

تأثیر توأم انحلال نمک‌های کربناتی یا سولفاتی و قابلیت رمبندگی بر تشدید شکل‌گیری فروچاله‌ها

دکتر وحید رضا اوحدی استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
امیر رضا گودرزی دانشجوی دکتری عمران، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

چکیده

ایجاد نشست‌های ناگهانی در سطح زمین و شکل‌گیری فروچاله‌ها در نقاط مختلفی از جهان از جمله ایران گزارش شده است. بطوریکه در سال‌های اخیر وقوع اینگونه از فروچاله‌ها در نواحی شمالی همدان حد فاصل همدان- فامنین از جمله مشکلات ژئوتکنیکی منطقه فوق می‌باشد. در این راستا نتایج مطالعات گمانه‌زنی صورت گرفته در حوالی فروچاله‌های منطقه مورد مطالعه بیانگر حضور یک سری نواحی ماسه‌ای مستعد رمبندگی و همچنین زون‌های انحلالی و آهکی در اعماق مختلف زمین است. بنحویکه به نظر می‌رسد شدت و بزرگی فروچاله‌های ایجاد شده ناشی از رفتار توأم مصالح خاص موجود در منطقه (شامل عملکرد فیزیکی رمبندگی و تأثیر شیمیایی نواحی انحلالی) بوده که این موضوع در مطالعات گذشته تا به حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس در پژوهش حاضر یا هدف در نظر گرفتن همزمان دو عملکرد رمبندگی و انحلال، با انجام تعداد قابل توجهی آزمایش اودومتری در نمونه‌های با شرایط کنترل شده، مشخص گردید خاک ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه دارای درصد بالایی از پتانسیل رمبندگی بوده که با حضور نمک‌های انحلال‌پذیر مانند سولفات سدیم و کربنات سدیم این پتانسیل به شدت افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده گردید قابلیت رمبندگی خصوصاً در حالت وجود کربنات در خاک، به شدت تابع pH آب حفره‌ای می‌باشد. لذا بر اساس نتایج بدست آمده انتظار می‌رود در مناطق مستعد رمبندگی و با حضور بیوند دهنده‌های شیمیایی، در صورت ایجاد شرایط مناسب جهت حل شدن بیوند دهنده‌ها، تأثیر توأم عملکرد فیزیکی رمبندگی و اثر انحلال نمک‌های سولفاتی و کربناتی، سبب افزایش شدت و بزرگی فرونشست‌ها گردد.

کلمات کلیدی: فروچاله (سینک‌هول)، رمبندگی، انحلال.

Impact of Solubility of Carbonate or Sulfate Salts and Collapsible Potential on the Formation of Sinkholes

V. R. Ouhadi Department of Civil Eng., Bu-Ali Sina University
A. R. Goodarzi Department of Civil Eng., Azad University of Hamedan

Abstract

In many parts of the world, the formations of sinkholes are reported by many researches. In the past few years, several sinkholes have formed in the northern part of Hamedan, between Hamedan and Famenin cities. The geotechnical results evaluation indicates that collapsible sandy soil and Karstic bedrock contribute to the formation of those sinkholes. It is understood that the simultaneous role of those factors significantly affects the size of sinkholes. In the previous researches, the mutual role of solubility of bonding material and the presence of collapsible sandy soil are not taken into account. In the current research with consideration of this point, a series of odometer testing performed. The artificially added sodium sulfate, sodium carbonate, and carbonate calcium, made possible to consider the effect of chemical bonding on the behaviour of collapsible sandy soils. It is shown that the collapsible behaviour of sandy soil having calcium carbonate as its bonding material is very sensitive to the pH of soil pore water. It is concluded that in the area susceptible to collapsible behaviour, the presence of soluble bonding may significantly affect the size and development of sinkholes.

Key words: Sinkhole, Collapsible Soil, Solubility.

۱- مقدمه

مقدار تنش مؤثر از تنش کلی اعمال شده به خاک بیشتر شده که باعث ایجاد یک مقاومت ظاهری بزرگتر و نهایتاً پایداری موقت ساختار خاک خواهد گردید. بطوریکه با اشباع شدن و حذف نیروی موقتی، ذرات دچار لغزش یا برش روی یکدیگر شده و با حرکت به فضای خالی موجود در خاک، سبب ایجاد یک سری نشست‌های ناگهانی در سطح زمین می‌گردند [۷ و ۸]. علاوه بر این، در مناطق حاوی سنگ بستر کارستی و آهکی، احتمال وقوع نوعی دیگر از رمبندگی و ایجاد نشست‌های ناگهانی در خاک وجود داشته که عمدتاً ناشی از تشکیل غارهای کارستی و انحلال لایه‌های آهکی می‌باشد. در اینگونه از مناطق با ایجاد ترک و فضاهای خالی در اعماق پایین‌تر، لایه‌های بالایی قادر به تحمل وزن خود نبوده و بطور ناگهانی در حفرات ایجاد شده فرو خواهند ریخت [۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲]. از طرفی مجموعاً در بخش اعظم تحقیقات قبلی در رابطه با بررسی عوامل مؤثر بر پتانسیل رمبندگی خاک، صرفاً عملکرد فیزیکی بین ذرات مورد توجه قرار گرفته و نحوه اندرکنش شیمیایی مصالح کمتر مد نظر واقع شده است [۱۳، ۱۴ و ۱۵].

شکل‌گیری فرونشست‌هایی بعضاً به قطر ۲۰ و عمق تا ۲۵ متر از سال ۱۳۷۱ به بعد در محدوده شمال همدان گزارش شده است (شکل ۱). بنحوی که با توجه به نتایج تعداد زیادی از مطالعات موجود، دلایل ایجاد این چنین نشست‌هایی واقع در نقاط مختلف جهان عمدتاً ناشی از حضور خاک‌های رمبند و یا حضور نواحی انحلالی و کارستی در اعماق مختلف زمین مطرح گردیده که در بیشتر موارد، کاهش سطح سفره آب زیرزمینی سبب تشدید بزرگی فرونشست‌ها گردیده است [۱، ۲، ۳ و ۴]. در واقع خاک‌های رمبند یا فروریزی، خاک‌های غیر اشباعی هستند که در هنگام اشباع شدن در یک محدوده زمانی بسیار کوتاه تغییر حجم زیادی در آنها بوجود می‌آید. در اینگونه از خاک‌ها شرایط خاص قرارگیری ذرات در کنار یکدیگر سبب شکل‌گیری نیروهای موقتی در بین ذرات خاک شده و باعث می‌شود که ساختار خاک در شرایط خشک به صورت پایدار باقی بماند [۴، ۵ و ۶]. در بسیاری از موارد، علت نیروهای موقتی ایجاد شده در ساختار خاک‌های رمبند ناشی از حضور نیروی مکش موینیگی در بین ذرات عنوان می‌گردد. در این حالت با توجه به منفی بودن فشار آب حفره‌ای موجود در بین ذرات،



شکل ۱- دو مورد از فروچاله‌های ایجاد در منطقه مورد مطالعه، واقع در کیلومتر ۴۵ جاده همدان - تهران

ماسه‌ای تقریباً یکنواخت با دانسیته خشک بسیار پایین (۱۸) بوده که با توجه به درصد تراکم نسبی آن و نمودارهای رمبندگی پیشنهادی توسط جینگز و نایت، درصد بالایی از پتانسیل رمبندگی برای این خاک قابل انتظار می‌باشد [۱۹]. روش مورد استفاده جهت اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک در این مطالعه بر اساس استاندارد ASTM-D5333 انتخاب گردیده است. بطوریکه در این روش ابتدا نمونه درون رینگ آزمایش تحکیم قرار گرفته و با افزایش مرحله‌ای، باری معادل ۲۰۰۰ کیلو پاسکال بر نمونه اعمال می‌شود. سپس در این تنش، نمونه اشباع شده و ۲۴ ساعت به جال خود رها می‌گردد. بدین ترتیب نشانه‌های تخلخل e_1 و e_2 قبل و بعد از اشباع شدن در این آزمایش تعیین و پتانسیل رمبندگی به صورت رابطه یک قابل محاسبه خواهد بود [۲۰].

$$C_p = \{(e_1 - e_2) / (1 + e_0)\} \times 100 = (\Delta h / h_0) \times 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق، C_p پتانسیل رمبندگی، Δh تغییر ضخامت نمونه در اثر اشباع شدن، h_0 ضخامت اولیه خاک و e_0 نسبت تخلخل طبیعی خاک می‌باشد. از طرفی با توجه به عدم امکان نمونه‌گیری دست نخورده در خاک دانه‌ای مورد مطالعه و همچنین نیاز به تغییر مشخصات نمونه‌ها و اضافه کردن افزودنی شیمیایی با مقادیر کنترل شده، لازم بود نمونه‌ها در آزمایشگاه مطابق با شرایط محل بازسازی گردند. بر این اساس ابتدا مقدار وزن لازم خاک جهت ساخت نمونه با توجه به مشخص بودن حجم رینگ آزمایش ادنومتر و با در نظر گرفتن وزن مخصوص 13 kN/m^3 (برابر وزن مخصوص خشک در محل)، تعیین گردیده است. سپس با توجه به مشخص بودن وزن لازم برای هر نمونه، یک سری نمونه مصنوعی شامل ماسه منطقه مورد مطالعه و با اضافه نمودن مقادیر کنترل شده افزودنی شیمیایی بر اساس رابطه (۲)، تهیه گردید. در مرحله بعد با اضافه نمودن رطوبت لازم (معادل درصد رطوبت در محل) به نمونه و بعد از یکنواخت نمودن کامل، با مخلوط کردن و ورز دادن آن، نمونه در دو مرحله درون رینگ فلزی تحکیم با ارتفاع ۲ سانتیمتر و قطر ۵ سانتیمتر ریخته شده و به حالت استاتیکی متراکم گردیده است.

$$(\%) \text{ درصد نمک} = \frac{\text{وزن افزودنی اضافه شده}}{\text{وزن خاک} + \text{وزن افزودنی}} \times 100 \quad (2)$$

علل وقوع فروچاله‌های موجود در مناطق کارستی و آهکی نیز اکثراً با فرض وجود حفرات کارستی و نهایتاً ریزش و یا شستشوی مناطق رمبند در اینگونه از حفرات، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۲، ۱۶ و ۱۷]. اما آنچه در منطقه وقوع فروچاله‌های اطراف همدان مشاهده می‌گردد ترکیبی از حضور نواحی مستعد رمبندگی همراه نواحی کارستی و آهکی بوده که به نظر می‌رسد سینک‌هولهای ایجاد شده ناشی از عملکرد توأم این دو موضوع می‌باشد.

لذا در پژوهش حاضر علاوه بر تعیین قابلیت رمبندگی خاک منطقه، تأثیر همزمان قابلیت رمبندگی و پیوند دهنده‌های شیمیایی مستعد انحلال، بر پتانسیل ایجاد نشست‌های ناگهانی در خاک، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های مورد آزمایش شامل خاک ماسه‌ای منطقه، مخلوط شده با افزودنی‌های سولفاتی و کربناتی بوده که در شرایط آزمایشگاهی مطابق با شرایط محل بازسازی و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

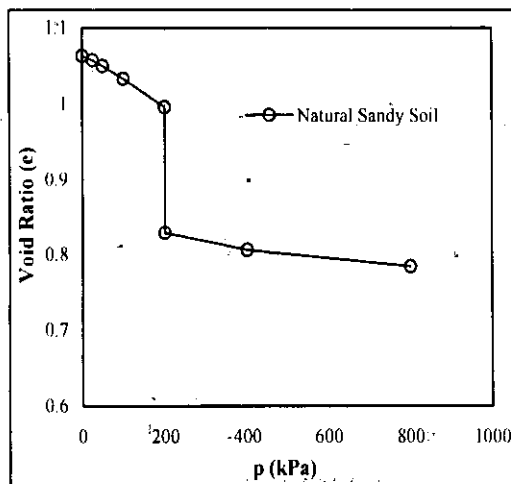
بمنظور ایجاد ارتباط مابین نتایج پژوهش حاضر و بررسی دلایل ایجاد فرونشست‌های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه، ماسه مورد نیاز به صورت طبیعی و از محل وقوع فروچاله‌ها تهیه گردید. بر این اساس پس از انجام تعداد زیادی نمونه‌گیری از نواحی ماسه‌ای موجود در فروچاله‌های منطقه، با در نظر گرفتن محدوده متداول دانه‌بندی خاک‌های مستعد رمبندگی، نهایتاً یکی از نمونه‌های ماسه‌ای (ماسه لای‌دار) که مشخصات آن در جدول شماره (۱) ارائه گردیده است انتخاب و کلیه مطالعات آزمایشگاهی بر روی این نمونه صورت گرفته است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه مورد مطالعه

SOIL TYPE	SM
Plasticity Index (%)	N.P
Natural Dry Density (kN/m^3)	13
Maximum Dry Density (kN/m^3)	19.7
Optimum Water Content (%)	11
Degree of Compaction (%)	66
Clay Percent (%)	4.5
Sand (%)	89.5

نمونه خاک مورد مطالعه به لحاظ خصوصیات دانه‌بندی و دانسیته در محل، دارای شرایط عمومی خاک‌های رمبند (خاک

دلایل وقوع فروچاله‌های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه را می‌توان حضور نواحی ماسه‌ای مستعد ریمندگی عنوان نمود.



شکل ۲- اندازه‌گیری پتانسیل ریمندگی ماسه مورد آزمایش بر اساس روش ادمتری ساده

۲-۳- تأثیر پیوند دهنده‌های شیمیایی بر قابلیت ریمندگی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که از جمله دلایل تغییرات شدید نشانه: جلاء (نسبت تخلخل) خاک، حضور لایه‌های نمک در آن می‌باشد [۲۲]. جریان آب در این حالت سبب شده است که نمک‌های موجود در خاک شده که این موضوع در نهایت سبب افزایش نسبت تخلخل خاک و در نتیجه افزایش C_p می‌گردد؛ این نوع از ریمندگی در مناطق مختلفی از افزایش گزارش گردیده است [۳]. بر این اساس در پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی میزان و نحوه تأثیر حضور پیوند دهنده‌های شیمیایی و انحلال این مواد بر پتانسیل ریمندگی، از دو افزودنی سولفات سدیم و کربنات کلسیم استفاده گردیده و با انجام آزمایش ادمتری، تغییرات پتانسیل ریمندگی نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۳)، تغییرات ریمندگی نمونه ماسه‌ای حاوی درصد‌های مختلف سولفات سدیم اضافه شده را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود اضافه نمودن نمک سولفات سدیم به نمونه‌های مورد آزمایش، سبب افزایش تغییرات نسبت تخلخل خاک در مقایسه با نمونه ماسه‌ای اولیه شده است. با توجه به شرایط یکسان آماده سازی نمونه‌ها، تغییرات بوجود آمده ناشی از انحلال افزودنی موجود در خاک و تابعی از درصد افزودنی اضافه شده به نمونه می‌باشد.

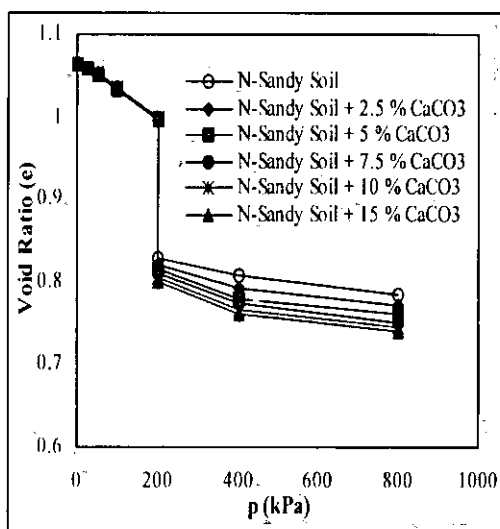
افزودنی‌های مورد استفاده به منظور بررسی عملکرد پیوند دهنده‌های شیمیایی بر پتانسیل ریمندگی، شامل سولفات سدیم (Na_2SO_4)، کربنات سدیم (Na_2CO_3) و کربنات کلسیم (CaCO_3) بوده که جهت ساخت نمونه‌های مصنوعی با درصد نمک کنترل شده استفاده گردیده‌اند. پنجوی که انتخاب ترکیبات فوق بر اساس حداکثر غلظت اندازه‌گیری شده‌ی کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در رس منطقه صورت گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به تأثیر قابل ملاحظه درصد رطوبت اولیه بر پتانسیل ریمندگی [۵ و ۱۴] و به منظور اندازه‌گیری بیشترین پتانسیل ریمندگی، قبل از انجام آزمایش ریمندگی کلیه نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای 40°C درجه خشک شده و پس از آن نمونه‌ها در تنش‌های مختلف در آزمایش ادمتری، ساده بارگذاری شده‌اند.

از طرفی با هدف بررسی تأثیر خصوصیات شیمیایی مایع منفذی خاک بر پتانسیل ریمندگی، ابتدا با استفاده از اسید کلریدریک، محلول‌هایی با غلظت ۰/۱ و یک نرمال اسید و pH متفاوت تهیه گردید. سپس در تعدادی از نمونه‌های ماسه‌ای حاوی کربنات کلسیم، پس از آماده ساختن نمونه درون سلولن تحکیم، در هنگام انجام آزمایش ریمندگی جهت اشباع کردن خاک بجای آب مقطر از محلول‌های ساخته شده با غلظت مختلف اسید، استفاده گردیده است. بطوریکه تغییرات بوجود آمده در این حالت با توجه به ثابت بودن شرایط نمونه‌سازی، بیانگر تأثیر خصوصیات شیمیایی مایع منفذی بر رفتار و پتانسیل ریمندگی خاک خواهد بود.

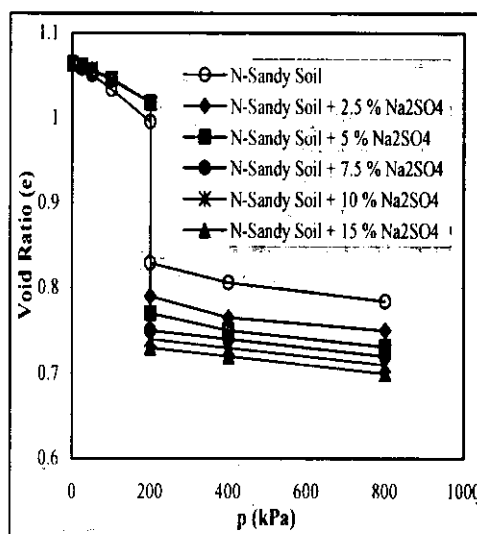
۳- بررسی و تحلیل داده‌های اخذ شده.

۳-۱- اندازه‌گیری پتانسیل ریمندگی در نمونه مورد آزمایش

شکل (۲) نتایج اندازه‌گیری قابلیت ریمندگی نمونه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد نتایج آزمایش ادمتری انجام شده بیانگر تغییرات شدید نشانه جلاء (نسبت تخلخل) پس از اشباع شدن نمونه مورد نظر می‌باشد. بطوریکه مقدار پتانسیل ریمندگی (C_p) خاک بر اساس رابطه یک در حدود ۸/۱ درصد می‌باشد. این مقدار از C_p در تاحیه با درصد‌های زیاد پتانسیل ریمندگی بوده و نشان دهنده پتانسیل بالای ریمندگی در ماسه مورد مطالعه می‌باشد [۲۱]. لذا یکی از



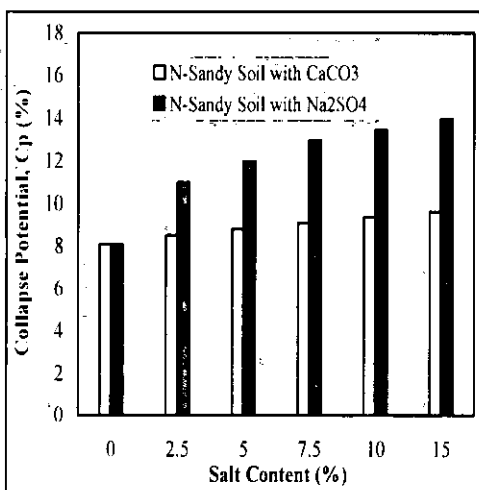
شکل ۴- افزایش اندک قابلیت رمبندگی ماسه ناشی از حضور کربنات کلسیم



شکل ۳- افزایش قابلیت رمبندگی ماسه ناشی از حضور سولفات سدیم

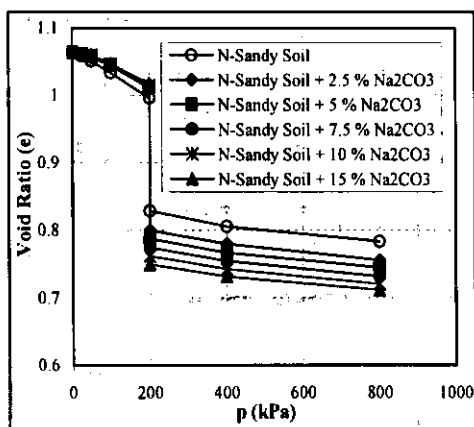
در واقع با مقایسه نتایج آزمایش‌های رمبندگی انجام شده در مورد نمونه‌های ماسه‌ای حاوی کربنات کلسیم و سولفات سدیم، همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه نمودن سولفات سدیم تغییراتی افزایشی در قابلیت رمبندگی خاک رخ داده که این تغییرات به مراتب بیشتر از تغییرات مشاهده شده در حضور کربنات کلسیم می‌باشد.

با توجه به داده‌های ارائه شده در شکل (۳) ملاحظه می‌گردد که عملکرد همزمان انحلال پیوند دهنده‌های شیمیایی و حضور پتانسیل رمبندگی در خاک، سبب افزایش تغییر شکل‌ها و در نتیجه امکان ایجاد نشست‌های ناگهانی شدید در خاک خواهد گردید. بطوریکه پتانسیل رمبندگی ماسه مورد مطالعه از ۸/۱ درصد در حالت عادی به مقداری برابر ۱۴ درصد در حضور ۱۵ درصد نمک سولفات سدیم افزایش یافته است.



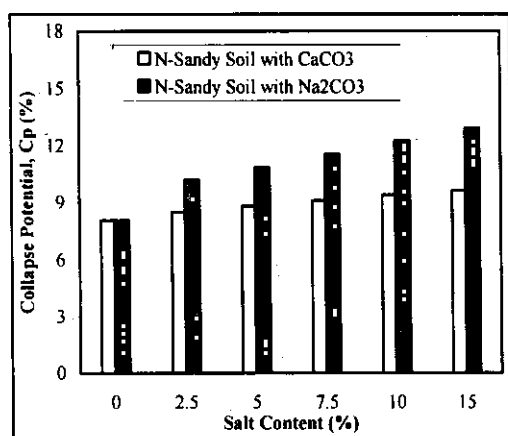
شکل ۵- مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی ماسه ناشی از حضور افزودنی‌های سولفات سدیم و کربنات کلسیم

نظر به روند افزایشی مقدار C_p در شکل (۳)، انتظار می‌رود با حضور بیشتر نمک، قابلیت رمبندگی به مراتب افزایش یابد. بر این اساس با توجه به مشابهت شرایط مدلسازی آزمایشگاهی با شرایط خاک موجود در منطقه مورد مطالعه، بنظر می‌رسد ترکیب همزمان انحلال و رمبندگی می‌تواند یکی از دلایل وسعت فروچاله‌های ایجاد شده در سطح زمین ارزیابی گردد. از طرفی نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های ماسه‌ای حاوی کربنات کلسیم با توجه به شکل (۴) نشان دهنده تأثیر به مراتب کمتر این نمک بر پتانسیل رمبندگی خاک می‌باشد. بطوریکه میزان پتانسیل رمبندگی از ۸/۱ درصد برای نمونه ماسه‌ای مورد مطالعه نهایتاً با حضور ۱۵ درصد کلسیت به مقداری برابر ۹/۶ درصد افزایش یافته است.



شکل ۶- افزایش قابلیت رمبندگی ماسه ناشی از حضور نمک کربنات سدیم

از طرفی همانطور که در شکل (۴) مشاهده گردید در مورد نمونه حاوی کربنات کلسیم، با افزایش درصد افزودنی، قابلیت رمبندگی در خاک تغییرات چندانی نشان نمی‌داد. لذا با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های (۴) و (۶) به شکل نمودار ستونی نشان داده شده در شکل (۷)، می‌توان علت کمتر بودن پتانسیل رمبندگی در نمونه‌های حاوی افزودنی کلسیت در مقادیر یکسان، نسبت به نمونه‌های حاوی کربنات سدیم را به حلالیت کمتر کلسیت نسبت داد. این موضوع توسط محققین دیگر نیز عنوان شده است [۲۲].



شکل ۷- مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی ماسه ناشی از حضور ترکیبات کربناتی محلول و نامحلول

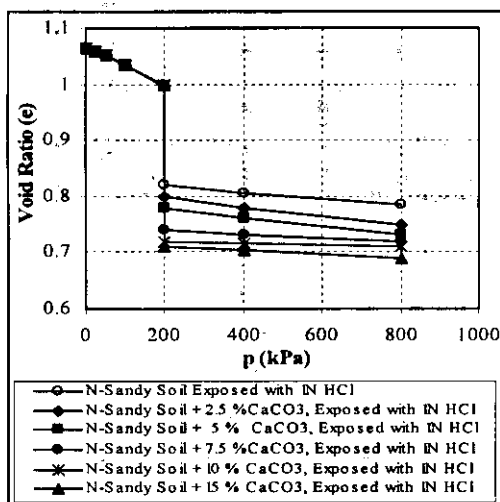
در این خصوص علت متمایز بودن نتایج آزمایش‌های انجام گرفته را می‌توان ناشی از متفاوت بودن قابلیت انحلال این دو نمک ارزیابی نمود [۲۳]. زیرا در نمونه‌های حاوی افزودنی سولفات سدیم با افزایش درصد رطوبت، نمک‌های موجود سریعاً شروع به حل شدن کرده و در نتیجه سبب بیشتر شدن حفرات موجود در خاک و افزایش استعداد رمبندگی خواهد گردید [۱۱ و ۲۲]. در حالیکه در نمونه‌های حاوی کربنات کلسیم، به دلیل قابلیت کم انحلال [۲۳] مشاهده می‌شود حضور این افزودنی در درصد‌های یکسان نسبت به نمک سولفات سدیم، تأثیر بمراتب کمتری بر قابلیت رمبندگی خاک داشته است. نتایج سایر تحقیقات موجود در این زمینه نیز نشان دهنده آنست که حضور ترکیباتی از کلسیم مانند گچ، هیدروکربنات کلسیم و کربنات کلسیم در خاک تأثیر محدودی در افزایش قابلیت رمبندگی خاک داشته است [۱۵].

۳-۳- تأثیر کربنات بر پتانسیل رمبندگی

نتایج آزمایش‌های شیمیایی بر نمونه‌های اخذ شده از سایت منطقه مورد مطالعه، نشان دهنده آنست که خاک‌های موجود در منطقه دارای مقادیر قابل ملاحظه‌ای (بعضاً در حدود ۳۰ درصد) کربنات با حلالیت کم می‌باشند. بنحوی که این موضوع در نمونه‌های با عمق‌های متفاوت، شامل عمق‌های سطحی تا عمق‌های در حدود ۱۳۰ متری گزارش شده است.

لذا یکی از اهداف پژوهش حاضر نیز به بررسی تأثیر کربنات بر پتانسیل رمبندگی اختصاص یافته است. در این راستا و بمنظور بررسی هدف فوق، ابتدا با استفاده از ترکیبات مختلف کربناتی از جمله نمک‌های کربنات سدیم (Na_2CO_3) و کربنات کلسیم (CaCO_3)، نمونه‌هایی پس از ترکیب با خاک ماسه‌ای تهیه و سپس مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. شکل (۶) نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که به صورت مصنوعی و کنترل شده با مقادیر مختلف از کربنات سدیم ترکیب شده‌اند، با افزایش درصد افزودنی، کرنش‌های رمبندگی همانند نمونه‌های حاوی سولفات سدیم افزایش نشان می‌دهند. بنحوی که با افزایش ۱۵ درصد کربنات سدیم به نمونه ماسه مورد مطالعه، پتانسیل رمبندگی آن از ۸/۱ درصد به ۱۲/۹ درصد افزایش یافته است.

براین اساس با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت مواد و روش‌ها پس از ساخت دو محلول در غلظت‌های ۰/۱ و یک نرمال اسید کلریدریک، ابتدا نمونه‌های مورد نظر شامل نمونه ماسه‌ای به همراه درصد‌های مختلف کلسیت، تهیه و تا تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال مشابه حالت آزمایش‌های قبل، بارگذاری گردیده‌اند. سپس جهت اشباع نمودن نمونه‌ها، بجای ریختن آب مقطر درون سلول‌های آزمایش تحکیم از محلول‌هایی با غلظت ۰/۱ و یک نرمال اسید کلریدریک استفاده گردیده است. پس از انجام آزمایش‌های ادمتری در این حالت، نتایج مخاسبه و در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه گردیده است:



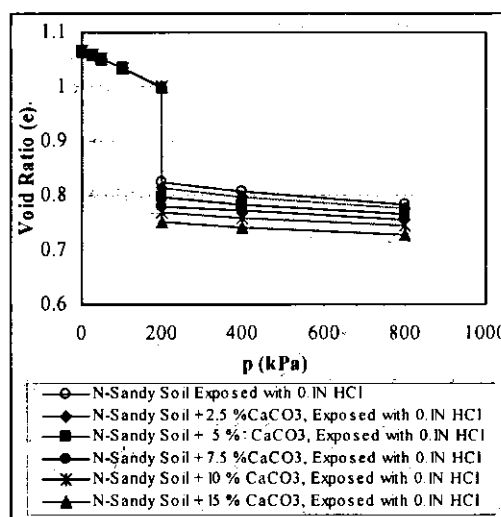
شکل ۹- تغییرات قابلیت رهمندگی نمونه‌های ماسه‌ای حاوی کربنات کلسیم ناشی از اشباع کردن با محلول ۱ نرمال اسید کلریدریک

همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در نمونه حاوی ۱۵ درصد افزودنی کربنات کلسیم که با استفاده از محلول ۰/۱ نرمال اسید اشباع گردیده است، قابلیت رهمندگی از ۹/۶ درصد در حالت استفاده از آب مقطر (شکل ۴) به ۱۱/۹ درصد افزایش یافته است. از طرفی با توجه با شکل (۹) در شرایط یکسان نمونه‌سازی در مقایسه با شکل (۸)، ملاحظه می‌گردد در این حالت در نمونه حاوی ۱۵ درصد کربنات کلسیم که با استفاده از محلول ۱ نرمال اسید اشباع گردیده است قابلیت رهمندگی به ۱۴ درصد افزایش یافته است.

بنحوی که با توجه به نتایج بدست آمده، در رابطه با اثر حضور پیوند دهنده‌های کربناتی انتظار می‌رود در صورت انحلال‌پذیری، حضور آنها در خاک مانند یک لایه شیمیایی عمل کرده و در نتیجه با مجاورت خاک در برابر آب و فرسایش نمک، افزایش قابلیت توجهی در رهمندگی خاک صورت گیرد.

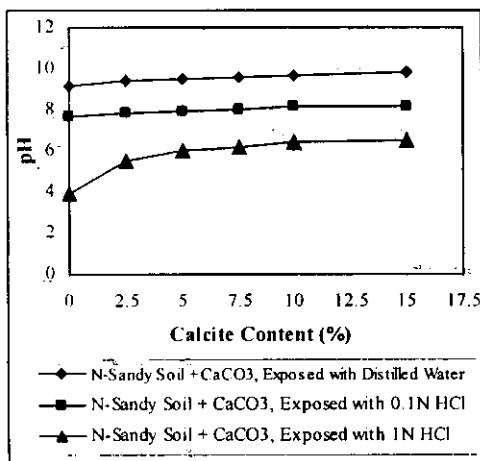
۴-۴- تأثیر تغییرات pH مایع منفذی بر پتانسیل رهمندگی انحلال کمتر کربنات کلسیم در حالت استفاده از آب مقطر را نمی‌توان دلیل قانع کننده‌ای جهت عدم امکان تغییر پتانسیل رهمندگی در نمونه‌های حاوی این نمک دانست. بطوریکه تغییر خصوصیات شیمیایی آب حفره‌ای در تماس با خاک، می‌تواند سبب تغییر در میزان انحلال‌پذیری و در نتیجه تأثیر این موضوع بر رهمندگی خاک گردد [۲۴].

بعنوان مثال افزایش قابلیت حل ترکیبات کربناتی در pHهای اسیدی، یکی از شرایط ممکن جهت تغییرات پتانسیل رهمندگی ناشی از تغییر شرایط محیطی خواهد بود. بز این اساس در ادامه پژوهش حاضر با در معرض اسید قرار دادن نمونه‌های مورد نظر، امکان یا عدم امکان انحلال‌پذیری لایه‌های حاوی کربنات نامحلول و تأثیر احتمالی این انحلال بر پتانسیل رهمندگی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۸- تغییرات قابلیت رهمندگی نمونه‌های ماسه‌ای حاوی کربنات کلسیم ناشی از اشباع کردن با محلول ۰/۱ نرمال اسید کلریدریک

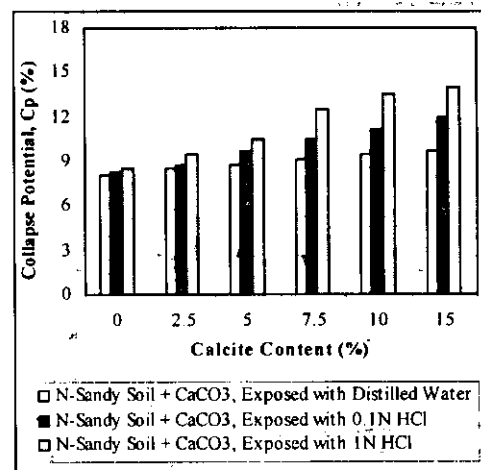
علاوه بر این با هدف بررسی میزان واکنش‌های صورت گرفته بین نمونه‌ها و اسید-اضافه شده، تغییرات pH نمونه‌ها در انتهای آزمایش ادمتری اندازه‌گیری و در شکل (۱۲) ارائه گردیده است.



شکل ۱۲- تغییر pH نمونه‌ها پس از ترکیب با مقادیر مختلف اسید

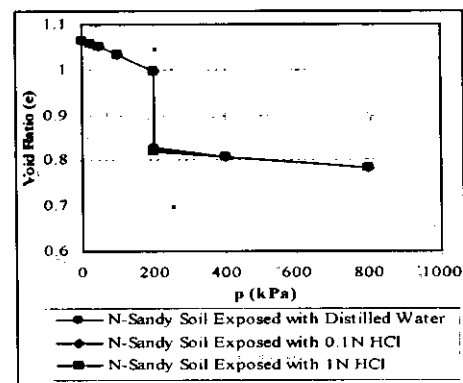
نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های موجود در قالب تحکیم پس از در معرض اسید قرار گرفتن، به میزان قابل توجهی با اسید موجود واکنش انجام داده‌اند. بعنوان مثال در مورد نمونه‌های اشباع شده با محلول ۱ نرمال اسید، در حالیکه مقدار pH نمونه ماسه خالص تا حدود pH برابر ۴ کاهش یافته است، بواسطه افزایش بافرینگ خاک در حضور کربنات، مخلول اسید یک نرمال استفاده شده، pH نمونه ماسه‌ای حاوی ۱۵٪ کربنات را فقط تا حدود ۶/۴ کاهش داده است. در عین حال از آنجا که حضور اسید بیشتر، سبب حل شدگی فاز کربنات می‌گردد، می‌توان انتظار داشت که با گذشت زمان، در فرایند اندرکنش شرایط اسیدی محیط و کربنات موجود در خاک، تأثیر افزایش غلظت یون H^+ در کاهش pH بیشتر شده و عملاً این فرایند یک فرایند تابع زمان خواهد بود. این امر تشدید فرایند کارستی شدن و نیز تشدید احتمال رمبندگی لایه‌های کربناتی بواسطه حل شدگی فاز کربنات را بدنبال خواهد داشت [۱۱]. لذا مجموعاً می‌توان گفت تغییرات ایجاد شده در قابلیت رمبندگی خاک ناشی از تغییر خصوصیات شیمیایی آب حفره‌ای در نمونه‌های حاوی کربنات کلسیم، عمدتاً به دلیل افزایش انحلال پذیری کربنات در مجاورت محلول اسیدی، شکست پیوند بین

بنحوی که مجموعاً با مقایسه نتایج تغییرات بوجود آمده و ارائه آن در نمودار ستونی شکل (۱۰)، می‌توان نتیجه گرفت که با در معرض اسید قرار دادن نمونه‌های حاوی کربنات با حلالیت کم، به دلیل افزایش قابلیت انحلال کربنات، پتانسیل رمبندگی افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی ماسه ناشی از تغییر مشخصات شیمیایی مایع منفذی و انحلال نمک‌های کربناتی نامحلول

زیرا همانگونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود در نمونه ماسه‌ای خالص، استفاده از دو محلول اسیدی مورد استفاده و تغییرات pH، سبب تغییراتی کمتر از یک درصد در پتانسیل رمبندگی خاک گردیده و لذا سهم عمده تغییرات مشاهده شده در شکل (۱۰) ناشی از اندرکنش کربنات با اسید می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات ناچیز قابلیت رمبندگی نمونه ماسه‌ای مورد مطالعه ناشی از تغییر مشخصات شیمیایی مایع منفذی

ایجاد تخریب سریع پیوندهای شیمیایی موقتی موجود در ساختار خاک گردد.

مراجع

- [1] اوحدی، وحید رضا، ۱۳۸۵، بررسی احتمال فرونشست در محدوده داخلی نیروگاه شهید مفتح و ارائه روش‌های جلوگیری از احتمال وقوع آنها. پروژه پژوهشی، کمیته مرکزی تحقیقات برق منطقه‌ای باختر با همکاری دانشگاه بوعلی سینا و دفتر امور پژوهشی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی.
- [2] Kaufmann, O., and Quinif, Y., "Cover-collapse sinkholes in the "Tournaisis" area, southern Belgium". Journal of Eng.Geology, Vol. 52, pp. 15-22, 1999.
- [3] Brink, A. B. A., and Kantely, B. A., "Collapsible grain structure in residual granite soils in southern Africa". Proceeding, Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., pp.611-614, 1961.
- [4] Rollins, K. M., Rollins, R. L., Smith, T. D., and Beckwith, H. G., "Identification and characterization of collapsible gravels". J. Geotech. Engrs., ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 528-542, 1994.
- [5] Lawton, E. C., Fragaszy, R. J., and Hardcastle, J. H., "Collapse of compacted clayey sand". J. Geotech. Engrs., ASCE, Vol. 115, No. 9, pp. 1252-1267, 1989.
- [6] Tadepalli, R., Rahardjo, H., and Fredlund, D., G., "Measurement of matric suction and volume change during inundation of collapsible soil". ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 15, No. 2, pp. 115-122, 1992.
- [7] Sudhakar, M. R., and Revanasiddappa, K., "Role of soil structure and matric suction in collapse of a compacted clay soil". J. Geotechnical Testing, Vol. 26, No. 1, pp. 1-9, 2003.
- [8] Pereira, J.H.F., and Fredlund, D.G., "Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 126 (10), pp. 907-916, 2000.
- [9] Liu, S. H., Sun, D. A., and Wang, Y., "Numerical study of soil collapse behavior by discrete element modeling". Journal of Computers and Geotechnics, Vol. 30, pp. 399-408, 2003.
- [10] Locama, J. L., Cohen, H. A., and Tonkin, M. J., "Deep karst conduits, flooding and sinkholes: lessons for the aggregates industry". Journal of Engineering Geology, Vol. 65, pp. 151-157, 2002.

ذرات و افزایش حفرات موجود در خاک بوده، که این نتایج با داده‌های ارائه شده توسط محققین دیگر نیز انطباق مناسبی نشان می‌دهد [۲۲، ۱۱ و ۲۳].

براین اساس با توجه به نتایج بدست آمده نهایتاً می‌توان نتیجه‌گیری نمود که وجود حلالیت کم در لایه‌های آهکی موجود در خاک و عدم حلالیت آنها در شرایط معمولی دلیلی بر عدم تأثیر آنها بر تغییر قابلیت رմبندگی خاک نخواهد بود. بطوریکه این ترکیبات در شرایط pH خنثی بصورت پیوند دهنده‌های شیمیایی غیر فعال عمل نمود که با ایجاد شرایط لازم، مانند کاهش pH آب حفره‌ای، بر اثر حل شدن آنها امکان کاهش سریع نشانه خلاء خاک در یک بازه زمانی بسیار کوتاه و نتیجتاً تشدید رմبندگی وجود خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در نمونه‌های خاک ماسه‌ای موجود در محدوده مطالعاتی مورد نظر نشان دهنده آنست که با توجه به پایین بودن دانسته خشک و خصوصیات دانه‌بندی این نمونه‌ها، پتانسیل رմبندگی در آنها بسیار بالا بوده و لذا یکی از دلایل وجود فروچاله‌های ایجاد شده را می‌توان حضور اینگونه از خاک‌ها در منطقه ارزیابی نمود.

۲- حضور پیوند دهنده‌های شیمیایی سبب افزایش قابلیت رմبندگی خاک شده، بطوریکه تغییرات ایجاد شده تابعی از درصد نمک، میزان انحلال‌پذیری نمک، و مشخصات شیمیایی آب حفره‌ای اشباع کننده خاک می‌باشد. بر این اساس انتظار می‌رود در مناطقی مانند منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، که ترکیبی از حضور نواحی انحلالی و ماسه‌ای مستعد رմبندگی در سایت وجود دارد عملکرد توأم این دو موضوع سبب افزایش پتانسیل رմبندگی و ایجاد فرونشست‌های در مقیاس بسیار بزرگ می‌گردد.

۳- جهت بررسی تأثیر کامل پیوند دهنده‌های شیمیایی بر پتانسیل رմبندگی، خصوصاً در شرایط آزمایشگاهی لازم است با مدل‌سازی مناسب، شرایط را برای انحلال کامل نمک‌ها ایجاد نمود. بر این اساس عدم انحلال پیوند دهنده‌های شیمیایی با آب مقطر دلیلی بر عدم تأثیر آنها بر افزایش استعداد رմبندگی نمی‌باشد. بطوریکه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با تغییر شرایط مایع منفذی خاک، حضور پیوند دهنده‌های با انحلال‌پذیری بسیار کم مانند کربنات کلسیم نیز می‌تواند باعث

- [18] Sheeler, J. B., "Summarization comparison of engineering properties of loess in the united states". Highway Research Board, HRR, No. 212, pp. 1-9, 1961.
- [19] Jennings, J. E., and Knight, K., "A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlements due to collapse of grain structure". Proceedings, Sixth Regional for Africa on Soil Mechanics and Foundation Eng., Johannesburg, pp. 99-105, 1975.
- [20] American Society for Testing and Materials, ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Philadelphia, V.4, 08, 1992.
- [21] Clemence, S. P., and Findbar, A. O., "Design consideration for collapsible soils". J. Geotech. Engrs., ASCE, Vol. 107, No. GT3, pp. 305-317, 1981.
- [22] Karakouzian, M., Schweppe, M., and Johnson, B., "Soluble mineral content of soils using electrical conductivity". Proceedings of the First International Conference on Geotechnical, Geoenvironmental Engineering and Management in Arid Lands, Al-Ain, United Arab Emirates, pp. 499-504, 2000.
- [23] Yong, R. N., "Geo-environmental engineering: Contaminant soils, pollutant fate and mitigation". By CRC Press LLC. pp. 307, 2000.
- [24] Panno, S.V., and Kelly, W. R., "Nitrate and herbicide loading in two groundwater basins of Illinois' sinkhole plain". Journal of Hydrology, Vol. 290, pp. 229-242, 2004.
- [11] Gongyu, L., and Wanfang, Z., "Sinkhole in karst mining areas in China and some methods of prevention". Journal of Engineering Geology, Vol. 52, pp. 45-50, 1999.
- [12] Tharp, T. M., "Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes". Journal of Engineering Geology, Vol. 52, pp. 23-33, 1999.
- [13] Alwail, T. L., Ho, C. L., and Fragaszy, R. J., "Collapse mechanism of compacted clayey and silty sand. Proceedings, Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments", ASCE Geotechnical Special Bulletin No. 40, Vol. 2, A. T. Yeung and G. Y. Felio, Eds., American Society of Civil Engineers, New York, pp. 1435-1446, 1994.
- [14] Basma, A. A., and Tuncer, E. R., "Evaluation and control of collapsible soils", J. Geotech. Engrs., ASCE, 118(10), pp. 1491-1504, 1992.
- [15] Dudley, J. H., "Review of collapsing soil. Journal of Mechanics and Foundation Engineering", ASCE, Vol. 96, No. SM 3, pp. 925-947, 1970.
- [16] Goodings, D. J., and Abdulla, W.A., "Stability charts for predicting sinkholes in weakly cemented sand over karst limestone". Journal of Engineering Geology, Vol. 65, pp. 151-157, 2002.
- [17] Al-Rifaiy, I. A., "Land subsidences in the Al-Dahr residential are in Kuwait: a case history study". Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 23, pp. 337-346, 1990.