

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی

ارزیابی خطر و ریسک فرونشست زمین و رخداد شکاف در دشت سمنان

نگارنده: حسین اکبری اریمی

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر مومنی

استاد مشاور

الهام خراسانی

تیرماه ۱۳۹۸

تقدیم به

برترینی که به ما فرصت بودن داده

و

تقدیم به

ماه و خورشید زندگیم که هیچگاه افول نخواهند کرد

پدر و مادر مهربانم

## تقدیر و تشکر

سپاس خدایی را که داشتن او جبران، همه نداشته‌های من است، می‌ستایم، چون لایق ستایش است.

هر چند این مختصر، زحمات ارزنده‌ی کسانی را که اجرای این تحقیق بدون کمک و راهنمایی‌های ارزشمندشان میسر نبود، جبران نخواهد کرد، به رسم ادب بر خود واجب می‌دانم از زحمات ارزنده‌ی استاد عزیز و بزرگواریم جناب آقای دکتر علی اکبر مومنی که صبورانه در تمام مراحل و اجرای این تحقیق امکانات و رهنمودهای ارزشمندی در اختیار اینجانب قرار دادند، و همچنین از راهنمایی‌های مشاور گران قدر سرکار خانم الهام خراسانی، از آقای دکتر باقری به خاطر در اختیار گذاشتن آزمایشگاه آب‌شناسی و زیست محیطی و از آقای دکتر کرامتی و مهندس محمدی برای انجام برخی از آزمایش‌ها در آزمایشگاه مهندسی خاک دانشکده عمران، نهایت تشکر و قدر دانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب حسین اکبری اریمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی زیست محیطی دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع ارزیابی خطر و ریسک فرونشست زمین و رخداد شکاف در دشت سمنان تحت راهنمایی آقای دکتر علی اکبر مومنی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

فرونشست و شکاف برداشتن زمین به عنوان مخاطره طبیعی مهمی بوده که بسیاری از دشت‌های ایران با آن روبرو بوده و باعث تخریب مناطق مسکونی، جاده‌ها، پل‌ها، خطوط انتقال نیرو، زمین‌های کشاورزی، چاه‌ها و پیزومترها شده است. در این مطالعه از یک طرف نحوه وقوع پدیده فرونشست در دشت سمنان و پهنه‌بندی این منطقه از نظر پتانسیل فرونشست زمین، مورد بحث قرار گرفته و از طرف دیگر مکانسیم رخداد شکاف و ارزیابی خطر و ریسک آن در جنوب و جنوب شرق سمنان بررسی گردید. بدین منظور ابتدا داده‌های مربوط به ۱۸ پیزومتر در طی دوره آماری ۲۴ ساله از اسفند ۱۳۷۲ تا اسفند ۱۳۹۶، برای ترسیم منحنی هم‌افت و هیدروگراف واحد دشت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای تعیین نوع و ضخامت لایه‌های زیرسطحی از داده‌های لاگ پیزومترها، داده‌های مربوط به سونداژهای ژئوالکتریک و نقشه زمین‌شناسی استفاده گردیده است. سپس با استفاده از داده‌های منحنی افت و اطلاعات شرایط لایه‌های زیر سطحی، نقشه پتانسیل فرونشست دشت سمنان تهیه شده است. برای ارزیابی شکاف خوردگی زمین، چندین روش زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شامل ارزیابی‌های جامع صحرائی، نمونه‌گیری دست خورده و دست نخورده از خاک و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی (آزمون‌های دانه‌بندی، حدود آتبرگ، هیدرومتری مضاعف، پین هول، کرامپ، تحکیم مضائف و غیره) به کار برده شد. در نهایت بر مبنای نتایج به دست آمده، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر و ریسک رخداد شکاف در این منطقه تهیه گردید. بررسی‌ها نشان داد که در دوره‌ی مذکور برداشت مداوم از آب زیرزمینی باعث افت ۱۸/۹ متری سطح آب زیرزمینی شده و شرایط را جهت تحکیم میان لایه‌های رسی و فرونشست زمین فراهم کرده است. نقشه پهنه‌بندی خطر رخداد فرونشست نشان می‌دهد که منطقه با پتانسیل بالای فرونشست در این دشت در بخش شمال شرقی دشت و در محدوده جنوب- جنوب غربی شهرک صنعتی قرار دارد. به علاوه نتایج نشان می‌دهد که حضور خاک‌های مسئله‌دار (رمبنده و واگرا) و فعالیت‌های انسانی مانند ساخت جاده و راه‌آهن در تشکیل و توسعه شکاف‌های این منطقه نقش داشته است. در حقیقت فرسایش خندقی متاثر از این دو عامل، مکانیسم اصلی رخداد شکاف شناخته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که شکاف خوردگی زمین در این منطقه در حال توسعه بوده و ایمنی راه‌آهن، بخش جنوبی فرودگاه سمنان و روستای اعلا را به خطر می‌اندازد.

**کلمات کلیدی:** فرونشست زمین، شکاف خوردگی زمین، سونداژ ژئوالکتریک، خاک رمبنده، فرسایش خندقی

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

(, بررسی فرونشست ناحیه‌ای زمین متاثر از برداشت بیش از حد آب زیر زمینی در دشت سمنان

(-

(.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۱-1	بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق
۲-۱	ضرورت انجام تحقیق
۳-۱	موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه
۴-۱	آب و هوای منطقه مورد مطالعه
۵-۱	زمین شناسی منطقه مورد مطالعه
۶-۱	چینه‌شناسی در محدوده مورد مطالعه
۷-۱	ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

## فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین و تئوری تحقیق

۱-۲	مقدمه
۲-۲	فرونشست
۳-۲	افت سطح آب زیرزمینی
۴-۲	مکانیسم ایجاد نشست زمین
۵-۲	تعریف رمبندگی (یا فروریزش)
۱-۵-۲	رابطه پدیده رمبندگی خاک و رخداد شکاف
۲-۵-۲	سازوکار پدیده رمبندگی
۳-۵-۲	عوامل مؤثر بر پدیده رمبندگی
۶-۲	شناسایی خاک‌های رمبنده در بررسی‌های محلی
۷-۲	معیارهای ارزیابی رمبندگی خاک
۱-۷-۲	معیار ابلف، ۱۹۴۸



- ۳۳..... ۲-۷-۲ معیار کلونجر، ۱۹۵۸.....
- ۳۳..... ۳-۷-۲ معیار گیبس و بارا، ۱۹۶۲.....
- ۳۳..... ۴-۷-۲ معیار دنسیو، ۱۹۶۴.....
- ۳۴..... ۵-۷-۲ معیار فدا، ۱۹۶۶.....
- ۳۴..... ۶-۷-۲ معیار براساس حد روانی و دانسیته خشک خاک در محل.....
- ۳۵..... ۷-۷-۲ معیار جنینگز و نایت، ۱۹۷۵.....
- ۳۷..... ۸-۷-۲ معیار ASTM مبتنی بر نتایج آزمایش تحکیم مضاعف.....
- ۳۸..... ۸-۲ مکانیزم و ماهیت پدیده‌ی واگرایی.....

## ۴۱ فصل سوم : روش انجام کار

- ۴۲..... ۱-۳ مقدمه.....
- ۴۲..... ۲-۳ مطالعات کتابخانه‌ای، جمع‌آوری و تجزیه تحلیل داده‌ها.....
- ۴۲..... ۱-۲-۳ تجزیه و تحلیل اطلاعات سطح آب در پیرومترها.....
- ۴۳..... ۲-۲-۳ تحلیل اطلاعات زمین شناسی زیر سطحی.....
- ۴۵..... ۳-۳ مطالعات صحرائی.....
- ۴۵..... ۱-۳-۳ اندازه‌گیری مشخصات هندسی شکاف‌ها و شواهد رمبندگی.....
- ۴۵..... ۲-۳-۳ نمونه‌گیری خاک از قسمت‌های مختلف دشت.....
- ۴۷..... ۴-۳ مطالعات آزمایشگاهی.....
- ۴۷..... ۱-۴-۳ تعیین مشخصات فیزیکی خاک.....
- ۴۸..... ۲-۴-۳ تعیین پتانسیل رمبندگی خاک.....
- ۵۰..... ۳-۴-۳ تعیین پتانسیل واگرایی خاک.....
- ۵۴..... ۵-۳ ارزیابی پتانسیل رخداد فرونشست.....
- ۵۵..... ۶-۳ ارزیابی مکانیسم رخداد شکاف.....

## فصل چهارم : بحث و نتایج

۵۷

- ۱-۴ مقدمه ..... ۵۸
- ۲-۴ بررسی خطر رخداد فرونشست در دشت سمنان ..... ۵۸
- ۱-۲-۴ نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل اطلاعات سطح آب در پیزومترها ..... ۵۸
- ۲-۲-۴ نتایج تحلیل اطلاعات زمین شناسی زیرسطحی ..... ۶۳
- ۳-۲-۴ نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست سطح زمین ..... ۶۵
- ۳-۴ مکانیسم، خطر و ریسک رخداد شکاف در دشت سمنان ..... ۷۱
- ۱-۳-۴ بررسی نتایج مطالعات صحرایی ..... ۷۱
- ۲-۳-۴ بررسی نتایج آزمایشگاهی ..... ۷۴
- ۳-۳-۴ آزمایش‌های تعیین پتانسیل رمبندگی خاک‌های ریزدانه ..... ۸۱
- ۴-۳-۴ آزمایش تعیین واگرایی خاک‌های لسی ..... ۸۴
- ۵-۳-۴ نقشه زمین‌شناسی مهندسی ..... ۹۱
- ۴-۴ ارزیابی مکانیسم خطر و ریسک رخداد شکاف ..... ۹۱

## فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۹۸

- ۱-۵ نتیجه‌گیری ..... ۹۹
- ۲-۵ پیشنهادها ..... ۱۰۰

۱۰۱

مراجع

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ : شاخص پتانسیل رمبندگی ..... ۳۶
- جدول ۲-۲ : پتانسیل فروریزی ..... ۳۸
- جدول ۱-۴ : افت سالانه سطح ایستایی در محل پی‌زومترهای حفر شده در دشت سمنان ..... ۵۹
- جدول ۲-۴ : آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های خاک در دشت سمنان ..... ۷۵
- جدول ۳-۴ : مقادیر وزن مخصوص (GS) نمونه خاک‌های ریزدانه مورد مطالعه ..... ۷۵
- جدول ۴-۴ : درصد دانه‌های خاک به تفکیک جنس خاک ..... ۷۸
- جدول ۵-۴ : حدود آتربرگ نمونه‌ها ..... ۷۹
- جدول ۶-۴ : رده‌بندی مهندسی خاک بر اساس رده‌بندی یونیفاید ..... ۸۰
- جدول ۷-۴ : نتایج ضریب رمبندگی بدست آمده در آزمایش تحکیم مضاعف ..... ۸۲
- جدول ۸-۴ : نتایج دانسیته خشک خاک ..... ۸۴
- جدول ۹-۴ : نتایج حاصل از آزمایش کرامب ..... ۸۵
- جدول ۱۰-۴ : نتایج حاصل از آزمایش هیدرومتری مضاعف ..... ۸۷
- جدول ۱۱-۴ : نتایج آزمایش پین‌هول انجام شده بر روی نمونه‌های ریزدانه ..... ۸۹
- جدول ۱۲-۴ : نتایج آزمایش‌های تعیین واگرایی لس‌ها ..... ۹۰

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمایی از ترک‌های رخ داده در محدوده مطالعاتی واقع در جنوب شرق دشت سمنان..... ۳
- شکل ۱-۲: نمایی از شکاف‌های ایجاد شده در اطراف راه‌آهن سرارسری تهران-مشهد..... ۴
- شکل ۱-۳: موقعیت محدوده مطالعاتی و راه‌های دسترسی به دشت سمنان..... ۵
- شکل ۱-۴: عکس گوگل ارث از منطقه مورد مطالعه..... ۱۰
- شکل ۱-۵: نقشه زمین‌شناسی دشت سمنان..... ۱۱
- شکل ۱-۱: کاهش حجم لایه‌های ریزدانه و نازک شدن آن در اثر زهکشی..... ۱۶
- شکل ۲-۲: رابطه بین تنش موثر و فشار آب منفذی..... ۱۷
- شکل ۲-۳: مقایسه بین تغییر شکل قائم رس و ماسه..... ۱۸
- شکل ۲-۴: رابطه‌ی بین درجه اشباع اولیه خاک و میزان کاهش درجه تخلخل آن..... ۲۷
- شکل ۲-۵: ارتباط بین درصد رطوبت طبیعی خاک و ضریب رمبندگی..... ۲۷
- شکل ۲-۶: رابطه بین دانسیته نسبی خاک و درصد رمبندگی خاک..... ۲۸
- شکل ۲-۷: نحوه پوشش ذرات ماسه توسط ذرات رس..... ۲۹
- شکل ۲-۸: پیوند ذرات ماسه توسط ذرات رس..... ۳۰
- شکل ۲-۹: فرو ریزی خاک بعد از اشباع شدن..... ۳۰
- شکل ۲-۱۰: عوامل استحکام و پایداری خاک‌های رمبنده..... ۳۱
- شکل ۲-۱۱: محدوده خاک‌های رمبنده و پایدار..... ۳۵
- شکل ۲-۱۲: آزمایش تحکیم..... ۳۶
- شکل ۲-۱۳: نتیجه آزمایش قابلیت فروریزی..... ۳۷
- شکل ۳-۱: موقعیت پیزومترهای حفر شده در دشت سمنان..... ۴۳
- شکل ۳-۲: نقشه محل سونداژ ژئوالکترونیک و مقاطع زمین‌شناسی در دشت سمنان..... ۴۴
- شکل ۳-۳: نمونه‌گیری به صورت بلوکی با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی متری..... ۴۶
- شکل ۳-۴: موقعیت نقاط نمونه‌برداری..... ۴۶
- شکل ۳-۵: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک..... ۴۷
- شکل ۳-۶: آزمایش تعیین حدود آتربرگ نمونه خاک..... ۴۹
- شکل ۳-۷: آزمایش کرامپ نمونه‌های خاک..... ۵۰
- شکل ۳-۸: آزمایش هیدرومتری انجام شده بر روی خاک‌های مورد مطالعه..... ۵۲
- شکل ۳-۹: طرح شماتیک دستگاه پین‌هول..... ۵۴
- شکل ۴-۱: میزان افت کل پیزومترها طی دوره ۲۴ ساله در دشت سمنان..... ۶۰
- شکل ۴-۲: نقشه‌ی تیسن‌بندی پیزومترهای دشت سمنان..... ۶۱
- شکل ۴-۳: هیدروگراف معرف دشت سمنان..... ۶۱
- شکل ۴-۴: نقشه افت سطح آب زیرزمینی دشت طی دوره ۲۴ ساله..... ۶۳

- شکل ۴-۵: مقطع‌های زمین‌شناسی AA' و BB' در دشت سمنان..... ۶۴
- شکل ۴-۶: نقشه زون‌بندی افت سطح آب زیرزمینی در دشت سمنان..... ۶۶
- شکل ۴-۷: نقشه زون‌بندی لیتولوژی دشت سمنان..... ۶۷
- شکل ۴-۸: نقشه کمی پتانسیل خطر رخداد فرونشست..... ۶۸
- شکل ۴-۹: تصاویری از بیرون زدگی لوله جدار پیزومترها در شرق اعلا..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرونشست زمین در دشت سمنان..... ۷۰
- شکل ۴-۱۱: تصاویری از شکاف‌های ایجاد شده در دشت سمنان..... ۷۱
- شکل ۴-۱۲: موقعیت شکاف‌های موجود در دشت سمنان..... ۷۲
- شکل ۴-۱۳: تصاویری از رخداد شکاف در دشت سمنان..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴: تصاویری از رخداد شکاف در دشت سمنان..... ۷۳
- شکل ۴-۱۵: تصاویری از تونل‌های پایپینگ ایجاد شده در محل شکاف‌ها در دشت سمنان..... ۷۴
- شکل ۴-۱۶: وجود حفرات ماکرسکوپی و دیواره‌های قائم و ارتفاع زیاد..... ۷۴
- شکل ۴-۱۷: منحنی دانه‌بندی خاک‌های درشت دانه در دشت سمنان..... ۷۶
- شکل ۴-۱۸: منحنی دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه در دشت سمنان..... ۷۷
- شکل ۴-۱۹: موقعیت قرار گیری خاک‌های ریزدانه در نمودار شاخص خمیری-حد روانی..... ۸۰
- شکل ۴-۲۰: نتیجه آزمایش تحکیم برای نمونه شماره ۳ در محل شکاف‌ها در دشت سمنان..... ۸۳
- شکل ۴-۲۱: آزمایش کرامپ برای نمونه‌های خاک ریزدانه..... ۸۵
- شکل ۴-۲۲: آزمایش هیدرومتری مضاعف برای تعیین واگرایی خاک..... ۸۶
- شکل ۴-۲۳: نمودار آزمایش هیدرومتری مضاعف برار نمونه شماره ۱۰..... ۸۷
- شکل ۴-۲۴: مراحل انجام آزمایش پین‌هول بر روی نمونه ۱۶..... ۸۸
- شکل ۴-۲۵: نقشه زمین‌شناسی مهندسی دشت سمنان..... ۹۱
- شکل ۴-۲۶: مکانیسم تشکیل شکاف در دشت سمنان..... ۹۴
- شکل ۴-۲۷: نقشه خطر رخداد شکاف در دشت سمنان..... ۹۵
- شکل ۴-۲۸: نقشه کاربری اراضی در دشت سمنان..... ۹۶
- شکل ۴-۲۹: نقشه ریسک در دشت سمنان..... ۹۷

## فصل ۱ : مقدمه

## ۱-۱ بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

یکی از معضلات بسیار مهم زیست محیطی در دهه‌های اخیر پدیده فرونشست می‌باشد. با توجه به افزایش جمعیت، محدودیت منابع آب‌های سطحی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، این پدیده روند رو به رشدی داشته و خسارت جبران‌ناپذیری را بر پیکره منابع آب زیرزمینی وارد کرده و عوارض زیست محیطی زیادی به همراه داشته است. فرونشست از جمله مخاطرات زمین‌شناسی است که از لحاظ سرعت شکل‌گیری، به دو دسته سریع و تدریجی تقسیم می‌گردد. حالت تدریجی، به دلیل تلفات انسانی کم آن در مقایسه با دیگر پدیده‌های طبیعی مانند زلزله، لغزش و سیلاب، کمتر مورد توجه قرار گرفته و معمولاً وسعت زیادی را در بر می‌گیرد. اما فرونشست در حالت سریع که عمدتاً به صورت محلی اتفاق می‌افتد، باعث آسیب به زیرساخت‌ها و سازه‌ها شده و ممکن است تلفات انسانی به همراه داشته باشد. فرونشست به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی باعث تخریب مناطق مسکونی، جاده‌ها، پل‌ها، خطوط انتقال نیرو، زمین‌های کشاورزی، چاه‌ها و پیرومترهای حفرشده در آبخوان‌های آبرفتی و ... می‌شود. به طور کلی فرونشست متاثر از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی و پارامترهای زمین‌شناسی می‌باشد که در صورت عدم توجه به این پدیده می‌تواند سبب وارد آمدن آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی گردد. رخداد فرونشست زمین در ایران بیشتر در اثر عواملی چون افت سطح آب‌های زیرزمینی، انحلال تشکیلات زیرسطحی و ریزش حفرات کارستی، انقباض خاک‌های رسی و وجود خاک‌های رمبنده اتفاق افتاده است. با توجه به وجود مناطق متعدد دارای پتانسیل یا فرونشست رخ داده در ایران، لزوم شناسایی و کنترل و مدیریت این مناطق امری ضروری به نظر می‌رسد.

دشت سمنان و پیرامون آن در منطقه خشک قرار گرفته و از نظر زمین‌شناسی در جنوب رشته کوه البرز و شمال ایران مرکزی واقع شده است. رسوبات موجود در این منطقه بیشتر از خاک‌های لسی، ماسه بادی و نهشته‌های برجا تشکیل شده‌اند. رسوبات موجود فاقد لایه‌بندی بوده و به رنگ زرد مایل

به قهوه‌ای با اندازه ذرات در حد ماسه ریز و سیلت می‌باشند. در محدوده جنوب و جنوب شرق سمنان شکاف کششی به طول ۱۰ تا ۲۰۰ متر مشاهده شده‌اند (شکل ۱-۱). روند این شکافها عمدتاً در راستای شمالی - جنوبی تا شمال شرق - جنوب غرب و گاهاً شرقی - غربی بوده و پراکندگی زیادی از خود نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن پراکندگی کلی این شکافها و شاخه‌های فرعی آنها، شکل‌گیری شکافها به صورت ساختار شاخه درختی (دندریتی) می‌باشد. شکافهای دشت سمنان از الگوی خاصی تبعیت نکرده، بنابراین به نظر می‌رسد که افت سطح آب زیرزمینی به تنهایی نمی‌تواند عامل اصلی به وجود آمدن ترک‌های ایجاد شده باشد. با توجه به خصوصیات زمین شناسی منطقه و وجود خاک‌های لسی و نهشته‌های برجا، احتمال می‌رود رمبندگی خاک به عنوان عامل دیگری برای رخداد این شکافها در دشت سمنان نقش بازی کند. هدف از این تحقیق بررسی علل رخداد این ترکها و در نهایت پهنه‌بندی منطقه از نظر خطر و ریسک رخداد فرونشست و شکافها می‌باشد.



شکل ۱-۱: نمایی از ترک‌های رخ داده در محدوده مطالعاتی واقع در جنوب شرق دشت سمنان

## ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

با توجه به وجود مناطق متعدد فرونشست در ایران، لزوم شناسایی و کنترل و مدیریت این مناطق امری ضروری به نظر می‌رسد. از مزایای پیش بینی فرونشست قبل از وقوع آن می‌توان به اعمال راهکارهایی



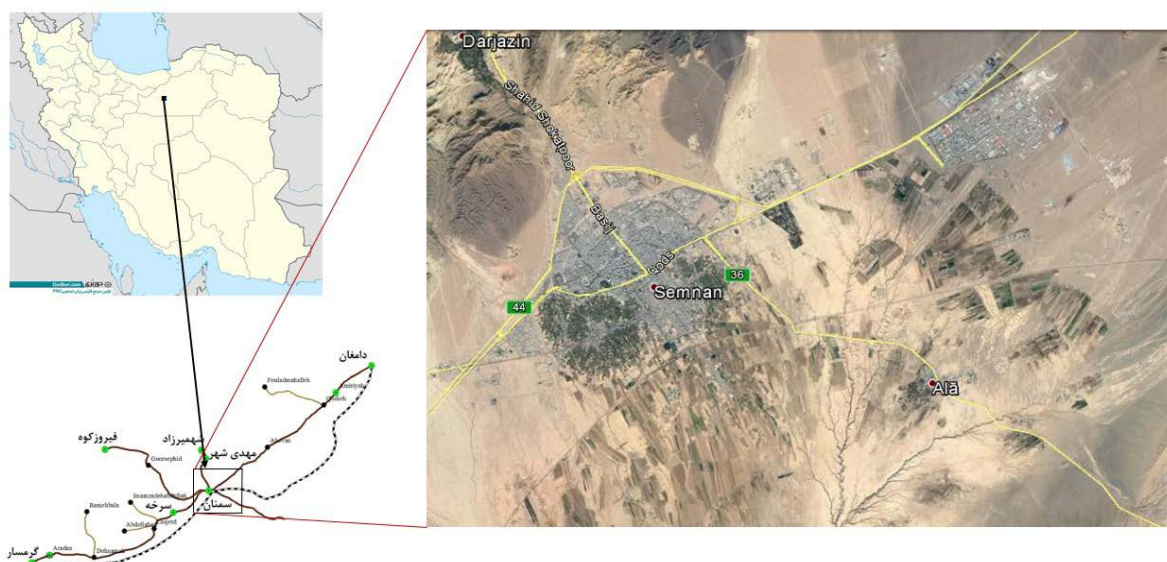
جهت جلوگیری از ایجاد فرونشست، مانند انجام برنامه‌ریزی اصولی برای کم کردن بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، راه‌کارهایی برای کم کردن خسارت وارده به سازه‌های موجود در سطح شهرها و اتخاذ تدابیری برای کاهش ضررهای اقتصادی در صورت بروز فرونشست زمین اشاره کرد. در دشت سمنان و به خصوص در بخش‌های جنوب و جنوب شرق این شهرستان، ترک‌ها و شکاف‌ها باعث وارد آمدن آسیب جدی به زیر ساخت‌ها شده است به عنوان مثال می‌توان به ایجاد ترک در بنای باستانی ارگ اعلا، ایجاد شکاف در محدوده چاه‌های آب مرکز تحقیقات کشاورزی در نزدیکی فرودگاه، آسیب به خطوط انتقال آب و کج شدگی لوله‌ها، خرابی و تعویض پی در پی جاده آسفالتی در محل عبور شکاف‌ها، گسترش ترک‌ها به سمت شمال و غرب و تحت تاثیر قرار دادن راه آهن سراسری تهران به مشهد و فرودگاه سمنان، اشاره کرد (شکل ۱-۲). در این بخش تراکم بالای شکاف‌های ایجاد شده باعث شده تا از یک طرف سازه‌های موجود با خطر گسیختگی و مشکل پایداری همراه بوده و از طرف دیگر توسعه آینده در این بخش با چالش همراه باشد. لذا برای مقابله با این پدیده و توسعه پایدار در آینده ابتدا لازم است عامل ایجاد این شکاف‌ها شناسایی شده و در نهایت مناطق خطرناک و ریسک بالا مشخص گردد تا در برنامه‌ریزی آتی این منطقه به آن توجه گردد و از توسعه در مناطق با خطر بالا اجتناب گردد.



شکل ۱-۲: نمایی از شکاف‌های ایجاد شده در اطراف راه آهن سراسری تهران - مشهد و جاده آسفالتی مجاور آن

## ۳-۱ موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

شهرستان سمنان در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۳ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه تا ۳۶ درجه شمالی که از غرب به شهرستان سرخه، از شرق به شهرستان دامغان، از جنوب به کویر مرکزی و به شهرستان نائین (استان اصفهان) و از شمال به شهرستان مهدیشهر محدود می‌گردد (شکل ۳-۱). محدوده مورد مطالعه (دشت سمنان) از نظر ارتفاعی دارای ارتفاع عمومی بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بوده، که به عنوان مثال می‌توان به ارتفاع ۱۱۰۰ متری شهر سمنان اشاره کرد. شیب عمومی منطقه از شمال به جنوب حدود ۸ تا ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۳-۱: موقعیت محدوده مطالعاتی و راه‌های دسترسی به دشت سمنان

## ۴-۱ آب و هوای منطقه مورد مطالعه

منطقه سمنان به علت همجواری با کویر مرکزی ایران و دامنه جنوبی البرز دارای تنوع آب و هوایی زیاد بوده، به طوری که با کاهش ارتفاع از شمال به جنوب در سطح منطقه، دما افزایش و بارش کاهش می‌یابد. با توجه به تغییرات دمایی و بارشی منطقه می‌توان اقلیم این ناحیه را خشک و نیمه خشک گرم

دانست. در بررسی تغییرات دمایی منطقه، می‌توان به دو دوره کاملاً متفاوت و مجزای سرد و گرم پی برد. دوره سرد نسبتاً کوتاه و شامل ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند بوده و دوره گرم شامل بقیه‌ی ماه‌های سال می‌باشد. تغییرات درجه حرارت بین دو دوره شدید بوده و همراه با تغییر ناگهانی دما و شرایط اکولوژیکی نظیر خشکی شدید، انهدام پوشش گیاهی، کاهش بارندگی و افزایش شدت باد می‌باشد. با توجه به عوامل مختلفی نظیر سیطره توده پرفشار جنب حاره‌ای در تابستان، دوری از دریا (عدم دسترسی به منابع رطوبت)، باد پناه بودن و عدم وجود عامل صعود، این منطقه از بارش اندکی برخوردار می‌باشد. توده‌های هوای باران زا که از غرب یا شمال غرب وارد کشور می‌شوند، در عبور از ارتفاعات زاگرس، آذربایجان و البرز، فرسایش رطوبتی شدید را متحمل شده و به تدریج که به مرکز و شرق کشور نزدیک می‌شوند، توان باران زائی آن‌ها کاهش می‌یابد. به طور کلی رژیم بارش منطقه سمنان مانند اغلب استان‌های کشور مدیترانه‌ای می‌باشد. با این مفهوم فصل خشک و فاقد بارش قابل توجه در منطقه منطبق بر تابستان و ایام گرم سال و فصل بارش منطبق بر زمستان و ایام سرد سال می‌باشد (جورابلو، ۱۳۹۵).

## ۱-۵ زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

استان سمنان در یال جنوبی رشته کوه البرز و شمال کویر بزرگ ایران واقع شده است. بنابراین از نقطه نظر زمین شناسی به زون‌های ساختاری البرز و ایران مرکزی تعلق دارد. گسل سمنان واقع در شمال سمنان و گسل عطاری واقع در ۳۰ کیلومتری شرق سمنان با روند شمال شرق و جنوب غرب، حد جدا کننده ساختاری زون ایران مرکزی از البرز می‌باشد (درویش زاده، ۱۳۸۵). منطقه‌ی مورد مطالعه در یک منطقه‌ی فعال تکتونیکی واقع شده است. مهم‌ترین خصوصیات تکتونیکی آن برتری گسلش بر چین خوردگی است. جوان‌ترین واحدهای رسوبی شامل پادگان‌ها و مخروط افکنه‌های کهن، آبرفت عهد حاضر، رسوبات منفصل بستر آبراهه‌ها و رودخانه‌ها و واریزه‌ها و خاک‌های برجا می‌باشد که پهنه‌ی دشت و سطح اغلب دره‌ها و دامنه‌ها را می‌پوشاند. توالی ضخیم از سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی، آذرآواری و

دایک و توده‌های نفوذی اسیدی تا بازیک وجود دارد که نشان دهنده‌ی فعالیت تکتونیکی است. آبخوان دشت سمنان از نوع آبخوان آزاد می‌باشد که در یک دشت آبرفتی واقع شده است. طبق مطالعات ژئوفیزیک سال ۱۳۵۳، رسوبات آبرفتی در دشت سمنان به سه افق مشخص قابل تفکیک می‌باشند. بخش سطحی آبرفت شامل حدود ۳۰ تا ۱۰۰ متر رسوبات دانه درشت تا دانه ریز خشک است. بخش میانی آبرفت شامل حدود ۲۰ تا ۱۰۰ متر رسوبات دانه متوسط حاوی آب شیرین می‌باشد که از نواحی شمال غرب به طرف جنوب شرق کم مقاومت (دانه ریز یا لب شور) می‌شوند. بخش تحتانی آبرفت نیز شامل حداکثر ۳۰ متر رسوبات دانه ریز حاوی آب لب شور می‌باشد، که در تمام نقاط دشت گسترش ندارد. جنس و دانه‌بندی رسوبات در نقاط مختلف وابسته به نوع و شدت فرسایش‌پذیری واحدهای سنگی ارتفاعات بوده که اغلب از جنس کنگلومرا، ماسه سنگ و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری متعلق به دوره ائوسن می‌باشد. این سنگ‌ها در اثر فرسایش و هوازدگی به رسوباتی که به لحاظ دانه‌بندی عمدتاً شامل دانه متوسط تا دانه ریز و در حد رس، سیلت و ماسه می‌باشند، تبدیل شده‌اند. بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی به نظر می‌رسد که سنگ کف دشت از مارن‌های میوسن بوده و در بخش‌های شمالی از سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و توف کرج تشکیل شده و در بخش غربی به وسیله‌ی ته نشست‌های کنگلومرای ائوسن جایگزین می‌شوند (شرکت مهندس مشاور پنگاوران، ۱۳۸۸). به منظور نشان دادن پراکندگی سطحی تشکیلات موجود در منطقه، نقشه زمین‌شناسی دشت سمنان در شکل (۱-۴) ارائه شده است.

## ۱-۶ چینه‌شناسی در محدوده مورد مطالعه

وجود توالی‌هایی از سنگ‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک با راستای کلی شمال خاوری - جنوب باختری تا خاوری - باختری در این ناحیه به اثبات رسیده است. سازند الیکا به سن تریاس زیرین تا میانی قدیمی - ترین و نهشته‌های کواترنری جدیدترین واحدهای رخنمون یافته منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. تشکیلات سنگی مربوط به مزوزوئیک شامل سازندهای الیکا، شمشک، دلیچای و واحدهای آهکی لار

می‌باشند. واحدهای مربوط به سنوزوئیک شامل سازند کرج، قرمز زیرین، قم، قرمز بالایی، و هزار دره می‌باشند. بخش میانی منطقه نیز توسط نهشته‌های کواترنری پوشیده شده است. واحدهای سنگی تشکیل دهنده‌ی منطقه به دو دسته سنگ‌های آذرین و سنگ‌های رسوبی تقسیم می‌شوند. سنگ‌های آذرین منطقه شامل سه گروه سنگ آذرین نفوذی، بیرونی و آذرآواری می‌باشند که ارتفاعات شمالی دشت را پوشانده‌اند. سنگ‌های آذرین نفوذی شامل گابرو، گرانودیوریت، گرانیت، سنگ‌های آذرین بیرونی نیز شامل بازالت، آندزیت و تراکی آندزیت و گروه آذرآواری شامل توف و آگلومرا می‌باشند. از طرف دیگر سنگ‌های رسوبی به دو دسته شامل آواری و شیمیایی-بیوشیمیایی تقسیم می‌شوند. ماسه سنگ‌ها و شیل‌های موجود در منطقه جزء گروه آواری‌ها و آهک جزء گروه سنگ‌های رسوبی شیمیایی-بیوشیمیایی هستند (آقاناتی و حمیدی، ۱۹۹۴).

## ۱-۷ ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

از دیدگاه ژئومورفولوژی، مهم‌ترین عناصر ریخت‌شناسی موجود در منطقه می‌توان به ارتفاعات واقع در بخش شمالی و جنوبی دشت، مخروط افکنه‌ها و رودخانه‌ها اشاره کرد. ارتفاعات شمالی دشت در تراز ارتفاعی بالاتری نسبت به ارتفاعات جنوبی قرار داشته و با توجه به ویژگی‌های بارشی و زمین‌شناسی این ارتفاعات نقش موثری در تغذیه آبخوان دشت دارد. ارتفاعات جنوبی تراز ارتفاعی کمتری داشته و عمدتاً از مارن تشکیل شده‌اند و عملاً نقشی در تغذیه آبخوان ندارند.

مخروط‌افکنه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه شامل مخروط‌افکنه‌ی شمال سمنان و مخروط‌افکنه‌ی شرق سمنان می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۶). مخروط‌افکنه‌ی شمال سمنان با شیب ۱ تا ۳ درصد به سمت جنوب می‌باشد. راس مخروط‌افکنه‌ی سمنان منطبق بر دهانه‌ی رود سمنان واقع در شمال شهر است و قاعده آن به سمت جنوب بوده که روستاهای واقع در جنوب سمنان را شامل می‌شود. سطح مخروط‌افکنه سمنان که شهر سمنان بر روی آن استقرار یافته، ناهموار و مواج است و تحذب آن نتیجه کاهش آب در زمان‌های جدید می‌باشد. زیرا سیلاب‌های جدید نتوانسته آبرفت‌ها را تا انتهای مخروط

اولیه برسانند، بلکه آن‌ها را بر سطح مخروط بر جای نهاده و هر بار از قدرت حمل آن کاسته شده و بالاخره منجر به پیدایش سطحی محدب بر روی مخروط افکنه شده است. مخروط افکنه شرقی از ارتفاعات گردنه آهوان منشا گرفته و امتداد شمال شرق به جنوب غرب دارد. رودخانه‌های تامین کننده رسوبات مخروط افکنه‌ها پس از عبور از ارتفاعات پرشیب و وارد شدن به بخش دشت کم شیب با کاهش سرعت مواجه شده و از قدرت انتقال رسوبات آن کاسته می‌شود بنابراین قسمت‌های بالای مخروط افکنه (نزدیکی دهانه) درشت دانه بوده و هر چه از راس مخروط افکنه به سمت قاعده آن می‌رویم رسوبات نهشته شده ریزدانه‌تر می‌شوند. مواد تشکیل دهنده دهانه مخروط افکنه شمال سمنان شامل تخته سنگ‌ها و قلوه سنگ‌های درشت می‌باشند و مواد ریزدانه به شکل سیمان یا ماتریکس آن‌ها را در بر گرفته‌اند که دلالت بر ساختمان سیلابی آن‌هاست چرا که هیچ لایه‌بندی مشخصی ندارند. مواد ریزدانه قاعده مخروط افکنه بیشتر از جنس سیلت و رس می‌باشد. جنس اجزاء تشکیل دهنده مخروط افکنه در ارتباط با تشکیلات رخنمون یافته در ارتفاعات شمالی سمنان می‌باشد.

مهم‌ترین رود دائمی دشت، رود سمنان می‌باشد که از به هم پیوستن دو رود جزین و آبگرم حاصل می‌شود، که از شمال شهر سمنان وارد پهنه‌ی دشت می‌گردد (شکل ۱-۵). رودخانه‌ی آبگرم با داشتن شوری و EC بالا، باعث ایجاد یک باند شور و گوگردی در محل ورودش به دشت سمنان می‌شود به منظور حفظ کیفیت آب دشت با احداث بند انحرافی در سال ۱۳۹۰ آب رودخانه توسط خط لوله به پایین دست دشت منتقل و در شوره زارها تخلیه می‌شود. آب رودخانه جزین که از چشمه گلرودبار با EC پایین منشأ می‌گیرد نیز به وسیله‌ی کانال انتقال آب قبل از ورود به رود سمنان وارد سیستم آب پخش‌کن سمنان به منظور استفاده کشاورزی می‌شود که در نهایت باعث تغذیه دشت سمنان می‌گردد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۶).



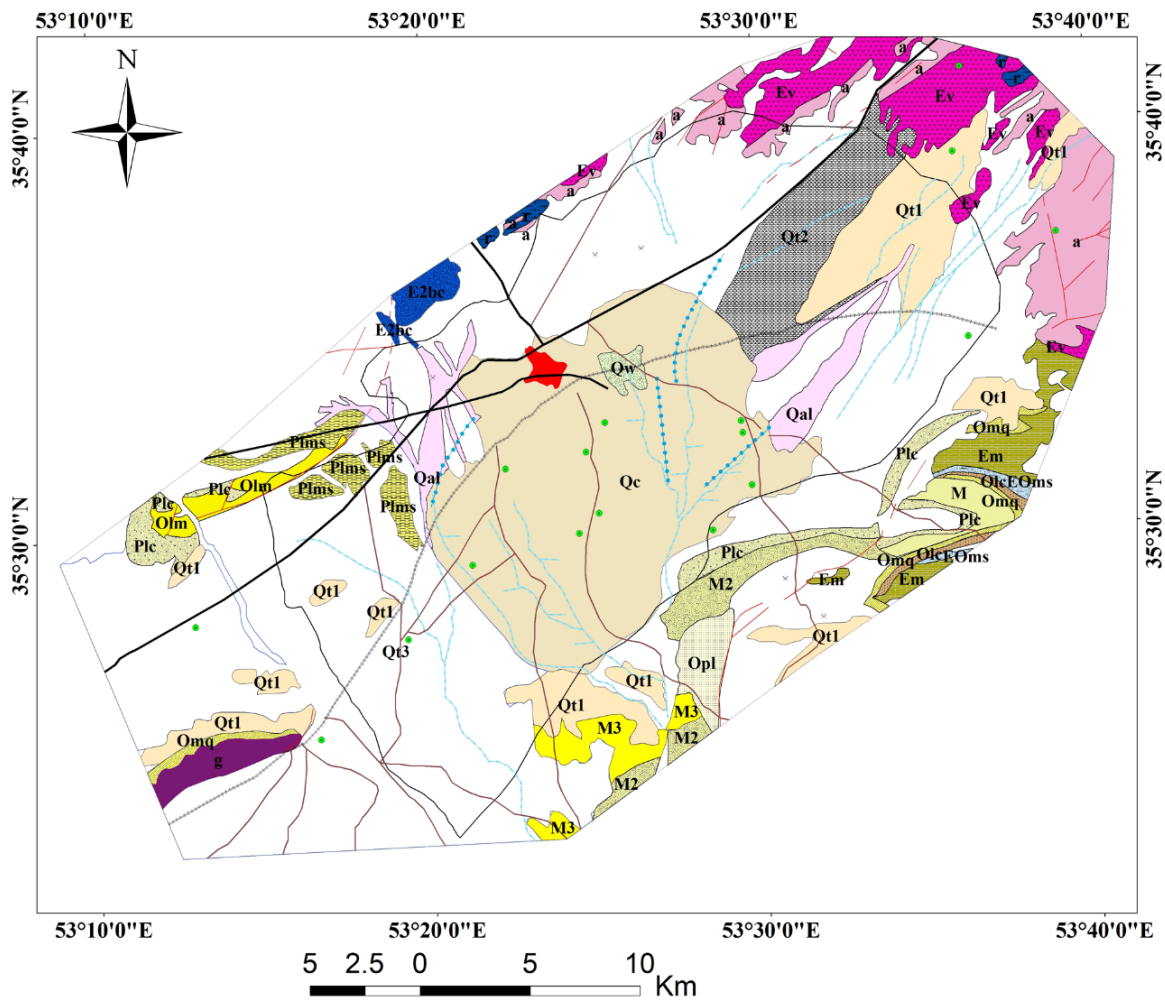
شکل ۴-۱: عکس گوگل ارث از منطقه مورد مطالعه که نشان دهنده‌ی عناصر ریخت شناسی موجود در منطقه می‌باشد

# LEGEND

CENOZOIC	QUATERNARY	
	H010	Qt1 : Older alluvial fan deposits
	Pleist	Qt2 : Young alluvial fan deposits Qt3 : Lowest alluvial fan deposits Qal : Channel fill deposits Qw : Wind blown sand
NEOGENE	Pliocene	Plms : Marl, silt, sandstone Plc : Conglomerate
	Miocene	M : Conglomerate, gypsiferous M2 : Sandstone, shale M3 : Mudstone, shale
PALEOGENE	Oligocene	Omq : Marly limestone Olc : Conglomerate, sandstone Opl : Conglomerate, clay
	Eocene	EOms : Marl Em : Marl, marlstone, tuff g : Gypsum, gypsiferous marl Ev : Volcanic rocks a : Andesite r : Rhyolite, dacite

## Symbols

- Qanat
- Fault
- Main road
- Secondary road
- Railway
- Stream chanal
- Mine in operation, abundance
- Semnan city
- Village



شکل ۵-۱: نقشه زمین‌شناسی دشت سمنان (برگرفته از حدادان و همکاران، ۱۹۹۴)





فصل ۲ : مروری بر  
مطالعات پیشین و تئوری  
تحقیق

## ۲-۱ مقدمه

رشد سریع جمعیت و توسعه روزافزون فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی در سال‌های اخیر سبب شده است تا میزان بهره‌برداری از منابع آب، به ویژه منابع آب زیرزمینی، افزایش پیدا کند. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به منظور مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی و آشامیدنی پیامدهای نامطلوبی را وارد کرده است. از جمله این پیامدها که در اثر برداشت بیش از حد منابع آب و افت سطح آب زیرزمینی حادث شده، می‌توان به پدیده فرونشست اشاره کرد. در این فصل تئوری تحقیق و نتایج مطالعات پیشین در خصوص عوامل تاثیر گذار بر پدیده فرونشست و رخداد شکاف ارائه می‌گردد.

## ۲-۲ فرونشست

فرونشست زمین (Land subsidence) عبارت است از فروریزش یا نشست سطح زمین که به علت‌های متفاوتی در مقیاس بزرگ روی می‌دهد (Hadad and Khodaian, 2002). این پدیده فروریزش ممکن است در اثر پدیده‌های زمین شناختی مانند انحلال تشکیلات زیر سطحی، تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی، بارگذاری، تراکم هیدرولیکی، انقباض خاک‌های رسی و وجود خاک‌های رمبنده روی دهد (Phien and Nutalya, 2006). فرونشست زمین یکی از مخاطرات محیطی است که در اثر فعالیت‌های انسانی هم چون تخلیه دراز مدت آب، نفت و گاز از مخازن زیرزمینی و یا استخراج معادن زیرزمینی می‌تواند تشدید یابد. به طور کلی عوامل مختلفی باعث وقوع پدیده فرونشست زمین می‌شود. در بسیاری از نقاط دنیا تنها انحلال تشکیلات زیر سطحی، برداشت بی‌رویه‌ی آب از سفره‌های آب زیرزمینی، انقباض خاک‌های لسی و رمبندگی خاک‌ها به عنوان عامل فرونشست زمین شناخته شده‌اند. با این وجود فرونشست ناحیه‌ای ناشی از بارگذاری بر روی خاک‌های ریزدانه در اثر افت سطح آب زیرزمینی می‌باشد. بنابراین در این پژوهش فرونشست ناحیه‌ای مورد بحث می‌باشد.

## ۲-۳ افت سطح آب زیرزمینی

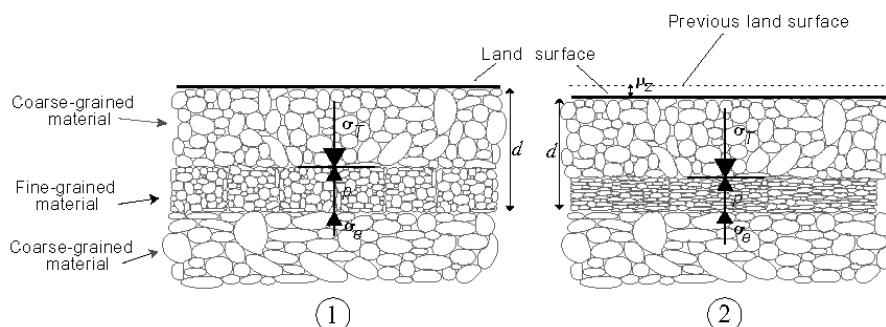
نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد در مناطقی که تغییرات سطح آب زیرزمینی مرتبط با برداشت بی‌رویه از منابع آبی باشد، این تغییرات باعث کاهش سطح ایستابی می‌شود. در چند دهه‌ی اخیر بسیاری از دشتهای ایران با این مشکل مواجه شده‌اند. به عنوان مثال میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت شهریار (جنوب غربی تهران) در طی سال‌های ۸۳-۱۳۸۴ در بخش‌های مختلف دشت بررسی گردید. در قسمت شمال شرقی میزان تغییرات سطح ایستابی صفر در نظر گرفته شده است. در قسمت شمال غربی دشت سطح ایستابی روند کاهشی داشته و به طور متوسط ۲۰ متر سطح آب زیرزمینی افت داشته است. بیشترین افت در این دشت حوالی یافت آباد حدود ۴۱/۶ متر بوده است (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴). در دشت کاشمر توسعه کشاورزی همراه با رشد جمعیت و افزایش نیاز آبی باعث استحصال بی‌رویه و افت سطح آب زیرزمینی شده است. افت سالیانه سطح آب زیرزمینی در این دشت حدود ۰/۸ متر می‌باشد.

افت سطح ایستابی در دشت فامنین همدان در طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۸ بررسی شده است. در این دشت افت سطح ایستابی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در چاه‌های کشاورزی می‌باشد. در این دشت سالانه ۱۵۵ میلیون متر مکعب آب از آبخوان برداشت می‌شود که موجب افت ۲/۵ تا ۳ متری سطح ایستابی در دشت شده است (Khanlari et al., 2012). وجود چاه‌های صنعتی و کشاورزی در آبخوان دشت بهاباد (استان یزد) سبب افت ممتد سطح ایستابی شده است، به طوری که میانگین سالیانه افت در این دشت حدود ۵۰ سانتی متر گزارش شده است (شیرافکن و جعفری، ۱۳۹۲).

## ۲-۴ مکانیسم ایجاد نشست زمین

یکی از اصلی‌ترین علل ایجاد فرونشست زمین در مقیاس بزرگ، برداشت بی‌رویه از مخازن آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی است که این پدیده باعث فرونشست تدریجی زمین در سفره‌های رسی و

نشست سریع در سفره‌های ماسه‌ای می‌گردد (Schuman and Poland, 1969). این وضعیت به ویژه در جایی که تراکم پمپاژ بی‌رویه از سفره‌های آبدار ماسه‌ای متخلخلی که بین لایه‌های رسی قرار دارد، حاد بوده و موجب فرونشست گسترده‌ای می‌شود. افت سطح آب زیرزمینی یا به عبارت دیگر کاهش وزن اشباع آبخوان سبب افزایش فشار بین دانه‌ای (تنش موثر) در خاک می‌گردد (Modoni et al., 2013). فشار بین‌دانه‌ای در هر عمق به صورت تفاضل فشار کل و فشار هیدرولیکی است. نتیجه این افزایش فشاردانه‌ای (افزایش تنش موثر) سبب تراکم لایه‌های تراکم پذیر خاک و در نهایت نشست ماندگار و غیرقابل برگشت زمین می‌گردد (طاحونی، ۱۳۸۶). این عمل زمان بر بوده و به آهستگی به وقوع پیوسته، چرا که زهکشی آب از لایه ریزدانه به دلیل افت فشار هیدرولیکی به کندی انجام می‌پذیرد. در چنین شرایطی یک تراکم غیرالاستیک به دلیل افزایش تنش موثر (اعمال تنشی بیش از تنش‌هایی که قبلاً تحمل نموده) در خاک رخ داده و چیدمان دانه‌های خاک به هم ریخته و چیدمان جدید باعث کاهش حجم و ضخامت عمودی لایه‌ها و در نهایت نشست می‌گردد (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷). نشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در خاک‌های ریزدانه نشست پلاستیک و عملاً غیرقابل برگشت می‌باشد (شکل ۱-۲). مقدار فرونشست زمین به ازای هر ۱ متر افت سطح آب زیرزمینی معمولاً بین ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر متغیر است. دامنه‌ی این تغییرات به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع تنش بستگی دارد.



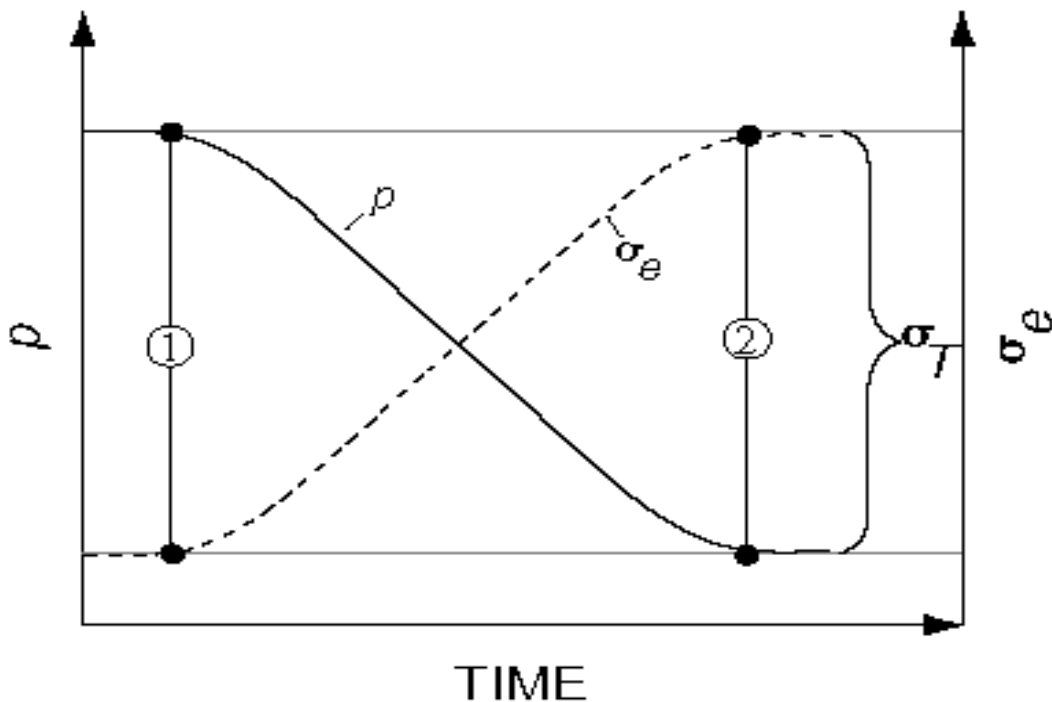
شکل ۱-۲: کاهش حجم لایه‌های ریزدانه و نازک شدن آن در اثر زهکشی، ۱- قبل از زهکشی و ۲- بعد از زهکشی یا نشست (اقتباس از لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷)

تنش موثر بر اساس قانون ساده ترازقی از (رابطه ۲-۱) پیروی می‌کند.

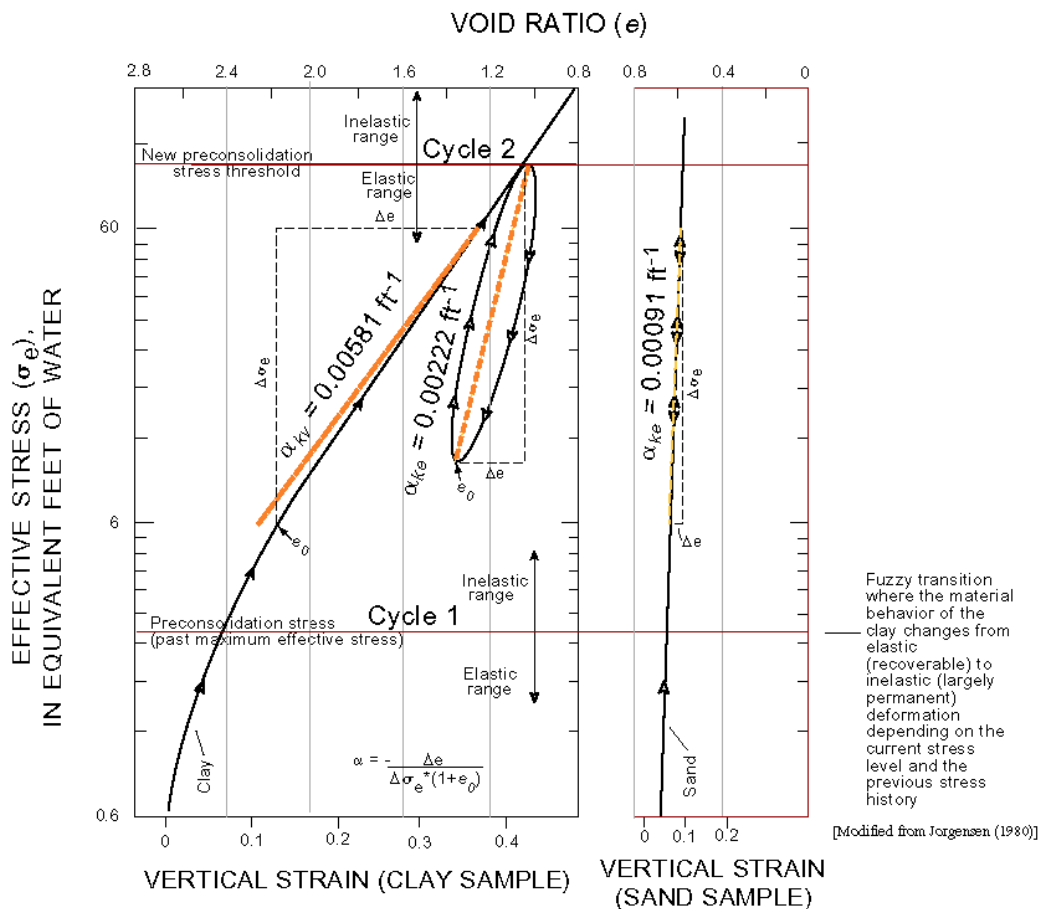
$$\sigma_{\theta} = \sigma_T - \rho \quad (1-2)$$

که در این رابطه  $\sigma_{\theta}$  تنش موثر،  $\sigma_T$  تنش کل و  $\rho$  فشار آب منفذی می‌باشد. ارتباط بین تنش موثر و فشار آب منفذی در اثر افت سطح آب زیرزمینی در شکل (۲-۲) ارائه شده است.

در شکل (۳-۲) مقایسه بین میزان نشست در خاک ریزدانه رسی با خاصیت تراکم پذیری زیاد و خاک درشت دانه ماسه نشان داده شده است. این شکل به خوبی میزان نشست قائم بیشتر در خاک‌های ریزدانه نسبت به درشت دانه را نشان می‌دهد. به همین دلیل خاک‌های ریزدانه از پتانسیل بیشتری جهت نشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی برخوردار بوده و بخش زیادی از نشست رخ داده غیر قابل برگشت خواهد بود.



شکل ۲-۲: رابطه بین تنش موثر و فشار آب منفذی (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷)



شکل ۲-۳: مقایسه بین تغییر شکل قائم رس و ماسه (اقتباس از دم شناس، ۱۳۸۸)

ایران از جمله کشورهایی است که به دلیل کمبود منابع آب سطحی، بیشترین آب مصرفی در کشاورزی را از منابع آب زیرزمینی تامین می‌نماید. بنابراین کمبود منابع آب زیرزمینی یکی از بحران‌های حال حاضر کشور محسوب می‌گردد. اولین بار فرونشست زمین در ایران، در دشت رفسنجان (سال ۱۳۴۶) همراه با پدیده لوله‌زایی در چاه‌های کشاورزی گزارش شده است (حسینی میلانی، ۱۳۷۳). بررسی فرونشست دشت شهریار-تهران نشان می‌دهد که پدیده فرونشست در اثر دو عامل افت سطح آب زیرزمینی و ضخامت زیاد نهشته‌های ریزدانه می‌باشد. فرونشست در این دشت دارای الگوی V شکل بوده و بیشترین نرخ فرونشست حدود ۱۶ سانتی‌متر در سال می‌باشد (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴). برداشت بیش از حد آب زیرزمینی در دشت اشتهارد موجب نشست زمین شده است. در این منطقه نشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های سطح آب زیرزمینی طی دوره ۸۳-۱۳۷۹، زمین‌شناسی منطقه

و مشخصات مهندسی رسوبات مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی موثرترین عوامل فرورانشست شامل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی، ضخامت لایه‌های رسوبی و ویژگی‌های مهندسی رسوبات می‌باشد. در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۸۳، سطح ایستابی حدود ۵ متر افت داشته است. افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌هایی از اشتهارد که لایه‌های زیر سطحی از جنس رس و مارن بوده، باعث فرورانشست بیشتری نسبت به بخش‌های درشت دانه، شده است (رنجبر و جعفری، ۱۳۸۸). افت سطح آب زیرزمینی در محدوده‌هایی از آبخوان دشت مشهد باعث نشست و جابجایی زمین شده است. آثار نشست به صورت گسیختگی و کج‌شدگی لوله‌های جدار نمایان شده است و سبب ایجاد مشکلاتی از جمله تخریب سازه‌های زیر سطحی گردیده است (موسوی مداح و همکاران، ۱۳۹۲). در دشت مرو دشت افت سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه، عمق زیاد آبرفت روی بستر سنگی، ضخامت زیاد لایه‌های ریزدانه رسی سبب فرورانشست در دشت شده به طوری که میزان نشست در روستای شول به ازای ۲۱ متر افت سطح آب زیرزمینی، به طور متوسط ۱۶/۵ سانتی‌متر تعیین شده است. با فاصله گرفتن از این روستا، میزان فرورانشست به علت افزایش ضخامت آبرفت، به حدود ۲۲ سانتی‌متر افزایش یافته است (رهنما و میراثی، ۱۳۹۵). در جنوب غربی تهران در اثر برداشت بیش از حد آب زیرزمینی در طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۲ سطح آب زیرزمینی ۱۱/۶۵ متر کاهش یافته، که باعث ایجاد فرورانشست در این دشت شده است (Mahmoudpour et al., 2016). در استان یزد فرورانشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ به علت کاهش سطح آب زیرزمینی، میزان نشست حدود ۲۲ سانتی‌متر برآورد شده است (Amighpey and Arabi, 2016).

در مقیاس جهانی خطر فرورانشست در بین سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۷۰ که همزمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی است به اوج خود رسید (Waltham, 1989). گزارش‌های متعددی از فرورانشست زمین خصوصاً از نقاط خشک و کم باران در سراسر جهان ارائه گردیده است. بر اساس مطالعه کارگروه فرورانشست در سازمان یونسکو (IHP)، قدیمی‌ترین فرورانشست شناخته شده در ایالت آلاباما (Alabama)



ایالت متحده آمریکا در سال ۱۹۰۰ میلادی اتفاق افتاده است. اساس مطالعه این کار گروه بررسی‌های تفضیلی بر روی ۴۲ فرونشست در ۱۵ کشور جهان بوده است. از حدود سال ۱۹۶۵ یونسکو اولین برنامه جهانی خود را برای چرخه‌ی آب شناختی تحت عنوان دهه‌ی جهانی آب‌شناسی آغاز نمود که در سال‌های بعد مطالعه فرونشست‌ها به یکی از موضوع‌های اصلی تبدیل گشت. پدیده نشست زمین در بیش از ۱۵۰ شهر مهم جهان گزارش گردیده است (Hu et al., 2004). برای نمونه نشست زمین در اثر پمپاژ آب زیرزمینی در بانکوک تایلند می‌توان اشاره کرد که حداکثر نشست سالانه ۱۲۰ میلی متر در اوایل دهه ۱۹۸۰ گزارش شده است (Phien-We et al., 2006). از نمونه‌های مهم دیگر نشست زمین می‌توان به شهر ساحلی و تاریخی ونیز در ایتالیا اشاره نمود. این شهر بر روی دلتای رودخانه پو (Po) و از رسوباتی ماسه‌ای، سیلتی و رسی ساخته شده است. در این شهر افسانه‌ای کلیساها و قصرها در سال‌های قبل با نرخ حدود ۰/۵ سانتی‌متر در سال در زمین فرو رفته است. در فاصله سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۳ این شهر حدود ۱۵ سانتی‌متر فرو نشست داشته است (Gambolati et al., 1974). از نمونه‌های دیگر می‌توان به نشست دشت ساحلی ستالونیکی در شمال یونان به میزان حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال، شهر لس بائوس - کتلمن در ایالت کالیفرنیا به مقدار ۸/۸ متر تا سال ۱۹۶۹ اشاره کرد (Larson et al., 2001). در اثر استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی در غرب تایوان فرونشست رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش و کاهش سطح آب زیرزمینی در تایوان تحت تاثیر باران و خشک‌سالی بوده و به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی فرونشست زمین اتفاق افتاده است (Chen et al., 2010). در پژوهشی دیگر فرونشست زمین در مناطق سیندوس و کالوچوری یونان مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی فرونشست زمین ۳۵ میلی‌متر در سال برآورد شده است. بررسی‌های انجام شده در این مناطق نشان می‌دهد که فرونشست زمین در ارتباط با هیدرولوژی منطقه می‌باشد. در این مناطق کاهش سطح آب زیرزمینی عامل پدیده فرونشست زمین می‌باشد (Nikos et al., 2016).

بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و کاهش سطح ایستابی در سال‌های اخیر باعث رخداد شکاف در زمین‌های کشاورزی و ساختمان‌ها در بعضی از دشت‌های بحرانی کشور نیز شده است (Rahnema and Mirassi, 2014). رخداد شکاف ناشی از فرونشست به دلیل وقوع فرونشست غیریکنواخت بوده که برآیند آن باعث به کشش افتادن بخشی از دشت شده و چون مصالح خاکی مقاومت کششی بسیار پایینی دارند ترک خورده و به صورت شکاف‌های طولی نمایان می‌گردد. علت رخداد نشست نامتقارن می‌تواند تغییر ضخامت لایه‌های ریزدانه (به علت تغییر توپوگرافی زیر سطحی یا گسل خوردگی) و یا متغیر بودن افزایش تنش ناشی از افت متفاوت سطح آب در دشت باشد.

رخداد شکاف در طی سال‌های اخیر در بسیاری از دشت‌های کشور گزارش شده است. به عنوان مثال می‌توان به رخداد شکاف در دشت‌های کاشمر، مهیار اصفهان، ورامین، نیشابور، هزاه، سمنان و ... اشاره کرد. در غرب دشت کاشمر ایجاد شکاف‌های کششی در رابطه با نشست‌های ناهمگن سطح زمین به دلیل افت سطح ایستابی و کاهش فشار هیدرواستاتیک در محیطی است که دارای تغییر رخساره از رسوبات درشت‌دانه به ریزدانه می‌باشد. در این دشت ایجاد شکاف در اثر زهکشی آب از لایه‌های ریزدانه به دلیل افزایش تنش موثر در اثر افت فشار هیدرولیکی است (لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۷). در دشت مهیار اصفهان برداشت طولانی مدت از آب‌های زیرزمینی با توسعه کشاورزی باعث فرونشست زمین و ایجاد شکاف شده است. حداکثر میزان فرونشست در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ حدود ۹ سانتی‌متر در سال بوده است (Davoodijam et al., 2015). شکاف‌های ایجاد شده در دشت منوجان (جنوب استان کرمان) ناشی از وجود خاک‌های رسی پوک و متخلخل و افت سطح آب زیرزمینی بوده است. وقوع خشکسالی طولانی مدت و کاهش تغذیه باعث افت سطح آب زیرزمینی و ایجاد نشست زمین در دشت شده است (عباس نژاد، ۱۳۹۶). شکاف‌های ناشی از فرونشست در جنوب غربی دشت کاشان خسارات زیادی به ساختمان‌ها، مزارع و جاده‌ها وارد کرده است. علت اصلی این پدیده کاهش سطح آب زیرزمینی به دلیل افزایش تعداد چاه‌های عمیق و پمپاژ آب‌های زیرزمینی می‌باشد. حداکثر نرخ فرونشست در این دشت حدود ۳/۵ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Ghazifard et al., 2016).

طول بزرگترین شکاف ایجاد شده در آمریکا حدود ۳/۵ کیلومتر می‌باشد ولی اغلب شکاف‌ها طولشان به چند صد متر می‌رسد. این شکاف‌ها در مرحله اولیه یکسری ترک‌های کوچکی بوده که به هم متصل شده‌اند (Houzer, 1988). در دره Cedar (ایالت یوتا) شکافی در شمال شرقی و جنوب غربی ایجاد شده است. کاهش سطح آب زیرزمینی به دلیل پمپاژ آب زیرزمینی سبب تراکم رسوبات ریزدانه شده است. در واقع تراکم رسوبات عامل اصلی در رخداد فرونشست زمین شناخته شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در این محل سالانه ۶۰ سانتی‌متر کاهش یافته و منجر به فرونشستی در حدود ۳ سانتی‌متر در سال شده است (Knudsen et al., 2014).

## ۲-۵ تعریف رمبندگی (یا فروریزش)

در بررسی تاریخچه رمبندگی می‌توان تعریف زیر را برای رمبندگی خاک ارائه داد. رمبندگی به ریزش ناگهانی خاک در اثر از دست رفتن مقاومت عامل پیوند دهنده ذرات خاک اتلاق می‌شود و میزان رمبندگی ایجاد شده وابسته به نسبت تخلخل اولیه خاک است (Jenings and Knight, 1975). نهشته‌های سیلتی تشکیل یافته تحت شرایط آب و هوایی خشک مستعد کاهش حجم قابل ملاحظه یا رمبندگی در هنگام اشباع شدن (مرطوب شدن) هستند. بنابراین، نفوذ آب سطحی که به شکل آبیاری، نشت از لوله‌ها و یا بالا آمدن سطح آب زیرزمینی ممکن است موجب به وقوع پیوستن نشست‌های زیادی گردد. ویژگی‌های اصلی که باعث می‌شوند این خاک‌ها خصوصیات فروریزی از خود نشان دهند، عبارتند از: تخلخل بالا (بیش از ۴۰٪)، درجه اشباع پایین (زیر ۶۰٪)، میزان لای بالا (بیش از ۳۰٪، گاهاً تا ۹۰٪) و نرم شدگی سریع در آب که کمتر از ۱ دقیقه است.

## ۲-۵-۱ رابطه پدیده رمبندگی خاک و رخداد شکاف

خاک‌های رمبنده در زمره‌ی خاک‌های مساله دار از نقطه نظر زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک می‌باشند و وجود آنها در پنج قاره جهان نیز گزارش شده است (Chenxing et al., 2014). در سال

۱۹۵۸ یکی از اولین معیارهای میزان رمبندگی خاک توسط کلونجر برمبنای چگالی خشک خاک ارائه شد (Clevenger, 1959). برگ در مشاهدات خود از کانال‌های حفاری شده در زمین‌های لسی قسمت-های مرکزی آسیا مثل کانال واکاش در تاجیکستان، کانال کاباردا در قفقاز، متوجه شد که با شروع جریان آب در این کانال‌ها، دیواره و زمین‌های اطراف در طول کانال‌ها شکسته و ترک‌هایی عمودی در آنها ایجاد شد و به موازات کانال حفاری شده در خاک‌های رسی یا لسی فرونشست پیدا کرده است. تعداد این ترک‌های ایجاد شده بین ۵ تا ۱۲ عدد متغیر بوده و عمق این ترک‌ها به ۱/۵ تا ۲/۵ متر می‌رسد که در اثر مرطوب شدن خاک‌ها با آب در این مناطق ایجاد شده است (Berg, 1964). در قسمت‌هایی از دشت‌های شمالی چین رمبندگی خاک‌های لسی باعث ایجاد ترک‌ها و شکاف‌ها و در نهایت موجب فرونشست در این مناطق شده است (Jianbing et al., 2016). صالحی و همکاران (۱۳۸۹) با موضوع نقش خاک‌های لسی در ایجاد فروچاله‌ها و شکاف موجود در اطراف سدهای خاکی آلاگل و گلستان، نشان دادند که میزان رمبندگی در خاک‌های این منطقه بالاست و عامل اصلی ایجاد شکاف‌ها در این مناطق به شمار می‌رود. باقری و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه خود به منظور شناسایی خاک‌های رمبنده در استان سمنان و ارزیابی میزان پتانسیل رمبندگی آنها، ۳۲ نقطه از دشت‌های استان که دارای لایه‌های خاک ریزدانه و بادرفتی بودند را مورد بررسی قرار دادند و ارتباط بین عوامل موثر بر رمبندگی نظیر درصد رطوبت، وزن مخصوص خشک و ... را بررسی کردند. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های آنها حاکی از آن بود که که نمونه‌های متعلق به ۲۰ نقطه در منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل رمبندگی با درجات مختلف بوده و ۱۲ نقطه دیگر فاقد پتانسیل رمبندگی می‌باشد.

ضرورت بررسی خاک‌های رمبنده با توجه به گسترش نسبتاً وسیع این خاک‌ها و لزوم طراحی سازه‌ها، کانال‌های آبیاری و سایر ابنیه‌های فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ و احداث مناطق مسکونی، لوله‌های آب و فاضلاب و ... بر روی این خاک‌ها اهمیتی دوچندان می‌یابد (Asadi-langroudi et al., 2016).

## ۲-۵-۲ سازوکار پدیده رمبندگی

سازوکارهای مختلفی برای این پدیده ارائه شده است که به دو گروه سازوکارهای میکرومکانیکی و ماکرومکانیکی تقسیم می‌شوند. در سازوکار میکرومکانیکی پیوند بین ذرات خاک و اندرکنش آب و ذرات تشکیل دهنده خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سازوکار ماکرو مکانیکی تنها به رفتار خاک در برابر افزایش رطوبت بدون توجه به اندرکنش ذرات تشکیل دهنده خاک و آب پرداخته می‌شود.

## ۱-۲-۵-۲ سازوکار پدیده رمبندگی از نقطه نظر میکرومکانیکی

این سازوکار توسط باردن و همکاران (۱۹۶۹) برای خاک‌های غیراشباع که دارای ساختمان باز هستند مطرح شده است. طبق این نظر عامل پیوند دهنده بین ذرات می‌تواند نیروی موئینگی یا عوامل سیمان شدگی مثل املاح کربنات کلسیم، اکسید آهن و یا ذرات رسی باشد که این عوامل پیوند دهنده در اثر تنش وارده به خاک و در اثر اشباع شدن از بین رفته و باعث ایجاد پدیده رمبندگی در خاک می‌شود. خاک‌های نواحی خشک معمولاً غیراشباع و خاک‌های ریزدانه‌ی این نواحی دارای مکش آب منفذی نسبتاً بزرگی هستند. بالا بودن نسبت تبخیر بر نفوذ آب به زمین موجب ایجاد فشار منفذی منفی (مکش خاک) می‌گردد. اگر مکش خاک به میزان کافی بالا باشد، هوا وارد خاک می‌شود. در این چنین محیط - هایی رفتار خاک را نمی‌توان تنها بر حسب تنش موثر تشریح کرد. اما می‌توان رفتار آن را بر اساس تنش کل اعمال شده و مکش آب موجود در خاک تشریح کرد. معمولاً دو پارامتر منتخب شامل تنش خالص  $(\sigma - U_a)$  و مکش ماتریکس  $(U_a - U_w)$  هستند که در این روابط  $\sigma$  تنش کل،  $U_a$  فشار هوای منفذی و  $U_w$  فشار آب منفذی می‌باشد. هم‌چنان که خاک آب جذب می‌کند و درجه اشباع آن افزایش می‌یابد، مکش کاهش می‌یابد. این عمل اغلب تحت مقدار تنش خالص ثابتی روی می‌دهد. تغییر در تنش کل اعمال شده و مکش آب موجود در خاک بصورت جداگانه موجب تغییر در حجم و مقاومت خاک می‌شود (Barden, 1969). اگر خاک دارای یک ساختار نیمه پایدار باشد، به محض رسیدن مکش آب موجود به

کمتر از یک مقدار بحرانی ممکن است رمبندگی رخ دهد. بسته به درصد رطوبت خاک، رمبندگی ممکن است پیشرونده یا ناگهانی رخ دهد. مقدار رمبندگی رخ داده بستگی به نسبت تخلخل اولیه خاک و هم چنین به تنش‌های اعمال شده به خاک دارد. در اثر عوامل گوناگون طبیعی و مصنوعی از قبیل بالا آمدن سطح آب‌های زیرزمینی، بارش باران و شکستن لوله‌های آب، چسبندگی ظاهری ناشی از نیروی مکش بین ذرات از بین رفته و پدیده رمبندگی رخ می‌دهد (Bell, 2002).

## ۲-۵-۲-۲ سازوکار پدیده رمبندگی از نقطه نظر ماکرو مکانیکی

نایت (۱۹۶۱)، این سازوکار را برای خاک دارای ساختمان باز مطرح نمود. طبق نظر وی در اثر افزایش رطوبت خاک در اثر اعمال تنش، مقاومت اتصالات رسی ما بین ذرات کاهش یافته و کمتر از تنش برشی وارده بر خاک می‌شود و در نتیجه پدیده رمبندگی در خاک رخ می‌دهد. کاهش مقدار مقاومت خاک با توجه به میزان ناتراوا بودن رس‌ها، بسته به نوع رس موجود در خاک، متغیر است. در نتیجه ممکن است رمبندگی در خاک‌ها ناگهانی باشد و یا اینکه ۲۰ الی ۳۰ درصد آن به آرامی اتفاق افتد. این نظریه در سال ۱۹۷۵ توسط بوت و سپس توسط (Fedra, 1988) مجدداً مطرح شده است. خاک‌های رمبنده به رطوبت حساس هستند به طوری که افزایش درصد رطوبت منجر به کاهش حجم خاک خواهد شد. یکی از نتایج شهر نشینی و توسعه شهری و صنعتی در نواحی خشک، افزایش درصد رطوبت خاک می‌باشد. بنابراین اثرات تغییرات تحمیلی بر رژیم آب‌های سطحی و زیرزمینی بر روی خاک‌های حساس به رطوبت در نواحی خشک مسئله بحرانی بر سر راه توسعه و گسترش شهرنشینی در نواحی خشک است.

## ۲-۵-۳ عوامل مؤثر بر پدیده رمبندگی

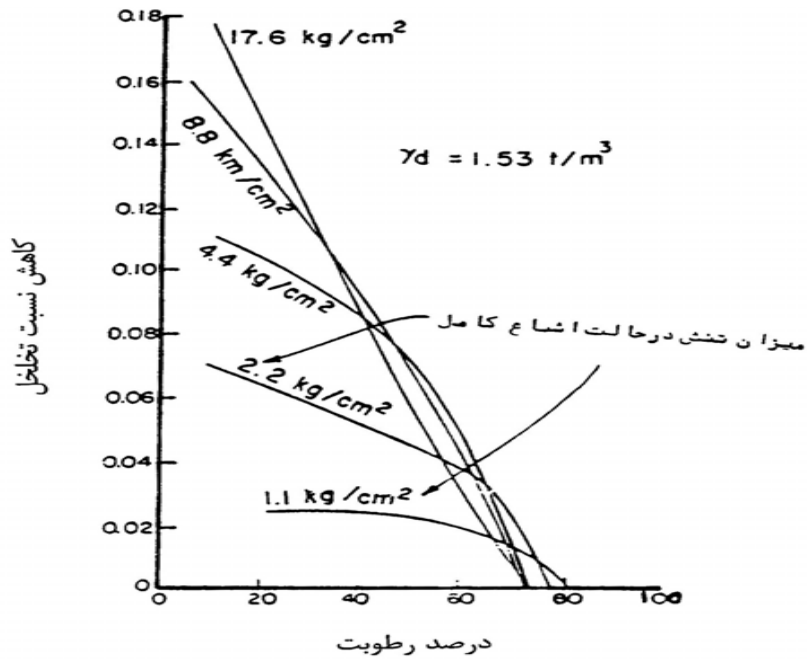
خاک‌های رمبنده در حقیقت رسوبات دانه‌ریزی هستند که قسمت اعظم آنها از سیلت، رس و ماسه‌های دانه‌ریز تشکیل شده است. این رسوبات از ته نشست موادی که به صورت شناور در باد حمل می‌شوند، به وجود می‌آیند. این نوع خاک‌ها عموماً دارای چسبندگی بوده و رنگ آنها قهوه‌ای روشن است. اندازه

ذرات خاک‌های رمبنده بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ میلی‌متر بوده و چسبندگی ذرات به علت وجود مواد ریزدانه آهکی، رسی و یا نمک‌هایی مانند سولفات‌ها، کربنات‌ها، کلریدها و ژپس‌ها می‌باشد که در اثر افزایش رطوبت این مواد شسته شده و نقش پیوند دهنده‌ی آنها از بین می‌رود. این امر باعث آرایش مجدد دانه‌ها و کاهش حجم خاک شده و با ایجاد حفره‌هایی سبب نشست زمین می‌شوند (علیزاده، ۱۳۸۷ و صالحی و همکاران، ۱۳۸۹).

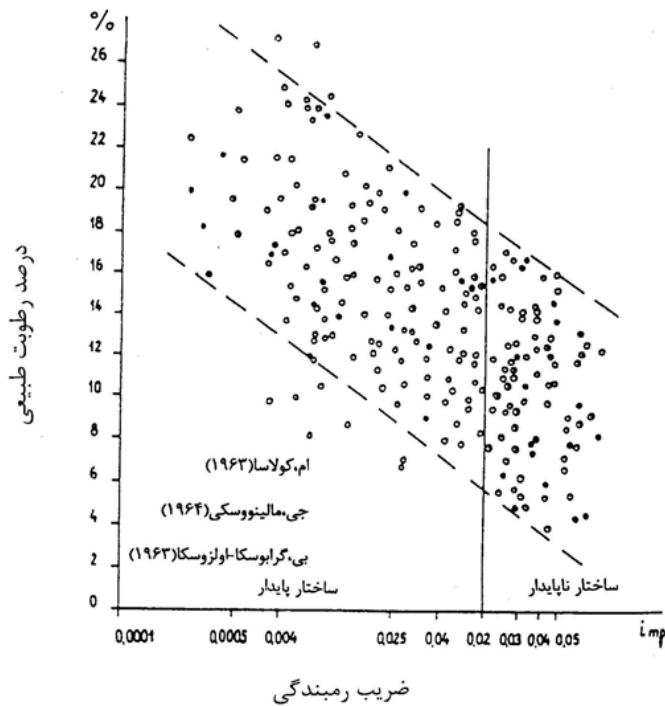
## ۲-۵-۳-۱ افزایش رطوبت

این نوع خاک‌ها به رطوبت حساس هستند و افزایش درصد رطوبت منجر به کاهش حجم آن‌ها خواهد شد. میزان رطوبت اولیه ارتباط مستقیمی با درجه اشباع دارد. هر چه درجه اشباع اولیه خاک کمتر باشد، درصد رمبندگی خاک بیشتر است. خاکی که درصد رطوبت بالایی دارد پتانسیل رمبندگی کمتری نسبت به خاک‌های با رطوبت اولیه کم از خود نشان می‌دهد (بانی خیر و اصغری، ۱۳۸۴). شکل (۲-۴) تاثیر درجه اشباع اولیه خاک در میزان رمبندگی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، در درجه اشباع پایین (۵۰٪ تا ۱۰٪) مقدار رمبندگی متناسب با مقدار تنش اعمال شده تغییر می‌کند، ولی در درجه اشباع اولیه‌ی بیش از (۶۰٪ تا ۵۰٪) مقدار رمبندگی ناچیز بوده و مستقل از تنش وارده بر خاک است.

شکل (۲-۵) تاثیر درصد رطوبت اولیه بر وضعیت پایداری لس‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود به طور کلی هر چه درصد رطوبت اولیه در خاک بالاتر باشد مقدار ضریب رمبندگی خاک کمتر از حد بحرانی برای رمبندگی (۰/۲٪) می‌شود. در توجیح این امر می‌توان گفت که خاکی که درصد رطوبت بالایی دارد، در اثر مرطوب شدن پیوندهای بین ذرات سست‌تر شده و یا کاملاً از بین رفته و در نتیجه در اثر مرطوب شدن بیش‌تر، درصد رمبندگی کمتری نسبت به خاک‌های با رطوبت اولیه‌ی کمتر، از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر بخشی از رمبندگی خاک قبلاً اتفاق افتاده است.



شکل ۲-۴: ارتباط بین درجه اشباع اولیه‌ی خاک و میزان کاهش درجه تخلخل آن (اقتباس از Grabowska - Olzewska, 1988)

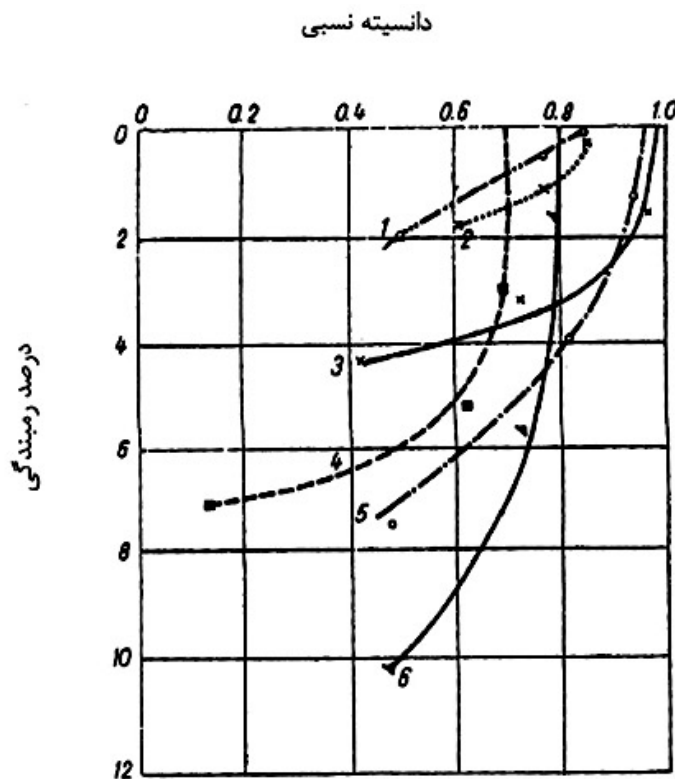


شکل ۲-۵: ارتباط بین درصد رطوبت طبیعی خاک و ضریب رمبندگی (اقتباس از Grabowska - Olzewska, 1988)



## ۲-۵-۳-۲ دانسیته نسبی

بررسی نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده توسط جکی (۱۹۴۸) به نقل از (Lutenegeer and Halberg, 1988)، نشان می‌دهد که بین مقدار رمبندگی و دانسیته خاک ارتباط مشخصی وجود دارد. جکی این ارتباط برای خاک‌های مختلف در شکل (۲-۶) نشان داده است. به طوری که ملاحظه می‌شود هر چه مقدار دانسیته نسبی خاک کمتر شود، به علت افزایش تخلخل درصد رمبندگی آن بیشتر می‌شود.

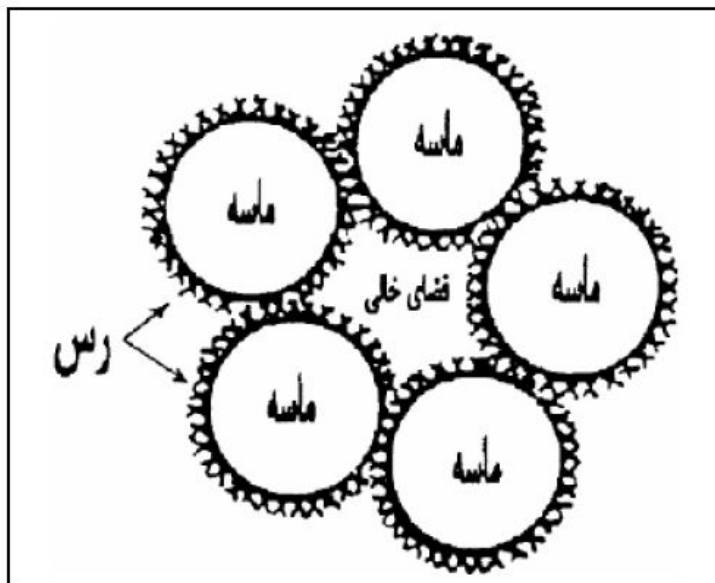


شکل ۲-۶: رابطه‌ی بین دانسیته نسبی خاک و درصد رمبندگی خاک (جکی، ۱۹۴۸)  
 ۱- ماسه دانه ریز ۲- ماسه دانه درشت ۳- شن ۴ و ۵- شن دانوب ۶- شن

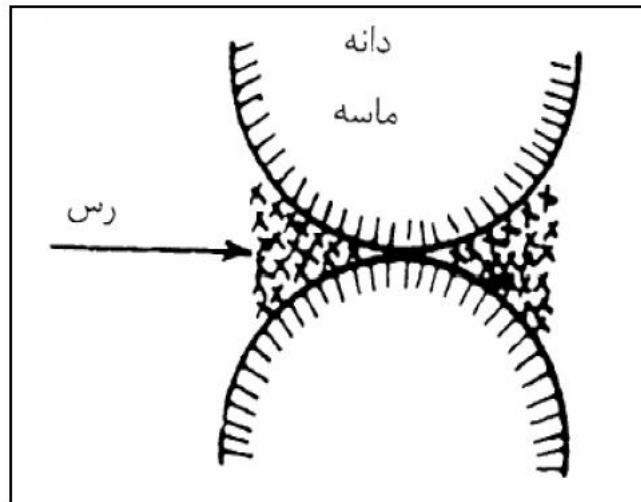
## ۲-۵-۳-۳ دانه‌بندی و درصد انواع ذرات تشکیل دهنده‌ی خاک

برای بررسی آزمایشگاهی تاثیر نسبت درصد ذرات ماسه و سیلت در میزان رمبندگی خاک‌ها، الصحبی و همکاران (۱۹۸۷) ترکیبی از خاک با درصدهای متفاوت از ذرات ماسه، سیلت و درصد ثابت ذرات رس

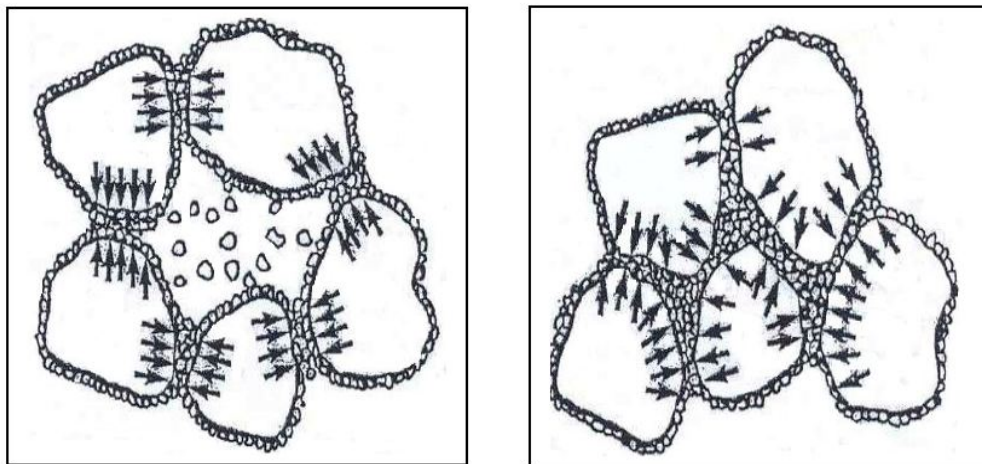
را در نظر گرفتند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برای خاک با درصد معین ذرات رس، هرچه نسبت ذرات ماسه بیشتر از ذرات سیلت باشد، میزان رمبندگی خاک بیشتر خواهد بود (علیزاده رفیع، ۱۳۸۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر خاک ماسه‌ای دارای مقدار رس نسبتاً پایین باشد، حداکثر مقدار رمبندگی اتفاق می‌افتد. چون اغلب ذرات ماسه نسبت به ذرات سیلت گرد گوشه‌تر هستند، با در نظر گرفتن رس موجود در بین ذرات خاک، غلتیدن و لغزش ذرات ماسه ساده‌تر و آسان‌تر از لغزش ذرات سیلت بر روی یکدیگر خواهد بود و مقدار رمبندگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. در خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی که درصد کمی رس دارند، رس ذرات توده خاک را می‌پوشاند (شکل ۲-۷) و یا باعث اتصال ذرات ماسه و سیلت که سطح تماس نقطه‌ای دارند، می‌شود (شکل ۲-۸). اگر در خاک سیلتی یا ماسه‌ای رس وجود نداشته باشد، رمبندگی خاک سیلتی بیشتر از خاک ماسه‌ای خواهد بود. در صورتی که خاک فاقد رس باشد و نسبت ذرات ماسه و سیلت با هم برابر باشد، حداکثر رمبندگی رخ خواهد داد، که این امر ناشی از تمایل ذرات سیلت به اتصال بین ذرات ماسه قبل از اشباع شدن است و بعد از اشباع شدن و یا تحت فشار ناشی از بارگذاری ذرات سیلت در فضای خالی بین دانه‌ای فرو می‌ریزد و باعث وقوع رمبندگی می‌شود (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۷: نحوه پوشش ذرات ماسه توسط ذرات رس (اقتباس از Dudley, 1970)



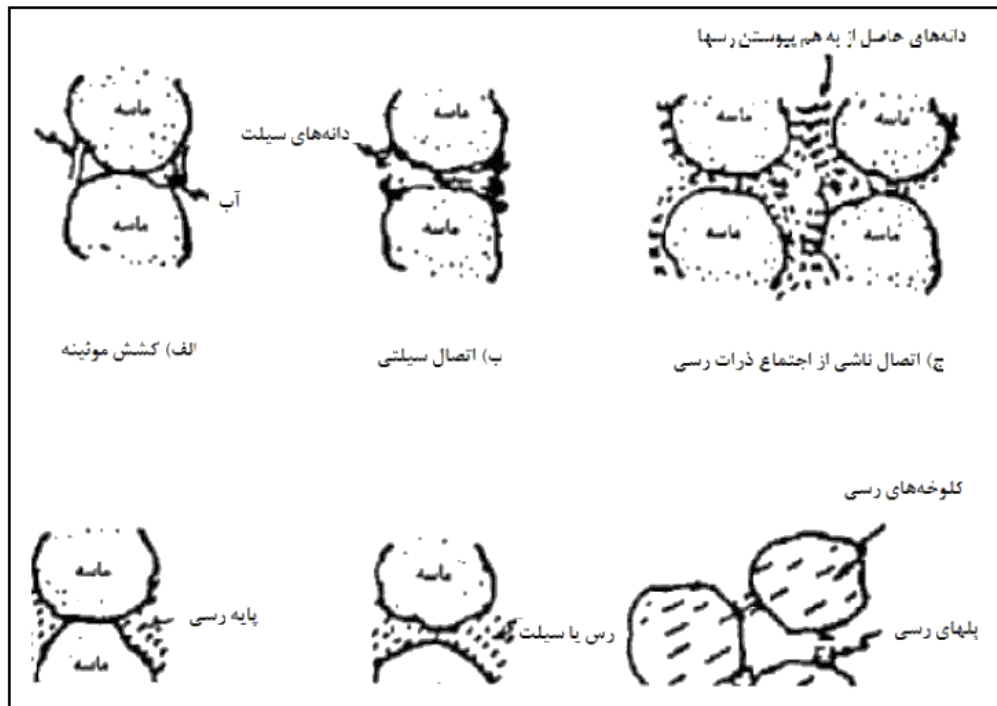
شکل ۲-۸: پیوند ذرات ماسه توسط ذرات رس (اقتباس از Dudley, 1970)



شکل ۲-۹: فروریزی خاک بعد از اشباع شدن (اقتباس از Al-Rawas, 2000)

## ۲-۵-۳-۴ سیمان

سیمان خاک شامل سیلت و رس، کربنات کلسیم، اکسید آهن، نهشته‌های تبخیری و مواد آلی می‌باشد. در حالتی که ذرات سیلت به صورت میان لایه یا به صورت ذرات پراکنده در بین دانه‌های ماسه قرار داشته باشد، در اثر کشش موئینه چسبندگی ظاهری و مقاومت ناچیزی در خاک ایجاد می‌گردد که با افزایش رطوبت و اشباع شدن، مقدار آن کاهش یافته و خاک نشست می‌کند (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰: عوامل استحکام و پایداری خاک رمنده (اقتباس از Dudley, 1970)

در بسیاری از موارد صفحات رسی نقش عامل پیوند دهنده‌ی توده‌های ماسه‌ای یا سیلتی را دارند. در این حالت کریستال‌های مونت‌موریلونیت و ایلیت ورقه‌ای به صورت سطح به سطح یا گوشه به سطح، می‌توانند ایجاد اتصال کنند که این امر تابع منشاء زمین‌شناسی خاک است. اگر رس به صورت برجا بین ذرات سیلت و ماسه نهشته شود دارای ساختمان صفحه‌ای متراکم بوده و در اثر اشباع شدن، رس نرم شده و مقاومت ساختمان خاک کاهش می‌یابد اما نشست حاصل از فروریزش، زیاد نخواهد بود. در شرایطی که رس‌ها به صورت معلق و کلوئیدی در آب بین منافذ خاک وجود داشته باشند، در اثر تبخیر تدریجی آب، صفحات رسی به شکل کلوئیدی و اسفنجی ذرات درشت را در بر می‌گیرند. این خاک در اثر اشباع شدن نشست زیادی خواهد داشت.

اگر به جای عوامل سیمان‌کننده، مقاومت خاک حاصل نیروی موئینگی باشد، رمنده‌گی سریع‌تر اتفاق می‌افتد ولی در حالت سیمان‌شدگی شیمیایی ذرات، رمنده‌گی کندتر رخ می‌دهد. اگر درصد رس موجود در خاک زیاد باشد، اشباع شدن خاک ممکن است دو تاثیر مختلف ایجاد کند. از یک طرف ممکن است

سبب کاهش حجم و رسیدن به حالت پایدارتر شود و از طرف دیگر باید تورم کانی‌های رسی و افزایش حجم حاصل از تورم کانی‌ها را در نظر داشت (حافظی مقدس، ۱۳۹۰).

## ۲-۶ شناسایی خاک‌های رمبنده در بررسی‌های محلی

در بررسی اولیه با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی محل، می‌توان مکان‌های احتمالی وجود خاک‌های مستعد رمبندگی را تخمین زد. در لس‌ها، ماسه‌های بادی، خاک‌های آبرفتی دانه‌ریز در مناطقی با آب و هوای خشک، خاک‌های برجا، رس‌های متخلخل و خاک‌های دستی، احتمال وقوع رمبندگی زیاد است. همانطور که قبلاً ذکر گردید، در مناطقی که دارای فصل خشک طولانی و فصل مرطوب کوتاه هستند و سطح آب زیرزمینی پایین است، وجود خاک‌های رمبنده متحمل‌تر است (حافظی مقدس، ۱۳۹۰). در این مناطق تپه ماهورهای کوچک و هم ارتفاع قابل مشاهده است. در بررسی‌های محلی می‌توان با تجزیه و تحلیل اشکال ویژه‌ای که این خاک‌ها در مقیاس وسیع روی زمین ایجاد می‌کنند، ارزیابی مقدماتی انجام داد. مثلاً در مورد لس‌ها هم ارتفاع بودن تپه‌ها، طرح زهکشی دندان‌های و پیمانند، رنگ زرد نخودی، وجود حفرات ماکرسکوپی و دیواره‌های قائم مرتفع پایدار را می‌توان ملاک تشخیص قرار داد.

## ۲-۷ معیارهای ارزیابی رمبندگی خاک

### ۲-۷-۱ معیار ابلف، ۱۹۴۸

اولین بار ابلف در سال ۱۹۴۸ ضریب رمبندگی ( $\Delta_s$ ) را مطرح کرد که برای ارزیابی کمی رمبندگی خاک استفاده می‌شود (Abelev., 1984).

$$\Delta_s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2-2)$$

در این رابطه :

$\Delta \Delta e$  تغییر نسبت تخلخل خاک بعد از اشباع شدن.

$\Delta e_0$  تخلخل اولیه خاک.

بر طبق این فرمول هرگاه ( $\Delta s$ ) بزرگتر از ۲٪ باشد خاک رمبنده به شمار می‌رود.

### ۲-۷-۲ معیار کلونجر، ۱۹۵۸

معیار کلونجر برای ارزیابی رمبندگی خاک‌ها بر اساس چگالی خشک ( $\gamma_d$ ) ارائه شده است و بر اساس آن اگر  $\gamma_d$  کمتر از  $12/6$  ( $\text{KN}/\text{m}^3$ ) باشد، خاک مستعد نشست زیاد است و در صورتی که  $\gamma_d$  بزرگتر از  $\text{m}^3$  ( $\text{KN}/14$ ) باشد میزان رمبندگی کم خواهد بود (Clevenger, 1958).

### ۳-۷-۲ معیار گیبس و بارا، ۱۹۶۲

گیبس و بارا از وزن واحد حجم خشک و حد روانی به عنوان معیاری برای تفکیک خاک‌های رمبنده و غیر رمبنده استفاده کردند. بر اساس این معیار خاکی که فضای خالی آن گنجایش درصد رطوبت حد روانی خاک را در حالت اشباع داشته باشد، مستعد رمبندگی خاک در حالت اشباع شدن می‌باشد. به عقیده‌ی آن‌ها این معیار زمانی معتبر است که خاک سیمانی نشده و حد روانی آن بیش‌تر از ۲۰٪ باشد (Gibbs and Bara, 1962).

### ۴-۷-۲ معیار دنسیو، ۱۹۶۴

در این معیار نسبت  $e/e_{II}$  برای تعیین رمبنده بودن خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این معیار  $e_{II}$  نسبت تخلخل در حالت روانی و  $e$  نسبت تخلخل خاک در حالت طبیعی است. طبق این معیار هرگاه  $e/e_{II}$  از ۱ بزرگتر باشد خاک رمبنده محسوب می‌گردد (Denisov, 1964). در صورتی که معیار به صورت  $e/e_{II}$  نوشته شود، اگر این نسبت بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد خاک خیلی رمبنده خواهد بود. عیب این معیار آن است که فقط در مواردی که تر شدن در سربار کم اتفاق می‌افتد، به کار می‌رود و نمی‌توان از آن با اطمینان برای تخمین رفتار خاک در سربارهای زیاد استفاده کرد (عالمی، ۱۳۷۷).

## ۲-۷-۵ معیار فدا، ۱۹۶۶

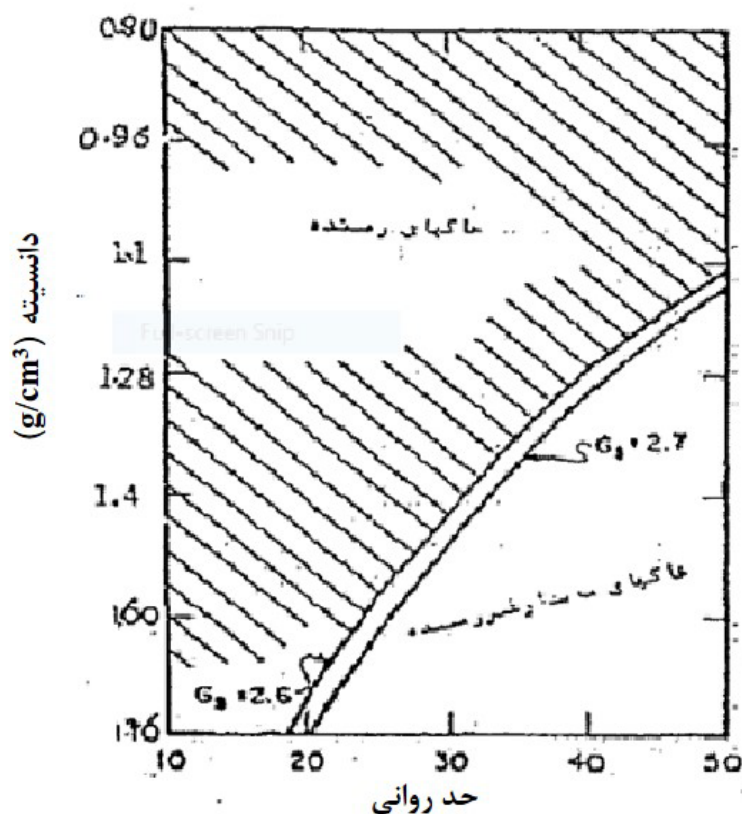
بر اساس این معیار شاخص رمبندگی ( $i_c$ ) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$i_c = \frac{\left(\frac{m}{sf}\right) - PL}{PI} \quad (3-2)$$

که در این رابطه:  $m$  درصد رطوبت طبیعی،  $sf$  درجه اشباع،  $PL$  حد خمیری و  $PI$  شاخص خمیری خاک است. فدا همچنین پیشنهاد کرد که پوکی بحرانی خاک ( مقدار پوکی که خاک به ازای مقدار پوکی بیشتر از آن مستعد رمبندگی باشد) باید بزرگتر یا مساوی ۴۰٪ باشد و بار اعمال شده به اندازه کافی بزرگ باشد تا به هنگام اشباع شدن موجب رمبندگی ساختار خاک شود. وی همچنین نتیجه گیری کرد که هرگاه شاخص رمبندگی بزرگتر از ۸۵٪ باشد، خاک نیمه پایدار است (Fedaa, 1966).

## ۲-۷-۶ معیار براساس حد روانی و دانسیته خشک خاک در محل

دنسیف (۱۹۶۴)، گیپس و هلند (۱۹۶۰) و گیپس و بارا (۱۹۶۲) معیاری بر اساس دانسیته خشک برجای خاک و حد روانی خاک ارائه داده اند. اگر دانسیته برجای خاک به قدری پایین باشد که رطوبت خاک در شرایط اشباع بزرگتر از حد روانی خاک شود، در این حالت مقاومت برشی خاک به صفر نزدیک شده و ساختمان خاک حتی بدون تحمل بار قابل ملاحظه ای، دچار رمبندگی می شود. به عنوان مثال شکل (۲-۱۱) که بر اساس حد روانی و دانسیته محلی خاک رسم شده است، محدوده های پایدار و مستعد رمبندگی را نشان می دهد. در این شکل دو منحنی برای خاک های دارای وزن مخصوص ۲/۶ و ۲/۷ برای حالتی رسم شده که حد روانی خاک با رطوبت در حالت اشباع، برابر است. نقاطی که در بالای منحنی می افتند، نشان دهنده رمبندگی بودن خاک هستند و نقاطی که در پایین منحنی می افتند، پایدار بودن خاک را نشان می دهند.

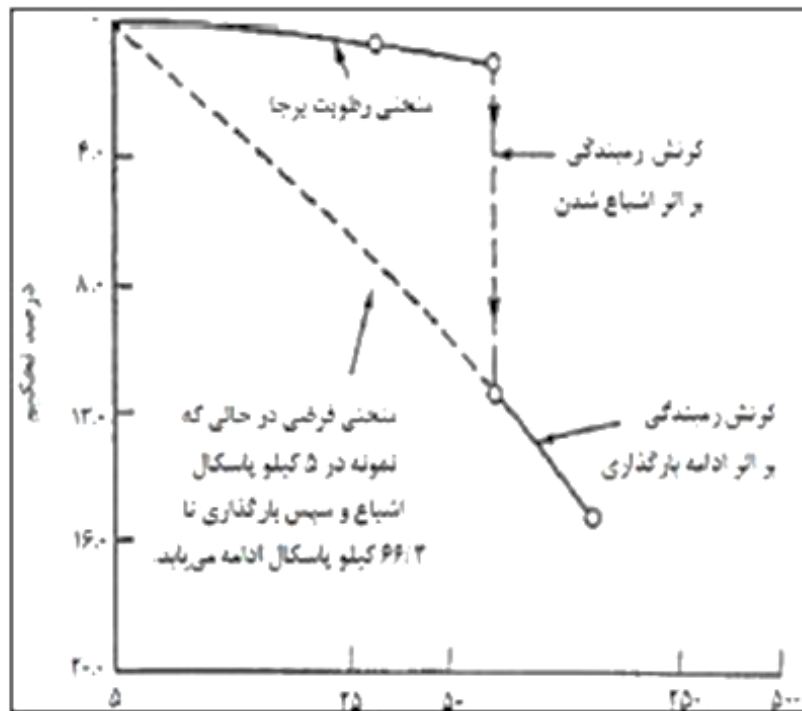


شکل ۲-۴۱: محدوده خاک‌های رطوبت‌ناهنجار و پایدار از نظر گیس و بار (۱۹۶۲)

## ۷-۷-۲ معیار جنینگز و نایت، ۱۹۷۵

جنینگز و نایت آزمایش تحکیم مضاعف را برای ارزیابی کمی رطوبت‌ناهنجاری خاک به کار بردند. آن‌ها این آزمایش را برای ارزیابی رفتار خاک در برابر اشباع شدن و بارگذاری در ترازوهای مختلف تنش توسعه دادند (دو آزمایش تحکیم روی دو نمونه خاک یکسان انجام می‌گردد، یکی با درصد رطوبت طبیعی و دیگری در حالت اشباع و برای هر دو نمونه بارگذاری یکسان می‌باشد (شکل ۲-۱۲)). آن‌ها آزمایش را به نحوی اصلاح کردند که در این آزمایش نمونه دست نخورده با درصد رطوبت طبیعی در دستگاه تحکیم تا یک مقدار بار دلخواه بارگذاری می‌شود، سپس نمونه غرقاب شده و کرنش ناشی از رطوبت‌ناهنجاری ثبت می‌گردد (Jennings and Knight, 1975).





شکل ۲-۵۲: آزمایش تحکیم (به نقل از حافظی مقدس، ۱۳۹۰)

آن‌ها تحکیم کل (C<sub>col</sub>) را پس از غرقاب کردن از رابطه زیر به دست آوردند.

$$C_{col} = \frac{\Delta e}{1 + e} \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه  $\Delta e$  تغییر نسبت تخلخل نمونه در هنگام غرقاب کردن و  $e$  نسبت تخلخل نمونه پیش از غرقاب کردن می‌باشد. جدول (۳-۲) شاخصی از شدت پتانسیل رطوبت‌دهی ارائه می‌دهد. طبق این جدول خاک‌هایی با بیش از ۱٪ رطوبت‌دهی را می‌توان به عنوان نیمه پایدار در نظر گرفت.

جدول ۲-۱: شاخص پتانسیل رطوبت‌دهی

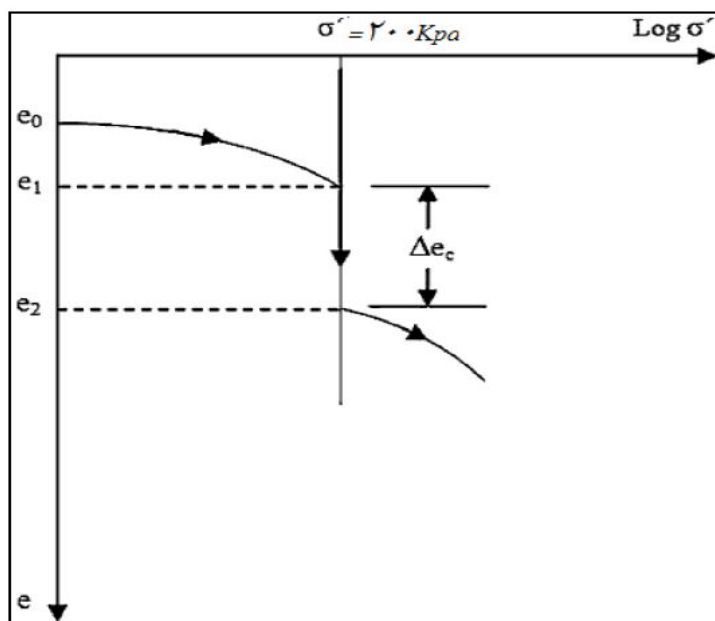
شدت مسئله	پتانسیل رطوبت‌دهی به %
بدون مشکل	۰-۱
مشکل متوسط	۱-۵
شدید	۵-۱۰
بسیار شدید	۱۰-۲۰
فوق‌العاده شدید	>۲۰

## ۲-۷-۸ معیار ASTM مبتنی بر نتایج آزمایش تحکیم مضاعف

آزمایش تحکیم مضاعف که توسط نایت (۱۹۷۵) پیشنهاد شده است، یک آزمایش مناسب برای اندازه-گیری قابلیت فروریزی خاک است. امروزه این آزمایش به روش ASTM D5333-03 انجام می‌شود. در این آزمایش نمونه‌ی برجای خاک با رطوبت طبیعی متناسب با ابعاد حلقه‌ی آزمایش تحکیم (ASTM D2435) تراشیده می‌شود. سپس بارهای قائم به صورت پیش‌رونده بر آن اعمال می‌شود تا به ۲۰۰ KPa برسد. بعد نمونه با مایع (معمولاً آب مقطر) غرقاب شده و به مدت یک روز به همان صورت رها می‌شود. در این مدت تغییر شکل نمونه دنبال می‌شود و سپس آزمایش تا رسیدن به حداکثر بارگذاری ادامه پیدا می‌کند. منحنی به دست آمده در (شکل ۲-۱۲) نشان داده شده است. قابلیت فروریزی  $I_c$  با شاخص فروریزی  $I_c$  توسط رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$I_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2-2)$$

در این رابطه  $\Delta e$  تغییر در نسبت پوکی در اثر مرطوب سازی و  $e_0$  نسبت تخلخل اولیه است. جدول (۲-۴) دسته‌بندی قابلیت فروریزی خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶۳: نتیجه آزمایش قابلیت فروریزی (Ali, 2011).

شاخص Ic برای تخمین نشست لایه‌ی خاک استفاده می‌شود و مقدار آن در این معادله بر اساس تنش قائم اعمال شده به نمونه و مایع مورد استفاده تعیین می‌شود. نشست خاک برای تنش قائم از حاصلضرب Ic در  $H/100$  به دست می‌آید که H ضخامت لایه‌ی خاک است.

جدول ۲-۲۲: پتانسیل فروریزی

شدت مشکل	پتانسیل رمبندگی به %
بدون مشکل	۰-۱
تا حدی مسئله دار	۱-۵
مسئله دار	۵-۱۰
شدیدا مسئله دار	۱۰-۲۰
بسیار شدید مسئله دار	۲۰

## ۲-۸ مکانیزم و ماهیت پدیده‌ی واگرایی

فرسایش خاک به طور عام و پدیده‌ی واگرایی به طور خاص در کشور ما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و همه ساله خسارت‌های زیادی را به بار می‌آورد. با توجه به آثار صحرایی در خاک‌های لسی، به بررسی پدیده‌ی واگرایی در این خاک‌ها پرداخته شده است. پدیده‌ی واگرایی خاک تاکنون باعث خرابی‌های گسترده‌ای در سدهای خاکی و کانال‌های آب رسانی و سایر خاکریزها شده است. اولین بار حدود صد سال پیش توجه کشاورزان را به خود معطوف داشت و متخصصان کشاورزی ویژگی‌های این خاک‌ها را ۷۰ سال گذشته به خوبی مورد بررسی قرار دادند. لیکن اهمیت یافتن این گونه خاک‌ها در نظر مهندسان عمران بیشتر در دو یا سه دهه اخیر و به خاطر تخریب سدهای خاکی بوده است (عسکری و فاخر، ۱۳۷۷).

واگرایی، پدیده‌ای است که طی آن خاک‌های رسی در مجاورت آب، چسبندگی خود را از دست داده و ذرات رسی یکدیگر را دفع می‌کنند. دلیل اصلی فرسایش رس‌ها بر اثر پدیده‌ی واگرایی، فزونی نیروی دافعه بین ذرات بر نیروی جاذبه بین آنها می‌باشد (رحیمی، ۱۳۸۰). به طور کلی، واگرایی پدیده‌ای است

فیزیکو-شیمیایی که بر اثر آن ذرات خاک رس در مجاورت آب، چسبندگی خود را از دست داده و یکدیگر را دفع می‌نمایند. در این حالت ذرات مذکور به صورت معلق در آب درآمده و به سهولت و با انرژی بسیار کمی از محیط شسته می‌شوند. البته لازم به ذکر است در سیلت غیرچسبنده، آرد سنگ و ماسه سنگ خیلی ریزدانه، که اساساً دارای چسبندگی بسیار کم یا فاقد چسبندگی می‌باشند، نیز این پدیده مشاهده می‌شود، اما ماهیت آن مکانیکی است و با پدیده‌ی واگرایی ناشی از وجود املاح در خاک رسی، متفاوت می‌باشد. خاک‌هایی که پدیده واگرایی در آن‌ها مشاهده می‌شود به طور کلی حساس بوده، به سهولت دچار فرسایش و آب شستگی درونی می‌گردند (روحانی، ۱۳۷۵).

اگر خاک رس به تدریج خشک شود کاتیون‌ها به شدت جذب سطح کانی‌های رس می‌شوند و مازاد کاتیون‌ها به صورت املاح می‌مانند. چنانچه خاک مذکور مجدداً در مجاورت آب قرار گیرد، املاح ته‌نشین شده در آب حل می‌شوند و کاتیون‌های جذب شده تحت اثر دو نیروی مخالف یعنی نیروی اسمزی از یک سو و جاذبه‌ی الکتریکی ذره‌ی رسی از سوی دیگر، در اطراف ذره رسی پخش می‌شوند. فراوانی آنیون‌ها در نزدیکی سطح ذرات رس به کمترین مقدار خود می‌رسد و با بیشتر شدن فاصله از سطح، فراوانی آن‌ها بیشتر می‌شود. سطح ذره رسی با بار منفی و توزیع کاتیون‌ها در اطراف آن به لایه دوگانه موسوم است. منشأ خصوصیات خمیری خاک‌های رسی، وجود همین لایه در اطراف ذرات می‌باشد (رحیمی، ۱۳۸۰). چنانچه برآیند بین ذره‌ای دافعه باشد، شکل ساختمانی ذرات خاک از نوع واگرا و اگر برآیند نیروها، جاذبه باشد شکل ساختمانی از نوع مجتمع (فلوکوله) یا غیرواگرا است. بر اساس مطالعات انجام شده، مهم‌ترین عامل موثر بر پدیده واگرایی غلظت یودن سدیم در آب منفذی و تک ظرفیتی بودن کاتیون مذکور می‌باشد. خاک‌های حاوی املاح کلسیم، منیزیم و آلومینیم به دلیل بیشتر بودن ظرفیت کاتیون‌ها و کاهش نیروی دافعه، واگرا نیستند. کاتیون پتاسیم نیز تک ظرفیتی است، اما به دلیل کوچک بودن شعاع هیدراته، نقش قابل توجهی در افزایش نیروهای دافعه ندارند و بنابراین خطرناک نمی‌باشند. از نظر نوع کانی نیز مونت موریلونیت‌ها در صورت جذب یون‌های سدیم در میان لایه‌های

خود، دارای پتانسیل واگرایی می‌باشند. وجود کانی‌های غیرفعال مانند کائولونیت در خاک از پتانسیل واگرایی آن می‌کاهد (بهرامی، ۱۳۹۰). در خاک‌های واگرا، میزان رطوبت حد انقباض بسیار کمتر از رطوبت اشباع است. بنابراین کاهش رطوبت این خاک‌ها، به کاهش حجم و ایجاد ترک‌های فراوان در سطح خاک منجر می‌شود. شسته شدن خاک‌های واگرا با جریان یافتن آب در درز و شکاف‌های خاک آغاز می‌شود (عسکری و فاخر، ۱۳۷۷).

## فصل ۳ : روش انجام کار

### ۳-۱ مقدمه

مراحل انجام کار در این پژوهش شامل جمع‌آوری اطلاعات کتابخانه‌ای و داده‌های مورد نیاز، مطالعات صحرائی، مطالعات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل اطلاعات موجود بوده که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد.

### ۳-۲ مطالعات کتابخانه‌ای، جمع‌آوری و تجزیه تحلیل داده‌ها

در این پژوهش مطالعات کتابخانه‌ای شامل جمع‌آوری اطلاعات از کتاب‌ها، مقالات و پایان‌نامه‌ها در زمینه‌ی فرونشست و رخداد شکاف، پتانسیل رمبندگی و واگرایی خاک و مطالعات انجام گرفته در دشت سمنان که در گذشته بدان پرداخته شده، می‌باشد. همچنین برای مطالعه لیتولوژی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده شده است.

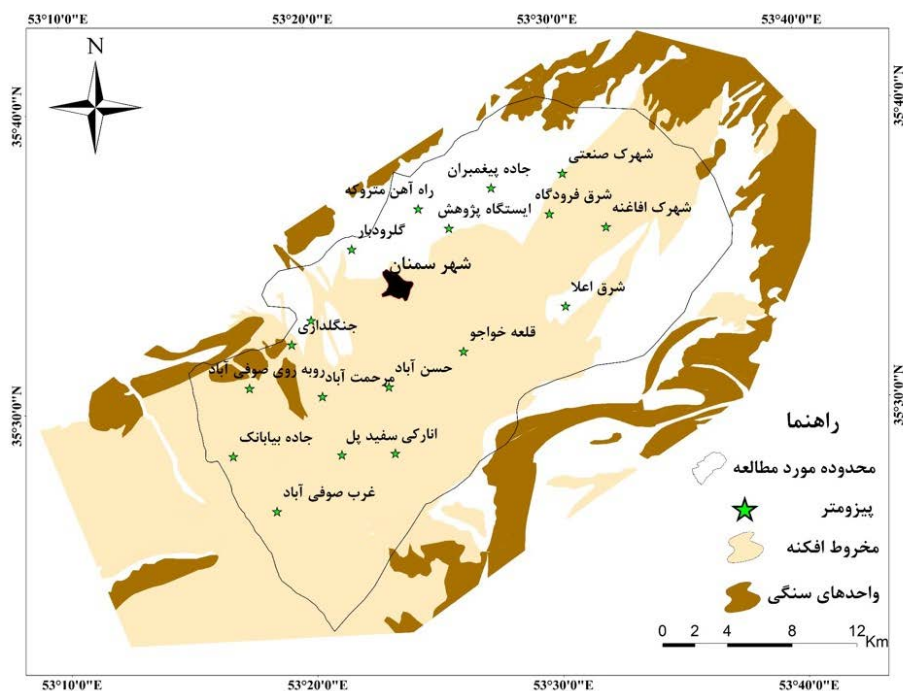
### ۳-۲-۱ تجزیه و تحلیل اطلاعات سطح آب در پیزومترها

بررسی کمی سطح آب زیرزمینی دشت سمنان بر اساس داده‌های موجود در ۱۸ حلقه پیزومتر حفر شده در دشت که به صورت ماهانه توسط آب منطقه‌ای استان سمنان اندازه‌گیری شده، انجام گرفته شده است. در این تحقیق از داده‌های ۲۴ ساله سطح آب زیرزمینی این پیزومترها از اسفند سال ۱۳۷۲ تا اسفند سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. همانطور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، موقعیت پیزومترها در دشت پراکندگی نسبتاً خوبی دارند.

### ۳-۲-۱-۱ ترسیم هیدروگراف واحد دشت

به منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت سمنان طی دوره ۲۴ ساله، هیدروگراف هریک از پیزومترها ترسیم شد. همچنین برای ترسیم هیدروگراف معرف دشت ابتدا با استفاده از نرم

افزار Arc GIS 10.3 نقشه تیسن آبخوان ترسیم گردید. سپس با استفاده از نقشه تیسن مقدار مساحت هر یک از چندضلعی‌ها محاسبه شده و برای ترسیم هیدروگراف معرف دشت مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱-۳: موقعیت پیزومترهای حفر شده در دشت سمنان

### ۲-۱-۲-۳ ترسیم منحنی‌های هم‌افت

برای ترسیم منحنی‌های هم‌افت در دشت سمنان، از داده‌های سطح آب زیرزمینی در طی دوره ۲۴ ساله در پیزومترها استفاده شده است. نقشه هم‌افت در ابتدا به صورت دستی ترسیم و سپس در محیط Arc GIS 10.3 رقومی گردید.

### ۲-۲-۳ تحلیل اطلاعات زمین‌شناسی زیر سطحی

#### ۱-۲-۲-۳ تجزیه و تحلیل اطلاعات سونداژهای ژئوالکتریکی انجام شده در دشت

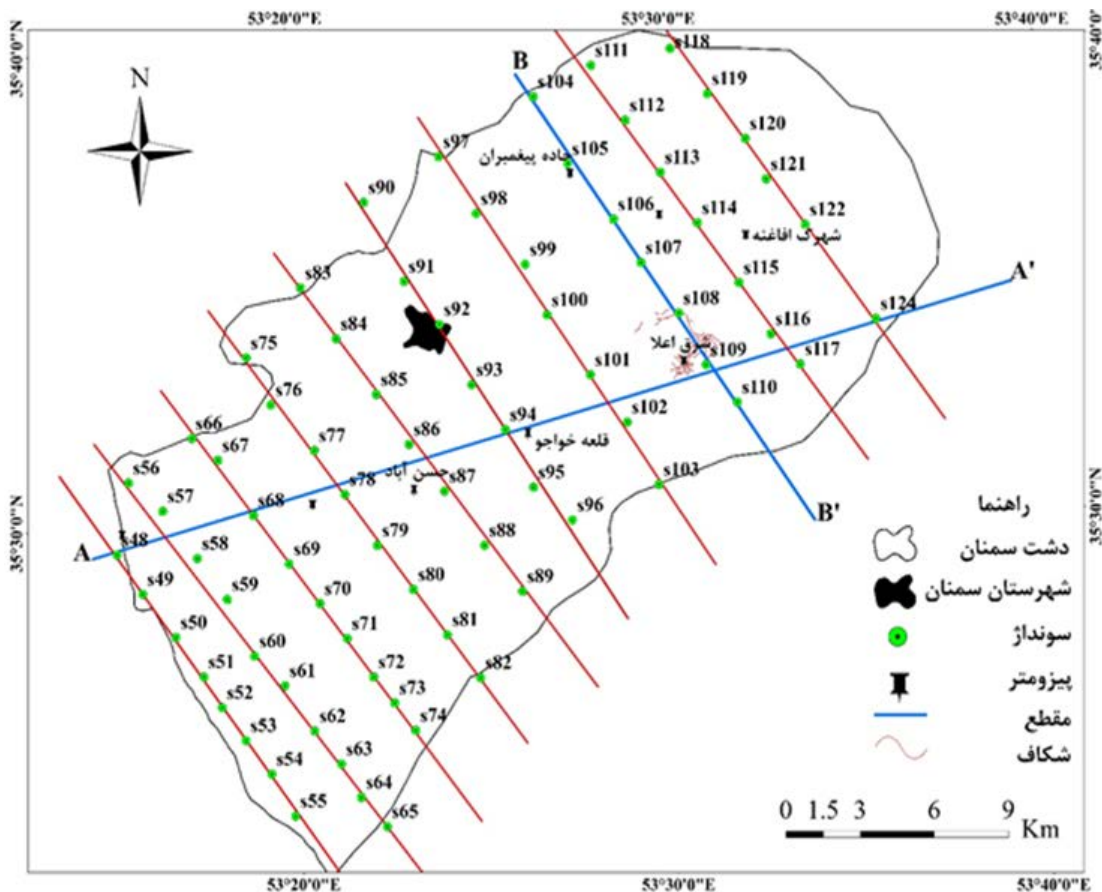
مطالعات ژئوفیزیکی در دشت سمنان با ۷۵ سونداژ ژئوالکتریکی بر روی ۱۰ مقطع توسط شرکت مهندسیین مشاور سازند آب پارس در سال ۱۳۸۸ انجام گرفته است. با توجه به داده‌های مقاومت ویژه



حاصل از این سونداژها پارامترهایی چون ضخامت و عمق رسوبات مختلف، عمق و لیتولوژی سنگ کف تعیین گردید.

### ۲-۲-۲-۳ ترسیم نقشه تغییرات ضخامت

با استفاده از لاگ پیژومترها و سونداژهای ژئوالکتریکی انجام شده در نقاط مختلف دشت و تلفیق این داده‌ها، ضخامت و نوع آبرفت در دشت در امتداد دو مقطع تعیین گردید. با توجه به موقعیت شکاف در دشت سمنان، دو مقطع زمین شناسی AA' با راستای شمال شرقی - جنوب غربی و مقطع BB' با راستای شمال غربی به جنوب شرقی دشت طوری ترسیم گردید تا بیشترین هم پوشانی را با شکافهای رخ داده در دشت داشته باشد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳: نقشه محل‌های سونداژهای ژئوالکتریکی و مقاطع زمین شناسی در دشت سمنان

## ۳-۳ مطالعات صحرائی

### ۳-۳-۱ اندازه‌گیری مشخصات هندسی شکاف‌ها و شواهد رمبندگی

به منظور بررسی وضعیت شکاف‌های سطحی ایجاد شده در جنوب و جنوب شرقی دشت سمنان بازدید صحرائی صورت گرفته است. در این بازدید موقعیت شکاف‌ها در دشت با دستگاه GPS اندازه‌گیری شده و با پیاده‌سازی این نقاط بر روی نقشه‌های رقومی شده، شکل هندسی و الگوی پراکندگی آنها ترسیم گردد. در ادامه موقعیت نقاط برداشت شده بر روی نرم افزار گوگل ارث پیاده شده و ملاحظه گردید که تطابق مناسبی با شکاف‌های مشاهده شده بر روی تصویر هوایی ارائه شده توسط این نرم افزار دارد. عرض و عمق شکاف‌ها در چندین نقطه برداشت شد. همچنین با توجه به مطالعه‌ی پژوهش‌های قبلی در این دشت و وجود گزارش‌هایی مبنی بر پتانسیل رمبندگی خاک در این ناحیه، در بازدیدهای صحرائی صورت گرفته از دشت و بخصوص دیواره‌های موجود در اطراف شکاف‌ها و رودخانه‌های موجود در دشت، شواهدی مانند وجود حفرات ماکرسکوپی مورد بررسی قرار گرفت.

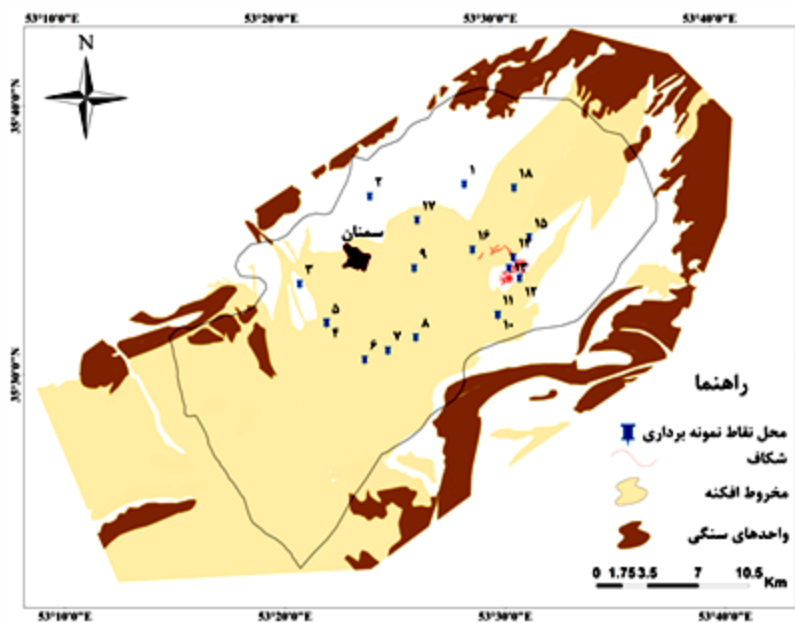
### ۳-۳-۲ نمونه‌گیری خاک از قسمت‌های مختلف دشت

طبق مطالعات قبلی و اطلاعات اولیه‌ای که از خاک منطقه در دسترس بود و همچنین طبق بازدیدهای انجام گرفته از منطقه مورد مطالعه، مشخص شد رطوبت خاک پایین بوده و خاک از نظر دست خوردگی از حساسیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه برای انجام برخی از آزمون‌های آزمایشگاهی نیازمند به نمونه خاک دست نخورده بود. و امکان استفاده از تجهیزات ماشینی برای گرفتن نمونه دست نخورده مهیا نبود، بدین منظور تصمیم بر نمونه‌گیری به روش بلوکی گرفته شد (شکل ۳-۳). در زمان نمونه‌گیری بعد از خاک‌برداری از سطح به منظور کنار گذاشتن خاک دست خورده، در محل ترک‌ها و شکاف‌های ایجاد شده، تعدادی نمونه به شکل بلوکی و در ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر گرفته شد و در نهایت نمونه به داخل کیسه نایلونی قرار گرفته و به آزمایشگاه حمل گردید. لازم به ذکر است که از عمق‌های بین ۰/۳

تا ۱ متر از سطح زمین نمونه برداری انجام گردید. همچنین برای بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک - های موجود در دشت در ابتدا دشت سمنان شبکه‌بندی شده (شکل ۳-۴) و تعداد ۱۸ نمونه خاک دست خورده از عمق ۱۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری با وزن تقریبی ۴ کیلوگرم گرفته شد.



شکل ۳-۲: نمونه‌گیری به صورت بلوکی با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متری



شکل ۳-۳: موقعیت نقاط نمونه برداری

## ۴-۳ مطالعات آزمایشگاهی

### ۱-۴-۳ تعیین مشخصات فیزیکی خاک

#### ۱-۱-۴-۳ وزن مخصوص خاک

وزن مخصوص ویژه یا Gs عبارت است از نسبت وزن حقیقی حجم مشخصی از ذرات خاک به وزن حقیقی همان حجم آب مقطر در دمای ۴ درجه سانتیگراد که اغلب برای ارتباط وزن و حجم خاک بکار می‌رود. این آزمایش به روش استاندارد ASTM D 854-87 انجام شده و نتایج آن برای محاسبه نسبت پوکی به کار رفته شده در آزمون تحکیم مضاعف استفاده گردید (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۴: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک

#### ۲-۱-۴-۳ دانه‌بندی مکانیکی خاک

برای جداسازی بخش درشت دانه خاک (ذرات بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) و توزیع اندازه ذرات درشت دانه بر حسب درصدی از وزن کل خاک، آزمایش دانه‌بندی به روش الک بر اساس استاندارد ASTM D 422-87 انجام شده است. لازم به ذکر است با توجه درصد بالای بخش ریزدانه در اکثر نمونه‌های خاک، از روش تر و شستشوی خاک بر روی الک‌ها استفاده گردید. نمونه‌های نزدیک به راس مخروط افکنه‌ها که دارای خاک درشت‌دانه بودند به روش خشک و جدایش ذرات خاک به وسیله شیکر دانه‌بندی شده‌اند. از نتایج این آزمون برای رده‌بندی مهندسی یونیفاید خاک استفاده گردید.

### ۳-۴-۱-۳ آزمایش هیدرومتری

با توجه به عدم امکان تفکیک خاک‌های ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر به روش الک از آزمون هیدرومتری که بر پایه‌ی اصول ته‌نشینی دانه‌های خاک در آب بنا شده است، استفاده گردید. این آزمایش به روش استاندارد ASTM D 421-58 & D 422-63 انجام شد و نتایج حاصل از آن با تلفیق نتایج دانه‌بندی به روش الک به منظور ترسیم منحنی دانه‌بندی و تعیین کلاس مهندسی خاک استفاده شد.

### ۳-۴-۱-۴ حدود آتربرگ

برای تعیین حدود آتربرگ نمونه‌های خاک دشت سمنان از آزمایش تعیین حد روانی خاک مطابق استاندارد ASTM D 423-66 و آزمایش تعیین حد خمیری خاک بر اساس استاندارد ASTM D 423-59 استفاده شده است (شکل ۳-۶). این آزمایش‌ها به منظور بررسی تغییر رفتار خاک‌ها به علت افزایش رطوبت و همچنین تعیین رده‌ی مهندسی خاک‌های ریزدانه و یا خاک‌های درشت‌دانه‌ی حاوی ذرات ریزدانه انجام می‌شود. حد روانی درصد رطوبتی است که در آن درصد رطوبت رفتار خاک از حالت خمیری به مایع‌گون تبدیل شده و برابر است با درصد رطوبتی که لبه‌ی شیار ایجاد شده با ۲۵ ضربه به اندازه‌ی ۱۲/۷ میلی‌متر بسته می‌شود. حد خمیری درصد رطوبتی است که رفتار خاک از حالت نیمه جامد به خمیری تبدیل شده و برابر است با درصد رطوبتی که فتیله‌های حاکی استاندارد ایجاد شده در آن درصد رطوبت شروع به ترک خوردن نمایند. با داشتن این دو شاخص می‌توان شاخص خمیری خاک را که برابر با حاصل تفاضل حد روانی و حد خمیری است، بدست آورد. این شاخص یکی از شاخص‌ها اصلی مورد استفاده در رده‌بندی یونیفاید خاک است.

### ۳-۴-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی خاک

برای تعیین پتانسیل رمبندگی خاک دشت سمنان از دو آزمایش تحکیم مضاعف و آزمایش تعیین دانسیته خاک استفاده شده است.



شکل ۳-۶: آزمایش تعیین حدود آتربرگ نمونه خاک

### ۳-۴-۲-۱ آزمایش تحکیم مضاعف

از آزمایش تحکیم مضاعف برای پیش بینی رمبندگی در نمونه‌های خاک به روش استاندارد ASTM D 2435-90 استفاده شده است. بدین منظور با توجه به نتایج آزمایش دانه‌بندی بر روی تعداد ۱۰ نمونه خاک ریزدانه (سیلت و رس) این آزمایش انجام گرفت. لازم به ذکر است که نمونه‌های استفاده شده در این آزمون دست نخورده بوده و به صورت بلوکی تهیه شده بود. این نمونه‌ها متناسب با قطر رینگ تحکیم با دقت به صورت استوانه‌ای تراشیده شد به طوری که ساختار خاک دست نخورده باقی ماند.

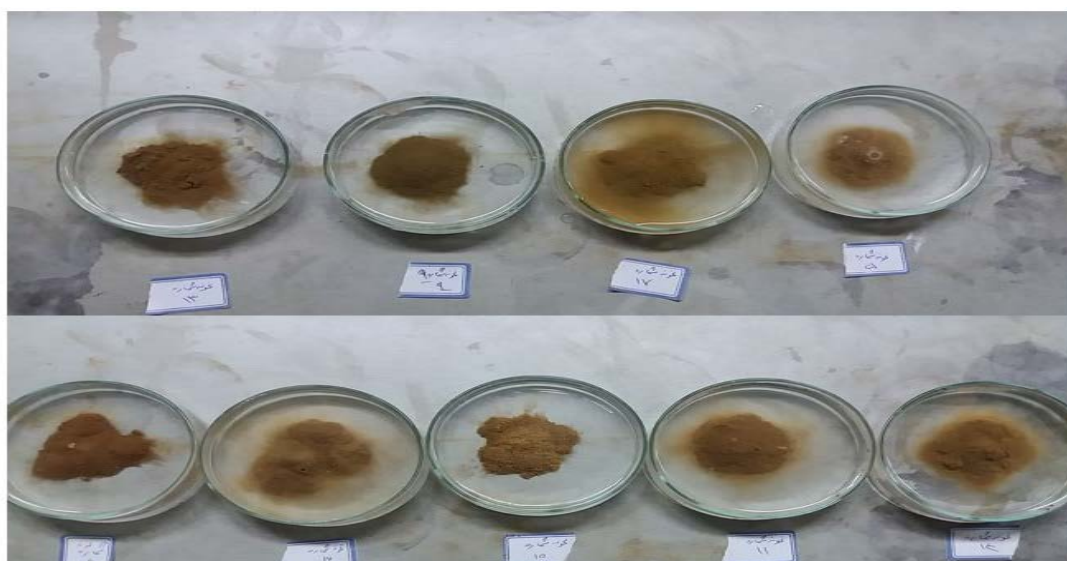
### ۳-۴-۲-۲ تعیین دانسیته نسبی

با توجه به استفاده از دانسیته نسبی به عنوان یکی از شاخص‌های رمبندگی از نمونه‌های استفاده شده در آزمایش تحکیم مضاعف قبل از انجام این آزمون وزن شده و با توجه به مشخص بودن حجم رینگ تحکیم دانسیته آن‌ها به دست آمد. در ادامه با توجه به مشخص کردن درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها دانسیته خشک این خاک‌ها محاسبه شده و رمبندگی آنها ارزیابی گردید.

### ۳-۴-۳ تعیین پتانسیل واگرایی خاک

#### ۳-۴-۳-۱ آزمایش کرامب

این آزمایش نخستین بار در سال ۱۹۶۷ در استرالیا مورد استفاده قرار گرفت و به آزمایش امرسون نیز معروف است. در این آزمایش تکه‌ی کوچکی از خاک (به قطر ۶ تا ۹ میلی‌متر) داخل ظرفی حاوی ۱۵۰ میلی‌متر مکعب آب مقطر انداخته می‌شود (شکل ۳-۷). پس از ۵ تا ۱۰ دقیقه، میزان جدایش ذرات رس از نمونه و تشکیل محلول کلوئیدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. واکنش ذرات خاک در مقابل آب به یکی از صورتهای بدون واکنش، واکنش ضعیف، واکنش متوسط و واکنش شدید بیان می‌شود. اگر خاکی در آزمایش کرامب واکنش نشان دهد به احتمال زیاد واگراست، اما عدم واکنش در این آزمایش نشان دهنده‌ی غیرواگرایی خاک نخواهد بود (حافظی مقدس، ۱۳۹۵).



شکل ۳-۷: آزمایش کرامب نمونه‌های خاک

#### ۳-۴-۳-۲ آزمایش هیدرومتری مضاعف

آزمایش هیدرومتری مضاعف یکی از روش‌های معمول در ارزیابی قابلیت واگرایی خاک‌های ریزدانه رسی می‌باشد. از این آزمایش برای تعیین نسبت واگرایی در نمونه‌های خاک بر اساس استاندارد ASTM D4221-83a استفاده شده است (شکل ۳-۸). بدین منظور آزمایش هیدرومتری برای خاک مورد نظر

همراه با اضافه نمودن محلول پراکنده ساز و یکبار بدون محلول پراکنده ساز انجام می‌گیرد و مقدار واگرایی به صورت درصد وزنی ذرات کوچکتر از  $0/005$  میلی‌متر در آزمایش بدون ماده پراکنده ساز نسبت با آزمایش با پراکنده ساز تعریف می‌شود.

دکر (به نقل از عسگری و فاخر، ۱۳۷۲) برای خاک‌های واگرا پیشنهاد نمود که در رس‌های غیرآلی، درصد واگرایی در حدود ۴۰ درصد و در سیلت‌ها با خاصیت خمیری کم، ماسه‌های رس‌دار (SC) و ماسه‌های لای‌دار (SM) در حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد در نظر گرفته شود. شرارد نیز معیارهای زیر را جهت تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها با کمک نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف، پیشنهاد کرده است (به نقل از عسگری و فاخر، ۱۳۷۲).

الف: چنانچه درصد واگرایی در اکثر آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها، از ۴۰ تا ۵۰ درصد بیشتر باشد، خاک به شدت واگرا است و احتمالاً نیازی به انجام یافتن آزمایش‌های شیمیایی نیز نخواهد بود.

ب: اگر نتایج بیشتر آزمایش‌ها در محدوده ۲۰ تا ۴۰ درصد قرار گیرد و در یک یا دو نمونه درصد واگرایی بیش از ۵۰ درصد باشد، خاک مورد مطالعه به طور متوسط واگرا است.

ج: معمولاً درصد واگرایی رس‌های عادی در حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد است، اما برخی از رس‌ها به شدت واگرا، با وجود وقوع فرسایش و آب شستگی‌های داخلی، درصد واگرایی کمتر از ۴۰ درصد بوده است بنابراین در چنین مواردی لازم است که آزمایش‌های شیمیایی نیز بر روی شیره اشباع خاک انجام شود و با مراجعه به نمودار مربوطه، میزان واگرایی خاک تعیین گردد.

د: درصد واگرایی رس‌های به شدت مقاوم در مقابل شسته شدن، معمولاً بین ۰ تا ۱۵ درصد است. اگر نتایج آزمایش‌ها در این محدوده قرار گیرد، به احتمال زیاد، خاک غیرواگرا است. با این وجود، انجام چند آزمایش شیمیایی بر روی شیره اشباع خاک جهت حصول اطمینان لازم است.





شکل ۳-۸: آزمایش هیدرومتری مضاعف انجام شده بر روی خاک‌های مورد مطالعه

### ۳-۳-۴-۳ آزمایش پین هول

آزمایش پین هول را شرارد و همکارانش در سال ۱۹۷۳ ابداع کردند و نتایج حاصل از آن را طی مقاله در سال ۱۹۷۶ ارائه دادند. در این آزمایش که به آزمایش شرارد نیز معروف است میزان واگرایی خاک‌های ریزدانه مستقیماً با عبور دادن آب از سوراخی که در نمونه ایجاد می‌گردد، اندازه‌گیری می‌شود. آبی که از داخل نمونه خاک‌های واگرا خارج می‌شود کدر و دارای ذرات معلق کلوئیدی است، اما در نمونه‌های غیرواگرا، آب مذکور زلال و شفاف است. در حال حاضر آزمایش پین هول مطمئن‌ترین روش موجود برای ارزیابی پتانسیل واگرایی در خاک‌ها به شمار می‌رود. انگیزه اصلی ابداع آزمایش پین هول، مدل کردن جریان متمرکز آب در سدهای رسی و مطالعه آن در آزمایشگاه بوده است (عسکری و فاخر، ۱۳۷۷). با توجه به احتمال وجود منشا فرسایشی برای شکاف‌های تشکیل شده در دشت سمنان، این آزمون علاوه بر نشان دادن پتانسیل واگرایی، مدل سازی خوبی از وضعیت فرسایش‌پذیری خاک‌های موجود در محل شکاف‌ها ارائه می‌دهد. جزئیات وسایل مورد نیاز در این آزمایش در شکل (۳-۱۱)

مشاهده می‌شود. شرح دقیق این آزمایش در استاندارد ASTM 4647-87 آمده است. بر اساس این

استاندارد واگرایی خاک‌ها در ۶ رده قرار می‌گیرند

D1 و D2: واگرا

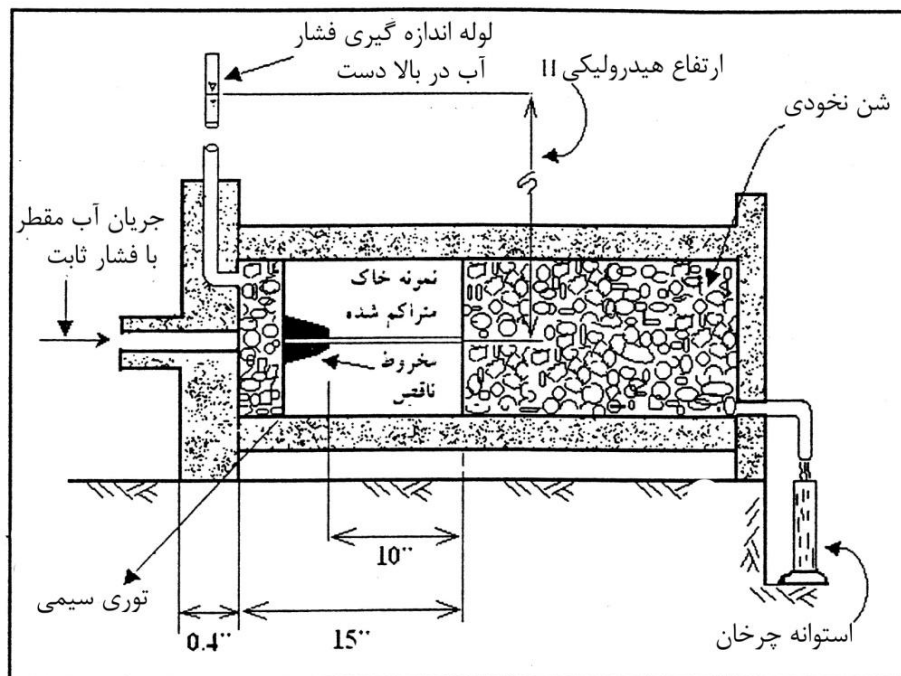
ND3 و ND4: کمی تا اندازه‌ای واگرا

ND1 و ND2: غیر واگرا

مطابق شکل (۳-۹) نمونه خاک در استوانه‌ای به قطر دلخواه بر روی ماسه درشت و توری سیمی که قبلاً در سلول آزمایش قرار داده شده‌اند، متراکم می‌گردد. در این پژوهش به جای نمونه دست خورده و متراکم نمودن آن از نمونه دست نخورده استفاده گردید. ارتفاع نمونه مورد آزمایش باید ۳۸ میلی‌متر باشد. به کمک سوزنی به قطر یک میلی‌متر، که از هادی سوزن عبور داده می‌شود، سوراخی در امتداد محور طولی نمونه ایجاد می‌گردد. سپس دستگاه در وضعیتی قرار داده می‌شود که این سوراخ افقی باشد. در این مرحله آب مقطر را به ترتیب تحت بارهای آبی ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر و در مدت زمانی معین (۵ دقیقه برای هر بار) از سوراخ نمونه عبور می‌دهند و مقدار آب و رنگ آن را پس از خروج نمونه مورد بررسی قرار می‌دهند. همچنین در پایان آزمایش نمونه خاک را از داخل استوانه در آورده و نحوه آب شستگی و قطر نهایی سوراخ را ثبت می‌کنند. به طور کلی می‌توان گفت اگر نمونه خاک تحت بار آبی ۵۰ میلی‌متر به آسانی شسته شود و محلول کلوئیدی از آن خارج گردد خاک واگرا است. در صورتی که نمونه تحت بار آبی ۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر به آهستگی شسته شود و آب خارج شده گل آلود باشد، خاک به طور متوسط واگرا است و در نهایت اگر نمونه مورد آزمایش، تحت بار آبی ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر شسته نشود و آب خارج شده از آن زلال باشد، خاک غیرواگرا است.

هرچه میزان املاح آب در تماس با خاک‌های رسی (آبی که به طور متمرکز در داخل توده رس جریان می‌یابد) کمتر باشد، تمایل این خاک‌ها به حل شدن در آب و تشکیل محلول کلوئیدی بیشتر می‌گردد.

تغییر میزان املاح آبی که در داخل خاک جریان دارد ممکن است تاثیر زیادی در نتایج آزمایش داشته باشد. به همین دلیل در آزمایش پین هول از آب مقطر استفاده می شود.



شکل ۳-۹: طرح شماتیک دستگاه پین هول (عسکری و فاخر، ۱۳۷۲)

### ۳-۵ ارزیابی پتانسیل رخداد فرونشست

ارزیابی نشست ناحیه‌ای مرتبط با افت سطح آب زیرزمینی معمولاً بر اساس دو متغیر اصلی شامل چگونگی و کمیت افت سطح ایستابی در بخش‌های مختلف دشت و شرایط زمین شناسی زیرسطحی در دشت، استوار است. با توجه به نتایج مطالعات انجام شده در مراحل قبل، در ابتدا دشت سمنان از نظر پتانسیل وقوع نشست پهنه‌بندی گردید. برای ارزیابی پتانسیل نشست‌پذیری دشت از دو نقشه افت سطح ایستابی و ضخامت و نوع رسوبات موجود در دشت استفاده شد. با توجه به نتایج افت سطح ایستابی در ۱۸ پیزومتر برای بازه زمانی ۲۴ ساله (اسفند ۱۳۷۲ تا اسفند ۱۳۹۶) نقشه منحنی هم افت تهیه شد سپس برای همسان‌سازی امتیاز ناشی آب زیرزمینی با امتیاز لیتولوژی محدوده‌های تغییرات افت سطح ایستابی در ضریب یک و نیم ضرب شد. در ادامه با توجه به داده‌های وزن‌دهی شده افت سطح ایستابی

در محل پیژومترها، نقشه‌ی وزن‌دهی شده افت سطح آب زیرزمینی دوباره ترسیم و از طریق ابزار Reclassify به ۵ رده با محدوده تغییرات ۱۰ متری تقسیم گردید. در نهایت به منظور استفاده از این نقشه برای پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین، به هر کدام از این ۵ رده امتیازی برابر با میانگین محدوده تغییرات آن رده داده شد. به منظور تهیه نقشه ضخامت و نوع رسوبات از نتایج ۷۵ سونداژ ژئوالکتریکی انجام شده در دشت استفاده گردید و با توجه به مکانیسم نشست ناشی از افزایش تنش موثر به وجود آمده به خاطر افت سطح ایستابی، تنها لایه‌های واقع در زیر سطح ایستابی سال ۱۳۷۲ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. چرا که عملاً لایه‌های بالای سطح ایستابی تحت تاثیر این افزایش قرار نگرفته و بنابراین نقشی در نشست نخواهند داشت. در نهایت وضعیت لایه‌های مختلف زیر سطح ایستابی سال ۱۳۷۲ در ۷۵ نقطه تهیه گردید. سپس متناسب با پتانسیل نشست برای هر لایه بر مبنای قضاوت مهندسی وزن‌دهی انجام گردید. برای لایه ریزدانه امتیاز ۰/۷، متوسط دانه امتیاز ۰/۵، مارن و شیل ۰/۴، درشت دانه، آهک، ماسه سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آتشفشانی به همراه آبرفت درشت دانه امتیاز صفر در نظر گرفته شده و در محل هر سونداژ ضخامت هر لایه زیر سطح ایستابی اولیه در امتیاز مربوط ضرب شده و مجموع این امتیازها به عنوان امتیاز نهایی آن نقطه در نظر گرفته شد. در نهایت برای تمامی نقاط نشان داده شده در شکل ۴، یک امتیاز به عنوان امتیاز نهایی آن نقطه گزارش شده است. در نهایت این دونقشه در محیط GIS وزن‌دهی گردیدند و با روی هم انداختن لایه‌ها وزن‌دهی شده، مناطق با پتانسیل‌های متفاوت نشست پذیری مشخص گردیدند.

### ۳-۶ ارزیابی مکانیسم رخداد شکاف

باتوجه به مطالعات انجام شده و نتایج آزمایشگاهی، رمبندگی و واگرایی خاک منطقه تعیین شد. در ادامه مکانیسم رخداد شکاف مورد بررسی قرار گرفت و متحمل‌ترین مکانیسم انتخاب گردید. سپس بر مبنای عوامل موثر بر رخداد شکاف منطقه زون بندی شد و نقشه‌ی خطر وقوع شکاف تهیه گردید. در مرحله‌ی بعد از نقشه خطر وقوع شکاف به عنوان یکی از پارامترهای ورودی در تهیه نقشه ریسک استفاده

شد. به جز این نقشه، نقشه‌ی کاربری اراضی منطقه که به نوعی نشان دهنده‌ی موقعیت اجزای ریسک - پذیر (مانند خط راه آهن سراسری تهران-مشهد، فرودگاه، خطوط انتقال گاز، جاده آسفالتی و ...) می‌باشد نیز به کار برده شد. این دو نقشه پس از تهیه، با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط GIS وزن‌دهی گردیدند و در نهایت با روی هم انداختن نقشه‌های وزن‌دهی شده، مناطق با پتانسیل ریسک رخداد شکاف مشخص گردید.

## فصل ۴ : بحث و نتایج

## ۴-۱ مقدمه

همانطور که در فصل قبل اشاره گردید این پژوهش در راستای ارزیابی پتانسیل و خطر فرونشست و رخداد شکاف در دشت سمنان بنا شده است. در این فصل مباحث گفته شده در فصل مواد و روش‌ها (فصل ۳) در غالب دو بخش ارزیابی خطر فرونشست و ارزیابی مکانیسم، خطر و ریسک رخداد شکاف دسته‌بندی شده‌اند. در بخش ارزیابی خطر فرونشست مطالعات هیدروژئولوژی شامل بررسی تغییرات افت سطح ایستابی در نقاط مختلف دشت مورد بررسی قرار گرفت و نقشه افت سطح ایستابی در محل پیزومترها و نقشه هم افت به همراه هیدروگراف واحد دشت ترسیم گردید. همچنین شرایط زمین‌شناسی زیر سطحی با استفاده از سونداژهای ژئوالکتریکی و لاگ‌ها به صورت کمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در بخش ارزیابی مکانیسم، خطر و ریسک رخداد شکاف نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی تلفیق شد و با تعیین شدن مکانیسم غالب، بر مبنای عوامل موثر نقشه‌ی خطر و ریسک رخداد شکاف در دشت سمنان ترسیم گردید.

## ۴-۲ بررسی خطر رخداد فرونشست در دشت سمنان

### ۴-۲-۱ نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل اطلاعات سطح آب در پیزومترها

#### ۴-۲-۱-۱ بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی

ارزیابی نشست ناحیه‌ای مرتبط با افت سطح آب زیرزمینی معمولاً بر اساس دو متغیر اصلی شامل چگونگی و کمیت افت سطح ایستابی در بخش‌های مختلف دشت و شرایط زمین‌شناسی زیرسطحی در دشت، استوار است. همچنین ارزیابی منابع آب زیرزمینی و برآورد میزان نوسانات سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی مورد مطالعه نیازمند دسترسی به داده‌های دقیق می‌باشد. به منظور بررسی میزان افت سطح آب زیرزمینی در دشت از داده‌های اندازه‌گیری شده طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۷۲ استفاده شده و

روند تغییرات سطح ایستابی در ۱۸ پیزومتر محاسبه شده است. افت کل در محل پیزومترها در جدول (۱-۴) ارائه شده و شکل (۱-۴) میزان افت کل را در محل پیزومترها طی دوره ۲۴ سال نشان می‌دهد.

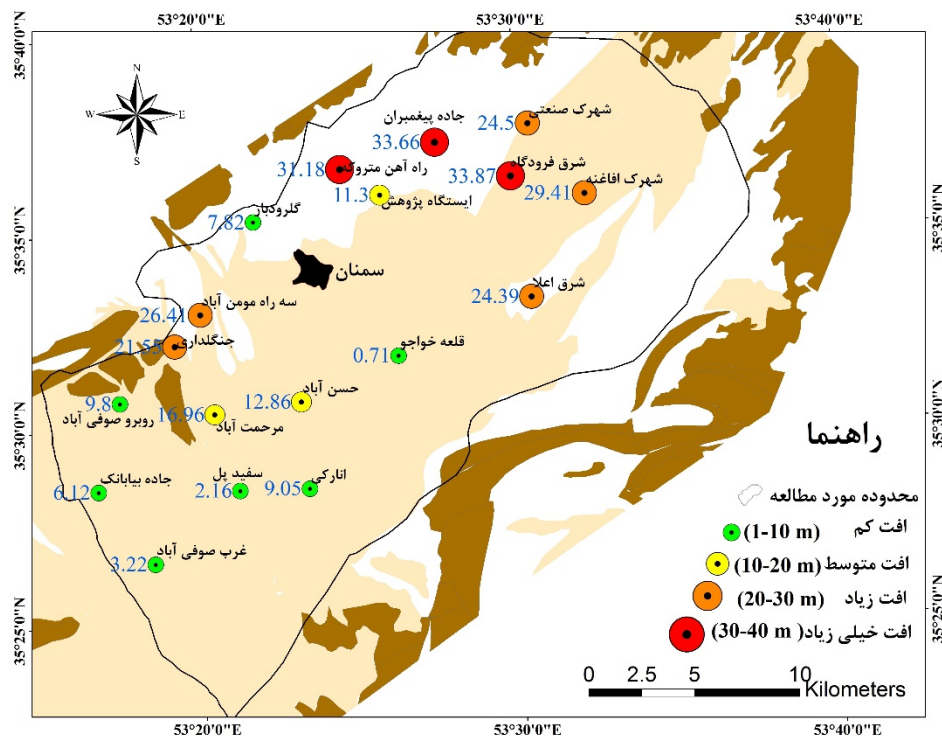
جدول ۱-۴: افت سالانه سطح ایستابی در محل پیزومترهای حفر شده در دشت سمنان

نام پیزومتر	دوره آماری	مقدارافت کل (m)	نرخ افت سالانه (m)
غرب صوفی آباد	۱۳۷۲-۹۶	۳/۲۲	۰/۱۳
جاده بیابانک	۱۳۷۲-۹۶	۶/۲	۰/۲۵
روبه رو جاده صوفی آباد	۱۳۷۲-۹۶	۹/۸	۰/۴۰
مرحمت آباد	۱۳۷۲-۹۶	۱۶/۹۶	۰/۷۰
سفید پل	۱۳۷۲-۹۶	۲/۱۶	۰/۰۹
انارکی	۱۳۷۲-۹۶	۹/۰۵	۰/۳۷
حسن آباد	۱۳۷۲-۹۶	۱۲/۸۶	۰/۵۳
جنگلداری	۱۳۷۲-۹۶	۲۱/۵۵	۰/۸۹
سه راه مومن آباد	۱۳۷۲-۹۶	۲۶/۴۱	۱/۱۰
گلرودبار	۱۳۷۲-۹۶	۷/۸۲	۰/۳۲
راه آهن متروکه	۱۳۷۲-۹۶	۳۱/۱۸	۱/۲۹
ایستگاه پژوهش	۱۳۷۲-۹۶	۱۱/۳	۰/۴۷
شرق اعلا	۱۳۷۲-۹۶	۲۴/۳۹	۱/۰۱
جاده پیغمبران	۱۳۷۲-۹۶	۳۳/۶۶	۱/۴۰
شرق فرودگاه	۱۳۷۲-۹۶	۳۳/۸۷	۱/۴۰
شهرک افاغنه	۱۳۷۲-۹۶	۲۹/۴۱	۱/۲۲
قلعه خواجه	۱۳۷۲-۹۶	۰/۷۶	۰/۰۳
شهرک صنعتی	۱۳۷۲-۹۶	۲۴/۵	۱/۰۲



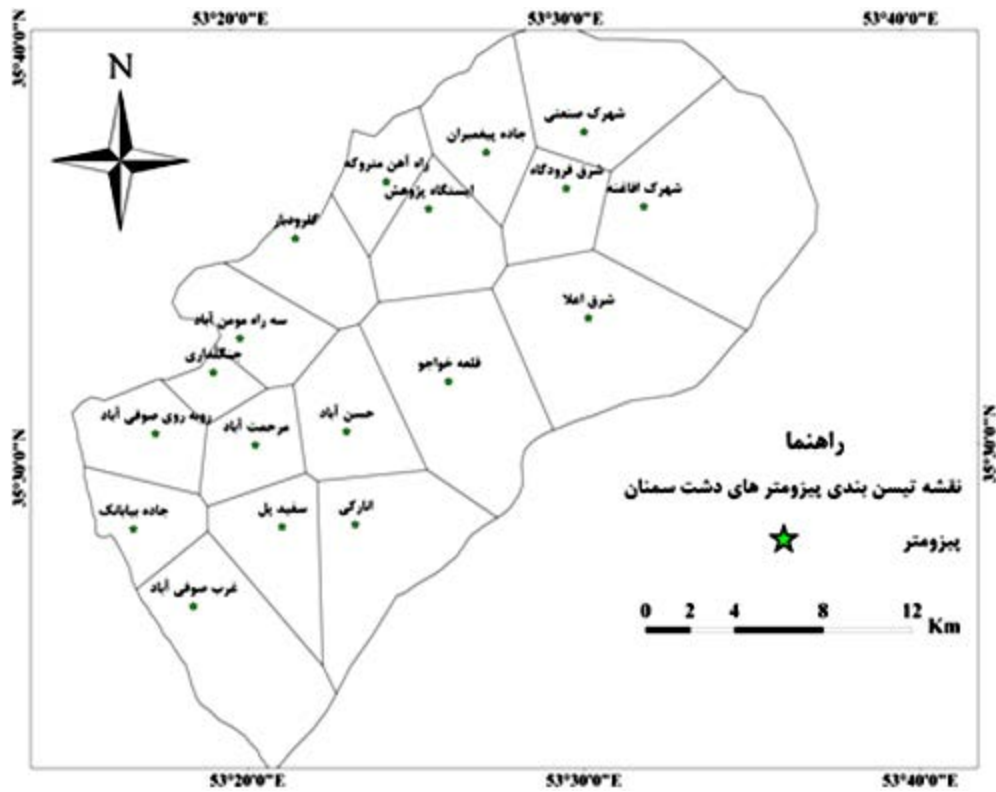
## ۲-۱-۲-۴ ترسیم هیدروگراف واحد دشت سمنان

هیدروگراف واحد دشت منحنی است که نشان دهنده میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت در بازه زمانی مشخص می‌باشد. هیدروگراف واحد دشت سمنان بر مبنای پیزومترهای فعال و شبکه تیسن شکل (۲-۴) طی دوره ۲۴ ساله (اسفند ۱۳۷۲ تا اسفند ۱۳۹۶) ترسیم و در شکل (۳-۴) ارائه شده است.

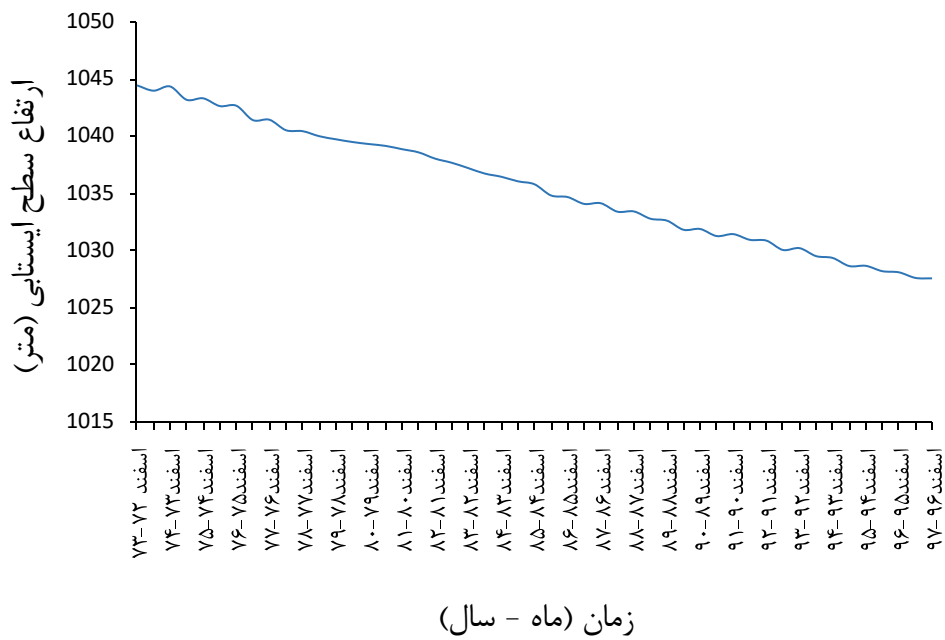


شکل ۳-۴: میزان افت کل پیزومترها طی دوره ۲۴ ساله در دشت سمنان

هیدروگراف واحد دشت سمنان نشان می‌دهد تراز آب زیرزمینی دشت طی دوره ۲۴ ساله، دارای روند نزولی است. با توجه به هیدروگراف واحد، متوسط تراز آب در اسفند ۱۳۷۲ برابر با  $1044/5$  متر که با  $18/89$  متر کاهش به مقدار  $1026/61$  متر در اسفند ۱۳۹۶ رسیده است. بنابراین افت متوسط سالیانه تراز آب طی دوره ۲۴ ساله برابر با  $18/89$  متر است که گویای کاهش ذخیره سفره آب زیرزمینی و بیلان منفی دشت می‌باشد (شکل ۳-۴). علی‌رغم اینکه هیدروگراف واحد دشت نشان از افت  $18/89$  متری سطح آب در دشت دارد.



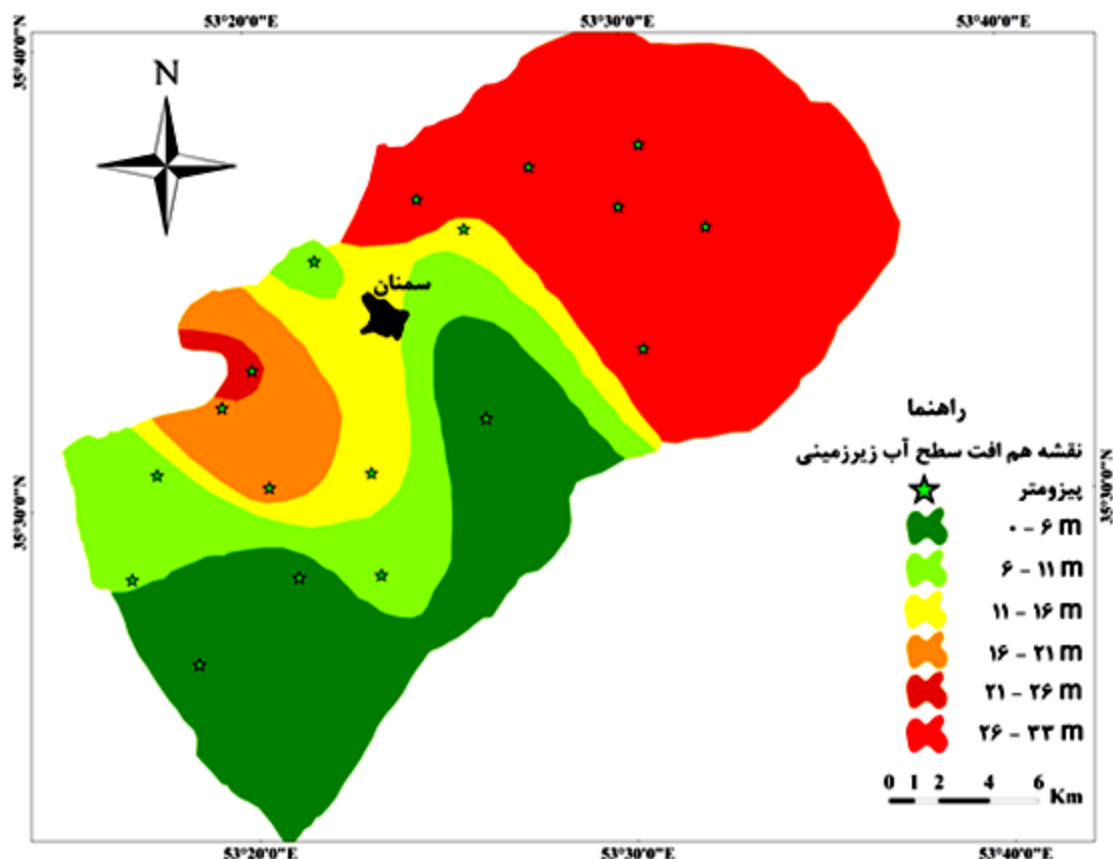
شکل ۴-۲: نقشه تیسن‌بندی پیزومترهای دشت سمنان



شکل ۴-۳: هیدروگراف معرف دشت سمنان

#### ۴-۲-۱-۳ ترسیم نقشه هم افت سطح آب زیرزمینی

به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت سمنان، نقشه هم افت ۲۴ ساله بر مبنای ۱۸ پیزومتر ترسیم شده و به صورت نقشه پهنه‌بندی شده افت سطح آب زیرزمینی در شکل (۴-۴) ارائه گردیده است. با توجه به نقشه هم افت ۲۴ ساله دشت، در قسمت شمال شرقی دشت که تمرکز چاه‌های کشاورزی بالایی نیز وجود دارد، بیشترین میزان افت مشاهده شده که مقدار بیشینه آن در پیزومتر شرق فرودگاه با ۳۳/۸۷ متر افت بدست آمده است. روند افت سطح آب زیرزمینی به سمت جنوب دشت کاهش می‌یابد و به افت کمتر ۱ متر می‌رسد. به عبارتی از قسمت شرقی دشت به سمت قسمت جنوبی و غربی دشت مقدار افت سطح ایستابی کاهش می‌یابد. در قسمت غربی دشت در محل پیزومترهای غرب صوفی آباد، قلعه خواجه و سفید پل، کمترین افت اندازه‌گیری شده است. این مطلب ناشی از تعداد کم چاه‌های بهره‌برداری به دلیل نبود آبخوان مناسب و ریز دانه بودن رسوبات زیر سطحی و همچنین کیفیت بد (EC بالا) آب‌های موجود در این منطقه می‌باشد. در محدوده پایین شهر سمنان افت سطح آب زیرزمینی کم بوده این در حالی است که محدوده‌های مجاور این بخش افت سطح آب زیرزمینی بیشتر است. علت این کاهش افت سطح آب زیرزمینی در بخش جنوبی شهر سمنان را می‌توان به تغذیه این منطقه از طریق فاضلاب شهری که عمدتاً به وسیله چاه‌های جذبی صورت می‌گیرد، مرتبط دانست. با توجه به مقادیر افت محاسبه شده طی دوره ۲۴ ساله در ۱۸ پیزومتر از اسفند ۱۳۷۲ تا اسفند ۱۳۹۶ متوسط افت در قسمت شرقی دشت بر مبنای پیزومترهای شرق اعلا، شهرک افاغنه، شرق فرودگاه، جاده پیغمبران برابر با ۳۰/۳۳ متر و در سمت شمالی دشت بر مبنای پیزومترهای ایستگاه پژوهش، راه آهن متروکه، گلرودبار، سه راه مومن آباد و جنگلداری برابر ۱۹/۶۵ متر می‌باشد.



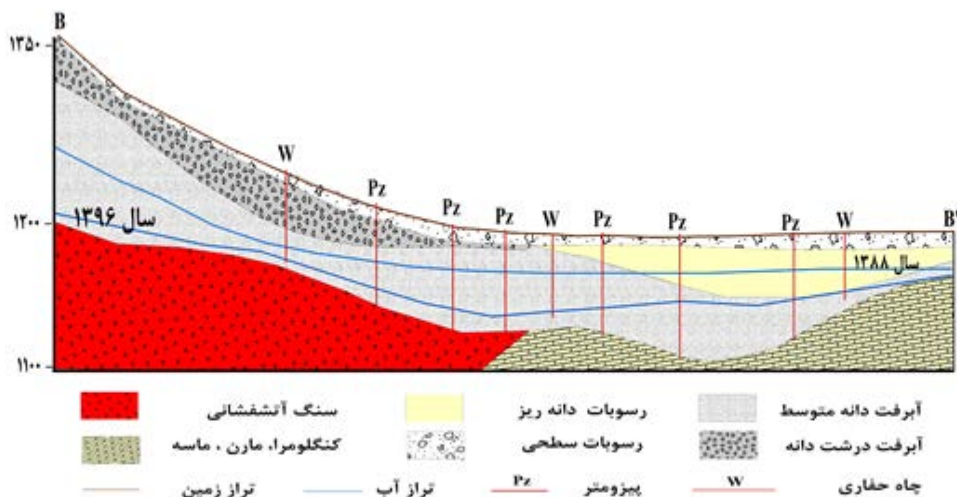
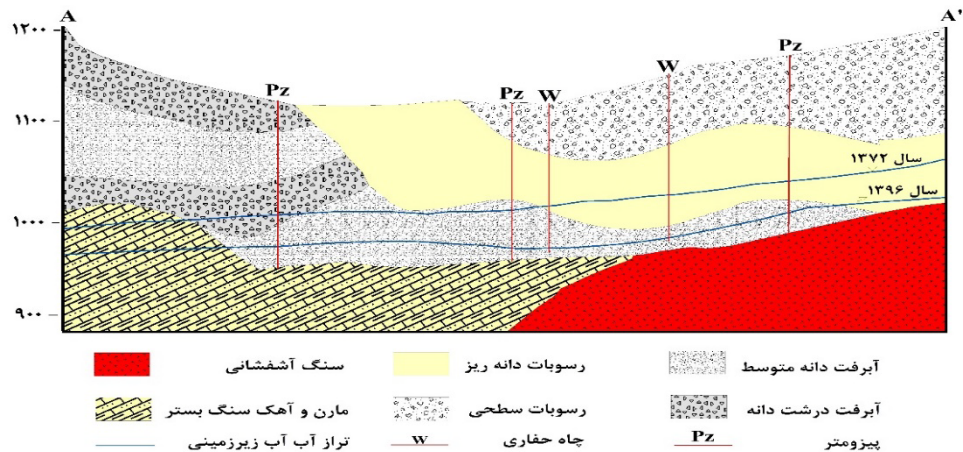
شکل ۴-۴: نقشه افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت سمنان در یک دوره ۲۴ ساله

## ۴-۲-۲ نتایج تحلیل اطلاعات زمین شناسی زیرسطحی

### ۴-۲-۲-۱ ترسیم نقشه تغییرات جنس و ضخامت رسوبات در دشت سمنان

تغییرات ضخامت و دانه‌بندی رسوبات، و جنس و عمق سنگ کف در منطقه در راستای دو نیمرخ در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. بررسی اندازه رسوبات دشت بیانگر این مطلب است که در مقطع AA' جنس سنگ بستر از سنگ‌های آتشفشانی، مارن و آهک تشکیل شده است. قسمت شمال شرقی دشت لایه‌ی سطحی متشکل از رسوبات مخروط افکنه‌ای درشت دانه که بیشتر از شن، ماسه قلوه سنگ دار تشکیل شده، پوشش داده شده است. پس از این بخش درشت دانه، رسوبات ریز دانه و متوسط دانه قرار داشته که در زیر آنها سنگ بستر آتشفشانی قرار دارد. از این بخش هرچه به سمت مرکز دشت می‌رویم، به طور کلی ضخامت لایه‌های ریزدانه بیشتر می‌شود. سطح ایستابی در این بخش در سال

۱۳۷۲ تماماً در لایه رسی قرار داشته و با افزایش افت در سال ۱۳۹۶ بخشی از آن وارد لایه متوسط دانه شده است. در بخش جنوب غربی دشت (A) رسوبات سطحی درشت دانه بوده که پس از عبور از لایه متوسط دانه دوباره درشت دانه می‌شوند. سنگ کف در این بخش در عمق کمتری واقع بوده و از نوع مارن تا آهک سازند قرمز بالایی می‌باشد.



شکل ۴-۵: مقطع زمین شناسی AA' با راستای شمال شرق  $\Delta$  جنوب غرب و مقطع زمین شناسی BB' با راستای شمال غرب - جنوب شرق در دشت سمنان

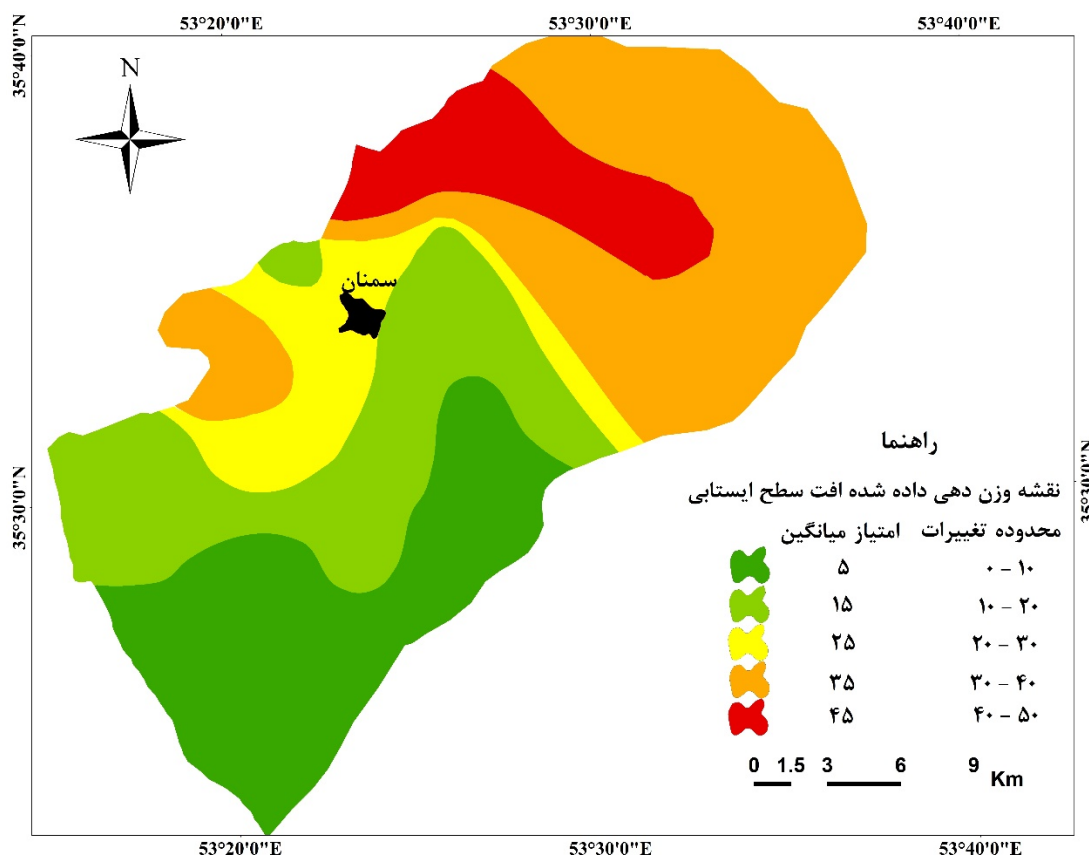
بررسی مقطع BB' نشان می‌دهد که در بخش‌های شمالی دشت رسوبات ریزدانه‌ای که پتانسیل نشست دارند، عملاً وجود نداشته و توالی رسوبات به این صورت است که پس از عبور از یک بخش خاک سطحی درشت دانه کوهرفتی، آبرفت درشت دانه حضور داشته که پس از این بخش درشت دانه آبرفتی، ضخامت

قابل توجه‌ای از آبرفت متوسط دانه قرار دارد. این توالی رسوبی بر روی سنگ بستر آتشفشانی ائوسن قرار دارند. تغییرات رسوبات در طول این مقطع نشان می‌دهد که با حرکت از شمال غرب به جنوب شرق (B به B') آبرفت درشت دانه ناشی از سیلاب‌های فصلی حذف شده و به جای آن یک بخش ریز دانه در بخش‌های جنوبی نمایان می‌گردد. در این بخش سنگ کف آتشفشانی ائوسن (سازند کرج) جای خود را به توالی مارن، کنگلومرا و ماسه سنگ سازند قرمز بالایی و قم می‌دهد. به علاوه سنگ کف در این بخش دارای ناهمواری قابل توجه‌ای بوده و باعث گردیده که ضخامت رسوبات در بخش جنوبی کم و زیاد گردد. بررسی تغییرات سطح ایستابی نشان می‌دهد که میزان تغییرات در بخش شمالی خیلی بیشتر از بخش جنوبی بوده است. با این وجود عدم حضور رسوبات ریزدانه از یک طرف و مقاوم بودن سنگ بستر آتشفشانی از طرف دیگر باعث می‌گردد که علی‌رغم افت قابل توجه در این بخش، نشست قابل ملاحظه‌ای اتفاق نیفتد. در بخش جنوبی علی‌رغم افت کم سطح آب زیرزمینی، وجود لایه‌های مارنی در سنگ بستر و رسوبات ریز تا متوسط دانه باعث می‌گردد که نشست تحکیمی این بخش بیش از بخش شمالی باشد. قسمت مرکزی دشت شامل رسوبات دانه ریز و رسوبات دانه متوسط آب داری بوده که بخش اعظمی از دشت را در بر می‌گیرد.

#### ۴-۲-۳ نقشه پهنه بندی خطر فرونشست سطح زمین

به منظور تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت سمنان، از نقشه‌ی هم‌افت سطح آب زیرزمینی و نقشه‌ی لیتولوژی دشت سمنان به عنوان نقشه‌های ورودی و از نرم‌افزار Arc GIS برای پردازش آنها استفاده شده است. برای همسان‌سازی امتیاز ناشی آب زیرزمینی با امتیاز لیتولوژی، افت سطح ایستابی در هر پیزومتر (شکل ۴-۴) در ضریب یک و نیم، ضرب شد و سپس بر مبنای افت سطح ایستابی وزن دهی شده، نقشه‌ی هم‌افت دوباره ترسیم گردید. این نقشه از طریق ابزار Reclassify به ۵ رده با محدوده تغییرات ۱۰ متری تقسیم گردید. در نهایت به منظور استفاده از این نقشه برای پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین، به هر کدام از این ۵ رده امتیازی برابر با میانگین محدوده تغییرات

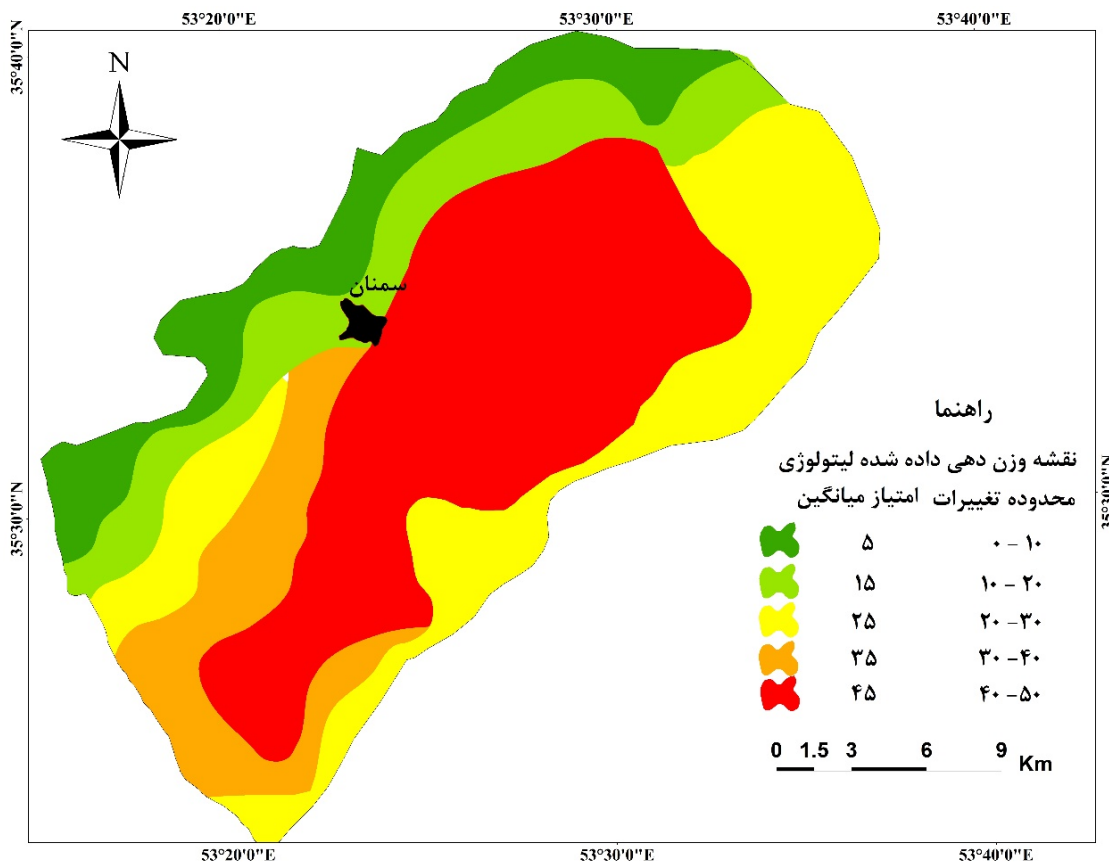
آن رده داده شد تا عملاً نقشه کیفی افت سطح ایستابی به صورت کمی و قابل استفاده در همپوشانی لایه‌ها شود شکل (۴-۶).



شکل ۴-۶: نقشه زون بندی افت سطح آب زیرزمینی

همان طور که گفته شده نشست مسئله دار مرتبط با افزایش فشار ناشی از افت سطح ایستابی مربوط به نشست تحکیمی خاک‌های ریزدانه می‌باشد. از طرفی لایه‌های متاثر از این افزایش فشار لایه‌هایی هستند که قبلاً زیر سطح ایستابی بوده‌اند. بنابراین لایه‌های بالای سطح ایستابی حتی اگر ریزدانه هم باشند تحت تاثیر این افزایش تنش قرار نمی‌گیرند. در این پژوهش خط مبنا، سطح ایستابی در سال ۱۳۷۲ در نظر گرفته شده است و به لایه‌های زیر سطح ایستابی بسته به نوع هر لایه یک امتیازی داده شده است. برای لایه ریزدانه امتیاز ۰/۷، متوسط دانه امتیاز ۰/۵، مارن و شیل ۰/۴، درشت دانه، آهک، ماسه سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آتشفشانی به همراه آبرفت درشت دانه امتیاز صفر در نظر گرفته شده

و در محل هر سونداژ ضخامت هر لایه زیر سطح ایستابی اولیه در امتیاز مربوط ضرب شده و مجموع این امتیازها به عنوان امتیاز نهایی آن نقطه در نظر گرفته شد. در ادامه برای پهنه‌بندی دشت از نظر پتانسیل وقوع نشست با توجه به شرایط زمین‌شناسی، حداکثر و حداقل امتیاز به دست آمده در محل ۷۵ سونداژ، از هم کسر گردید تا دامنه تغییرات امتیازات لیتولوژی بدست آید و سپس از طریق ابزار کلاس‌بندی، وضعیت زمین‌شناسی دشت سمنان و به ۵ رده تقسیم شد. برای جمع کردن امتیاز شرایط زمین‌شناسی با افت سطح آب زیرزمینی مشابه با نقشه قبلی متوسط هر رده لیتولوژیکی به عنوان امتیاز آن محدوده در نظر گرفته شد (شکل ۴-۷).

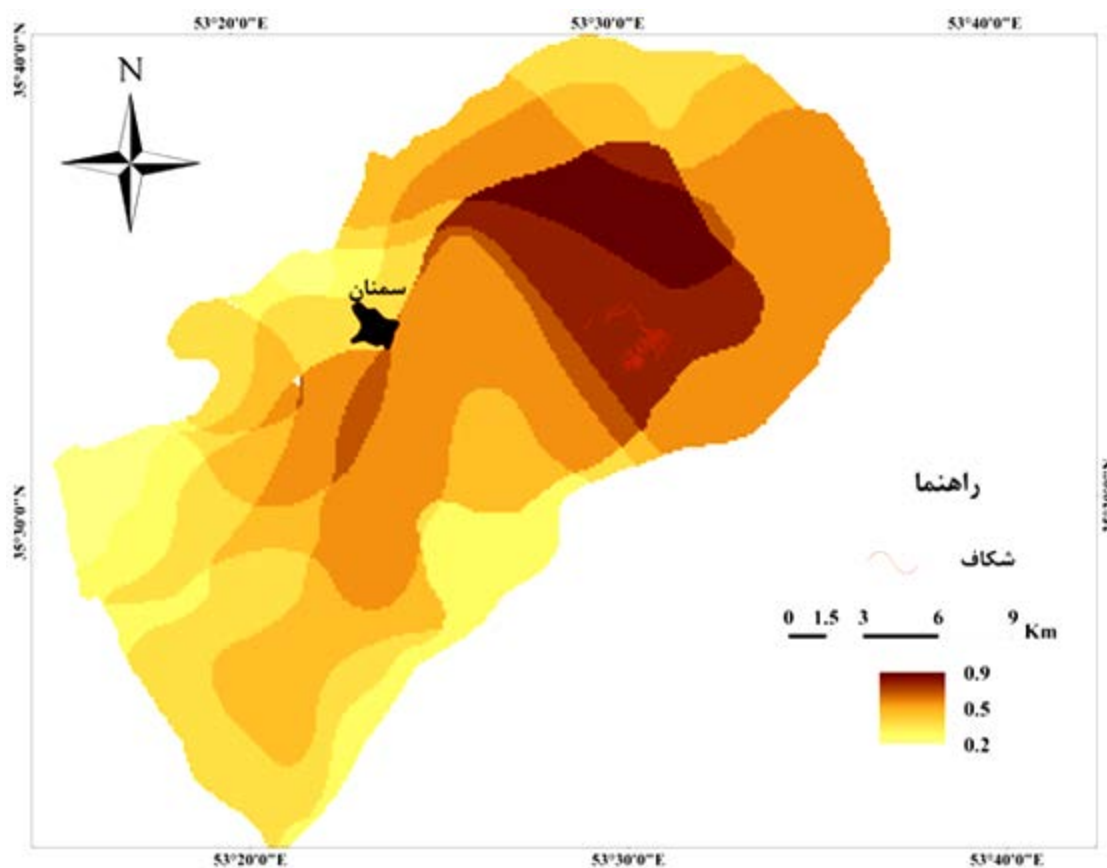


شکل ۴-۷: نقشه زون‌بندی لیتولوژی دشت سمنان

در انتها برای هم پوشانی نقشه‌ی افت سطح آب زیرزمینی و نقشه لیتولوژی از ابزار Weighted Sum استفاده شد و نقشه‌های وزن داده شده افت سطح ایستابی و شرایط لیتولوژیکی با یکدیگر جمع شد و نقشه‌ی پتانسیل خطر فرونشست تهیه شد (شکل ۴-۸). نقاط دارای امتیاز بیشتر پتانسیل فرونشست



بیشتری دارند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در حد فاصل بین پیزومترهای شهرک افغانه، شرق فرودگاه و در جنوب جاده پیغمبران بیشترین پتانسیل فرونشست وجود دارد. محدود بعدی پتانسیل فرونشست در حوالی محدوده اول بوده و قسمت‌های نظیر روستای اعلا، شرق پیزومتر ایستگاه پژوهش و اطراف شهرک صنعتی را پوشش می‌دهد. بررسی رشد لوله جدار پیزومتر شرق اعلا به عنوان شاهد صحرائی نشست در این محدوده نشان می‌دهد که نشست بیش از ۳۰ سانتیمتر در آن رخ داده است (شکل ۴-۹). یک محدود با خطر نشست نسبتاً بالا در بخش غربی دشت و محدوده بین روستاهای حسن‌آباد، مرحمت‌آباد و سه راه مومن‌آباد دیده می‌شود. بقیه مناطق پتانسیل فرونشست محدودی دارند.



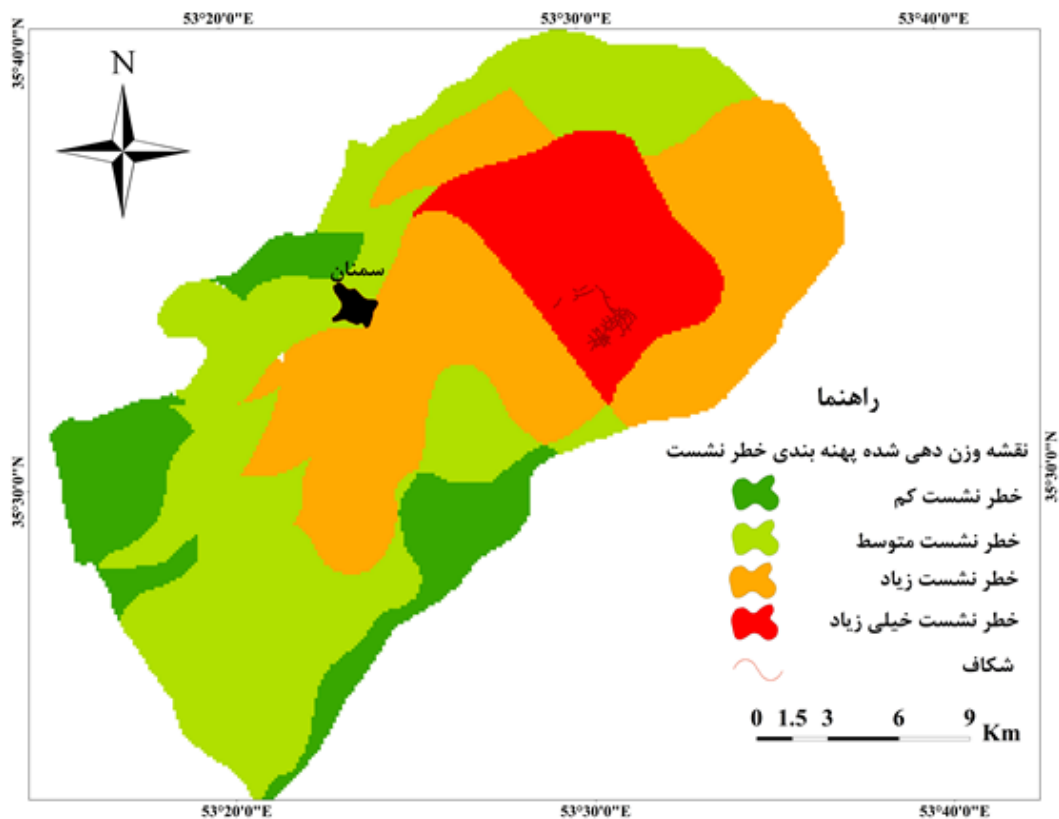
شکل ۴-۸: نقشه کمی پتانسیل خطر رخداد فرونشست حاصل از هم پوشانی نقشه‌های افت سطح آب زیرزمینی و شرایط لیتولوژی



شکل ۴-۹: تصاویری از بیرون زدگی لوله جدار پیزومترها در شرق اعلا

در نهایت به منظور ترسیم نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست، محدوده تغییرات امتیازهای به دست آمده در شکل (۴-۸) محاسبه شد و این محدوده تغییرات از طریق ابزار کلاس‌بندی مجدد به ۴ محدوده تبدیل گردید. با توجه به نقشه‌ی بدست آمده پهنه‌بندی خطر نشست سطح زمین در دشت سمنان شکل (۴-۱۰)، بیشترین مقدار پتانسیل نشست در بخش شرقی شهر سمنان بوده و عناصر ریسک‌پذیر نظیر خطوط انتقال نیرو، خطوط ارتباطی و روستاهای واقع در این بخش دچار مشکلاتی شده یا خواهند شد. نکته قابل توجه پتانسیل فرونشست خود شهر سمنان بوده که در رده متوسط قرار دارد. درشت بودن رسوبات زیرسطحی و عدم افت قابل توجه سطح ایستابی در زیر شهر سمنان منجر شده که این منطقه پرریسک در رده خطر متوسط قرار بگیرد. مطابق با این نقشه توسعه شهری در آینده برای شهر سمنان در جهت جنوب و شرق خطر بالاتری داشته و در صورت مهیا بودن شرایط مورفولوژیکی و فنی، توسعه شهر به سمت شمال توصیه می‌گردد. مناطق مرکزی تا جنوبی دشت نیز علی‌رغم مهیا بودن شرایط زمین‌شناسی، دچار افت قابل ملاحظه سطح ایستابی و به تبع آن افزایش تنش موثر نشده‌اند و در نتیجه خطر نشست زمین در آنجا نیز کم می‌باشد. در قسمت‌های غرب و جنوب غربی دشت سمنان با توجه به این که در این مناطق میزان افت سطح آب زیرزمینی پایین است و از طرفی مناسب بودن شرایط زمین‌شناسی برای رخداد فرونشست نیز در حد متوسط یا ضعیف بوده، در نتیجه پتانسیل رخداد

نشست سطح زمین بصورت ضعیف می باشد.



شکل ۴-۱۰: نقشه پهنه بندی پتانسیل خطر فرونشست زمین در دشت سمنان

همان طور که در نقشه پهنه بندی خطر فرونشست دیده می شود، یکی از نکات قابل توجه در این دشت رخداد شکاف در قسمت جنوب شرق دشت و حوالی پیزومتر شرق اعلا در جنوب شرقی دشت سمنان می باشد. این شکافها نسبتاً عمیق بوده و طول قابل توجهی دارند (شکل ۴-۱۱). محل رخداد شکافها در محدوده با پتانسیل رخداد نشست خیلی زیاد قرار گرفته است. با توجه به نقشه پهنه بندی خطر به دست آمده و بر مبنای نشستهای متفاوت در دشت، احتمال رخداد زون کششی برای ایجاد این شکافها پایین می باشد. از طرفی هندسه و الگوی غیر یکنواخت و شاخه درختی این شکافها تایید کننده این مطلب بوده و در نتیجه این شکافها نمی توانند معلول مستقیم فرونشستهای رخ داده شده در دشت باشند.

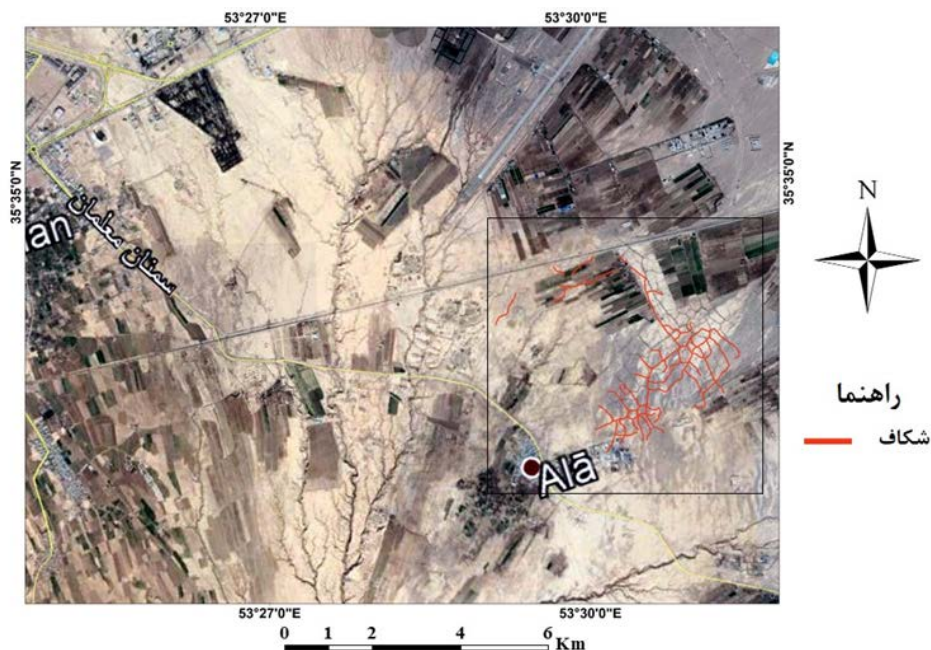


شکل ۴-۱۱: تصاویری از شکاف‌های ایجاد شده در دشت سمنان

## ۳-۴ مکانیسم، خطر و ریسک رخداد شکاف در دشت سمنان

### ۴-۳-۱ بررسی نتایج مطالعات صحرایی

در این تحقیق بررسی‌های جامع صحرایی و اندازه‌گیری‌های مربوطه انجام گردید تا شواهد و اطلاعاتی برای تعیین علل رخداد شکاف و توسعه آن در منطقه مورد مطالعه فراهم نماید. در طی اندازه‌گیری و مشاهدات صحرایی، مشخصات شکاف‌ها شامل، طول، عرض، عمق، الگو و جهت‌یابی، بررسی گردید. شکاف‌های تشکیل شده در محدوده‌ای به وسعت تقریباً ۱۰ کیلومتر مربع و در ۱۰ کیلومتری شرق شهر سمنان مشاهده گردیدند. موقعیت این شکاف‌ها توسط دستگاه GPS ثبت شد و این نقاط بر روی نقشه‌ی رقومی شده پیاده‌سازی و شکل هندسی و الگوی پراکندگی شکاف در منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۲: موقعیت شکاف‌های موجود در دشت سمنان

در نزدیکی راه آهن جهت یابی غالب شکاف اصلی به صورت شمالی-جنوبی و عمود بر مسیر راه آهن سراسری تهران-مشهد بوده و سپس در بخش جنوبی به سمت جنوب غرب منحرف می‌گردد. بررسی ابعاد شکاف‌ها نشان می‌دهد که عرض این شکاف‌ها از چند سانتی‌متر تا ۲ متر متغیر است (شکل ۴-۱۳). اندازه‌گیری عمق شکاف‌ها نشان می‌دهد که عمق شکاف‌ها نیز عمدتاً در حد بین ۵۰ سانتی‌متر تا ۵ متر می‌باشند (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۳: تصاویری از رخداد شکاف در دشت سمنان



شکل ۴-۱۴: تصاویری از رخداد شکاف در دشت سمنان

الگوی کلی این شکاف‌ها حالت دندریتی از خود نشان می‌دهند و دارای جابه‌جایی افقی یا قائم نمی‌باشند. نکته قابل توجه در محل شکاف‌ها، وجود تونل‌های زیرزمینی در بخشی از شکاف بوده که سقف آن هنوز نریخته و باعث انقطاع شکاف در طول مسیر شده است. در کف این تونل‌ها آثار ترک گلی که نشان از حضور آب دارد، دیده می‌شود. این تونل‌ها که به عنوان تونل‌های لوله‌ای (Piping) شناخته می‌شوند حکایت از فرسایش هیدرولیکی زیر سطحی و انتقال رسوبات واقع در مسیر حرکت آب دارند (شکل ۴-۱۵). با این وجود هیچ مشاهده‌ای از فرسایش رودخانه‌ای و رسوبات مربوط به آن در دیواره شکاف‌ها دیده نمی‌شود. تکامل شکاف در محل این تونل‌ها حکایت از مهاجرت رو به بالای حفره‌ها و تونل‌های زیر سطحی داشته تا نهایتاً خود را به سطح زمین رسانده و شکاف نمایان گردد. بررسی‌های صحرایی همچنین نشان‌دهنده پتانسیل رمبندگی خاک در این منطقه بوده و حفرات ماکروسکوپی و دیواره قائم با ارتفاع زیاد در مسیر رودخانه‌های جزین و آبگرم از جمله شواهد صحرایی هستند که به نوعی نشان‌دهنده رمبندگی خاک‌های واقع در مسیر شکاف می‌باشند (شکل ۴-۱۶).



شکل ۴-۱۵: تصاویری از تونل‌های پایپینگ ایجاد شده در محل شکاف‌ها در دشت سمنان



شکل ۴-۱۶ وجود حفرات ماکروسکوپی و دیواره‌های قائم و ارتفاع زیاد بعنوان شواهد رمبندگی خاک در دشت سمنان

### ۴-۳-۲ بررسی نتایج آزمایشگاهی

آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها شامل آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری، آزمایش تعیین چگالی، آزمایش تحکیم مضاعف، آزمایش تعیین حدود اتربرگ (حد روانی و حد خمیری)، آزمایش کرامپ، آزمایش هیدرومتری مضاعف و آزمایش پین هول می‌باشد. تمام آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM D انجام شد جدول (۴-۲).

جدول ۴-۲: آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های خاک در دشت سمنان

ردیف	نوع آزمایش	تعداد نمونه	ردیف	نوع آزمایش	تعداد نمونه
۱	دانه‌بندی الک	۱۸	۶	آزمایش حد خمیری	۱۳
۲	دانه‌بندی هیدرومتری	۱۳	۷	آزمایش حد روانی	۱۳
۳	آزمایش تحکیم	۱۰	۸	آزمایش کرامپ	۹
۴	آزمایش تعیین چگالی	۱۸	۹	آزمایش پین هول	۹
۵	آزمایش دانسیته خشک خاک	۱۰	۱۰	آزمایش هیدرومتری مضاعف	۱۳

### ۴-۳-۲ - نتایج آزمایشات تعیین خصوصیات فیزیکی خاک

#### ۴-۳-۲-۱ نتایج آزمایشات تعیین وزن مخصوص ویژه خاک یا (Gs)

نتیجه آزمایش تعیین چگالی در جدول (۴-۳) آورده شده است. نتایج حاصل از آزمایش تعیین وزن مخصوص ویژه خاک نشان داد که مقدار Gs برای ۱۸ نمونه بین ۲/۶۴ تا ۲/۷۳ متغیر بوده است. با توجه به اینکه از پارامتر Gs برای محاسبات آزمایش تحکیم استفاده می‌شود، بنابراین در نمونه‌های درشت‌دانه مانند نمونه‌های ۱، ۲، ۳، ۱۵، ۱۸ این آزمایش انجام نشده است.

جدول ۴-۳: مقادیر وزن مخصوص (Gs) نمونه خاک‌های ریزدانه مورد مطالعه

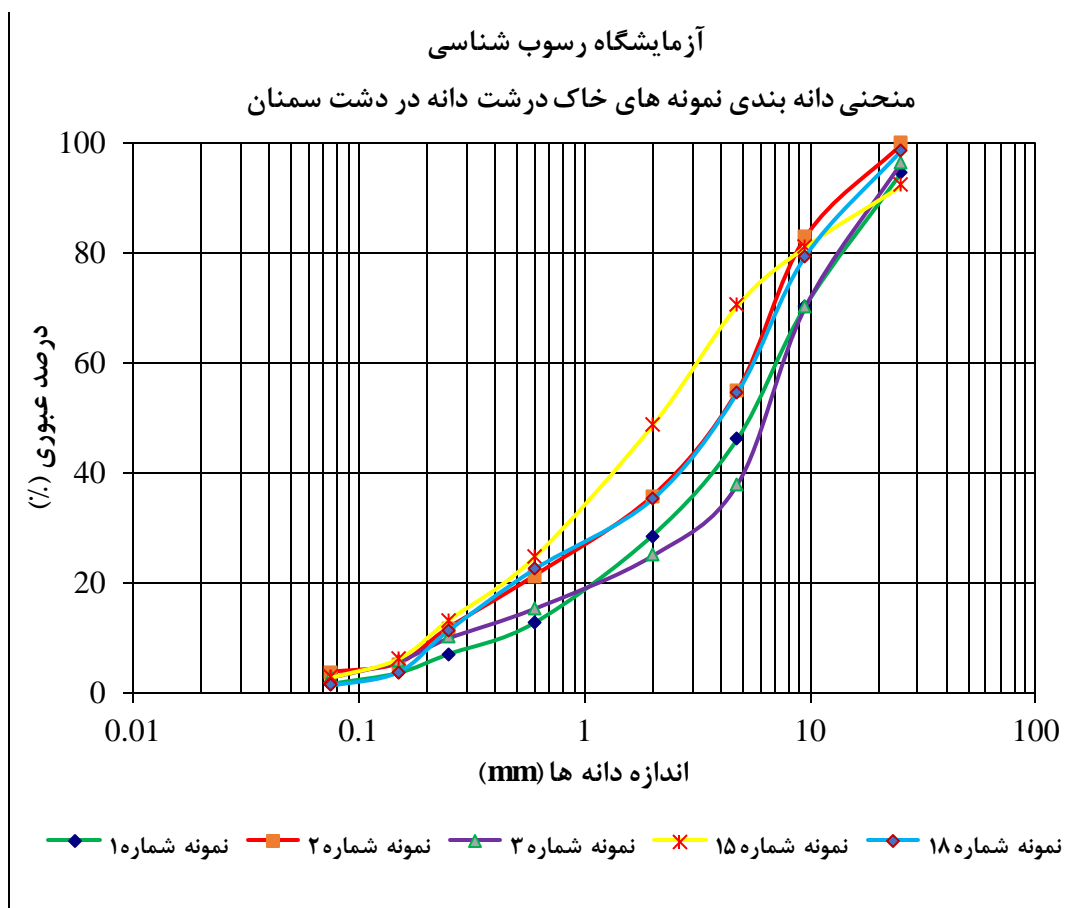
شماره نمونه	*۱	*۲	*۳	*۴	*۵	۶	۷	۸
Gs	۲/۶۷	۲/۶۹	۲/۶۹	۲/۶۴	۲/۶۲	۲/۶۴	۲/۷۰	۲/۵۶
شماره نمونه	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۶	۱۷
Gs	۲/۶۷	۲/۶۳	۲/۶۳	۲/۷۰	۲/۷۰	۲/۷۳	۲/۶۳	۲/۷۰

نمونه‌هایی که با علامت \* نشان داده شده است در مرحله‌ی اول و در محل شکاف‌ها برداشت شده‌اند.



### ۲-۲-۳-۴ نتایج آزمایش دانه بندی و هیدرومتری

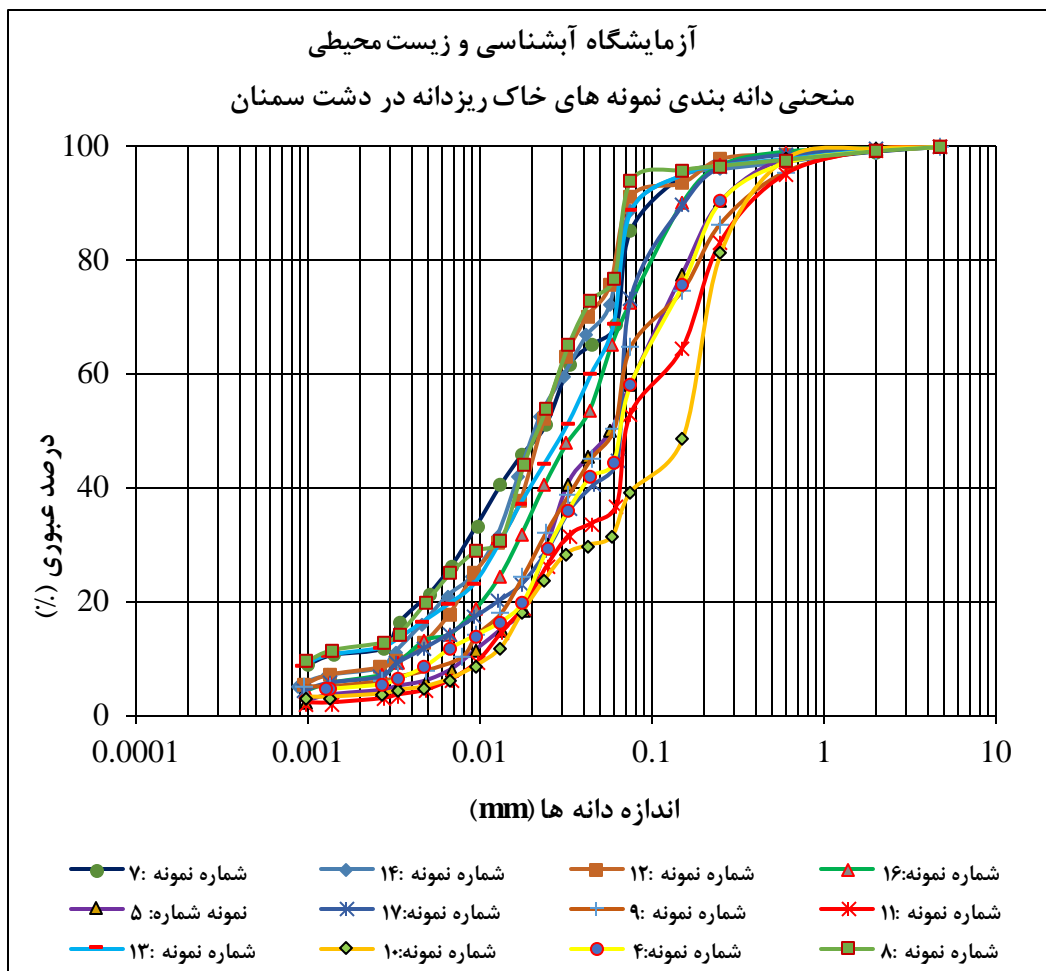
منحنی دانه بندی نمونه‌های خاک در شکل‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) آورده شده‌اند. همچنین جدول (۴-۴) نتایج دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری را برای خاک‌های محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۷) مربوط به خاک‌های درشت‌دانه واقع در بخش‌های شمالی دشت بوده که صرفاً بر مبنای نتایج آزمایش الک تهیه گردیده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود بخش عمده‌ای از این خاک‌ها از شن تشکیل شده که دارای ابعاد بین ۲ تا ۲۵ میلی‌متر می‌باشند و حکایت از رسوبات بخش میانی مخروط افکنه دارند.



شکل ۴-۱۷: منحنی دانه بندی خاک‌های درشت دانه در دشت سمنان

منحنی دانه‌بندی برای خاک‌هایی که مقدار قابل توجهی ریزدانه دارند از تلفیق نتایج آزمون دانه‌بندی به روش الک و آزمون هیدرومتری به دست آمد (شکل ۴-۱۸). همانطور که در شکل (۴-۱۸) بخش اصلی

این خاک‌ها از ذرات ریزدانه و به خصوص ذرات در اندازه‌ی سیلت تشکیل شده و همخوانی مناسبی با دانه‌بندی مورد انتظار با لسی‌های بادرفتی دارد.



شکل ۴-۱۸: منحنی دانه بندی خاک‌های ریزدانه در دشت سمنان

### ۴-۳-۲-۳ نتایج آزمایش تعیین حدود آتربرگ

همانطور که قبلاً اشاره شد، به منظور بررسی تغییر رفتار خاک‌ها به علت افزایش رطوبت و همچنین تعیین رده‌ی مهندسی خاک‌های ریزدانه و یا خاک‌های درشت‌دانه‌ی حاوی ذرات ریزدانه، آزمایش تعیین حدود آتربرگ بر طبق استاندارد ASTM انجام گرفته شده و نتایج آن برای هریک از نمونه‌های مورد مطالعه در دشت سمنان در جدول (۴-۵) آورده شده است. همانطور که در جدول (۴-۵) دیده می‌شود

حد روانی و شاخص خمیری این خاک‌ها پایین بوده که می‌تواند به دلیل کم بودن رس موجود در خاک و یا غالب بودن رس‌های دولایه ( گروه کائولینیت) باشد.

جدول ۴-۴ : درصد دانه‌های خاک به تفکیک جنس خاک

شماره نمونه	شن و ماسه (%)	سیلت (%)	رس (%)
۱	۹۵	۵	-
۲	۱۰۰	-	-
۳	۱۰۰	-	-
۴	۴۲	۴۰	۱۸
۵	۴۳	۴۲	۱۵
۶	۱۷	۵۲	۳۱
۷	۳۲	۴۹	۳۶
۸	۲۴	۴۶	۳۰
۹	۳۶	۴۶	۱۸
۱۰	۶۱	۱۴	۱۲
۱۱	۴۸	۳۸	۱۴
۱۲	۹	۶۳	۲۸
۱۳	۱۲	۵۹	۲۹
۱۴	۱۱	۵۸	۳۱
۱۵	۹۲	۸	-
۱۶	۲۸	۴۴	۲۸
۱۷	۲۷	۵۳	۲۰
۱۸	۹۸	۲	-

جدول ۴-۵ : نتایج حدود آتربرگ نمونه‌ها

شماره آزمایش	حد روانی LL	حد خمیری PL	شاخص خمیری PI
۴	۱۸/۷۵	۱۳/۷۹	۴/۹۶
۵	۱۷/۰۶	۱۲/۵	۴/۵۶
۶	۲۰/۰۵	۱۴/۲۸	۵/۷۷
۷	۲۰/۰۵	۱۴/۲۸	۵/۷۷
۸	۲۶/۲۹	۱۸/۸	۷/۴۹
۹	۲۶/۵۴	۱۹/۳۵	۷/۱۹
۱۰	۲۳/۳۶	۱۲/۵	۱۰/۸۶
۱۱	۱۸/۵۶	۱۲/۵	۶/۰۶
۱۲	۱۸/۲۰	۱۵/۷۸	۲/۴۲
۱۳	۲۴/۹۹	۱۸/۵۱	۶/۴۸
۱۴	۲۴/۷۷	۱۸/۵۱	۶/۲۶
۱۶	۲۰/۵۸	۱۱/۳	۹/۲۸
۱۷	۲۰/۱۵	۱۲/۰	۸/۱۵

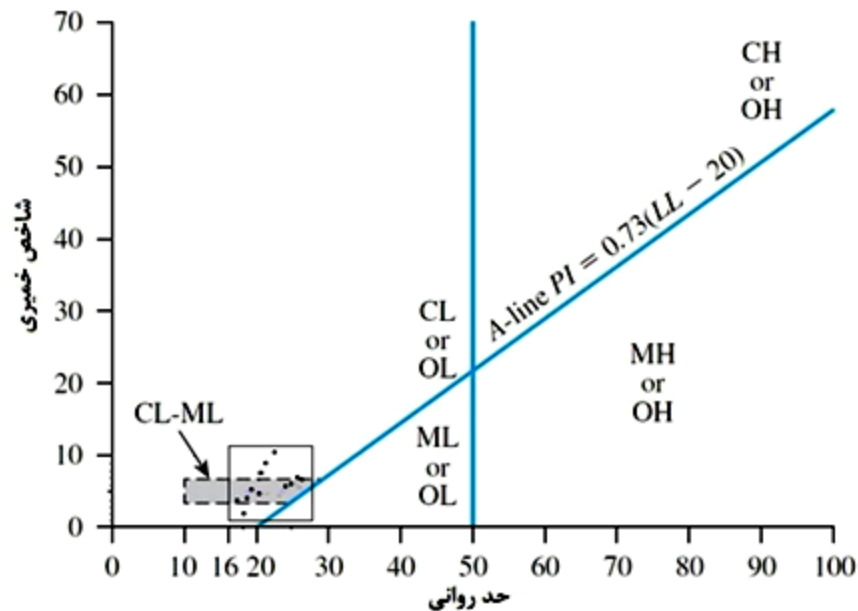
#### ۴-۳-۲-۴ رده بندی مهندسی خاک‌های مورد مطالعه

رده‌بندی مهندسی خاک یکی از مرسوم ترین مراحل در مطالعات ژئوتکنیکی خاک‌ها می‌باشد. هدف از رده‌بندی خاک این است که خاک‌هایی که دارای رفتار فیزیکی و مکانیکی مشابه‌ای هستند در دسته‌های یکسانی قرار گیرند، لذا با مشخص بودن رده خاک می‌توان حدود کلی رفتار خاک را استنباط کرد. باتوجه به اینکه در ایران رده‌بندی متحد خاک (یونیفاید) بیشترین کاربرد را داشته، بر مبنای آزمایش دانه‌بندی و حدود آتربرگ، رده مهندسی تمامی نمونه‌های اخذ شده بر مبنای این رده‌بندی مشخص گردیده که نتایج آن در جدول (۴-۶) و شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج این رده‌بندی در نقشه‌ی زمین‌شناسی مهندسی تهیه شده برای دشت سمنان مورد استفاده قرار گرفته است نتایج رده‌بندی مهندسی خاک نشان می‌دهد که در قسمت دهانه مخروط افکنه شمال دشت

سمنان در رده مهندسی خاک SW یا ماسه تمیز خوب دانه‌بندی شده تا شن تمیز بد دانه‌بندی شده (GP) بوده است. بخش مرکزی، جنوبی و غربی دشت عمدتاً خاک‌های لسی بوده که رده مهندسی آن‌ها ML، CL، ML-CL و CL می‌باشد.

جدول ۴-۶: رده‌بندی مهندسی خاک بر اساس رده‌بندی یونیفاید

نوع خاک	شماره نمونه	نوع خاک	شماره نمونه
SC	۱۰	GW	۱
ML-CL	۱۱	SW	۲
ML	۱۲	GP	۳
ML-CL	۱۳	ML-CL	۴
ML-CL	۱۴	ML-CL	۵
SW	۱۵	ML-CL	۶
CL	۱۶	ML-CL	۷
CL	۱۷	ML	۸
SW	۱۸	SC	۹



شکل ۴-۱۹: موقعیت قرارگیری خاک‌های ریزدانه در نمودار شاخص خمیری-حد روانی

## ۳-۳-۴ آزمایش‌های تعیین پتانسیل رمبندگی خاک‌های ریزدانه

### ۳-۳-۴-۱ آزمایش تحکیم مضاعف

آزمایش تحکیم مضاعف بدین صورت انجام گرفت که باری به اندازه ۲۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در حالت رطوبت طبیعی بر خاک وارد شده و پس از گذشت زمان و رخداد نشست خاک در این بار، نمونه اشباع گردید و روند نشست و کاهش ارتفاع نمونه تحت این بار در حالت اشباع ثبت گردید. نتایج آزمایش در جدول (۷-۴) و شکل (۴-۲۰) نشان داده شده است برای تعیین پتانسیل رمبندگی خاک، بر اساس استاندارد ASTM از فرمول زیر استفاده گردید.

$$I_c = \left(\frac{D_h}{h_0}\right) \times 100$$

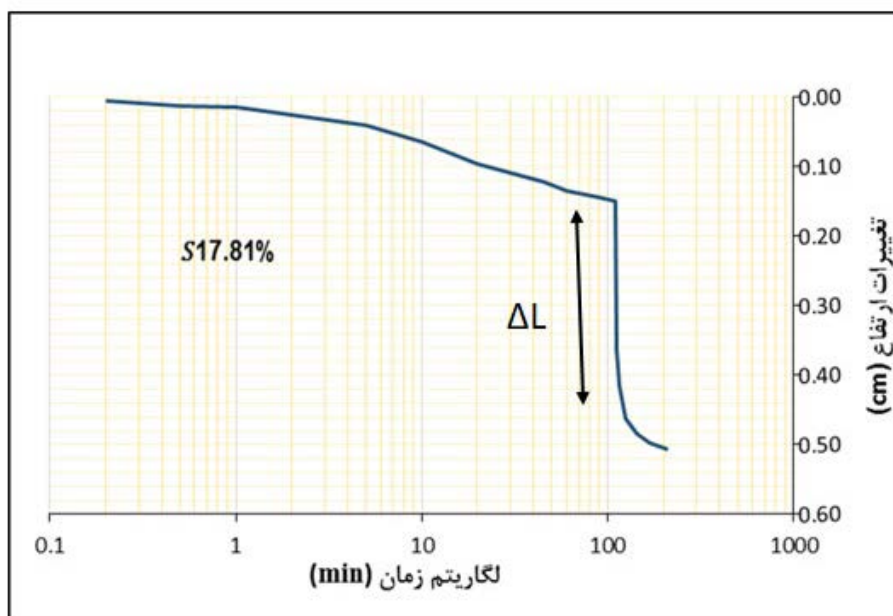
$I_c$  ضریب پتانسیل رمبندگی،  $D_h$  تغییر در ارتفاع نمونه در نتیجه اشباع شدن شدن،  $h_0$  ارتفاع اولیه نمونه خاک

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش تحکیم مضاعف و (جدول ۷-۴) مطابق با معیارهای مختلف رمبندگی خاک ارائه شده تمامی نمونه‌ها بر اساس معیار (Abelev (1984) دارای رمبندگی شدید می‌باشند. همچنین بر اساس معیار (Jennings and Knighth (1975) به نظر می‌رسد که در نمونه شماره ۴ مقدار رمبندگی شدید و در نمونه‌های ۱، ۲، ۳، ۸، ۹، ۱۰ مقدار رمبندگی بسیار شدید و در نمونه‌های ۵، ۶ و ۷ که در محل شکاف‌های اصلی گرفته شده است مقدار رمبندگی فوق‌العاده شدید بوده است. و در نهایت بر اساس معیار (ASTM (2003) که بهترین تطابق را با خاک مورد آزمایش برقرار کرده است و نشان داد که از نظر شدت رمبندگی نمونه شماره ۴ مسئله‌دار، و نمونه‌ها ۱، ۲، ۳، ۸، ۹، ۱۰ شدیداً مسئله‌دار و نمونه‌های ۵، ۶ و ۷ بسیار شدید مسئله‌دار بوده‌اند.

جدول ۷-۴: نتایج ضریب رمبندگی بدست آمده در آزمایش تحکیم مضاعف

شدت رمبندگی			Ic	D <sub>h</sub> (cm)	h <sub>0</sub> (cm)	شماره آزمایش
ASTM (2003)	Jennings & Knights (1975)	Abelev (1984)				
شدیدا مسئله‌دار	بسیار شدید	رمبندگی شدید	٪۱۵	۰/۲۹	۰/۸۸	*۱
شدیدا مسئله‌دار	بسیار شدید	رمبندگی شدید	٪۱۸	۰/۳۵	۰/۹۲	*۲
شدیدا مسئله‌دار	بسیار شدید	رمبندگی شدید	۱۷/۸۱٪	۰/۳۴	۰/۹۴	*۳
مسئله‌دار	شدید	شدید	٪۶/۷	۰/۷۹	۰/۸۶	۴
بسیار شدیداً مسئله‌- دار	فوق‌العاده شدید	رمبندگی شدید	٪۲۱	۰/۴۳	۰/۷۲	*۵
بسیار شدیداً مسئله‌- دار	فوق‌العاده شدید	رمبندگی شدید	٪۲۰	۰/۲۷	۰/۷۸	*۶
بسیار شدیداً مسئله‌- دار	فوق‌العاده شدید	رمبندگی شدید	٪۲۰	۰/۳۸	۰/۹۲	*۷
شدیدا مسئله‌دار	بسیار شدید	رمبندگی شدید	٪۱۸	۰/۳۲	۰/۸۱	۸
شدیدا مسئله‌دار	بسیار شدید	رمبندگی شدید	٪۱۸	۰/۳۳	۰/۷۸	۹
شدیدا مسئله‌دار	بسیار شدید	رمبندگی شدید	۱۶/۸٪	۰/۵۶	۰/۹۶	۱۰

\*منظور نمونه‌هایی است که در مرحله‌ی اول و در محل اصلی رخداد شکاف‌ها گرفته شده است.



شکل ۴-۲۰: نتیجه آزمایش تحکیم برای نمونه شماره ۳ در محل شکافها در دشت سمنان

#### ۴-۳-۲ نتایج تعیین دانسیته خشک خاک

برای تعیین دانسیته خشک به عنوان یکی از شاخص‌های رمبندگی، از نمونه‌های به کار گرفته شده در آزمایش تحکیم مضاعف استفاده شد. با مشخص کردن درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها، دانسیته خشک این خاک‌ها محاسبه شد و رمبندگی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۴-۸) نتایج دانسیته خشک خاک‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مطابق با این معیار نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۷ و ۱۰ در رده رمبندگی متوسط قرار گرفته و نمونه‌های ۱، ۲، ۶، ۸ و ۹ در رده رمبندگی ضعیف قرار گرفته‌اند. ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک بر اساس دانسیته خشک خاک، مقادیر کمتری را نسبت به نتایج آزمایش تحکیم مضاعف نشان می‌دهد. از آنجایی که دانسیته خشک خاک الزاماً تنها متأثر از فضای خالی و حفرات موجود در خاک نیست و پارامتری نظیر کانی شناسی اجزای تشکیل دهنده خاک نیز می‌تواند در میزان دانسیته خشک اثر گذار باشد، این پارامتر دقت کمتری نسبت به نتایج آزمون تحکیم مضاعف دارد.



جدول ۴-۸: نتایج دانسیته خشک خاک

شماره نمونه	دانسیته خشک (g/cm <sup>3</sup> )	توصیف رمبندگی	شماره نمونه	دانسیته خشک (g/cm <sup>3</sup> )	توصیف رمبندگی
۱	۱۴/۰۵	ضعیف	۶	۱۴/۶۴	ضعیف
۲	۱۴/۰۴	ضعیف	۷	۱۳/۱۲	متوسط
۳	۱۳/۶۱	متوسط	۸	۱۴/۳۸	ضعیف
۴	۱۲/۸۶	متوسط	۹	۱۵/۰۹	ضعیف
۵	۱۳/۹۸	متوسط	۱۰	۱۳/۱۷	متوسط

## ۴-۳-۴ آزمایش تعیین واگرایی خاک‌های لسی

### ۴-۳-۴-۱ آزمایش کرامپ

همانطور که در فصل ۳ نیز گفته شد در این آزمایش کلوخه کوچکی از خاک به قطر ۶ الی ۹ میلی‌متر داخل ظرفی محتوای ۱۵۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر قرار داده می‌شوند. بعد از مدت زمانی در حدود ۵ الی ۱۵ دقیقه در صورت واگرا بودن خاک، جدائی ذرات رس از کلوخه خاک باعث تولید یک محلول کلوئیدی در اطراف نمونه خاک می‌شود (شکل ۴-۲۱). بر اساس شدت کلوئیدی بودن محلول حاصل، می‌توان میزان واگرایی خاک را ارزیابی کرد. نتایج این آزمایش در جدول (۴-۹) آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده نمونه‌های ۱۳، ۱۴، ۱۶ و ۱۷ در محدوده‌ی شکاف‌های ایجاد شده در دشت دارای شدت واگرایی متوسط تا شدید بوده و درصد رس در این نمونه‌ها نیز بالا و بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است. در نمونه‌های ۴ و ۷ واقع در بخش غربی دشت سمنان شدت واکنش واگرایی با توجه به درصد رس موجود در این خاک‌ها ضعیف تا متوسط بوده است. همچنین در نمونه‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ که در محدوده جنوبی دشت سمنان برداشت شده، میزان واکنش واگرایی در آنها ضعیف بوده، و می‌توان گفت خاصیت واگرایی ضعیفی دارند.



شکل ۴-۲۱: آزمایش کرامپ بر روی نمونه‌های خاک ریزدانه

جدول ۴-۹: نتایج حاصل از آزمایش کرامپ

شماره نمونه	شدت واکنش (واگرایی)	شماره نمونه	شدت واکنش (واگرایی)
۴	واکنش ضعیف تا متوسط	۱۲	واکنش متوسط
۷	واکنش ضعیف تا متوسط	۱۳	واکنش متوسط
۹	واکنش ضعیف	۱۴	واکنش متوسط
۱۰	واکنش ضعیف	۱۶	واکنش متوسط
۱۱	واکنش ضعیف	۱۷	واکنش شدید

#### ۲-۴-۳-۴ نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف

همانطور که در فصل قبل نیز گفته شد به منظور ارزیابی قابلیت واگرایی در نمونه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه اقدام به آزمایش هیدرومتری به دو صورت همراه با ماده پراکنده‌ساز و بدون ماده پراکنده‌ساز انجام گردید. نتایج این آزمایش در جدول (۴-۱۰) و شکل (۴-۲۲) آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و همچنین بر اساس دو معیار دگر و شرارد در نمونه‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ که در محل اصلی رخداد شکافها برداشت شد، دارای شدت واگرایی متوسط بوده، و در نمونه شماره ۱۷ میزان واگرایی کمی شدید بوده است. همچنین در نمونه‌های ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ در قسمت مرکزی تا بخش جنوبی دشت برداشت شده، شدت واگرایی ضعیف بوده، و در نمونه‌های ۴ و ۵ شدت واگرایی متوسط می‌باشد. شکل (۴-۲۳) نمودار آزمایش هیدرومتری و تغییرات منحنی را در دو مرحله آزمایش بدون ماده پراکنده-ساز و آزمایش با ماده پراکنده‌ساز را برای نمونه شماره ۱۰ نشان می‌دهد.



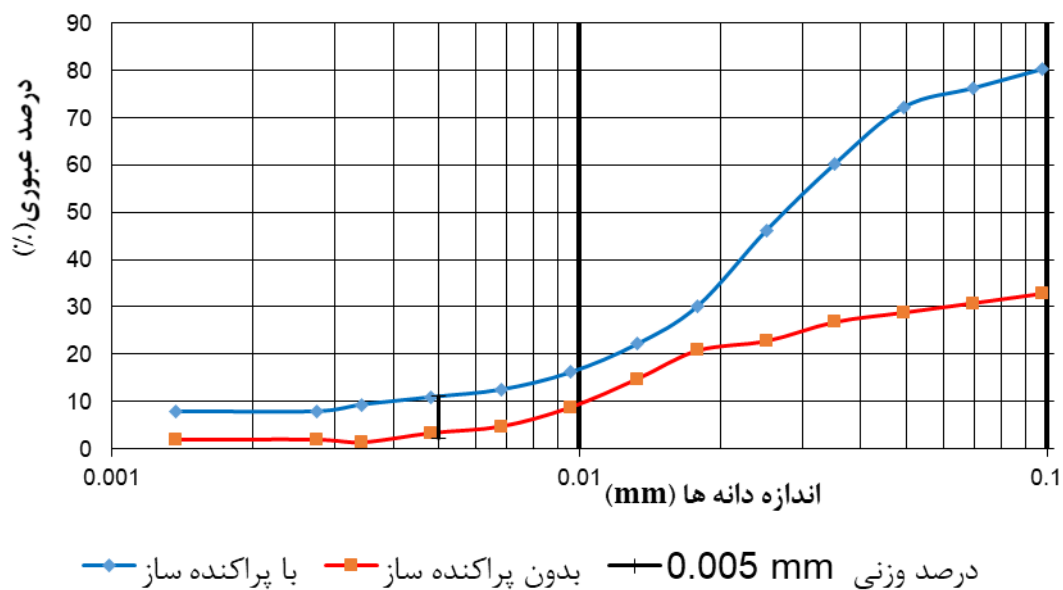
شکل ۴-۲۲: آزمایش هیدرومتری مضاعف برای تعیین واگرایی خاک

جدول ۱۰-۴: نتایج حاصل از آزمایش هیدرومتری مضاعف

درصد واگرایی (A/B)	درصد وزنی ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلی متر		نمونه خاک
	آزمایش با پراکنده ساز (B)	آزمایش بدون پراکنده ساز (A)	
۳۱	۱۱/۳۳	۳/۵۵	۴
۳۵	۹/۸۱	۳/۵۰	۵
۱۰	۱۹/۳۴	۲/۰۸	۷
۶	۱۵/۳۴	۱/۰۰	۸
۱۹	۱۰/۶۶	۲/۱۰	۹
۲۰	۱۱/۲۲	۲/۳۰	۱۰
۳۲	۱۰/۷۷	۳/۵۳	۱۲
۲۶	۱۳/۲۳	۳/۵۵	۱۴
۲۶	۱۲/۹۵	۱/۳۵	۱۶
۲۶	۱۳/۲۳	۳/۵۳	۱۷

آزمایشگاه آبخش‌شناسی و زیست محیطی

نمودار آزمایش هیدرومتری مضاعف برای نمونه شماره ۱۰



شکل ۴-۲۳: نمودار آزمایش هیدرومتری مضاعف برای نمونه شماره ۱۰

### ۳-۴-۳-۴ نتایج آزمایش پین هول

آزمایش پین هول را معتبرترین آزمایش برای تعیین واگرایی خاک می‌دانند. با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش، نمونه شماره ۱۶ که در محدوده رخداد شکاف‌ها از منطقه مورد مطالعه برداشت شده واگرا بوده و در نمونه‌های ۵، ۷، ۱۴، ۱۲ و ۱۷ کمی تا اندازه‌ای واگرا، در نمونه‌های ۸، ۹ و ۱۱ غیرواگرا می‌باشند. شکل (۴-۲۴) آزمایش پین هول و جدول (۴-۱۱) نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۴: مراحل انجام آزمایش پین هول بر روی نمونه ۱۶. ۱- تراشیدن نمونه دست نخورده برای قرار دادن داخل استوانه پین هول، ۲- ایجاد سوراخ توسط سوزن، ۳- اضافه کردن قطعات درشت‌دانه، ۴- قرار دادن نمونه آماده شده بر روی دستگاه و نصب لوله انتقال آب به نمونه، ۵- انجام آزمایش و بررسی آب خروجی از نمونه

از آنجایی که این آزمایش معتبرترین آزمایش برای تعیین واگرایی خاک است و از بین بقیه آزمایش‌های تعیین کننده واگرایی خاک، آزمایش قابل اعتمادتری است، در نتیجه می‌توان گفت که خاک در منطقه مورد مطالعه به ویژه در محدوده رخداد شکاف‌ها در رده واگرا تا کمی واگرا قرار می‌گیرد. بین مقدار سیلت خاک و فرسایش‌پذیری آن ارتباط نزدیکی وجود دارد. هرچه مقدار سیلت خاک بیشتر باشد فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد، زیرا سیلت چسبندگی ندارد. و البته باید در نظر داشت که خاک‌های سیلتی خوب دانه‌بندی می‌شود ولی در اثر مرطوب شدن، به سهولت شکسته و ذرات سیلت جدا می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۸). بنابراین با توجه به پتانسیل واگرایی رس موجود در این خاک‌ها و همچنین درصد بالای ذرات سیلتی، می‌توان نتیجه گرفت که این خاک‌ها از فرسایش‌پذیری بالایی برخوردار هستند.

جدول ۴-۱۱: نتایج آزمایش پین‌هول انجام شده بر روی نمونه‌های ریزدانه

شماره نمونه	رده خاک	شدت واگرایی
۵	ND4	کمی تا اندازه‌ای واگرا
۷	ND3	کمی تا اندازه‌ای واگرا
۸	ND2	غیر واگرا
۹	ND1	غیر واگرا
۱۱	ND1	غیر واگرا
۱۲	ND4	کمی تا اندازه‌ای واگرا
۱۴	ND3	کمی تا اندازه‌ای واگرا
۱۶	D1	واگرا
۱۷	ND3	کمی تا اندازه‌ای واگرا

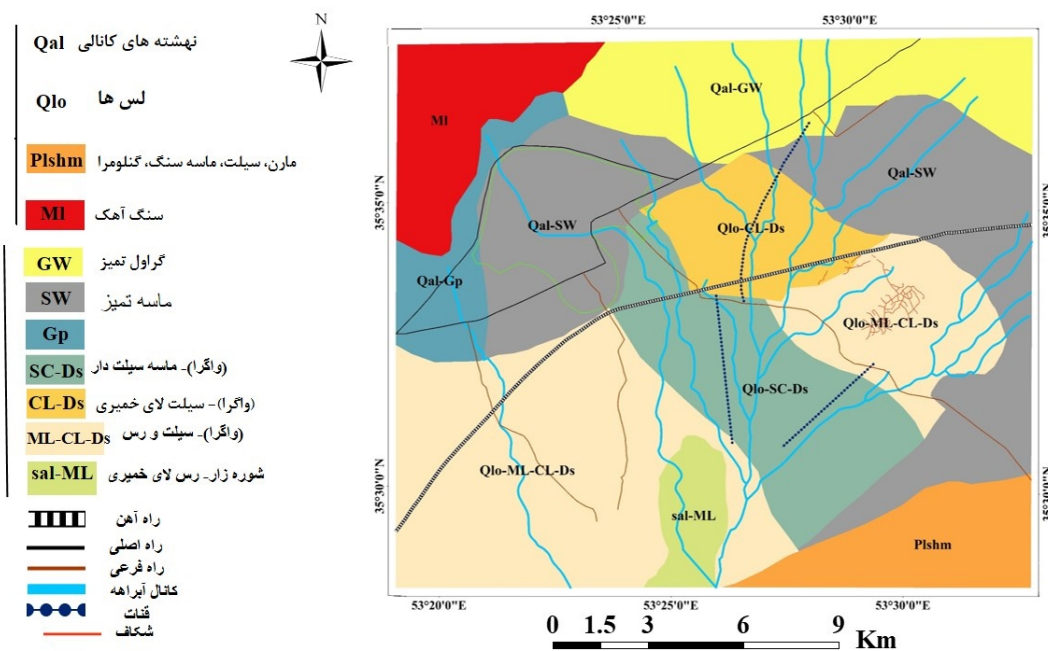
نتایج آزمایش‌های کرامپ و هیدرومتری دوگانه که اساساً بر پایه واگرایی شیمیایی (واگرایی ناشی از حضور سدیم خاک می‌باشد این خاک‌ها را بیشتر در محدوده واگرایی ضعیف تا متوسط و در یک مورد در محدوده واگرایی شدید نشان می‌دهد. آزمایش پین هول که نتایج آن هم بر پایه واگرایی شیمیایی و هم واگرایی مکانیکی است بعضی از نمونه‌های اندازه‌گیری شده را کمی تا اندازه‌های واگرا و واگرا نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۴-۱۲) با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۴-۱۲: نتایج آزمایش‌های تعیین واگرایی لس‌ها

ارزبایی کلی	توصیف واگرایی			شماره نمونه
	پین هول	هیدرومتری	معیار کرامپ	
کمی تا اندازه‌های واگرا	-	واگرایی متوسط	واگرایی ضعیف تا متوسط	۴
کمی تا اندازه‌های واگرا	کمی تا اندازه‌های واگرا	واگرایی متوسط	-	۵
کمی تا اندازه‌های واگرا	کمی تا اندازه‌های واگرا	واگرایی ضعیف	واگرایی ضعیف تا متوسط	۷
غیرواگرا	غیرواگرا	غیرواگرا	-	۸
غیرواگرا	غیرواگرا	واگرایی ضعیف	واگرایی ضعیف	۹
غیرواگرا	-	واگرایی ضعیف	واگرایی ضعیف	۱۰
غیرواگرا	غیرواگرا	واگرایی ضعیف	-	۱۱
واگرایی متوسط	کمی تا اندازه‌های واگرا	واگرایی متوسط	واگرایی متوسط	۱۲
کمی تا اندازه‌های واگرا	-	واگرایی متوسط	واگرایی متوسط	۱۳
کمی تا اندازه‌های واگرا	کمی تا اندازه‌های واگرا	واگرایی متوسط	واگرایی متوسط	۱۴
واگرایی شدید	واگرا	واگرایی متوسط	واگرایی متوسط	۱۶
واگرایی متوسط تا شدید	کمی تا اندازه‌های واگرا	واگرایی متوسط	واگرایی شدید	۱۷

### ۴-۳-۵ نقشه زمین‌شناسی مهندسی

بر اساس نتایج حاصل مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی نقشه زمین‌شناسی مهندسی بخش جنوب و شرق سمنان تهیه گردید (شکل ۴-۲۵). همانطور که در این نقشه دیده می‌شود بخش مرکزی و جنوب دشت عمدتاً از خاک‌های مسئله‌دار تشکیل شده و انتظار می‌رود بیشترین مخاطرات طبیعی و محیطی در ارتباط با این بخش باشد.



شکل ۴-۲۵: نقشه زمین‌شناسی مهندسی دشت سمنان

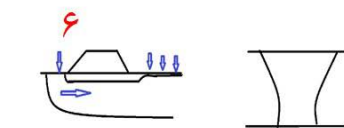
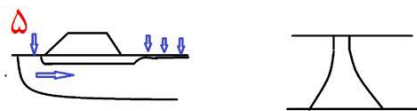
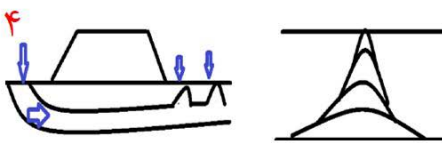
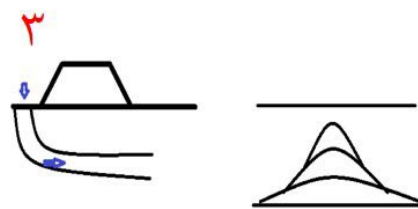
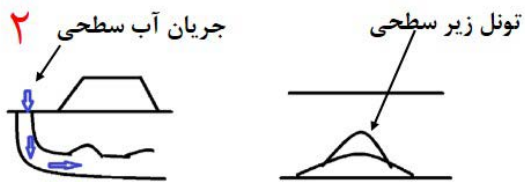
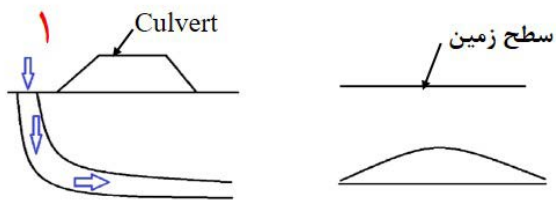
### ۴-۴ ارزیابی مکانیسم خطر و ریسک رخداد شکاف

همانطور که قبلاً ذکر گردید قرار گرفتن محل شکاف‌ها در محدوده‌ای با پتانسیل فرونشست بالا در منطقه نشان می‌دهد که این منطقه عملاً تحت فشار بوده و مکانیسم ایجاد شکاف ناشی از فرونشست غیریکنواخت که مکانیسم کششی است، برای این شکاف‌ها همخوانی نداشته، و می‌بایستی عامل یا عوامل دیگری باعث به وجود آمدن آن‌ها شده باشد. لازم به ذکر است در بررسی‌های صحرایی نیز



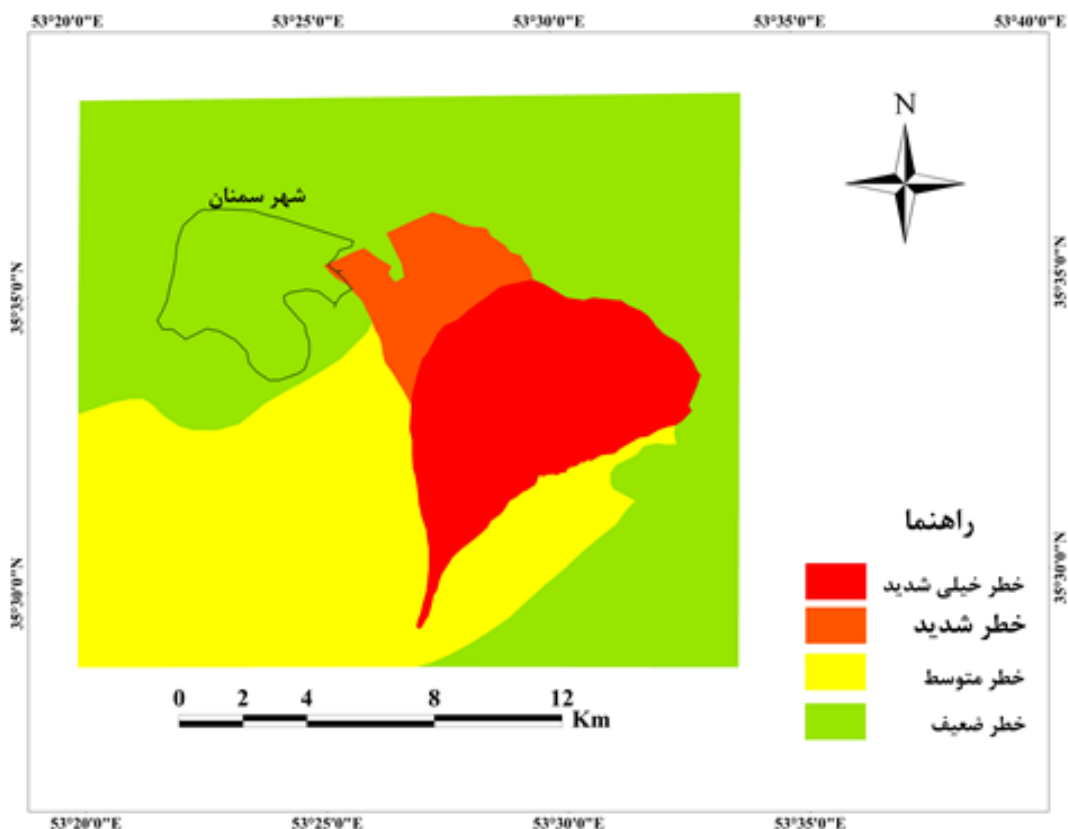
شواهدی از کششی بودن شکافها بدست نیامد. بررسی مهندسی خاک نشان می‌دهد که خاک‌های محل شکافها دارای پتانسیل رمبندگی شدید و بسیار شدید بوده و ارزیابی واگرایی خاک نیز حکایت از پتانسیل واگرایی عمدتاً متوسط تا بالای این خاکها دارد. این دو خاصیت مسئله‌دار باعث ایجاد پتانسیل بالای فرسایش می‌گردد. در نتیجه می‌توان مکانیسم فرسایشی تونلی را به عنوان متحمل‌ترین مکانیسم رخداد شکاف در بخش شرق و جنوب شرق سمنان معرفی کرد. با این وجود برای رخداد فرسایش تونلی عملاً بایستی جریان متمرکز آب نیز وجود داشته باشد. ممکن است این سوال پیش بیاید که اگر عامل تشکیل رخداد شکاف، مسئله‌دار بودن خاک‌های این منطقه است، پس چرا هم اکنون این شکافها رخ داده در صورتی که این خاصیت‌های واگرایی و رمبندگی از زمان‌های قبل نیز همراه با این خاکها بوده است؟. بنابراین احتمال دخالت فعالیت‌های انسانی و برهم زدن تعادل موجود نیز منطقی به نظر می‌رسد. با این وجود در ایجاد این شکافها دخالت انسان به صورت برداشت بیش از حد آب زیرزمینی و فرونشست زمین نبوده بلکه تغییر وضعیت زهکشی سطحی رواناب‌های منطقه می‌باشد. پس از احداث راه‌آهن تهران\_مشهد و جاده آسفالته مجاور آن در این منطقه، مسیرهای طبیعی زهکشی سطحی قطع شده و آب تنها از طریق کالورت‌های محدودی که از زیر این خطوط ارتباطی عبور می‌کند، می‌تواند به پایین دست انتقال یابد. محدود بودن مسیرهای عبور آب باعث تمرکز جریان آب سطحی و افزایش دبی عبوری شده که این مسئله قدرت فرسایش آب را بالا می‌برد. نفوذ متمرکز آب باعث رمبش خاک زیر سطحی و تشکیل حفره شده و مسیر جریان زیر سطحی تشکیل می‌گردد. آب نفوذی که از این مجاری زیرزمینی در حال عبور است باعث شسته شدن خاک مسیر خود گردیده و این مجاری پیوسته رشد می‌کند. واگرایی باعث می‌شود که بخشی از خاک که رسی بوده به راحتی شسته شده و از مسیر خارج گردد. در برخی موارد این رس‌ها نقش اتصال دهنده قطعات سیلتی و ماسه‌ای را نیز داشته و با خروج از خاک اتصال این دانه‌ها نیز از بین رفته و فرسایش‌پذیری آن زیادتر می‌شود. وجود تونل‌ها در مسیر شکافها و همچنین ترک‌های گلی در کف این تونل‌ها تایید کننده این مکانیسم و مجرای آب بودن آنها می‌باشد. با رشد این تونل‌ها به دلیل اینکه عملاً سقف این مجاری به خاطر فشاری که از

طریق روباره به آن وارد می‌شود تحت کشش بوده و مقاومت کششی خاک نیز خیلی پایین است، مجاری زیر سطحی رشد به سمت بالا داشته و ریزش پیوسته سقف تونل‌ها باعث شده تا این مجاری به سمت سطح زمین شروع به پیشروی نمایند. با رشد تونل به سمت سطح زمین و در هر ریزش ابعاد تونل بالایی کوچکتر می‌گردد. این مسئله باعث می‌شود تا شکاف‌های سطحی در ابتدا به صورت کم عرض و اصطلاحاً مویی ظاهر گردد. با گسترش این شکاف‌ها عرض شکاف زیاد شده و نهایتاً به صورت شکاف‌های باز ظاهر می‌گردد (شکل ۴-۲۶). بنابراین دو عامل مسئله دار بودن خاک منطقه (رمبند و واگرا بودن) و ایجاد جریان متمرکز به دلیل احداث راه‌آهن و جاده آسفالت‌ه عوامل اصلی هستند که در ایجاد و گسترش این شکاف‌ها نقش دارند. در واقع در اثر نفوذ آب و ایجاد مجرا یک شبکه زهکشی زیرزمینی تشکیل شده که توسط خروجی‌هایی به شبکه زهکشی سطحی متصل است. این شبکه زهکشی زیر سطحی به علت ناپایدار بودن به دلیل مقاومت پایین خاک روباره خود را به سطح رسانده و شبکه شکاف‌های سطحی را تشکیل می‌دهد. همچنین الگوی دندریتی برای این شکاف‌ها می‌تواند تایید کننده این مطلب باشد. مکانیسم مشابه نیز برای شکاف‌های محدوده ورامین در مجاورت بزرگراه حرم تا حرم توسط نیک بختی و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش شده است. متناسب با این عوامل نقشه رخداد شکاف در دشت تهپیه گردید (شکل ۴-۲۷). همانطور که در این نقشه دیده می‌شود محدوده خاک لسی واقع در مجاورت راه‌آهن پتانسیل بالای رخداد شکاف داشته که این محدوده به سمت جنوب دارای انحراف به سمت غرب است. بررسی دو رودخانه خشک موجود در دشت نیز عملاً همین روند را داشته و انتظار می‌رود در نهایت این شکاف‌ها رشد کرده و تشکیل یک رودخانه خشک دیگر را بدهد. محدوده خاک لسی در قسمت شمالی و محدوده خاک لسی در پایین رودخانه خشک به دلیل اینکه عامل دوم یعنی جریان متمرکز آن‌ها را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد در رده پتانسیل متوسط قرار داشته و محدوده رسوبات درشت دانه بخش شمالی و شرقی نیز که هیچ کدام از عوامل به طور موثر وجود ندارد، در رده پتانسیل ضعیف قرار می‌گیرد.



شکل ۵: مکانیسم تشکیل شکاف در دشت سمنان

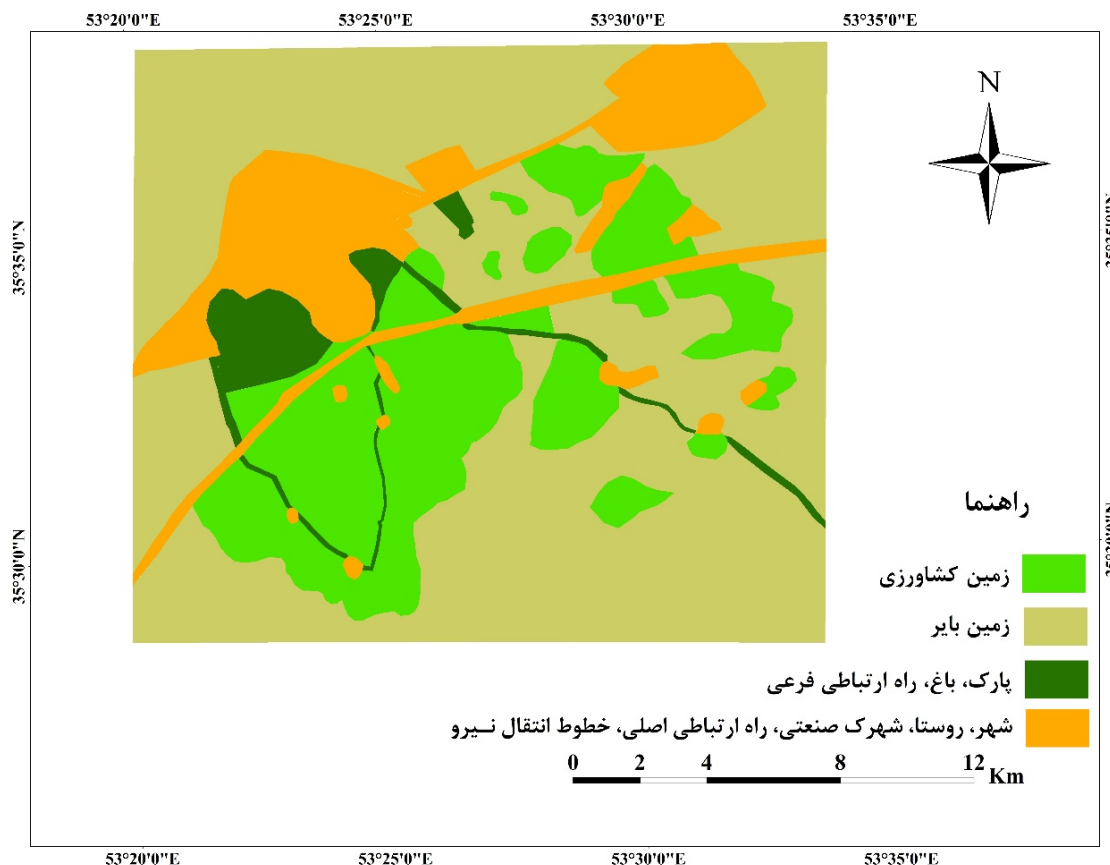
- ۱- ایجاد ترک‌های مویی، ۲- گسترش و پیشروی ترک‌ها به صورت الگوی دندریتی، ۳- نفوذ و رمبش خاک زیر سطحی، ۴- تشکیل حفره و تونل زیر سطحی، ۵- پیشروی تونل‌ها به سطح زمین و ایجاد شکاف‌های طولی، ۶- رشد و گسترش شکاف‌ها و در نهایت ایجاد رودخانه خشک



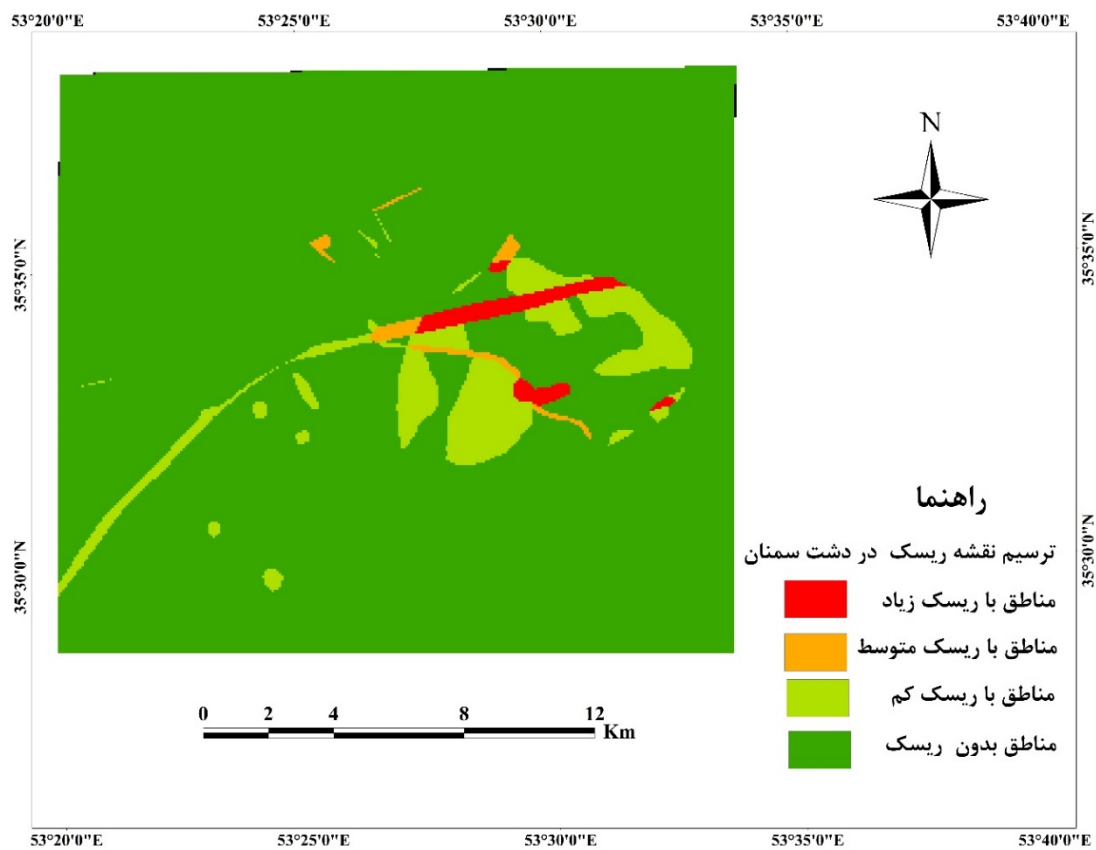
شکل ۴-۲۷: نقشه خطر رخداد شکاف در دشت سمنان

با توجه به اهمیت نقشه‌های خطر و ریسک رخداد مخاطرات طبیعی در توسعه پایدار و برنامه‌ریزی‌های محیطی، علاوه بر نقشه خطر رخداد شکاف در دشت سمنان، نقشه ریسک ایجاد شکاف برای این دشت نیز ترسیم شد. برای تهیه نقشه ریسک از نقشه خطر رخداد شکاف و نقشه کاربری اراضی به عنوان نقشه ورودی استفاده شده است. نقشه‌ی کاربری اراضی منطقه که به نوعی نشان دهنده موقعیت اجزای ریسک‌پذیر (مانند خط راه‌آهن سراسری تهران-مشهد، فرودگاه، خطوط انتقال گاز، جاده آسفالت، شهر، روستا و ...) می‌باشد تهیه شد (شکل ۴-۲۸). در ادامه دو نقشه خطر رخداد شکاف و نقشه کاربری اراضی بر اساس روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) امتیاز دهی و به ۴ رده تقسیم بندی و به هر لایه امتیاز داده شد. برای لایه با خطر خیلی زیاد امتیاز ۰/۵۸، لایه با خطر نسبتاً زیاد امتیاز ۰/۲۶، برای لایه با خطر متوسط امتیاز ۰/۱، و برای لایه با خطر ضعیف امتیاز ۰/۰۴ در نظر گرفته شد. سپس برای تهیه نقشه ریسک این دو نقشه در محیط GIS با استفاده از ابزار Raster calculator در هم ضرب

شده و نقشه ریسک برای این دشت ترسیم شد، و نقشه ریسک بدست آمده به ۴ رده تقسیم گردید (شکل ۴-۲۹). برای تعیین مرز رده‌ها بر اساس قضاوت مهندسی و ارزیابی محافظه کارانه، بدین صورت عمل شد که ابتدا بیشینه و کمینه امتیازهای ریسک بدست آمده از هم کم شده تا محدوده تغییرات امتیاز ریسک تعیین گردد. سپس نسبت به محدوده تغییرات، مرزهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد به عنوان مرز رده‌های نشان داده شده در شکل (۴-۲۹) در نظر گرفته شد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود بیشترین ریسک در پهنه راه‌آهن - خط انتقال گاز، بخش پایینی فرودگاه، روستای اعلا و محدوده نظامی واقع در بخش جنوب شرقی روستای اعلا بدست آمد. این نقشه علاوه بر نشان دادن نقشه راه برای توسعه پایدار آینده، می‌بایستی برای پایش ریسک رخداد نیز در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۲۸: نقشه کاربری اراضی در دشت سمنان



شکل ۴-۲۹: نقشه ریسک در دشت سمنان

# فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث ارائه شده در این پژوهش، می‌توان نتایج به دست آمده از این تحقیق را در غالب موارد زیر دسته‌بندی کرد:

۱- بررسی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در فاصله‌ی بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۶ در پیزومترهای دشت سمنان، میانگین افت سطح آب زیرزمینی ۱۸/۸۹ متر بوده و در بازه‌ای بین ۰/۷۶ تا ۳۳/۸۷ متغیر است. بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی در بخش شرقی و شمال شرقی دشت رخ داده و کمترین مقدار در بخش جنوبی دشت روی داده است.

۲- روند تغییرات ضخامت رسوبات نشان می‌دهد که هر چه از شمال به سمت جنوب دشت حرکت می‌کنیم ضخامت لایه‌های ریزدانه مستعد فرونشست افزایش می‌یابد. بیشترین میزان ضخامت رسوبات ریزدانه دشت در بخش مرکزی تا جنوب غربی دشت با روندی مشابه با روند غالب دشت مشاهده گردید. ۳- محدوده جنوب شرقی شهرستان سمنان و محدوده بین روستای اعلا، شهرک افانگه، جنوب شهرک صنعتی و جاده پیغمبران و شرق پیزومتر ایستگاه پژوهش، محدوده دارای پتانسیل فرونشست قابل توجهی می‌باشد.

۴- محل قرارگیری شکاف‌های رخ داد در دشت بر روی نقشه پهنه بندی خطر فرونشست و همچنین الگوی انتشار سطحی این شکاف‌ها نشان می‌دهد که فرونشست زمین عامل رخداد این شکاف‌ها نبوده و عامل یا عوامل دیگری نقش اصلی را در این زمینه بازی می‌کنند.

۵- بررسی خصوصیات مهندسی خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان داد که خاک‌های ریز دانه و مسئله‌دار همگی دارای پتانسیل رمبندگی بالایی داشته و بخش‌های که رس قابل توجهی دارند دارای خاصیت واگرایی نیز می‌باشند. این عوامل باعث ایجاد پتانسیل فرسایش‌پذیر بالا در این خاکها شده است.

۶- نقشه پهنه بندی رخداد شکاف نشان داد که محدوده دارای پتانسیل رخداد شکاف از قسمت شمال به بخش بالایی راه‌آهن تا حوالی فرودگاه، از بخش شرقی به قاعده مخروط افکنه شرق سمنان، از بخش جنوبی و غربی به دو رودخانه خشک آبگرم و جزین ختم می‌شود.



۸- نقشه ریسک رخداد شکاف نشان داده که یک باند بین راه آهن تا خط لوله گاز با طول تقریبی شش کیلومتر، بخش جنوبی فرودگاه، روستای اعلا و محدوده نظامی واقع در جنوب غربی آن دارای ریسک بالای رخداد شکاف هستند.

## ۵-۲ پیشنهادها

- ۱- به منظور صحت سنجی داده‌های ژئوفیزیکی و انجام مطالعات تکمیلی ژئوتکنیکی، در محدود فرونشست بالا و رخداد شکاف، منطبق بر محل یکی از سونداژها، یک گمانه به صورت حفاری دورانی همراه با نمونه‌گیری، حفاری گردد.
- ۲- با استفاده از روش‌های راداری عمق شکاف‌ها ارزیابی گردد. همچنین مناطق با ریسک بالا بدست آمده با استفاده از این تکنیک مورد پایش قرار گیرد.

## مراجع

- آقائباتی، آ.، حمیدی، آ.، (۱۹۹۴) نقشه زمین شناسی سمنان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور.
- بانی خیز، م.، اصغری، ا.، (۱۳۸۴) رمبندگی خاک‌های شرق سمنان در مسیر راه آهن، چهارمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۳۷-۱۴۶.
- باقری، ط.، عظیمی، م.، بوداقیور، س.، (۱۳۹۲) شناسایی خاک‌های رمبنده در استان سمنان ارزیابی پتانسیل رمبندگی آنها، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان. بهرامی، ک.، (۱۳۹۰) بررسی خصوصیات زمین شناسی مهندسی نهشته‌های لسی شمال کلاله در استان گلستان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- جورابلو، س.، (۱۳۹۵) بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه سمنان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۵۱.
- خدائیان، س.، نیکخواه شه‌میرزادی، م.، دوست محمدی، ع.، (۱۳۹۰) بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و ژئوتکنیک خاک‌های شهر سمنان به منظور احداث ساختمان‌های بلند مرتبه، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- حافظی مقدس، ن.، (۱۳۹۰) زمین شناسی مهندسی، چاپ اول، انتشارات آرسس، مشهد، ص ۴۸۸.
- دم شناس، م.، (۱۳۸۸) بررسی نشست زمین در دشت نیشابور در اثر افت سطح آبهای زیرزمینی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه فردوسی مشهد.
- درویش زاده، ع.، (۱۳۸۵) زمین شناسی ایران: تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم، انتشارات سپهر، تهران، ص ۴۳۴.
- رفاهی، حسینقلی.، (۱۳۸۸) فرسایش آبی و کنترل آن، چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران.
- روحانی، م.، (۱۳۷۵) بررسی تجربی فیلتر مانع فرسایش هسته رس واگرادر سد خاکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی دانشگاه تهران.
- رنجبر، م.، جعفری، ن.، (۱۳۸۸) بررسی عوامل موثر در فرونشست زمین در دشت اشتهارد، نشریه علمی پژوهشی انجمن جغرافیایی ایران، سال ششم، شماره ۱۸-۱۹، ص ۱۵۵-۱۶۶.
- رهنما، ح.، میراثی، س.، (۱۳۹۵) تحلیل و ارزیابی پارامترهای موثر بر فرونشست زمین، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، جلد ۱۶، شماره ۱، ص ۴۵-۵۴.
- شرکت مهندسی مشاور پنگان آوران. (۱۳۸۸) مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی سمنان، فصل دوم هیدرولوژی، ص ۱۲۵.

شمشکی، ا.، بلورچی، م. ج.، انصاری، ف.، (۱۳۸۴) بررسی فرونشست زمین در دشت تهران-شهریار، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور .

شیر افکن، م.، جعفری، ف.ه.، (۱۳۹۲) ارزیابی بیلان هیدرولوژیکی آبخوان بهاباد در استان یزد، هشتمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۵۵-۴۷.

شجاع، ف.، (۱۳۸۹) مدیریت شهری یکپارچه در بهسازی و نو سازی بافت فرسوده و جایگاه هریک از آنها (مطالعه موردی شهرستان سمنان)، پایان نامه ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان.

صالحی، ط.، حیدری، م.، خانلری، غ.، (۱۳۸۹) نقش خاک‌های لسی در ایجاد فروچاله‌ها و شکاف‌ها در اطراف و مسیر سدهای خاکی آلاگل و گلستان، پنجمین همایش ملی زمین شناسی و محیط زیست. داس، ب.، (۱۳۸۶) اصول مهندسی ژئوتکنیک (ترجمه طاحونی)، جلد اول، ویرایش دوم، موسسه انتشارات پارس آیین.

عسکری، ف.ا.، و فاخر، ع.، (۱۳۷۲) تورم و واگرایی خاک‌ها از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۴۵.

عباس نژاد، ب.، (۱۳۹۶) نشست زمین در دشت منوجان (جنوب استان کرمان): عوامل، اثرات و پهنه بندی، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۳.

عسکری، ف.، فاخر، ع.، (۱۳۷۷) تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندسی ژئوتکنیک، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.

کریمی، ث.، محمدی، ض.، سامانی، ن.، (۱۳۹۶) بررسی خصوصیات هیدروشمیایی آب زیرزمینی و روند تکامل شوری آن در دشت سمنان، هیدروژئولوژی، سال دوم، شماره ۱.

لشکری پور، غ.، غفوری، م.، رستمی بارانی، ح.ر.، (۱۳۸۷) بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر، مجله مطالعات زمین شناسی، جلد ۱، شماره ۱، ص ۱-۱۹.

موسوی مداح، س.م.، غفوری، م.، لشکری پور غ.، افشاری. س.، (۱۳۹۲) بررسی پدیده نشست زمین و تاثیر آن بر روی گسیختگی لوله‌های جدار چاه‌های آب در محدوده شهر مشهد با استفاده از پهنه‌بندی تغییرات دانه بندی لایه‌های زمین، فصل نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره سیزدهم، ص ۵۶-۶۶.

محمدعلیزاده رفیع ب.، (۱۳۸۷)، اصلاح خاک‌های رمبنده به روش تزریق (مطالعه موردی راه آهن سمنان-تهران) پایان نامه ارشد.

مهندسین مشاور سازند آب پارس، ۱۳۸۸. گزارش مطالعات ژئوالکتریکی دشت سمنان.

Abelev, Y.M., (1984) "The essentials of designing building on microporous soil. Stroitel'naya Promyshelnost", NO. 10

Asadi-langroudi, A., Ngambi, S., Smalley, L., (2018) "Loess as a collapsible: some basic particle packing aspect". Quaternary International, 469 (A, 5): 20-29

Ali, M. M., (20011), "Identifying and analyzing problematic soils". Geotech Geo I Eng, 29: 343-350.

- Al-Rawas, A.A., (2000) "State-of-the-Art Review of collapsible soil". Science and Technology, Special Review: DOI: 10.24200/squjs.vol5iss0pp115-135,
- Amighpey, M., Arabi, S., (2016) "Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurement". Remote Sensing Applications: Society and Environment, 4: 1-8.
- Barden, L., Mc Gown, A., Collins, K., (1969) "The collapse mechanism in partly saturated soil". Engineering Geology, 7: 49-60.
- Bell. F. G., (2002) "Engineering Properties of soil and Rocks", (3<sup>rd</sup> End). Oxford, U. K. Butter Wortt-Heinemann.
- Berg, I. s., (1964) "Loess as product of weathering and soil formation", Israel Progr. Sci, Transl., Jerusalem, 207 pp.
- Booth, A. R., (1975) "The factors influencing Collapse settlement in compacted", Soil, Proc, Sixth Regional Conference for Africa on soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa, pp: 57-63.
- Chen, C.H., Wang, C.H., Hsu, Y.J., Yu, S.B., Kuo, L.C., (2010) "Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan". Taiwan Engineering Geology 115: 122-131.
- Chen, X.X., Luo, Z.J., Zhou, S.L., (2014) "Influences of soil hydrolic and mechanical parametrs on land subsidence and ground fissures caused by groundwater exploitation". Journal of Hydrodynamics, 26(1): 155-164.
- Cleveanger, W.A., (1959) "Experiences with Loess as a foundation material". Transadation American Society for Civil Engineer, 123: 51- 80.
- Davoodijam, M., Motagh, M., Momeni, M., (2015) "Land subsidence in mahyar plain, Central Iran, Investigated Using Envisat SAR Data", In: Kutterer H., Seitz F., Alkhatib H., Schmidt M. (Eds) The 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). International Association of Geodesy Symposia, vol 140. Springer, Cham
- Derbyshire, E., and Mellor's, T. W., 1988, "Geological and Geotechnical characteristics of some Engineering loess and loessic soils from china and Britain a comparison". Engineering Geology, 25: 135-175.
- Dudley, J., (1975) "Review of collapsing soils". Journals of soil Mechanics and Foundation Divisions. ASCE, 96(3): 925-947.
- Feda, J., (1998) "Collapse of loess upon wetting" Engineering Geology, 25pp: 263-269.
- Gamboliation, G., Gatto, P., Freeze, A., (1974) "Predictive simulation of the subsidence of Venice", Science, 183: 849-851.
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., (2011) Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeology Journal, 19(8): 1459-1486.
- Gazifard. A., Moslehi. A., Safeei. H., Roostaei. M., (2016) "Effects of groundwater withdrawal on land subsidence in Kashan plain", Iran. Bull Eng Geol Environ, 75: 1157-1168.
- Haddadan, M. Afsharianzadeh, A.M. Chaichi, Z. (1994) Printed by: Tehran Naghsheh.
- Haddad, A., Khodaian, S., (2002) "Collapse Potential of Semnan Soils" Proceedings 3rd Iranian International Conference on Geotechnical Engineering & Soil Mechanics, Tehran, Iran.
- Gibbs, H.J, Bara J.P, (1962) "Predicting surface subsidence from basic soil test". Denver, Colo. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Division of Engineering Laboratories.
- Grabowska-Olzewska, B., (1988), "Engineering Geological problems of loess in Poland". Engineering Geology, 25: 77-79.

- Hoque, M.M., Ahmed, K.M., (2007) "Declining groundwater level and aquifer dewatering in Dhakh metropolition area Bangladesh causes quantification". *Hydrogeology jornal*, 15: 1523-1534.
- Houzer, T.L., (1988) "man- induce land subsidence", *Review in engineering geology*, Geological Society of America, 232 p.
- Hu, R.L., Wang, S.J., Lee, C.F., & Li, M.L., (2004) "Characteristics and trends of land Subsidence in Tanggu, Tianjin, China". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61:213-225.
- Jennings, J. E., Knight, K., (1975) "A guide construction with materials exhibiting additional settelement due to collapse of grain structure", 6th Regional conferens for Africa On soil Mechanics and Foundation Engineeringpp, pp 99-105 Durban, South Africa.
- Phacheco-Martinez, J., Hernandez, M., Burbey, T.J., Gonzalez-Cervantes, N., Angelortiz-Lozano, J., (2013) "Land subsidence and ground failure associated to ground water exploitation in the Agua scalientes valley, Mexico. *Engineering Geology*, 14: 172-186.
- Jianbing, P., Jishan, X., Feiyong, W., (2016) "Characteristic and mechanism of the longyao fissure on north Chins Plaim, China". *Engineering Geology*, 214: 126-1146.
- Khanlari, G.R., Heidari, M., Momeni, A., Ahmadi, M., Taleb-Beydokhti, A.R., (2012)"The effect of grandwater overexploitation on land subsidence and sinkhole occurences, western Iran". *Quarterly jornal of Engineering Geology and hydrogeobgy*, 45: 447-456.
- Knudsen, T., Inkenbrandt, P., Lund, W., Lowe, M., Bowman, S., (2014)"Investigation of land subsidence and earth fissures in Cedar valley, Iron County", special study 150 Utah geological survey.
- Larson, K.J., Bas, Agaoglu, H., Marino, M.A., (2001) "Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model". *Journal of Hydrology*, 242: 79–102.
- Luo zu, J., Zhoushi, L., (2013) "Influences of soil hydraulic and mechanical parameters on land subsidence and ground fissures caused by groundwater exploitation". *School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University*, 26 (1):155-164
- Lutenegeer, A. j., (1988) "Stability of loess", *Engineering Geology*, 25: 247-261.
- Mahmoudpour, M., Khamhchiyan, M., Nikudel, M.R., Ghassemi, M.R, (2016) "Numerical simulation and predication of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran". *Engineering Geology*, 201: 6-28.
- Modoni, G., Darini, R.L., Spacagna, M., Saroli, G. (2013) "Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal". *Engineering Geology*, 167: 59-71
- Nikbakhti, O., Hashemi, M., Banikheir, M., Khabbazi Basmenji, A., (2017) "Geo environmental assessment of the formation and expansion of earth fissures as geological hazards along the route of the Haram-to-Haram Highway, Iran". *Bull Eng Geol Environ*, DOI 10.1007/s 10064-017-1019-2.
- Nikos, S., Loannis, P., Constantinos, L., Paraskevas, T., Anastasia, K., Charalambos, K., (2016) "Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece". *Engineering Geology* 209: 175-186.
- Phien, W., Nutalya, H., (2006) "Land subsidence in Bankok, Thailand". *Engineering Geology*, 82: 187-201.

- Rahnema, H., Mirassi, S., (2014) "Crisis Management Concerning Underground Water Falling and Land Subsidence Occurrence in the Plains of Iran". *Advances in Environmental Biology*, 8(5): 1453-1465.
- Rogels, C.D.F., Digkastara, T.A., Smalley, I.G., (1994) "Hydroconsolidation and subsidence of loes: studies from China, Russia, North America and Europe". *Engineering Geology*, 37: 83-113.
- Schuman, H.H., Poland, J.F., (1969) "Land subsidence, earth fissures, and groundwater withdrawal in South Central Arizona".
- Sohby, M.A. El., (1987), "Influence of soil constituents on collapsible soils. 9th Regional conference on soil Mechanics and Foundation Engineering/Lagos".
- Waltham, A.C., (1989). "Ground subsidence. Blackie & Son Limited".
- Wang, G.Y., You, G., Shi, B., Yu, J., Tuck, M., (2009) "Long-Term. Land subsidence and starata compression in Changzhou China", *Engineering Geology*, 104: 109-118.
- Hung, W.C., Hwang, C., Liu, J.C., Lin, Y.S., Yang, H.L., (2012), "Modeling aquifer – system compaction and predicting landsubsidence in central Tiwan", *Engineering Geology*, 147, 78-90.



# Abstract

Land subsidence and earth fissuring are natural important hazards which is involved with most of plains in Iran and leads to damages of urban area, roads, bridges, power transmission lines, agriculture lands, wells and piezometers. In this study in the one hand the occurrences pattern of regional subsidence phenomenon in the Semnan plain and also the zoning of this region in terms of the susceptibility of land subsidence have been discussed and in the other hand, mechanism of earth fissuring and its hazard and in the south and south-east of the plain was evaluated. For this reason at the first step data of 18 piezometers for 24 years period (May 1993-2017) were used to provide iso-potential lines of drawdown groundwater table and unite hydrograph of the plain. Furthermore, for the determination of type and thickness of the subsurface layers some data including piezoelectric log, geoelectric sounding and geological map were used. Then, using the drawdown groundwater level map and the subsurface layers conditions map, a subsidence susceptibility map of the Semnan plain was prepared. For evaluation of earth fissuring several geological and geotechnical approaches were used, including comprehensive field investigations, soil disturbed and undisturbed sampling, and laboratory assessments (particle size distribution, Atterberg limits, double hydrometer, pinhole, Cramp, double consolidation tests and etc). Finally, hazard and risk zonation maps of the study area were prepared based on the obtained results. The results showed that during the period of 1993-2018 continuous extraction of groundwater caused a drop of 18.9 meters of groundwater level and provided conditions for consolidation of clayey layers and land subsidence. The subsidence hazard zonation map indicates that the area with a high potential of subsidence in this plain is located in the northeastern part of the plain and in the south-southwest of the Semnan industrial park. Furthermore, results showed that a combination of the presence of problematic (collapsible and dispersive) soils and various human actives such as construction of road and railway contributed to fissure formation and expansion in the study area. In fact, gully erosion due to these two parameters was distinguished as the main mechanism of earth fissuring. This study results indicated that earth fissuring is an ongoing problem in the study area that endangers the safety of railway, down part of Semnan airport and Alla village.

**Keywords:** Land subsidence, Earth fissuring, Geoelectric sounding, Collapsible soil, Gully erosion





**Shahrood University of  
Technology**

Faculty of Earth Sciences

M.Sc. Thesis in.

# **Assessing hazard and risk of land subsidence and fissure occurrences in the Semanan plain**

**By:  
Hossein Akbari Aryami**

**Supervisor:  
Dr. Aliakbar Momeni**

**Advisor:  
Elham Khorasani**