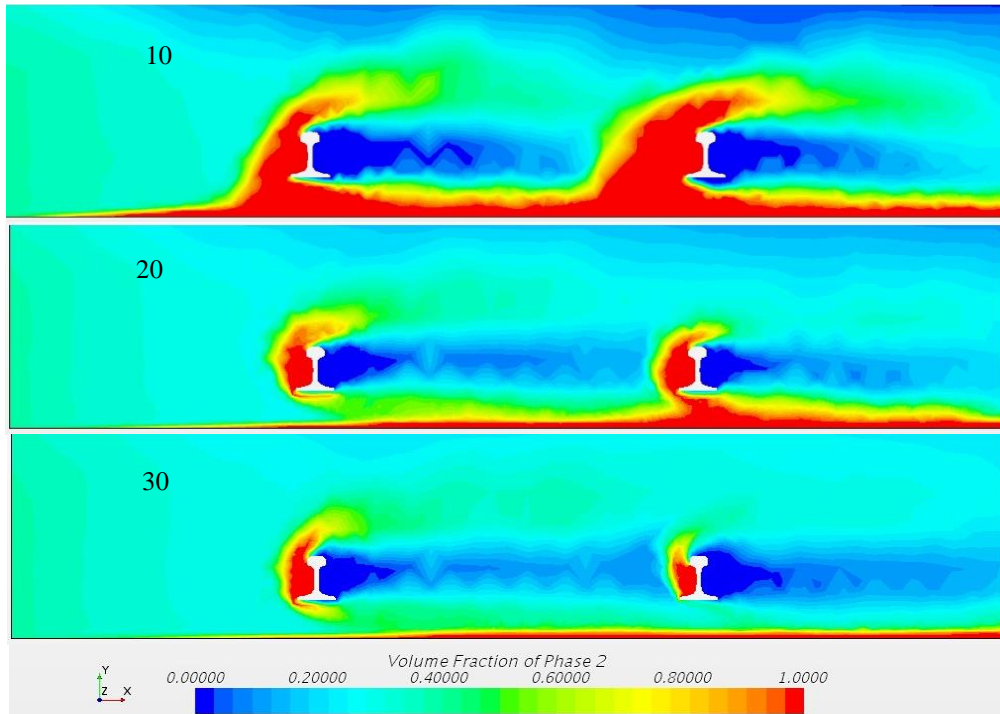
با توجه به نتایج، میزان شن نشست کرده در پشت کوهان‌ها با افزایش سرعت، کاهش یافته و نرخ عبور ذرات از میان کوهان‌ها و نرخ پرش ذرات از روی ریل و کوهان‌ها افزایش می‌یابد و عملا برای سرعت‌های بالای  $20\text{ m/s}$  نشست شن در مدل تراورس کوهان‌دار رخ نمی‌دهد. در «شکل ۱۲» تغییرات کسرحجمی شن در نقطه شماره ۱ برای سه سرعت جریان در ورودی مشاهده می‌شود.



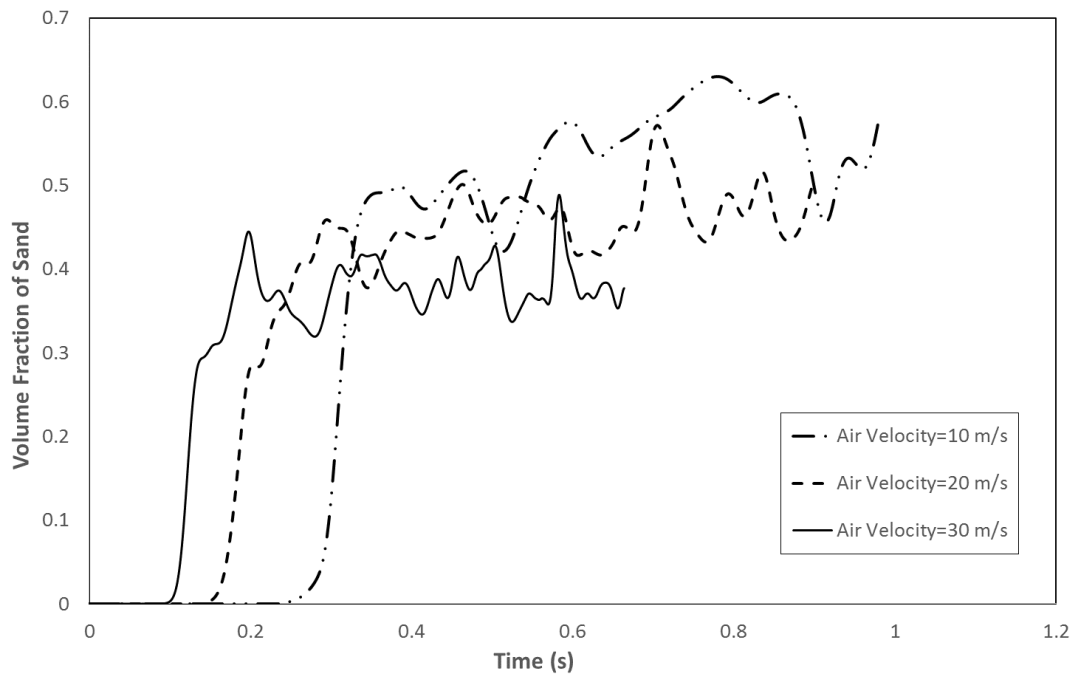
شکل ۹- نرخ کسرحجمی شن در مقطع عرض کوهان برای سه سرعت هوا



شکل ۱۰- نرخ کسرحجمی شن در مقطع طولی تراورس کوهان‌دار برای سه سرعت هوا



شکل ۱۱- نرخ کسر حجمی شن در مقطع عرضی بین کوهان‌ها برای سرعت هوا به ترتیب برابر  $10\text{ m/s}$ ،  $20\text{ m/s}$  و  $30\text{ m/s}$

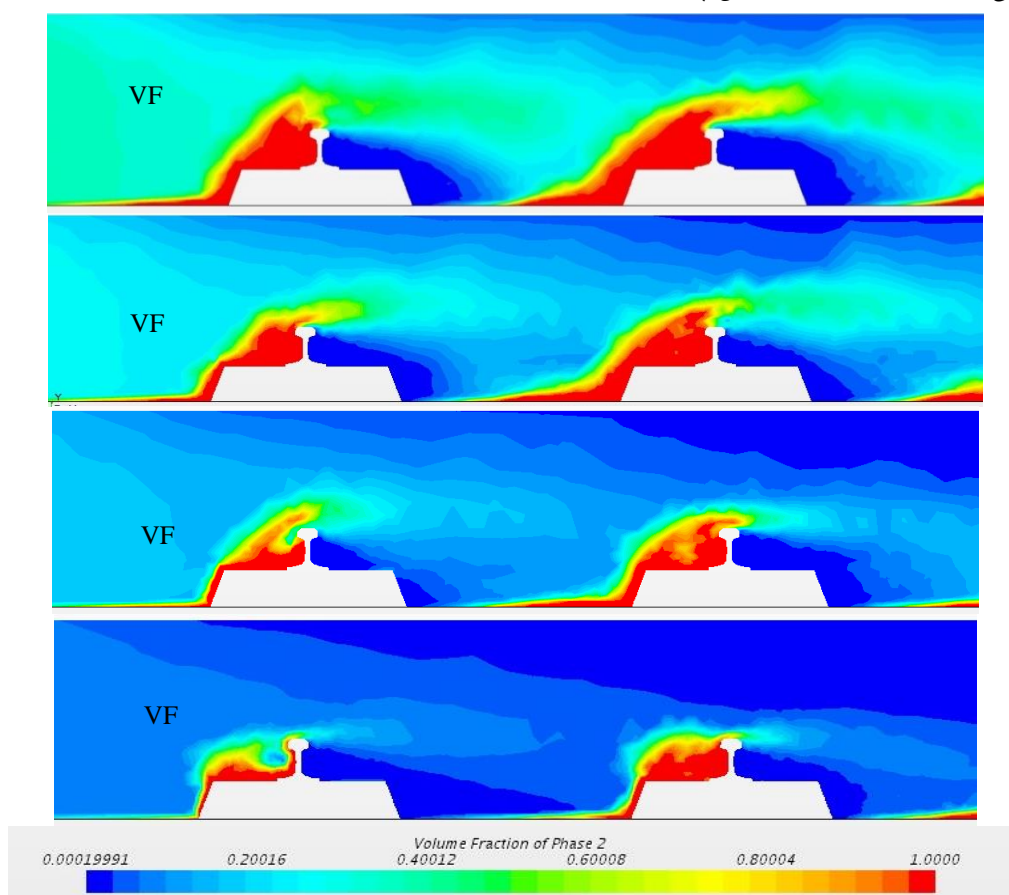


شکل ۱۲- تغییرات کسر حجمی در نقطه شماره ۱ برای سه سرعت

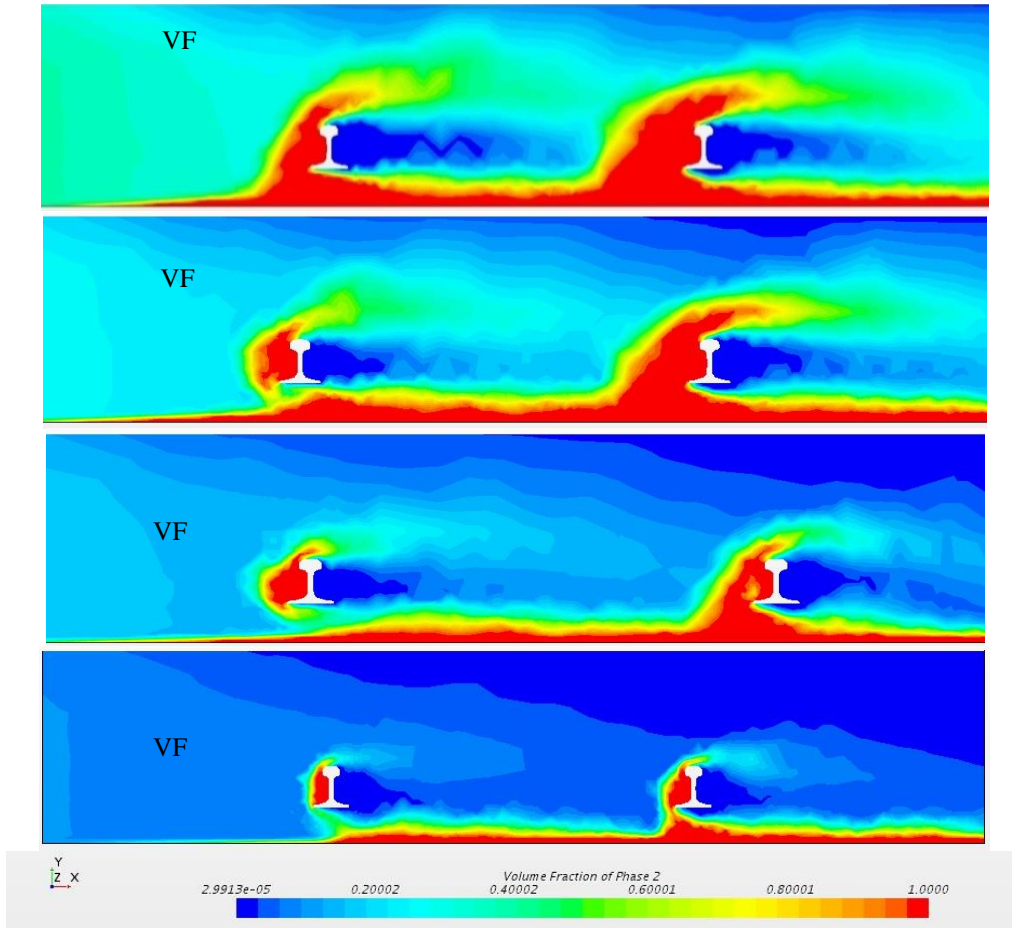
#### ۴-۲- بررسی اثر غلظت طوفان

یکی دیگر از مشخصه‌های یک طوفان، غلظت طوفان است که نشان دهنده تراکم ذرات شن در جریان باد می‌باشد. مهمترین پارامتر مدل ساز غلظت طوفان، نرخ کسرحجمی شن در جریان ورودی است. برای بررسی این مساله، از ۴ غلظت مختلف استفاده شده است. شرایط مرزی مشترک بین مدل‌ها به این صورت است: سرعت جریان هوای ورودی  $10\text{ m/s}$ ، سرعت ذرات شن برابر  $4\text{ m/s}$ ، قطر ذرات شن برابر  $500\text{ }\mu\text{m}$  و ارتفاع کوهان‌ها برابر  $15\text{ cm}$ . نرخ کسرحجمی‌های شن در ورودی برابر  $0/4$ ،  $0/3$ ،  $0/2$  و  $0/1$  است. نتایج این مدل‌سازی‌ها در «شکل‌های ۱۳ و ۱۴» مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج، با کاهش نرخ کسرحجمی ورودی، نشست ذرات شن پشت کوهان‌ها

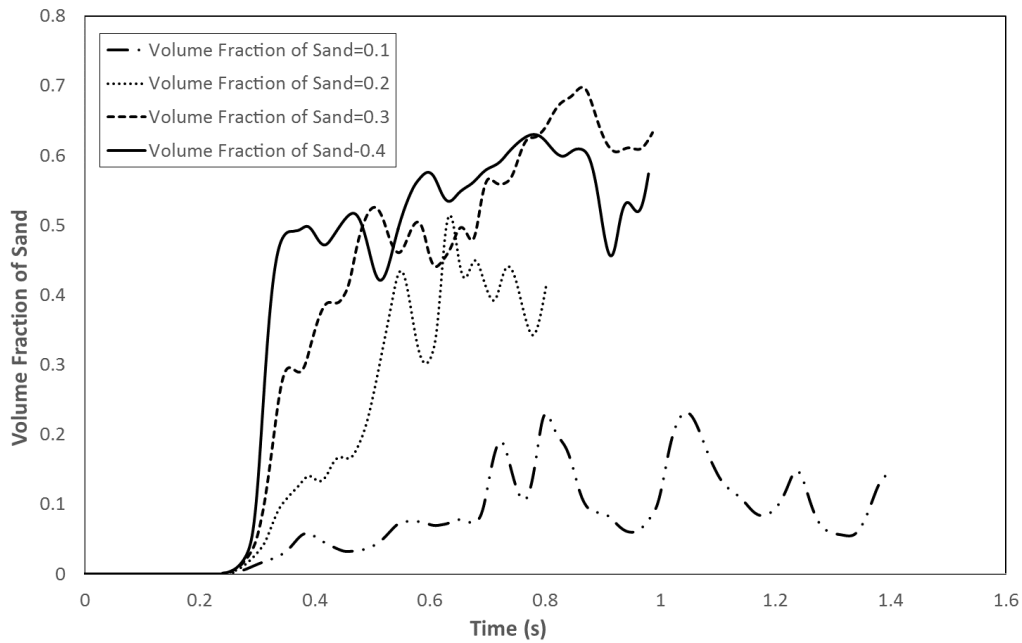
کاهش می‌یابد و ذرات کمتری از روی ریل و کوهان‌ها جهش داشته است، به طوری که برای شن با نرخ‌های کسرحجمی شن در ورودی کمتر از  $0/2$ ، نشست ذرات کاهش زیادی می‌یابد و عملاً نشست رخ نمی‌دهد. لذا با توجه به اینکه شدت و غلظت طوفان شن می‌تواند به هم مرتبط باشد، می‌توان گفت که تراورس کوهان‌دار در طوفان‌های با شدت بالا می‌تواند کارا باشد ولی برای طوفان‌های با غلظت بیش از  $0/2$  که در مناطق کویری ایران مثل بادهای شدید در ناحیه سیستان روی می‌دهد این مسئله کارایی خود را از دست داده و نیاز به تعمیر و نگهداری خط به طور کامل مرتفع نمی‌گردد. این مساله در میزان نرخ کسرحجمی ذرات شن در نقطه میانی ریل در بین دو کوهان همچنان که در «شکل ۱۵» نشان داده شده قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- نمودار کسرحجمی شن در مقطع عرض تراورس کوهان دار برای طوفان شن با غلظت های مختلف



شکل ۱۴- نمودار کسر حجمی شن در مقطع عرضی بین کوهان‌ها برای طوفان شن با غلظت‌های مختلف

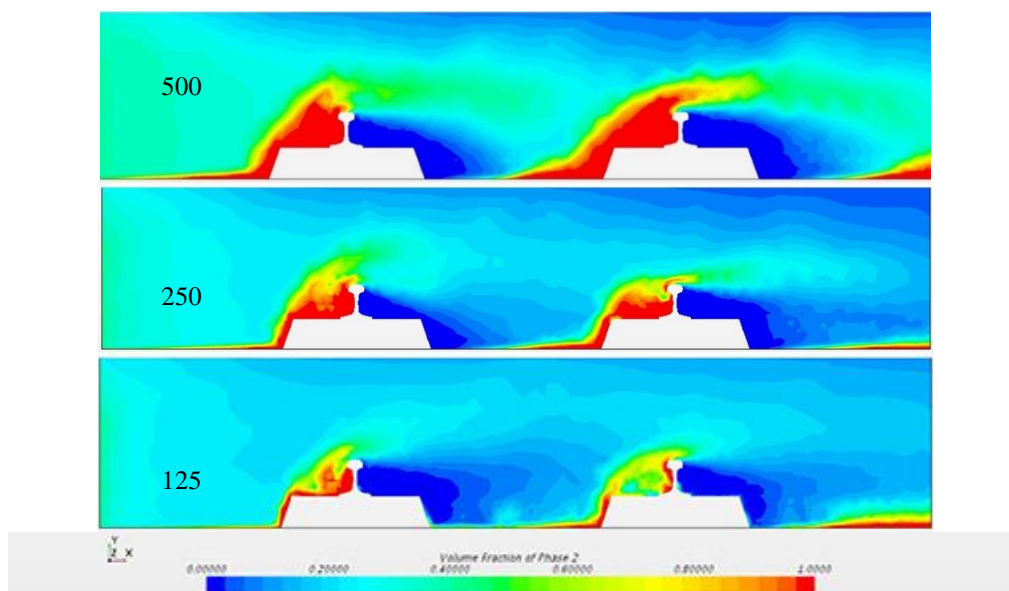


شکل ۱۵- تغییرات کسر حجمی در نقطه شماره ۱ برای ۴ کسر حجمی

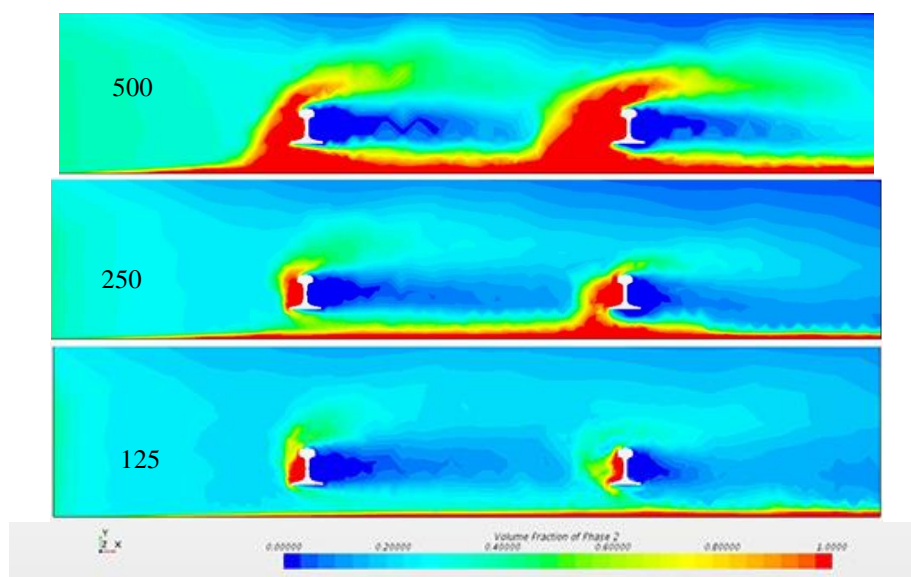
#### ۳-۴- بررسی اثر ماهیت طوفان

سومین مولفه مهم یک طوفان، ماهیت ذرات موجود در طوفان که بیانگر وجود طوفان در نواحی بیابانی مختلف که دارای ذرات شن گوناگون می‌باشد، است. پارامتر اصلی در این مساله، قطر ذرات شن موجود در آن طوفان می‌باشد. برای این منظور، سه مدل مختلف برای این مساله شبیه‌سازی شده است. این قطرها برابر  $500\ \mu\text{m}$ ،  $250\ \mu\text{m}$  و  $125\ \mu\text{m}$  می‌باشد. سایر شرایط مشترک

بین مدل‌ها: سرعت جریان هوا برابر  $10\ \text{m/s}$ ، سرعت ذرات شن برابر  $4\ \text{m/s}$ ، نرخ کسرحجمی شن در ورودی برابر  $0/4$ ، ارتفاع کوهان‌ها برابر  $15\ \text{cm}$ ، بر اساس نتایج، هر چه قطر ذرات کوچکتر می‌شود، میزان نشست شن در پشت کوهان‌ها کاهش می‌یابد، به طوری که برای شن در قطرهای کمتر از  $250\ \mu\text{m}$  عملاً نشست رخ نداده است. این نتایج در «شکل‌های ۱۶ و ۱۷» قابل مشاهده می‌باشد. همچنین تغییرات کسرحجمی شن در نقطه شماره ۱ برای ۳ قطر شن بر حسب زمان در «شکل ۱۸» مشاهده می‌شود.

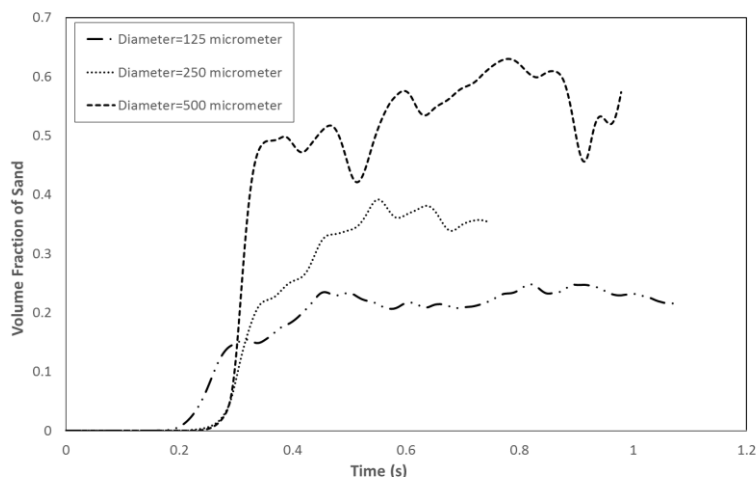


شکل ۱۶- نرخ کسرحجمی شن در مقطع عرض کوهان برای قطرهای شن به ترتیب برابر  $500\ \mu\text{m}$ ،  $250\ \mu\text{m}$  و  $125\ \mu\text{m}$



شکل ۱۷- نرخ کسرحجمی شن در مقطع بین عرض کوهان‌ها برای قطرهای شن به ترتیب برابر  $500\ \mu\text{m}$ ،  $250\ \mu\text{m}$  و  $125\ \mu\text{m}$



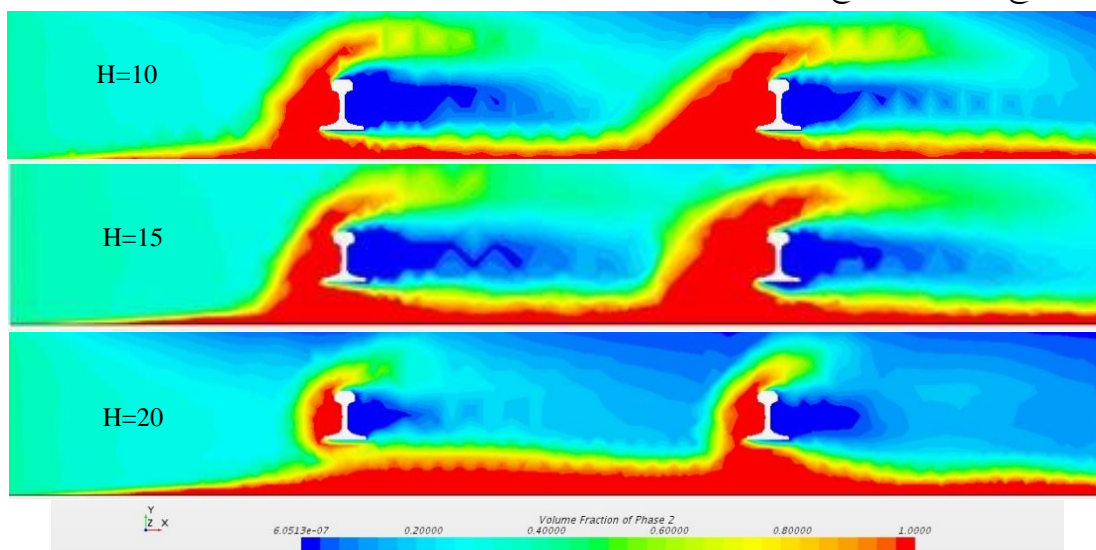


شکل ۱۸- تغییرات کسر حجمی در نقطه شماره ۱ برای ۳ قطر شن

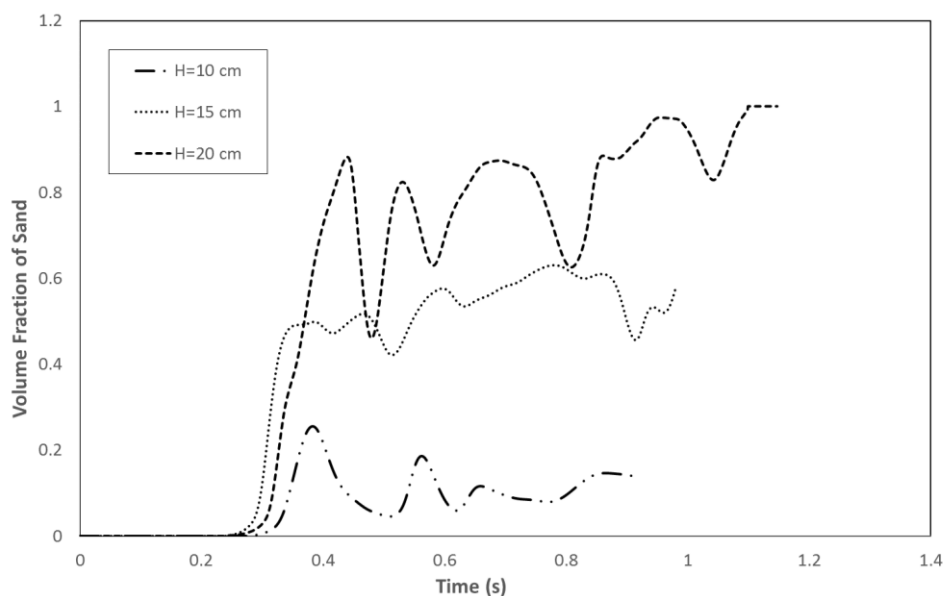
شدن فاصله هوایی زیر ریل، میزان شن نشست کرده پشت کوهان‌ها کاهش یافته و حجم بیشتر شن از فاصله بین دو کوهان جریان می‌یابد این مساله با دقت در میزان نرخ کسر حجمی در نقطه میانی ریل (نقطه ۱) در شکل های ۱۹ و ۲۰ به خوبی ملاحظه می‌گردد. البته باید این نکته را مد نظر قرار داد که افزایش ارتفاع کوهان وابسته به پارامترهای دیگری چون مقاومت در برابر ضربات قطار و سایر محاسبات ارتعاشی و دینامیکی و یا پارامترهای ایمنی می‌باشد و نمی‌توان ارتفاع را بیش از حد مشخصی افزایش داد.

#### ۴-۴- بررسی اثر ارتفاع کوهان

عامل مهم دیگر در عملکرد یک تراورس کوهاندار در طوفان شن که مربوط به هندسه تراورس می‌شود، ارتفاع کوهان‌ها است. برای این منظور نیز سه مدل با ارتفاع‌های کوهان به ترتیب برابر ۱۰cm، ۱۵cm و ۲۰cm شبیه‌سازی شده است. شرایط مشترک بین این مدل‌ها در ورودی از این قرار است: سرعت جریان هوا برابر ۱۰m/s، سرعت ذرات شن برابر ۴m/s، نرخ کسر حجمی شن برابر ۰/۴ و قطر ذرات برابر ۵۰۰μm. با توجه به نتایج، با افزایش ارتفاع کوهان‌ها به دلیل زیاد



شکل ۱۹- نرخ کسر حجمی شن در مقطع بین کوهان‌ها برای مدل‌های با ارتفاع کوهان‌ها به ترتیب برابر ۱۰cm، ۱۵cm و ۲۰cm



شکل ۲۰- تغییرات کسر حجمی در نقطه شماره ۱ برای ارتفاع کوهان

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا طوفان شن با دیدگاه اویلری مدل سازی و صحت نتایج آن بررسی شد. سپس با توجه به استانداردها، یک مدل از تراورس کوهاندار در نرم افزار STAR CCM+ شبیه سازی شد و در معرض طوفان شن مدل سازی شده در مرحله قبل قرار گرفت. سپس متغیرهای قطر ذرات شن، سرعت جریان ورودی، کسر حجمی ذرات در ورودی و ارتفاع کوهان‌ها به طور پارامتریک مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر آن‌ها مشخص شد. خلاصه نتایج بدست آمده بصورت زیر می باشد:

بسیار محسوسی در سرعت های مختلف باد افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر عملکرد تراورس کوهاندار در غلظت های بالای طوفان شن (با مشخصه کسر حجمی بزرگتر از ۰/۲) اطمینان بخش نمی باشد

- در مورد ماهیت طوفان شن در نواحی مختلف (با مشخصه قطر ذرات شن موجود) می توان گفت که بکار گیری تراورس کوهاندار برای نواحی کویری با قطر ذرات کمتر از  $250\mu\text{m}$  می تواند نشست ذرات شن را به طور محسوسی کاهش دهد.

در ادامه می توان گفت که موارد زیر به عنوان پیشنهادات ادامه کار می تواند مد نظر قرار گیرد:

- ایجاد مانع آیرودینامیک در کنار ریل‌ها به منظور تسهیل عبور ذرات شن
- بررسی طرح آیرودینامیکی کوهان در تراورس کوهان دار که منجر به هدایت بهتر جریان شن به بیرون از خط گردد

- برای سرعت‌های باد بالای  $20\text{m/s}$ ، استفاده از تراورس کوهاندار برای تمام قطرهای شن مورد بررسی می‌تواند به خوبی مانع تجمع شن روی خط گردد و لذا در طوفان های با شدت کم (با مشخصه سرعت باد زیر  $20\text{m/s}$ )، عملکرد تراورس کوهاندار اطمینان بخش نبوده و لذا نیاز به تعمیر و نگهداری خط مرتفع نمی شود.
- در تراورس کوهاندار برای نرخ کسر حجمی شن طوفان ورودی بالای ۰/۲ نشست شن به طور

1. Khosroshahi, M., *Iranian desert territory from the viewpoint of research*. 2016: p. 30-36.
2. Riessberger, K., *HEAVY HAUL IN SAND ENVIRONMENT*. IHHA 2015 Conference, 2015.
3. Dong, Z., et al., A wind tunnel investigation of the influences of fetch length on the flux profile of a sand cloud blowing over a gravel surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004. **29**(13): p. 1613-1626.
4. Li, G.S., et al., The sand-deposition impact of artificial gravel beds on the protection of the Mogao Grottoes. *Scientific reports*, 2014. **4**: p. 4341.
5. Cheng, J.-j. and C.-x. Xue, The sand-damage-prevention engineering system for the railway in the desert region of the Qinghai-Tibet plateau. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014. **125**: p. 30-37.
6. Cheng, J.-j., et al., Characteristics of the disastrous wind-sand environment along railways in the Gobi area of Xinjiang, China. *Atmospheric Environment*, 2015. **102**: p. 344-354.
7. Martin, R.L., et al., High-frequency measurements of aeolian saltation flux: Field-based methodology and applications. *Aeolian Research*, 2018. **30**: p. 97-114.
8. Lin, Z., et al., Advances in disaster modeling, simulation and visualization for sandstorm risk management in North China. *Remote Sensing*, 2012. **4**(5): p. 1337-1354.
9. Luo, K., et al., *CFD simulations of flow and dust dispersion in a realistic urban area*. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2016. **10**(1): p. 228-242.
10. Stovern, M., et al., Simulation of windblown dust transport from a mine tailings impoundment using a computational fluid dynamics model. *Aeolian research*, 2014. **14**: p. 75-83.
11. Novak, L., et al., *Numerical Modeling of Dust Lifting from a Complex-Geometry Industrial Stockpile*. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 2015. **61**(11).
12. Wong, C., et al. CFD simulations and experimental validation of sand erosion on a cylindrical rod in wet gas conditions. in *Offshore Technology Conference-Asia*. 2014. Offshore Technology Conference.
13. Mazumder, Q.H., *S-bend erosion in particulated multiphase flow with air and sand*. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2016. **8**(3): p. 157-166.
14. Kang, L. and L. Guo, *Eulerian-Lagrangian simulation of aeolian sand transport*. *Powder technology*, 2006. **162**(2): p. 111-120.
15. Kang, L. and D. Liu, Numerical investigation of particle velocity distributions in aeolian sand transport. *Geomorphology*, 2010. **115**(1-2): p. 156-171.
16. Mirabdollah Lavasani, A., P. Razi, and R. Mehdipour, *Numerical Solution of Fence Performance for Reduction of Sand Deposition on Railway Tracks*. 2016.
17. Zakeri, J.A.E., M.; Fathali, M., *Introducing New Humped Slab Track Superstructure for Obviating the Problems of*. *Modares Civil Engineering Journal*, 2010.
18. Fathi, J.A.Z.A., *Analysis the Influence of Different Forms of Geometric Humps on Sand Track Crossing the Desert Using the Fluent Simulation Software*. *Journal of Transportation Reseach*, 2017.
19. Salighe, M.H.P.A.M.M., *Analysis of the nature and structure of Sistan wind*. *Iranian journal of geophysics*, 2016.

