ارزیابی هندسه بهینه دال‌خط کوهان‌دار در راه‌آهن‌های کویری با رویکرد شبیه سازی دو فازی جامد-گاز

مقاله علمی - پژوهشی

مسعود فتحعلی*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
محمد محسن کبیری نصرآباد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
فریدون مقدس نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.fathali@bhrc.ac.ir
دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶
صفحه ۱۴-۱

چکیده

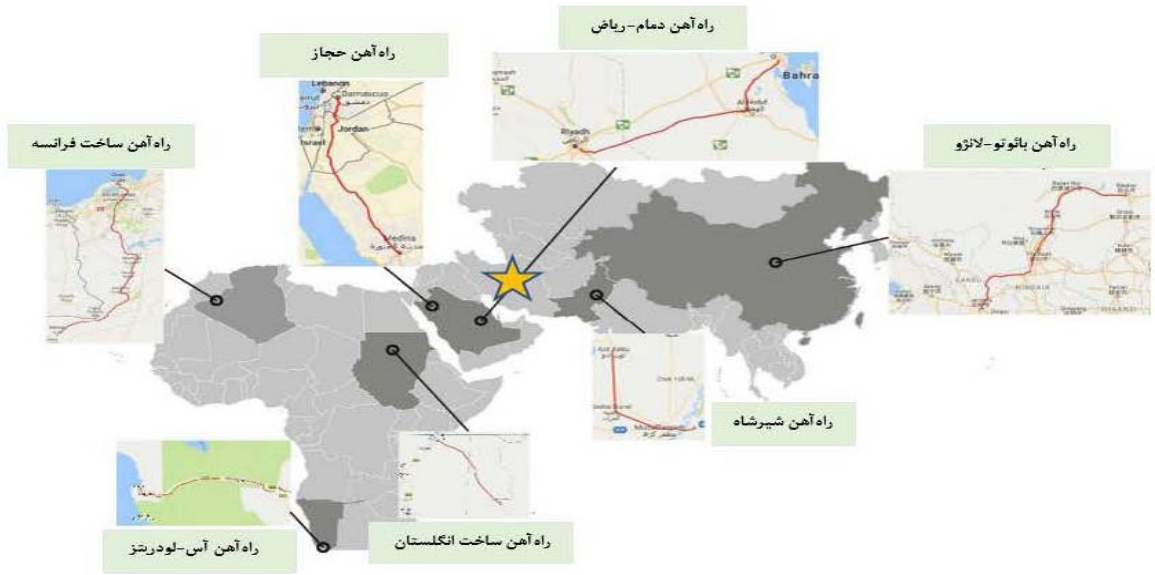
از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر توسعه شبکه حمل و نقل ریلی، عبور از مناطق کویری و ماسه‌گیر است. راه‌آهن های کویری در عین حال باعث افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیر، کاهش سرعت و مسدود شدن خط در حین بهره‌برداری و حتی خروج قطار از خط می‌شوند. تاکنون راهکارهای مختلفی برای مقابله با ماسه‌های روان در راه‌آهن‌های کویری ارایه شده است. یکی از روش‌های نوین توسعه داده شده، روسازی دال‌خط کوهاندار است که با حذف بالاست از خط ریلی و نیز ارتفاع‌دهی به ریل توسط پایه‌های بتنی موسوم به کوهان و در نتیجه ایجاد کانال‌های عبوری ماسه از زیر ریل، در پی کنترل و عبور حجم ماسه‌های ورودی از خط‌آهن است. هندسه کوهان باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر شرایط آیرودینامیکی مطلوب، حداکثر فضای خالی جهت عبور ماسه را فراهم کند. در این تحقیق با هدف بهینه‌سازی هندسه کوهان در این روسازی، مقاطع هندسی مختلف برای کوهان بررسی و سپس دو مقطع اصلی شامل بیضی و مستطیل-نیم دایره با دو ارتفاع مختلف ارزیابی شده است. شبیه‌سازی‌ها در بستر دینامیک سیالات محاسباتی و در نرم افزار انسیس فلوئنت پیگیری شده است، جریان دو فازی جامد-گاز شامل یک سیل ماسه با ابعاد محدود و جریان باد از مدل‌ها عبور داده شده و میزان کسرحجمی ماسه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقطع هندسی مستطیل-نیم دایره با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر نتایج مطلوب‌تری را در برابر هجوم ماسه‌های روان نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن‌کویری، ماسه‌روان، دال خط کوهاندار، جریان دوفازی، کسرحجمی

۱- مقدمه

برای تکمیل و بهبود شبکه ریلی جهان، عبور از مناطق بیابانی امری اجتناب‌ناپذیر است. موضوعی که با توجه به وضعیت بادهای حاکم بر منطقه و پتانسیل برداشت ماسه‌های روان، می تواند مشکلات عمده‌ای را به همراه داشته باشد (فتحعلی، ۱۳۸۷). راه آهن ایران نیز به ویژه با عبور از استان‌های واقع شده در بیابانهای شرقی، جنوب شرقی و مرکزی کشور در کنار سایر راه آهن‌های جهان نظیر آفریقای جنوبی، چین، هند و عربستان، درگیر معضل اساسی ماسه‌های روان در مناطق کویری است که همه ساله خسارات هنگفتی را موجب می‌شود (امرالهی، ۱۴۰۰). به طوری که اصلی‌ترین محورهای کویری راه آهن ایران در نواحی ریلی شرق و کرمان قرار دارند و در مجموع طول خطوط کویری راه آهن ایران ۶۰۲ کیلومتر (معادل ۵٫۸ درصد از کل شبکه ریلی) برآورد می‌شود (امرالهی، ۱۴۰۰). شکل (۱) نمایی کلی از مهمترین

راه آهن‌های کویری در جهان را نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که کشورهای چین، پاکستان، عربستان، الجزیره، سودان و نامیبیا مهمترین کشورهای درگیر معضلات راه آهن‌های کویری هستند (یرونو و همکاران، ۲۰۱۸؛ هاروات، ۲۰۲۲). همچنین مهمترین محورهای راه آهن کویری ایران با تاکید بر مناطق ریلی شرق (طبس و جندق) و کرمان (بافق و شورگز) در شکل (۲) نشان داده شده است.



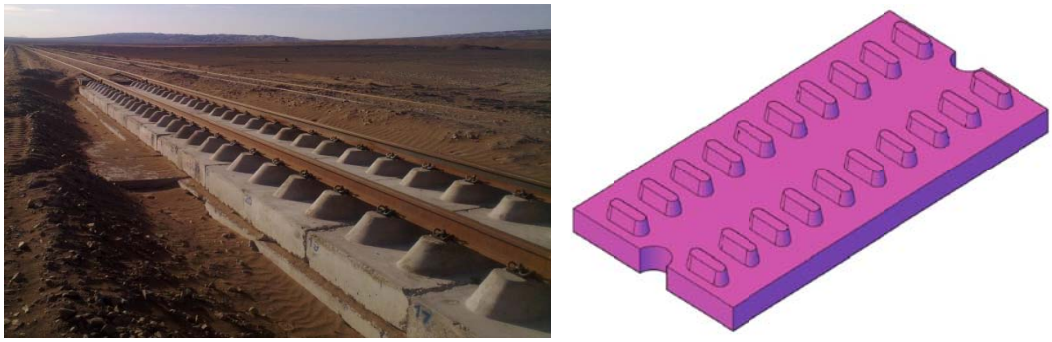
شکل ۱. نمایی از مهمترین راه آهن‌های کویری در جهان

شکل ۲. مهمترین مناطق راه آهن‌های کویری ایران

مهمترین خسارات ایجاد شده در راه آهن‌های کویری ناشی از حرکت و نیز آثار نامطلوب زوال ماسه‌های روان است که موجب هزینه‌های بالای نگهداری و تعمیر زیرساخت‌های ریلی و مشکلات مختلف در بخش‌های روسازی، ناوگان، ابنیه فنی، علائم و ارتباطات، بهره برداری و ایمنی می‌شود. برای مثال ماسه‌های روان منجر به صلبیت روسازی در اثر نفوذ در مصالح درشت دانه سنگی بالاست شده و بنابراین تشدید نیروهای دینامیکی عبوری و به تبع آن زوال سریع‌تر اجزاء را در پی دارد. همچنین حرکت ماسه‌های روان می‌تواند باعث پرشدگی و در نتیجه مسدودی روسازی شود

و کاهش سرعت سیر قطارهای عبوری و حتی خروج از خط قطارها در اثر مسدودی خط را نتیجه دهد. مواردی از قبیل سایش ریل و فرسودگی تراورس‌ها و ادوات اتصال، بهم خوردن مرزبندی لایه‌های روسازی و زیرسازی، سایش و بریدگی چرخ، داغی محور، آسیب به تجهیزات علائم و ارتباطات و سلب آسایش و رفاه مسافرین را می‌توان به موارد قبلی اشاره شده اضافه کرد (رافائل و برونو، ۲۰۲۰ ؛ راهداری و همکاران، ۲۰۲۱). برای مثال در سال ۱۴۰۱ قطار مشهد–یزد در حوالی طبس که منطقه ای بیابانی و ماسه گیر است شاهد خروج از خط بود که تلفات بسیار بالای جانی و مالی در بر داشت. برای کاهش اثرات نامطلوب ماسه‌های روان در مناطق کویری، روش‌هایی مختلفی پیشنهاد شده است که در چهار طبقه اصلی روش‌های تثبیت زیستی مانند کاشت گیاهان متناسب با شرایط منطقه، تثبیت فیزیکی مانند حفر خندق و احداث دیوار، تثبیت شیمیایی مانند مالچ پاشی و در نهایت روش‌های نوین مانند بهره‌گیری از کانال‌های عبوری در زیر خاکریز یا احداث دال خط کوهاندار اشاره کرد (فتحعلی، ۱۳۸۷ ؛ ذاکری و همکاران، ۲۰۱۰ ؛ ذاکری و همکاران، ۲۰۱۱).

در عین حال مطابق تحقیقات گذشته اثبات شده است که بهره گیری از سیستم روسازی دال خط کوهاندار اثربخشی بسیار خوبی را برای رفع معضل راه آهن‌های کویری تا سطوح بالایی دارد. چرا که در این روش نوع روسازی از بالاستی به بدون بالاست تغییر می‌کند و عملاً معضل صلبیت لایه بالاست حذف می‌شود. همچنین با ایجاد ارتفاع به ریل‌ها توسط تکیه‌گاه‌های بتنی منقطع موسوم به کوهان، تراز ریل‌ها بالا آمده و بنابراین جریان ماسه می تواند آزادانه از کانال های عبوری ایجاد شده در زیر ریل و بین کوهان‌ها حرکت کند. بنابراین مسدودی خط و انباشت غیر ایمن ماسه در روسازی از بین می رود (فتحعلی، ۱۳۸۷). دال خط کوهاندار برای نخستین بار در سال ۱۳۸۷ توسط فتحعلی طی یک پژوهش دانشگاهی در ایران مطرح شد. در این طرح، کوهان‌هایی با مقاطع مستطیل–نیم دایره در بستر دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شد. سپس با مبنا قرار دادن کسر حجمی ۰/۷۵ نسبت به سطح ریل به عنوان کسر حجمی قابل قبول، سه سیل ماسه با ارتفاع‌های ۸، ۹ و ۱۱ سانتی متر به عنوان ورودی انتخاب شد. نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم طراحی شده پاسخگوی سیل بالای ماسه با ارتفاع ۸ سانتی متر است که اثباتی بر قابلیت عبور ماسه در بحرانی ترین شرایط بود (فتحعلی، ۱۳۸۷ ؛ ذاکری و همکاران، ۲۰۱۱). شکل (۳) طرح سه بعدی این روسازی و نیز تصاویری از نمونه اجرا شده آن را در محور راه‌آهن کرمان (موقعیت ایستگاه نمکزار) نمایش می‌دهد.



شکل ۳. طرح سه بعدی روسازی دال خط کوهاندار و نمونه‌ای از روسازی اجرا شده در ایستگاه نمکزار

پس از معرفی این روسازی نوین، پژوهش‌های محدودی در زمینه بررسی پارامترهای موثر در رفتار دال خط کوهاندار صورت گرفت. برای مثال ذاکری و فتحی (۱۳۹۶) فرم‌های مختلفی از جمله دایره و مستطیل–نیم دایره را برای کوهان‌ها در نرم افزار انسیس فلوئنت در نظر گرفتند و فرم دایره‌ای مخروطی به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر را به عنوان کاراترین فرم کوهان پیشنهاد دادند. یکی از نتایج خلاف پیش بینی این تحقیق آن است که افزایش ارتفاع کوهان لزوماً باعث افزایش دبی ماسه عبوری در بازه زمانی تحلیل نشده است، موضوعی که دقت نتایج تحلیل را زیر سوال می برد. لازم به ذکر است که در تحقیق انجام گرفته، اعتبارسنجی مدل توسعه یافته ارایه نشده و نتایج تحلیل در زمان‌های بسیار کوتاه اولیه ناشی از برخورد مورد مقایسه قرار گرفته است که می‌تواند بر دقت نتایج اثر قابل توجهی داشته باشد. ملکانه و طلایی (۱۳۹۸)

نیز عملکرد تراورس کوهاندار را به صورت سه بعدی در نرم افزار استار- سی سی ام به صورت مدل دوفازی (گاز-جامد) و با فرض جریان توربالانسی شبیه سازی کردند. در این تحقیق اثرات شدت و غلظت طوفان، قطر ذرات و ارتفاع کوهان‌ها به خوبی مورد بحث قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع کوهان تاثیر قابل ملاحظه ای در تسهیل عبور ماسه‌های روان از مقطع خط دارد و بر این اساس ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر برای کوهان پیشنهاد شده است. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی طرح هندسه کوهان‌ها به صورت موثر و کامل انجام نپذیرفته و نتایج به دست آمده دارای برخی ابهامات است. بر این اساس، تحقیق پیش رو با هدف ارزیابی هندسه کوهان متناسب با کلیه الزامات و ملاحظات فنی و اجرایی حاکم انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، در گام نخست هندسه متصور برای کوهان‌ها پیشنهاد و در نهایت دو مقطع اصلی به منظور تحلیل‌های تکمیلی انتخاب شده است. سپس شبیه سازی عددی در بستر دینامیک سیالات محاسباتی با لحاظ مقاطع منتخب (مقاطع بیضوی و مستطیل-نیم‌دایره در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر) مدلسازی شده است. در این مدلسازی‌ها، امکان عبور یک سیل ماسه از روی روسازی دال خط کوهاندار توسط پروفیل اعمالی باد ارایه شده است. ارایه نتایج تحلیل و تفسیر نتایج به دست آمده در گام‌های بعدی پیگیری شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مقاطع هندسی اولیه پیشنهادی برای کوهان

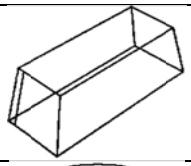
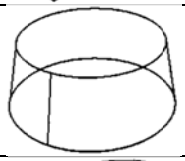
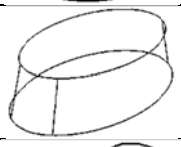
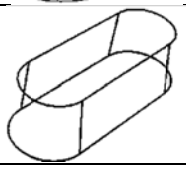
اب اولیه هندسه کوهان باید بر اساس ملاحظات مختلف فنی و اجرایی در نظر گرفته شود. مهمترین این ملاحظات در جدول (۱) جمع‌بندی شده است. بر اساس این ملاحظات، انواع مقاطع هندسی قابل استفاده در روسازی دال خط کوهاندار مطابق جدول (۲) مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که ملاحظه مربوط به عملکرد و ایمنی سیر ناوگان در اصل محدود کننده ارتفاع کوهان ناشی از ارتفاع چرخ‌های قطار به گونه‌ای است که در اثر خروج از خط، چرخ بر روی دال افتاده و به دلیل ارتفاع زیاد، پدیده چرخش و واژگونی چرخ که تبعات و خسارات سنگین‌تری را به دنبال دارد، حادث نشود. از این رو مطابق مراجع قبلی، حداکثر ارتفاع پیشنهادی برای کوهان معادل ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است که در اینجا نیز رعایت می‌شود. موضوع دیگری که مطابق جدول (۲) باید به آن اشاره شود، آن است که مقطع دایره‌ای به صورت توامان نمی‌تواند هم الزام نصب پابند و هم الزام شرایط آیرودینامیکی را تامین کند. چرا که با توجه به عرض مورد نیاز برای ادوات اتصال، حداقل عرض ۳۰ سانتیمتر برای نصب این ادوات مورد نیاز خواهد بود (پاندرول، ۲۰۲۲ ؛ وسلو، ۲۰۲۲) و بر این اساس قطر دایره کوهان بزرگ می‌شود. این موضوع موجب می‌شود که فاصله بین کوهان‌ها بسیار کم شده و عملاً عرض کانال عبوری ماسه بسیار کوچک می‌شود. از این رو در انتخاب اولیه این مقطع هندسی نیز کنار گذاشته شده است.

بر اساس مقایسه صورت گرفته دو مقطع هندسی بیضوی و مستطیل-نیم دایره شرایط تامین کلیه الزامات حاکم را دارا می‌باشند و بنابراین، با لحاظ دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در بخش بعدی تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱. الزامات و ملاحظات حاکم بر هندسه کوهان در روسازی دال خط کوهاندار

ردیف	الزامات و ملاحظات	توضیحات
۱	سازه‌ای	تامین شرایط باربری کوهان تحت تاثیر بارهای دینامیکی عبوری قطار
۲	سهولت تولید قطعات پیش ساخته	شامل ملاحظات قالب‌بندی و اجرای شیب‌ها، قوس‌ها، خم‌های آرماتورهای داخلی و ...
۳	جانمایی مناسب ادوات اتصال ریل به دال	شامل رعایت حداقل ابعاد برای پدهای ارتجاعی زیر ریل و فنرهای اتصال ریل به تراورس
٤	عملکردی و ایمنی سیر ناوگان	شامل تامین شرایط مورد نیاز برای قرارگیری در خط آهن نظیر ارتفاع تمام شده خط پروژه، ملاحظات قوس‌های افقی مسیر، پیش بینی شرایط خروج از خط چرخ از ریل (با نگاه به ارتفاع و شیب‌های کوهان)
٥	عملکرد مناسب آیرودینامیکی	تامین شرایط آیرودینامیکی مناسب برای حرکت و عبور ماسه‌های روان از مقطع خط نظیر عدم وجود مرزهای تیزگوشه به منظور عبور بهتر ماسه‌های روان

جدول ۲. مقایسه مقاطع مختلف هندسی کوهان و ارزیابی اولیه تامین ملاحظات و الزامات حاکم

هندسه	نمای سه بعدی کوهان	تامین ملاحظات و الزامات				
		سازه‌ای	سهولت تولید	جانمایی مناسب ادوات اتصال	عملکردی و ایمنی (لحاظ ارتفاع حداکثر ۲۰ سانتیمتر)	عملکرد مناسب آیرودینامیکی
هرم ناقص		√	×	√	√	×
مخروط ناقص با مقطع دایره		√	√	×	√	×
مخروط ناقص با مقطع بیضی		√	√	√	√	√
مخروط ناقص با مقطع مستطیل-نیم‌دایره		√	√	√	√	√

۲-۲- انتخاب مدل و فرضیات شبیه سازی

گسترش و بهبود کامپیوترهای سریع تاثیر بسزایی در نحوه بکارگیری قوانین مکانیک سیالات برای طراحی و حل مسائل مهندسی گذارده است. در روش دینامیک سیالات محاسباتی، معادلاتی که اغلب به شکل مشتقات جزئی می‌باشند به صورت عددی حل می‌شوند. برای حل یک مساله دینامیک سیالاتی سه راه حل وجود دارد که عبارتند از: روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی. در این تحقیق از روش عددی جهت شبیه سازی رفتار دال خط کوهاندار در برابر ماسه‌های روان برپایه ی حل معادلات دینامیک سیالاتی در نرم افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. فازهای جریان در شبیه سازی این تحقیق، شامل ماسه و هوا (جریان دو فاز) است. برای مدلسازی از روش اولر-اولر و درنهایت اویلرین استفاده شده است. در روش اولر- اولر فازهای مختلف شرکت کننده در مدلسازی از لحاظ ریاضی به صورت نفوذ کننده در یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که در این نوع از مدلسازی حجم یک فاز توسط فاز دیگر اشغال نمی‌شود، مفهوم کسر حجم فازی در آن تعریف می‌شود. در عمل فرض می‌شود که این کسر حجمی تابعی از زمان و مکان بوده و مجموع آن‌ها برابر یک می‌باشد. قبل از تحلیل سیالاتی مد نظر در نرم افزار فلوئنت لازم است در محدوده تحلیل شرایط مرزی تعریف شده و مدل هندسی مش‌بندی شود.

برای این منظور از بین نرم‌افزارهای دارای قابلیت ذکر شده، آی سی ام سی اف دی به دلیل کاربری نسبتا ساده انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در جریان مدلسازی اولیه، طولی معادل ۹ کوهان به فاصله ٦٠ سانتیمتر (در مجموع ٥/٤ متر) در نظر گرفته شد، تا تاثیر شرایط مرزی بر نتایج تحلیل مشخص شود. نتایج نشان داد که شرایط مرزی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در ۱۰ سانتیمتر اول داشته و در بقیه موقعیت‌ها زیر ۳ درصد تاثیر دارد.

بنابراین، به منظور کاهش حجم و سرعت تحلیل‌های مورد نیاز، ۳ کوهان در نظر گرفته شد و نتایج مربوط به کوهان میانی به عنوان خروجی‌های تحلیل در نظر گرفته شد. شکل (٤) نمونه‌ای از مدل مش بندی شده را نشان می‌دهد.

شکل ٤. نمونه‌مش بندی دال خط کوهاندار در نرم افزار آی‌سی‌ام سی‌اف‌دی

فرضیات مدلسازی تا حد امکان مطابق با واقعیت منطقه شوره گز به عنوان منطقه طرح بحرانی در راه‌آهن کویری کشور در نظر گرفته شد (طویلی، ۲۰۱۵). با توجه به اطلاعات موجود متوسط سالیانه بیشترین سرعت باد در منطقه ۲۵ متر بر ثانیه است. همچنین اندازه ذرات با حساسیت بسیار بالا نسبت به باد بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرومتر (µm) است که در مدلسازی به طور متوسط ۱۲۵ میکرومتر (µm) تعریف شد. به منظور ایجاد شرایط بسیار بحرانی جهت بررسی کیفیت عبور ماسه‌های روان از بین کوهان‌ها، یک سیل ماسه به ارتفاع ۰/۲ متر و طول و عرض ۲/۵ و ۱/۸ متر با ویسکوزیته ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر مترثانیه و چگالی ۲۷۲٤ کیلوگرم بر متر مکعب مطابق ماسه ایران در نظر گرفته شد. همچنین شتاب گرانش ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه به فازها اعمال شد. از دیگر مشخصاتی که در مدلسازی‌های دوفازی از اهمیت بالایی برخوردار است، تعیین مدل آشفتگی برای حل معادلات می‌باشد. به طور کلی دو دسته جریان آرام و آشفته وجود دارد. جریان آرام جریانی است که در آن سیال به طریقی منظم و تحت لایه‌ها و مسیرهای مشخص حرکت می‌کند. در نقطه مقابل آن، جریان آشفته، جریانی است که رفتاری بسیار اتفاقی و بی‌قاعده دارد. در یک جریان آشفته اندازه سرعت در هر نقطه دائماً تحت نوسانات و تغییرات، هم در اندازه و هم در راستای حرکتی قرار می‌گیرد. جهت بیان آشفتگی و بیان آن به صورت ریاضی مدل‌های مختلفی ارایه شده است. یکی از مدل‌های بیان شده در این رابطه مدل آشفتگی کا-اپسیلن است. این مدل به دلیل سادگی در پیاده‌سازی و توانایی در حل گستره وسیعی از مسائل، به عنوان پرکاربردترین مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از مهمترین فرضیات مدلسازی در جدول (۳) ارایه شده است.

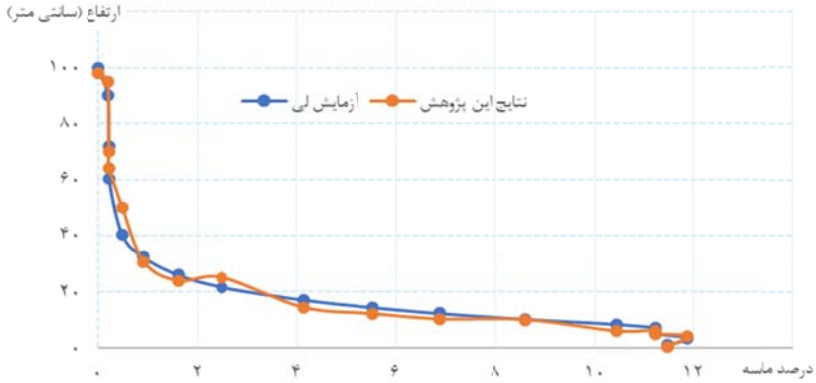
جدول ۳. مشخصات مدلسازی دال خط کوهاندار در نرم‌افزار انسیس فلوئنت

پارامترهای مدل	مشخصات مدلسازی
فضای تحلیل	3D
زمان	Unsteady, 1st-Order Implicit
مدل ویسکوزیته	Realizable k-epsilon turbulence model
رفتار دیواره	Standard Wall Functions
نوع مدل کا-اپسیلون	Mixture k-epsilon
مدل جریان چند فازی	Eulerian

۲-۳- اعتبار سنجی مدل

در این پژوهش جهت صحت‌سنجی از مدل لی (لی و همکاران، ۲۰۱٤) استفاده شده است. در این مقاله تاثیر بسترشنی درشت‌دانه بر انتشار ماسه و گرد و غبار در تونل باد و شرایط میدانی بررسی شد. در تحقیق آن‌ها رابطه‌ی معناداری بین پارامتر درصد پوشیدگی سطح بستر ماسه‌ای از شن‌های درشت‌دانه و میزان انتشار گرد و غبار در ارتفاع‌های مختلف به دست آمده است. در مقاله لی اشاره شده است که اطلاعات مربوط به درصد وزنی ذرات ماسه یک طوفان تا ارتفاع ۱متری برداشت شده است. جهت صحت‌سنجی مدل‌های این تحقیق باید شرایطی یکسان با مدل لی مدلسازی

شود. بنابراین در این تحقیق جریان بادی برابر با ۱۰متر بر ثانیه، طوفانی با کسر حجمی۰/٤ و چگالی دانه‌ای ۲٦٥۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (٥) و تطبیق نسبی نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری لی و مدلسازی این تحقیق، مشخص می شود که نتایج این تحقیق قابل اعتماد است.



شکل ٥. مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق با نتایج لی و همکاران (اعتبارسنجی مدل)

۲-٤- مشخصات هندسی مدلسازی دال خط کوهاندار

برای شبیه سازی، یک دال خط کوهاندار با طول ۱/۸ متر شامل ٦ کوهان در سه ردیف، استفاده شده است. از میان مدل های هندسی مختلف برای کوهان ۲ فرم هندسی که هر کدام دارای دو ارتفاع مختلف بودند در نظر گرفته شده است. شیب کناره کوهان‌ها مطابق با تراورس B70 و برابر با ۰/۱ انتخاب شده است. در مدلسازی دو فازی، سیل ماسه توسط باد از ورودی به سمت دال خط کوهاندار حرکت می‌کند بنابراین ابتدا ماسه کناره‌های دال را پر کرده و سپس از سطح دال خط عبور می‌کنند. برای در نظرگرفتن شرایط بحرانی در تمام مدلسازی‌ها از ضخامت دال صرف نظر شده است. مشخصات هندسی کوهان‌ها در جدول (٤) بیان شده است. همچنین نمونه‌ای از فضای تحلیلی یک نمونه مدل ایجاد شده در نرم افزار در شکل (٦) نشان داده شده است که در آن بردارهای جهت دار آبی و قرمز به ترتیب نشانگر ورودی فاز هوا و خروجی جریان دوفازی می‌باشند.

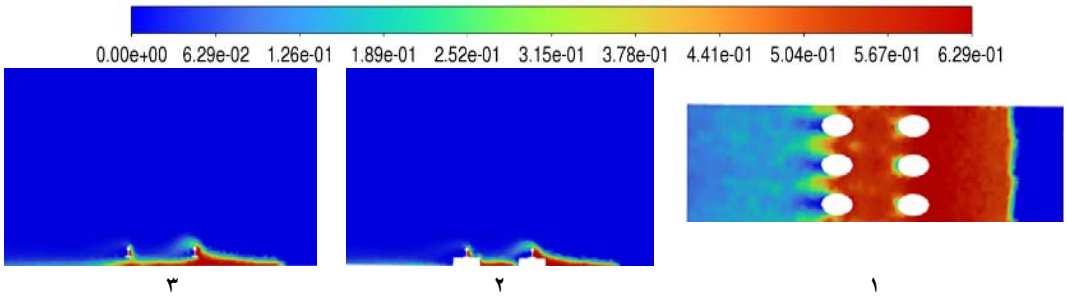
جدول ٤. مشخصات هندسی کوهان های پیشنهادی جهت مدلسازی

طرح سه بعدی کوهان	ارتفاع کوهان (سانتی‌متر)	مشخصات هندسی کف کوهان (سانتی‌متر)	مشخصات هندسی بالای کوهان (سانتی‌متر)
استوانه با مقطع مستطیل-نیم دایره	۱۵	مستطیل با طول ٤۰ و نیم دایره با قطر۲۰	مستطیل با طول ٤۰ و نیم دایره با قطر۲۳
	۲۰	مستطیل با طول ٤۰ و نیم دایره با قطر۲۰	مستطیل با طول ٤۰ و نیم دایره با قطر۲٤
استوانه با مقطع بیضوی	۱۵	بیضی با قطر بزرگ ٦۰ و قطر کوچک ۳۰	بیضی با قطر بزرگ ٦۳ و قطر کوچک ۳۳
	۲۰	بیضی با قطر بزرگ ٦۰ و قطر کوچک ۳۰	بیضی با قطر بزرگ ٦٤ و قطر کوچک ۳٤

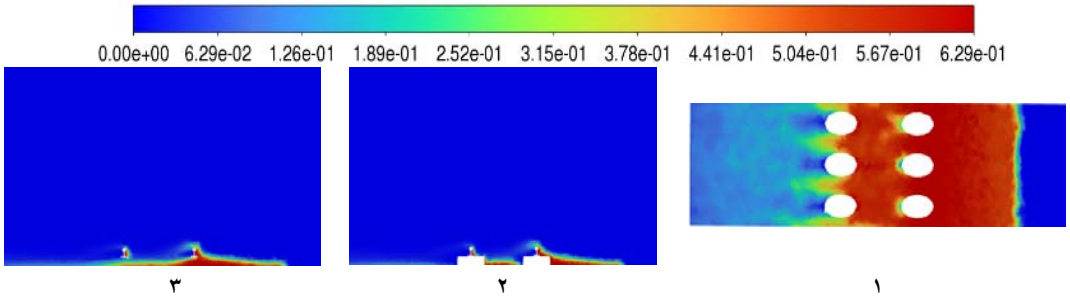
شکل ٦. نمونه‌ای از فضای تحلیل مدل در نرم افزار

۳- نتایج تحقیق

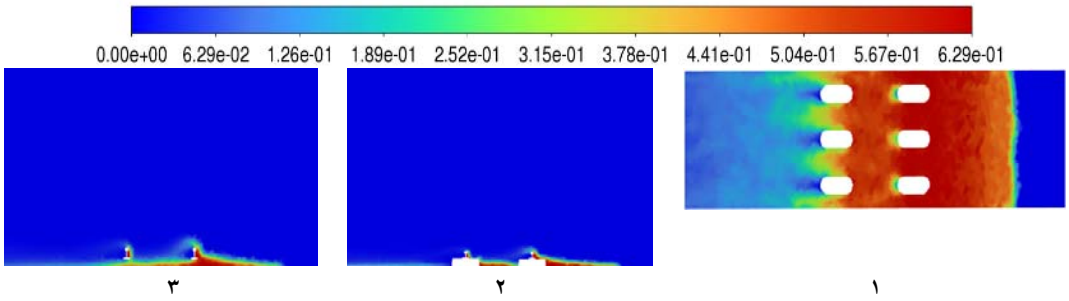
به منظور اندازه گیری میزان پرشدگی محدوده روسازی دال خط کوهاندار از ماسه و همچنین مقایسه نتایج شبیه سازی، از مفهوم کسرحجمی استفاده می‌شود. مفهوم کسرحجمی ماسه در این مدلسازی به معنای نسبت حجمی فاز ماسه به کل (مجموع حجم ماسه و هوا) تعریف می‌شود. کسر حجمی ماسه در هر مکان و گام زمانی قابل برداشت است، اما آنچه از اهمیت بالایی برخوردار است، مقدار آن در پایان تحلیل است. به منظور حفظ دقت کافی و بررسی تاثیر ورود و خروج سیل ماسه از دال خط کوهاندار، ۱۰۰۰ گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه (در مجموع یک ثانیه) برای تحلیل انتخاب شده است. نتایج مربوط به کسر حجمی ماسه در پایان تحلیل برای فرم‌های هندسی مختلف کوهان در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نمایش داده شده است.



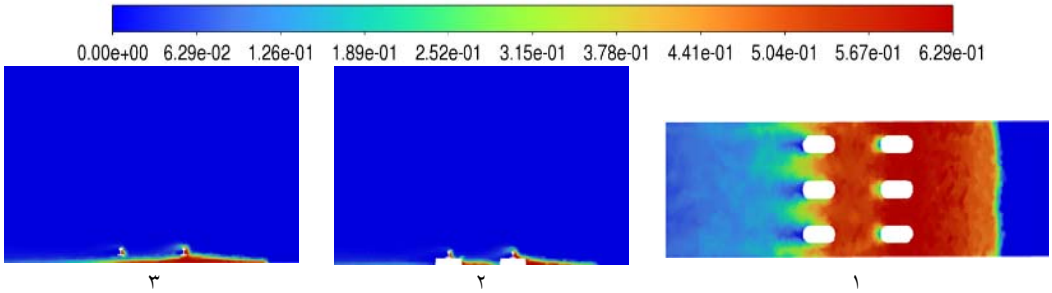
شکل ۷. کنتور کسرحجمی ماسه برای کوهان با مقطع بیضوی و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در لحظه‌ی پایانی
۱)مقطع پلان ۲)مقطع عرضی گذرنده از کوهان‌ها ۳)مقطع عرضی گذرنده از بین کوهان‌ها



شکل ۸. کنتور کسرحجمی ماسه برای کوهان با مقطع بیضوی و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در لحظه‌ی پایانی
۱)مقطع پلان ۲)مقطع عرضی گذرنده از کوهان‌ها ۳)مقطع عرضی گذرنده از بین کوهان‌ها



شکل ۹. کنتور کسرحجمی ماسه برای کوهان با مقطع مستطیل-نیم‌دایره و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در لحظه‌ی پایانی
۱)مقطع پلان ۲)مقطع عرضی گذرنده از کوهان‌ها ۳)مقطع عرضی گذرنده از بین کوهان‌ها



شکل ۱۰. کنتور کسرحجمی ماسه برای کوهان مقطع مستطیل-نیم‌دایره و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در لحظه‌ی پایانی
۱)مقطع پلان ۲) مقطع عرضی گذرنده از کوهان‌ها ۳) مقطع عرضی گذرنده از بین کوهان‌ها

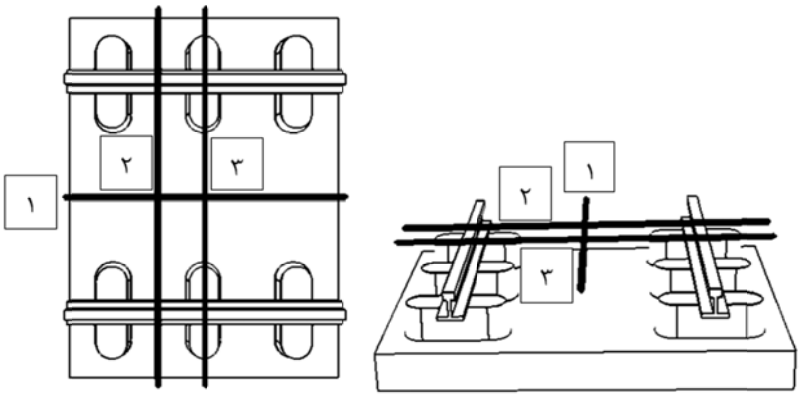
٤- تفسیر نتایج

همانطور که بیان شد، مسدودی خط در اثر پرشدن خط ریلی از ماسه و پس از آن خروج از خط قطار یکی از بزرگترین مشکلاتی که ماسه‌های روان برای زیرساخت راه آهن ایجاد می‌کند؛ بنابراین مقدار یا کسرحجمی ماسه در صفحه گذرنده از سطح ریل طرفین مبنای خوبی جهت مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف قرارمی‌گیرد. در نرم‌افزار، مقادیر کسرحجمی فازهای مختلف را می‌توان برای نقاط یا منحنی‌های از قبل تعیین شده تعیین نمود. بدیهی است نقاط به صورت مجزا نمی‌توانند نماینده قابل اطمینانی برای مقدار پرشدگی سطح دال از فاز ماسه باشند، بنابراین مطابق شکل (۱۱) سه خط به عنوان خطوط معیار برای مقایسه انتخاب می‌شوند. تمام خطوط انتخاب‌شده در صفحه موازی با سطح دال و گذرنده از سطح ریل‌ها قرار دارند؛ بنابراین ارتفاع خطوط مبنا از سطح دال، برای کوهان‌هایی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب ۳۲/۲ و ۳۷/۲ سانتی‌متر درنظرگرفته شده است (با فرض وجود ریل UIC60). توضیحات خطوط نمایش داده شده در شکل ۱۰ دیده می‌شود.

-خط ۱ موازی با محور خط انتخاب شده است، زیرا در شرایط واقعی طوفان‌های ماسه، ذرات در وسط دال خط تجمع کرده، بالا آمده و موجب مسدودی خط می‌شود. بنابراین تغییرات کسرحجمی ماسه این خط از اهمیت بالایی برخوردار است.

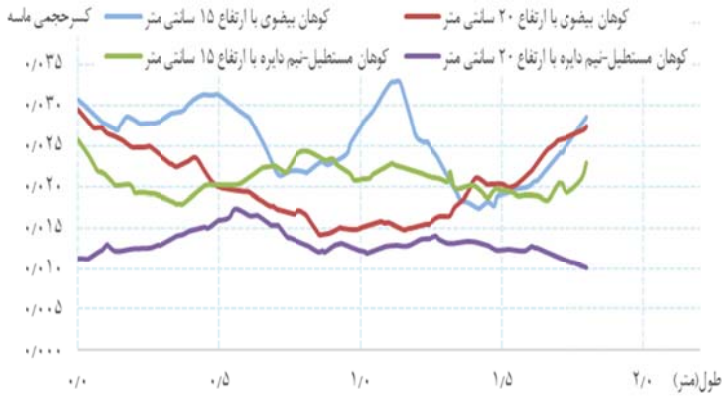
-خط ۲ در جهت عمود بر محور خط و در فاصله بین کوهان‌ها در نظرگرفته شده است. تغییرات کسرحجمی ماسه نسبت به این خط، روند ورود، تجمع و خروج ماسه‌ها از کانال‌های بین کوهان‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین عملکرد سیستم روسازی از این طریق قابل ارزیابی است.

-خط ۳ عمود بر محور دال خط و گذرنده از بالای کوهان‌ها در نظر گرفته شده است. در ابتدای طوفان ماسه این ناحیه خالی از ماسه است و با گذر زمان انباشت ماسه در این محدوده اتفاق می‌افتد. همچنین زمان ورود ماسه و زمان خروج آن از این محدوده می‌تواند تعیین کننده کیفیت آیرودینامیکی کوهان‌ها باشد.

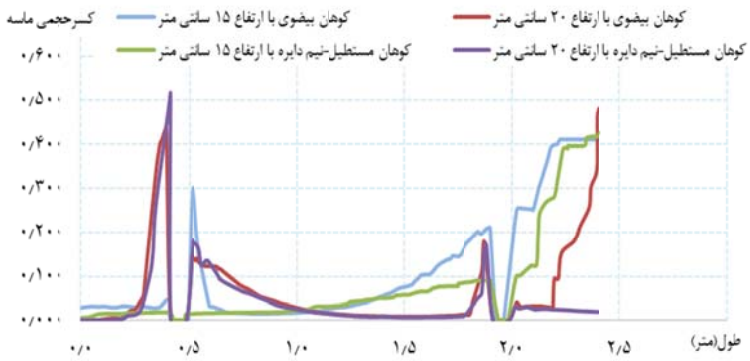


شکل ۱۱. موقعیت خطوط انتخاب‌شده جهت ترسیم پروفیل کسرحجمی ماسه

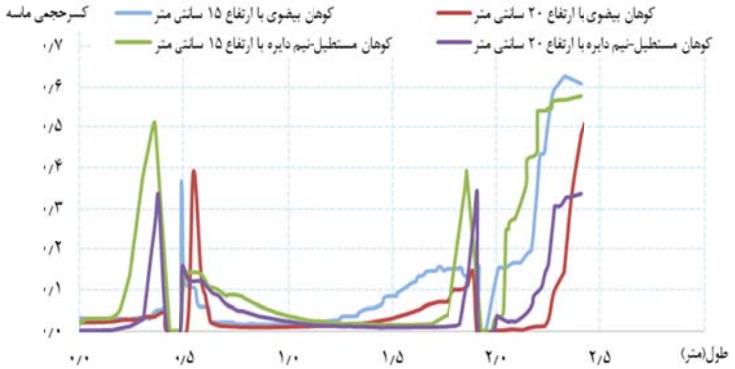
در پایان تحلیل، مقداری ماسه روی سطح دال انباشت می‌شود. به هرمیزان انباشت ماسه کمتر باشد، بدین معناست که شرایط کانال‌های ماسه و آیرودینامیک کوهان‌ها وضعیت بهتری داشته است. شکل (۱۲) پروفیل کسرحجمی ماسه را برای خط ۱ و چهار مدل نشان می‌دهد. دال خط کوهاندار با مقطع کوهان مستطیل-نیم‌دایره و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر کمترین تجمع ماسه و مقطع بیضوی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بیشترین تجمع ماسه را نشان می‌دهد. دو مدل دیگر تقریبا رفتار مشابهی با یکدیگر دارند. شکل‌های (۱۳) و (۱٤) پروفیل‌های عرضی کسرحجمی ماسه نسبت به موقعیت عرضی را به ترتیب برای خطوط ۲ و ۳ نشان می‌دهند. دراین شکل‌ها موقعیت صفر نشان‌دهنده دورترین نقطه نسبت به ورودی جریان دوفاز و موقعیت ۲/٤ متر نشان‌دهنده‌ی نزدیک‌ترین نقطه به ورودی جریان دوفاز می‌باشد. با توجه به شکل (۱۳) میزان ماسه‌های عبور نکرده از کانال (قبل از ورود به فضای بین دو ریل) برای هر دو مقطع با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بسیار کمتر از دو مدل دیگر است. با توجه به شکل (۱٤) تجمع ماسه برای هر دو شکل هندسی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به مقدار قابل توجهی کمتر از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر است.



شکل ۱۲. پروفیل کسرحجمی خط شماره ۱ برای مدلسازی‌های مختلف



شکل ۱۳. پروفیل کسرحجمی خط شماره ۲ برای مدلسازی‌های مختلف



شکل ۱٤. پروفیل کسرحجمی خط شماره ۳ برای مدلسازی‌های مختلف

مقایسه نتایج نشان می‌دهد، عبور سیل ماسه از کوهان‌هایی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بهتر از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر صورت می‌گیرد که منطقی به نظر می آید و البته متفاوت با نتایج تحقیق قبلی در این زمینه است [۹]. اما مقایسه ماسه انباشت شده نیازمند یک پارامتر کمی می‌باشد؛ به همین جهت در این تحقیق پارامتر کسرحجمی طولی تعریف شده است. کسرحجمی طولی یک فاز به عنوان مساحت زیر نمودار کسرحجمی آن فاز نسبت به موقعیت تعریف می‌شود (محور افقی نمودار، موقعیت و محور عمودی کسرحجمی). کسرحجمی طولی یک فاز ارتباط مستقیمی با مقدار آن فاز دارد؛ بنابراین کسرحجمی طولی ماسه با مقدار ماسه انباشته شده روی دال ارتباط مستقیم دارد. باتوجه به شکل‌های (۱۳) و (۱٤)، تغییرات کسرحجمی ماسه در ابتدا و انتهای نمودار تا محل ریل‌ها حالت ناپایداری دارد و درمحل ریل‌ها به صفر می‌رسد و پس از آن در قسمت میانه حالت پایدارتری دارد. از جهت دیگر انباشت ماسه بین دو ریل منجر به مسدودی می شود. بنابراین کسر حجمی طولی ماسه بین دو ریل برای همه مدل‌ها و خطوط شماره ۱ تا ۳ محاسبه شده و در جدول (۵) با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به این جدول، دال خط کوهاندار با مقطع مستطیل نیم دایره با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بهترین عملکرد را دارا می‌باشد و پس از آن به ترتیب مقاطع بیضوی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، مستطیل-نیم‌دایره با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و بیضوی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر قرار می‌گیرند. در این جدول همچنین درصد اختلاف کسر حجمی نسبت به گزینه برتر به منظور مقایسه مناسب تر ارائه شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد کوهان‌های بیضوی با ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و مستطیل-نیم دایره با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر با مدل برتر به ترتیب حداکثر ۹۲، ۵۰ و ۵۸ درصد در راستای طولی دال خط (خط ۱) و ۷۵، ۱۱ و ٥٦ درصد در راستای عرضی دال خط (خطوط ۲ و ۳) اختلاف دارد.

جدول ۵. مشخصات کسرحجمی طولی برای دال خط‌های کوهاندار با هندسه‌های مختلف

هندسه کوهان (سانتی متر)	کسر حجمی طولی (خط ۳)		کسر حجمی طولی (خط ۲)		کسر حجمی طولی (خط ۱)	
	مقدار	اختلاف (٪)	مقدار	اختلاف (٪)	مقدار	اختلاف (٪)
بیضوی (ارتفاع ۱۵)	۰/۰۹۵	۶۱	۰/۰۹۸	۷۵	۰/۰۴۶	۹۲
بیضوی (ارتفاع ۲۰)	۰/۰۶۱	۳	۰/۰۶۲	۱۱	۰/۰۳۶	۵۰
مستطیل-نیم‌دایره (ارتفاع ۱۵)	۰/۰۹۲	۵۶	۰/۰۶۰	۷	۰/۰۳۸	۵۸
مستطیل-نیم‌دایره (ارتفاع ۲۰)	۰/۰۵۹	۰	۰/۰۵۶	۰	۰/۰۲۴	۰

۵- نتیجه‌گیری

مهمترین مشکلی که راه‌آهن مناطق ماسه‌گیر را تحت‌تاثیر قرارداده و منجر به مخاطرات مالی و جانی می‌شود، حرکت ماسه‌های روان تحت تاثیر جریان‌های باد منطقه به ویژه در زمان وقوع طوفان است. روش‌های گوناگونی جهت حل مشکل ماسه‌های روان در راه‌آهن ارایه شده است که در دودسته اصلاح شرایط روسازی و اصلاح شرایط محیطی که راه‌آهن از آن عبور می‌کند، تقسیم می‌شود. محور این پژوهش بهینه‌سازی هندسی دال خط کوهاندار به عنوان روشی ابداعی بوده است که به طور مستقیم روسازی را دست خوش اصلاح قرار می‌دهد. بر این اساس، پس از مرور انواع مقاطع متصور کوهان برای عبور ماسه، دو مقطع بیضی و مستطیل-نیم‌دایره در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به دلایلی از جمله حالت آیرودینامیکی بهتر و ایجاد فضای عبوری مناسب‌تر برای عبور ماسه برای مدلسازی انتخاب شد. سپس بر اساس فرضیات حاکم بر منطقه کویری راه‌آهن بم-زاهدان (محدوده شوره‌گز)، اطلاعات مورد نیاز شبیه سازی نظیر دانه‌بندی ماسه و سرعت باد این منطقه در نظر گرفته شد. مدل‌های مختلف در نرم افزار انسیس فلوئنت تحت جریان دوفازی شامل جریان ماسه‌ای با حجم ۰/۹ مترمکعب و ویسکوزیته ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر متر ثانیه و جریان بادی با سرعت ۲۵ متر بر ثانیه توسعه یافت. معیار مقایسه نتایج مدل‌های مختلف در پایان تحلیل، پروفیل‌های کسرحجمی ماسه در راستاهای طولی و عرضی دال‌خط در نظرگرفته شد که نشان دهنده میزان پرشدگی ماسه در روی ریل‌های دال خط کوهاندار به عنوان مبنایی برای مسدودی خط می‌باشد. همچنین در مدلسازی‌ها از ضخامت دال اصلی به منظور در نظرگرفتن شرایط بحرانی‌تر صرف نظر شد. نتایج این مطالعه نشان داد، کسر حجمی طولی در شرایط بحرانی هجوم سیل ماسه در دال خط‌هایی با مقاطع کوهان مستطیل-نیم دایره با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر و بیضوی با ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر به ترتیب ۰/۰۹۲، ۰/۰۶۲ و ۰/۰۹۸ متر است. این در حالی است که کوهان های مستطیل-نیم دایره با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر دارای کسرحجمی طولی ماسه پایین‌تری دارد به طوری که مقدار آن در بحرانی‌ترین شرایط در حدود ۰/۰۶ می‌باشد. شاخصی که بیانگر توانایی بیشتر این هندسه در عبور سیل ماسه است. بنابراین دال خط کوهاندار با مقطع کوهان مستطیل-نیم‌دایره (ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر)، پروفیل‌کسرحجمی ماسه پایین‌تری نسبت به سایر مدل‌ها در هر دو راستای موازی و عمود بر خط دارد و به عنوان مدل بهینه هندسی پیشنهاد می‌شود.

۶-مراجع

-امرالهی، ع.، (۱۴۰۰)، "گزارش مناطق ماسه گیر خطوط راه آهن ج.ا.ا، اداره کل خط و سازه‌های فنی راه آهن".

- فتحعلی، م.، (۱۳۸۷)، "ارایه روسازی دال خط کوهاندار برای رفع معضل راه آهن‌های مناطق کویری"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-Bruno, L., Horvat, M., & Raffaele, L., (2018), “Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures”, Journal of Wind

-Rahdari, M. R., Gyasi-Agyei, Y., & Rodrigo-Comino, J., (2021), "Sand drifts potential impacts within desert railway corridors: a case study of the Sarakhs-Mashhad railway line", Arabian Journal of Geosciences, Vol. 14, No. 9, pp. 1-14.

-Zakeri, J. A. and Fathi, A., (2017), "Analysis the Influence of Different Forms of Geometric Humps on Sand Track Crossing the Desert Using the Fluent Simulation Software", Journal of Transportation Research, Vol. 14, No. 2, pp. 349-362.

-Zakeri, J. A., Esmaieli, M., Fathali, M., (2010), "Introducing New Humped Slab Track Superstructure for Obviating the Problems of Desert Railways", Modares Civil Engineering journal, Vol. 10, No. 2.

-Zakeri, J. A., Esmaieli, M., Fathali, M., (2011), "Evaluation of humped slab track performance in desert railways", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 225, No. 6, pp. 566-573.

-Tavili, A., (2015), "Studying and designing the construction of a biological protection belt for stabilization Flowing sands in Shurgaz area of Zahedan".

-Vossloh, (2022), "System W. 14 – the world's most popular solution", [online] https://media.vossloh.com/media/01_product_finder/vfs/pf_system_w_14/Vossloh_System_W_14_EN.pdf.

Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 177, pp. 340-365.

-Horvat, M., Bruno, L., & Khris, S., (2022), "Receiver Sand Mitigation Measures along railways: CWE-based conceptual design and preliminary performance assessment", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 228, pp. 105109.

-Li, G. S., Qu, J. J., Li, X. Z., & Wang, W. F., (2014), "The sand-deposition impact of artificial gravel beds on the protection of the Mogao Grottoes", Scientific reports, Vol. 4, No. 1, pp. 1-8.

-Malkaneh, M. and Talaee, M. R., (2019), "Numerical Study of the Humped Slab Track Behavior in SandStorm by Modeling Two-Phase Flow", Journal of Transportation Infrastructure Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 37-56.

-pandrol, (2022), "Fastclip FCA Product Guide", [online] Available at: https://www.pandrol.com/wp-content/uploads/2021/01/FCA-Product-Guide-EN.pdf.

-Raffaele, L., & Bruno, L., (2020), "Windblown sand mitigation along railway megaprojects: A comparative study, Structural Engineering International, Vol. 30, No. 3, pp. 355-364.

Evaluation of the Optimal Geometry of the Hump Slab in Desert Railways with the Solid-Gas Two-Phase Simulation Approach

Masoud Fathali, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
Mohammad Mohsen Kabiri Nasrabad, M.Sc., Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
Fereidoon Moghadas Nejad, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: m.fathali@bhrc.ac.ir

Received: February 2023 - Accepted: May 2023

ABSTRACT
One of the inevitable necessities for the development of the rail transport network is to pass through desert and sandy areas. At the same time, desert railways increase maintenance and repair costs, reduce speed and block the line during operation, and even cause the train to derail. So far, various solutions have been proposed to deal with quicksand in desert railways. One of the newly developed methods is the hump slab track, which seeks to control and pass the amount of incoming sand from the railway track. In this system, the ballast material is removed and the height of rails is raised by means of concrete supports known as humps. As a result, channels for the passage of sands under the rails are created. The geometry of the hump should be such that, in addition to favorable aerodynamic conditions, it provides maximum free space for sand to pass through. In this research, with the aim of optimizing the geometry of the hump, different sections for the hump have been investigated and then two main sections including oval and rectangle-semicircle with two different heights have been evaluated. Simulations have been carried out in the platform of computational fluid dynamics and in Ansys Fluent software. Two-phase solid-gas flow including a sand flood and wind flow has been passed through the models and the amount of sand volume fraction has been compared. The results show that the rectangular-semi-circular geometric section (height of 20 cm) shows more favorable results against the influx of quicksand.

Keywords: Desert Railway, Quicksand, Hump Slab, Two-Phase Flow, Volume Fraction