

چالش اندازه‌گیری و محاسبه نشست ریزگرد بر روی سطح‌های گوناگون

احمد عباسی، امیرحسین نیکو، محمد رضا ملایری⁺

بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: امروزه پدیده ریزگردها یکی از مشکل‌های بزرگ و بسیار جدی در حوزه محیط‌زیست می‌باشد که بسیاری از کشورها از جمله ایران با آن روبرو هستند. مشکل‌های تنفسی و بروز برخی سرطان‌ها، آلودگی هوا و منابع آبی از جمله اثرهای این پدیده به‌شمار می‌روند. از این رو مقابله با این پدیده، ضرورتی بسیار جدی می‌باشد. فعالیت‌های انسانی که بر شدت رخداد ریزگردها افزوده است، باعث شده تا راهکارهای کنونی برای مقابله با چنین پدیده‌ای کارآمدی لازم را نداشته باشد. برای رسیدن به راه‌حل‌های عملیاتی و مؤثرتر برای مواجه شدن با این پدیده، نخست باید مکانیسم‌های انتقال ریزگردها و نیز چسبندگی آن‌ها به سطح به‌طور کامل و جامع بررسی شود و سپس براساس این مطالعه‌ها، رسیدن به راهکار مقابله با پدیده ریزگردها امکان‌سنجی شود. در این مطالعه، مکانیسم‌های انتقال و چسبیدن ریزگردها به سطح بررسی شده و چالش‌های موجود بر اساس مطالعه‌های پیشین شناسایی شده است. سپس براساس نظریه DLVO، به محاسبه نیروی بین مولکولی متفاوت بین ذرات ریزگرد و سطح‌های نشست در چندین حالت پرداخته شده است. نتیجه‌های این مطالعه نشان می‌دهد که محاسبه‌های مربوط به چسبندگی ریزگرد به سطح با چالش‌های فراوانی روبرو است و به‌همین دلیل ارایه راهکارهای مقابله با ریزگردها پیچیدگی‌هایی دارد. در این میان، انرژی سطح و رطوبت، مهم‌ترین عامل‌های پیچیدگی در نشست ریزگرد هستند.

کلمات کلیدی: ریزگرد؛ نشست ذره‌ها؛ نیروی بین مولکولی متفاوت؛ انرژی سطح؛ جنس سطح.

KEYWORDS: Dust; Particle deposition; Adhesion force; Surface energy; Surface material.

مقدمه

محیطی تعیین می‌شود)، نیروی اعمالی به ذره‌های خاک سطح زمین از سوی آن باعث جدا شدن ذره‌ها از سطح، ورود به جریان هوا و معلق شدن آن‌ها می‌شود و ریزگرد یا طوفان غبار را ایجاد می‌کند که در پی این پدیده، تیرگی آسمان نیز به دست می‌آید و محدوده دید کاهش می‌یابد [۱]. گرد و غبار هم که ذره‌های بسیار ریز جامد معلق در هوا است، اگر از ذره‌های خاک سطحی تشکیل شده باشد، ریزگرد خواهد بود اما طوفان شن با ریزگرد متفاوت است. در دانش اتمسفری، شن به صورت ذره‌هایی تعریف شده است که به ندرت معلق می‌شوند

توجه جامعه جهانی نسبت به محیط‌زیست و تغییرات آن، امروزه بیش از پیش شده است. فعالیت‌های انسانی افزون بر منافع مقطعی و کوتاه‌مدت، اثرها و عارضه‌های ناخواسته بلندمدتی هم به‌دنبال داشته است که اکنون با آن دست و پنجه نرم می‌شود. یکی از این عارضه‌های منفی، گسترش و تشدید پدیده‌ای به نام ریزگرد و طوفان غبار است که در حال حاضر، منطقه‌های گوناگونی در سراسر جهان با آن مواجه هستند و ناخواسته تحت‌تأثیر آن قرار گرفته‌اند. با افزایش سرعت باد از یک مقدار مشخص (که با توجه به بافت خاک و شرایط

* عهده دار مکاتبات

+E-mail: malayeri@shirazu.ac.ir

پرداخته می‌شود. مبانی نظری چسبیدن ذره‌ها به سطح و نیز عامل‌هایی که در انتقال و نشست ذره‌ها روی سطح‌ها اهمیت دارند، با مطالعه مقاله‌های مربوطه گردآوری و معرفی شده است.

مکانیسم‌های چسبیدن ریزگرد به سطح

وقتی ذره‌های ریزگرد توسط مکانیسم‌های گوناگون به یک سطح شامل زمین یا اجسام و المان‌های سطحی، نزدیک شده و با آن تماس می‌یابند، تحت تأثیر نیروهای گوناگونی قرار می‌گیرند که از برهم کنش‌های بین مولکول‌های مجاور در ذره‌ها و سطح ناشی می‌شود. در این شرایط اگر نیروهای جاذبه بر نیروهای دافعه بین دو سطح غلبه کنند، ذره به سطح خواهد چسبید، در غیر این صورت، ذره پس از تماس با سطح، از آن جدا شده و نشست صورت نمی‌گیرد. انرژی‌های برهم کنش بین مولکولی در چسبندگی ذرات به سطح نقش بسیار مهم و مؤثری دارند. انرژی سطح برابر با مقدار کار مورد نیاز برای ایجاد واحد مساحت سطح است و همانند کنش سطحی برای مایعات می‌باشد [۷]. براساس تئوری DLVO [۸، ۹] که چسبندگی بین دو سطح در تماس با هم را تفسیر می‌کند و راهکاری برای محاسبه نیروهای بین آن‌ها ارائه می‌دهد، انرژی‌های برهم کنش بین دو جسم به طور عمده شامل انرژی لیفشیتز - واندروالس، ΔE_{132}^{LW} ، و انرژی الکترواستاتیک دو لایه‌ای^۴، ΔE_{132}^{EL} ، هستند. بعدها، نظریه DLVO با افزودن دو انرژی برهم کنش اسید - باز لوویس، ΔE_{132}^{AB} و حرکت براونی، ΔE^{Br} ، توسعه داده شد [۱۰]. بنابراین انرژی کل برهم کنش بین مولکولی بین رسوب و سطح مطابق معادله (۱) برابر با مجموع انرژی‌های برهم کنش لیفشیتز - واندروالس، الکترواستاتیک دو لایه‌ای، اسید - باز لوویس و حرکت براونی است [۱۱، ۱۲]:

$$\Delta E_{132}^{Tot} = \Delta E_{132}^{LW} + \Delta E_{132}^{EL} + \Delta E_{132}^{AB} + \Delta E^{Br} \quad (1)$$

در این معادله زیرنویس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهنده رسوب، سطح و سیال هستند. موازنه میان همه انرژی‌های برهم کنش که در ΔE_{132}^{Tot} ظاهر می‌شوند، تعیین‌کننده تشکیل و یا عدم تشکیل رسوب روی سطح است. به‌عنوان نمونه اگر ΔE_{132}^{Tot} منفی باشد، رسوب به سطح می‌چسبد. به‌عبارت دیگر با کاهش انرژی برهم کنش کل، چسبندگی رسوب به سطح بیش‌تر می‌شود. در مورد موضوع ریزگردها، از میان انرژی‌های برهم کنش در نظر گرفته شده در نظریه‌ها DLVO، انرژی‌های لیفشیتز - واندروالس و اسید - باز لوویس

و تمایل به تشکیل تپه‌های شنی روی سطح زمین دارند در حالی که غبار به سادگی توسط باد معلق می‌شود. همچنین از دیدگاه زمین‌شناسی، ذره‌های شن در بازه اندازه ۶۲/۵ تا ۲۰۰۰ میکرومتر قرار دارند (البته این مرز تقریبی است) ولی ذره‌های کوچک‌تر از این بازه، غبار شناخته می‌شوند [۲]. دامنه آسیب ریزگرد در گستره ویژه‌ای نمی‌گنجد و از اثرات سلامتی و تشدید بیماری‌های تنفسی گرفته تا ایجاد اختلال در زندگی روزمره، مشکل‌های مربوط به کشاورزی، تهدید زندگی آبزیان و گروه گسترده‌ای از مورد‌های منفی دیگر را در بر می‌گیرد [۳، ۴].

ذره‌های جامد سطح خاک، پس از ورود به هوا در شرایط مناسب برای تشکیل ریزگرد، همراه جریان هوا حرکت کرده و می‌توانند مسافت زیادی جابه‌جا شوند. این ذره‌ها ماندگاری زیادی در هوا دارند و به‌دلیل دانسیته کم، می‌توانند مدت زیادی معلق بمانند. ذره‌ها در زمان حرکت همراه جریان هوا، توسط مکانیسم‌های گوناگونی به‌سوی زمین انتقال می‌یابند. ذره‌هایی که در فاصله به نسبت دوری از سطح زمین همراه باد حرکت می‌کنند، توسط حرکت گردانه‌ها و نفوذ تلاطمی^۱، به زیرلایه نزدیک سطح منتقل می‌شوند. درون این زیرلایه که جریانی آرام و لایه‌ای برقرار است، حرکات براونی^۲ و نفوذ مولکولی^۳، مکانیسم غالب برای انتقال ذره‌ها به سطح است [۵]. در سطح نیز ذره‌ها به‌دلیل وجود انواع نیروهای بین مولکولی متفاوت^۴ در شرایط گوناگون، به آن می‌چسبند و ممکن است روی آن باقی بمانند و یا به دلیل‌هایی مانند تنش سطحی شدید، از آن جدا شوند و به هوا بازگردند [۶].

در این مطالعه، مرحله سوم نشست ریزگرد یعنی تماس ذره‌ها با سطح و چسبیدن به آن، عامل‌های اثرگذار و چالش‌های مرتبط مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به محاسبه انرژی سطح و نیروی بین مولکولی متفاوت بین ذره و سطح برای سطح‌های خاک رس، شیشه و آسفالت به‌عنوان سطح‌های رایج در محیطی که در آن زندگی می‌کنیم، بر اساس نظریه DLVO^۵ پرداخته می‌شود و سرانجام مقایسه‌ای با رسوب تبلوری به‌عنوان رسوبی که مطالعه‌های فراوانی پیرامون آن انجام گرفته است، صورت خواهد گرفت.

بخش نظری

در این بخش به شرح نشست ذره‌ها از هوا بر روی سطح‌ها و سپس مهم‌ترین عامل‌هایی که این فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهند،

(۱) Turbulent Diffusion

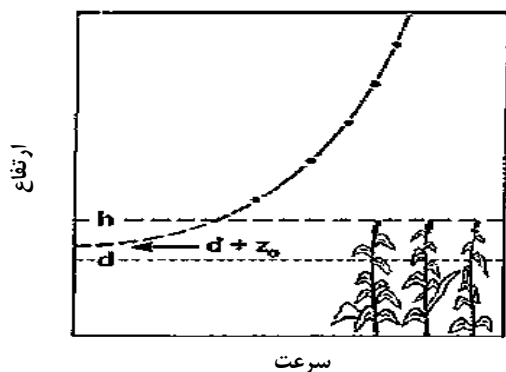
(۲) Brownian motion

(۳) Molecular diffusion

(۴) Adhesion

(۵) Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek

(۶) Electrostatic double layer



شکل ۱- پروفیل لگاریتمی سرعت باد در حضور المان‌های زبری سطح و سطح جابه‌جایی صفحه صفر [۱۳].

براونی از لایه مرزی مجاور سطح زمین انتقال یابند تا به سطح برسند. از طرفی در بخش‌های آبی دیده خواهد شد که سرعت باد در نزدیک سطح زمین و تنش برشی اعمالی به ذره‌های نشست کرده، بر جدایی آن‌ها از سطح اثرگذار است. لایه مرزی، تحت تأثیر پروفیل سرعت باد و شرایط سطحی زمین است. شکل واقعی پروفیل باد در شرایط پایداری طبیعی به صورت یک منحنی نزولی لگاریتمی است که در معادله (۵) نشان داده شده است [۱۲]:

$$\bar{U}_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5)$$

در این معادله z ، ارتفاع از سطح زمین و k ، ثابت ون - کارمن^۱ است که به طور تقریبی برابر 0.4 می‌باشد. u^* ، سرعت اصطکاکی جریان هوا است و z_0 ، طول زبری^۲ سطح است که وابسته به وضعیت المان‌های زبری سطح مانند درختان یا ساختمان‌ها است. وجود این المان‌ها در سطح مطابق شکل ۱، باعث انتقال پروفیل سرعت باد به اندازه d به بالا می‌شود و در این ارتفاع یک صفحه فرضی به نام سطح جابه‌جایی صفحه صفر^۳ در نظر گرفته می‌شود که سرعت باد در آن صفر است و سپس پروفیل لگاریتمی سرعت جریان، تشکیل می‌شود. ارتباط دقیق z_0 و d با ارتفاع المان‌های زبری، توزیع تراکم آن‌ها و سرعت باد مشخص نیست اما می‌توان مقدار تقریبی آن‌ها را از جدول (۱) مشخص کرد یا از یک قاعده سرانگشتی استفاده کرد که اگر متوسط ارتفاع المان‌های زبری برابر با h باشد، آنگاه [۱۳]:

$$d \approx \frac{2}{3}h \quad (6)$$

مهم هستند زیرا برهم‌کنش و به بیان دیگر، چسبندگی ریزگرد به سطح در محیط هوا اتفاق می‌افتد که نقش یک محیط بی اثر را بازی می‌کند، به همین دلیل انرژی برهم‌کنش ΔE_{12}^{LW} به جای ΔE_{132}^{LW} و انرژی برهم‌کنش ΔE_{12}^{AB} به جای ΔE_{132}^{AB} لحاظ می‌شوند. انرژی‌های برهم‌کنش لیفشیتز - واندروالس و اسید - باز لوویس به ترتیب به صورت معادله‌های (۲) و (۳) ارایه شده است [۱۰]:

$$\Delta E_{12}^{LW} = -2 \left(\sqrt{\gamma_1^{LW} \cdot \gamma_2^{LW}} \right) \quad (2)$$

در این معادله γ_1^{LW} و γ_2^{LW} به ترتیب مؤلفه لیفشیتز - واندروالس انرژی سطح ذره‌های ریزگرد و سطح دریافت کننده آن هستند.

$$\Delta E_{12}^{AB} = -2 \left(\sqrt{\gamma_1^+ \cdot \gamma_2^-} + \sqrt{\gamma_1^- \cdot \gamma_2^+} \right) \quad (3)$$

در معادله (۳)، γ_1^+ و γ_1^- به ترتیب مؤلفه‌های پذیرنده و دهنده الکترون انرژی سطح برای ریزگرد هستند. همچنین γ_2^+ و γ_2^- به ترتیب مؤلفه‌های پذیرنده و دهنده الکترون انرژی سطح برای سطح می‌باشند. نیروی کل بین مولکولی متفاوت بین ریزگرد و سطح نیز از معادله (۴) به دست می‌آید [۱۰].

$$\begin{aligned} \Delta E_{12}^{Tot} &= \Delta E_{12}^{LW} + \Delta E_{12}^{AB} \\ &= -2 \left[\left(\sqrt{\gamma_1^{LW} \cdot \gamma_2^{LW}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\sqrt{\gamma_1^+ \cdot \gamma_2^-} + \sqrt{\gamma_1^- \cdot \gamma_2^+} \right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

عامل‌های تأثیرگذار

در پدیده نشست ذره‌های جامد اتمسفری روی سطح‌ها، عامل‌هایی تأثیرگذار هستند که هنوز به طور کامل و دقیق مشخص نشده‌اند و در محاسبه و استفاده از آن‌ها، تقریب‌هایی به کار می‌رود که خطاهایی را نیز به وجود می‌آورد. در این بخش به طور اجمالی به بررسی این چالش‌ها پرداخته می‌شود و به نمونه‌هایی از پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون آن‌ها اشاره می‌شود.

تراکم المان‌های زبری در سطح

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، ذره‌های موجود در جو باید نخست به کمک گردانه‌ها و سپس توسط نفوذ مولکولی یا حرکت‌های

(۱) von-Karman

(۲) Roughness length

(۳) Level of zero plane displacement

جدول ۱- مقدارهای Z_0 و d برای سطح‌های گوناگون مورد استفاده در پروفیل لگاریتمی سرعت باد [۱۳].

نوع سطح	ملاحظه	Z_0 ، طول زبری (متر)	d ، جابه‌جایی صفحه صفر (متر)
آب	دریای آزاد - باز	۰/۰۰۰۱ - ۰/۱	-
یخ	صاف	۰/۰۰۰۱ - ۰/۱	-
برف		۰/۰۰۱ - ۰/۵	-
شن، بیابان		۰/۰۰۰۳	-
خاک‌ها		۰/۰۰۱ - ۰/۰۱	-
چمن	۰/۱ - ۰/۰۲ متر	۰/۰۰۳ - ۰/۰۱	کمتر از ۰/۰۷
	۰/۲۵ - ۱ متر	۰/۰۴ - ۰/۱	کمتر از ۰/۶۶
محصولات کشاورزی		۰/۰۴ - ۰/۲	کمتر از ۳
باغ‌ها		۰/۵ - ۱	کمتر از ۴
جنگل‌ها	برگ‌ریز	۱ - ۶	کمتر از ۲۰

$$z_0 \approx \frac{1}{10} h \quad (7)$$

در معادله‌های (۶) و (۷)، اثر شکل و فضای المان‌های موجود در سطح نادیده گرفته شده است که در محاسبه طول زبری، خطا ایجاد خواهد کرد.

زبری‌های میکرو و نانو مقیاس در سطح

در بحث چسبیدن ذره‌ها به سطح و جدا شدن آن‌ها، تا به حال پژوهش‌های بسیاری صورت گرفته است که در بسیاری از آن‌ها از جمله نظریه‌های مکانیک چسبندگی و مکانیک تماس، ذره‌ها به شکل کره‌های بدون زبری و سطح‌های تخت، به حالت ایده‌آل و به طور کامل صاف در نظر گرفته شدند. این کار باعث ساده‌تر شدن فیزیک مسئله و محاسبه‌های مربوط به آن شد ولی پژوهش‌های تجربی نشان داد که سطح‌ها، زبری‌هایی دارند که غیر قابل صرف نظر کردن است و نیز در مدل‌های پیشین، تغییر شکل سطح‌ها در هنگام چسبیدن ذرات، در نظر گرفته نمی‌شد که باعث ایجاد اختلاف با نتیجه‌های آزمایشگاهی می‌شد [۱۴].

در پژوهش‌های دیگر، اثرات زبری بیش‌تر مورد توجه قرار گرفت. در اولین مدل‌های بررسی زبری، از رویکرد همکر^۱ استفاده شد که در آن اثر یک زبری منفرد به شکل نیم‌کره‌ای کوچک بر نیروهای

واندروالس^۲ بین یک ذره کروی و یک صفحه تخت در نظر گرفته شد و رابطه‌ای برای نیروی بین مولکولی متفاوت به دست آمد که پیچیدگی بیشتری نسبت به مدل‌های ایده‌آل داشت [۱۵]. سپس در نظریه زبری چندگانه^۳، توزیع زبری‌های سطح به کمک مدل‌های ریاضی مانند توزیع گوسی نرمال وارد شد و با انتگرال‌گیری مجموع اثرهای زبری‌های منفرد، نیروی بین مولکولی متفاوت به دست آمد [۱۶]. برای بررسی هر ذره، از نظریه‌های JKR [۱۷] یا DMT [۱۸] استفاده می‌شود.

در پژوهشی دیگر، جدا شدن ذره‌های با اندازه ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرون از سطح‌های زبر در جریان آشفته بررسی شد و با فرض تغییر شکل الاستیک زبری‌های سطح در ناحیه تماس، مشخص شد که با افزایش زبری، سرعت برشی بحرانی کاهش می‌یابد و کاهش شعاع زبری‌ها، اثر عکس دارد [۱۹]. هر چه اثرهای زبری بیش‌تر لحاظ شود، رابطه‌های نیروی بین مولکولی متفاوت شکل پیچیده‌تری به خود می‌گیرد و از یک‌سو، نتایج واقعی‌تری به دست می‌آید ولی از سوی دیگر، خطاهای محاسباتی مانند خطای ضرب و جمع و یا خطای گرد کردن افزایش می‌یابد.

جنس سطح و پوشش آن

یکی دیگر از عوامل اثرگذار بر نشست و چسبندگی ریزگرد به سطح، جنس سطح است. برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن برای هر سطحی به کمک نظریه‌های گوناگون، به دو عامل نیاز است [۲۰]:

۱. زاویه‌های تماس مایعات آزمون^۴ روی سطح

۲. مقدارهای کشش سطحی مایعات آزمون و مؤلفه‌های آن

با تغییر جنس سطح و یا پوشش آن، به دلیل عوض شدن مقدارهای زاویه‌های تماس مایعات آزمون روی سطح که لازمه محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن برای سطح می‌باشد، مقدارهای این ویژگی سطحی مهم، دستخوش تغییر می‌شود و براساس معادله‌های (۲) تا (۴)، نیروی بین مولکولی متفاوت ریزگرد به سطح نیز عوض خواهد شد.

رطوبت سطح

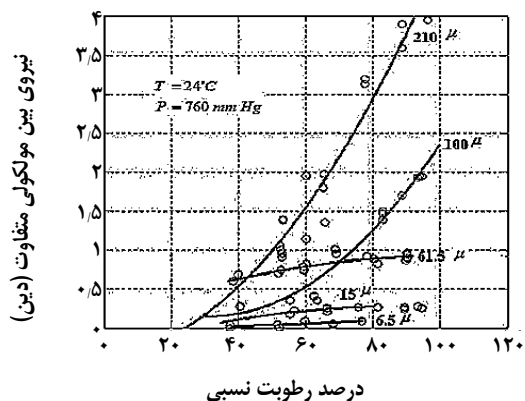
رطوبت موجود در هوا که با رطوبت نسبی مشخص می‌شود، بر روی سطح ذره‌ها می‌باید و تشکیل لایه نازکی از آب می‌دهد.

(۱) Hamaker

(۲) van der Waals

(۳) Multi-asperities theory

(۴) Test liquids



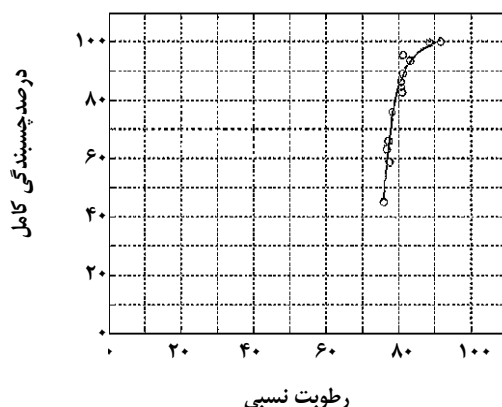
شکل ۳ - نمودار نیروی بین مولکولی متفاوت بر حسب رطوبت نسبی برای ذرات با اندازه‌های گوناگون [۲۲]

اثر می‌گذارد و به همین دلیل می‌توان توجیه کرد که اثر رطوبت بر چسبندگی ذره‌ها با قطر بیش از ۹۰ میکرون، بیش‌تر از چسبندگی ذره‌ها با قطر کم‌تر از ۹۰ میکرون است.

در پژوهش‌های دیگر، مرز شدت اثر رطوبت بر چسبندگی برای ذره‌های شن، قطر ۸۰ میکرون تعیین شده است. ذرات کوچک‌تر، حتی در رطوبت نسبی پایین نیز می‌چسبند درحالی‌که ذرات بزرگ‌تر، آزاد هستند [۲۳]. در آزمایشی دیگر برای ذره‌های شن روی یک سطح لعابی، چسبندگی در رطوبت نسبی ۱۰٪، بیشتر از حالت رطوبت نسبی ۵۰٪ است در حالی که برای ذرات شیشه روی سطح شیشه‌ای، چسبندگی با افزایش رطوبت نسبی، افزایش می‌یابد [۲۴]. نتیجه‌های این آزمایش‌ها و موردهایی از این دست نشان می‌دهد که اثر رطوبت به طور جامع ناشناخته است و در حال حاضر نمی‌توان قاعده‌ای کلی برای میزان تأثیر نیروی موینگی ناشی از حضور رطوبت در محل نشست ریزگرد، بر سطح‌های گوناگون بیان کرد.

سرعت باد در فاصله‌ی نزدیک سطح

ذره‌هایی که روی سطح قرار می‌گیرند یا با آن در تماس هستند، تحت تأثیر نیروهای گوناگونی قرار دارند. نیروهایی که از طرف جریان هوا به ذرات نشست کرده، وارد می‌شود شامل نیروی پسا^۲ و نیروی برا^۳ است. اگر این نیروها بتوانند بر نیروهای بین مولکولی متفاوت غلبه کنند، می‌توانند باعث جدا شدن ذرات از سطح شده و آن‌ها را دوباره معلق می‌کنند. با استفاده از موازنه نیرو روی یک ذره در آستانه جدا شدن از سطح، سرعت جریان بحرانی هوا (باد) به دست می‌آید که



شکل ۲ - نمودار درصد چسبندگی کامل ذره‌های شیشه به سطح شیشه‌ای بر حسب رطوبت نسبی [۲۱]

ضخامت این لایه تحت تأثیر مقدار رطوبت نسبی است. پژوهش‌های صورت گرفته روی مواد گوناگون، نتیجه‌های متفاوتی را نشان داده است و همین موضوع باعث نبود شناخت کامل اثر رطوبت بر چسبیدن ذره‌ها به سطح شده است. نتیجه‌های یکی از این پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون ذره‌های کروی شیشه روی اسلاید شیشه‌ای در شکل ۲ نشان می‌دهد که درصد چسبیدن با رطوبت نسبی افزایش می‌یابد [۲۱].

اعتقاد بر این است که افزایش ضخامت فیلم مایع روی ذره‌ها، باعث افزایش چسبندگی می‌شود. با مشاهده شکل ۳ که نتیجه‌های پژوهش‌های همانندی را نشان می‌دهد [۲۲]، مشخص می‌شود که میزان اثر رطوبت نسبی بر چسبندگی، تحت تأثیر اندازه ذره‌های شیشه است بدین صورت که برای ذرات با قطر بیش از ۹۰ میکرون، رطوبت نسبی به میزان بیشتری باعث افزایش چسبندگی می‌شود زیرا ذره‌های کوچک‌تر، رطوبت جذب شده را در سطح مشترک تماس حفظ می‌کنند و زمان بیش‌تری برای سازگار شدن با تغییرهای شرایط هوای محیط اطراف خود نیاز دارند. موینگی ناشی از اختلاف نیروی بین مولکولی همسان^۱ میان مولکول‌های آب با خودشان و نیروی بین مولکولی متفاوت میان مولکول‌های آب با سطح ذره‌ها است. ذره‌های کوچک‌تر در هنگام تماس با سطح‌ها نسبت به ذره‌های بزرگ‌تر، فضای خالی کوچک‌تری در اطراف محل تماس ایجاد می‌کنند که در حضور رطوبت، توسط آب اشغال می‌شود، در نتیجه سطح تماس آب و دو سطح جامد (ذره و صفحه)، برای ذره‌های کوچک‌تر، نسبت به ذره‌های بزرگ‌تر، کم‌تر است پس نیروی موینگی در سطح کم‌تری

(۱) Cohesion

(۲) Drag

(۳) Lift

جدول ۲ - مقدارهای انرژی سطح برای خاکرس، آسفالت و شیشه [۲۸].

جنس سطح	عدد CAS	انرژی سطح γ_2 (mN/m)
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۳۱/۳۰
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۴۵/۶۷
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۵۱/۷۱
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۵۵/۵۰
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۶۰/۶۰
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۶۰/۷۰
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۶۲
خاکرس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۶۵/۸
خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	۶۶/۰۰
شیشه	نامشخص	۴۳/۱۰
شیشه	نامشخص	۶۵/۰۰
شیشه	نامشخص	۶۶/۵۰
شیشه	نامشخص	۶۸/۰۰
شیشه	نامشخص	۶۹/۵۰
شیشه	نامشخص	۷۰/۳۰
شیشه	نامشخص	۷۳/۰۰
شیشه	نامشخص	۷۳/۰۰
شیشه	نامشخص	۱۱۲/۹۰
آسفالت AAA	---	۵۴/۴۴
آسفالت AAD	---	۲۷/۱۴
آسفالت AAM	---	۴۸/۳۵

سطح سه نوع آسفالت استفاده شده در بزرگراه‌های آمریکا توسط گروهی از پژوهشگران تعیین شده است [۲۹]. جدول ۲ مقدارهای انرژی سطح برای سطح‌های خاکرس، شیشه و آسفالت را نشان می‌دهد.

در پایگاه اینترنتی KRÜSS.de [۲۸]، برای خاکرس و شیشه با عدد CAS یکسان، چندین مقدار متفاوت انرژی سطح گزارش شده است که این موضوع را می‌توان ناشی از دو عامل زیر دانست: ۱. تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مایع‌های آزمون روی سطح‌ها: برای اندازه‌گیری زاویه تماس مایع‌های آزمون روی سطح‌ها، دو روش هندسی و اندازه‌گیری نیروی کششی وجود دارد.

۲. متفاوت بودن نظریه‌های محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن: افزون بر نظریه اسید - باز لوویس که توضیح داده شد، روش‌های دیگری مانند OWRK [۳۰] و Wu [۳۱، ۳۲] وجود دارد که هر کدام از این روش‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه‌های ویژه‌ای برای انرژی سطح و استفاده از رابطه‌های ریاضی یگانه، ویژگی انرژی سطح و مؤلفه‌های آن را به دست می‌دهند.

اگر سرعت باد از این سرعت بحرانی بیش‌تر باشد، ذره‌ها معلق می‌شوند. در محاسبه نیروی پسا، نیاز به داشتن پارامتری به نام ضریب پسا است که به عدد رینولدز جریان هوا وابسته است و نتیجه‌های پژوهش‌های گوناگون در شرایط متفاوت، به رابطه‌های بسیاری برای محاسبه این ضریب منجر شده است. یکی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، پیرامون جدایش ذره‌های دوده از سطح آگزوز خودرو می‌باشد که در آن از نیروهای برا و گرانش در برابر نیروهای پسا و واندروالس صرف‌نظر شده است و با برابر قرار دادن این دو نیرو، رابطه‌ای برای سرعت بحرانی سیال به دست آمده است [۲۵].

یکی دیگر از اثرهای سرعت هوا در سطح، بر هم‌زدن موازنه گشتاورهای اعمالی به ذره‌ها است. در پژوهش صورت گرفته پیرامون موقعیت‌های یک ذره نشست کرده نسبت به سایر ذره‌های سطحی روی صفحه تخت، تغییر موازنه گشتاورهای اعمال شده به ذره‌ها بررسی شده است و برای به‌شمار آوردن اثرهای ناپیوستگی در محاسبه نیروی پسا بر ذره‌های کوچک، از ضریب تصحیح کانینگهام^۱ استفاده شده است [۱۹].

محاسبه انرژی سطح برای سطح‌های خاکرس، شیشه و آسفالت

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین بیان شد، برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن به‌عنوان یک خصوصیت سطحی مهم و مؤثر در چسبندگی ریزگرد به سطح، نظریه‌های گوناگونی وجود دارد. یکی از آن‌ها، نظریه اسید - باز لوویس است که معادله (۸) آن را نشان می‌دهد [۲۶، ۲۷]:

$$\gamma_3 (1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_2^{LW} \cdot \gamma_3^{LW}} + \sqrt{\gamma_2^- \cdot \gamma_3^+} + \sqrt{\gamma_2^+ \cdot \gamma_3^-} \right) \quad (8)$$

براساس این تئوری، برای انرژی سطح و مؤلفه‌های آن، سه مؤلفه لیفشیتز - واندروالس، γ_2^{LW} ، دهنده الکترون، γ_2^- ، و پذیرنده الکترون، γ_2^+ ، لحاظ می‌شود. مقدار کل انرژی سطح نیز از معادله (۹) به دست می‌آید:

$$\gamma_2 = \gamma_2^{LW} + 2\sqrt{\gamma_2^+ \cdot \gamma_3^-} \quad (9)$$

در این مطالعه، به‌صورت موردی، سه سطح با جنس‌های خاکرس، شیشه و آسفالت (که اطلاعات مربوط به آن‌ها در دسترس است) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر انرژی سطح برای خاکرس و شیشه توسط پایگاه اینترنتی KRÜSS.de [۲۸] گزارش شده است. همچنین انرژی

(۱) Cunningham

جدول ۳ - مقادیر نیروی بین مولکولی متفاوت برای خاک رس/خاک رس، آسفالت/آسفالت و شیشه/شیشه.

ریزگرد/سطح	عدد CAS	نیروی بین مولکولی متفاوت ΔE_{12}^{Tot} (mNm)
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۶۲/۶۰
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۹۱/۳۴
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۰۳/۴۲
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۱۱
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۲۱/۲
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۲۱/۴
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۲۴
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۳۱/۶
خاک رس / خاک رس	۷-۷۴-۱۳۱۸	-۱۳۲
شیشه / شیشه	نامشخص	-۸۶/۲
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۳۰
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۳۳
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۳۶
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۳۹
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۴۰/۶
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۴۶
شیشه / شیشه	نامشخص	-۱۴۶
شیشه / شیشه	نامشخص	-۲۲۵/۸
آسفالت / آسفالت AAA	---	-۱۰۸/۸۸
آسفالت / آسفالت AAD	---	-۵۴/۲۸
آسفالت / آسفالت AAM	---	-۹۶/۷۰

در صورتی که چندین نوع المان با ارتفاع‌ها و میزان تراکم گوناگون وجود داشته باشند (مانند وجود درختان و ساختمان‌ها در یک شهر بزرگ)، تعیین ارتفاع زبری و سطح جابه‌جایی صفحه صفر با مشکل مواجه می‌شود و استفاده از قاعده سرانگشتی با وجود تقریب‌های مربوطه نیز به تعیین یک ارتفاع متوسط کل برای همه المان‌های زبری نیاز دارد که به‌طور دقیق قابل تعیین نیست.

نتیجه‌های آزمایش‌های پیشین نشان داده است که اثرهای زبری‌های میکرو و نانو مقیاس در چسبیدن ذره‌ها به سطح، مهم است ولی در مدل‌هایی که این اثرات را لحاظ می‌کنند، از شکل‌های تقریبی و ساده شده‌ای برای زبری‌های مورد نظر استفاده می‌شود و توزیع آن‌ها توسط مدل‌های ریاضی بیان می‌شود که با حالت واقعی توزیع زبری‌ها روی سطح متفاوت است. روابط به‌دست آمده نیز پیچیدگی‌های زیادی دارد و کار کردن با آن‌ها دشوار است.

محاسبه نیروهای بین مولکولی متفاوت

در بخش‌های پیشین درباره انرژی‌های برهم‌کنش مؤثر در چسبندگی ریزگرد به سطح، بحث و معادله (۴) برای نیروی بین مولکولی متفاوت میان ریزگرد/سطح در محیط هوا ارائه شد. در این مطالعه به‌دلیل در اختیار نبودن مقادیر انرژی سطح و مؤلفه‌های آن برای ریزگردها، انرژی برهم‌کنش یا به بیان دیگر، نیروی بین مولکولی متفاوت میان ریزگرد/سطح به‌صورت خاک رس/خاک رس، آسفالت/آسفالت و شیشه/شیشه تقریب زده و محاسبه می‌شود. بنابراین در این حالت، جزء ۱ با جزء ۲ یکی است و رابطه نیروی بین مولکولی متفاوت ΔE_{12}^{Tot} به‌صورت معادله (۱۰) در می‌آید:

$$\Delta E_{12}^{Tot} = -2 \left(\gamma_2^{LW} + 2\sqrt{\gamma_2^+ \cdot \gamma_2^-} \right) \quad (10)$$

معادله (۱۱)، مؤلفه قطبی انرژی سطح، γ_2^{AB} را به مؤلفه دهنده، γ_2^+ و گیرنده الکترون، γ_2^- ارتباط می‌دهد:

$$\gamma_2^{AB} = 2\sqrt{\gamma_2^+ \cdot \gamma_2^-} \quad (11)$$

از ترکیب معادله‌های (۱۰) و (۱۱) رابطه پایانی محاسبه نیروی کل بین مولکولی متفاوت ΔE_{12}^{Tot} به‌دست می‌آید:

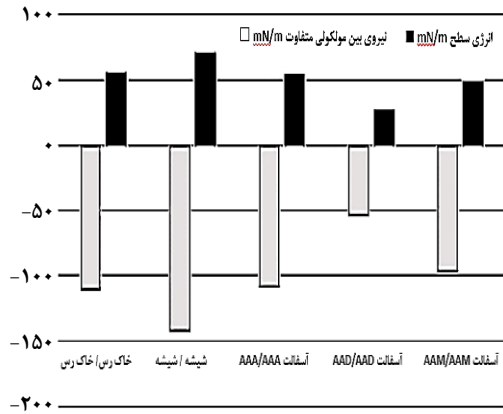
$$\Delta E_{12}^{Tot} = -2\gamma_2 \quad (12)$$

جدول ۳ مقادیر نیروی بین مولکولی متفاوت برای سطح‌های جدول ۲ را نشان می‌دهد.

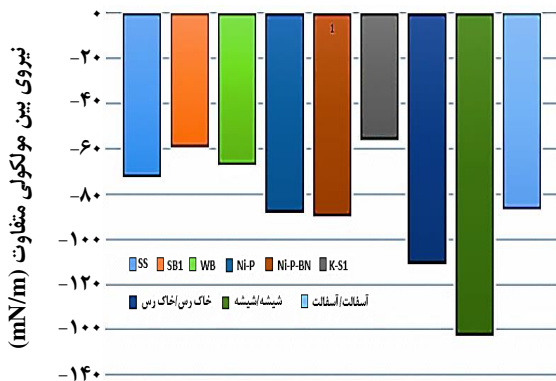
نتیجه‌ها و بحث

اهمیت و اثرات پدیده نشست ذره‌های خاک سطح زمین به صورت معلق در هوا که حالت شدیدتر آن به‌عنوان ریزگرد یا طوفان غبار دیده می‌شود، باعث شد تا بررسی جامع‌تری پیرامون چگونگی نشست و چسبیدن ذره‌ها به سطح‌ها و عامل‌های مؤثر بر آن صورت گیرد. در این مطالعه پس از بررسی اجمالی مکانیسم‌های نشست و عامل‌های اثرگذار بر چسبیدن ذره‌ها به سطح‌ها، محاسبه انرژی سطح برای سطح‌های خاک رس، شیشه و آسفالت انجام شد و چالش‌هایی در این زمینه شناسایی شدند که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

انتقال ذره‌ها از جو به سطح‌ها، تحت‌تأثیر سرعت باد قرار دارد که با پروفایل لگاریتمی سرعت مشخص می‌شود. این پروفیل از ارتفاعی نسبت به سطح شروع می‌شود که به المان‌های سطحی بستگی دارد. ارتفاع زبری برای المان‌های زبری سطح زمین به‌طور خالص در جدول‌های گوناگون در کتاب‌های مرجع موجود است ولی



شکل ۴ - متوسط انرژی سطح و نیروی بین مولکولی متفاوت برای حالت‌های گوناگون [۲۸]



شکل ۵ - نیروی بین مولکولی متفاوت تشکیل رسوب تبلوری کلسیم سولفات روی سطح اصلاح‌نشده فولاد ضدزنگ و سطح‌های اصلاح‌شده گوناگون به همراه متوسط نیروی بین مولکولی متفاوت رس/رس، شیشه/شیشه و آسفالت/آسفالت

پایه آب WB، الکتروسل Ni-P و Ni-P-BN و نانوساختار K-S1 استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، نیروی متوسط بین مولکولی متفاوت برای حالت‌های خاک رس/خاک رس، شیشه/شیشه و آسفالت/آسفالت از نیروی بین مولکولی متفاوت رسوب کلسیم سولفات روی سطح اصلاح‌نشده فولاد ضدزنگ و سطح‌های اصلاح‌شده گوناگون بیشتر است. بیشتر بودن شدت چسبندگی برای حالات بررسی شده در این مطالعه از مقدار همانند برای رسوب تبلوری روی سطح فولادی اصلاح‌نشده، بیانگر شدت نشست بالای ریزگرد روی سطح‌ها است. همچنین داده‌های شکل ۵ این نکته را برجسته می‌کند که می‌توان با روکش کردن سطح‌ها از شدت نشست ریزگرد روی سطح‌های گوناگون کاست. این موضوع البته نه برای سطح زمین بلکه برای سطح‌هایی مانند ساختمان‌ها و پنجره‌ها توصیه می‌شود.

در تعیین سرعت بحرانی سیال که آستانه جدا شدن ذره‌ها از سطح‌ها است، به موازنه نیرو و گشتاور روی ذره در آستانه جدایش یا غلتیدن روی سطح نیاز است که یکی از آن‌ها، نیروی پسا است و در این نیرو از ضریب پسا استفاده می‌شود. رابطه‌هایی که ضریب پسا توسط آن‌ها محاسبه می‌شود، دارای تقریب است و خطاهایی دارد. افزون بر این، هر رابطه‌ای دارای شرایط ویژه‌ای برای معتبر بودن است که باید رعایت شود.

در بخش پیشین، محاسبه نیروی بین مولکولی متفاوت برای حالت‌های گوناگون صورت گرفت. رابطه‌های استفاده شده برای این محاسبات اهمیت زیاد و نقش تعیین‌کننده انرژی سطح را نشان می‌دهند، چرا که با افزایش انرژی سطح، مولکول‌های سطحی تمایل بیشتری برای جذب ریزگردها دارند. پس با این توضیح، می‌توان گفت که با افزایش انرژی سطح، نیروی بین مولکولی متفاوت ریزگرد به سطح نیز افزایش پیدا می‌کند. بنابراین یکی از راهکارهای کاهش چسبیدن ریزگرد روی سطح‌ها این است که انرژی سطح به روشی کاهش پیدا کند تا از تمایل ریزگرد به نشست و باقی ماندن روی سطح بکاهد. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین نیروی بین مولکولی متفاوت و انرژی سطح در حالت‌های خاک رس/خاک رس، شیشه/شیشه، آسفالت‌های AAA/AAA، AAD/AAD و AAM/AAM انجام شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ نیز مشخص است، هر چه انرژی سطح بیشتر باشد، نیروی بین مولکولی متفاوت ریزگرد به سطح نیز بیشتر خواهد بود به طوری که بیشترین چسبندگی برای شیشه/شیشه با نیروی متوسط بین مولکولی متفاوت $142/51 \text{ mN/m}$ می‌باشد. بیشترین انرژی سطح نیز برای شیشه می‌باشد. بررسی انرژی سطح شیشه و نیروی بین مولکولی متفاوت شیشه/شیشه، از آنجایی که جنس غالب ریزگرد از این ماده (سیلیکا) می‌باشد، دارای اهمیت است.

از آنجایی که مطالعات زیادی در زمینه نیروی بین مولکولی متفاوت در مبحث رسوب تبلوری صورت گرفته است، بنابراین در این قسمت مقایسه‌ای میان نیروی بین مولکولی متفاوت در مبحث یاد شده با ریزگردها صورت می‌گیرد. شکل ۵ مقایسه‌ای را میان چسبندگی متفاوت در حالت ساده مشابه‌سازی شده با نشست ریزگرد روی سطح‌ها با رسوب تبلوری کلسیم سولفات روی سطح‌های گوناگون نشان می‌دهد. در پژوهشی [۳۳]، رسوب تبلوری کلسیم سولفات روی سطح اصلاح‌نشده فولاد ضدزنگ و چندین سطح اصلاح‌شده بررسی شد. به همین دلیل برای مقایسه از داده‌های نیروی بین مولکولی متفاوت سطح فولاد ضدزنگ و سطح‌های اصلاح‌شده پایه حلال به‌عنوان نمونه SB1،

نتیجه‌گیری

از آنجایی که مقادیرهای ویژگی‌های سطحی مؤثر در چسبندگی ریزگرد به سطح، با تغییر روش اندازه‌گیری زوایای تماس مایع‌های آزمون روی سطح‌ها، نظریه‌های محاسبه و حتی مایع‌های آزمون تغییر می‌کنند، در نتیجه، یکی از مشکلات اساسی پیش‌روی محاسبه نیروی بین مولکولی متفاوت میان ریزگرد و سطح، متفاوت بودن داده‌های انرژی سطح برای سطح‌ها و رسوب‌ها است. اثر رطوبت به‌طور کامل شناخته نشده است و یک روند عمومی برای آن توسط پژوهشگران ارایه نشده است. تاکنون به تأثیر اندازه ذره‌ها و آب‌گریز یا آب‌دوست بودن سطح‌ها بر نوع و شدت اثر رطوبت نسبی در مورد چسبندن ذره‌ها به سطح‌ها پی برده شده است ولی ممکن است علت عدم ارایه یک رابطه کلی، وجود عامل‌های اثرگذار شناخته نشده باشد.

در این مطالعه، با هدف تعیین چالش‌های موجود در مسیر محاسبه نیروهای بین مولکولی متفاوت میان ذره‌های ریزگرد و سطح‌های جامد، به مطالعه مکانیسم‌های نشست ریزگرد و برهم کنش‌های میان این دو پرداخته شد. تعیین یک مقدار متوسط برای ارتفاع جابه‌جایی صفحه صفر، هنگامی که مجموعه‌ای از المان‌های سطحی وجود دارد، با تقریب‌هایی مواجه است که خطا را به محاسبه‌ها وارد می‌کند. در نظر گرفتن یا نگرفتن زبری‌های سطح باعث پیچیدگی محاسبات نیروی بین مولکولی متفاوت می‌شود و فرضیه‌های به کار رفته در مدل‌های گوناگون، متفاوت است که باعث اختلاف در نتیجه آن‌ها می‌شود. با توجه به این که برای محاسبه نیروی بین مولکولی متفاوت بین ریزگرد/سطح نیاز به مقادیرهای انرژی سطح و مؤلفه‌های آن برای ریزگرد و سطح می‌باشد، همچنین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۲۰

مراجع

- [1] Middleton N., Kang U., *Sand and Dust Storms: Impact Mitigation, Sustainability*, **9**(6): 1-22 (2017).
- [2] Shao Y., *Physics and Modelling of Wind Erosion, Springer Science & Business Media*, **37**: (2008).
- [3] Middleton N.J., *Desert Dust Hazards: A Global Review, Aeolian Research*, **24**, 53-63 (2017).
- [4] Aili A., Oanh N.T.K., *Effects of Dust Storm on Public Health in Desert Fringe Area: Case Study of Northeast Edge of Taklimakan Desert, China, Atmospheric Pollution Research*, **6**(5): 805-814 (2015).
- [5] Wu Y.L., Davidson C.I., Dolske D.A., Sherwood S.I., *Dry Deposition of Atmospheric Contaminants: the Relative Importance of Aerodynamic, Boundary Layer, and Surface Resistances, Aerosol Science and Technology*, **16**(1): 65-81 (1992).
- [6] Kok J.F., Parteli E.J., Michaels T.I., Karam D.B., *The Physics of Wind-Blown Sand and Dust, Reports on Progress in Physics*, **75**(10): 106901- (2012).
- [7] Skriver H.L., Rosengaard N.M., *Surface Energy and Work Function of Elemental Metals, Physical Review B*, **46**(11): 7157-7168 (1992).
- [8] Derjaguin B.V., *Theory of the Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols and the Adhesion of Strongly Charged Particles in Solutions Of Electrolytes, Acta Physicochim. USSR*, **14**: 633-662 (1941).
- [9] Verwey E.J.W., "Theory of the Stability of Lyophobic Colloids: The Interaction of Sol Particles Having an Electric Double Layer", Elsevier Pub. Co. (1948)
- [10] Becher D.Z., *A Review of: "Interfacial Forces in Aqueous Media". Carel J. Van Oss, Marcel Dekker, Inc. New York, 1994, pp. viii+ 440. \$???(ISBN 0-8247-9168-1), Journal of Dispersion Science and Technology*, **17**(2):247-247 (1996).
- [11] Oliveira R., *Understanding Adhesion: a Means for Preventing Fouling, Experimental Thermal and Fluid Science*, **14**(4): 316-322 (1997).

- [12] Cook N.J., "The Designer's Guide to Wind Loading on Building Structures. Part I: Background, Damage Survey, Wind Data, and Structural Classification", Building Research Establishment, Watford (1985).
- [13] Oke T.R., "Boundary Layer Climates", 372. Methuen, New York (1978).
- [14] Dagaonkar M., Majumdar U., Effect of Fluid Flow, Solution Chemistry and Surface Morphology of Fibrous Material on Colloid Filtration, *Journal of Engineered Fabrics & Fibers (JEFF)*, **7**(3): 841-852 (2012).
- [15] Rumpf H., "Particle Technology", Vol. 1, Springer Science & Business Media (2012).
- [16] Greenwood J. A., Tripp J.H., The Contact of Two Nominal Flat Rough Surfaces. *Instn Meth Engrs, Tribology Group*, **185**: 48-51 (1971).
- [17] Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D., Surface Energy and the Contact of Elastic Solids, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **324**(1558): 301-313 (1971).
- [18] Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P., Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles, *Progress in Surface Science*, **45**(1-4): 131-143 (1994).
- [19] Gilkey N., "A Simple Computational Model for Particle Resuspension Behind a Normal Moving Shock", M.Sc. Thesis, The University of New Mexico (2014).
- [20] Janabi A.K.A., "Convective Heat Transfer Fouling of Aqueous Solutions on Modified Surfaces" Ph.D. Dissertation, University of Stuttgart (2011).
- [21] Bowden F. P., Tabor D., "The Friction and Lubrication of Solids", Vol. 1, Oxford University Press (2001).
- [22] Corn M., The Adhesion of Solid Particles to Solid Surfaces II., *Journal of the Air Pollution Control Association*, **11**(12): 566-584 (1961).
- [23] Bagnold R.A., "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes" (Methuen, New York, 1941), *Google Scholar* (1941).
- [24] Kordecki M.C., Orr Jr C., Adhesion of Solid Particles to Solid Surfaces, *Archives of Environmental Health: An International Journal*, **1**(1): 1-9 (1960).
- [25] Razmavar A.R., Malayeri M.R., A Simplified Model for Deposition and Removal of Soot Particles in an Exhaust Gas Recirculation Cooler, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **138**(1): 011505 (2016).
- [26] Oss Van C.J., Good R.J., Chaudhury M.K., Determination off the Hydrophobia Interaction Energy-Application to Separation Processes, *Separation Science and Technology*, **22**(1): 1-24 (1987).
- [27] Van Oss C.J., Good R.J., Chaudhury M.K., Additive and Nonadditive Surface Tension Components and the Interpretation of Contact Angles, *Langmuir*, **4**(4): 884-891 (1988).
- [28] "KRÜSS - Advancing Your Surface Science: Services; Substance Data; Solids", Krüss GmbH (2016).
- [29] Cheng D., Little D., Lytton R., Holste J., Surface Energy Measurement of Asphalt and Its Application to Predicting Fatigue and Healing in Asphalt Mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1810): 44-53 (2002).

- [30] Owens D. K., Wendt R.C., Estimation of the Surface Free Energy of Polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, **13**(8): 1741-1747 (1969).
- [31] Wu S., [Calculation of Interfacial Tension in Polymer Systems](#), *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia* , **34**(1): 19-30 (1971).
- [32] Wu S., [Polar and Nonpolar Interactions in Adhesion](#), *The Journal of Adhesion*, **5**(1): 39-55 (1973).
- [33] Janabi A.A.K., "Convective Heat Transfer Fouling of Aqueous Solutions on Modified Surfaces", PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany (2011).