

## بررسی فرسایش بادی در دشت سیستان و تأثیر آن بر خصوصیات مهندسی خاک‌ها

حمیدرضا سلوکی<sup>۱</sup>؛ ماشاله خامه‌چیان<sup>۲\*</sup>؛ ناصر حافظی مقدس<sup>۳</sup>؛ سید کاظم علوی پناه<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۶

دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۲/۱

### چکیده

در منطقه سیستان به دلیل شرایط خاص آب و هوایی (اقلیم خشک) و نیز وزش بادهای شدید (از جمله بادهای یکصدویست روزه)، فرسایش بادی یکی از عوامل مهم ایجاد تغییر شکل در زمین است که باعث تغییر خصوصیات مهندسی خاک نیز می‌گردد. جهت بررسی نقش فرسایش بادی در تغییر خصوصیات خاک‌های منطقه، از چهار محدوده‌ی مختلف شامل، نقاط فاقد پوشش در دریاچه هامون، نقاط واجد پوشش در دریاچه هامون، زمین‌های بایر و زمین‌های کشاورزی بدون کشت در دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷ نمونه‌گیری به عمل آمده است. همچنین آزمون‌های برجا برای تعیین دانسیته در محل و مقدار مقاومت زهکشی نشده‌ی خاک و آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین دانه‌بندی، حدود اتربرگ و حداکثر دانسیته خشک انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حد روانی و مقدار چسبندگی خاک، در زمین‌های رسی بدون پوشش گیاهی و زمین‌های کشاورزی، با گذشت زمان کاهش می‌یابد و خاک‌های رسی به سمت سیلتی شدن پیش می‌روند. با کاهش چسبندگی، خاک‌ها بیشتر از پیش مستعد فرسایش پذیری می‌شوند. دانسیته بر جای خاک‌ها در نقاطی که لایه‌های سست سطحی فرسایش می‌یابند افزایش می‌یابد و حداکثر به ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌رسد.

**کلید واژه‌ها:** دشت سیستان، فرسایش بادی، خصوصیات مهندسی خاک، سیلتی شدن

۱. گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴. مرکز تحقیقات بیابان ایران، دانشگاه تهران، ایران

## مقدمه

فرسایش بادی یکی از عوامل مهم تغییر شکل سطح زمین در مناطق مختلف جهان بخصوص نواحی گرم و خشک است. تقریباً یک سوم مناطق جهان تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارد (Chen and Fryrear, 1996). این فرآیند در مناطق خشک و نیمه خشک یکی از عوامل اصلی تخریب سطح زمین بوده و ژئومورفولوژی منطقه را دگرگون می کند. فرسایش سطح زمین همواره مشکلاتی را به وجود می آورد که از زوایای مختلف قابل بررسی است. فرسایش بادی باعث تخریب زمین شده و شرایط و پتانسیل تولید رسوبات را افزایش می دهد (Lopez, 1998). وجود گرد و غبار ناشی از وزش باد باعث تغییر در ترکیب اتمسفر و شرایط آب و هوایی شده که یکی از خطرناک ترین مسائل زیست محیطی محسوب می شود (Gomes et al., 2003)، همچنین فرسایش بادی باعث کاهش حاصلخیزی خاک و پرکردن کانال های آب و ذخایر آبی توسط رسوبات بادی می شود (Nordstrom and Hotta, 2004).

عوامل مختلفی در شدت فرسایش بادی مؤثر هستند که از آن جمله می توان به شدت وزش باد، وضعیت پوشش گیاهی و خصوصیات خاک شامل، رطوبت، زبری، چسبندگی و مقاومت برشی آن اشاره نمود. آستانه شروع فرسایش بادی در خاک های مختلف بستگی به عوامل فوق دارد. مطالعات لی و همکاران (2003) نشان می دهد که در مراتع ماسه ای شمال چین، آستانه شروع حرکت ذرات ماسه حدود  $4 \text{ m/s}$  است و ذرات با قطر  $0.1-0.25 \text{ (mm)}$  زودتر از ذرات ریزتر و یا درشت تر فرسایش می یابند. ذرات درشت تر به دلیل وزن بیشتر دارای آستانه ی بالاتری هستند در حالیکه ذرات ریزتر مانند رس ها به علت چسبندگی، در برابر فرسایش بادی مقاوم هستند (Li et al., 2003).

ژائو و همکاران (2006) با مطالعه ی اثر فرسایش بادی طولانی مدت بر خصوصیات خاک دریافتند که فرسایش بادی باعث افزایش درصد ماسه و PH خاک و کاهش درصد رس، مواد ارگانیکی و رطوبت خاک می شود. علاوه بر آن بسیاری از خصوصیات خاک های مذکور، مانند درصد عناصر خاک و دانسیته درجا، با فرسایش بادی به مرور زمان تغییر می کند و

بر حاصلخیزی خاک اثرات نامناسبی می گذارد. مطالعات نشان می دهد که در مناطق گرم و خشک، زمین های کشاورزی به دلیل زیر و رو شدن، استعداد بیشتری برای فرسایش بادی دارند و تغییرات ایجاد شده به دلیل فرسایش بادی در آنها بیشتر از سایر زمین ها است (Zhibao et al., 2000).

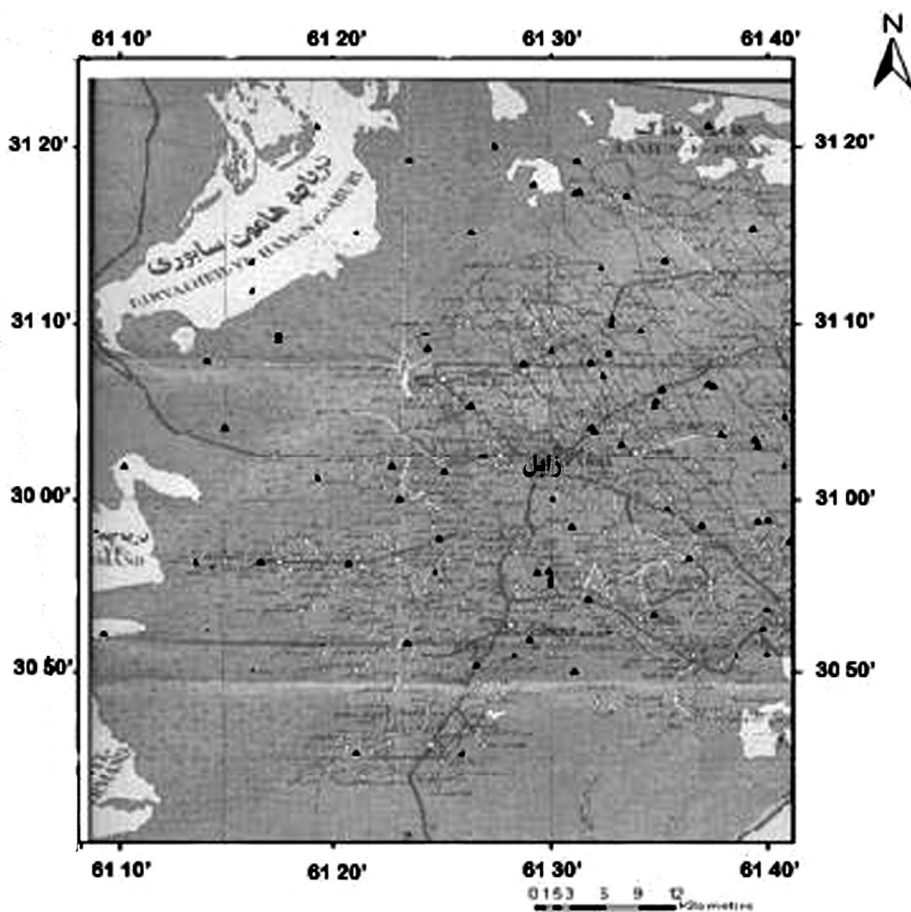
دشت سیستان به دلیل قرار گرفتن در مجرای بادهای یکصدوبیست روزه، که از اواسط اردیبهشت تا اواسط شهریور با شدت زیاد در منطقه می وزد، و نیز به دلیل دارا بودن ذرات ریزدانه و همچنین رطوبت کم (به دلیل خشکسالی) مستعد فرسایش بادی است. سرعت وزش باد، خشکی هوا و کم بودن میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک باعث فرسایش شدید در منطقه مورد بررسی شده است. تصاویر ماهواره ای نشان می دهد که ذرات گرد و غبار ناشی از فرسایش بادی از دشت سیستان تا خلیج فارس گسترش می یابد که نشان از فرسایش ذرات ریز و معلق در منطقه دارد (Esmaili et al., 2006). همچنین تصاویر ماهواره ای نشان می دهد که ذرات ریز ناشی از فرسایش بادی در دشت سیستان هزاران کیلومتر نیز جابه جا می شوند (Barrie & Nickovic, 2009). هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر فرسایش بادی بر روی خصوصیات مهندسی خاک ها در دشت سیستان می باشد. برای این منظور، چهار محدوده با شرایط مختلف کاربری که با شدت متفاوتی تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارند در دشت سیستان انتخاب و با انجام آزمون های صحرائی و آزمایشگاهی خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه برداری و آزمایش های صحرائی در زمستان ۱۳۸۵ و زمستان ۱۳۸۷ انجام شده است. وزن واحد حجم درجا و مقاومت برشی خاک ها در محل اندازه گیری شده است و آزمایش های تعیین درصد رطوبت، دانه بندی، حدود اتربرگ و تراکم پس از نمونه برداری در آزمایشگاه انجام شده است.

## ۲- زمین شناسی محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در شرق ایران و در شمال استان سیستان و بلوچستان و در موقعیت طول جغرافیایی  $61^{\circ}14'53''$  تا  $61^{\circ}48'20''$  و عرض جغرافیایی  $30^{\circ}43'52''$  تا  $31^{\circ}20'49''$

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیم‌بندی آب و هوایی بر اساس روش‌های گوسن، آمبرژه و فائو در اقلیم گرم و خشک طبقه‌بندی می‌گردد (احمدی ۱۳۸۵). میزان بارندگی سالیانه این منطقه حدود ۵۰ میلی‌متر است، مهم‌ترین منبع تأمین آب دشت سیستان، رودخانه هیرمند است که از افغانستان به این منطقه وارد می‌شود (UNEP, 2006). بادهای مختلف محلی در منطقه می‌وزند که مهم‌ترین آنها بادهای ۱۲۰ روزه می‌باشند، این بادهای از اردیبهشت شروع می‌شوند و تا اواخر شهریور ادامه می‌یابند و عامل مهمی در فرسایش بادی منطقه هستند. سرعت وزش این بادهای گاهی به ۱۲۰ km/h می‌رسد و جهت غالب آن شمال و شمال‌غرب است (Miri et al, 2009).

واقع شده است. شکل ۱ محل مطالعه و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. از نظر زمین‌شناسی دشت سیستان بخشی از بلوک هلمند است که در اثر حرکات تکتونیکی در اواخر ترشیاری و اوایل کواترنر به وجود آمده است (نبوی ۱۳۵۶). تنها بیرون‌زدگی سنگی منطقه، کوه خواجه با قطر ۲ تا ۲/۵ کیلومتر و ارتفاع ۶۱۲ متر بوده که جنس آن از بازالت و آهک است (ابراهیم‌زاده و همکاران ۱۳۸۳). بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه، رسوبات منطقه مربوط به عهد حاضر و عمدتاً رسوبات ریزدانه رودخانه‌ای و دریاچه‌ای می‌باشند (شکل ۲). رودخانه هیرمند و دیگر رودخانه‌های موجود، در طول عمر خود، بارها تغییر مسیر داده‌اند و رسوبات به جای مانده از آنها در کل دشت، واحدهای زمین‌شناختی کهن‌تر را پوشش داده است (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۳).



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری (نقاط مشکی)

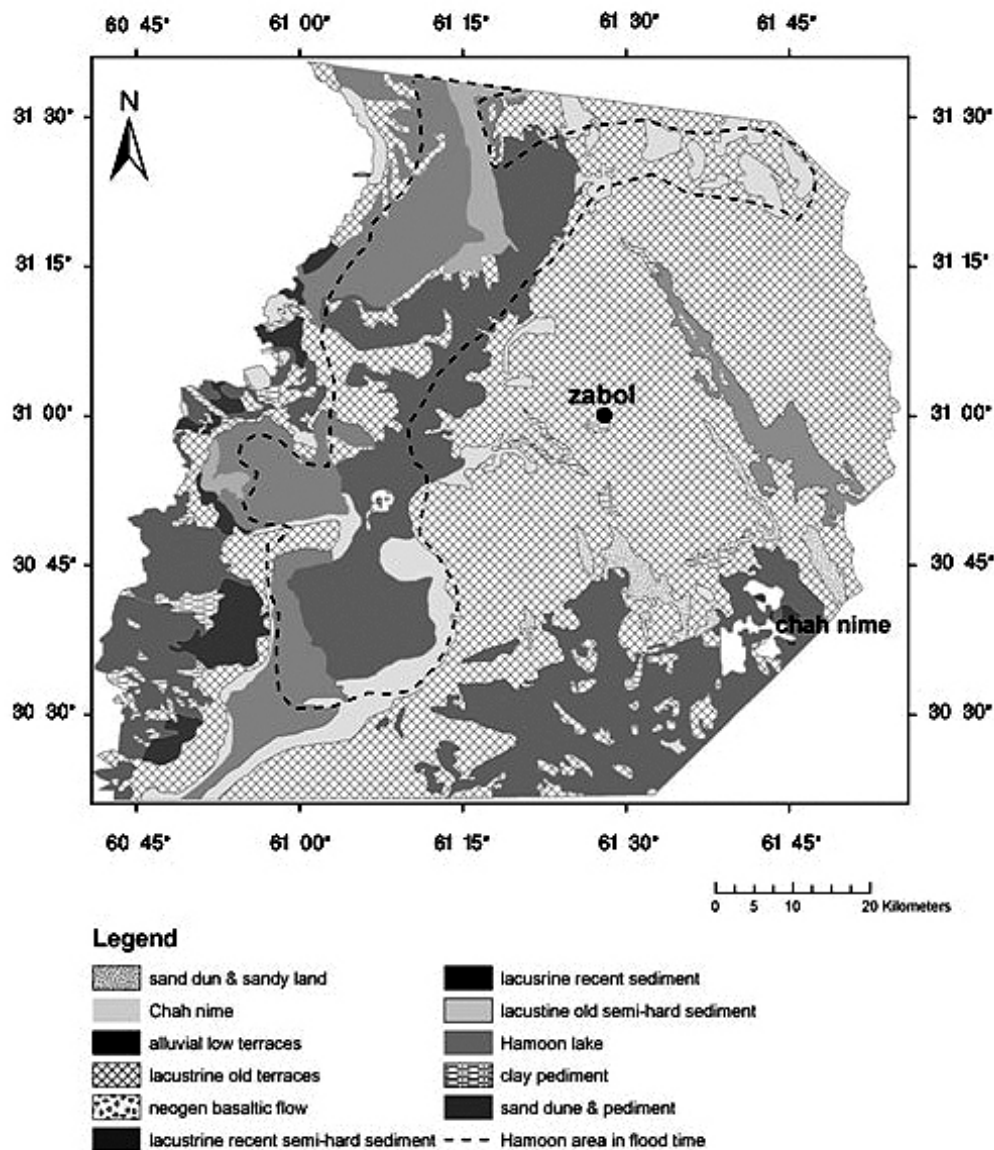
### ۳- ژئومرفولوژی منطقه:

منطقه مورد مطالعه در انتهای حوضه آبریز رودخانه هیرمند قرار دارد و این رودخانه به همراه چند رودخانه فصلی دیگر مانند خاش رود و فررود از مهم ترین منابع تأمین رسوب منطقه هستند. تیپ های ژئومرفولوژی منطقه شامل پلایا، مخروط افکنه، پهنه های رسی، دشت سراپانداژ و دشت سرپوشیده می باشد (شکل ۳). در خشکسالی های سال های اخیر تمامی این محدوده ها تحت فرسایش شدید بوده و در رخساره های ژئومرفولوژی تغییراتی ایجاد گردیده است. به عنوان نمونه

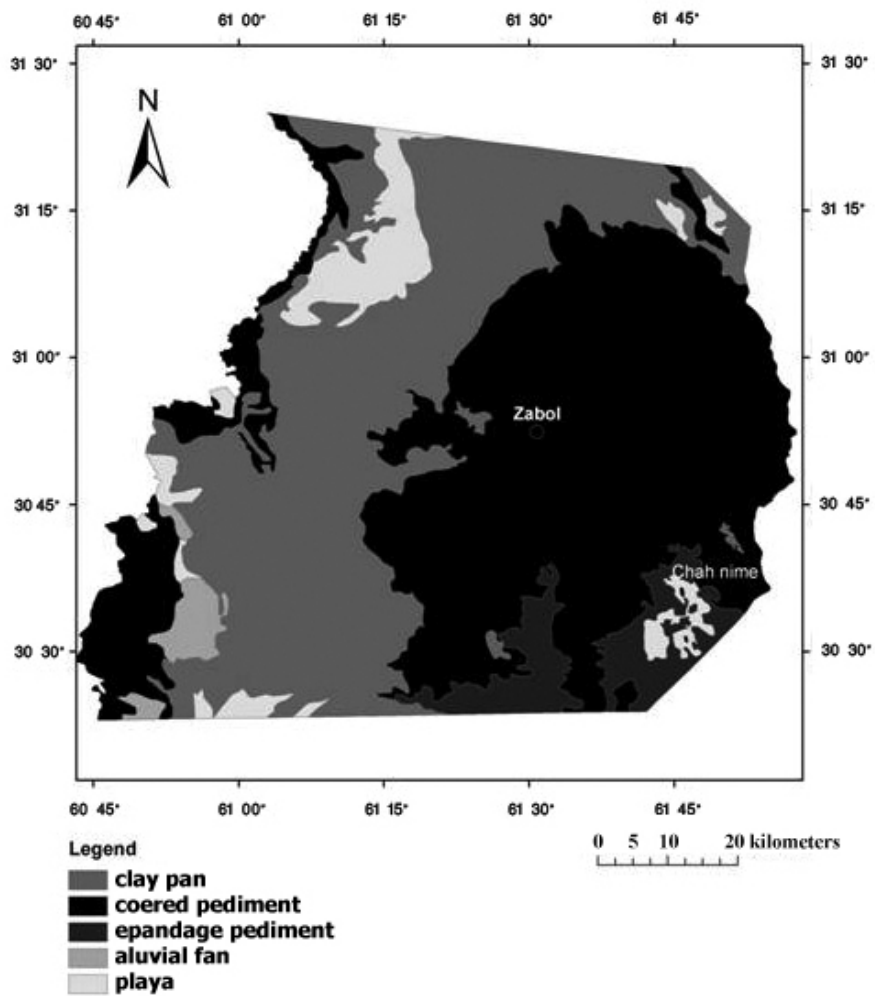
برخی از مناطق که جزو زمین های کشاورزی و مسکونی طبقه بندی می شده اند در حال حاضر به عنوان پهنه های ماسه ای طبقه بندی می شوند.

### ۴- اهمیت فرسایش بادی در منطقه :

کمبود نزولات جوی و خشک شدن دریاچه ی هامون سبب تشدید فرسایش بادی در سیستان شده است. شدت فرسایش در منطقه به حدی است که ریشه برخی از درختان محلی در سطح خاک نمایان می شود (شکل ۴).



شکل ۲: زمین شناسی منطقه (با اقتباس و تصحیح از نقشه مهندسی مشاور جامع ایران، ۱۳۸۳)



شکل ۳: ژئومرفولوژی منطقه (با اقتباس و تصحیح از نقشه مهندسین مشاور جامع ایران ۱۳۸۳)



شکل ۴: خروج ریشه درختان بر اثر فرسایش بادی

یک محدوده فاقد پوشش گیاهی است. محدوده سوم از زمین‌های بایر و فاقد پوشش گیاهی و محدوده چهارم، زمین‌های کشاورزی که شخم زده شده‌اند، اما به دلیل خشکسالی، کشت و زرع در آنها نشده، انتخاب شده است. نمونه‌برداری در دو بازه زمانی در زمستان ۱۳۸۵ و زمستان ۱۳۸۷ انجام شده است. موقعیت نمونه‌ها توسط GPS تعیین و بر روی نقشه پایه پیاده شده است. نمونه‌برداری از نقاط بدون پوشش گیاهی از محل‌هایی انجام شده است که هیچگونه عارضه‌ای در مسیر وزش باد وجود نداشته باشد و باعث تغییر در سرعت باد نگردد. نقاط دارای پوشش گیاهی، با پوشش گیاهی بیشتر از ۴۰ درصد انتخاب شده است که مانع فرسایش بادی می‌گردد (Li et al., 2003). زمین‌های کشاورزی و زمین‌های بایر طوری انتخاب شده‌اند که پوشش گیاهی و موانع موجود در مسیر وزش باد در اطراف و داخل آنها کمتر از ۵ درصد باشد. در هنگام نمونه‌برداری در سال ۱۳۸۷، تعدادی از زمین‌های کشاورزی و بایر توسط رسوبات بادی تحت تأثیر قرار گرفته بودند و نوع خاک آنها به طور کامل تغییر کرده بود؛ همچنین تعدادی از زمین‌های کشاورزی بعد از سال ۱۳۸۵ رها شده و تبدیل به زمین‌های بایر شده بودند که در این تحقیق مورد مطالعه و نمونه‌برداری قرار نگرفتند. زمین‌های بایر و کشاورزی از نظر زمین‌شناسی در تراس‌های کهن دریاچه‌ای و از نظر ژئومورفولوژی در دشت سر پوشیده انتخاب شده‌اند. نقاط دارای وزن واحد حجم برجای نسبتاً یکسان در هر منطقه انتخاب شده تا حداقل اختلاف در خصوصیات مهندسی اولیه نمونه‌ها رعایت شده باشد. در هر قطعه زمین، دو تا چهار نقطه انتخاب شده و در هر نقطه سه تا چهار نمونه خاک جهت آزمون‌های آزمایشگاهی اخذ شده است. جدول ۱، تعداد نمونه‌های اخذ شده، نوع خاک و تعداد آزمون‌ها را نشان می‌دهد.

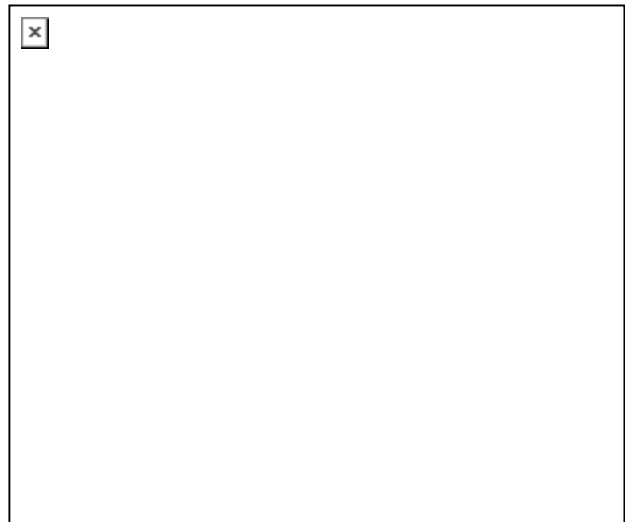
#### ۶- آزمایشات برجا

##### ۶-۱ مقاومت برشی خاک

یکی از عوامل مؤثر در دیرفرسایی خاک، مقاومت برشی آن است. در مطالعه حاضر جهت تعیین مقاومت برشی زهکشی

بررسی نقشه‌ی سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در دشت سیستان که توسط مهندسین مشاور جامع ایران (۱۳۸۳) رسم گردیده (شکل ۵)، نشان می‌دهد که اکثر خاک‌های دشت سیستان به سهولت در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند؛ لازم بذکر است با توجه به بافت خاک، سرعت آستانه برای شروع فرسایش بادی حداکثر ۱۰ متر بر ثانیه است. در حالیکه سرعت وزش باد بعضاً به ۳۳ متر بر ثانیه نیز می‌رسد (Miri et al., 2009).

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که ایلیت و کلریت، کانی‌های رسی چیره در خاک‌های منطقه هستند و اندیس پلاستیسیته‌ی خاک‌ها به ۲۵ هم می‌رسد (خامه‌چیان و همکاران، ۱۳۸۴). فرسایش بادی با حمل ذرات ریز سیلت و رس، باعث تغییر بافت خاک می‌گردد. این تغییر معمولاً تدریجی است (برزگر، ۱۳۸۰). به همین علت در این تحقیق بررسی نقش فرسایش بادی در ایجاد تغییر در میزان اندیس پلاستیسیته، مقاومت برشی (ناشی از میزان رس موجود در خاک) و تغییر میزان تراکم پذیری خاک، ناشی از تغییر بافت خاک، مد نظر قرار گرفته است.



شکل ۵: نقشه سرعت آستانه باد برای فرسایش پذیری

خاک‌های منطقه (مهندسین مشاور جامع ایران ۱۳۸۳)

#### ۵- نمونه برداری :

همان‌طورکه بیان شد مطالعات حاضر در چهار ناحیه با کاربری متفاوت انجام گردید. دو محدوده در داخل دریاچه هامون انتخاب گردید که یک محدوده دارای پوشش گیاهی و

این معنی که اختلاف قابل قبولی بین دو میانگین وجود ندارد. اگر بین دو میانگین اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌داری وجود داشته باشد؛ مقدار P کوچک‌تر از صفر می‌شود. حال چنانچه مقدار اختلاف در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار باشد؛  $P < 0.001$  و اگر در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار باشد  $P < 0.005$  خواهد بود. ضریب تغییرات (CV) نیز بیان‌کننده میزان تغییرات اعداد اندازه‌گیری شده نسبت به میانگین است؛ معمولاً ضریب تغییرات کمتر از ۱۰ نشان‌دهنده هماهنگی مناسب نتایج با یکدیگر است. CV اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها در این تحقیق کمتر از ۱۰ است.

جدول ۱: نوع خاک، تعداد نمونه‌ها و آزمایش‌ها

تعداد آزمایش‌ها							تعداد نمونه	نوع خاک	نوع کاربری
وزن رطوبت‌دار	وزن رطوبت‌ناقص	دانه بندی	سیلتی	رسی	کل	کل			
۱۲۱۵	۴۹۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	رسی	زمین‌های کشاورزی	
۶۹۸	۲۸۲	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	سیلتی		
۸۰۸	۳۳۲	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	رسی - سیلتی	زمین‌های بایر	
۹۳۳	۴۰۱	۸۲	۸۲	۸۲	۸۲	۸۲	رسی	زمین‌های دارای پوشش درون	
۹۱۱	۲۹۳	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	سیلتی		
۶۵۸	۲۴۵	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	رسی	زمین‌های بدون پوشش درون	
۴۱۰	۱۸۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	سیلتی		
۵۱۵	۲۱۹	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	رسی	بدون پوشش درون	
۵۲۶	۲۰۵	۴۱	۴۱	۴۱	۴۱	۴۱	سیلتی		

۸-۱ درصد رطوبت خاک: بررسی نتایج درصد رطوبت طبیعی خاک نشان‌دهنده‌ی رطوبت بسیار کم خاک است؛ به‌طوری‌که درصد رطوبت خاک در تمام نقاط بین ۰/۷ تا ۴ درصد در هر دو سال متغیر می‌باشد.

نشده از دستگاه برش پره‌ای جیبی مدل 16-T0175/2 استفاده شده است. مطالعات انجام شده در سایر نقاط جهان نشان می‌دهد که با استفاده از دستگاه فوق می‌توان مقاومت برشی خاک‌های سطحی را تا حد قابل قبولی تعیین نمود (Zimbone et al., 1996; Gossens et al., 2004). برای تعیین مقاومت برشی در محل هر نمونه‌گیری، ۱۰ تا ۱۵ بار آزمایش تکرار شده و میانگین اعداد به عنوان عدد نهایی در نظر گرفته شده است. نمونه‌گیری از عمق حداکثر ۱۰ سانتی‌متری انتخاب شده است.

#### ۶-۲ وزن واحد حجم خشک

جهت اندازه‌گیری وزن واحد حجم در محل، تعداد ۴ تا ۶ نمونه توسط یک استوانه (به قطر و ارتفاع ۵ cm)، از عمق حداکثر ۱۰ سانتی‌متر تهیه شده و وزن واحد حجم خشک آن محاسبه شده است، میانگین وزن واحد حجم خشک محاسبه شده به عنوان عدد نهایی در محل در نظر گرفته شده است.

#### ۷- آزمون‌های آزمایشگاهی

درصد رطوبت کلیه نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D4959-07 تعیین شده است. همچنین حدود اتربرگ و اندیس خمیری نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D 4318-05 و دانسیته خشک حداکثر بر اساس استاندارد ASTM D 698-00 تعیین شده است. همچنین بافت خاک در برخی نمونه‌ها با میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۸- بررسی نتایج

پس از اندازه‌گیری خصوصیات مهندسی خاک‌ها، میانگین هرکدام از خصوصیات جداگانه محاسبه شده است؛ سپس میانگین مربوط به سال ۱۳۸۵ با میانگین سال ۱۳۸۷ با استفاده از آزمون فرض آماری P- مقدار<sup>۵</sup>، مقایسه شده است. در این فرض آماری که فرضیه صفر نیز نامیده می‌شود؛ اگر مقدار P مساوی یا بزرگتر از صفر باشد؛ اختلاف معنی‌دار نیست؛ به

<sup>5</sup> - P- Value

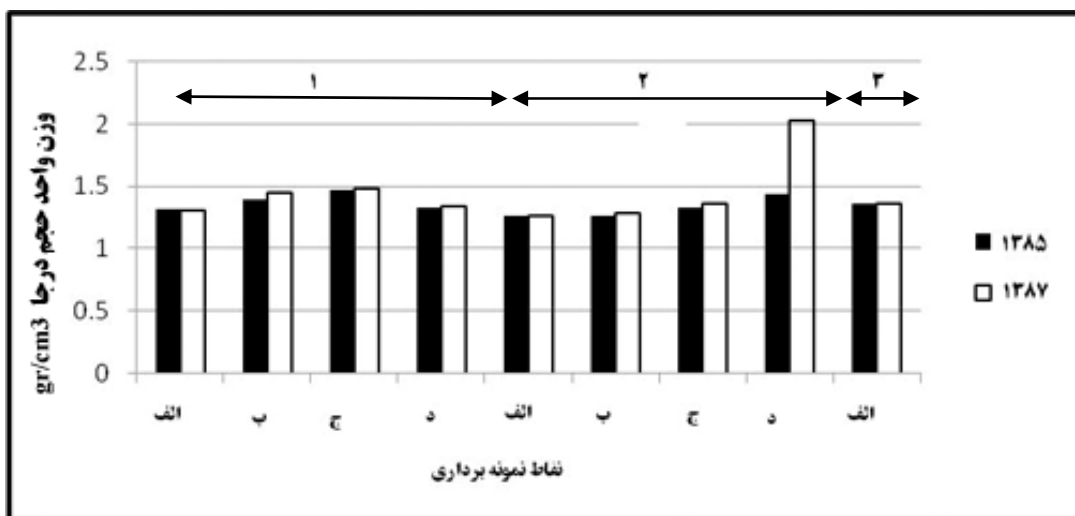
۲-۸ وزن واحد حجم درجا

مقدار وزن واحد حجم در جای خاک‌ها کمتر از ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است که نشان دهنده‌ی بافت سست خاک و استعداد فرسایش‌پذیری آنها می‌باشد. نتایج حاکی از افزایش وزن واحد حجم خشک همه نمونه‌ها (در بازه دو سال مورد بررسی) به جز زمین‌های کشاورزی می‌باشد. مقدار افزایش وزن واحد حجم برجا برای زمین‌های سیلتی و دریاچه‌ای بدون پوشش گیاهی بسیار زیاد و در درجه دوم در زمین‌های

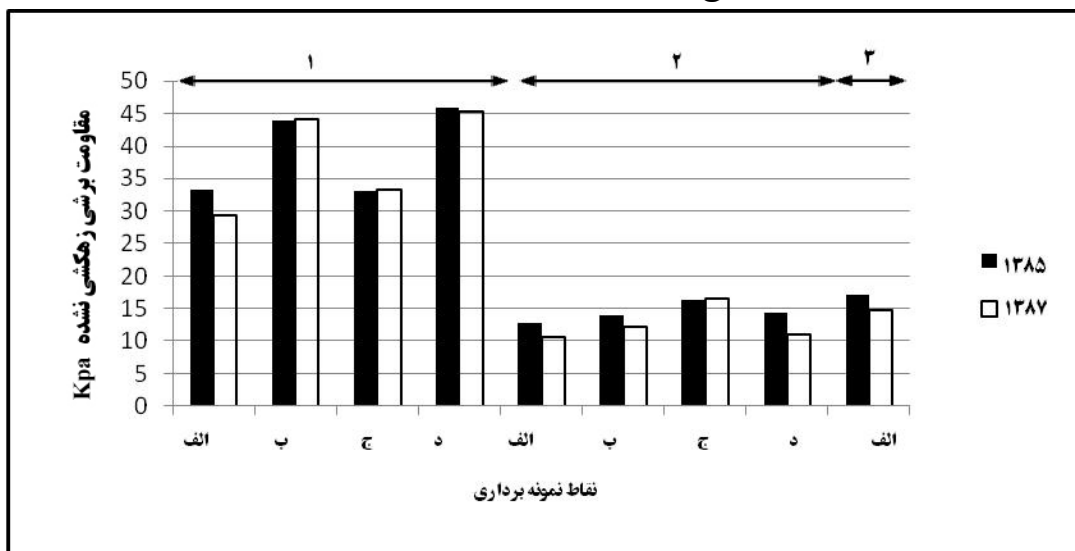
بایر رسی افزایش بیشتری نشان می‌دهد. افزایش وزن واحد حجم خشک به معنای سیلتی شدن خاک می‌باشد (شکل ۶)

۳-۸ مقاومت برشی خاک

مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌ها که نشان‌دهنده چسبندگی خاک‌ها نیز می‌باشد؛ در اکثر خاک‌ها کمتر از ۵۰ کیلوپاسکال است (شکل ۷).



شکل ۶: میانگین وزن واحد حجم درجا. ۱=رسی، ۲=سیلتی، ۳=سیلتی\_رسی  
 الف=کشاورزی، ب=بایر، ج=دریاچه واجد پوشش گیاهی، د=دریاچه فاقد پوشش گیاهی

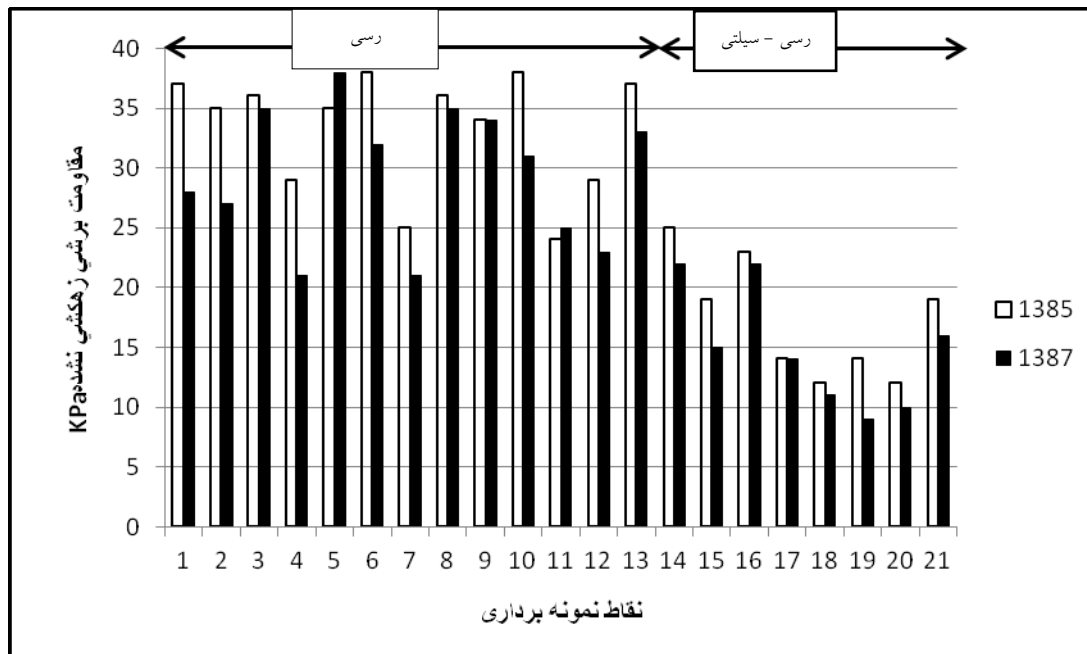


شکل ۷: میانگین مقاومت برشی زهکشی نشده. ۱=رسی، ۲=سیلت، ۳=سیلتی\_رسی  
 الف=کشاورزی، ب=بایر، ج=دریاچه واجد پوشش، د=دریاچه فاقد پوشش



اندازه‌گیری مقاومت برشی زهکشی نشده در ۱۳ زمین رسی و ۸ زمین رسی - سیلتی با کاربری کشاورزی، نشان می‌دهد که با گذشت زمان و فرسایش خاک، مقاومت برشی سطحی

خاک‌ها عموماً کاهش می‌یابد (شکل ۸). مقدار این کاهش برای خاک‌های سیلتی و سیلتی رسی که در اصل مقاومت برشی کمتری دارند بیشتر بوده است.



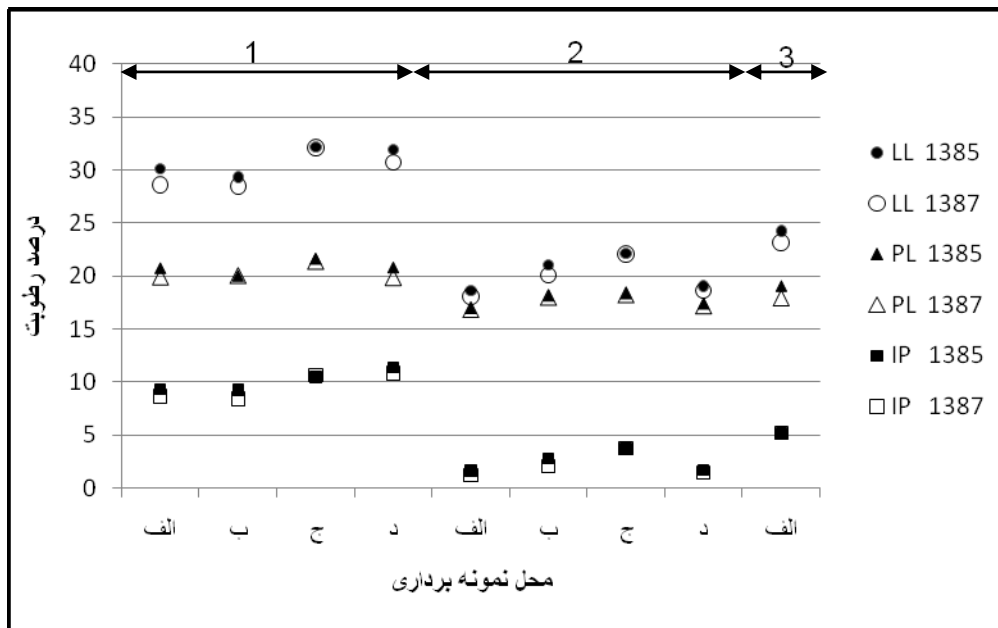
شکل ۸: تغییر مقاومت برشی زهکشی نشده در زمین‌های کشاورزی

#### ۴-۸- حدود اتربرگ

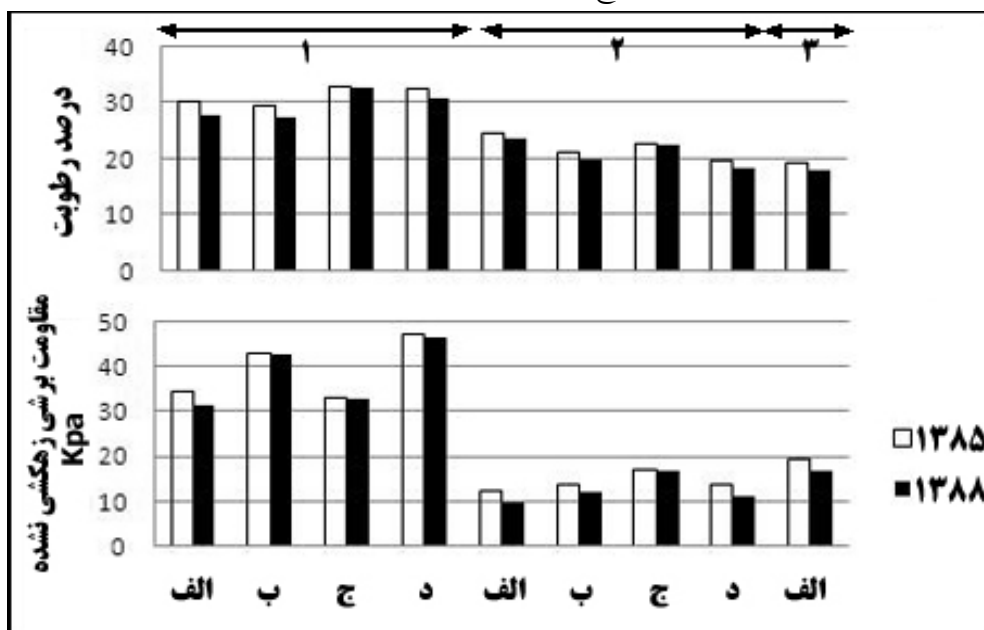
حد روانی کلیه نمونه‌های مورد بررسی کمتر از ۳۵ درصد است؛ و شاخص خمیری نیز کمتر از ۱۲ می‌باشد که در طی دو سال اندازه‌گیری کاهش نیز یافته است (شکل ۹). مقدار حدود اتربرگ در زمین‌های رسی کشاورزی و شخم زده شده کاهش مشخصی را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین‌های به دست آمده و محاسبه عدد P برای حدود اتربرگ در زمین‌های کشاورزی رسی کاملاً معنی‌دار است؛ به طوری که مقدار  $P < 0.0001$  برای حد روانی و  $P < 0.05$  برای حد خمیری و اندیس پلاستیسیته به دست آمده است. مقدار ضریب تغییرات (CV) نیز برای حد خمیری و روانی کمتر از ۵ و برای اندیس پلاستیسیته کمتر از ۱۰ است. در زمین‌های کشاورزی سیلتی مقداری کاهش در حد روانی دیده می‌شود؛ اما در حد خمیری و اندیس پلاستیسیته روند خاصی مشاهده نمی‌شود و در کل، تغییرات معنی‌دار نیستند. در زمین‌های بایر رسی و سیلتی مقدار تغییر و کم شدن حد روانی و اندیس پلاستیسیته

در حد  $P < 0.05$  معنی‌دار است اما تغییرات حد خمیری روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. در زمین‌های رسی محدوده بدون پوشش گیاهی، اگرچه حدود اتربرگ کاهش نشان می‌دهند؛ اما این کاهش تنها برای حد روانی معنی‌دار است ( $P < 0.05$ ). مقدار CV در این محدوده کمتر از ۱۰ است. در زمین‌های سیلتی این محدوده در مقدار حدود اتربرگ تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود. همچنین در زمین‌های دارای پوشش گیاهی در دریاچه هامون هیچ‌گونه تغییر معنی‌داری در مقدار حدود اتربرگ مشاهده نمی‌شود.

در زمین‌های کشاورزی به دلیل شخم‌زدن، خاک کاملاً زیر و رو می‌شود و ذرات ریز با وزش باد حمل شده و از محل خارج می‌شوند. با حمل ذرات ریز رسی، علاوه بر کم شدن حد روانی خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک (چسبندگی خاک) نیز کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). در دو نقطه در محدوده دریاچه با خاک سیلتی و با پوشش گیاهی؛ افزایش چسبندگی در خاک دیده می‌شود.



شکل ۹: میانگین حدود اتربرگ در محدوده‌های مورد مطالعه ۱=رس، ۲=سیلت، ۳=رسی - سیلتی  
الف = کشاورزی، ب = بایر، ج = دریاچه واجد پوشش، د = دریاچه فاقد پوشش



شکل ۱۰: مقایسه حد روانی با مقاومت برشی زه کشی نشده ۱=رس، ۲=سیلت، ۳=رسی - سیلتی  
الف = کشاورزی، ب = بایر، ج = دریاچه واجد پوشش، د = دریاچه فاقد پوشش

دارای پوشش گیاهی با گذشت زمان چسبندگی خاک را زیاد کرده است.

در خاکهای کشاورزی از نوع CL، مقدار LL, PL, IP کاهش یافته است. مقدار تغییرات کاملاً معنی دار است (برای LL،

این دو نقطه دارای پوشش بالای نود درصد بوده و سطح زمین توسط گیاهان هرز و خودرو پوشیده شده است. افزایش چسبندگی در زمین‌های سیلتی با پوشش گیاهی می‌تواند به دلیل وجود مواد آلی موجود در خاک باشد که در محدوده

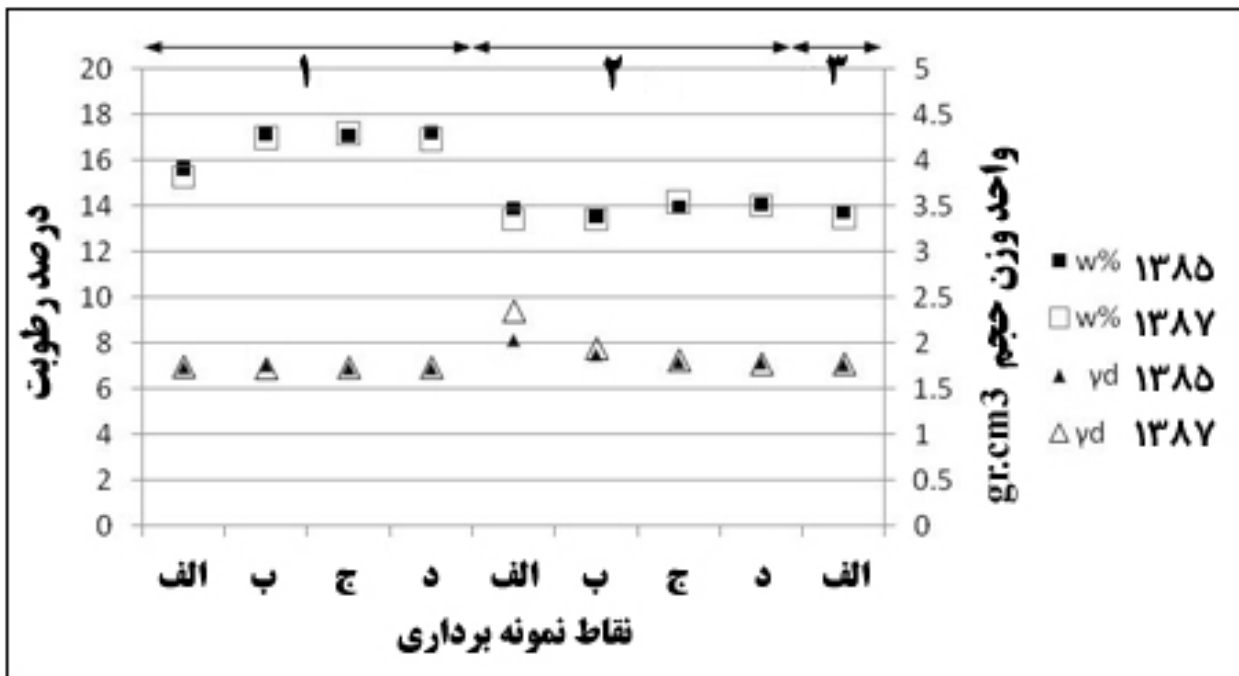
$P < 0.0001$  و برای  $IP$ ،  $PL$  و  $P < 0.05$ ). کم شدن مقدار رس و کاهش پلاستیسیته خاک باعث شده است که مقدار مقاومت زهکشی نشده خاک نیز کاملاً کاهش یابد ( $p < 0.05$ ). کاهش رس خاک، باعث کم شدن حد روانی و چسبندگی خاک می‌شود، اما حد خمیری تغییرات شدیدی نشان نمی‌دهد. در زمین‌های کشاورزی از نوع  $ML$ ، مقدار تغییر معنی‌داری در حدود اتربرگ مشاهده نمی‌شود. به دلیل اینکه مقدار رس موجود در خاک کم بوده و با توجه به اینکه خاک سیلتی است؛ فرسایش باعث می‌شود تا ذرات سیلتی فاقد چسبندگی به همراه ماسه‌های ریزدانه، فرسایش یابند و بافت کلی خاک تغییری نکند. مطالعات نشان می‌دهد که حمل ماسه و سیلت تبعیت چندانی از هم نمی‌کنند و مقدار سیلت در فرسایش ماسه بی‌تأثیر است (Mao and Liejin, 2009). بنابراین در این گونه خاک‌ها، فرسایش بادی، در حدود اتربرگ نیز اثر مشخصی ندارد. در زمین‌های بایر به دلیل اینکه کمتر دستخوش تغییرات انسانی، مانند شخم زدن می‌شوند؛ میزان کاهش حد روانی و اندیس پلاستیسیته کمتر است.

#### ۵-۸ تراکم پذیری

نتایج آزمایش تراکم در زمین‌های مختلف نشان می‌دهد که مقدار وزن واحد حجم خشک خاک تغییر محسوسی ندارد و تنها در زمین‌های کشاورزی سیلتی افزایش یافته است؛ اما میزان رطوبت بهینه در اکثر نقاط کاهش نشان می‌دهد (شکل ۱۱) این امر بیانگر سیلتی شدن بیشتر خاک می‌باشد. (Raghavan et al, 1977).

#### ۶-۸ مطالعات میکروسکوپی

وجود حالت برفکی در نمونه‌های میکروسکوپی نشان دهنده‌ی تأثیر فرسایش بادی بر روی نمونه‌ها است. مطالعات میکروسکوپی یک نمونه از خاک‌های اخذ شده در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. در این شکل حالت برفکی موجود در شکل نشان می‌دهد که این نمونه‌ها تحت تأثیر فرسایش بادی قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز تصاویر میکروسکوپی از گردش‌دگی نمونه‌های خاک‌های منطقه را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱: میانگین نتایج آزمایش تراکم در محدوده‌های مورد مطالعه. ۱=رس، ۲=سیلت، ۳=سیلتی\_رسی

الف= کشاورزی، ب= زمین بایر، ج= دریاچه دارای پوشش، د= دریاچه فاقد پوشش

### ۹- نتیجه گیری

در خاک‌های محدوده مورد مطالعه در دشت سیستان، وزن واحد حجم اندازه‌گیری شده در اکثر نقاط، کم بوده (بین ۱/۳۳ تا ۲/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب)؛ و خاک را مستعد فرسایش می‌نماید. نتایج آزمون‌های برش پره‌ای نیز از کم بودن مقدار چسبندگی خاک‌های دشت سیستان حکایت دارد، به‌طوری‌که مقدار مقاومت زهکشی نشده خاک‌ها در تمام مناطق کمتر از ۵۰ کیلو پاسکال است. این مسئله در مطالعات قبلی نیز تأیید شده است (UNEP, 2006; Miri et al., 2009). مطالعات میکروسکوپی انجام شده بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد که منشاء اولیه خاک‌ها یکسان است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر افزایش مقدار وزن واحد حجم درجای اندازه‌گیری شده در مرحله دوم در غالب نقاط نمونه‌برداری می‌باشد که دلیل اصلی آن برداشته شدن لایه سست فوقانی توسط باد و رخنا شدن لایه متراکم‌تر زیری می‌باشد.

مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های دشت سیستان کم و ناچیز است. بر اساس مطالعات لی و همکاران (۲۰۰۳)، معمولاً نقاطی که دارای خاک‌های چسبنده هستند؛ کمتر از سایر نقاط در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند. در محدوده مورد مطالعه اولاً به دلیل خشک بودن خاک و ثانیاً به دلیل کم بودن چسبندگی خاک، رس‌ها در جلوگیری از فرسایش تأثیر کمی دارند و در اثر بادهایی که در منطقه می‌وزد رس‌ها جزو اولین ذراتی هستند که فرسایش می‌یابند و تا فواصل دور حمل میشوند. مائو و لایی جین (۲۰۰۹) معتقدند که ضربه‌های ناشی از ذرات درشت‌تر، باعث می‌شود که ذرات ریزتر فرسایش یابند و گردوغبار تولید کنند.

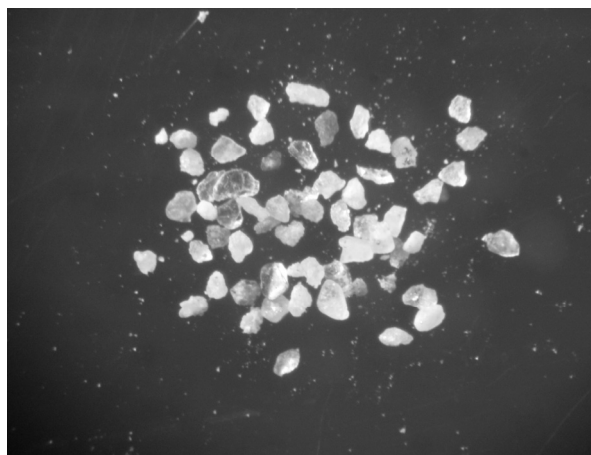
به طور کلی نتایج این تحقیق بیانگر آن است که با ادامه فرسایش بادی در منطقه تمام زمین‌ها با کاربری‌های مختلف به سمت سیلنتی شدن پیش می‌روند و با گذشت زمان از مقدار چسبندگی خاک‌ها بیش از پیش کاسته می‌شود؛ که این امر می‌تواند علاوه بر تغییر بیشتر خصوصیات خاک، باعث کاهش حاصلخیزی خاک شده و بر شدت فرسایش‌پذیری خاک بیفزاید و با ادامه‌ی خشکسالی و فرسایش بادی مشکلات موجود در منطقه وخیم تر نیز شود.



شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپی نمونه‌ای از خاک منطقه با حالت برفکی (بزرگنمایی ۶۰۰)



شکل ۱۳: ذرات مانده روی الک شماره ۱۰۰ با بزرگنمایی ۳۰۰



شکل ۱۴: ذرات مانده روی الک ۲۰۰ با بزرگنمایی ۶۰۰

## منابع

- ابراهیم زاده، عیسی؛ لشکری پور، غلامرضا؛ مریدی، علی اصغر. ۱۳۸۳، تأثیر عوامل زمین‌شناسی در تغییر مسیر رودخانه‌ی هیرمند و نقش تاریخی آن در جابجایی سکونتگاه‌ها در سیستان. مجله جغرافیا و توسعه، پاییز و زمستان. شماره ۴، ص ۵-۲۰
- احمدی، حسن. ۱۳۸۵، ژئومرفولوژی کاربردی، جلد دوم، بیابان- فرسایش بادی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.
- برزگر، عبدالرحمن، ۱۳۸۰. مبانی فیزیک خاک، دانشگاه شهید چمران، اهواز
- خامه چیان، م؛ رحیمی، ا؛ لشکری پور، غ؛ سلوکی، ح. ر. ۱۳۸۴. بررسی علل فرسایش خاکهای دشت سیستان از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی با نگرش خاص به پدیده واگرایی. مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۳۱. ص ۲۶۸-۲۵۳.
- مهندسین مشاور جامع ایران. ۱۳۸۳، مطالعات جامع بیابان زدایی و مقابله با فرسایش بادی دشت سیستان، منابع اراضی و خاک. وزارت جهاد کشاورزی، دفتر تثبیت شن و بیابانزدایی.
- مهندسین مشاور سازآب شرق. ۱۳۸۲، مطالعات شناسایی منشاء، جهت جریان و محل‌های رسوبگذاری ماسه‌های روان (منطقه شمال رودخانه سیستان)، جلد نهم: منشاء یابی رسوبات بادی. وزارت نیرو، شرکت سهامی توسعه منابع آب و خاک سیستان.
- نبوی، محمد حسن. ۱۳۵۶، دیباچه ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- ASTM. 2005. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. D 4318-05, ASTM International 8pp
- ASTMD698-00a. 2003. Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort, *Annual Book of ASTM Standards*, American Society For Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 78-87 04.08
- ASTM. Standard D4959, 2007. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barrie, L., Nickovic, S. 2009. A Global View of Atmospheric Sand and Dust: Occurrence, Prediction and Impacts. ESA/WMO SDS WAS Satellite Products Workshop 8-9 Sept Barcelona.
- Chen, W., Fryrear, D. W., 1996. Grain-Size Distribution of Wind Eroded Material Above a Flat Bare Soil. *Physical. Geography*. 17, 554 – 584.
- Cho, G.C., Dodds, J., Santamarina, J.C., 2006. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 132, 591-602
- Esmaili, O., Tajrishy, M., Daneshkar Arasteh, P., 2006. Results of the 50 Year Ground-Based Measurements in Comparison with Satellite Remote Sensing of Two Prominent Dust Emission Sources Located in Iran. *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XI*, edited by James R. Slusser, Klaus Schafer, Adolfo Comeron. Proc. of SPIE Vol. 6362.
- Gomes, L., Arrue, J.L., Lopez, M.V., Streck, G., Richard, D., Garcia, R., Sabre, J.M., Gaudichet, A., Frangi, J.P., 2003. Wind Erosion in a Semiarid Area of Spain: the WELSONS project. *Catena* 52, 235-256.
- Goossens, D., 2004. Effect of Soil Crusting on the Emission and Transport of wind-eroded Sediment: Field Measurements on Loamy Sandy Soil. *Geomorphology*. 58, 145-160
- Li, F. R., Zhang, H., Zhang, T. H., Shirato, Y., 2003. Variation of Sand Transportation Rates in Sandy Grasslands along a Desertification Gradient in Northern China. *Catena*. 53, 255-272
- Li, F.R., Zhao, L.Y., Zhang, H., Zhang, T.H., Shirato, Y., 2004. Wind Erosion and Airborne Dust Deposition in Farmland During Spring in the Horqin Sandy Land of Eastern Inner Mongolia, China. *Soil & Tillage Research*. 75, 121-130
- Liu, S., Wang, T., Chen, G., Guo, J., Xue, X., Ma, S., 2008. Field Investigation of Surface Sand and Dust Movement over Different Sandy Grasslands in the Otindag Sandy Land, China. *Environmental Geology*. 53, 1225-1233
- Lopez, M. V., 1998. Wind Erosion in Agricultural Soil: an Example of Limited Supply of Particle Available for Erosion. *Catena* 33, 17-28

- Mao, X., Liejin, G., 2009. The Dust Emission Law in the wind Erosion Process on Soil Surface. Science China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy. 52, 258-269
- Miri, A., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M. R., Panjekeh, N., Ghanbari, A., 2009. Environmental and Socio-Economic Impacts of Dust Storms in Sistan Region, Iran. International Journal of Environmental Studies. 66, 343-355
- Nordstrom, K.F., Hotta, S., 2004. Wind Erosion from Cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. Geoderma. 121, 157-167
- Raghavan, G. S., Mckyes, E., Beaulieu, B., 1977. Prediction of Clay Soil Compaction. Journal of Terramechanics. 14, 31- 38.
- UNEP, 2006. History of Environmental Change in the Sistan Basin Based on Satellite Image Analysis: 1976 – 2005, Geneva, UNEP Post-Conflict Branch
- Zhao, H.L., Yi, X.Y., Zhou, R.L., Zhao, X.Y., Zhang, T.H., Drake, S., 2006. Wind Erosion and Sand Accumulation Effects on Soil Properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. Catena 65, 71 – 79.
- Zhibao, D., Zunming, W., Lianyou, L., 2000. Wind Erosion in Arid and Semiarid China: an overview. Journal of Soil Conservation. 55, 439 – 444.
- Zimbone, S.M, Vickers, A., Morgan, R.P.C., Vella, P., 1996. Field Investigations of Different Techniques for Measuring Surface Soil Shear Strength. Soil Technology 9, 101-111