



فرونشست زمین و کاهش آن

جوزیه گامبولاتی و پیترواتیانی

مترجمین: ناصر رفیقی اسکویی و مسعود سعیدی



THE
GROUNDWATER
PROJECT

فرونشست زمین و کاهش آن

The Groundwater Project

جوزیه گامبولاتی

Professor Emeritus
School of Engineering
University of Padova
Padua, Veneto, Italy

پیترو تیاتینی

Associate Professor
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering
University of Padova
Padua, Veneto, Italy

مترجمین: ناصر رفیقی اسکونی- مسعود سعیدی
مشاور فنی: مصطفی ملایی پاکباده

فرونشست زمین و کاهش آن‌ها

The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada

تمامی حقوق محفوظ است. این کتاب بوسیله‌ی قانون حق نشر (کپی رایت) محافظت شده است. هیچ بخشی از این کتاب را نمی‌توان به هر شکل و یا به هر وسیله‌ای بدون اجازه‌ی کتبی از نویسندگان بازنشر کرد. برای درخواست مجوز با "permissions@gw project.org" مکاتبه نمایید. توزیع و بازنشر تجاری اکیداً ممنوع است.

آثار منتشر شده‌ی پروژه‌ی آب زیرزمینی را می‌توان به صورت رایگان از تارنمای "gw-project.org" به دست آورد. هر کسی می‌تواند از پیوند "gw-project.org" برای گرفتن کتابهای "GW-Project" استفاده کرده و آنها را به اشتراک بگذارد. در دسترس قرار دادن آثار منتشر شده در تارنماهای دیگر و یا ارسال بخشهایی از اسناد به طور مستقیم برای دیگران مجاز نیست. لطفاً این منبع دانش رایگان را که برای شما و همه‌ی کسانی که علاقه‌مند به آموزش آب‌های زیرزمینی هستند، گرامی بدارید.

کپی رایت © 2022، جوزیه گامبولاتی و پیتر تیاتینی

منتشر شده توسط پروژه‌ی آب زیرزمینی، گولف، اونتاریو، کانادا، 2022.

گامبولاتی، ج و تیاتینی، پ.

فرونشست زمین و کاهش آن‌ها / جوزیه گامبولاتی و پیتر تیاتینی - گولف، اونتاریو، کانادا، 2022

126 صفحه

ISBN: 978-1-77470-110-2

لطفاً به ثبت نام در فهرست دریافت‌کننده‌های پست الکترونیک پروژه‌ی "GW" توجه نمایید تا از انتشار کتاب‌های جدید، رویدادها و راه‌های مشارکت در این پروژه آگاه شوید. هنگامی که در لیست دریافت‌کننده‌های پست الکترونیک ما ثبت نام می‌کنید، به ما کمک می‌کنید تا یک جامعه‌ی جهانی برای آب‌های زیرزمینی بسازیم. از این پیوند ثبت نام کنید "Sign up".

شناسه‌ی اصلی: جان چری

هیئت مدیره: جان چری، پل هسیه، اینکه کالویج، استفن موران، اورتون دی اولیویرا و آیلین پونتر

کمیته راهبری: آلن فریز، پل هسیه، اینکه کالویج، داگلاس مککی، استفن موران، اورتون دی اولیویرا،

بت پارکر، آیلین پونتر، بینگ فن، وارن وود و یان ژنگ.

مترجمین: ناصر رفیقی اسکویی و مسعود سعیدی، 2024

مشاور فنی: مصطفی ملایی پاکیا

پوشش روی جلد: تصاویر نشان‌دهنده‌ی پیامدهای فرونشست و گسیختگی زمین به دلیل پمپاژ آب‌های

زیرزمینی است.

بالا: کنار دریا، ناحیه‌ی پلوییت در جاکارتا اندونزی است. چند مکان در زیر تراز سطح آب دریا واقع

شده که با یک دیوار بتنی محافظت شده است و هر چند سال یکبار برای مقابله با فرونشست زمین، ارتفاع

دیوار بتنی، پیرامون ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد (به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه، عکس از

پیتر تیاتینی، ۲۰ سپتامبر 2019)

پایین: یک شکاف بزرگ زمین در "سیفون درا" در آریزونا که به دلیل تغییر شکل آبخوان در ارتباط

با پمپاژ آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است (عکس از پیتر تیاتینی، 6 نوامبر 2019)

تقدیم:

نویسنده اول این اثر را به چهار نوه خود گایا، کلو، گیوا و ایریس تقدیم می کند. نویسنده دوم این اثر را به همسرش سابرینا و پسرانش آلبرتو و میکلہ تقدیم کرده است.

فهرست مطالب

8.....	پیش‌گفتار پروژه‌ی آب‌های زیرزمینی
9.....	سرآغاز
10.....	دییاجه
11.....	سپاسگزاری
12.....	مقدمه‌ی چاپ نخست
14.....	1- مقدمه
14.....	1-1- مفاهیم و اصول کلی
20.....	2-1- چهارچوب تاریخی
24.....	3-1- رخدادها
29.....	4-1- پیامدهای مهم زیست محیطی
31.....	2- نظریه‌ی تحکیم یک بعدی خاک و واکنش آبخوان به پمپاژ
31.....	1-1- تنش مؤثر بین دانه‌ای و پارامترهای خاک
35.....	2-2- پمپاژ از سطح ایستایی یک آبخوان
36.....	3-2- پمپاژ از یک آبخوان محصور منفرد
37.....	4-2- پمپاژ از یک سامانه‌ی آبخوان چندگانه
38.....	5-2- تراکم تأخیری در آبخوان کم‌تراوا (طبقات محصور شده)
42.....	6-2- عامل زمان و نیمرخ تراکم
و	اندازه‌گیری
و	پایش
فرونشست	و
44.....	تراکم
45.....	3-1- تراز یابی
45.....	3-2- سامانه‌های جهانی تصویربرداری رادار "GNSS"
46.....	3-3- تداخل سنجی "InSAR"
51.....	3-4- کشش سنج گمانه‌ها
53.....	3-5- فیبر نوری
56.....	4- کاهش فرونشست زمین به وسیله‌ی تزریق آب
56.....	5- فرآیندهای ژئومکانیکی در ارتباط با فرونشست‌های زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی
62.....	5-1- گسستگی‌های زمین
67.....	5-2- لرزه خیزی القایی
72.....	6- نمونه‌ای از محاسبات فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی
78.....	7- نتیجه‌گیری
80.....	8- تمرین‌ها
80.....	تمرین 1
80.....	تمرین 2
81.....	تمرین 3
82.....	9- کتاب‌نامه
96.....	10- جعبه‌ها

96.....	10-1-جعبه‌ی 1- توجیه اصل ترزاقی
97.....	10-2-جعبه‌ی 2- تجسم رابطه‌ی بین تنش مؤثر و نسبت پوکی
100.....	10-3-جعبه‌ی 3- معادله‌های سه بعدی پوروالاستیک (متخلخل کشسانی)
107.....	11- حل تمرین‌ها
107.....	حل تمرین 1
108.....	حل تمرین 2
109.....	حل تمرین 3
111.....	12-درباره‌ی نویسندگان

پیش‌گفتار پروژه‌ی آب‌های زیرزمینی

شعار سازمان ملل برای روز جهانی آب در 22 مارس 2022، "آب‌های زیرزمینی ناپیدا را، دیدنی کنیم" است. این رویکرد با وجود پروژه‌ی آب‌های زمینی "GW-Project" که هدف آن افزایش آگاهی در مورد آب‌های زیرزمینی و ارتقای تخصص جهانی آن است که با انتشار کتابها و پشتیبانی درباره‌ی "همه چیز آب زیرزمینی است"، صورت می‌پذیرد.

پروژه‌ی "GW"، یک سازمان مردم‌نهاد غیر انتفاعی است که در سال 2019 در کانادا ثبت شده و متعهد به انتشار و توسعه‌ی رویکردهای جدید علوم و دانش‌هایی برای شناخت و حل مسائل مربوط به آب‌های زیرزمینی است. پروژه‌ی "GW" با تارنمای "<https://gw-project.org>" در سراسر جهان برای در دسترس قرار دادن دانش‌ها و علوم گوناگون با این شعار، به ارائه‌ی خدمات خود ادامه خواهد داد:

« دانش بایستی رایگان باشد و بهترین دانش‌ها، دانش رایگان است. "ناشناس" »

مأموریت پروژه‌ی "GW" در دسترس قرار دادن مطالب آموزشی و ارائه‌ی خدمات بر خط رایگان برای همه‌ی کسانی است که می‌خواهند درباره‌ی آب‌های زیرزمینی و چگونگی ارتباط آن‌ها با توسعه‌ی پایدار، سامانه‌های بوم‌شناختی و زیست‌محیطی آگاهی داشته باشند. این رویه، گونه‌ی جدیدی از تلاش‌های آموزشی بر پایه‌ی حضور داوطلبان حرفه‌ای با رشته‌های متفاوت دانشگاهی، مشاورین و بازنشستگان می‌باشد. پروژه‌ی "GW" با همراهی بیش از 200 سازمان از 14 کشور و در 6 قاره‌ی جهان گسترش یافته و مشارکت‌کنندگان آن روزانه افزایش می‌یابند.

پروژه‌ی "GW" در آگوست 2020 با انتشار کتاب فعالیت خود را شروع کرد و تلاش‌های خود را برای انتشار کتاب‌های بر خط در این سال‌ها ادامه داده است. اولین کتاب‌ها به زبان انگلیسی بوده و گرفتن آن‌ها از اینترنت رایگان می‌باشد. این پروژه همچنین از سخنرانی‌ها، عملیات‌های آزمایشگاهی، انتشار فیلم، ابزارهای آموزشی و تهیه و تولید نرم افزارها، پشتیبانی می‌کند.

پروژه‌ی "GW" کاملاً فعال بوده و بنابراین ویرایش و انتشار این کتاب‌ها را انجام خواهد داد و از بهره‌برداران درخواست می‌شود با این نهاد همکاری نمایند.

در خاتمه از همه‌ی بخش‌های پروژه‌ی "GW" سپاسگزاری نموده و امیدواریم از تجربیات شما در استفاده از این کتابها و سایر تولیدات دیگر این مجموعه آگاه شویم و از همه‌ی فکرها و پیشگامان استقبال می‌کنیم.

بخش راهبردی پروژه‌ی "GW"

جولای 2021

سراغاز

منابع آب‌های شیرین زیرزمینی منافع بسیاری برای سامانه‌های بوم شناختی و انسانی به همراه دارند، اما پمپاژ آب از آبخوان‌ها مشکل آفرین است. یکی از این پیامدها، فرونشست سطح زمین در مناطق شهری ناشی از تراکم پایین رس‌ها با تراوایی کم و یا لایه‌های سیلتی زمین است که در بالا و پایین آبخوان قرار گرفته‌اند که در این کتاب به بررسی آنها می‌پردازیم. تراکم به دلیل کاهش تخلخل رس‌ها و لایه‌های سیلتی صورت می‌گیرد و فشار آب منفذی کاهش می‌یابد. تولید آب از آبخوانی که از لایه‌هایی با تراوایی کم تشکیل شده، باعث ایجاد مشکلاتی در تراکم و در نهایت منجر به فرونشست سطح زمین می‌گردد.

انسان‌هایی که در زمین‌های دارای قابلیت فرونشینی زندگی می‌کنند، این پدیده را احساس نمی‌کنند و تنها در زمان رخداد زمین‌لرزه‌ها، تغییر موقعیت سطح زمین، آشکار می‌شود. فرونشست قابل توجه، در یک دوره‌ی زمانی چند ساله و یا چند ده ساله رخ می‌دهد اما در ابتدا مهندسين شهری پیامدهای این پدیده را شناسایی می‌کنند زیرا مشکلاتی در شرایط تخلیه‌ی آب‌ها به دلیل تغییر شیب خیابان‌ها، آبروها و خطوط فاضلاب رخ می‌دهد و آب باران به خوبی تخلیه نمی‌شود. مناطقی با فرونشست قابل توجه به دلیل پمپاژ زیاد در آبخوان‌ها ایجاد می‌شود، زیرا بیشتر لایه‌های دارای تراوایی کم به اندازه‌ی کافی متخلخل نیستند تا بتوانند کاهش‌های قابل توجه تخلخل را تحمل نمایند. با توجه به سکونت و زندگی جمعیت زیاد در این مناطق، مشکل فرونشست تشدید می‌یابد. به دلیل سامانه‌های زمین شناختی آبخوان و تراکم زمین‌ها، فرونشست‌ها بیشتر در امتداد سواحل و بویژه در محل تخلیه‌ی رودخانه‌ها به دریاها و اقیانوس‌ها، صورت می‌گیرند.

این مناطق جغرافیایی دارای نهشته‌های ضخیم لایه‌ی سست و بویژه در رسوبات متخلخل عهد حاضر دارای تراکم کمی هستند که با گذشت دوران‌های زمین شناسی، متراکم می‌شوند، ولی گاهی اوقات فعالیت‌های انسانی باعث افزایش تراکم آن‌ها می‌گردد. گسترش کلان شهرهایی مانند اسکندریه، بانگوک، داکا، شهر هوشی مینه، هیوستون، جاکارتا، لاگوس، نیواورلئان، روتردام و شانگهای، در موقعیت‌های زمین‌شناسی ویژه‌ای شکل گرفته‌اند. فرونشست زمین‌ها یکی از مشکلات جهانی است که کوچک شمرده شده و در آینده به دلیل افزایش تراز سطح آب دریاها در اثر تغییرات آب و هوایی، تشدید خواهد یافت.

نویسندگان این کتاب، جوزپه گامبولاتی¹ و پیترو تیاتینی² استاتید ممتاز، این کتاب را براساس اطلاعات شهر بی نظیر ونیز³ و براساس مشکلات فرونشست در دیگر شهرهای جهان، تدوین کرده‌اند. اگر چه فرونشست‌ها بیشتر به دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است ولی این مطالعات از بخش‌های مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک بهره‌مند شده است که نگارندگان تجارب جهانی و موفق خود را در این زمینه ارائه داده‌اند.

جان چری⁴، رهبر گروه پروژه‌ی آب زیرزمینی

گولپ، اونتاریو – کانادا

جون 2021

¹ Guseppe Gambolati

³ Venice

² Pietro Teatini

⁴ John Cherry

دیباچه

فرونشست فرآیند کاهش ارتفاع زمین است که یک پدیده مهم ژئومکانیکی به شمار می‌رود و تهدیدی برای زندگی و توسعه پایدار میلیون‌ها نفر در سراسر جهان، بویژه در مناطق شهری و ساحلی است. شدیدترین موارد فرونشست زمین در ارتباط با برداشت اضافی از آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد. شوربختانه پیش‌بینی می‌شود که استفاده ناپایدار از زمین‌ها و منابع آبی در دهه‌های آینده و بویژه در کشورهای توسعه یافته آسیا و آفریقا افزایش یابد. پیامد تغییرات آب و هوایی یعنی افزایش تراز سطح آب دریاها، تغییرات در زمان و توزیع بارش‌ها، رواناب‌ها و تغذیه آبخوان‌ها در ترکیب با افزایش و تمرکز جمعیت در کلان شهرها، به ویژه در امتداد مناطق ساحلی در جهان همساز خواهد بود. توسعه پایدار به منابع آب شیرین نیازمند است و تمرکز بیشتر در مناطقی با احتمال خطرزایی زیاد منجر به افزایش پیامدهای فرونشست زمین در مناطق پر جمعیت می‌شود.

بیش از یک قرن از شروع پژوهش‌ها در ارتباط با فرونشست‌های زمین به دلیل فعالیت‌ها و مداخلات انسانی می‌گذرد و پیشرفت‌های چشمگیری در این زمینه‌ها به دست آمده است:

A. شناخت اصول ژئومکانیکی و آب شناختی

B. اندازه‌گیری تراکم آبخوان‌ها و جابجایی‌های زمین‌ها در هر دو جهت افقی و عمودی

C. الگوسازی تاریخی و شبیه‌سازی رخدادهای پیش‌بینی شده در آینده

D. کاهش پیامدهای زیست محیطی در هنگام تغذیه آبخوان‌ها و یا تزریق آب‌های سطحی

این کتاب به فرونشست‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌پردازد و واکنش‌های ژئومکانیکی پمپاژ آب‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار می‌دهد. یک بررسی تاریخی با تشریح مناطق مهمی که فرونشست‌های بزرگی را تجربه کرده‌اند، را معرفی می‌نماید که تأثیرات زیست‌محیطی مهمی بر جای گذاشته‌اند. عوامل اصلی کنترل‌کننده فرآیند، مبانی بنیادین و معادله‌ها با توجه به تنش‌های خاک‌ها و ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پمپاژ از سطح ایستابی سامانه‌های آبخوان‌های محصور و پیچیده، تشریح شده است. تراکم سازندهایی با تراوایی پایین، آبخوان‌های کم‌تراوا¹ به همراه عامل زمان و نیمرخ‌های تراکمی، واکاوی شده است. تجهیزات پیشرفته برای ثبت و پایش درجا و لحظه‌ای تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های سطحی ارائه شده است. رخداد مخالف نشست زمین یعنی برخاستگی (بالا آمدگی) سطح زمین که به علت تغذیه آبخوان‌ها و یا ناشی از تزریق به بخش‌های زیرسطحی بوده، مورد بررسی قرار گرفته است. تعدادی از فرآیندهایی که ذکر گردیدند تاکنون به خوبی شناخته نشده‌اند که مهمترین آن‌ها شامل: تغییرات تأثیر تراکم عمودی، جابجایی‌های افقی و ناپیوستگی‌ها در سنگ‌های بستر در نزدیکی گسستگی‌های زمین، ایجاد درز و شکاف و فعال‌سازی گسل‌های ناشی از لرزه‌خیزی‌های القایی، می‌باشند. سرانجام، بررسی‌ها بیشتر بر روی ارتباط بین ژئومکانیک آب‌های زیرزمینی و چالش‌های جدید در ارتباط با بهسازی و بازسازی آن‌ها انجام شده و بر روی کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی آن‌ها متمرکز شده است.

¹ Aquitards

سیاسگزاری

در ابتدا نویسندگان از همکاری آلن فریز¹ برای معرفی موارد مرتبط با الگوسازی آب‌های زیرزمینی و با اشاره‌ی ویژه به فرونشست زمین در اثر پمپاژ آب‌های زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی در ونیز ایتالیا، قدردانی می‌نمایند.

سیاس ویژه از همکاری و مشارکت افراد زیر در تهیه‌ی و بازبینی این کتاب :

ویلیام وئسنر²، دانشگاه مونتانا، امریکا

هرب وانگ³، دانشگاه ویسکانسین، امریکا

توموتوکوناگا⁴، دانشگاه توکیو، ژاپن

نویسندگان و ویراستاران سیاسگزار نظارت آماندا سیلز⁵ و الهانا دیک⁶ بابت ویرایش نسخه‌های پروژه‌ی آب‌های زیرزمینی (گولپ اونتاریو-کانادا) و آیلین پوتر⁷ (دانشکده‌ی معدن کلرادو - امریکا) برای بازبینی و ویرایش و تولید این کتاب هستند.

¹ Allan Freeze

² William Woessner

³ Herb Wang

⁴ Tomo Tokunaga

⁵ Amanda Sills

⁶ Elhana Dyck

⁷ Eileen Poeter

مقدمه‌ی چاپ نخست

پدیده‌ی فرونشست زمین شامل فروریزش و یا فرونشست‌های تدریجی زمین به سمت پایین است که می‌تواند بردار جابجایی افقی اندکی داشته باشد. دلیل اصلی رخداد چنین پدیده‌ای برداشت بیش از ظرفیت آب‌های زیرزمینی، نفت و گاز، معدن کاری، کاهش گونه‌های زیستی و بویژه فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی می‌باشد. خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها پر هزینه و در برخی مواقع جبران‌ناپذیر هستند و تخریب سامانه‌های آبیاری، از بین رفتن خاک، تخریب جاده‌ها و زیر ساخت‌ها، ایجاد اختلال در خطوط آبرسانی و فاضلاب، گاز و نفت، اجتناب‌ناپذیر است.

شوربختانه فرونشست‌ها و پیامدهای ناگوار آن‌ها، سرشتی برگشت‌ناپذیر داشته و به سختی می‌توان سرعت رخداد آن‌ها را کند و یا به طور کلی آن‌ها را مهار کرد. مدیریت مصرف منابع آب و کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی نقش کلیدی در جلوگیری از رخداد چنین پدیده‌ای دارد.

هم اکنون بیش از 300 دشت ایران زمین دچار این بحران هستند که در برخی از مناطق، دشت‌ها از مرحله‌ی فرونشست عبور کرده و به مرحله‌ی بحرانی فروچاله‌ها وارد شده اند که می‌توان به دشت‌های کیودرآهنگ، ورامین، دشت تهران، دشت مشهد و نیشابور و دشت‌های استان کرمان، اصفهان و قزوین اشاره نمود.

این کتاب در یازده فصل تدوین شده است که فصل اول به مبانی و تاریخچه‌ی پدیده‌ی فرونشست‌های زمین، فصل دوم به نظریه‌ی تحکیم یک بعدی و واکنش آبخوان‌ها به پمپاژ، فصل سوم به اندازه‌گیری و پایش، فصل چهارم به روش‌های جلوگیری از رخداد این پدیده با استفاده از تزریق آب، فصل‌های پنجم و ششم به فرآیندهای ژئومکانیکی در ارتباط با فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی و نمونه‌های مهم این رخدادها در جهان، فصل هفتم به نتایج به دست آمده، فصل هشتم به تمرین‌ها، فصل نهم به کتابنامه، فصل دهم به ارائه اطلاعات موردنیاز بیشتر جهت آگاهی از روابط و معادله‌های بکار رفته و در نهایت در فصل یازدهم به حل تمرین‌ها و مسائل ارائه شده در این کتاب، می‌پردازد.

شایان ذکر است ترجمه‌ی فارسی و انتشار این کتاب به تأیید نویسندگان و ناشر رسمی کتاب رسیده و هم‌اکنون نسخه‌ی الکترونیکی آن در تارنمای "gw project.org" به صورت رایگان، قابل دسترسی می‌باشد. ترجمه‌ی متون علمی کاری وقت گیر، نیازمند دقت بالا و بسیار لذت بخش است و فضای لازم برای این کار بدون یاری همسر و فرزندانم فراهم نمی‌گردید. در اینجا لازم است مراتب سپاسگزاری خود را خالصانه، به آنها تقدیم نمایم.

همچنین تشکر ویژه‌ی خود را به آقای دکتر مصطفی ملایی‌پایکیاده بابت مشاوره‌ی علمی و مطالعه‌ی پیش‌نویس اولیه‌ی کتاب، خانم دکتر زهرا اشرفی فینی و آقای مهندس کمیل پایین‌شهری بابت ویرایش علمی، خانم مهندس بهاره حسن‌زاده بابت ویرایش ادبی و خانم‌ها فاطمه اسماعیل‌زاده و اعظم محمدزاده بابت تایپ و صفحه‌آرایی این کتاب، تقدیم نمایم.

با وجود دقت در ترجمه و ویرایش علمی و ادبی کتاب و همچنین تلاش برای یکسان‌سازی واژگان تخصصی، نتیجه‌ی کار بدون لغزش و اشتباه نخواهد بود. از کلیه‌ی دوستان گرامی درخواست می‌گردد با ابلاغ نظرات سازنده‌ی خود، ما را در کاهش ایرادات در چاپ‌های بعدی، یاری نمایند.

چاپ نخست این کتاب جهت پاسداشت آغاز سی و سومین سال ارائه خدمات فنی و مهندسی در عرصه‌ی آبادانی ایران زمین و به همت و کوشش مدیریت و کارشناسان توانا و مجرب مهندسین مشاور پارس پیاب، فراهم گردیده است.

سرگشته‌چو پرگار همه عمر دویدیم آخر به همان نقطه که بودیم، رسیدیم

پاییز 1402

ناصر رفیقی اسکویی - مسعود سعیدی

1 - مقدمه

فرونشست زمین یک پدیده‌ی ناگهانی و یا تدریجی است که به دلیل تغییر در سازگان تنش ساختارهای زیرسطحی رخ می‌دهد. فرونشینی ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی و هنگامی صورت می‌گیرد که مصالح آبخوان‌ها از عدسی‌ها و یا لایه‌های ریزدانه با قابلیت تراکم‌پذیری، تشکیل شده باشد، که به دلیل کاهش فشار ارتفاع آب منفذی ناشی از تراکم نهشته‌ها صورت می‌پذیرد. این کاهش حجم به دلیل پایین افتادن تراز سطح زمین می‌باشد. تزریق آب به سامانه‌ی آبخوان‌ها، در مواردی باعث کاهش فرونشست‌هایی می‌گردد که دارای خاستگاه انسانی هستند. شایان ذکر است تراکم نهشته‌های ریزدانه معمولاً به طور کامل برگشت‌ناپذیر هستند.

فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی می‌تواند نتایج ژئومکانیکی مهمی را به همراه داشته باشد، این نتایج عبارتند از:

- پایین افتادن و کاهش ارتفاع سطح زمین، به این معنی که فرونشست زمین به دلیل اضافه برداشت از آبخوان‌ها، صورت می‌پذیرد.
 - ایجاد درز و شکاف در سطح زمین به دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی و فرونشینی حوضه، بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک.
 - فعال شدن گسل‌های کم ژرفای موجود و به دنبال آن ایجاد گسیختگی در سطح زمین.
 - بروز رخدادهای لرزه‌ای و ریز لرزه‌ای به دلیل تغییرات در سازگان تنش‌های طبیعی.
- در مقابل، تغذیه‌ی آبخوان‌ها از طریق تزریق آب می‌تواند اثراتی بر پایداری و یا برگشت‌پذیری تراز سطح آب‌های زیرزمینی و همچنین منجر به کاهش میزان فرونشست به همراه داشته باشند. برخی از مشاهدات پیرامون تغییرات محسوس سطح زمین (بالآمدگی) در این کتاب ارائه خواهد شد.

1-1- مفاهیم و اصول کلی

ساز و کار تغییر شکل و تراکم سنگ‌ها که ناشی از تغییرات فشار منفذی آب آن‌ها است به خوبی شناخته شده است. در سامانه‌ی آبخوان، کل بار زمین ایستایی¹ بر روی آبخوان و طبقات محصور اثر کرده و به وسیله‌ی فشار آب منفذی و تنش‌های مؤثر افقی و عمودی به تعادل می‌رسند (شکل 1-1). هنگامی که آبخوان پمپاژ می‌شود، فشار آب منفذی به سرعت نمی‌تواند درصد زیادی از بار لایه‌های سازنده‌های پوشاننده را تحمل نماید، بنابراین بیشتر این بارها می‌بایست به وسیله‌ی ذرات در تماس با یکدیگر (تنش مؤثر) تحمل گردد افزایش تنش مؤثر (در آبخوان‌های کم‌تراوای درگیر و طبقات محصور) منجر به تراکم می‌گردد. میزان تراکم در ابتدا به قابلیت تراکم‌پذیری لایه‌های متراکم شده بستگی دارد. تراکم جمعی لایه‌های زیرسطحی منجر به گسترش آن‌ها تا سطح زمین شده و در نهایت موجب فرونشست می‌گردد. (شکل 1-2). همچنین فشار آب منفذی تا زمانی که آب به آبخوان اضافه می‌گردد، افزایش می‌یابد. افزایش آب می‌تواند به دلیل تغذیه‌ی طبیعی و یا تزریق باشد. در برخی شرایط ممکن است تا حدی این فرونشست‌ها برگشت‌پذیر و یا کاهش‌ی باشند.

۱-

۲-

تنش

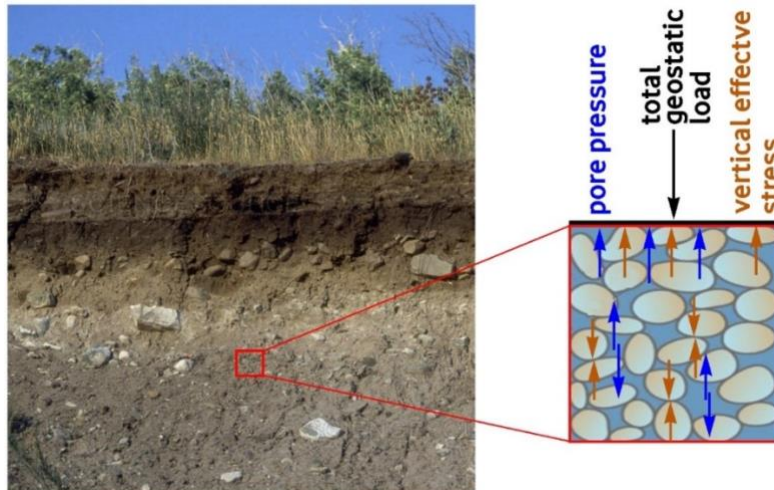
مؤثر

عمودی

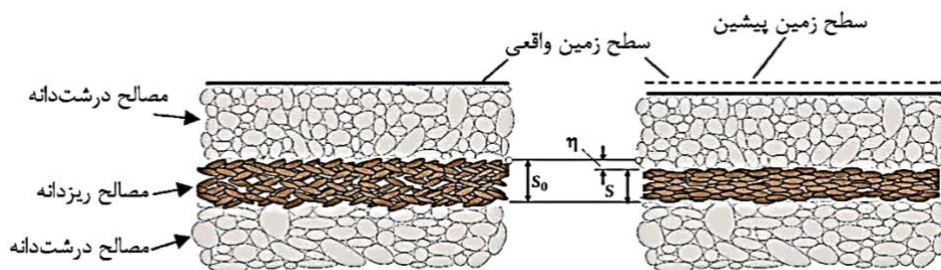
فشار

منفذی

¹ Geostatic



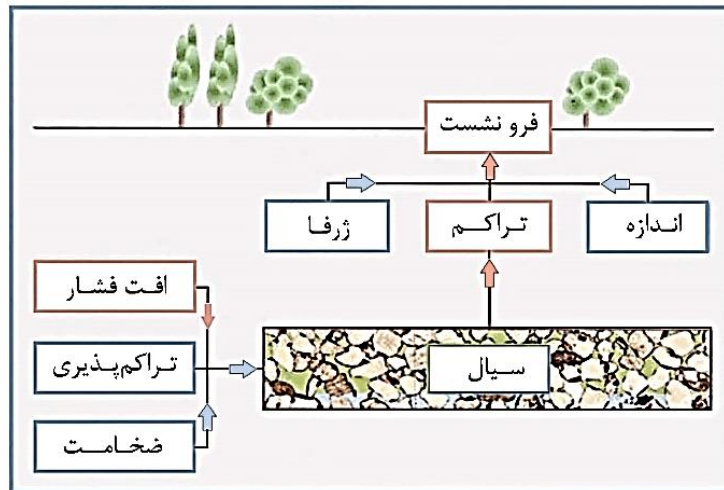
شکل 1-1: بار کل زمین ایستایی که به وسیله‌ی تنش مؤثر عمودی (پیکان قرمز) و فشار آب منفذی (پیکان آبی) پشتیبانی می‌شود.



شکل 1-2: تراکم خاک " η " با کاهش فضای متخلخل

(ذرات دانه‌ها برای تمامی اهداف مهندسی تراکم‌ناپذیر هستند).

پمپاژ کردن آب یک چاه باعث برهم‌خوردگی سامانه‌ی جریان طبیعی آب شده و تأثیرات آن در زمان و مکان در یک محیط زمین‌شناسی، انتشار می‌یابد. در هنگام پمپاژ، در اطراف چاه یک فرورفتگی مخروطی ایجاد شده و به طور جانبی و عمودی گسترش می‌یابد. (شکل 1-3) بزرگی و زمان‌بندی افت فشار ارتفاع در اثر پمپاژ، به فاصله‌ی بین چاه و نقطه‌ی مشاهده‌ای، پیکربندی هندسی، مرزبندی و سیمای زمین‌شناختی حوضه‌های زیر سطحی و ویژگی ژئومکانیکی سیال‌های سازند و بویژه چگالی، گرانشی، میزان تراوایی محیط، تخلخل و قابلیت تراکم‌پذیری آن‌ها بستگی دارد. (شکل 1-4)

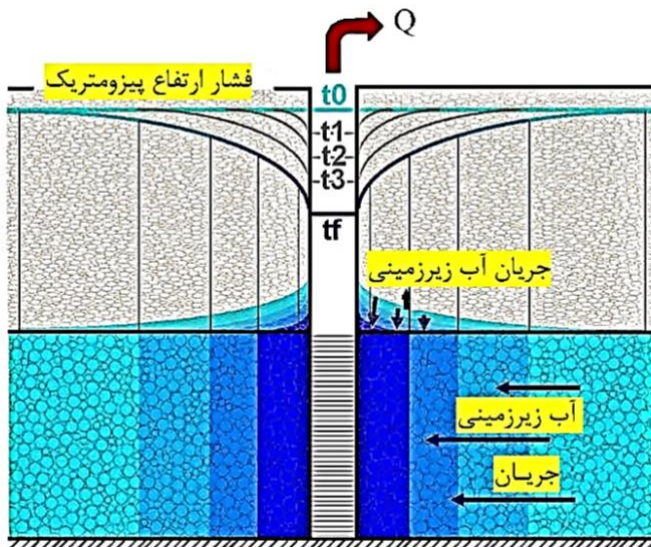


شکل 3-1: برداشت آب زیرزمینی از یک چاه

باعث کاهش فشار ارتفاع پیزومتریک در یک آبخوان پمپاژ شده می‌گردد (رنگ آبی تیره نشانه‌ی فشار ارتفاع کمتر) و به میزان کمتری در رسوبات ریزدانه‌ی نهشته‌های بالایی فشار ارتفاع پیزومتریک در گذر زمان نسبت به زمان اولیه " t_0 " و در زمان پایانی " t_f " کاهش یافته و شکل مخروط افت گسترده‌تر (پهن‌تر) می‌گردد.

شکل 4-1: عوامل اصلی کنترل کننده‌ی فرونشست زمین

ناشی از برداشت سیال زیر سطحی عبارت است از میزان کاهش فشار آب منفذی در لایه‌های پمپاژ شده و ضخامت و تراکم‌پذیری که میزان تراکم را کنترل می‌کند. سپس ژرفا و میزان مصالح تراکم‌یافته بر میزان و توزیع فرونشست سطحی تأثیر می‌گذارند. زمانی که تراکم ژرف و گسترش جانبی آن محدود باشد فرونشست سطحی کمتر از زمانی خواهد بود که تراکم‌ها سطحی و گسترده باشند.



هنگامی که یک جسم متخلخل تغییریری در جریان داخلی و تنش‌ها را تجربه می‌کند به عنوان مثال در یک فرآیند رسوب‌گذاری¹، تنش کلی افزایش می‌یابد و یا در هنگام پمپاژ یک سیال، فشار منفذی کاهش می‌یابد، تنش مؤثر افزایشی و شیب دینامیکی سیال، باعث افزایش سطح تماس می‌گردد. این ارتباط برای اولین بار توسط بایوت² در سال 1941 تعیین و باعث شد تا نظریه‌ی دوگانه‌ی تحکیم (و در نتیجه نظریه‌ی

همزمان فرونشست زمین) را ارائه دهد که جریان‌ها و تنش‌ها در ارتباط با یکدیگر بودند. در این حالت جریان سیال در تغییر شکل محیط‌های متخلخل تأثیرگذار است که منجر به تغییر در میدان سیال می‌گردد. کارشناسان آب‌های زیرزمینی بیشتر با دیدگاه‌های دینامیکی سیال سر و کار دارند و نظریه‌ی جریان یکطرفه

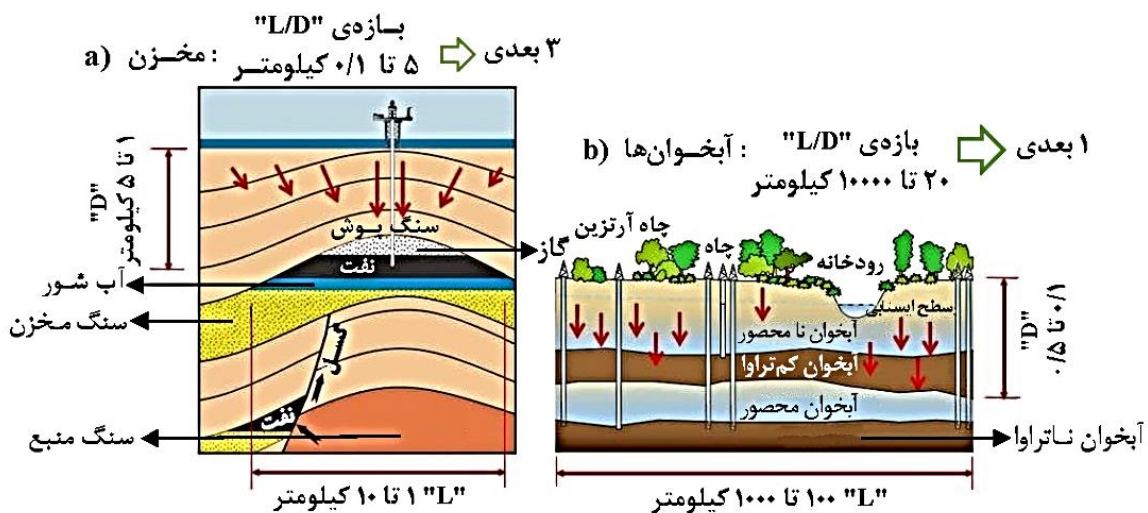
¹ Sedimentation

² Biot

را براساس معادله‌ی انتشار، ارائه نموده‌اند. در سال 1935 تیس¹ معادله‌ی جریان یکطرفه‌ی آب‌های زیرزمینی را با استفاده از تلفیق ویژگی‌های ساختاری سنگ‌ها با ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌ی آن‌ها (ضریب ذخیره‌ی کشسان "S_v" که در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد) را حل نمود. راه حل تیس در معادله‌ی انتشار به طور جداگانه و مستقل از محیط ساختاری به منظور توزیع فشار منفذی محاسبه گردید. یافته‌ی مهم او این بود که فشار منفذی به عنوان نیروی رانشی بیرونی برای پیش‌بینی تغییر شکل محیط همراه با الگوهای ژئومکانیکی، بویژه برای جابجایی‌های عمودی در سطح زمین، یعنی فرونشست زمین، استفاده می‌شود.

فرونشست زمین در هنگام پمپاژ نفت و گاز از مخازن ژرف و همچنین در هنگام استخراج آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد. در این جا به مقایسه‌ی فرونشست زمین در اثر فعالیت‌های انسانی در میدان‌های نفتی و گازی و سامانه‌ی آبخوان‌های چندگانه می‌پردازیم. توزیع دوباره‌ی تنش - کرنش در روباره‌های ضخیم لایه، مخازن را از سطح زمین جدا می‌کنند. نشست در بالای میدان‌های نفت و گاز به طور متداول کمتر از تراکم مخزن آن‌ها است اما گسترش آن‌ها در ناحیه‌ی وسیع و فراتر از میدان‌های نفتی مشاهده می‌شود. (شکل 1-5a).

از طرف دیگر سامانه‌ی آبخوان‌ها عموماً کم ژرفا بوده ولی ناحیه‌ی گسترده‌تری از میدان‌های نفتی و گازی را در بر می‌گیرند. در این سامانه‌ها تراکم رسوبات، تفاوتی با نهشته‌های بالایی و پوشاننده نداشته و در نتیجه به سادگی به سطح زمین مهاجرت می‌کنند. از این‌رو، چنین مجموعه‌ای به صورت مکانیکی رفتار می‌کنند، همانند ساختارهای یک بعدی بوده، در صورتی که جریان سیال ممکن است سه بعدی باشد (به عنوان مثال، جریان‌های عمودی در لایه‌های محصور و آبخوان‌های کم تراوا و جریان‌های افقی در آبخوان‌ها)، جابجایی زمین‌ها بیشتر در جهت عمودی و به سمت پایین رخ می‌دهد (شکل 1-5).



شکل 1-5: ویژگی‌های سطحی ناشی از پمپاژ سیال‌ها از بخش‌های زیرسطحی

(a) برداشت نفت و گاز به علت ژرفای زیاد "D" نسبت به سطح "L" که نسبت "L/D" کوچک است. میدان جابجایی (پیکان‌های قرمز) ناشی از تولید هیدروکربن سه بعدی است.

(b) پمپاژ آب‌های زیرزمینی از یک آبخوان از طریق یک چاه که معمولاً سطح آن بسیار گسترده تر از ژرفای آن است

¹ Theis

و در نتیجه نسبت "L/D" بسیار بزرگ است. میدان جابجایی عموماً یک بعدی و در جهت عمودی است.

علاوه بر ابعاد، ساز و کار تراکم میدان‌های نفت و گاز از تراکم آبخوان‌ها و آبخوان‌های کم‌تراوا متمایز می‌گردد. معمولاً محیط‌های زیر سطحی دارای توالی چینه‌ای از ماسه، رس و یا ماسه سنگ و شیل هستند. ماسه سنگ‌ها، ماسه‌های سیمانی شده هستند، در صورتیکه شیل‌ها، رس‌هایی هستند که در فرآیند مدفون‌شدگی تحت‌تأثیر تغییرات شدید کانی‌شناسی، همراه با چینه‌های دارای هیدروکربن‌ها قرار گرفته‌اند. این تغییرات ممکن است به طور اساسی بر روی تراکم شیل‌ها تأثیر بگذارد. بیشتر سامانه‌های آبخوان‌های آب شیرین به طور طبیعی تحکیم یافته و تحت فشار هستند و یا کمی تحت فشار بیش از حد دارند و ممکن است در صورت نبود گسل‌های مهم و به دلیل ساز و کار ساختاری متداول آن‌ها، دارای نهشته‌های رخساره‌ای دریایی و یا آبرفتی و بدون جابجایی زمین‌ساختی مهمی باشند که به این ترتیب ساختار ژئومکانیکی ساده‌ی شیل‌ها ممکن است با پیچیدگی‌های واحدهای چینه‌شناسی سنگی در ارتباط با توزیع خاک‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای در یک سامانه‌ی تراکمی تحت‌تأثیر قرار بگیرد. بدیهی است که خاک‌های رس در ژرفای کم، ممکن است تا دو برابر تراکم‌پذیرتر از ماسه‌ها باشد (چیلینگریان و نایت¹/1960)، بنابراین فرونشست زمین در یک آبخوان آب شیرین به شدت به توزیع ذرات رس و سیلت در درون لایه‌های محصور، تداخل با آبخوان‌های کم‌تراوا و عدسی‌های بین لایه‌ای بستگی دارد. به این ترتیب زهکشی از این طبقات می‌تواند موجب ایجاد زمان تأخیر در زهکشی سامانه‌ی آبخوان‌های دارای ذرات ماسه گردد و در نتیجه تأخیر در فرونشست رخ می‌دهد و ممکن است پس از مسدود شدن چاه‌ها نمایان گردد. (شکل 1-6). بر خلاف آبخوان‌ها در میدان‌های نفت و گاز با ژرفای زیاد، رس‌ها (شیل‌ها) و ماسه‌ها (ماسه سنگ‌ها) صرف نظر از ترکیب سنگ‌شناسی آن‌ها، ویژگی‌های مکانیکی همسانی را نمایش می‌دهند (فینول و سانسوچ²/1995، باو³/2002، فرروناتو⁴/2013)، که این امر متمایز کننده‌ی بزرگی و گسترش فرونشینی در بالای آبخوان‌های پمپاژ شده نسبت به میدان‌های گازی و نفتی می‌باشد. از نظر مفهومی، ممکن است چهار عامل با یکدیگر ترکیب شده تا بتوانند نشست قابل اندازه‌گیری در آبخوان‌ها را ایجاد نمایند:

- 1- ژرفای کم لایه‌های پمپاژ شده
 - 2- نهشته‌های بسیار تراکم‌پذیر در محیط‌های آبرفتی و یا کم‌ژرفای دریایی و یا دریاچه‌ای، گسترش یافته باشند.
 - 3- کاهش قابل ملاحظه‌ی فشار منفذی
 - 4- ضخامت زیاد لایه‌های آبدار فشارزدایی‌شده
- در مکان‌هایی که آبخوان‌ها تحت فشار بیش از حد باشند، عوامل دو گانه‌ی 1 و 3 انحصاری خواهند بود، در صورتیکه می‌توانند با عوامل 2 و 4 با یکدیگر مرتبط شوند. برای اینکه یک فرونشست بزرگ صورت بگیرد به یک نهشته رسوبی با تراکم کم و یا به کاهش فشار زیاد نیازمندیم. به عنوان مثال شهر مکزیکوسیتی تنها با کاهش فشار بیشینه پیرامون 0/7 مگاپاسکال پیرامون 10 متر فرونشست کرد، زیرا خاک سازنده‌های سطحی بسیار سست و با تخلخل زیاد و در 50 متری بخش بالایی قرار داشتند

¹ Chilingarian & Knight

² Finol & Sancevic

³ Bau

⁴ Ferronato

(ریورا¹/1990) نشست‌های 9 و 6/7 متری از ویلمینگتون² (رینتول³/1981) و اکوفیسک⁴ (هرمانسن⁵/2000 و زمان⁶/1995) در میدان‌های نفتی کالیفرنیا در آمریکا و دریای شمال از اروپا گزارش شده است. این نشست‌های بزرگ ناشی از افت شدید فشار منفذی (بیش از 20 مگا پاسکال) همراه با ضخامت قابل توجه واحدهای تراکم‌یافته، صورت گرفته بود. اگر چه فرونشست زمین در بالای میدین هیدروکربنی، خارج از سرفصل‌های این کتاب است، شاید ارزش گفتن داشته باشد که در اکوفیسک، متراکم شدن ناگهانی سنگ مخزن در برخی از مراحل توسعه‌ی میدان نفتی موجب ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ و برگشت‌ناپذیر گردید که از آن به عنوان «فروریزش منفذی»⁷ یاد می‌شود و تصور بر این است که دلیل اصلی نشست غیرمنتظره در این میدان‌ها بوده است. (زمان/1995)

برخی از آبخوان‌ها ممکن است بیش از حد تحکیم یافته باشند (هولزر⁸/1981). بیش تحکیمی، باعث کاهش نرخ فرونشست اولیه شده و سپس با نرخ غیر قابل تصویری در فرونشست در برخی از مراحل استخراج روبرو می‌شویم که تنش مؤثر بیشتر از تنش پیش تحکیمی می‌گردد. اگر رسوبات دارای نفت و گاز بیش تحکیم یافته باشند، پیش‌بینی دخالت‌های انسانی در فرونشست زمین در شرایط میدانی و توسعه‌ی آبخوان‌ها بسیار سخت‌تر می‌گردد. اثرات پیش تحکیمی ممکن است به دلیل فعالیت‌های زمین‌شناسی در گذشته، ناشی از برخاستگی⁹ و فرسایش نهشته‌های بالایی و پوشاننده‌ی دارای سیال باشد که بوسیله‌ی فشار زیاد سیال و یا هر دو ایجاد شده باشد (مالتمن¹⁰/1994). هنگامی که فشار منفذی به دلیل استخراج سیال افت می‌کند، بارگذاری دوباره در سازندهای پمپاژ شده رخ می‌دهد. در ابتدا تراکم اندک است و در نتیجه میزان نشست نیز اندک خواهد بود، به محض افزایش سد بار بیش از آستانه‌ی تحمل سازند، فشرده‌سازی سنگ بر روی منحنی بارگذاری، با افزایش ناگهانی تراکم پذیری و نرخ فرونشست همراه خواهد بود. عامل دیگری که بر روی این فرآیند تأثیرگذار است وجود گسل‌ها در سامانه‌ی روباره‌ها است، همانند شرایطی که در لاس وگاس آمریکا وجود دارد (آملونگ¹¹/1999). گسل‌ها باعث سست شدن مواد تشکیل دهنده‌ی محیط‌های متخلخل شده و در نتیجه واکاوی و پیش‌بینی را سخت‌تر می‌نمایند.

¹ Rivera

² Wilmington

³ Rintoul

⁴ Ekofisk

⁵ Hermansen

⁶ Zaman

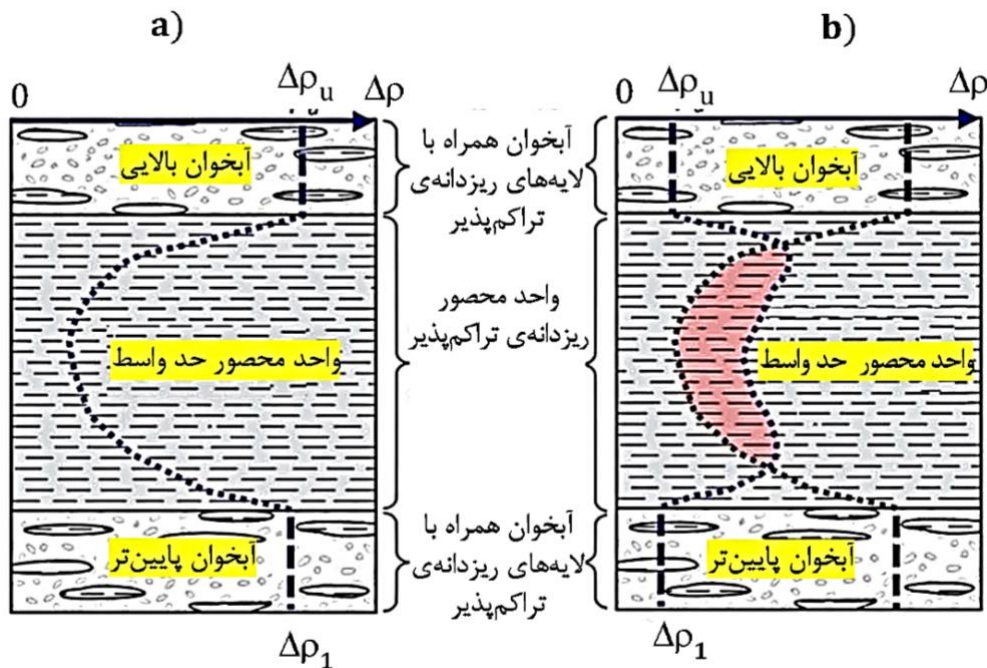
⁷ Pore Collapse

⁸ Holzer

⁹ Uplift

¹⁰ Maltman

¹¹ Amelung



شکل 6-1: کاهش فشار منفذی (خط چین آبی) در دو آبخوان و تداخل با آبخوان کم‌تراوا

(a) در انتهای پمپاژ آب‌های زیرزمینی و (b) مدتی پس از خاموش شدن پمپاژ از چاه

پهنه‌ی هاشورهای قرمز بخشی از آبخوان کم‌تراوای محصور شده را نشان می‌دهد که فشار پس از توقف پمپاژ از چاه کاهش یافته و فرونشست با تأخیر انجام می‌شود.

در تکمیل موارد فوق، باید به انواع دیگری از فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی اشاره کرد که در مجموعه‌ی حاضر به آن‌ها نمی‌پردازیم. بیشتر این عوامل اهمیت کمتری نسبت به موارد پیش گفته داشته و در ارتباط با پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی - اجتماعی است که شامل معدن کاری زیرزمینی، انحلال سنگ‌های کربناته، فرسایش‌های زیرسطحی، بارگذاری سطحی، زهکشی زمین، بازیابی زمین‌ها، اکسایش پیت‌ها (خاک‌های آلی¹)، انحلال خاک‌های کربن‌دار و مصارف مختلف آب می‌باشند (آلن / 1984). نمونه‌ای از فرونشست زمین به دلیل اکسایش پیت‌ها توسط زانللو² و همکاران ارائه شده است (2011).

1-2- چهارچوب تاریخی

اولین مشاهدات در ارتباط با فرونشست زمین ناشی از برداشت سیال از بخش‌های زیرسطحی در سال 1926 توسط زمین‌شناسان آمریکایی، پرات و جانسون³ گزارش گردید که در مورد نشست زمین در شبه جزیره‌ی گایلارد⁴ در مرکز میدان نفتی "Goose Creek" در خلیج گالوستون⁵ در تگزاس رخ داده بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که "این نشست‌ها به طور مستقیم در اثر استخراج نفت، گاز، آب و ماسه از بخش زیرین میدان نفتی در سال 1917 شروع شده بود." همچنین آن‌ها نگرانی‌هایی در مورد ساز و کارهای حاکم بر این فرآیندها ابراز داشتند که "منافذ خالی که توسط آب پر شده بود به کندی نسبت به رس‌های پیرامونی زهکشی می‌شوند و این حقیقت کاملاً آشکار بود که زهکشی رس‌ها باعث تراکم بیشتر آن‌ها شده بود و این امر باعث

¹ Peat

² Zanello

³ Pratt & Johnson

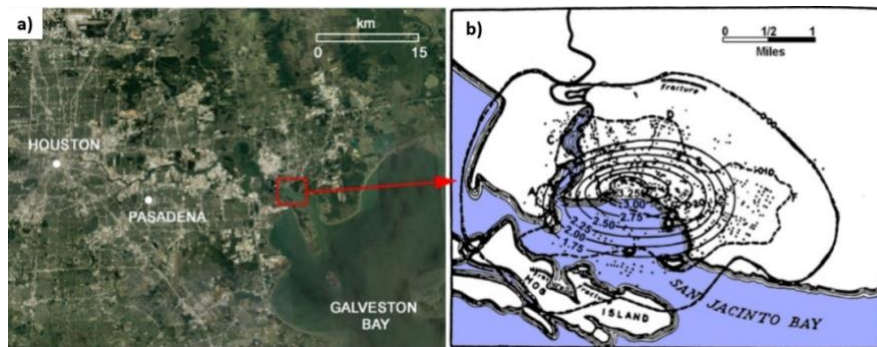
⁴ Gaillard

⁵ Galveston

ایجاد فرونشست لایه‌های پوشاننده‌ی سطحی می‌گردید. " با این حال، چند سال پیش‌تر، فولر (1908) این نظریه را مطرح کرده بود که خروج سیالات و کاهش فشار منفذی سیال، باعث فرورفتن سطح زمین به دلیل حذف نیروهای هیدرواستاتیک، پشتیبانی شده است.

جالب است بدانیم که چگونه تصور عمومی مردم از فرونشست زمین به طور چشمگیری در گذر زمان تغییر کرده است. امروزه تأثیر رخداد نشست در مناطق بزرگ، نگرانی‌های متفاوتی از نظر اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی را به همراه دارد. در مناطقی که فرونشست زمین به دو دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی و استخراج هیدروکربن‌ها است، ممکن است شاهد باشیم که یکی از طرفین مسئولیت را بر عهده‌ی دیگری بگذارد. در دهه‌ی 1920 این گونه نبود، همان‌طور که از یک نمونه‌ی تکان دهنده در "Goose Creek" می‌بینیم، شبه جزیره‌ی گایلارد واقع در دهانه‌ی "Goose Creek"، که بخشی از میدان نفتی را پوشانده بود، شروع به نشست کرد و به سرعت توسط آب‌های خلیج جاسینتو¹ پوشیده شد. در سال 1925 بیشینه فرونشست بیش از 1 متر و در ناحیه‌ای به وسعت "2/5 × 4" کیلومتر مربع گسترش یافت که تقریباً با مرز چاه‌های تولید نفت، همپوشانی داشت. (شکل 1-7)

ایالت تگزاس ادعای مالکیت زمین‌های به زیر آب رفته در اثر فرونشست زمین را داشت و به دنبال بازیابی ارزش نفت از بین رفته، پس از فرونشست بود. با این حال، دادگاه با تکیه بر این اصل که هیچ عملی از سوی انسان نمی‌تواند به موجب قانون منجر به سلب مالکیت شخص دیگری گردد، به نفع متهمان تصمیم گرفت و دلایل آنان را پذیرفت که فرونشست‌ها نتیجه‌ی یک فرآیند طبیعی نبوده، بلکه در اثر فعالیت‌های انسانی، یعنی خارج کردن حجم زیادی از سیالات و شن و ماسه از زیرزمین، ایجاد شده است. اگر فرونشست یک فرآیند طبیعی ناشی از "قدرت خداوند" بوده باشد، احتمالاً مالکیت زمین فرو رفته به زیر آب و ذخایر زیربنایی آن به ایالت تگزاس می‌رسید.



شکل 1-7: a - موقعیت دهانه‌ی "Goose Creek" در خلیج گالوستون در نزدیکی هیوستون آمریکا
b - نقشه‌ی فرونشست زمین، "پرات و جانسون، 1926"

از نظر کمی، اصل تنش مؤثر بین دانه‌ای که توسط ترزاقی² در سال 1923 ارائه گردید، نشان داد که تحکیم خاک‌ها عامل اصلی نشست زمین است. به زودی این اصل به عنوان یک عامل مهم در تراکم یک آبخوان (در ماسه سنگ‌های داکوتا³) شناخته شد، (مینزر و هارد⁴، 1925). آن‌ها اظهار نمودند که فشار روباره‌ی همه‌ی طبقات بالای آبخوان محصور داکوتا بوسیله‌ی سیال و بخشی دیگر توسط ماسه سنگ‌ها از طریق تنش‌های مؤثر بین دانه‌ای، مستهلک شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که بارگذاری بر روی دانه‌ها تا 50

¹ Jacinto

² Terzaghi

³ Dakota

⁴ Meinzer & Hard

درصد به علت کاهش فشار ارتفاع آرتزین، افزایش یافته است. براساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی، مینزر در سال 1928 به شواهدی مبنی بر قابلیت تراکم‌پذیری کشتان آبخوان‌های آرتزین، اشاره کرد بود. او مشخص کرد که برداشت آب از ذخیره موجب تراکم آبخوان و کاهش حجم ذخیره‌ی آن (به علت فشردگی) خواهد شد که حتی می‌تواند به صورت دائمی و برگشت‌ناپذیر باشد.

راپلیه¹ در سال 1933 اولین گزارش فرونشست ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی را در دره‌ی سانتا کلارا² در کالیفرنیا و اینگرسون³ در سال 1941 فرونشست دلانو - تولاره - واسکو⁴ در کالیفرنیا را ارائه کرد. او یک نقشه و یک نیمرخ از فرونشست زمین را براساس مقایسه‌ی بین ترازیبی و پیمایش‌های انجام شده در سال‌های 1902، 1930 و 1940 ارائه نمود. در همین زمان رابطه‌ی بین برداشت سیالات زیر سطحی (آب، نفت و گاز) و فرونشست زمین، دست کم در آمریکا شناسایی شده بود.

در سال 1940 ژاکوب برآورد نمود هنگامی که آب از طریق پمپاژ یک آبخوان آرتزین کشتان تخلیه می‌شود، فشار منفذی کاهش می‌یابد، در نتیجه برداشت آب به دلیل انبساط آب، فشردگی آبخوان و تراکم و تداخل طبقات رسی مجاور بدست آمده است.

همچنین او اظهار داشت مورد سوم که احتمالاً مهمترین آن‌ها است: به علت تراوایی کم رس‌ها (و یا شیل‌ها) یک تاخیر زمانی بین کاهش فشار در درون آبخوان و پیدایش بخشی از آب ذخیره‌سازی شده در رس‌ها، پدید می‌آید. در نهایت لوهمان⁵ در سال 1961 معادله‌ای را برای تعیین میزان فشردگی کشتان آبخوان‌های آرتزین در هنگام کاهش فشار آرتزین و ویژگی‌های هیدرومکانیکی آبخوان‌ها، ارائه کرد. روند این فشردگی انتقال به سطح زمین است که می‌تواند به برآورد فرونشست زمین منجر گردد.

در اواخر دهه‌ی پنجاه و شصت میلادی، مفهوم فرونشست زمین و پایین افتادن سطح سیال‌ها، به طور جهانی پذیرفته شده بود که فعالیت‌های انسانی منجر به فرونشست گردیده و توسط پیشگامانی ارائه گردید (پولند و دیویس⁶ / 1969). در همین زمان اصول تنش مؤثر در ژئومکانیک مشخص شده بود (تایلور⁷ / 1948 و ترزاقی و پک⁸ / 1948 و لئوناردز⁹ / 1962). در پایان دهه‌ی شصت، مفهوم و سازوکار زیربنایی فرونشست زمین‌ها با خاستگاه فعالیت‌های انسانی به روشنی مشخص گردید. مسیر برای پیشرفت‌های جدید برای تعیین معادله‌ها و رابطه‌های نوین ریاضی برای حل و پیش‌بینی فرونشست زمین در هنگام بهره‌برداری از آبخوان‌ها فراهم گردید. روش اجزای محدود فرونشست‌های زمین به دلیل فعالیت‌های انسانی در ونیز توسط گامبولاتی و فریز در سال 1973 مورد بررسی قرار گرفت.

دومین پیامد ژئومکانیکی مهم در ارتباط با پمپاژ آب‌های زیرزمینی در سامانه‌های آبخوان‌های رسوبی تحکیم نیافته، گسستگی¹⁰ زمین بود. ماهیت گسیختگی زمین در بازه‌ای از درز و شکاف‌های باز شده تا گسلش و تغییرات متفاوت در جهات مختلف صفحه‌ی گسیختگی وجود داشت (شکل 1-8)

¹ Rappleye

² Santa Clara Valley

³ Ingerson

⁴ Delano-Tulare-Wasco

⁵ Lohman

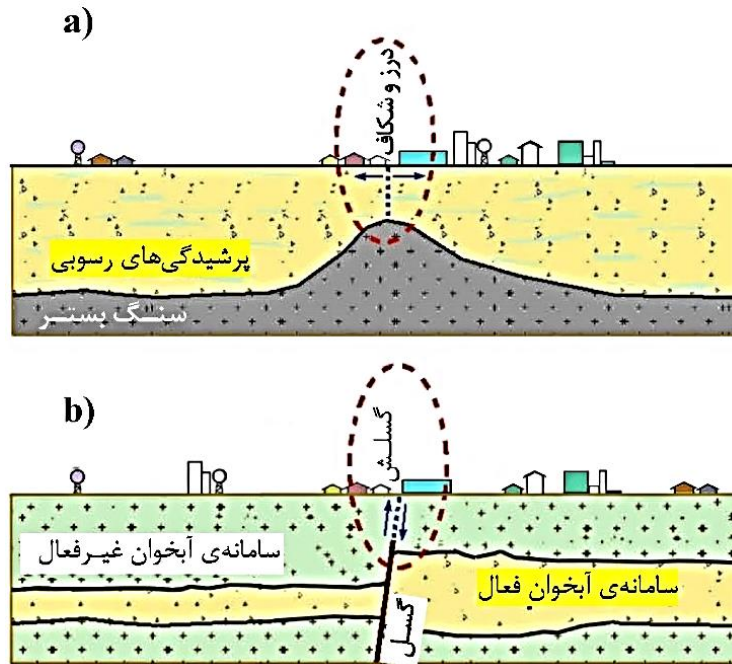
⁶ Poland & Davis

⁷ Tylor

⁸ Peck

⁹ Leonards

¹⁰ Rupture



شکل 8-1: a) درز و شکاف خوردگی و b) گسلش به دلیل تغییر شکل سامانه‌ی آبخوان در ارتباط با پمپاژ آب‌های زیرزمینی

گسستگی‌های زمین همراه با فرونشست، برای اولین بار در سال 1949 در آریزونا مرکزی¹ توسط فیت² گزارش گردید. کارهای اولیه 20 سال بعد توسط سازمان زمین شناسی آمریکا در ارتباط با درز و شکاف‌های مهم زمین در مناطق دارای فرونشست (کالیفرنیا، آریزونا، تگزاس و نوادا) انجام گردید. "هولزر و پامپیان³ مشخص کردند که "مناطق و ارتباط زمانی درز و شکاف‌های زمین با فرونشست‌ها ناشی از پایین افتادن تراز سطح آب زیرزمینی است به دلیل فعالیت‌های انسانی، بوجود آمده است." سازوکار اساسی در این زمان با داشتن داده‌های میدانی کافی برای آزمون‌های این فرضیه ضروری بود. خمش⁴ به دلیل اختلاف موضعی جابجایی، توسط فیت در سال 1951 پیشنهاد گردید تا مشاهده‌ی درز و شکاف‌ها را توضیح دهد. او گمان می‌کرد که این پدیده می‌تواند به دلیل کرنش‌های کششی بوجود آمده که ناشی از اختلاف میزان فرونشست می‌باشد. او اختلاف فرونشست را به تغییرات ناگهانی ضخامت نسبت آبخوان داد. لفران⁵ در سال 1971 پیشنهاد کرد که در مناطق فرونشینی، جابجایی افقی اندازه‌گیری شود، زیرا ممکن است به دلیل نیروها، تراوش افقی صورت گرفته باشد. بر اساس ارتباط درزه‌ها و شکاف‌های زمین با کاهش تراز سطح ایستابی و سایر شواهد میدانی، پیشنهاد گردید که درزه‌ها و شکاف‌هایی که در ژرفا شکل گرفته و به سمت بالا انتشار می‌یابند (هولزر و دیویس/1967) در اثر خشک شدن و به دلیل پایین افتادن تراز سطح ایستابی بوجود آمده باشد. در دهه‌ی گذشته در دسترس بودن الگوهای ژئومکانیکی سه بعدی اجازه داد تا اولین تلاش‌ها برای شبیه‌سازی گسستگی‌های زمین در ارتباط با تغییرات در شرایط تنش و در محیط‌های متخلخل به دلیل فعالیت‌های انسانی صورت پذیرد. الگوسازی‌ها نشان می‌دهد که کنترل‌های اولیه به علت فعال شدن دوباره‌ی گسل‌های موجود، اختلاف تراکم به دلیل ضخامت لایه‌های

¹ Central Arizona

² Feth

³ Pampeyan

⁴ Bending

⁵ Lofgren

آبخوان و یا آبخوان‌های کمتر او می‌باشد و شکستگی‌های کششی در بالای سنگ‌های بستر در سامانه‌ی پی‌سنگ آبخوان‌ها تشکیل می‌دهند.

3-1- رخدادها

فرونشست زمین شاید گسترده‌ترین و متداول‌ترین تهدید ژئومکانیکی ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی باشد. هنگامی که برداشت آب‌های زیرزمینی به طور گسترده و در مناطق پرجمعیت و در حوضه‌های زمین‌شناسی تحکیم نیافته رخ دهد که دارای خاستگاه آبرفت‌های دریاچه‌ای و دریایی کم ژرفا باشد، فرونشست‌های عهد حاضر¹ رخ می‌دهد. مناطقی که در نزدیکی دریاها، مرداب‌ها و یا دلتاها قرار گرفته‌اند، بیشتر تحت تأثیر فرونشست‌ها قرار می‌گیرند. در هنگام شروع نشست زمین، آن‌ها قابل تشخیص نبوده و تنها پس از رخداد و زمانی که خسارت‌های زیادی به بار آید، تشخیص داده می‌شوند. در این مرحله انجام اقدامات بازسازی و بهسازی مؤثر برای کاهش پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی – اجتماعی دارای هزینه‌های بسیار سنگینی خواهد بود، به این ترتیب به تازگی آگاهی از تهدیدها و خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها در ارتباط با فعالیت‌های انسانی در سطح اجتماعی و سیاسی از اهمیت زیادی برخوردار شده و مشارکت مردم برای کاهش آستانه‌ی هشدارها و خسارت‌ها ضروری است. در نتیجه جدیدترین برنامه‌ها برای توسعه‌ی منابع زیر سطحی، معمولاً شامل مطالعه‌ی پیامدهای زیست‌محیطی به همراه پیش‌بینی‌های عددی فرونشست مورد انتظار در سامانه‌های بهره‌برداری شده، بایستی انجام شود.

شکل 1-9 مناطق فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی، مانند استخراج آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان را نشان می‌دهد. جدول 1-1 مهم‌ترین رخداد‌های ثبت شده در شکل 1-9 را ارائه کرده است. بیشینه نشست ثبت شده در همه‌ی زمان‌ها پیرامون 14 متر و به دلیل تولید آب زمین گرمایی در میدان زمین گرمایی وایراکی² در نیوزیلند بود (الیس³ 2009) که در شکل (1-10a) نمایش داده شده است. با این حال ژرفای فرونشست 10 متر در دره‌ی خواکین⁴ در کالیفرنیا (گالوی و رایلی⁵ 1999)، در مکزیکوسیتی (کابرال – کانو⁶ 2008، اوتیز – زامورا⁷ و اورتگا – گوئرو⁸ 2010) غیرعادی نیستند. (شکل 1-10)

¹ Quiaternary

² Wairakei

³ Allis

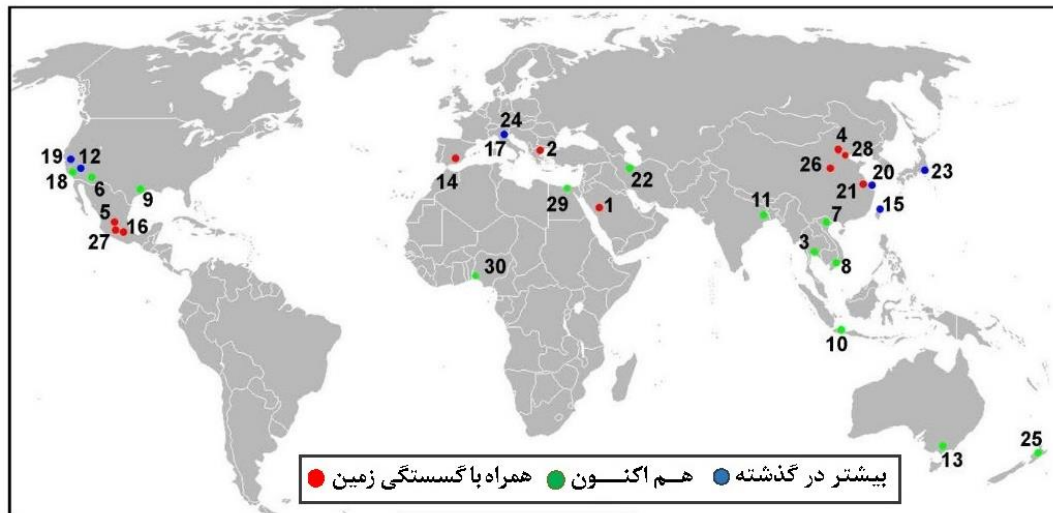
⁴ Joaquin

⁵ Galloway & Riley

⁶ Carbal- Cano

⁷ Otiz- Zamora

⁸ Ortega- Guerrero



شکل 9-1: مهمترین مناطق فرونشست جهانی زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی و در اثر برداشتن از آبهای زیرزمینی

- 1: Wadi Al-Yutamah, Saudi Arabia; 2: Anthemountas Basin, Greece; 3: Bangkok, Thailand; 4: Beijing, P.R. China; 5: Celaya, Mexico; 6: Eloy Basin, Arizona, USA; 7: Hanoi, Vietnam; 8: Ho Chi Minh, Vietnam; 9: Houston, Texas, USA; 10: Jakarta, Indonesia; 11: Kolkata, India; 12: Las Vegas, Nevada, USA; 13: Latrobe Valley, Australia; 14: Lorca, Spain; 15: Taipei, Taiwan; 16: Mexico City, Mexico; 17: Ravenna, Italy; 18: San Joaquin Valley, California, USA; 19: Santa Clara Valley, California, USA; 20: Shanghai, P.R. China; 21: Su-Xi-Chang area, P.R. China; 22: Tehran, Iran; 23: Tokyo, Japan; 24: Venice, Italy; 25: Wairakei, New Zealand; 26: Xian, P.R. China; 27: Zamora de Hidalgo, Mexico City; 28: Tianjin, P.R. China; 29: Nile River delta, Egypt; 30: Lagos, Nigeria

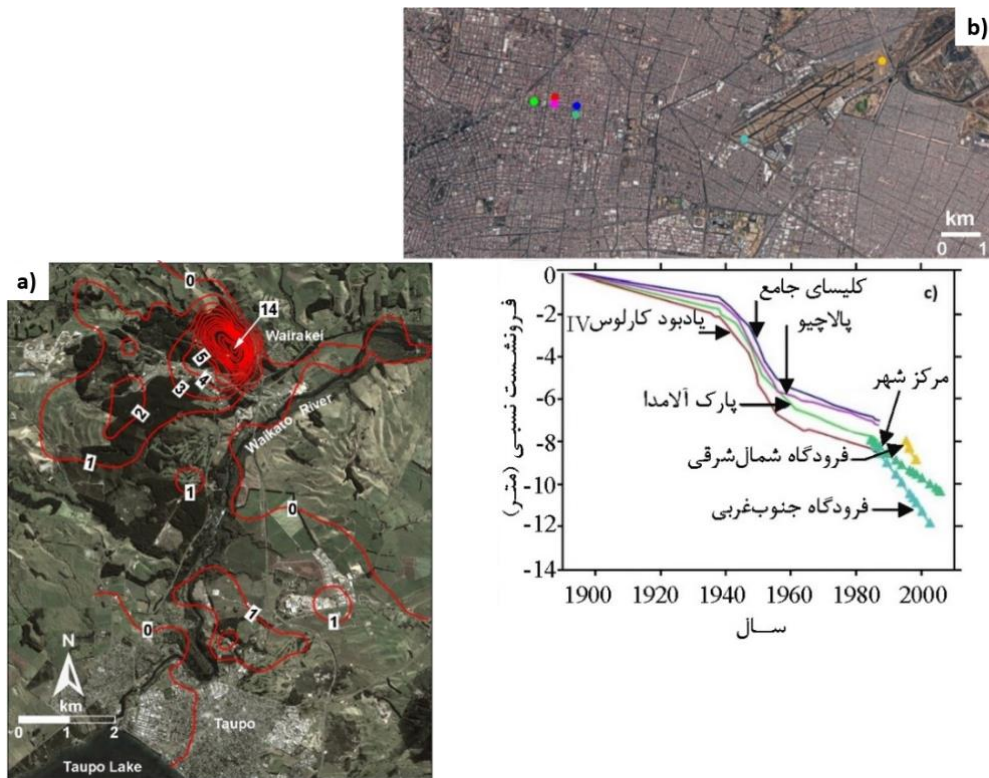
جدول 1-1 : مناطق منتخب با فرونشست‌های مهم زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در جهان.

زمان رخداد در داخل پرانتز، نرخ بیشینه نشست‌ها در یک زمان مشخص و مقادیر منفی نشانه‌ای برخاستگی زمین است.

ردیف	موقعیت	بیشینه فرونشست (متر)	تراخ بیشینه سانتی‌متر در سال	زرفای پمپاژ (متر)	مساحت فرونشست (مترمربع)	منابع مهم
۱	Wadi Al-Yutamah	۰/۳ (۱۹۹۳-۱۹۹۶)	-	۰-۱۵۰	۱۵۰	Banker and Al-Harthia [1999]
۲	Anthemountas Basin	-	۳/۵ (۱۹۹۵-۲۰۰۱)	۲۰-۱۵۰	۴۰	Raspini et al. [1933]
۳	Bangkok	۲/۱ (۱۹۳۳-۲۰۰۲)	۲ (۲۰۰۵-۲۰۱۰)	۲۰-۳۰۰	۷۰۰	Phien-wej et al. [2006]; Aobpaet et al. [1999]
۴	Beijing	۱/۱ (۱۹۵۵-۲۰۰۷)	۵ (۲۰۰۳-۲۰۱۰)	۲۰-۴۰۰	۴۲۰۰	Zhang et al. [2014] Zhu et al. [2014]
۵	Celaya	۳/۱ (۱۹۸۵-۲۰۰۸)	۹ (۲۰۰۷-۲۰۱۱)	۵۰-۲۰۰	۵۰	Huizar-Alvarez et al. [2011]; Chaussard et al. [2014]
۶	Eloy Basin	۳/۰ (۱۹۴۸-۱۹۷۷)	۴ (۲۰۱۰-۲۰۱۴)	۱۰۰-۷۶۰	۱۰۰۰	Holzer et al. [1979]; Conway [2014]
۷	Hanoi	۰/۵ (۱۹۸۸-۲۰۰۳)	۷ (۲۰۰۷-۲۰۱۱)	۰-۸۰	۳۵	Thu and Fredlund [2000]; Dang et al. [2014]
۸	Ho Chi Minh	۰/۴ (۱۹۹۶-۲۰۰۵)	۴ (۲۰۰۶-۲۰۱۰)	۵۰-۲۴۰	۲۵۰	Erban et al. [2014]
۹	Houston	۳ (۱۹۱۵-۲۰۰۰)	۲/۵ (۲۰۰۵-۲۰۱۲)	۶۰-۹۰۰	۱۲۰۰۰	Gabrysch and Neighbors [2000]; Yu et al. [2014]
۱۰	Jakarta	۴/۱ (۱۹۷۴-۲۰۱۰)	۲۶ (۲۰۰۷-۲۰۱۱)	۴۰-۲۴۰	۶۶۰	Ng et al. [2012]
۱۱	Kolkata	۱/۱ (۱۹۵۶-۲۰۰۰)	۴ (۲۰۰۱-۲۰۰۵)	۵۰-۱۶۰	۱۵۰	Shau and Sikdar [2011]
۱۲	Las Vegas	۲ (۱۹۳۵-۲۰۰۰)	۲/۵ (۱۹۹۷-۱۹۹۹)	۲۰۰-۳۰۰	۲۵۰	Amelung et al. [1999]; Hoffmann et al. [2001]
۱۳	Latrobe Valley	۱/۳ (۱۹۶۰-۱۹۷۷)	۱/۵ (۲۰۰۶-۲۰۱۱)	۰-۱۵۰	۴۰۰	Gloe [1984]
۱۴	Lorca	۲/۲ (۱۹۹۲-۲۰۱۲)	۱۶ (۱۹۹۲-۲۰۱۱)	۵۰-۳۰۰	۱۴۰	Gonzalez et al. [2012]
۱۵	Taipei	۲ (۱۹۵۵-۱۹۹۱)	-۰/۷ (۱۹۸۹-۲۰۰۳)	۵۰-۲۵۰	۲۰۰	Chen et al. [2007]

ادامه جدول 1-1 :

منابع مهم	مساحت فرونشست (مترمربع)	ژرفای بیمار (متر)	نرخ پیشینیه سائتی متر در سال	پیشینه فرونشست (متر)	موقعیت	ردیف
Ortiz-Zamora and Ortega-Guerrero [2010]; Chaussard et al. [2014]	۲۵۰	۰-۳۵۰	۳۰ (۲۰۰۷-۲۰۱۱)	۱۳ (تاکنون-۱۹۶۰)	Mexico City	۱۶
Teatini et al. [2006]	۴۰۰	۸۰-۴۵۰	۰/۲ (۱۹۹۸-۲۰۰۲)	۱/۴ (۱۸۹۷-۲۰۰۲)	Ravenna	۱۷
Galloway and Riley [1999]; Borchers and Carpenter [2014]	۱۳۵۰۰	۶۰-۶۰۰	۳۰ (۲۰۰۷-۲۰۱۱)	۱۰ (تاکنون-۱۹۳۰)	San Joaquin Valley	۱۸
Schmidt and Burgmann [2003]; Borchers and Carpenter [2014]	۵۰۰	۵۰-۲۸۰	۰-۰/۵ (۱۹۹۲-۲۰۰۰)	۴/۳ (۱۹۱۰-۱۹۹۵)	Santa Clara Valley	۱۹
Wu et al. [2010]; Dong et al. [2014]	۵۰۰۰	۱۰-۳۳۰	۱/۵ (۲۰۰۶-۲۰۱۱)	۲/۶ (۱۹۵۸-۲۰۰۲)	Shanghai	۲۰
Shi et al. [2007]; Yu et al. [2009]	۴۰۰۰	۲۰-۲۰۰	۳ (۲۰۰۳-۲۰۰۸)	۱/۱ (۱۹۶۰-۱۹۹۵)	Su-Xi-Chang area	۲۱
Mahmoudpour et al. [2013]	۵۰۰	۲۰-۱۰۰	۱۵ (۲۰۰۴-۲۰۰۵)	۳/۰ (۱۹۸۹-۲۰۰۴)	Tehran	۲۲
Sreng et al. [2011]	۳۴۰۰	۰-۴۰۰	۰-۰/۳ (۱۹۹۱-۲۰۰۵)	۴/۳ (۱۹۰۰-۱۹۷۵)	Tokyo	۲۳
Gambolati et al. [1974]; Teatini et al. [2012]	۱۵۰	۷۰-۳۵۰	۰/۱ (۲۰۰۸-۲۰۱۱)	۰/۱۲ (۱۹۵۲-۱۹۷۳)	Venice	۲۴
Allis et al. [2009]	۲۵	۲۵۰-۸۰۰	۹ (۲۰۰۰-۲۰۰۷)	۱۴/۵ (تاکنون-۱۹۵۰)	Wairakei	۲۵
Zhao et al. [2008]; Qu et al. [2014]	۲۴۰	۵۰-۳۷۰	۱۱ (۲۰۰۵-۲۰۱۲)	۲/۳ (۱۹۵۹-۱۹۹۵)	Xian	۲۶
Chaussard et al. [2014]	۱۵	۰-۳۰۰	۱۸ (۲۰۰۷-۲۰۱۱)	-	Zamora de Hidalgo	۲۷
Yi et al. [2011]	۸۰۰۰	۰-۵۵۰	۱۱ (۱۹۷۵-۱۹۸۵)	۳/۲ (۱۹۵۹-۲۰۰۷)	Tianjin	۲۸
Gebremichael et al. [2018]	۴۸۰۰	۲۰-۲۰۰	۱ (۲۰۰۴-۲۰۱۰)	-	Nile River delta	۲۹
Cian et al. [2019]	۳۵۰	۵۰-۲۰۰	۰/۶ (۲۰۱۱-۲۰۱۸)	-	Lagos	۳۰



شکل 10-1: a- فرونشست کلی در میدان زمین گرمایی ویراکی در سال‌های 1953 تا 2005 .

فواصل منحنی‌های میزان یک متر و بیشینه منحنی فرونشست 14 متر می‌باشد. b- موقعیت نقاط پایشی c- ترکیب فن آوری‌های چندگانه برای ترسیم فرونشست در مرکز شهر مکزیکوسیتی از سال 1895. داده‌های ترازبایی پیش از 1985 از روی نقاط مرجع شهر جمع‌آوری شده است، در صورتی که داده‌های 1985 تا 2002 از ترازبایی شبکه‌های نقاط مبنای نوین به دست آمده است.

"برگفته از کابرال- کاتو و همکاران، 2008"

ژرفای برداشت سیال از چاه‌ها دارای بازه‌ی وسیعی از بسیار کم ژرفا مربوط به آبخوان‌هایی با سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین تا ذخایر نفت و گاز در ژرفای 4 تا 5 هزار متری در نوسان می‌باشد. گستره‌ی ناحیه‌ی فرونشست کرده می‌تواند بزرگ (دره‌ی خواکین به وسعت 13500 کیلومتر مربع)، در ناحیه‌ی هوستون¹ - گالوستون در تگزاس 12000 کیلومتر مربع (گابریش و نیبور² / 2000) باشد. شاید چین از بزرگترین مناطق تجمعی فرونشست (80000 کیلومتر مربع) زیرسطحی به علت برداشت آب اضافی، در جهان باشد. در شکل 9-1 شهرهای مهم چین که دارای فرونشست‌های زیادی هستند، ارائه شده است (ژو³ / 2005). برای بررسی اولیه‌ی فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی و تاریخچه‌ی آن در سراسر جهان و بویژه ایالات متحده، خواننده می‌تواند به کارهای پولند (1984) و گالووی و همکاران (1999) مراجعه نماید.

¹ Houston

² Gabrysch & Neighbor

³ Xue

4-1- پیامدهای مهم زیست محیطی

برخی از پیامدهای مهم ناشی از فعالیت‌های انسانی در ارتباط با رخداد فرونشست زمین‌ها عبارت است از:

- افزایش احتمال خطر سیلاب (فراوانی، شدت و مدت زمان رخداد سیلاب)، پیامدهای بیشتر سیل‌های ناشی از بارندگی‌ها به دلیل کاهش اثربخشی سامانه‌های زهکشی، می‌باشد.
 - آسیب و خسارت به ساختمان‌ها، پی‌ها، زیر ساخت‌ها (راه‌ها، پل‌ها و خاکریزها) و سازه‌های زیر زمینی (زهکش‌ها، خطوط لوله و شبکه‌ی فاضلاب)
 - اختلال در مدیریت توزیع آب و پیامدهای مرتبط با آن‌ها (تغییر شیب آبراهه‌ها، کانال‌ها، زهکش‌ها، افزایش نفوذ آب دریا و افزایش انرژی مصرفی پمپ‌ها)
- همچنین به عنوان نتیجه می‌توان به محدودیت فضای موجود و در دسترس، ساخت مسکن، مراکز صنعتی و زیر ساخت‌ها اشاره کرد که استقرار آن‌ها در این گونه مناطق سیل‌گیر (دشت‌های سیلابی و باتلاق‌های ساحلی) در حال افزایش است. این شرایط ممکن است در بلند مدت به علت تغییرات آب و هوایی در آینده و یا بالا آمدن تراز سطح آب دریاها، امواج‌های سهمگین، طوفان‌ها و افزایش بارش‌ها، تشدید گردد.

فرونشست زمین به صورت مستقیم و غیر مستقیم باعث ایجاد خسارت می‌گردد. خسارت‌های مستقیم شامل عملکرد نامناسب و یا تخریب یکپارچگی سازه‌هایی مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها، قطارهای زیرزمینی و شبکه‌های آب و برق زیرزمینی (زیر ساخت‌ها)، می‌گردد. خسارت‌های غیر مستقیم مانند کاهش باروری زمین‌های کشاورزی در مناطق دلتایی به دلیل محدودیت دسترسی به آب‌های شیرین و با افزایش نفوذ آب‌های شور (به دلیل کاهش ارتفاع زمین‌ها) بر روی زمین‌های ساحلی می‌گردد. رایج‌ترین پیامدهای خسارت‌های غیر مستقیم در ارتباط با تغییرات نسبی تراز سطح آب‌های سطحی و زیرسطحی است که برآورد هزینه‌های این خسارت‌ها، بسیار پیچیده است. هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری براساس سیاست‌گذاری‌های کوتاه مدت و بلند مدت و بودجه‌بندی به صورت برآوردهای سرانگشتی است. در چین میانگین کل خسارت‌های اقتصادی به دلیل فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی پیرامون 1/5 میلیارد دلار برآورد شده است که 80 تا 90 درصد آن، هزینه‌های غیر مستقیم هستند. در شانگهای در سالهای 2001 تا 2010 کل خسارت‌های تجمعی پیرامون دو میلیارد دلار برآورد شده بود. در بانکوک در کشور تایلند بسیاری از ساختمان‌های عمومی و خصوصی، جاده‌ها، پیاده‌روها، خاکریزها و سازه‌های زیرسطحی (فاضلاب‌ها و زهکش‌ها) به وسیله‌ی فرونشست زمین‌ها به شدت آسیب دیدند ولی برآورد خسارت قابل اطمینانی از هزینه‌ها در دسترس نمی‌باشد. هزینه‌های کلی آسیب‌های مرتبط با فرونشست در هلند پیرامون 3/5 میلیارد دلار در سال برآورد می‌گردد.

مشکلات غیر منتظره‌ی زیست محیطی می‌تواند پس از پایان و توقف فرونشست زمین، نیز رخ دهد. هنگامی که مقررات پمپاژ کردن اجازه می‌دهد تا بازیابی تراز سطح آب صورت بگیرد، آب در برخی از مناطق غیر قابل تصور، مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در توکیو بازیابی سریع فشار ارتفاع پیزومتریک به علت عملکرد نیروهای شناوری باعث آسیب‌رسانی به زیر ساخت‌ها، پی ساختمان‌ها و تراوش آب‌های زیرزمینی به پی سنگ کف سازه‌ها و تونل‌ها گردید (توکونگا¹/2008). در منطقه‌ی صنعتی در سرزمین ونیز

¹ Tokunga

در ایتالیا در راستای فشرده‌سازی دوباره¹ آبخوان‌های محصورشده‌ی ژرف، پس از توقف پمپاژ در اوایل دهه‌ی 1970، خسارت‌های زیادی رخ داد. بیش از 400 گمانه‌ی ژرف متروکه که به طور نامناسبی مسدود شده بودند، به عنوان آبروهایی برای تأمین آب و تغذیه‌ی آبخوان‌ها استفاده شدند که نیاز به زهکشی و هزینه‌های تصفیه و بهسازی آب برای کارخانه‌های مستقر در این منطقه، داشتند. (پاریس² و دیگران/2010).

پیش از توسعه، ارزیابی تأثیرات آینده‌نگر تولید آب زیرزمینی و یا هیدروکربن‌ها در محیط‌های داخلی ضروری بوده که مجموعه‌ای از نظام‌نامه‌ها برای ارزیابی احتمال خطرات زیست‌محیطی و اجرای سیاست‌گذاری‌ها برای توسعه‌ی «پایدار»، مورد نیاز است. گام اساسی را می‌توان تا پیش از شروع فعالیت‌های توسعه‌ای در یک برنامه‌ی کنترلی پیش‌بینی کرد:

۱- پیش‌بینی نشست زمین مورد انتظار در منطقه با استفاده از الگوسازی فعالیت‌های پیشرفته که این پیش‌بینی‌ها با تکیه بر اطلاعات موجود و براساس نتایج گمانه‌های اکتشافی و دانش گذشته از حوضه‌های زیر سطحی، بایستی به روز رسانی گردد.

۲- پایش و اندازه‌گیری پیوسته‌ی فرونشست در مناطقی که قابلیت آسیب‌پذیری محیطی، اقتصادی و اجتماعی بالایی دارند و بایستی پیش از شروع آن‌ها انجام شوند تا بتوان با قطعیت برنامه‌ی توسعه‌ی واقعی را تهیه نمود. پایش سطحی زمین با استفاده از روش‌هایی مانند سامانه‌ی جهانی موقعیت‌یاب تفاضلی³ "DGPS"، تداخل‌سنجی راداری تفاضلی⁴ "InSAR" امکان‌پذیر است. پایش در ژرفای در سازندهای تخلیه شده بایستی با هدایت و استفاده از ابزارهای مانند کشش‌سنج‌ها⁵ انجام گردد و همچنین بایستی شبکه‌ای برای اندازه‌گیری ریزلرزه‌ها نصب گردد.

۳- جلوگیری و یا کاهش فرونشست‌های زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی در هنگام توسعه و گسترش آبخوان‌ها ضروری است. نقاط حساس (فرونشست‌های بزرگتر از مقادیر معین‌شده) بایستی شناسایی و روش‌های کاهش آن‌ها پیشنهاد گردد. برنامه‌ی نگهداری فشار شامل تغذیه‌ی سازند با آب‌های تصفیه شده‌ی سطحی بایستی مورد ملاحظه قرار گیرد.

فعالیت‌هایی که بیشتر تشریح گردید بایستی همزمان و در ارتباط با یکدیگر بوده و داده‌های بدست آمده در گام‌های دیگر بایستی مورد استفاده قرار گیرند. در بررسی‌های جدید، موارد مهم همراه با فرونشست‌های زمین به دلیل فعالیت‌های انسانی و به دلیل پایین افتادن تراز سطح سیال در نوشته‌های گامبولاتی و تیاتینی در سال 2015 ارائه شده است. مواردی اصلی یکپارچگی، تضاد فنی، اجتماعی، اقتصادی، حقوقی و سیاسی است که در اثر فرونشست زمین‌ها بوجود خواهد آمد. (فریز/2000)

¹ Re-Prewssurization

² Paris

³ Differential Global Positioning System
"DGPS"

⁴ Interferometric Synthetic Aperture Radar
"InSAR"

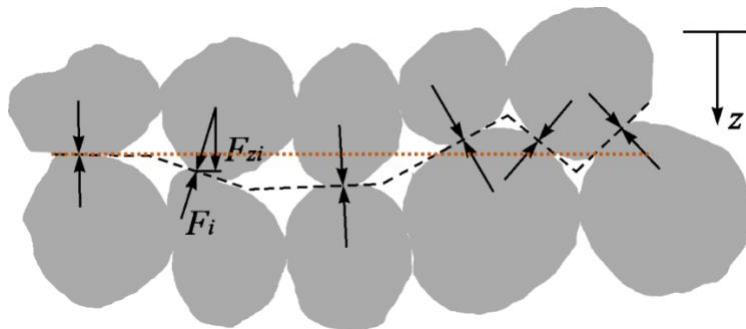
⁵ Extensometer

2 - نظریه‌ی تحکیم یک بعدی خاک و واکنش آبخوان به پمپاژ

سامانه‌های لایه‌بندی شده دارای ساختارهایی با رفتار مکانیکی یک بعدی هستند، در صورتی‌که جریان سیال درون آن‌ها ممکن است سه بعدی باشد و جابجایی بیشتر به صورت عمودی و در جهت پایین رخ می‌دهد (شکل 1-5b). این نمایش مبانی نظری مورد استفاده برای بررسی فرونشست زمین‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی، در یک فرآیند دو مرحله‌ای است: گام اول اجزای دینامیکی سیال است که رفتار جریان محیط‌های متخلخل را با استفاده از ذخیره‌ی کشسان "SS" کنترل می‌کند. گام دوم مشکلات ساختاری را با استفاده از شیب فضایی¹ فشار منافذ سیال "P" در گام اول را که به عنوان نیروی رانشی در محیط‌های ژئومکانیکی است، محاسبه می‌کند (ممکن است بیش تحکیم یافته، تحکیم یافته و گسل خورده باشد). شیب فضایی "P" چهارچوب تغییر شکل جامد و فرونشست در سطح زمین را کنترل می‌کند (این جابجایی عمودی است).

1-2- تنش مؤثر بین دانه‌های و پارامترهای خاک

فرضیه‌های فرونشست زمین بر مبنای اصول مکانیک خاک بنا شده است. همچنین در این بخش پارامترهای خاک‌ها تشریح می‌گردند. با بررسی مصالح خاک‌ها در آبخوان‌ها و طبقات محصور در آب‌های زیرزمینی می‌توان به اطلاعات مهمی دست یافت. خاک‌ها مجموعه‌ای از دانه‌هایی هستند که در تماس با یکدیگر می‌باشند. فرض کنید که درجه‌ی اشباع شدگی آن‌ها برابر با یک باشد (اشباع شدگی کامل). یک برش عمودی از نقاط تماس آن‌ها در شکل (۲-۱) ارائه شده است.



شکل 1-2: نمای برش عمودی از یک محیط متخلخل. خط چین‌های سیاه سطح تقاطع و نقطه‌چین‌های نارنجی تصویر افقی سطح تقاطع را نشان می‌دهند.

قطعه‌ای از این برش را به مساحت "A" را بر روی یک صفحه‌ی افقی در نظر بگیرید. (نقطه چین‌های نارنجی) و "n" نقطه‌ی تماس آن‌ها است (پیکان‌های سیاه). اگر "F_{zi}" از اجزای نیروی عمودی باشد که دانه‌ها در امتداد آن در ناحیه‌ی تماس تغییر می‌کنند، می‌توانیم تنش مؤثر بین دانه‌های را با "σ_z" در معادله‌ی "1" تعیین نماییم:

$$\sigma_z = \frac{\sum_{i=1}^n F_{zi}}{A} \quad (1)$$

معادله‌ی "1" تنش مؤثر بین دانه‌های به صورت تنش یکنواخت بر روی تصویر افقی سطح تقاطع با "n" ، نقطه‌ی تماس را نشان می‌دهد. تنش برابر با نیرو بر واحد سطح است و ابعاد آن "ML⁻¹T⁻²" است که

¹ Spatial Gradient

همان ابعاد فشار می‌باشد. تنش بین دانه‌های مؤثر برابر با ترکیب تنش‌های منفرد است " $\sigma_{zi} = F_{zi}/A_i$ " که در مناطق افقی " A " گسترده یافته‌اند تنش‌های فشاری مثبت هستند به طوری که نیروهای وارده یکسان هستند، به این ترتیب:

$$\sigma_z A = \sum_{i=1}^n \sigma_{zi} A_i \quad \text{و می‌توان نوشت:} \quad \sigma_z = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{zi} A_i}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{zi}}{A}$$

تنش زمین ایستایی با نماد " σ_c " نشانگر وزن یک ستون خاک بر روی یک واحد گسترده‌ی افقی است که در ژرفای معین اعمال می‌شود. وزن ستون خاک ترکیبی از وزن جامدات و سیالات موجود در منافذ است که در شرایط اشباع " σ_c " کامل، به وسیله‌ی " σ_z " و فشار منفذی " p " متعادل می‌شود (معادله‌ی 2). فشار سیال در واحد سطح منهای سطح تماس دانه‌ها، توزیع می‌شود. (پرانتر معادله‌ی 2):

$$\sigma_c = \sigma_z + p \left(1 - \sum_{i=1}^n A_i \cos \alpha_i \right) \quad \text{معادله‌ی (۲)}$$

در این معادله:

$$\sigma_c = \text{تنش زمین ایستا (ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{)}$$

$$\sigma_z = \text{تنش مؤثر بین دانه‌های (ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{)}$$

$$p = \text{فشار منفذی (ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{)}$$

$$\alpha_i = \text{زاویه‌ی بین سطح تماس "A}_i\text{" و عمود}$$

$$A_i = \text{سطح تماس با نیروی طبیعی بین دانه‌ها (L}^2\text{) طبیعی است.}$$

سطح تماس " $\sum(A_i \cos \alpha_i)$ " بسیار کوچکتر از 1 است (مثال در جعبه‌ی 1)، همچنین مقادیر داخل پرانتز به طور اساسی برابر با 1 است، بنابراین با این تقریب، معادله‌ی 2 به معادله‌ی 3 تبدیل می‌شود:

$$\sigma_c = \sigma_z + p \quad \text{معادله‌ی (۳)}$$

بار زمین ایستا " σ_c "، تنش عمودی کل¹ نیز نامیده می‌شود. اگر " σ_c " در هنگام پمپاژ ثابت باقی بماند (این شرایط به طور اساسی در حالت پمپاژ در آبخوان‌های محصور دیده می‌شود، زیرا منافذ زهکشی نمی‌شوند)، کاهش " p " منجر به افزایش یکسان تنش مؤثر بین دانه‌های " σ_z " می‌گردد، (تحت شرایطی که سازند پمپاژ شده، تراکم شده باشد) البته که این تحلیل مقدماتی است و مطالعات تکمیلی بایستی بر روی پیامدهای ثانویه مانند نیروهای جاذبه‌ی متقابل بین ذرات دانه‌ها و کشش سطحی مایعات (مانند فشار گازها در روی بخش‌هایی از خاک‌های اشباع شده) و همچنین فشار گازها در خاک‌های نیمه اشباع، مورد ملاحظه قرار گیرد.

برای ارزیابی تراکم یک سازند با کاهش فشار منفذی، بایستی چند ویژگی بدون بُعد پارامترهای خاک، تعیین گردد:

- نسبت پوکی " e " نسبت حجم منافذ به حجم ذرات است.
- تخلخل " \emptyset " که نسبت حجم منافذ به حجم کل می‌باشد.

این رابطه‌ها برقرار هستند:

¹ Total Vertical Stress

نسبت پوکی برابر با نسبت حجم منافذ تقسیم بر تفاضل بین حجم کل و حجم منافذ، است.

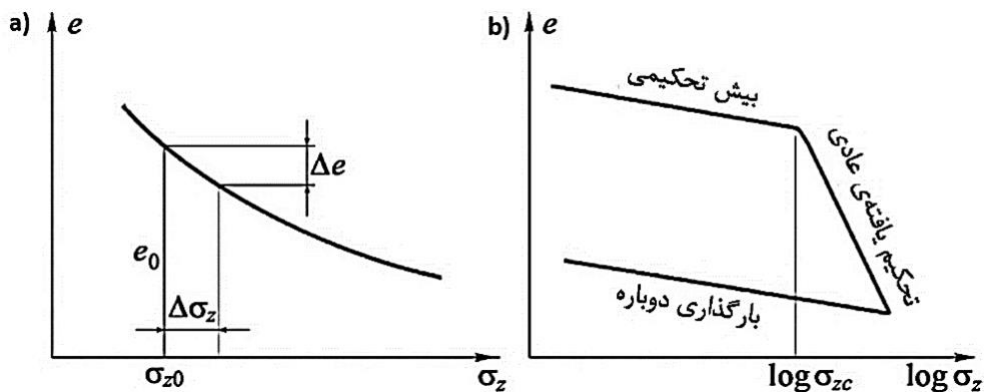
$$e = \emptyset / (1 - \emptyset)$$

$$\emptyset = e / (1 + e)$$

مهمترین نمایه تجربی، رفتار "e" در برابر " σ_z " است که از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سازندهای تراکم یافته به دست می‌آید. از نظر کیفی رفتار "e" در برابر " σ_z " در شکل ۲-۲ ارائه شده است. اگر تنش مؤثر بین دانه‌های افزایش یابد، سازند تراکم یافته و در نتیجه "e" کاهش می‌یابد. در برآوردهای اولیه، دانه‌ها را تراکم ناپذیر فرض می‌کنیم (دانه‌ها بسیار سفت‌تر از محیط متخلخل هستند، به ویژه در خاک‌های کم ژرفا)، به این معنی که تراکم محیط‌های متخلخل به دلیل کاهش حجم منافذ است یعنی کاهش "e" و \emptyset .

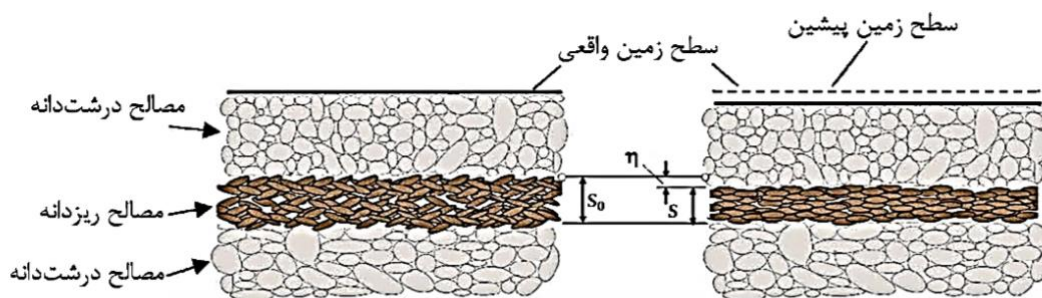
تراکم کل " η " یک لایه (" η " دارای ابعاد طولی است) در شکل ۲-۲ ارائه شده است و ضخامت اولیه " s_0 " و نسبت پوکی " e_0 " می‌باشد که به دلیل کاهش منافذ می‌باشد و در معادله‌ی ۴ ارائه شده است:

$$\eta = s_0 \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (4) \text{ معادله‌ی (۴)}$$



شکل 2-2: رفتار متداول نسبت پوکی "e" در برابر:

(a) تنش مؤثر بین دانه‌های " σ_z " و (b) " $\log \sigma_z$ ". مراحل بیش تحکیمی (اگر وجود داشته باشد)، تحکیم یافتگی عادی و بارگذاری دوباره برجسته شده‌اند. (b) بیش تحکیمی نمایه‌ی این است که خاک‌ها در گذشته تنش مؤثر بیشینه‌ای برابر با " σ_{zc} " را که بعدها کاهش یافته، تجربه کرده است (به دلیل فرسایش سطحی)



تکرار شکل 1-2 تراکم خاک " η " با کاهش فضای متخلخل

(ذرات دانه‌ها برای تمامی اهداف مهندسی تراکم‌ناپذیر هستند).

معادله‌ی 4 به سادگی و با در نظر گرفتن موارد هندسی زیر به دست می‌آید: اگر فرض کنیم که ذرات جامد تراکم‌ناپذیر باشند، حجم ذرات ناشی از تراکم بایستی معادل افزایش حجم دانه‌ها در لایه‌های تراکم یافته باشد. "A" سطح افقی لایه‌ی تراکم یافته را نشان می‌دهد و با مراجعه به شکل 2، کاهش حجم دانه‌ها در هنگام تراکم برابر است با:

$$\eta A(1 - \phi_0) \Rightarrow \eta A / (1 + e_0)$$

افزایش حجم دانه‌ها در لایه‌ی تراکم یافته برابر است با:

$$sA((1 - \phi) - (1 - \phi_0)) \Rightarrow (s_0 - \eta)A \left(\frac{1}{1 + e_0 - \Delta e} - \frac{1}{1 + e_0} \right).$$

سپس با یکسان‌سازی دو معادله‌ی بالا و بازنویسی آن‌ها، معادله‌ی 4 به دست می‌آید. قابلیت تراکم‌پذیری عمودی یک محوری خاک " C_b "، تغییری کوچک در حجم ایجاد می‌کند، " $d(\Delta V)/\Delta V$ " که در پاسخ به تغییر واحد در تنش " $d\sigma_z$ " بوده و دارای ابعاد تنش معکوس است. ($M^{-1} LT^2$)

$$C_b = \frac{d(\Delta V) \frac{1}{\Delta V}}{d\sigma_z}$$

در این معادله:

$$C_b = \text{قابلیت تراکم‌پذیری عمودی یک محوری } (M^{-1}LT^2)$$

$$\Delta V = \text{حجم بیش از تراکم } "L^3"$$

از آنجا که " $d(\Delta V)/\Delta V$ " برابر است با:

(تغییر حجم منافذ) تقسیم بر (حجم منافذ + حجم دانه‌ها) یعنی: " $\Delta e / (1 + e)$ " پس می‌توان با جایگزینی

آن به جای " $d(\Delta V)/\Delta V$ "، عبارت بعدی را برای " C_b " نوشت:

$$C_b = \frac{1}{d\sigma_z} \frac{\Delta e}{1 + e}$$

قابلیت تراکم‌پذیری عمودی یک محوری خاک می‌تواند به صورت معادله‌ی 5 بیان گردد که با اعمال علامت منفی می‌توان مقدار " C_b " مثبت را به دست آورد. فرض می‌شود " σ_c و σ_z " حتی اگر تنش‌ها فشارشی باشند، مثبت باشند). سپس قابلیت تراکم‌پذیری " C_b " می‌تواند در آزمایشگاه با یافتن شیب نیمرخ آزمایشی که در شکل "12a" ارائه شده، برآورد گردد. (معادله‌ی 5).

$$C_b = - \frac{d_e}{d\sigma_z} \frac{1}{1 + e} \quad \text{معادله‌ی (5)}$$

علامت منفی در معادله‌ی بالا به گونه‌ای تعریف شده تا " C_b " مثبت گردد. اگرچه آن‌ها تنش‌های فشاری هستند ولی فرض می‌شود که مقادیر " σ_c و σ_z " مثبت باشند. همچنین اگر مقادیر " C_b " ثابت باشد، معادله‌ی 5 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d_e}{1 + e} = -C_b d\sigma_z$$

با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی بالا می‌توان نوشت:

$$\ln(1 + e) = -C_b \sigma_z + C$$

که با ساده‌سازی می‌توان به معادله‌ی 6 دست یافت:

$$-1e = C \exp(-c_b \sigma_z) \quad (۶)$$

با انتگرال گیری از ضریب ثابت "C" و جایگزینی "e = e₀" به جای "σ_z = σ_{z0}"، پس برای "C" می توان نوشت:

$$C = (1 + e_0) \exp - (-c_b \sigma_{z0}) - 1$$

و با جایگزینی "C" در معادله 6 می توان معادله 7 را بازنویسی کرد:

$$e = (1 + e_0) \exp[-c_b(\sigma_z - \sigma_{z0})] - 1 \quad (۷)$$

به طور کلی "e₀" در ارتباط با شرایط ابتدایی است یعنی "σ_z = σ_{z0}" مربوط به پیش از شروع پمپاژ است و فرض بر این است که "C_b" ثابت بوده و برای بازه ی محدودی از "σ_z" دارای اعتبار است. محیط های متخلخل با افزایش "Δσ_z" و با پیشرفت تراکم، استحکام بیشتری می یابند. بنابراین معادله 7 برای مقادیر پایین "σ_z" که در بازه ی تنش های محدودی قرار دارند، مورد استفاده قرار می گیرد. به طور کلی "C_b" با استفاده از معادله 5 و هنگامی که شکل ۱-۲ قابل دستیابی باشد، محاسبه می گردد.

2-2- پمپاژ از سطح ایستابی یک آبخوان

برای سادگی بیشتر فرض می شود که سطح ایستابی آبخوان افقی است و کاهش تراز پیزومتریک به دلیل پمپاژ در یک بازه ی زمانی معین، برابر با "Δz" است، "θ_w" میزان رطوبت (یعنی بخشی از حجم کل محیط متخلخل به وسیله ی آب اشغال شده که این میزان معادل تخلخل در محیط های کاملاً اشباع شده است) در پهنه ی اشباع نشده در بالای "A" و بین سطح لایه ی آبدار سطحی¹ (که تحت عنوان تراز پیزومتریک از "A" و "B" در شکل ۲-۳ نامیده شده است)، پس از کاهش تراز پیزومتریک از "A" به "B" قرار می گیرد.

در نتیجه ی کاهش تراز پیزومتریک، افزایش تنش مؤثر به دلیل زهکشی آب از پهنه ی بین "A" و "B" قابل پیش بینی بوده و این پهنه تحت تأثیر فشار منفذی آب قرار ندارد (نیروی شناوری بالا برنده ی ارشمیدس). در هر نقطه ای بین "B" و "C"، تنش زمین ایستابی "σ_c" به وسیله ی مقدار "γΔz(φ - θ_w)" کاهش یافته است که در این عبارت "γ" وزن مخصوص آب و دارای معادله ی ابعادی "ML⁻²T⁻²" می باشد و مقدار "γΔz" برابر با "P" است، بنابراین تنش مؤثر "σ_z" افزایش یافته است (معادله 8):

$$\Delta \sigma_z = \gamma \Delta z (1 - \phi + \theta_w) \quad (۸)$$

ذکر این نکته ضروری است که افزایش اختلاف نیروی ارشمیدس بر روی نرات دانه های جامد، پیش و پس از پمپاژ کردن است. در لایه های زیر تراز سطح ایستابی آبخوان، "P" ثابت باقی می ماند و کاهش "σ_z" معادل کاهش "σ_c" است یعنی "γΔz(φ - θ_w)" که منجر به برگشت پذیری کمی نیز خواهد بود. از آنجایی که میزان برگشت پذیری کم است در محاسبات بعدی از این مقدار صرف نظر می گردد. با مراجعه به نقطه ی میانی بین "B" و "C" در شکل 2-3 می توان میزان تنش "σ_{z0}" را پیش از پایین افتادن تراز در معادله 9 مشخص کرد:

$$\sigma_{z0} = (1 - \phi) [\gamma'(d + \Delta z + s_0/2) - \gamma(\Delta z + s_0/2)] + \gamma \theta_w d \quad (۹)$$

¹ Phreatic Surface

در این معادله " γ' " وزن مخصوص ذرات جامد است ($ML^{-2}T^{-2}$) برای به دست آوردن معادله‌ی 9 از معادله‌ی 3 استفاده می‌کنیم، در صورتی که " σ_c " برابر با وزن زمین ایستایی یک ستون خاک با ارتفاع " $h=d+\Delta z+s_0/2$ " است که :

$$\sigma_c = \gamma \theta_w d + \gamma' h (1 - \phi) + \gamma \phi (h - d) \quad , \quad P = \gamma (h - d)$$

بنابراین نقطه‌ی " σ_{z0} " را در شکل "2-2a" با استفاده از معادله‌ی 8 می‌توانیم فرونشست را در یک ژرفای معین و با استفاده از معادله‌ی 4 محاسبه می‌کنیم:

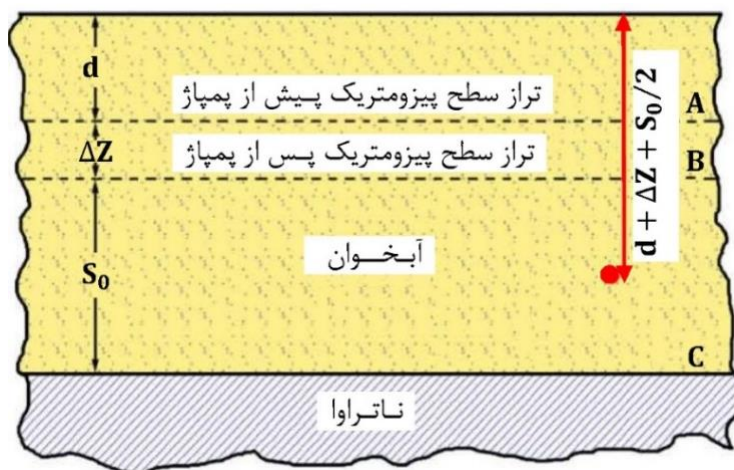
$$\eta = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \left(s_0 + \frac{\Delta z}{2} \right)$$

ساده‌تر است که تصور کنیم رابطه‌ی بین تراکم و نسبت پوکی با استفاده از نسخه‌ی خلاصه‌ی شکل 2 وجود دارد که همه‌ی ذرات جامد بدون منفذ بوده و بقیه‌ی فضای منفذها نشانگر حجم است و بدین ترتیب می‌توان محاسبات را انجام داد (جعبه‌ی 2). در این جعبه نمونه‌ای از محاسبه‌ی تغییر در تنش مؤثر برای کاهش تراز سطح پیزومتریک در یک آبخوان نامحسوس ارائه شده است (شکل 2-3).

اگر " s_0 " بزرگ باشد، می‌توانیم آن را به تعدادی زیر لایه تقسیم کرده و محاسبات بالا را برای نقطه‌ی میانی هر زیر لایه انجام داد. (" $\Delta \sigma_z$ " برای هر زیر لایه یکسان است در صورتی که " σ_{z0} " تغییر می‌نماید.) به طور خلاصه تراکم یک لایه‌ی آبدار آبخوان در معادله‌ی 10 ارائه شده است:

$$\eta = \left(s_0 + \frac{\Delta z}{2} \right) c_b \Delta \sigma_z \quad (10)$$

در معادله‌ی 10، " c_b " قابلیت تراکم‌پذیری عمودی یک محوری خاک است و " $\Delta \sigma_z$ " تغییر در تنش مؤثر بین دانه‌ای می‌باشد (معادله‌ی 8).



شکل 2-3: برشی از سطح ایستایی یک آبخوان پمپاژ شده

2-3-2- پمپاژ از یک آبخوان محصور منفرد

در نظر بگیریم که " Δz " کاهش تراز سطح پیزومتریک در یک آبخوان محصور می‌باشد (شکل 2-4). با توجه به این که وزن ستون خاک بالایی تغییر نمی‌کند (" σ_c " ثابت است)، یعنی دارای مقدار مساوی ولی با علامت مخالف است که تغییر در تنش بین دانه‌ای مؤثر و فشار منفذی رخ می‌دهد یعنی تغییر در تنش مؤثر بین دانه‌ای و فشار منفذی، برابر با " $\Delta \sigma_z = P = \gamma \Delta z$ " است. محاسبه‌ی " σ_c " در نقطه‌ی میانی

آبخوان برابر با مجموع تنش " σ'_c " در کف آبخوان کمتر او و با اضافه کردن وزن ستون آبخوان تا پایین نقطه‌ی میانی است در نتیجه:

$$\sigma_c = \sigma'_c + 0.5s_0[(1 - \phi)\gamma' + \phi\gamma]$$

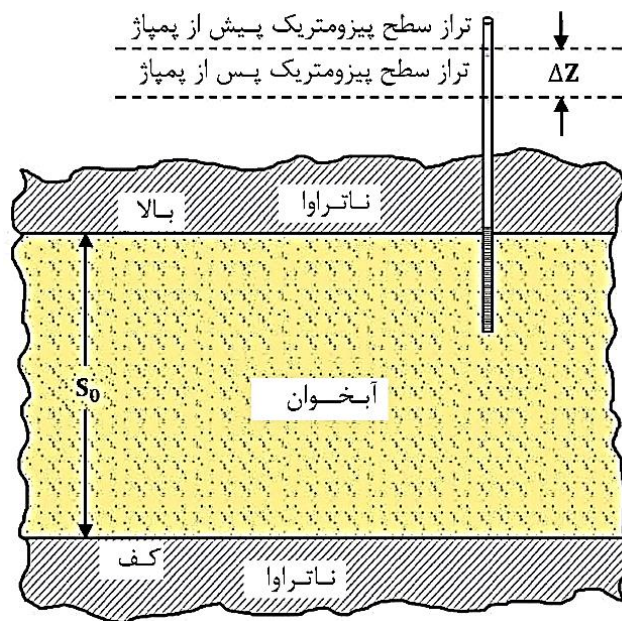
همچنین تنش بین دانه‌ای در معادله‌ی 11 ارائه شده است:

$$\sigma_{z0} = \sigma'_c + 0.5s_0[(1 - \phi)\gamma' + \gamma\phi] - p \quad \text{معادله‌ی (۱۱)}$$

در این رابطه:

σ'_c = تنش زمین ایستا در کف لایه‌ی پوشاننده‌ی ناتراوا است.

p = فشار منفذی اندازمگیری شده در صفحه‌ی میانی آبخوان پیش از کاهش تراز سطح پیزومتریک است. " $ML^{-1}T^{-2}$ "



شکل 4-2: برشی از یک آبخوان محصور پمپاژ شده

فرونشست زمین برابر با تراکم آبخوان بوده و با استفاده از نمودار شکل 2-2 و معادله‌ی 3 محاسبه می‌شود. اگر " s_0 " بزرگ باشد، می‌توان آن‌ها را به چند زیر بازه تقسیم کرد و " σ_{z0} " برای هر زیر بازه محاسبه نمود (زمانی که " $\Delta\sigma_0$ " برای هر زیر بازه یکسان باشد).

به طور خلاصه میزان تراکم یک آبخوان محصور منفرد از معادله‌ی 12 به دست می‌آید:

$$\eta = s_0 c_b \Delta\sigma_z \quad \text{معادله‌ی (۱۲)}$$

در این رابطه " s_0 " ضخامت آبخوان، " c_b " قابلیت تراکم‌پذیری عمودی یک محوری خاک و " $\Delta\sigma_z$ " تغییر در تنش مؤثر بین دانه‌ای می‌باشد.

2-4- پمپاژ از یک سامانه‌ی آبخوان چندگانه

مثالی را در نظر بگیرید که یک سامانه‌ی آبخوان چندگانه‌ی پیچیده از ترکیب یک آبخوان نامحصور و دو آبخوان محصور تشکیل شده باشد (شکل ۲-۵). به یاد داشته باشید که " Δz_1 ، " Δz_2 و " Δz_3 " به ترتیب کاهش تراز سطح پیزومتریک در سه سازند تراوا است. نشست زمین " η_1 " ناشی از کاهش فشار آبخوان

نامحصور بوده و بر اساس بخش "2-2" که پیشتر ارائه گردید، محاسبه شده است. تا جایی که دو آبخوان محصور وجود دارند بایستی میزان کاهش کل تنش زمین ایستایی را با استفاده از رابطه‌ی " $(\Delta z_1 \gamma (\phi_f - \theta_w))$ " در نظر بگیریم.

در این رابطه " ϕ_f " تخلخل سطح ایستایی آبخوان است. در نتیجه " σ_z " به ترتیب برای سازندهای 2 و 3 افزایش می‌یابد.

$$\Delta \sigma_2 = \Delta z_2 \gamma - \Delta z_1 \gamma (\phi_f - \theta_w)$$

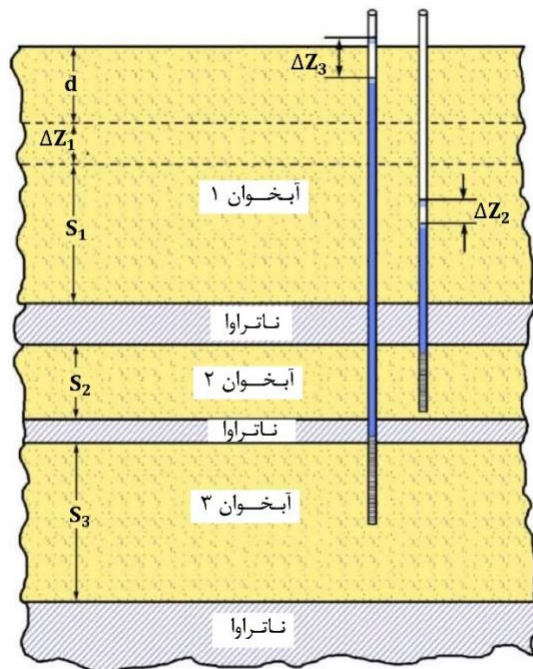
$$\Delta \sigma_3 = \Delta z_3 \gamma - \Delta z_1 \gamma (\phi_f - \theta_w)$$

تراکم آبخوان‌های محصور " η_3, η_2 " از معادله‌ی 4 و شکل 12 به دست می‌آیند که نشان دهنده‌ی تنش مؤثر پیش از پمپاژ بوده و با استفاده از معادله‌ی همسان با معادله‌ی 11 محاسبه می‌شوند. فرونشست " η " در سطح زمین با استفاده از معادله‌ی 13 به دست می‌آید:

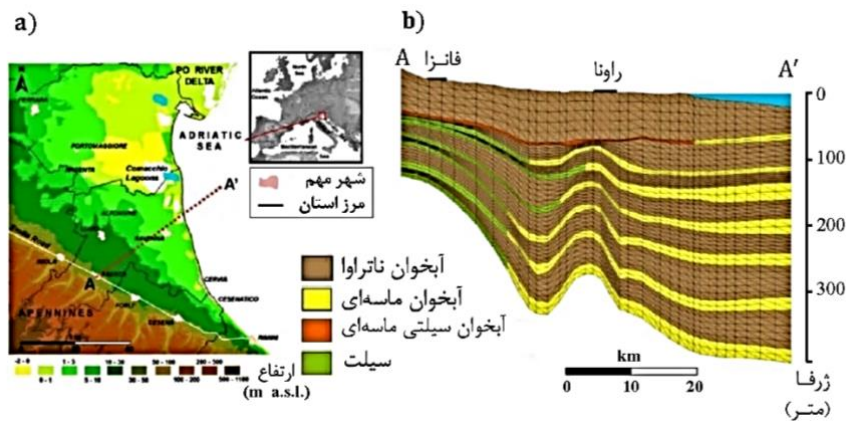
$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \quad (13)$$

2-5- تراکم تأخیری در آبخوان کم‌تراوا (طبقات محصور شده)

یک آبخوان کم‌تراوا (طبقات محصور شده)، یک سازند رسی - سیلتی با تراوایی کم است که نمی‌تواند مقادیر قابل توجهی از آب زیرزمینی را به سوی چاه‌های پمپاژ جریان دهد و تنها می‌تواند مقادیر کمی آب را به آبخوان‌های مجاور انتقال دهد. در حالی که جریان در یک آبخوان بیشتر دو بعدی و افقی می‌باشد و اگر گمانه‌ها به داخل آبخوان نفوذ کرده باشند، جریان از آبخوان کم‌تراوا بیشتر یک بعدی و عمودی می‌باشد. در یک سامانه‌ی آبخوان پیچیده (مثل شکل 2-6) نقش آبخوان‌های کم‌تراوا در تداخل با آبخوان‌ها بسیار اهمیت داشته و می‌تواند منبع چشمگیری از آب را برای آبخوان‌ها فراهم کرده و به دلیل قابلیت تراکم‌پذیری رس‌ها و سیلت‌ها می‌تواند نقش مهمی در فرونشست زمین ایفا نماید زیرا قابلیت تراکم‌پذیری " c_b " این مصالح، خیلی بیشتر از ماسه‌ها و شن‌ها است.



شکل 2-5: برشی از یک سامانه‌ی آبخوان چندگانه پمپاژ شده



شکل 6-2: (a) الگوی ارتفاعی دیجیتال از دشت امیلیا - رومانیا در ایتالیا

(b) برش عرض عمودی AA' برای نمایش (a) سامانه‌ی پیچیده‌ی آبخوان‌های چندگانه مورد استفاده برای تأمین آب شیرین از زمین‌های ساحلی (اصلاح شده توسط تیاتینی/2006)

به طور طبیعی آبخوان‌های کم تراوا مترکم‌تر از سایر آبخوان‌ها هستند. کاهش فشار منفذی در آبخوان‌های کم تراوا تابعی از زمان و عوامل کنترل کننده‌ی تراکم است که در این بخش ارائه می‌گردد. قانون داریسی¹ سرعت جریان آب زیرزمینی را در آبخوان‌های کم تراوا تشریح کرده که در معادله‌ی 14 ارائه شده است.

$$v_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{معادله‌ی (۱۴)}$$

در این رابطه:

$$v_z = \text{سرعت ظاهری تراواش (LT}^{-1}\text{)}$$

$$K = \text{هدایت هیدرولیکی (LT}^{-1}\text{)}$$

$$h = \text{فشار ارتفاع هیدرولیکی } z + \frac{P}{\gamma} \text{ (L)}$$

$$z = \text{مختصات عمودی مثبت رو به پایین (L)}$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \text{شیب هیدرولیکی عمودی (LL}^{-1}\text{)}$$

هدایت هیدرولیکی تابع ویژگی‌های ویژگی‌های فیزیکی سیال و خاک است که در معادله‌ی 15 ارائه شده است:

$$K = k^* \frac{\gamma}{\mu} \quad \text{معادله‌ی (۱۵)}$$

در این رابطه:

$$k^* = \text{تراوایی ذاتی (L}^2\text{)}$$

$$\gamma = \text{وزن مخصوص آب (ML}^{-2}\text{T}^{-2}\text{)}$$

$$\mu = \text{گرانروی دینامیکی آب (ML}^{-1}\text{T}^{-1}\text{)}$$

تراوایی ذاتی تنها به ویژگی‌های محیط بستگی دارد:

¹ Darcy's Law

² Intrinsic Permeability

در این رابطه : $k^* = CD^2$
 $D =$ نمایش دهنده‌ی طول محیط متخلخل (به عنوان مثال، اندازه‌ی میانگین ذرات)
 $C =$ پارامتری که به نوع خاک بستگی دارد.

سایر رابطه‌های پیچیده‌تر (بر اساس تخلخل، میانگین قطر منافذ و مساحت سطح ویژه) برای تراوایی ذاتی رس‌های واکنش‌پذیر، بویژه زمانی که نمک‌ها در آب‌های منفذی انحلال یافته باشند، مشاهده می‌شود (رافنس پرگر و فریل¹/1991).

فرض بر این است که در شرایط ابتدایی تعادل برقرار است و همه‌ی مقادیر ارائه شده‌ی آب شناختی و ژئومکانیکی نسبت به مقادیر ابتدایی، افزایشی هستند. در ابتدا وزن آب در یک نمونه‌ی خاک با طول اولیه در متعادل است " Δz " سطح مقطع واحد (در عبارت زیر، 1 در نظر گرفته شده است) که بین زمان‌های " t و $t + \Delta t$ " می‌باشد.

- جریان ورودی: $(\gamma v_z)(1)(\Delta t)$
- جریان خروجی: $\gamma(v_z + \partial v_z / \partial z \Delta z)(1)(\Delta t)$
- وزن آب خروجی به وسیله‌ی انقباض منافذ متخلخل و انبساط آب در معادله‌ی 16 ارائه شده است (فرض بر این است که دانه‌های جامد تراکم‌ناپذیر بوده و کل تغییر حجم محیط همزمان با تغییرات حجم تخلخل است)

$$\text{معادله‌ی (۱۶)} \quad -[(\gamma \Delta(\phi \Delta z) 1 \Delta P) + (\gamma \phi \beta 1 \Delta P)]$$

در این رابطه " β " قابلیت فشردگی حجمی آب است ($ML^{-1}T^{-2}$)
 فرض می‌شود که در معادله‌ی 16 تنش کل زمین ایستایی " σ_c " ثابت باشد، بنابراین از معادله‌ی 3 خواهیم داشت:

$$\Delta \sigma_z = -\Delta P$$

تغییر فشار " ΔP "، زمانی که " P " کاهش یافته است، منفی خواهد بود (همانند زمانی که پمپاژ آب زیرزمینی صورت می‌گیرد). باید توجه داشت که " $\Delta(\phi \Delta z)$ " برابر با " $\Delta\{[e/(1+e)]\Delta z$ " و " $\Delta z/(1+e)$ " ثابت می‌باشد، زیرا این بخش جامد (دانه‌ها) دارای حجم اولیه‌ای برابر با " $(1)\Delta z$ " هستند. بنابراین با بازنویسی معادله‌ی 5 خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta e}{1+e} = c_b \Delta p$$

و از طرفی می‌توان نوشت:

جریان خروجی منهای جریان ورودی برابر با وزن آب خروجی از محیط است:

$$\gamma \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \Delta t = -\gamma(c_b + \phi \beta) \Delta z \Delta P$$

با حذف " γ " و " Δz " در دو طرف معادله و با یادآوری فشار ارتفاع هیدرولیکی " $h = z + p/\gamma$ " و دانستن " $\Delta p = \gamma \Delta h$ " و با استفاده از معادله‌ی 14 وقتی رویکرد تغییرات زمان به سمت صفر باشد " $\Delta t \rightarrow 0$ "، معادله‌ی 17 به دست می‌آید:

¹ Raffensperger & Ferrell

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \gamma(c_b + \phi\beta) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (17)$$

با حل معادله‌ی 17 و با تکمیل شرایط مرزی بالا و پایین و شرایط اولیه، کاهش فشار در آبخوان کم تراوا فراهم می‌گردد، در نتیجه " Δp " برای محاسبه‌ی تراکم آبخوان کم تراوا در برابر زمان، مورد نیاز است. ضریب ذخیره‌ی ویژه¹ از معادله‌ی 18 به دست می‌آید:

$$S_s = \gamma(c_b + \phi\beta) \quad (18)$$

در این رابطه " S_s " ذخیره‌ی کشسان ویژه (L^-) و همراه با هدایت هیدرولیکی " K "، ضریب تحکیم ترزاقی " c_v " را تعیین می‌کند که می‌تواند بزرگی و زمان‌بندی تراکم آبخوان کم تراوا را کنترل نمایند، همان‌گونه که در معادله‌ی 19 دیده می‌شود " $\phi\beta \ll c_b$ " برای طبقات آبخوان‌های محصور شده رایج می‌باشد.

$$c_v = \frac{K}{\gamma(c_b + \phi\beta)} \approx \frac{K}{\gamma c_b} \quad (19)$$

شرایط اولیه " $\Delta p = 0$ " برای کل ضخامت " b "، برای آبخوان کم تراوا در شرایط مرزی به وسیله‌ی " Δp " در بخش‌های بالایی و زیرین آبخوان‌ها است. اگر فشار افت نماید " Δp_0 " در بخش بالا " $z = 0$ " و در پایین " $z = b$ " خواهد بود و در نتیجه شرایط فشار در بالا و پایین و نقطه‌ی میانی آبخوان کم تراوا یکسان بوده و بنابراین " $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ " در " $z = b/2$ " خواهد بود در این حالت حل معادله‌ی 17 می‌تواند با بسط این سری‌ها بیان گردد. با نوشتن راه حل برحسب " p "، معادله‌ی 20 به دست می‌آید:

$$p = p_0 - \frac{4}{\pi} \Delta p_0 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\sin(\pi z/b)}{\exp(\pi/b)^2 c_v t} - \frac{1}{3} \frac{\sin(3\pi z/b)}{\exp(3\pi/b)^2 c_v t} - \dots \right] \quad (20)$$

در این معادله:

z = مختصات عمودی مثبت رو به پایین از بالای آبخوان کم تراوا " $0 \leq z \leq b/2$ "

t = زمان از تغییر اولیه در فشار در مرزهای آبخوان کم تراوا

برای " $t = 0$ " و داده‌های " $\pi z/b = x$ ($0 \leq x \leq \pi/2$)"، می‌توان معادله‌ی 21 را از روی معادله‌ی 20 نوشت:

$$p(z=0) = p_0(z) - \frac{4}{\pi} \Delta p_0 \left[\left(\frac{\pi}{4} - \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x - \dots \right) \right] \quad (21)$$

مقادیر داخل پرانتز در معادله‌ی 21، سری فوریه‌ی² گسترش یافته و تابع $f(x)$ است:

$$f(x) = \begin{cases} \pi/4 & \text{برای } 0 \leq x < \pi \\ -\pi/4 & \text{برای } \pi < x \leq 2\pi \end{cases}$$

به یاد داشته باشید که بازه‌ی تغییرپذیری " x ($0 \leq x \leq \pi/2$)" می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که دقت معادله‌ی 20 نشان دهنده‌ی فشار منفذی اولیه و در زمان صفر است " $t = 0$ "

¹ Specific Storage Coefficient

² Fourier Series

6-2- عامل زمان و نیمرخ تراکم

تراکم (مثبت) " $\eta(t)$ " نیمی از آبخوان کم تراوا در زمان " t " برابر است با :

$$\eta(t) = \int_0^{b/2} c_b (p_0 - p) dz$$

با جایگزینی در معادله‌ی 20 و انتگرال گیری به معادله‌ی 22 می‌رسیم :

$$\eta(t) = \frac{4}{\pi^2} c_b \Delta p_0 b \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\exp((2n+1)\pi/b)^2 c_v t} \right\} \quad (22)$$

برابری " $t = 0$ " می‌توان " $\eta(0) = 0$ " به دست آورد، زمانی که " $t = \infty$ " باشد، معادله‌ی 22 به معادله‌ی 23 تبدیل می‌شود:

$$\eta(\infty) = \frac{4}{\pi^2} c_b \Delta p_0 b \left(1 + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \dots \right) \quad (23)$$

همگرایی در سری بالا به " $\frac{\pi^2}{8}$ " و در نتیجه " $\eta(\infty)$ " حد تراکم نهایی است. برای نیمی از آبخوان‌های کم تراوا است که بیشتر برای آبخوان‌های متفاوت با استفاده از معادله‌های 4 و 5 نمایش داده شده و به صورت معادله‌ی 24 بازنویسی می‌گردد:

$$\eta(\infty) = c_b \Delta p_0 \frac{b}{2} \quad (24)$$

نکته‌ی جالب محاسبه‌ی زمان موردنیاز برای آبخوان کم تراوا به صورت درصدی از تراکم کامل " $\eta(\infty)$ " و با استفاده از معادله‌ی 24 محاسبه می‌گردد. برای رسیدن به این هدف عامل زمان " t_v " بدون ابعاد (معادله‌ی 25)، توسط تزراقی در سال 1923 تعریف گردید:

$$T_v = 4 \frac{C_v t}{b^2} \quad (25)$$

قابل ذکر است که درصد تراکم " w " در معادله‌ی 26 تنها تابع " T_v " است

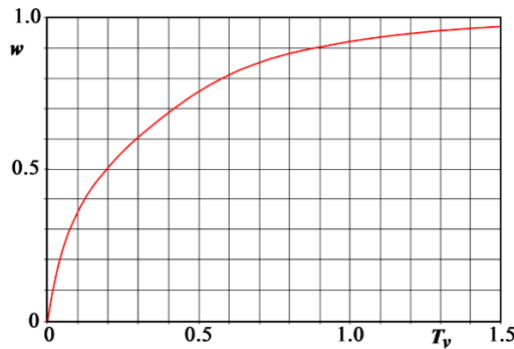
$$w(T_v) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\exp[\pi^2 (2n+1)^2 T_v / 4]} \right\} \quad (26)$$

رفتار " $w(T_v)$ " در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. در اینجا دو روش برای استفاده از شکل ۷-۲ وجود دارد:

- درصد معینی از تراکم نهایی را در شکل ۷-۲ وارد کنید. تا " (T_v) " متناسب با آن به دست آید، زمان " t " موردنیاز برای رسیدن به آن درصد از روی معادله‌ی 25 محاسبه می‌گردد و یا :
- انتخاب یک زمان " t "، محاسبه‌ی " (T_v) " از معادله 25 و سپس تعیین درصد تراکم از روی شکل 17 صورت می‌گیرد.

تراکم آبخوان کم تراوا در زمان " t " در معادله‌ی 27 ارائه شده است :

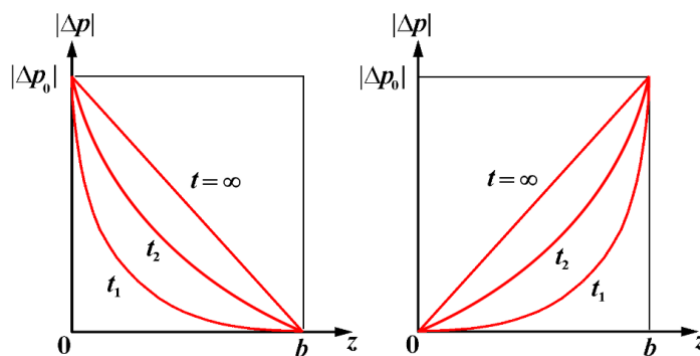
$$\eta(t) = 2w(T_v)\eta(\infty) = w(T_v)c_b \Delta p_0 b \quad (27)$$



شکل 7-2: رفتار تراکمی در آبخوان‌های کم‌تراوا " $\eta(t)$ " تراکم نسبی تا نهایی

" T_v " در برابر عامل زمان $c_b \Delta p_0 b, \eta(\infty)$

همچنین شکل ۷-۲ برای محاسبه‌ی تراکم یک آبخوان کم‌تراوا که در تماس با یک آبخوان نامولد تولید آب، است، قابل استفاده می‌باشد، به عنوان مثال اگر " $\Delta p_0 = 0$ " در کف آبخوان کم تراوا باشد، با توجه به خطی بودن معادله‌ی 17 و با " Δp_0 " برابر در بالا و پایین آبخوان کم تراوا، با روی هم قرارگیری تأثیرات آن‌ها می‌توان به طور جداگانه تراکم آبخوان کم تراوا را در صورتی که " $\Delta p_0 \neq 0$ " در بالا و " $\Delta p_0 = 0$ " در پایین و به طور وارونه " $\Delta p_0 = 0$ " در بالا و " $\Delta p_0 \neq 0$ " در پایین باشد، آنها را محاسبه کرد. رفتار " Δp " در برابر " z " برای مقادیر زمانی مختلف در شکل ۸-۲ و به ترتیب از راست و چپ نشان داده شده است.



شکل 8-2: رفتار نمادین کاهش فشار منفذی در یک آبخوان کم تراوا

تحت تأثیر کاهش سریع فشار منفذی " Δp_0 " در بالا (سمت چپ " $z = 0$ ") و در پایین (سمت راست " $z = b$ ") برای نمایش مقادیر زمان

ناحیه‌ی زیر نیمرخ " Δp_0 " در هر زمان معین، به عنوان مثال " t_1 " در تصاویر چپ و راست شکل 18 مشابه هم هستند با این وجود چنین ناحیه‌ای متناسب با تراکم آبخوان کم‌تراوا در بالا و پایین " $\Delta p_0 \neq 0$ "، یعنی نیمی از میزان " $\eta(t)$ " ارائه شده در معادله‌ی 22 است. به طور خلاصه، اگر یکی از آبخوان‌های مجاور پمپاژ نشود می‌توان تراکم آبخوان‌های کم‌تراوا را با استفاده از معادله‌ی ۲۲ و 24 و به ترتیب در زمان‌های " t " و " $t = \infty$ " به دست آورد. همچنین می‌توانیم از نمودار 7-2 که پیشتر توضیح داده شده با درصد تراکمی نسبت به تراکم نهایی که در معادله‌ی ۲۴ ارائه شده، استفاده نماییم.

یک تعمیم‌سازی ساده از نتایج پیشین، نشان می‌دهد که آبخوان‌های بالا و پایین افت‌های متفاوتی را در فشارهای منفذی مختلف تجربه می‌کنند یعنی " $\Delta p_1 \neq \Delta p_2$ ". تراکم نهایی آبخوان کم تراوا در معادله‌ی 28 ارائه شده است:

$$\eta(\infty) = \frac{1}{2}(\Delta p_1 + \Delta p_2)c_b b \quad \text{معادله‌ی (۲۸)}$$

شکل 17 ممکن است برای توصیف درصد نسبی " $\eta(\infty)$ " در معادله‌ی 26 مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که کاهش فشار منفذی " $\Delta p_1, \Delta p_2$ " در بالا و پایین یک آبخوان کم‌تراوا، تابعی پیوسته از زمان هستند و می‌توانند به صورت گام به گام با افزایش افت نسبت به زمان برآورد گردند.

3 - اندازه‌گیری و پایش فرونشست و تراکم

واکوی و پیش‌بینی تأثیرات ناشی از فعالیت‌های انسانی در فرونشست زمین به دلیل پمپاژ، نیازمند مطالعات اکتشافی و شناسایی دقیق از گستره‌ی موردنظر است و بایستی جزئیات دقیق جانمایی، زمین‌شناسی حوضه، شکل هندسی، بازسازی و بهینه‌سازی نرخ پمپاژ، میزان فشار ارتفاع و جابجایی‌های سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد. ویژگی‌های ژئومکانیکی و هیدرولیکی دارای بیشترین اهمیت هستند، تنش‌های پیش‌تحکیمی، پهنه‌هایی با فشارهای بیش از اندازه و وجود راندگی‌ها و گسل‌ها به همراه گسترش و جهت‌گیری آن‌ها و ویژگی‌های ژئومکانیکی آن‌ها (مانند زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی)، بایستی به دقت تعیین شوند. کاربرد فن‌آوری‌های پیشرفته مانند کاوش‌های لرزه‌ای 2 بعدی و 3 بعدی، اکتشافات الکترومغناطیسی هوا برد¹، چاه پیمایی²، حفر گمانه‌های اکتشافی، آزمون‌های پمپاژ و آزمون‌های آزمایشگاهی ویژه، می‌توانند ارزشمند باشد. بیشترین پیشرفت فن‌آوری‌ها در ابزارهای ترازیابی³ و پایش دقیق جابجایی‌های سطحی زمین صورت گرفته است. فن‌آوری‌های جدید شامل سامانه‌ی جهانی رادار تصویربرداری⁴ "GNSS" و تداخل‌سنجی راداری "InSAR" می‌باشد که میزان فرونشست زمین از فضا را با دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند. همچنین پیشرفت‌هایی در اندازه‌گیری تراکم آبخوان‌های کم‌ژرفا تا ژرف به وسیله‌ی کابل‌های تک‌سطحی و چند سطحی مغناطیسی کشش‌سنج‌ها، صورت گرفته است.

الگوسازی و پیش‌بینی فرونشست‌های زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی به طور پیوسته توسعه یافته است. پژوهشگران هم از دستگاه‌های رایانه‌ی پیشرفته (به عنوان مثال، سخت‌افزارهای موازی) و هم از فناوری‌های اندازه‌گیری پیشرفته برای تعیین حرکات افقی و عمودی زمین استفاده می‌نمایند (به عنوان مثال، سامانه‌ی موقعیت‌یاب تفاضلی جهانی "DGPS"⁵ و فناوری‌های "InSAR" استفاده می‌کنند). ابزارهای الگوسازی در تعیین و تمایز بین حالت‌های چندگانه مفید هستند و می‌توانند به طور مؤثری با فن‌آوری‌های اندازه‌گیری ترکیب شوند. این الگوها بایستی با توجه به تاریخچه‌ی مشاهدات آبخوان‌ها، واسنجی شده باشند تا بتوانند برای پیش‌بینی ظرفیت‌ها و ارزیابی طرح‌های آب‌های زیرزمینی در آینده، مورد استفاده قرار گیرند، همچنین اینها می‌توانند برای توسعه‌ی برنامه‌های مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب و تعیین پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی - اجتماعی استفاده شوند. از این الگوها برای ارزیابی پیامدهای نامطلوب استخراج سیالات در محیط‌ها با بازه‌های زمانی دراز مدت و بویژه برای مدیریت سیلاب‌های شهری در مناطق ساحلی و سایر محیط‌های آسیب‌پذیر، کاربرد وسیعی دارد. در بخش‌های بعدی الگوهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری فرونشست زمین ارائه شده است.

¹ Airborne-Electromagnetic

² Well Log

³ Spirit Levelling

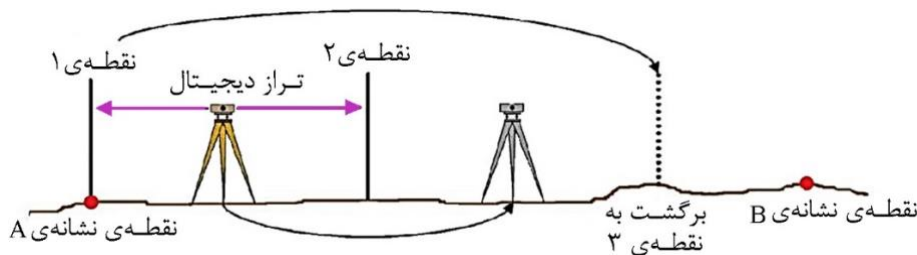
⁴ Global Navigation Satellite System "GNSS"

⁵ Differential Global Positioning System

"DGPS"

3-1-ترازیابی

ترازیابی روش متداول تعیین تغییرات ارتفاع زمین است و با وجود سادگی می‌تواند بسیار دقیق باشد. ابزارها و رویکردها به طور کامل در کتاب‌های راهنما شرح داده شده‌اند (راپلیه¹/1948 و فلویدم²/1978). این فن آوری در قرن نوزدهم گسترش یافت که تا امروز به صورت گسترده‌ای کاربرد دارد. این روش به نقشه‌برداران این اجازه را می‌دهد تا با استفاده از دوربین‌های دقیق ترازیابی و سایر علامت‌های ژئودزی، ارتفاع نقطه‌ای را از یک نقطه‌ی مبنای شناخته شده به سایر نقاط انتقال دهند. در هر پیمایش اختلاف ارتفاع "ed" بین دو نقطه‌ی مبنای با تجمیع اختلاف ارتفاع بین دسته‌ای از نقاط رفت و برگشتی ثبت می‌شود. در این روش فرض می‌شود که نقطه‌ی مرجع ثابت می‌باشد، بنابراین در مناطق فعال زمین ساختی بایستی دقت ویژه‌ای داشت. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده "ed" در جهت‌های پشت و جلو برای پیمایش‌های بسیار دقیق نبایستی بیشتر از " $1/5\sqrt{D}$ " (میلیمتر) و برای پیمایش‌های دقیق این میزان نبایستی بیشتر از " $3\sqrt{D}$ " (میلیمتر) باشد. طول خط اصلی بر حسب کیلومتر است. معمولاً نقاط شاخص در فاصله‌ی 1 کیلومتری و نقاط عطف در فاصله‌ی 20 تا 100 متری از یکدیگر قرار می‌گیرند. هنگامی که شبکه‌ای از نقاط مبنایی ایجاد شد ترازیابی دقیق انجام می‌گردد و بررسی‌های پسین در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که آیا جابجایی‌های عمودی صورت گرفته است یا خیر؟ (شکل 3-1)



شکل 3-1: نمایی از یک پیمایش ترازیابی

استفاده از ترازهای دیجیتالی و شاخص‌های نوری (با آلیاژی از آهن و نیکل با ضریب انبساط بسیار ناچیز) برای بالابردن دقت، حذف خطاهای انسانی و افزایش سرعت اندازه‌گیری کمک می‌کنند. برای راستی آزمایی در طولانی مدت، نقاط مرجع بر روی سازه‌های بزرگ مانند دیوارهای پل‌ها، رخنمون‌های سنگ بستر و یا در بالای میله‌های به طول 5 تا 10 متر که به درون زمین رانده شده‌اند و توسط یک غلاف بیرونی محافظت می‌شود، جاگذاری می‌شوند. نمونه‌ای از شبکه‌های ترازیابی برای کنترل فرونشست زمین ناشی از افت سطح سیالات توسط ایکهارا³ و توسی⁴ و همکاران/2007، ارائه شده است.

3-2-سامانه‌های جهانی تصویربرداری رادار⁵ "GNSS"

این سامانه‌ها در اوایل دهه‌ی 1970 گسترش یافت و در میانه‌ی دهه‌ی 1990 برای بررسی و پایش جابجایی‌های ناشی از زمین‌لرزه‌ها، حرکات زمین ساخت ورقه‌ای و تغییر شکل صفحات مرزی استفاده

¹ Rappleye² Floyd³ Ikehara⁴ Tosi⁵ Global Navigation Satellite Systems "GNSS"

گردید. این سامانه‌ها شامل سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی ایالات متحده، "GPS" سامانه‌ی تصویربرداری راداری روسیه "GLONASS" و سامانه‌ی اتحادیه‌ی اروپا "گالیله"¹ می‌باشد. این سامانه‌ها به طور کلی اگرچه به اشتباه "GPS" نامیده می‌شوند، ولی در حقیقت سنجنده‌هایی در مدار زمین هستند که علائم رادیویی را برای دست آوردن موقعیت دقیق سطح زمین، تولید می‌کنند. سامانه‌ی "GPS" مجموعه‌ای متشکل از 24 سنجنده در عرض جغرافیایی و در 20.000 کیلومتری از سطح زمین و با زاویه‌ی 55 درجه نسبت به خط استوا قرار گرفته است. تا اکتبر 2017، 31 سنجنده‌ی "GPS" در مدار زمین وجود داشت.

دست‌کم علائم دریافتی از چهار ماهواره می‌توانند توسط گیرنده‌ای مستقل در هر نقطه‌ای از زمین و یا نزدیک به آن، مورد استفاده قرار گیرند تا موقعیت مطلق تقریبی آن را تعیین نمایند. اندازه‌گیری دقیق حرکات پوسته‌ی زمین را می‌توان "GNSS" و با تعیین میزان جابجایی نسبی بین گیرنده‌های آن انجام داد. از چند ایستگاه در اطراف مناطق در حال تغییر شکل فعال (مانند یک آتشفشان و یا پهنه‌های گسلی)، برای تعیین میزان جابجایی و کرنش زمین، استفاده می‌شود. در دهه‌های گذشته تعداد زیادی از ایستگاه‌های ردیابی "GNSS" (ایستگاه‌های پایه) در سراسر جهان ایجاد شده است. این شبکه‌های بزرگ فراملی و فراقاره‌ی توسط نهادها و مشارکت نهاد‌های مختلف مدیریت می‌شوند (مانند "SOPAC"، "UNAVCO" و "EUREF"^{***})

*-Spac.UCSd.edu/index.shtml

**www.unavco.org

***www.opneb.oma.be

مشاهدات "GNSS" که به طور همزمان در دو گیرنده جمع‌آوری می‌شود (یک گیرنده ممکن است یک سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی باشد) که برای محاسبه‌ی یک خط مبنایی دقیق در بین گیرنده‌ها استفاده می‌شود. با توجه به شناخته شدن مکان "GNSS"، موقعیت سه بعدی گیرنده‌ی متحرک زمینی با افزودن بردار خط مبنایی مشاهده شده نسبت به موقعیت شناخته شده، محاسبه می‌شود. بدین ترتیب شبکه‌های ژئودزی نقاط مرجع در پهنه‌های فرونشست ایجاد می‌گردد و به عنوان سنجنده‌های تصویربرداری بر روی نقاط مبنا و برای یک و یا چند ایستگاه "GNSS" موجود در منطقه، بررسی می‌شوند. یک نمونه برای منطقه‌ی ونیز ایتالیا در شکل ۳-۲ ارائه شده است. یکی از اولین شبکه‌هایی که به طور ویژه برای پایش میزان فرونشست زمین که ناشی از استخراج آب زیرزمینی بوده در دره‌ی آنتلوپ² در صحرای موجا³ در کالیفرنیا ایالات متحده در سال 1992 ایجاد گردید. (ایکهارا و فیلیپس/1994).

3-3-تداخل سنجی "InSAR"

در دو دهه‌ی گذشته مقالات علمی زیادی در مورد روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح زمین، به ویژه حرکات زمین ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی منتشر شده است (آملونگ⁴ و همکاران/1991، هافمن و همکاران/2001، باکلی⁵ و همکاران/2003، هافمن و همکاران/2003، گالووی و هافمن/2007، بل و همکاران/2008، هیگینز⁶ و همکاران/2014، توسی و

¹ Galileo

² Antelope

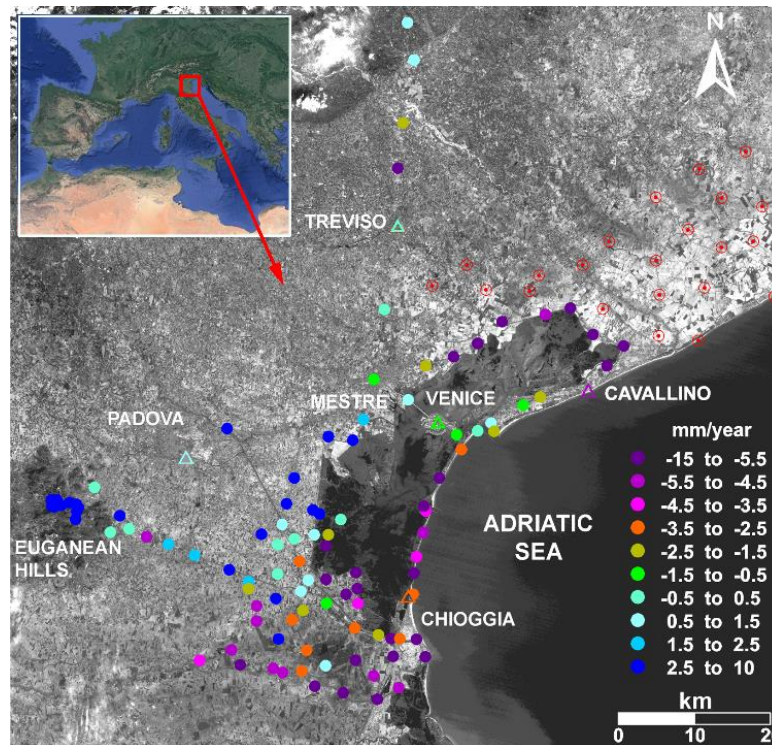
³ Mojave

⁴ Amelung

⁵ Buckley

⁶ Higgins

همکاران/2016، دالیو¹ و همکاران/2018). مهمترین و پرکاربردترین فناوری‌های پردازش تداخل سنجی در بین الگوریتم‌های متنوع و که پیوسته در حال افزایش هستند، عبارتند: از تداخل سنجی تفاضلی² "DInSAR" (گابریل³ و همکاران/1989) تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌ی دائمی⁴ PS In SAR (فررتی⁵ و همکاران/2001)، زیر مجموعه‌ی خط مبنای اولیه "SBAS" (براردینو و همکاران/2002)، تجزیه و تحلیل اهداف نقاط تداخلی⁶ IPTA (وگمولر⁷ و همکاران/2004)، تداخل سنجی نقاط مترکم⁸ "SqueeSAR" (فررتی/2011).



شکل 2-3: تصویر راداری لندست از گستره‌ی ونیز ایتالیا با استفاده از شبکه‌ای "GNSS" (دایره) و "C-GNSS" (مثلث‌ها)

رنگ‌ها نشان دهنده‌ی نرخ جابجایی (میلی‌متر در سال) هستند که در سال‌های 1999 تا 2003 اندازه‌گیری شده است. دایره‌های قرمز توخالی نقاط مرجع جدید "GNSS" است که در سال 2004 به شبکه اضافه گردیدند. (تیاتینی و همکاران/2005)

فناوری‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری از اختلاف فاز علایم راداری بین تعدادی (دست‌کم دو) سنجنده در همان منطقه استفاده می‌کنند. اختلاف فاز به طور دقیق مربوط به جابجایی سطح زمین است که پس از حذف اثر توپوگرافی سطح و کاهش اختلالات جوی، آشکار می‌شود. روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی امکان تشخیص و اندازه‌گیری حرکت زمین را در مقیاس‌های زیر سانتی‌متر با جزئیات فضایی و وضوح اندازه‌گیری بالا فراهم می‌کنند.

چندین سنجده راداری از سال 1991 تاکنون فعال بوده‌اند:

¹ Da Liu

² Differential SAR Interferometry "DINSAR"

³ Gabriel

⁴ Permanent Scatter InSAR- PSINSAR

⁵ Ferretti

⁶ Interferometric Point Target Analysis "IPTA"

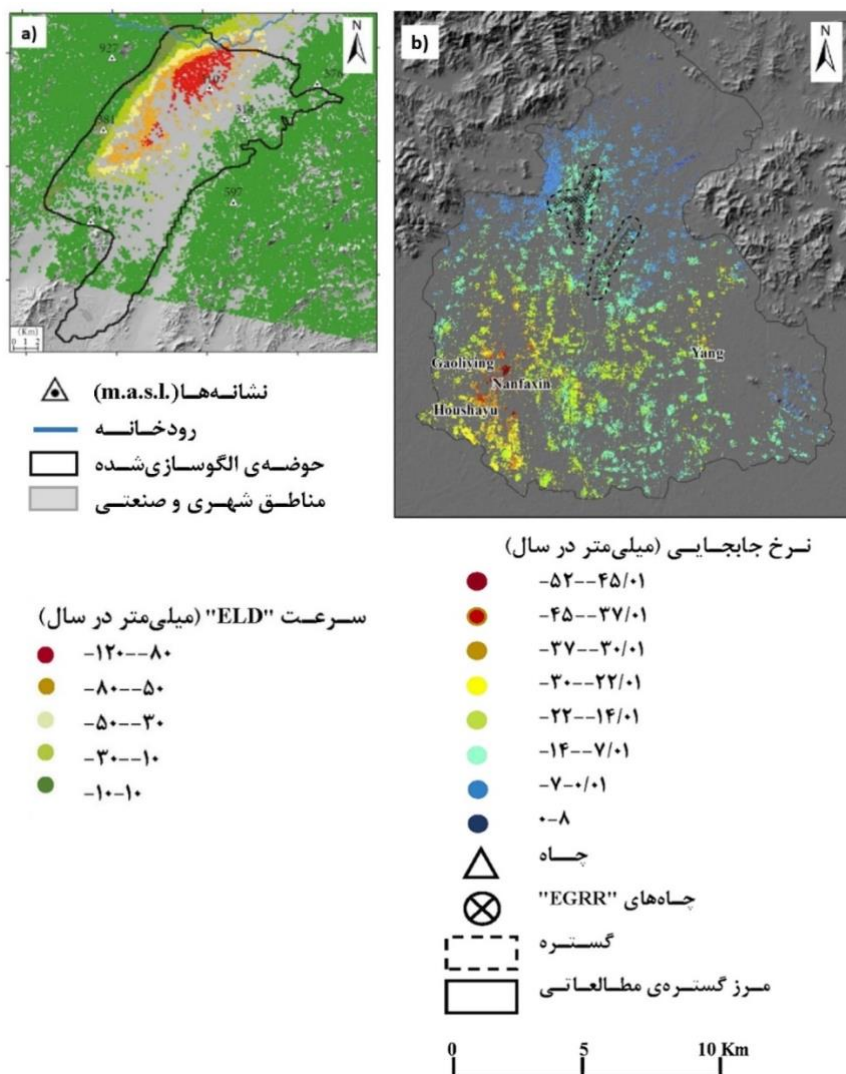
⁷ Wegmuller

⁸ Squeezed SAR "Squee SAR"

(ERS-1/2; ENVISAT; JERS-1; Radarsat-1/2, ALOS, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed)

سنجندهی سنتینل¹ از اواسط سال 2014 بهره‌برداری شده است، بنابراین بایگانی داده‌های راداری در بسیاری از مناطق وجود دارد. شکل 3-3 دو نمونه‌ی قابل توجه از فرونشست‌های زمین را که بوسیله‌ی سنجنده‌های راداری مشخص شده، نشان می‌دهد.

همانند شرایط تراز یابی، داده‌های به دست آمده از "SAR"، اندازه‌گیری‌های تفاضلی هستند یعنی جابجایی نسبت به یک نقطه‌ی مرجع به دست می‌آیند، بنابراین، جابجایی‌ها از نقطه‌ی مبنا بایستی مشخص گردد. به عنوان مثال از پیمایش‌های پیشین و یا ایستگاه‌های دائمی "GPS" برای واسنجی نتایج حاصله از "SAR" و به دست آوردن جابجایی مطلق استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های داده‌های "SAR"، اندازه‌گیری‌های یک‌بعدی در ارتباط با بردار امتداد خط دید ماهواره‌ای² "LOS" بوده و بردار جابجایی سه بعدی بر روی هدف اصلی رادار تأثیرگذار است.

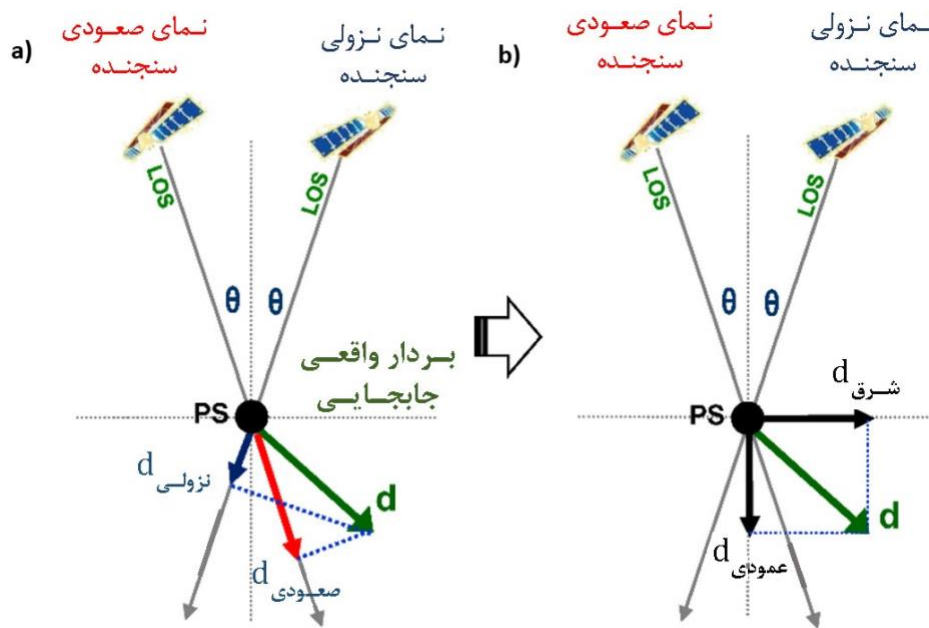


شکل 3-3: (a -) آبخوان آلتو گوادانتین در جنوب شرق اسپانیا سرعت تغییر شکل "LOS" از داده‌های "ERS" از (کونور، 2017)

¹ Sentinel

² Line Of Sight "LOS"

(b) دشت شمالی پکن در چین، میانگین نرخ جابجایی توسط "IPTA" از ژوئن 2003 تا ژانویه 2010 مقادیر منحنی نشانه‌ی فرونشست زمین و مقادیر مثبت نشانه‌ی میانگین برخاستگی است (ژو و همکاران/2015) با توجه به اینکه زاویه‌ی دید رادار کمتر از 45 درجه نسبت به خط عمود است، در نتیجه سنجنده‌ی راداری نسبت به حرکت عمودی بسیار حساس می‌باشد با این حال ترکیب چرخش زمین و حرکت سنجنده، امکان تصویربرداری شفاف را برای هر گستره‌ی موردنظر فراهم می‌کند. صفحه‌ی اصلی سنجنده در امتداد دو خط پروازی، متفاوت است. سنجنده‌ای که از جنوب به شمال پرواز می‌کند که به عنوان "نمای صعودی"¹ و دیگری از شمال به جنوب پرواز می‌کند که به نام "نمای نزولی"² شناخته می‌شود که در شکل 3-4 ارائه شده است.



شکل 3-4: هندسه‌ی تصویربرداری سنجنده‌ی "SAR" در امتداد مدارهای صعودی و نزولی

و تصویر مرتبط با جابجایی "LOS" و مؤلفه‌های حرکات سه بعدی را نشان می‌دهد.

- a - ترکیب مؤلفه‌های جابجایی در امتداد جهت‌های صعودی و نزولی "LOS" برای تعیین کمیت جابجایی‌های واقعی "d"
- b - مؤلفه‌های جابجایی در جهت عمودی و غربی - شرقی است

هر زمان که دو مجموعه داده از سنجنده‌های راداری در دسترس باشند که در یک منطقه و در یک بازه‌ی زمانی یکسان و در امتداد مدارهای صعودی و نزولی به دست آمده باشند، نتایج سنجنده‌ی راداری را می‌توان برای تخمین جابجایی‌های محلی استفاده کرد. (مؤلفه‌ها عمودی و غربی - شرقی باشند) به این ترتیب شناخت ما را از رویدادهای مورد مطالعه به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند. برای منطقه‌ی فونیکس³، در آریزونا که در شکل 3-5 نشان داده شده است می‌توان برای محاسبه از معادلات زیر استفاده کرد: (پیپه و کالو⁴/2077)

¹ Ascending Mode

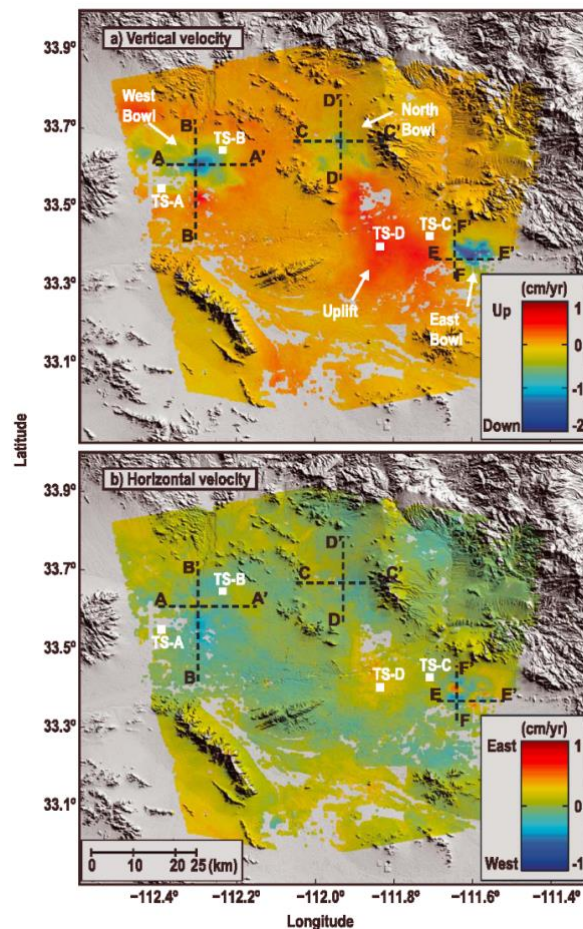
² Descending Mode

³ Phoenix

⁴ Pepe & Calo

$$\begin{bmatrix} d_{\text{vertical}} \\ d_{\text{east}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_{\text{asce}} - d_{\text{desce}}}{2 \sin \theta} \\ \frac{d_{\text{asce}} + d_{\text{desce}}}{2 \cos \theta} \end{bmatrix}$$

زنجیره‌های پردازش سنجنده‌های راداری "SAR" امکان تصویربرداری از میلیون‌ها نقطه‌ی داده را در یک منطقه‌ی بزرگ، "10⁴ تا 10⁵" نقطه در هر کیلومتر مربع، فراهم می‌کند و اغلب ارزان‌تر از اندازه‌گیری نقاط پراکنده از ایستگاه‌های موقعیت‌یاب جهانی "C-GPS" هستند. علاوه بر این نتایج سنجنده‌های راداری نشان داده‌اند که شناسایی جابه‌جایی‌های زمین به دلیل برداشت آب‌های زیرزمینی و تزریق با سایر فن‌آوری‌های نقشه‌برداری غیر ممکن است و به همین دلیل در سال‌های گذشته اندازه‌گیری میزان فرونشست با استفاده از داده‌های تراز یابی "GPS" کمتر مورد توجه قرار گرفته است، با این حال ما تأکید می‌کنیم که برای واسنجی نتایج حاصل از سنجنده‌های راداری، استفاده از داده‌های "GPS" در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم و زمین‌های کشاورزی، برای راستی‌آزمایی تحلیل‌های تداخل سنجی راداری "SAR"، ضروری هستند.



شکل 3-5: گستره‌ی فونیکس در آریزونا

a - نقشه‌ی عمودی و b - نقشه‌ی افقی سرعت بر اساس تلفیق داده‌های نزولی و صعودی "ENVISAT" مرتب شده است.

3-4- کشش سنج گمانه‌ها 1

اندازه‌گیری پیوسته‌ی تغییر شکل خاک (معمولاً کم) در تعدادی از مناطق فرونشینی با استفاده از کشش سنج‌های گمانه‌ها انجام شده است. آن‌ها تغییرات فاصله‌ی بین سطح زمین و نشانه‌های مبنایی زیر سطحی را که در انتهای گمانه‌های ژرف قرار دارند، اندازه‌گیری می‌کنند. اگر نشانه‌ی مبنای زیر سطحی² در زیر سامانه‌ی آبخوان متراکم و یا بر روی سنگ بستر قرار گرفته باشد، کشش سنج‌ها می‌توانند به عنوان مرجع پایدار پیمایش‌های ژئودزی³ محلی مورد استفاده قرار بگیرند. اولین گونه از این کشش سنج‌ها در سال 1955 به وسیله‌ی سازمان زمین شناسی آمریکا "USGS" در دره‌ی سان خواکین در کالیفرنیا نصب گردید (پولند/1984). از آن زمان تاکنون فناوری‌های کشش سنج‌ها به تدریج گسترش یافته است و نقش مهمی در ارتباط با تعیین فرونشست‌های زمین ناشی از تراکم آبخوان‌های محصور، ایفا می‌نمایند.

گونه‌های متعددی از کشش سنج‌های اولیه به وسیله‌ی پولند در سال 1984 مورد بازنگری قرار گرفت. به تازگی کشش سنج‌های مهاری با وزنه‌های تعادلی⁴ و کشش سنج‌های جداری دارای اتصال لغزشی⁵ به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابزارهای اندازه‌گیری به صورت نمایی در شکل‌های "3-b" و "6a" نمایش داده شده است. یک کشش سنج مهاری با وزنه‌های تعادلی شامل یک میله‌ی تعادلی برای نگهداری کابل و یا لوله است که یک انتهای آن را به یک مهاربند وزنی که در انتهای سامانه‌ی متراکم قرار دارد، چفت و بست می‌کند و در انتهای دیگر، وزنه‌ی تعادلی کابل را با کشش ثابت حفظ می‌کند. به منظور ساخت یک کشش سنج جداری دارای اتصال لغزشی، گمانه‌هایی ژرف تا رسیدن به سنگ‌های مناسب حفر می‌گردد. سپس گمانه با یک لوله‌ی جداری فولادی با اتصال لغزشی برای جلوگیری از مچاله شدن⁶ در هنگام فرونشست، محافظت می‌شود. سپس یک لوله در پوشش بتنی در انتهای گمانه قرار گرفته و تا بالای گمانه ادامه می‌یابد. اندازه‌گیری فاصله‌ی این لوله تا سطح زمین پیرامونی، میزان تراکم در فاصله‌ی زمانی معین شده را نشان می‌دهد (شکل 3-b-6). سامانه‌ی کنترل رایانه‌ای داده‌های تراکم را در برابر زمان ثبت می‌کند. دقت ابزارها به شدت به نصب و راه اندازی کشش سنج‌ها بستگی داشته ولی دقت اسمی تغییر شکل "0/1 تا 0/01 میلی متر" می‌تواند در ژرفای 200 تا 1000 متری به دست آید (رایلی/1986/7).

در شرایطی که با چندین آبخوان در یک گستره روبرو باشیم، کشش سنج‌ها در ژرفای متفاوت گمانه‌های چندگانه قرار گرفته و تغییر شکل را در هر سازند و به صورت مستقل ثبت خواهند کرد و با تفریق داده‌ها در ژرفای متفاوت، نرخ فرونشست به دست می‌آید. یک جایگزین مناسب برای ایستگاه‌های کشش سنج‌های چندگانه، استفاده از کشش سنج‌هایی با موقعیت‌های چندگانه به همراه تعدادی از نشانگرهای منفرد هستند که در ژرفای متفاوت یک گمانه در یک سازند مهاربندی می‌شوند. (شکل 3-6c) از نشانگرهای مغناطیسی در تایوان (هوانگ⁸ و همکاران/2008 و هونگ⁹ و همکاران/2012) برای محاسبه‌ی تراکم عمودی در گمانه‌ها، با استفاده از چاه‌پیمایی‌های دوره‌ای با حسگرهای مغناطیسی بر روی خطوط و یا نوارهای واسنجی‌شده، برای اندازه‌گیری موقتی تغییرات موقعیت نشانگرها، استفاده شده است. این روش توانایی

¹ Borehole Extensometer

² Benchmark

³ Geodetic

⁴ Cable Counterweighted Extensometer

⁵ Slip Joints Casing Extensometer

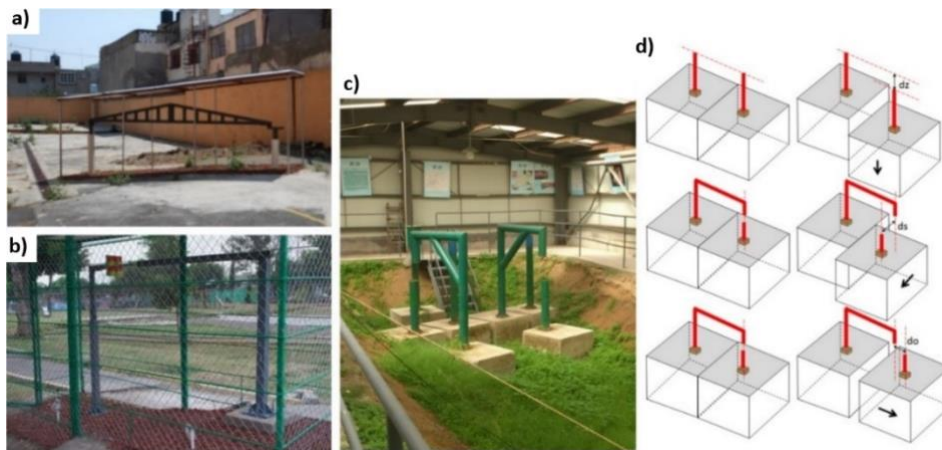
⁶ Crumpling

⁷ Riley

⁸ Hwang

⁹ Hung

(کارپنتر¹/1993). کشش سنج‌های مدفون از لوله‌ها و یا سیم‌های کوارتزی برای اندازه‌گیری پیوسته‌ی بازشدگی درزه‌ها و شکاف‌ها در محیط‌های طبیعی و تا فواصل بیش از 330 متر مورد استفاده قرار گرفته است. پیرو افزایش رخدادهای گسستگی زمین‌ها به تازگی در بسیاری از کشورهای جهان، سایر تجهیزات و ابزارهای نوری² و مکانیکی گسترش یافته و بویژه در مناطق شهری مانند ایزتاپالاپا³ در مکزیکویستی (کاریون- فریره⁴/2010) و شهر پکن در چین (ژو⁵ و دیگران)، به کار گرفته شد. این ایستگاه‌های پایش، اندازه‌گیری دقیق جابجایی‌های نسبی گسستگی‌ها را به صورت یک بعدی (تنها بازشدگی) و یا سه بعدی (بازشدگی و لغزش) و با استفاده از سامانه‌های مرجع، امکان‌پذیر می‌سازند. (شکل 3-7)



شکل 3-7: نمونه‌هایی از تجهیزات تک کاره " Ad Hoc " که پایش بازشدگی‌ها

و لغزش‌های ترک‌های زمین و یا فعال شدن گسل‌ها را به دلیل اضافه برداشت از منابع آبی آبخوان‌ها را نشان می‌دهد. a - ابزاربندی یک‌بعدی، b - ابزاربندی سه‌بعدی در ایزتاپالاپا، c - ابزاربندی سه‌بعدی در دشت شمالی پکن و d - برشی از چگونگی جابجایی سه‌بعدی قابل اندازه‌گیری در دشت شمالی پکن را نشان می‌دهد.

3-5-3- فیبر نوری⁶

به دنبال گسترش و نیاز به پایش زیر ساخت‌های عمرانی، استفاده از حسگرهای فیبر نوری⁷ "FOS" در سال‌های گذشته افزایش یافت تا مشاهدات به موقع و اعلان هشدارهای اولیه‌ی خطرات طبیعی و ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند زمین لغزش‌ها⁸ (شناتو⁹/2017) جریان‌های واریزه‌ای، فرونشست (وو و همکاران/2015) و درز و شکاف زمین (لیو¹⁰ و همکاران/2017) امکان‌پذیر گردد. فرض بر این است که ویژگی‌های حسگرهای فیبر نوری تحت تأثیر محیط‌های پیرامونی قرار می‌گیرد و بر روی خواص فیبرها اثرگذار می‌باشد و به سادگی دمای محلی و تأثیر ذاتی کرنش‌ها و شدت علایم انتشار یافته و در نتیجه‌ی تغییرات دمایی ناشی از جابجایی‌ها، بارگذاری‌ها، فشارهای زمین، فشار منفذی آب و رطوبت خاک، می‌گردد. شناتو و ژو در سال 2017 دقت این روش‌ها را بررسی کردند.

¹ Carpenter

² Optical

³ Iztapalapa

⁴ Carreon- Freyre

⁵ Zhu

⁶ Fiber Optics

⁷ Fiber Optics Sensors "FOS"

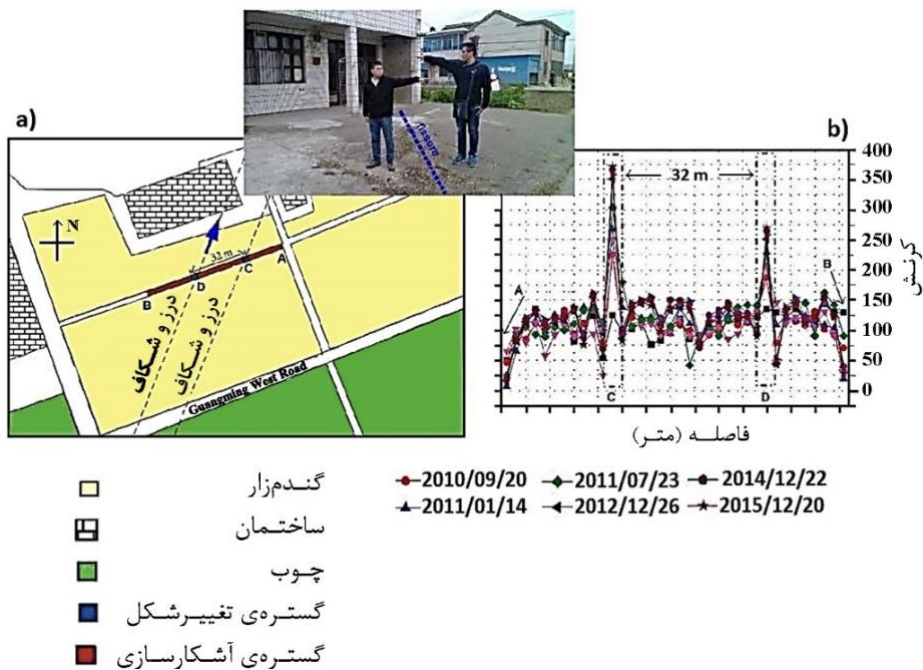
⁸ Landslides

⁹ Shenato

¹⁰ Liu

در ژاپن، یک سامانه‌ی "FOS" در گمانه‌ها برای پایش تراکم سازند در هنگام بهره‌برداری از گازهای طبیعی ارائه گردید (ایکدا¹ و همکاران/2015). در سال 2015، وو مطالعاتی بر روی کاربرد "FOS" برای پایش فرونشست زمین در سوژو² در کشور چین، در جایی که یک سامانه‌ی آبخوان چندگانه‌ی پیچیده در چند دهه‌ی گذشته، بیش از حد برداشت شده بود، استفاده کرد او با استفاده از کابل‌های حسگر که به صورت عمودی در گمانه‌های آبخوان چندگانه‌ی پیچیده نصب شده بود، توانست کرنش‌ها را پایش نماید. این گمانه‌ها پس از نصب کابل‌ها با مخلوطی از ماسه‌ی ریزدانه، شن و بنتونیت پر شده بود و هیچگونه تمهیداتی برای کاهش دما صورت نگرفته بود. جابجایی‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های کرنش محوری کابل‌ها محاسبه شده بود.

لیو و همکاران در سال 2017 مطالعات امکان‌سنجی استفاده از حسگرهای فیبرهای نوری با توزیع نقاط ثابت را برای پایش‌های درزه و شکاف‌های زمین، آغاز کردند. برای مقاوم‌سازی فیبرها، ساختار کابل‌ها سه لایه گردید که از مرکز به سمت بیرون شامل فیبر ساده، پوشش پلی‌پورتان و سپس یک غلاف مارپیچی فلزی بود. 5 سانتی متر از طول کابل در لوله‌ای با آلیاژ آلومینیومی پوشیده شده و در داخل یک لوله‌ی قابل انقباض حرارتی در فواصل منظم (طول 10 سانتی‌متر) جاسازی گردید. این بخش از کابل‌ها بوسیله‌ی مهاربندها و یا میخ‌هایی در زمین ثابت گردیدند. فاصله‌ی ۲ متری بین مهارها با در نظر گرفتن شرایط پیرامونی آن‌ها ثابت شده بود و کابل‌ها هنگام نصب، پیش‌تنیده³ شده بودند. کابل‌های بدون کرنش اضافی برای اندازه‌گیری کاهش دما به کار می‌رود. سامانه‌ی حسگرها با موفقیت در درز و شکاف زمین در ساختگاه ووکسی در چین مورد استفاده قرار گرفت که 2 درز و شکاف اصلی (با بیشینه مقدار 360×10^{-6}) را تعیین و اندازه‌گیری نمودند. (شکل 3-۸).



شکل 3-8: a- نقشه‌ی آثار ترک‌های زمین در ووژی چین و موقعیت تجهیزات پایش "FOS"

¹ Ikeda

³ Pre Stresses

² Suzhou

پیکان‌های آبی نمایش دهنده‌ی جهت تصویربرداری **b** - توزیع کرنش‌ها در امتداد کابل را نشان می‌دهد دو نقطه‌ی اوج، با ترک‌های سطح زمین در ارتباط هستند. (اصلاح شده از لیو و همکاران/2017).

4 - کاهش فرونشست زمین به وسیله تزریق آب

ساده‌ترین روش برای کاهش فرونشست زمین ناشی از افت تراز سطح آب زیرزمینی، تزریق مصنوعی آب می‌باشد. بدیهی است که راهبردها و روش‌های دیگری نیز می‌تواند به جلوگیری از فرونشست زمین کمک نماید؛ از جمله سیاست‌های الزام‌آور به محدودیت برداشت، مجوزها، قیمت گذاری، مالیات، نصب کنتور و کنترل شدید بر روی پمپاژ آب‌های زیرزمینی می‌تواند مؤثر باشد که به وسیله مسئولین محلی و یا مقامات مرکزی صورت می‌گیرد. در سال 2000، فیز پیشنهادهایی ارائه کرد که بر اساس آن می‌بایست فرونشست زمین به عنوان یک عامل راهنما در هنگام تعریف سیاست‌گذاری‌های مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی همراه با سایر روش‌های متداول مانند جلوگیری از کاهش تراز سطح ایستابی، نفوذ آب شور و آلودگی آب‌های زیرزمینی، به کار گرفته شود.

به طور کلی می‌توان گفت هنگامی که فرونشست زمین در حال رخداد است، هر یک از روش‌های کنترلی و یا کاهش نرخ فرونشست شامل کاهش و یا توقف پمپاژ از منابع آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی آبخوان از سطح زمین، افزایش فشار پیرومتریک لایه تخلیه شده آبخوان با استفاده از چاه‌های تزریقی، ایجاد آب بندهای هیدرولیکی برای توقف گسترش مخروط افت چاه‌ها و ایجاد فشار بیش از حد در واحدهای زمین‌شناسی خارج از گستره تأثیر پمپاژ، به منظور ایجاد یک مانع ساختاری در برابر مهاجرت تراکم از لایه‌های ژرف به لایه‌های سطحی، به تنهایی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش نرخ فرونشست داشته باشد؛ هر چند که ترکیب شدن هر یک از روش‌های پیشنهادی بالا می‌تواند تأثیرگذاری بیشتری به همراه داشته باشد، ولی بایستی با محاسبه نسبت سود به هزینه، بهترین ترکیب را انتخاب نمود. یک نمونه از راهکارهای کاهش دست‌بالا این است که به موجب آن تنش مؤثر در سازند تخلیه شده فراتر از سطح تنش تجربه شده تا به امروز، افزایش نمی‌یابد. روش بسیار سخت گیرانه‌تر، کاهش تنش مؤثر و یا فعال کردن سازندهای بالایی از طریق تزریق آب می‌باشد. تزریق آب به سازندهای زمین‌شناسی باعث افزایش فشار منفذی و کاهش تنش مؤثر شده و منجر به گسترش سازندهای تزریق شده می‌گردد. بخشی از مهاجرت‌ها به سطح زمین می‌تواند با تشدید فعالیت‌های انسانی موجب برخاستگی و یا برگشت‌پذیری سطح زمین گردد.

در حالی که فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی یک فرآیند شناخته شده است، انجام تزریق مایعات در زمین بیش از نیم قرن پیشینه دارد، ولی برخاستگی مصنوعی زمین، یک رویداد بسیار نادر است. فن آوری تزریق از زمان ابداع آن در دهه‌ی 1950 تا 1960 همواره در حال رشد و توسعه بوده است. تزریق دوباره به سازندهایی که آب به همراه هیدروکربن‌ها از آن استخراج شده‌اند می‌تواند با تزریق پساب‌های صنعتی به سازندهای زیرزمینی ادامه یابد. تعداد چاه‌های تزریق به طور نمایی در حال افزایش است. براساس مطالعات موسسه‌ی حفاظت محیط زیست ایالات متحده‌ی آمریکا "US EPA" ¹ بیش از 400.000 گمانه تزریق تنها در آمریکا شناسایی شده است. تزریق محلول‌هایی با پایه‌ی آب، هیدروکربن‌ها، "CO₂" و "N₂" برای افزایش تولید نفت "EOR" ² از اوایل دهه‌ی 1940 شروع و به سرعت تبدیل به یک فن‌آوری بازیافت نفت اضافی از مخازن گردید که پیشتر تولید آن‌ها کاهش یافته بود. فرآیندهای بازیابی گرمایی به وسیله‌ی تزریق بخار در مخازنی به کار می‌رود که دارای نفت سنگین (با گرانش بالا) و یا بیتومین ³ باشند و معمولاً با برخاستگی چشمگیری همراه می‌باشند (به صورت محلی تا 30

¹ USA Environmental Protection Agency
"USEPA"

² Enhance Oil Production "EOR"

³ Bitumen

سانتی متر ثبت شده است). به طور مثال می‌توان به کلدلیک¹ (استانکلیف و وندرکویچ² 2001)، رودخانه‌ی شل پیس³ (دو⁴ و همکاران 2008) و ماسه‌های نفتی آتاباسکا⁵ (کالینز⁶ 2007) در کانادا، اشاره نمود. در میدان گازی کرچبا⁷ در الجزایر، برگشت‌پذیری زمین ناشی از تزریق دوباره‌ی "CO₂" از گازهای تولیدی صورت‌گرفته است (واسکو⁸ 2010). ذخیره‌سازی گاز در بخش‌های زیرین زمین ممکن است بتواند میزان برخاستگی قابل اندازه‌گیری در زمین را ایجاد نماید (تیاتینی/2011). سامانه‌های آبخوان‌های زیرزمینی شهرهای توکیو و اوزاکا در ژاپن (اسرنگ⁸ 2011) و شهر تایپه در تایوان، تجربه‌ی خوبی از بازیابی جریان طبیعی پس از توقف پمپاژ آب و برگشت‌پذیری چشمگیر زمین را نمایش می‌دهند (چن⁹ 2007). همچنین نمونه‌های دیگر از پمپاژ آب به میدان نفتی به منظور کاهش فرونشست زمین ناشی از تولید نفت، مربوط به میدان نفتی لانگ بیچ¹⁰ در ایالت کالیفرنیا است. این برنامه‌ی کاهش به دقت کنترل و پایش گردید (پیرس¹¹ 1970، رینتول¹² 1981، کولازاس و استرهل¹³ 1995). تزریق آب در سال 1958 و در مقیاس گسترده‌ای با استفاده از آب پالایش شده‌ی دریا که از ژرفای 30 تا 120 متری از چاه‌ها تأمین می‌شد، انجام گردید که بعدها با پساب حاصل از سازندهای نفت‌دار مخلوط شده بود، 11 سال بعد وقتی که پیرامون 2 مترمکعب در ثانیه آب به درون میدان نفتی پمپاژ شده بود، گستره‌ی نشست از 58 به 8 کیلومتر مربع کاهش یافت و برگشت‌پذیری سطح زمین پیرامون 30 سانتی‌متر بود.

حرکات زمین در ارتباط با تزریق زیرسطحی سیالات به مدت طولانی و در بسیاری از مناطق، کم‌اهمیت تصور می‌گردید که دارای چند دلیل اصلی بود: اول اینکه در بیشتر موارد دفع سیالات در مناطق متروکه و کم‌جمعیتی انجام می‌شود که اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح زمین دارای اولویت نیست ولی می‌تواند به بالا بردن هزینه‌های ترازابی در این مناطق منجر گردد. مورد دیگر، برخاستگی زمین بسیار ناچیز بوده و به همین دلیل هیچگونه خطری برای محیط زیست نداشته و به سازه‌های مهندسی و زیر ساخت‌ها آسیبی نخواهد داشت پایش در این مناطق صورت نمی‌گیرد. به تازگی فن آوری‌های راداری که نسبتاً ارزان بوده و دارای پراکندگی فضایی مناسب و دقیقی هستند می‌توانند با این رویکرد، جابجایی‌های زمین را آشکار سازی نمایند. کاربرد فن آوری "SAR" که در دهه‌های گذشته رشد چشمگیری داشته است می‌تواند برخاستگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی با توجه به بزرگی و اندازه‌ی گستره‌ی تأثیر آن‌ها شناسایی و نمایان سازند. از فن آوری‌های "SAR" و تجهیزات و ابزارهای مرتبط با آن‌ها می‌توان جابجایی‌های سطحی در ارتباط با نوسانات طبیعی فشار ارتفاع آب‌های زیرزمینی در گستره‌ی نخیره‌ی آبخوان‌ها¹⁴ "ASR" که به طور سازمان یافته توسط "USGS" پایش شده، را تعیین کرد. در مناطقی مانند دره‌ی سانتا کلارا در کالیفرنیا (اشمیت و برگمان¹⁵ 2003)، حوضه‌ی سانتا آنا¹⁶ در کالیفرنیا (گالوی و هافمن¹⁷ 2007) و دره‌ی لاس وگاس در نوادا (هافمن/2001 و بل¹⁷ 2008) از این روش استفاده شده است. از سال 1992 تا 1999 در دره‌ی سانتا کلارا میزان برخاستگی پیرامون 4 سانتیمتر و در دره‌ی لاس وگاس از سال 2003 تا 2005، پیرامون 3 سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، انحراف سنج‌های

¹ Cold Lake

² Stancliffe & Van Der Kooij

³ Shell Peace

⁴ Du

⁵ Athabasca

⁶ Collins

⁷ Krechba

⁸ Sreng

⁹ Chen

¹⁰ Long Beach

¹¹ Pierce

¹² Rintoul

¹³ Colazas & Strehle

¹⁴ Aquifer Storage & Recovery "ASR"

¹⁵ Schmidt & Burgmann

¹⁶ Santa Ana

¹⁷ Bell

سطحی و گمانه‌ها به طور گسترده‌ای در دهه‌های گذشته برای پایش برآمدگی‌های زمین در مناطق نسبتاً کوچک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (دو و همکاران/ 2008). تیاتینی و همکاران به تازگی بر روی مناطق برخاسته‌ی ناشی از فعالیت‌های انسانی در اثر تزریق سیالات زیرزمینی، مطالعاتی انجام داده‌اند.

در صورتی که خاک قابلیت تراکم پذیری داشته باشد، میزان "cb" در اولین چرخه‌ی بارگذاری و در صورتی که آبخوان پمپاژ شده باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و در هنگام باربرداری – بارگذاری، آبخوان دوباره تغذیه شده و تحت فشار قرار می‌گیرد. نسبت بین "Cb" بارگذاری به "Cb" باربرداری متناسب با ژرفا کاهش می‌یابد و ممکن است برای نهشته‌های سیلنتی رسی بسیار کم ژرفا، بزرگتر از 1 باشد (تیاتینی و همکاران/ 2011).

به علت موقعیت و ارتفاع کم نسبت به دریا، شانگهای در چین و ونیز در ایتالیا دو مورد ویژه‌ی هستند که کاهش فرونشست زمین، اهمیت بسیار زیادی دارد. شانگهای یک شهر ساحلی است که در بخش جنوبی دلتای رودخانه‌ی زرد¹ در چین واقع شده و فرونشست بزرگی را به دلیل برداشت دراز مدت از سطح آب زیرزمینی، تجربه کرده است، دوم اینکه این شهر رشد و گسترش سریعی داشته است (جدول 4-1) استخراج آب‌های زیرزمینی در شانگهای به دهه‌ی 1860 بر می‌گردد. میزان پمپاژ آب پیش از سال 1949 بسیار کم بود و سپس به سرعت و بویژه در اواخر دهه‌ی 1950 افزایش چشمگیری یافت. نرخ پمپاژ سالیانه در سال 1963 به " 200×10^6 " مترمکعب در سال افزایش یافت (شکل 4-1a). استخراج بی‌رویه و شدید آب‌های زیرزمینی باعث رخداد فرونشست‌های بزرگی گردید. در دوره‌ی زمانی 1957 تا 1961، نرخ بیشینه‌ی سالیانه‌ی فرونشست بیش از 17 سانتی متر در سال گزارش گردید. (ژانگ² 2015 و یه³ و همکاران/ 2016).

به منظور کنترل فرونشست زمین، مجموعه اقداماتی به وسیله‌ی دولت شانگهای در اوایل دهه‌ی 1960 صورت گرفت، این تمهیدات شامل موارد زیر بود:

- کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی
- بهره‌برداری از لایه‌های ژرف‌تر برای تولید آب
- تغذیه‌ی مصنوعی آبخوان‌ها

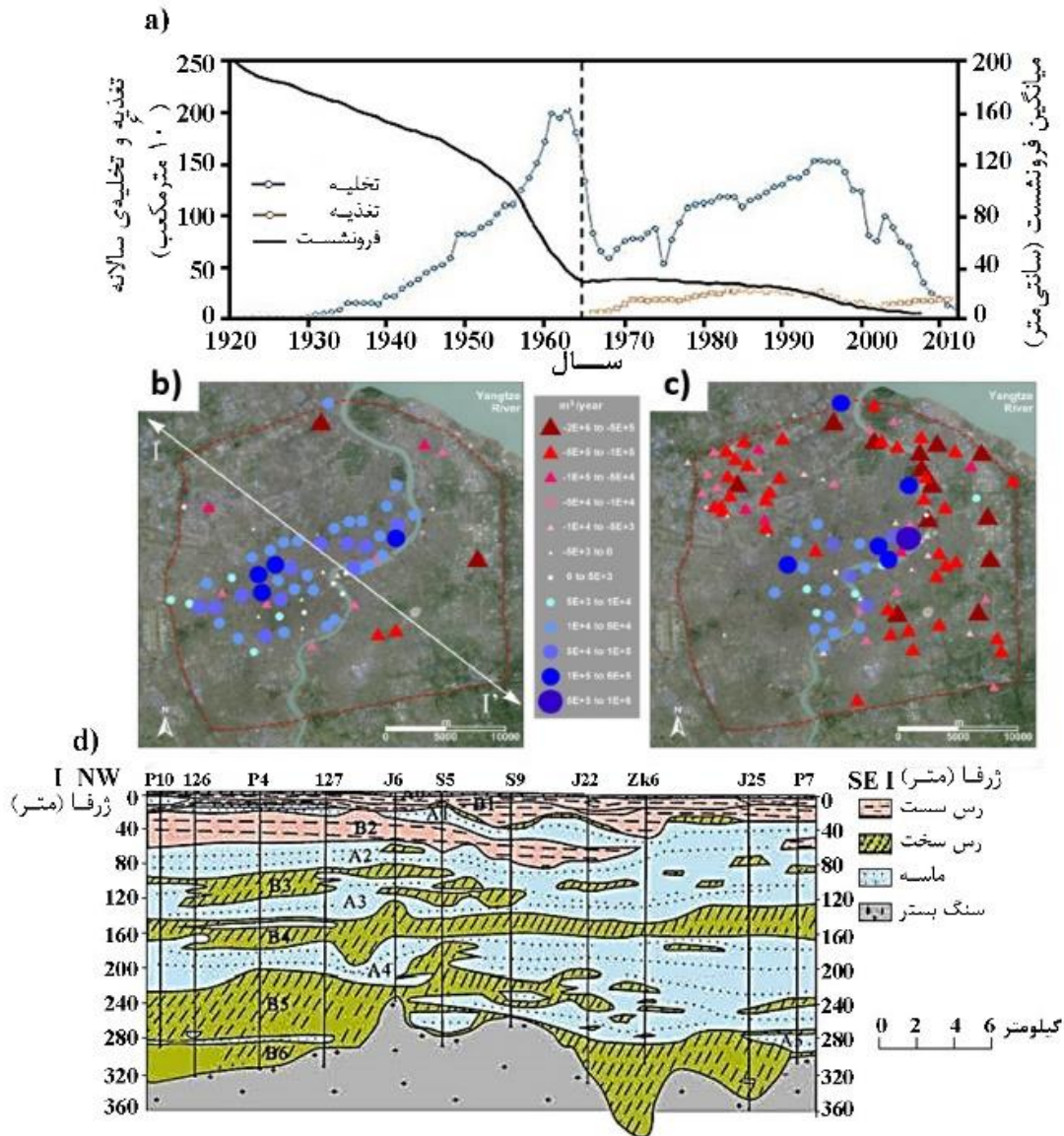
با کاهش سالانه‌ی پمپاژ آب از سال 1988، پمپاژ به تدریج از آبخوان‌های محصور دوم "A2" و سوم "A3" به آبخوان‌های چهارم "A4" و پنجم "A5" انتقال یافت. تغذیه‌ی مصنوعی در سال 1966 آغاز و در سال‌های بعد به تدریج افزایش یافت. تغذیه با استفاده از آبی در حد آشامیدن که از رودخانه‌ی هوانگپو⁴ بدست می‌آمد، انجام گردید در سال‌های 1983 تا 1989 نرخ ثابت تزریق سالیانه به میزان " 30×10^6 " مترمکعب در سال که پس از آن به تدریج کاهش و از سال 2003 به بعد دوباره افزایش یافت (شکل 4-2a)

¹ Yangtze Delta

² Zhang

³ Ye

⁴ Huangpu



شکل 1-4: a - تاریخچه‌ی پمپاژ آب‌های زیرزمینی، تغذیه‌ی مصنوعی و میانگین فرونشست زمین

را در شانگهای را نشان می‌دهد (ژانگ/2015). پمپاژ و چاههای تغذیه در b- آبخوان "A2" و c- آبخوان "A4" در شانگهای است. مثلث‌های سفید تا قرمز نشانه‌ی چاه‌های پمپاژ (مقادیر منفی) و دایره‌های سفید تا آبی نشانه‌ی چاههای تغذیه (مقادیر مثبت) می‌باشند. اندازه‌ی نماد متناسب میانگین نرخ سالانه از 1980 تا 1996 است، d- نمایش بخش آب زمین‌شناسی آبخوان شانگهای در امتداد برشی "I-I" می‌باشد که در شکل "b" ارائه شده است. (اصلاح شده از یه/2016)

شکل‌های "c-4" و "b-2" نرخ تخلیه و تغذیه‌ی چاه‌ها در آبخوان‌های "A2، A4" را به همراه میانگین سالیانه‌ی نرخ تخلیه و تغذیه را در سال‌های 1980 تا 1996 نشان می‌دهد. تعداد چاه‌های تغذیه بیشتر از تعداد چاه‌های پمپاژ در آبخوان "A2" بود، از طرف دیگر، تعداد چاه‌های پمپاژ شده با نرخ جریان زیاد و تعداد چند چاه با تغذیه‌ی کم در آبخوان "A4" فعال بودند. با توجه به اجرایی شدن اقدامات کاهش‌ی به تازگی فرونشست زمین تا پیرامون 1 سانتی‌متر در سال کاهش یافت.

در ونیز، برخاستگی زمین با توجه به الگوهای اجزای محدود "FE" پیش‌بینی شده است (شکل 4-2a). بالا آمدن شهر به دلیل تزریق آب دریا به آبخوان‌های شور ژرف می‌تواند به طور چشمگیری باعث کاهش فراوانی کشندهای بلند گردد که باعث سیلاب‌های دوره‌ای در ونیز می‌گردید (به استثنای کشنده بلند 12 نوامبر 2019 که ارتفاع اوج آن 187 سانتی متر بالاتر از تراز مبنا¹ بود و به این علت، شهر به شدت خسارت دید.*

* <https://www.voanews.com/Europe/venice-Mayor-declares-disaster-city-hit-2nd-worst-high-tide>

مطالعات عددی اولیه بر پایه‌ی چینه‌شناسی سنگی² زیر سطحی ونیز انجام شد (کومرلاتی³ 2004) و پیشنهاد گردید که شهر ممکن است با پمپاژ آب دریا به آبخوان‌های ژرف از طریق 12 گمانه‌ای که در فاصله‌ی دایره‌ای به قطر 10 کیلومتری قرار دارند، دچار برخاستگی شود. با استفاده از بازسازی 3 بعدی نهشته‌های عهد حاضر که بر اساس 1050 کیلومتر نیمرخ‌های لرزه‌ای چند کاناله و هشت حلقه چاه‌های اکتشافی و گمانه‌های تزریق انجام شده بود، پیش‌بینی‌های جدید "FE" عملیاتی گردید (تیاتینی/2011) و با الگوی‌سازی جدید، چینه‌شناسی سازندهای زیر سطحی تالاب شبیه‌سازی و ارزیابی واقعی حجم آب تزریق شده به سازندهای زمین شناسی بر اساس اندازه‌گیری فشارهای بیش از حد کف چاه‌ها، امکان‌پذیر گردید که نتایج آن‌ها در زمان و مکان متفاوت بودند. انتخاب بهترین شرایط هدایت هیدرولیکی توسط تیاتینی هنگامی که قابلیت تراکم‌پذیری سنگ در شرایط باربرداری و هم‌راستا با نظرات کومرلاتی و فروناتو⁴ بود، به دست آمد (2013). پمپاژ در امتداد 2 توالی پلیستوسن⁵ از رسوبات آلپ و آپنین⁶ به ترتیب در شمال و جنوب ونیز و در بخش فلات قاره‌ای توالی پلیوسن⁷ در زیر مرداب مرکزی به همراه لایه‌های آرنایتی⁸ در ژرفای 1000 متری در زیر تراز دریا، برنامه‌ریزی گردید. با تنظیم مناسب فشار تزریق، این الگو پیش‌بینی برخاستگی یکنواختی را پیرامون 25 تا 30 سانتی‌متر در 10 سال گذشته و پس از تزریق‌های اولیه، تأیید کردند (شکل 4-2b)

¹ Datum

² Lithostratigraphy

³ Comerlati

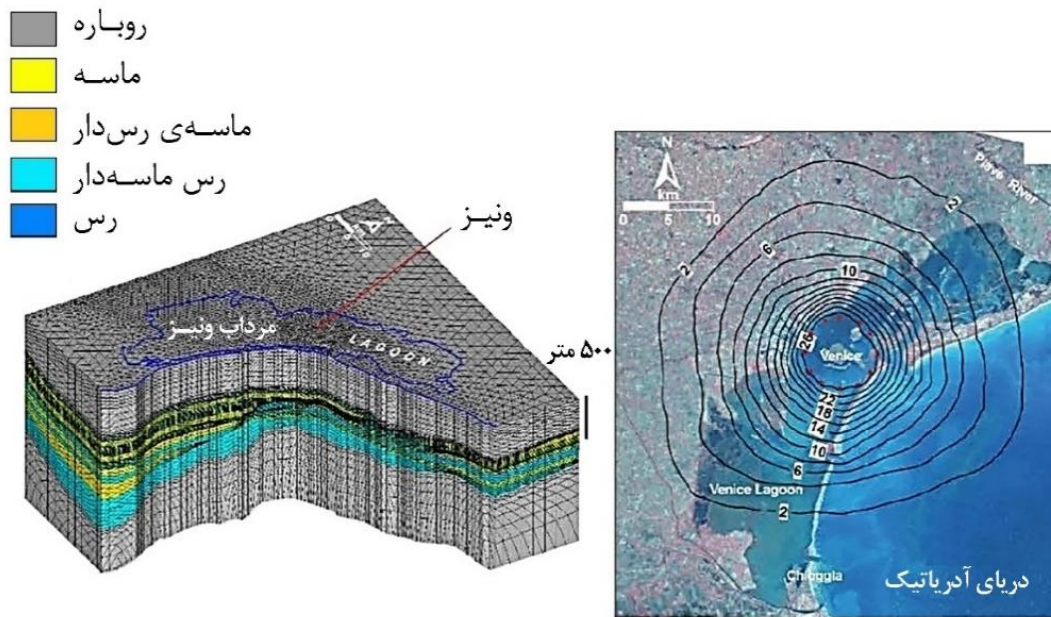
⁴ Ferronato

⁵ Pleistocene

⁶ Apennines

⁷ Pliocene

⁸ Arenite



شکل 2-4: a- نمای محوری از شبکه‌ی چهار وجهی برای پیش‌بینی برخاستگی ونیز

به دلیل فعالیت‌های انسانی و با استفاده از تزریق آب دریا به آبخوان‌های شور در این شبکه صورت گرفته است. این شبکه دارای 1905058 عنصر و 328215 گره است.

b- برخاستگی پیش‌بینی شده (سانتی متر) در ونیز پس از 10 سال تزریق به آبخوان‌های شور در ژرفای 650 تا 1000 متری در زیر مرداب ونیز را نشان میدهد، چاه‌های تزریق به رنگ قرمز نشان داده شده اند (اصلاح شده از تیاتینی، 2011)

یک عملیات آزمایشی برای تأیید امکان‌سنجی پروژه‌ی برخاست ونیز طراحی شده بود (کاستلنتو¹/2008). در طرح آزمایشی سه گمانه پیش‌بینی شده بود که در رأس مثلثی به طول ضلع 1 کیلومتر، در گستره‌ی مرداب و در نزدیکی مرکز باستانی جانمایی شده بود. هدف‌گذاری پروژه شامل: 1- به دست آوردن جزئیات بیشتر و دقیق تر از چینه‌شناسی سنگی در بخش‌های زیر سطحی مرداب، 2- انجام آزمون آزمایشی تزریق با آب (بهسازی شده) دریا و اندازه‌گیری فشار بیش از حد تولید شده در سازندی که تزریق در آن انجام شده، 3- پایش پیوسته و زمان برخاستگی زمین همراه با ترازیبی دقیق با، استفاده از "GPS" و تداخل سنجی راداری و 4- طراحی و انجام آزمون با رویکرد کنترل بهنیه، به عنوان مثال، یکنواختی برخاستگی با استفاده از حسگرهای خودکار و تعیین نرخ تزریق در هر چاه به تفکیک انجام گردید. جزئیات تشریحی دقیق پروژه‌ی برخاستگی ونیز که ناشی از فعالیت‌های انسانی بود به همراه پیامدهای زیست محیطی و هزینه‌های قابل پیش‌بینی آن توسط گامبولاتی و تیاتینی (2014)، ارائه شده است.

¹ Castelletto

5 - فرآیندهای ژئومکانیکی در ارتباط با فرونشست‌های زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی

به غیر از تراکم و یا انبساط، تغییر فشار منفذی در هنگام پمپاژ و یا تزریق ممکن است منجر به فرآیندهای ژئومکانیکی گردد، به عنوان مثال، تولید شکستگی‌های موضعی که ممکن است تا سطح زمین گسترش یابد، فعال شدن گسل‌های موجود همراه با افزایش هدایت هیدرولیکی و کاهش مقاومت خواهد بود. در نتیجه ممکن است تأثیرات مهمی بر روی سازه‌های سطحی و زیر ساخت‌ها داشته باشد و آبخوان‌ها را با احتمال خطرزایی در برابر آلودگی‌ها قرار دهد.

توصیف این ساز و کارها با نمایش شرایط تنش مؤثر موهر - کولمب¹ در صفحه‌ی " τ و σ " امکان‌پذیر است (شکل 1-5) که در آن تنش‌های فشارشی به صورت مثبت مشخص شده‌اند. وقتی آب برداشت می‌شود، فشار منفذی " p " با توجه به میزان اولیه‌ی آن " $p_0 < p$ " کاهش یافته و تنش مؤثر " σ " بر اساس اصول ترزاقی² افزایش می‌یابد. بنابراین دایره‌های موهر - کولمب به سمت راست حرکت می‌کند یعنی دورتر از محور برشی " τ " و به طور کلی از خط گسیختگی به پوش تنش مجاز محدود می‌گردد. در مقابل هنگامی که سیال تزریق می‌گردد " p " افزایش یافته و ممکن است بیشتر از " p_0 " گردد. در این حالت، تنش مؤثر کمتر از مقدار اولیه به همراه دایره‌ی موهر - کولمب به سمت چپ، یعنی به سمت محور " τ " حرکت می‌کند (یعنی خط گسیختگی). اشاره به این نکته مهم است که در هنگام پمپاژ و تزریق، تنش‌های مؤثر بیشینه " σ_1 " و کمینه " σ_3 " ممکن است مسیرهای متفاوتی داشته باشند و شاید قطر دایره‌های موهر - کولمب افزایش داشته باشد که به خط گسیختگی نزدیک می‌شود (شکل 1-5) (تیوفل³ و همکاران/1991، سگال و فتیز جرال⁴ 1996). شایان ذکر است که تنش‌های بیرونی یعنی تنش‌های بیرونی یعنی تنش‌های زمین ساختی در طول دوره‌ی زمانی یک آبخوان ثابت فرض می‌شوند. (بیشینه در حد چند دهه) و جهت‌یابی تنش‌های اصلی و نسبت " σ_1/σ_3 " به طور چشمگیری با توجه به ژرفا تغییر می‌یابد (زوباک⁵ 2007).

دو ساز و کار گسیختگی ممکن است رخ دهد: a - اگر دایره‌ی موهر-کولمب با خط پوش یک گسیختگی برشی در تماس باشد ممکن است نشان‌دهنده‌ی فعالیت دوباره‌ی راندگی‌ها⁶ و یا گسل‌های موجود باشد و b - اگر دایره‌های موهر-کولمب محور " τ " را قطع نماید، گسیختگی کششی رخ خواهد داد. پدیده‌ی اتساع⁷ ممکن است موجب افزایش حجم کرنش ناشی از برش شده و باعث بزرگی انبساط سازند تزریق شده گردد. اتساع برشی در ضعیف شدگی و عملکرد کرنش به همراه تغییرات دائمی در بافت چینه‌های دارای سیالات از طریق تغییرات بازگشت‌ناپذیر تراوایی و افزایش تخلخل و تغییر در نفوذپذیری قابل اندازه‌گیری در سطح زمین می‌گردد. (زوباک⁸ 2007).

1-5- گسیختگی‌های زمین

گسیختگی‌های زمین در ارتباط با فرونشست ناشی از برداشت از آب زیرزمینی در حوضه‌های آبرفتی در مناطق خشک و نیمه خشک از اواخر دهه‌ی 1970 گزارش شده است. نمونه‌های مهم آن در جنوب

¹ Mohr - Coulomb

² Terzaghi

³ Teufel

⁴ Segall & Fitzgerald

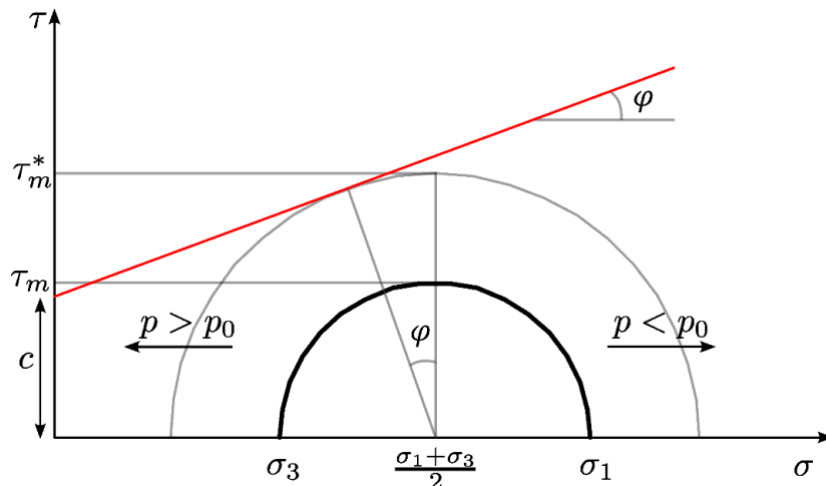
⁵ Zobak

⁶ Thrust

⁷ Dilatancy

⁸ Zobak

غرب آمریکا (هولزر¹، 1979، جاجنز² و هولزر¹، 1979 و هولزر و گالووی¹، 2005)، مکزیک مرکزی (پاکه کو³، 2006 و کارنون - فریره⁶، 2016)، از ایران (ضیایی¹، 2009 و محمودپور¹، 2013) از عربستان سعودی (بانخر و الهارتیه⁴، 1999) از پاکستان (خان⁵، 2013) و از چین (شی⁶، 2007 و انگ¹، 2009 و هی⁷، 2017)، مشاهده شده است.



شکل 5-1: دایره‌های موهر-کولمب. وقتی فشار منفذی "p" به علت تزریق سیال افزایش می‌یابد،

دایره‌ها به سمت چپ حرکت کرده و ممکن است به سطح تسلیم و یا اصطکاک محدود را به دست آورند. این معادله $\tau = c + \sigma \tan \phi$ نشان می‌دهد که "σ و τ" تنش‌های طبیعی و برشی هستند، "c" چسبندگی و "φ" زاویه اصطکاک است. "τ_m و τ_m^{*}" به ترتیب بزرگترین و بیشینه تنش برشی مجاز هستند، "σ₁ و σ₃" به ترتیب بیشینه و کمینه تنش‌های اصلی هستند.

توسعه و گسترش درز و شکاف‌ها هم در مناطقی که از منابع طبیعی بهره برداری شده و هم در پهنه‌های مرزی مشاهده شده است. چگالی، شکل، طول، بازشدگی، ژرفا و جابجایی این دره‌ها و شکاف‌ها از ساختگاهی به ساختگاه دیگر بسیار متفاوت بوده و به تغییرات خاک‌ها و واحدهای سنگ چینه‌ای بخش‌های زیر سطحی بستگی دارد. در برخی از مناطق تعداد کمی از درز و شکاف‌های منفرد شکل گرفته است. جابجایی عمودی این درز و شکاف‌ها بیش از 2 متر و به طول 15 کیلومتر و پهنای 1 تا 2 متر و در ژرفای 15 تا 20 متری، مشاهده شده است که آسیب‌های قابل ملاحظه‌ای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی از آن‌ها گزارش شده است. این خسارت‌ها شامل بریده شدن لوله‌های جدار گمانه‌ها و چاه‌ها، لوله‌ها و کانال‌های برداشت و انتقال آب‌های زیرزمینی و لوله‌های نفت و گاز می‌باشد. پیامدهای این شرایط در مناطق روستایی که آب بیشتر به مصارف کشاورزی می‌رسد (مانند منطقه کشاورزی سریر⁸ در صحرای لیبی و جنوب مرکزی آریزونا در آمریکا) و هم در مناطق شهری (مانند مکزیکویتی و کوئرتارو⁹ در

¹ Holzer

² Jachens

³ Pacheco

⁴ Bankher & Al - Harthia

⁵ Khan

⁶ Shi

⁷ He

⁸ Sarir

⁹ Queretaro

مکزیک و سیلایا¹ واقع در کمربند آتشفشانی مکزیک و در شهرهای پکن²، ژیان³ و ووکسی⁴ در چین)، قابل مشاهده هستند. سایر پیامدها شامل کاهش منابع آب آشامیدنی، افزایش هزینه‌های استخراج آب‌های زیرزمینی، خسارت به سازه‌های سطحی، جاده‌ها، خطوط انتقال آب، راه آهن، باند فرودگاه‌ها، مجروح شدن حیوانات خانگی و سایر جانوران، خسارت به انسان‌ها، ایجاد مسیرهای جریان مواد آلاینده از مناطق سطحی به آبخوان‌های کم ژرفا و افزایش شدید فرسایش خاک‌ها و ایجاد پدیده‌های توپوگرافی بدبوم⁵ در نزدیکی گسستگی‌ها، اجتناب‌ناپذیر هستند. (شکل 5-2).

ساز و کارهای فراوانی برای تشریح خاستگاه گسستگی زمین‌ها در ارتباط با توسعه‌ی منابع طبیعی، پیشنهاد و تعدادی از این ساز و کارها در شکل 5-3 ارائه شده است (هولزر و همکاران/1979، شنگ و هلم⁶/1998 و شنگ/2003) براساس جهت تنش‌های ناشی از پمپاژ در زیر سطح زمین می‌توانیم دو گونه‌ی اصلی گسستگی زمین را شناسایی کنیم که شامل ترک‌های کششی و ترک‌های برشی هستند. تفاوت اصلی بین این دو گونه از ترک‌ها جابجایی عمودی مشاهده شده در شرایط میدانی می‌باشد. به طور متداول شکاف‌های ناشی از کشش اندک و یا بسیار جزیی می‌باشد در صورتی‌که در ترک‌های برشی، گسیختگی‌ها به صورت پرتگاه⁷ بوده و قابل اندازه‌گیری هستند. (هولزر و پامپیان/1981). تشخیص این تفاوت‌ها در مناطق شهری بسیار دشوار است زیرا در برخی از گسستگی‌های برشی، در ابتدا بدون جابجایی اولیه‌ی عمودی بوده و سازه‌ها و زیر ساخت‌های سطح زمین جابجایی‌های واقعی گسستگی‌ها را پوشانده‌اند.



شکل 2-5: نمونه‌هایی از ترک و شکاف‌های زمین به دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی، a - آریزونا، آمریکا

b - آسیب دیدن خانه‌ای در پکن، چین

c - در کوئته در پاکستان

از اوایل سال 2000 پژوهش‌ها بیشتر بر روی الگوسازی و پیش‌بینی گسیختگی‌های زمین متمرکز شده است. معیارهای گسیختگی موهر - کولمب توسط بودهو⁸ در سال 2008 برای واکاوی شروع درز و

¹ Celaya

² Beijing

³ Xian

⁴ Wuxi

⁵ Badland

⁶ Sheng & Helm

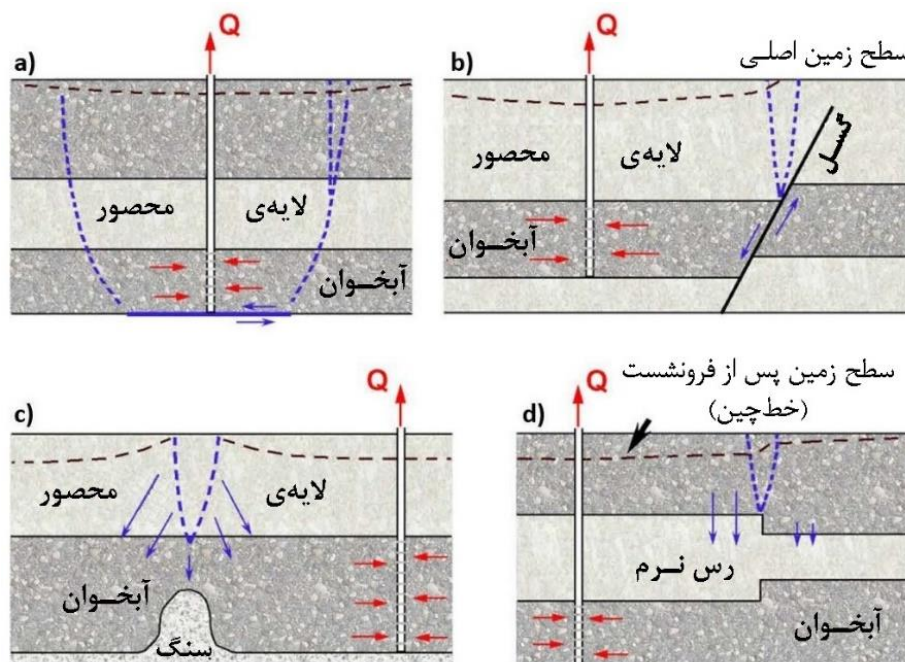
⁷ Scarp

⁸ Budhu

شکاف نهشته‌های رسوبی ناهمگن مورد استفاده قرار گرفت. او دریافت که نیرومندترین سازو کار برای تشکیل ترک‌های زمین از ترکیب برش و خمش به دست می‌آید. ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی برای رخدادهای گسیختگی‌ها در اولویت هستند. ابتدا گسیختگی در سطح تشکیل شده و سپس به سمت پایین و یا برعکس و بر اساس سازوکار غالب انتشار می‌یابد. با استفاده از رویکرد پیوستگی و نرم افزار شبیه‌ساز ژئومکانیکی "ABAQUS" هراندز- مارین¹ و بوری² در سال 2012، مطالعات توزیع فضایی تغییر شکل و تنش‌های برشی و عادی را انجام دادند و نشان دادند که این عوامل می‌توانند منجر به گسیختگی زمین گردند.*

*<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>

نتایج مطالعات نشان داد که وجود پهنه‌های گسلی (از پیش) می‌تواند به طور گسترده‌ای تغییر شکل و سازگان تنش‌های محیط‌های متخلخل را در هنگام پمپاژ، با مناطق تجمع تنش‌ها که در نهایت موجب تشکیل ترک‌ها می‌گردد، کنترل نماید. شبیه‌سازی بر اساس بخش‌های عمودی دو بعدی، مانند دره‌ی لاس وگاس ارائه شده است.



شکل 3-5: نمای ساز و کار گسیختگی‌های القایی زمین (خط چین‌های آبی)

a- جابجایی افقی به دلیل برش صفحه‌ی ضعیف و یا گسیختگی کششی، b- دوباره فعال شدن گسل‌ها بدلیل جابجایی‌های افقی، c- خردشدگی‌های کششی در بالای سنگ بستر، d- تراکم ناچیز به دلیل ناهمگنی ضخامت آبخوان (انعطاف ناپذیر)، آبخوان کم‌تراوا و پیکان‌های قرمز و آبی به ترتیب نمایش‌دهنده‌ی میدان‌های جریان و جابجایی‌ها هستند.

به تازگی یک رویکرد عددی بر پایه‌ی "عناصر واسطه³ IE" برای شبیه‌سازی امکان‌فعالیت گسل‌های ناحیه‌ای ناشی از تولید هیدروکربن‌ها گسترش یافته است (فرروناتو، 2008 و یها و یوانیس⁴ 2014) که

¹ Hernades - Marin

² Burbey

³ Interface Elements "IE"

⁴ Jha & Juanes

برای شبیه‌سازی ایجاد و انتشار شکاف‌های زمین به علت پمپاژ آب‌های زیرزمینی در ووژی چین مورد استفاده قرار گرفته است.

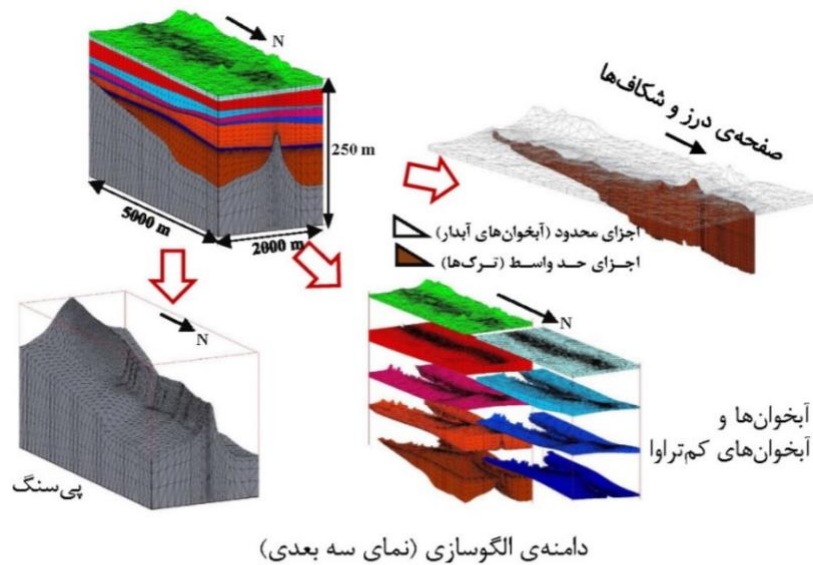
پمپاژ آب‌های زیرزمینی بین سال‌های 1985 تا 2004 سبب فرونشست زمین به میزان بیش از دو متر گردید (په و همکاران/ 2018). الگوی نمایی، وجود یک سنگ بستر کم ژرفا را در تقاطع با دلتای رودخانه‌ی زرد نشان می‌دهد (با ژرفای 80 متر) که عامل کلیدی ایجاد شکاف‌های زمین در این منطقه می‌باشد (شکل 4-5). خمش نهشته‌های آبرفتی در لبه‌ی پشته‌ای و تنش‌های برشی ناشی از تغییرات نامناسب تراز پیزومتریک و شکل نامتقارن سنگ بستر موجب رخداد ترک‌هایی از سطح زمین و تشدید آن به سمت پایین (ژرفای) شده و بیشینه ژرفای آن 20 تا 30 متر می‌باشد. بیشینه لغزش و بازشدگی‌ها به ترتیب در بازه‌ی 10 تا 40 سانتی‌متر، محاسبه شده است.

الگوی ژئومکانیکی شکاف زمین و فعال شدن آن‌ها بر پایه‌ی معادلات ساختاری محیط‌های کشسانی متخلخل¹، در یک محیط سه بعدی و با رویکرد هدف "FE-IE" حل شده است. چنانچه رویکردهای "FE" برای نمایش پیوستگی‌ها استفاده می‌شود، رویکردهای "IE" بویژه برای بررسی جابجایی نسبی عناصر مجاور مؤثر می‌باشند و برای بررسی بازشدگی‌ها و لغزش گسل‌های از پیش موجود و یا ایجاد شکستگی‌های جدید، به کار می‌رود (با استفاده از قوانین الاستوپلاستیک² و بر مبنای معیار گسیختگی موهر – کولمب). یک "IE" با ضخامت صفر با یک "FE" خطی که دارای یک جفت اجزای خطی با گره‌های متضاد هستند، همبستگی دارند (یک بعدی در یک مسئله‌ی دو بعدی و دو بعدی در مسئله‌ی سه بعدی)، جابجایی‌های حد واسط در یک چهارچوب مرجع محلی همراه با هر یک از اجزای بازشدگی " σ_n " و لغزش‌های " σ_{s1} " و " σ_{s2} " بین بالا و پایین رویه‌ی اجزای جابجایی وجود دارد. اجزای جابجایی‌ها به تنش‌های حد واسط " σ_n " و " τ_{s1} " و " τ_{s2} " با " σ_n " که تنش عادی است، در نظر گرفته می‌شود (منفی در شرایط فشارش و مثبت در هنگام انبساط) و " τ_{s1} " و " τ_{s2} " به عنوان اجزای تنش برشی در صفحه‌ی حد واسط هستند. جابجایی‌های پلاستیکی غیر قابل برگشت ممکن است در جایی رخ دهد که محدودیت شرایط کشش و یا برشی افزایش یافته باشد. فرض دست بالا این است که مقاومت کششی غیر مجاز بوده، باز شدگی سطح ترک‌ها و یا گسل‌ها زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های طبیعی در صفحه‌ی حد واسط " σ_n " مثبت باشند. لغزش‌های برگشت‌ناپذیر زمانی رخ می‌دهند که معیارهای گسیختگی موهر – کولمب نقض گردد. شکاف‌های آب‌بندی شده، بدون هر گونه جریان سطحی با عملکرد شیب فشاری بر روی سطح تماس، به صورت متفاوت شبیه سازی شده است. گسستگی‌های زمین به تازگی در پروژه‌ی "M3EF3"، "UNESCO-IGCP641" تأمین مالی شده است. (ساز و کارها، پایش و الگوسازی شکاف‌ها و ترک‌های زمین و فعال‌سازی گسل‌ها) و بیشتر بر روی بهره‌برداری از سیالات زیر سطحی تمرکز یافته است. مقادیر زیادی از مصالح در ارتباط با گسستگی‌های زمین در شبکه‌ی تارنمای این پروژه به آدرس زیر قابل دسترسی هستند.

<http://www.igcp641.org>

¹ Poroelasticited

² Elastoplastic



شکل 4-5: مش بندی سه بعدی "FE-IE" که توسط به در سال 2018 برای الگوسازی

فرونشست زمین و انتشار درز و شکاف‌ها در ووزی چین را نشان می‌دهد. تفاوت‌های اجزای زمین شناسی (سنگ بستر، آبخوان‌ها، ترک خوردگی و آبخوان‌های کم‌تراوا) به وسیله‌ی رنگ‌ها برجسته و در برخی موارد بزرگ‌نمایی شده‌اند (به/2018).

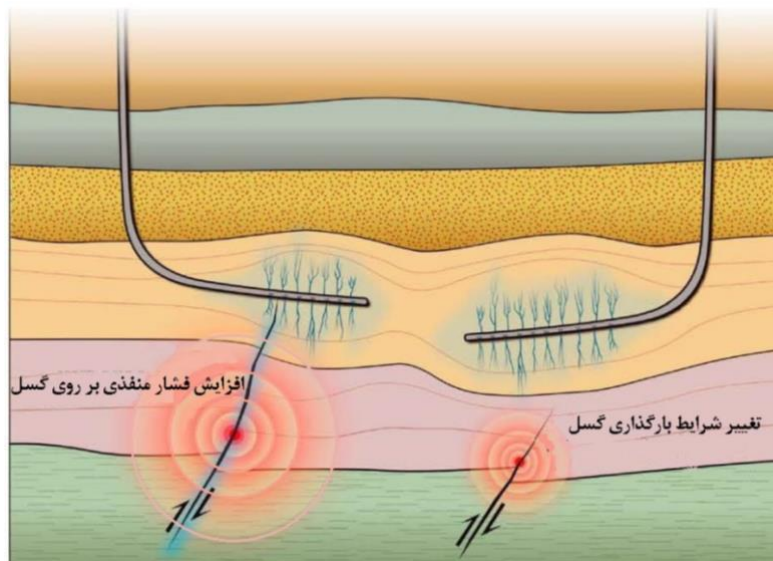
5-2- لرزه خیزی القایی

در چند سال گذشته، نگرانی‌ها در ارتباط با احتمال خطر فعالیت‌های لرزه‌ای القایی ناشی از پمپاژ آب و یا تزریق آب به سازندهای زمین‌شناسی افزایش یافته است (السورت¹/2013) به تازگی زمین لرزه‌های القایی ناشی از تزریق، موضوع مباحث زیادی بوده و پژوهش‌ها بیشتر بر روی مواردی همچون 1- شکستگی‌های هیدرولیکی سازندهای سخت شیلی در تولید هیدروکربن، 2- تخلیه و دفع پساب‌ها و فاضلاب‌ها و 3- سامانه‌های زمین‌گرمایی، متمرکز شده است. فعال‌شدن رانگی‌ها و گسل‌ها به دلیل پایین افتادن تراز سطح آب زیرزمینی (همانند تزریق سیال) ممکن است باعث بروز خطرات جدی لرزه‌خیزی ناشی از فعالیت‌های انسانی گردد. براساس گفته‌های السورت در سال 2013 ساز و کارهای لرزه‌خیزی القایی باعث ایجاد فرآیندهای برانگیخته شدن گسل‌های از پیش موجود می‌گردد که به دلیل تغییر در شرایط بارگذاری بر روی گسل‌ها می‌باشد به طور طبیعی افزایش تنش برشی، کاهش تنش طبیعی و یا افزایش فشار منفذی می‌تواند باعث گسیختگی گسل‌ها و هسته‌زایی یک زمین لرزه گردد (شکل 5-5). سالیانه تعداد زیادی از زمین لرزه‌ها با بزرگی " $M \geq 3$ " در پهنه‌ی میانی ایالات متحده‌ی آمریکا رخ می‌دهد که از سال 2001 به بعد به طور چشمگیری افزایش یافته است که دلیل این امر تأثیر و تشدید فعالیت‌های انسانی است. بزرگی زمین لرزه‌ها با اندازه‌گیری امواج لرزه‌ای و ثبت آن‌ها توسط لرزه نگاشت² انجام می‌گیرد. به یاد

¹ Ellsworth

² Seismogram

داشته باشید که مقیاس بزرگی "M" لگاریتمی بوده و هر واحد نمایش دهنده‌ی افزایش ده برابری دامنه‌ی¹ امواج لرزه‌ای می‌باشد. مقادیر بزرگی 3، نشانه‌ی رخداد ضعیف می‌باشد، یعنی توسط مردم احساس می‌شود و به ندرت باعث ایجاد خسارت می‌گردد. انرژی یک موج لرزه‌ای "10^{1.5}" برابر دامنه‌ی آن است و هر واحد نشانه‌ی افزایش 32 برابری در انرژی لرزه‌ای یک زمین لرزه می‌باشد. شروع زمین‌لرزه و انتشار آن‌ها به ویژگی‌های مکانی ساختگاه، مانند تأثیر ویژگی‌های اصطکاک گسل‌ها و هندسه‌ی آن‌ها، سازگان تنش‌های عادی پیش لرزه‌ها، تغییر تنش‌های القایی ناشی از فعالیت‌های انسانی و حجم سیال تزریق شده و یا پمپاژ شده، بستگی دارد.



شکل 5-5: برشی از ساز و کار زمین لرزه‌های القایی، (سمت چپ) افزایش فشار منفذی

و در (سمت راست) تغییر زمین ایستایی بار در نزدیکی گسل است. در موارد بالا، هر دو تنش طبیعی و مماسی بر روی تغییر گسل منجر به فعال شدن آن‌ها می‌گردد. (شولتز و همکاران/2017)

موارد متعددی در ارتباط با رخداد ریز لرزه‌ها که به طور مستقیم با شکستگی‌های هیدرولیکی همبسته هستند، گزارش شده است. این موارد بسیار قابل توجه هستند، اگرچه بزرگی آن‌ها کم و خسارت‌های قابل توجهی در آن‌ها دیده نمی‌شود ولی منجر به افزایش نگرانی‌های عمومی می‌شود. استخراج هیدروکربن‌ها از شیل‌ها نیازمند ایجاد شبکه‌ای از شکستگی‌های باز در گمانه‌ها می‌باشد. این رویکردها با استفاده از تزریق با فشارهای زیاد و تزریق آب به سازندها صورت می‌گیرد. همچنین به طور خودخواسته تعداد زیادی از ریزلرزه‌های القایی که بزرگی آن‌ها کوچکتر از یک " $M < 1$ " است، بوجود می‌آید. به تازگی در بسیاری از موارد زمین لرزه‌های القایی بزرگی ایجاد شده است که به طور مستقیم به شکستگی‌های هیدرولیکی ارتباط داده می‌شود. در سال 2013، هالند² پژوهش‌هایی را بر روی توالی‌های جنوب اوکلاه‌مای مرکزی و بر روی زمین لرزه‌هایی با بیشینه بزرگی " $2.9M$ " انجام داد و ثابت کرد که همبستگی روشنی بین خردشدگی‌ها در هنگام بهره‌برداری و فعالیت‌های لرزه‌ای وجود دارد. در آوریل 2011 در ناحیه‌ی بلک پول³ در شمال انگلستان مدت زمان کوتاهی لرزه‌خیزی با بزرگی " $2.3M$ " را

¹ Amplitude

² Holland

³ Blackpool

پس از شکستگی‌های هیدرولیکی در ذخایر گازی شیل‌ها در حوضه‌ی باولند¹، تجربه کردند. (انجمن و مؤسسه‌ی مهندسی سلطنتی²/2012).

تزریق به چاه‌های دفع باعث برانگیخته شدن و یا ایجاد زمین لرزه‌های القایی در نیمه‌ی غربی ایالات متحده گردیده است. پیش از سال 2011، رخدادهایی با " $M=4.8$ " در سال 1967 در دنور آمریکا، بزرگترین رخدادی بود که در جامعه‌ی علمی به عنوان زمین لرزه‌ی القایی ناشی از تزریق پساب و فاضلاب، ایجاد شده بود (هرمان و پارک³/1981). در آن زمان زمین لرزه‌ها تا 10 کیلومتری از نقطه‌ی تزریق و در امتداد سامانه‌ی گسلی کهن با فشار بحرانی $3/2$ مگاپاسکال، مهاجرت کرده بودند. تزریق این پساب‌ها باعث رخداد بیش از 109 زمین لرزه‌ی کوچک القایی " $0.4 < M < 3.9$ " از ژانویه‌ی 2011 تا فوریه 2012 دریانگ استون⁴ در اوهایو⁵ و در مجاورت چاه‌های ژرف تزریق سیالات، شده بود. لرزه‌های اصلی در ژرفای 3500 تا 4000 متری و در امتداد گسلی که در پی سنگ پرکامبرین کارساز شده بود، رخ داده بود (کیم⁶/2013). یک مورد مشابه نیز در آرکانزاس مرکزی در آمریکا گزارش شده بود (هورتون⁷/2012) تعدادی از مطالعات اکتشافی در ارتباط با واکنش ناشی از تزریق آب و فعالیت‌های القایی در سامانه‌های زمین‌گرایی انجام شده است. برجسته‌ترین نمونه‌ی رخداد القایی با بزرگی " $M=3.4$ " در سال 2006 به علت برانگیخته شدن مخزن زمین‌گرایی در بخش‌های زیر سطحی شهر بازل⁸ در سوئیس و در ژرفای پیرامون 5000 متری رخ داد. (هارینگ⁹ و همکاران/2008) و هزاران لرزه‌ی کوچک ثبت گردید. که از شرکت‌های بیمه بیش از 7 میلیون یورو خسارت دریافت کردند، در سال 2003 در ساختگاه زمین‌گرایی سولتزسوس فورتس¹⁰ در فرانسه، برانگیخته شدن مخزنی در ژرفای 4800 متری باعث ایجاد رخدادهای القایی با بزرگی " $M=2.9$ " گردید. (بایش¹¹/همکاران, 2010). مرکز روستحی زلزله‌ها هم راستا با ساختار گسله‌های نیمه عمودی، از پیش موجود بوده است. پروژه‌ی سنگ‌های خرد شده گرم در حوضه‌ی کوپر¹² در جنوب استرالیا در سال 2002 در مخزن گرانیته‌ی هابانرو¹³ در ژرفای 4000 تا 4500 متری راه‌اندازی گردید. آزمون‌های محرک سازی متفاوتی انجام شده بود که زمین لرزه‌هایی با بزرگی بین $1/7$ تا $3/1$ با ژرفای کانونی $2/4$ تا $7/8$ کیلومتر و ژرفای 3900 تا 4500 متری، ایجاد گردید. در این شرایط، تزریق موجب تغییرات چشم‌گیری در سازگان تنش مؤثر به دلیل تغییر فشار سیال سازند و افت حرارتی در سنگ گردید که احتمال فعالیت دوباره‌ی گسل‌ها و در نتیجه لرزمخیزی‌های القایی را افزایش می‌داد (گان¹⁴ و السورت/2014).

با توجه به احتمال رخداد لرزه‌های القایی به دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی، زمین‌لرزه‌ی لورکا¹⁵ در می سال 2011 در جنوب‌شرقی اسپانیا با بزرگی " $M=5.1$ " رخ داد که به شهر لورکا خسارت‌های زیادی وارد کرد، صدها نفر مجروح و 9 نفر کشته شدند. ژرفای کانونی زلزله در یک سامانه‌ی فعال و پیچیده از گسل‌های امتداد لغز¹⁶ در ژرفای 3 کیلومتری قرار داشت. براساس مطالعات گونزالس¹⁷ در سال 2012

¹ Bowland Basin

² Royal Society & The Royal Academy of Engineering

³ Hermann & Park

⁴ Youngstone

⁵ Ohio

⁶ Kim

⁷ Horton

⁸ Basel

⁹ Haring

¹⁰ Soultz- Sous - Forts

¹¹ Baisch

¹² Cooper Basin

¹³ Habanero

¹⁴ Gan

¹⁵ Lorca

¹⁶ Strike Slip

¹⁷ Gonzalez

این رخداد ممکن است به دلیل باربرداری سطحی قابل توجه پوسته باشد که بعلت کاهش 250 متری تراز سطح آب زیرزمینی در سال‌های 1960 تا 2010 به دلیل اضافه برداشت از آبخوان بوده باشد. کاهش تنش کل ممکن است باعث کاهش تنش طبیعی مؤثر بر روی صفحه‌ی گسلی گردد که موجب فعال سازی دوباره‌ی آن می‌شود. به این ترتیب یادآوری می‌شود که توافق کلی در ارتباط با پایین افتادن سطح پیرومتریک و این رخدادها وجود ندارد.

هنگامی که نگرانی‌ها در ارتباط با رخداد زمین لرزه‌های القایی افزایش می‌یابد، گستره‌ای وسیع برای شناسایی و تعیین ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی مهم، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این داده‌ها بایستی به درستی به عنوان داده‌های ورودی ابزار الگوسازی برای پیش‌بینی فعال شدن گسل‌ها و راندگی‌های ناشی از برداشت آب و یا تزریق سیالات، مورد استفاده قرار گیرند (فرروناتو/2008، گان و السورث/2014، یها و یوانس/2014 و تیاتینی/2014). با بهره‌گیری از الگوی موردی¹ می‌توان لغزش گسل‌ها و یا راندگی‌ها را برآورد نمود و بزرگی لرزه‌خیزی را پیش‌بینی کرد. در ادبیات لرزه‌ای تعدادی روابط تجربی ما را به پیش‌بینی بزرگی لرزه‌های القایی ناشی از فعال شدن دوباره‌ی گسل‌ها و راندگی‌ها، هدایت می‌کند. به تازگی، ماترولدوی² و همکاران در سال 2012 معادله‌ای را براساس نظریه‌ی لرزه‌خیزی پیشنهاد کردند که می‌تواند گشتاور لرزه‌خیزی را برای یک لرزه‌خیزی القایی ناشی از گسل‌ها و یا راندگی‌های امتداد لغز، برآورد نماید.

$$M_0 = G \Delta L \Delta Z_a s_a \quad (\text{معادله‌ی 29})$$

در این معادله:

ΔL = طول افقی بخش فعال شده‌ی گسل و یا راندگی (L)

ΔZ_a = ارتفاع بخش فعال شده‌ی گسل و یا راندگی (L)

s_a = میانگین سطوح لغزش گسل و یا راندگی (L)

G = مدول برشی سازند در ترکیب با گسل و یا راندگی ($ML^{-1}T^{-2}$)

مقادیر "G" به قابلیت تراکم‌پذیری خاک وابسته بوده و در معادله‌ی 30 ارائه شده است:

$$G = \frac{1}{2c_b} \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \quad (\text{معادله‌ی 30})$$

در این رابطه:

ν = نسبت پواسون³ (نسبت کرنش عرضی به کرنش محوری در یک نمونه‌ی فشاری تک محوری)

گشتاور لرزه‌ای " M_0 " که از معادله‌ی 29 به دست آمده ممکن است به ممان تبدیل شود "M" برای

اندازه‌گیری نیرومندی رخداد لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه‌ی " $M_0 - M$ " توسط کاناموری و

اندرسون⁴ در سال 1975 تعریف شده بود که در معادله‌ی 31 ارائه می‌گردد:

$$M = \frac{2}{3} (\log_{10} M_0 - 9.1) \quad (\text{معادله‌ی 31})$$

در این رابطه " M_0 " برحسب نیوتن متر " Nm " است. در معادله 30 برای استفاده از " c_b " در اولین

چرخه‌ی بارگذاری، در صورت پمپاژ آبخوان و در چرخه‌ی دوم باربرداری و یا بارگذاری دوباره و در

هنگام تغذیه و یا فشردسازی دوباره‌ی آبخوان استفاده می‌شود. واقعیت این است که لرزه‌خیزی در مخزن

معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که کاهش فشار منفذی نسبتاً زیاد باشد و بیشتر چنین تنش‌ی به وسیله‌ی ساختار

¹ Ad Hoc

² Nazzoldi

³ Poisson, S Ratio

⁴ Kanamori & Anderson

مخزن، تجربه نشده باشد. مخزن گرونینگن¹ در هلند نمونه‌ای از این رخداد می‌باشد. (وان تینن-ویسر و برونز² 2015)

¹ Groningen

² Van Thienen – Visser & Breunese

6 - نمونه‌ای از محاسبات فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی

در اینجا یک نمونه‌ی عملی از محاسبه‌ی فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی ارائه می‌گردد. داده‌ها مربوط به شهر ونیز در ایتالیا است که نشست زمین مهمی را به دلیل فعالیت‌های انسانی در نیمه‌ی دوم قرن بیستم تجربه کرده و توسط گامبولاتی در سال 1971 به طور چکیده ارائه شده است. این داده‌ها برای محاسبات به دو گونه مورد استفاده قرار می‌گیرند. گونه‌ی اول شامل بررسی‌های سنگ چینه‌شناسی بخش‌های زیرین خاک‌ها تا ژرفای موردنظر (ژرفایی که افت در آن رخ داده است) و با در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی هر چینه‌ای انجام می‌شود (چینه‌ها همگن فرض می‌شوند) و گونه‌ی دوم تاریخچه‌ی کاهش تراز سطح پیزومتریک در سازندهای تراوا (بیشتر ماسه‌ای) که از طریق پمپاژ چاه‌ها انجام می‌شود. جدول 1-6 چینه‌شناسی سنگی ساده شده‌ی گستره‌ی ونیز را تا ژرفای 300 متری نشان می‌دهد. ضخامت قابل تراکم در برخی از موارد با ضخامت کل نهشته‌ها متفاوت بوده که شامل لایه‌هایی از ماسه‌ها هستند که به مراتب سخت‌تر از لایه‌های رسی می‌باشند. این جدول شامل تراز سطح آبخوان‌های متعددی می‌باشد که در توالی‌های رسوبی در نقاط مختلف ونیز به وفور مشاهده می‌شوند. توجه ویژه به لایه‌های "2، 4، 6، 8، 11 و 13" که ماسه‌ای هستند نشان می‌دهد که چاه‌های آبیگری و گمانه‌های پیزومتریک در آن‌ها حفر شده‌اند، بدیهی است زیر تقسیمات دقیق‌تر واحدهای چینه سنگی در زیرزمین وجود دارد و می‌توان این نهشته‌های را با دقت بیشتری بررسی نمود که امکان رده‌بندی مناسب‌تر چینه‌های ترکیبی را فراهم می‌سازد.

جدول 1-6: چینه شناسی و سنگ شناسی ساده سازی شده‌ی در گستره‌ی ترونکتو در ونیز - ایتالیا

لایه	ژرفای میانه‌ی لایه (متر)	ضخامت لایه (متر)	ضخامت قابل تراکم (متر)	توصیف سنگ‌شناسی
1	28/0	56	45	رس، گل، ماسه با بین لایه‌هایی از رس، رس ماسه‌ای، رس آلی
2	71/5	31	31	ماسه، ماسه‌ی رس‌دار، تناوب ماسه با رس
3	92/0	10	10	بیشتر از رس
4	102/0	10	10	ماسه به همراه با لایه‌های نازک رس
5	113/0	12	6	تناوب لایه‌های ماسه‌ی رس‌دار و رس
6	137/0	36	36	ماسه، ماسه پایین لایه‌های رس‌دار
7	159/0	8	8	بیشتر از رس
8	168/0	10	10	ماسه و ماسه‌ی رس‌دار
9	194/0	22	22	ماسه‌ی رس دار، ماسه با بین لایه‌های رسی
10	210/0	10	10	بیشتر از رس
11	222/5	15	15	بیشتر از رس
12	242/5	25	25	بیشتر از رس
13	267/5	25	25	بیشتر از ماسه، ماسه‌سنگ روشن، لایه‌های نازک از شن روشن
14	285/0	10	8	لایه‌های متناوب ماسه و رس

در سال 1905 اندازه‌گیری تراز سطح پیزومتریک در ژرفای متفاوت انجام و نتایج آن در جدول 2-6 ارائه شده است. همبستگی بین ژرفای جدول 2-6 و تراز سطح آبخوان‌ها در جدول 1-6 بسیار دور از انتظار است و علت آن می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری شده در جدول 2-6 و یا به دلیل تفاوت ویژگی‌های زمین شناسی موقعیت و ژرفای چاههایی باشد که مقادیر آن در جدول 2-6 ارائه شده است. به

تازگی داده‌های جدید در جدول 6-3 گردآوری شده که تراز سطح پیزومتریک آبخوان‌های مختلف را به صورت میانگین و بر اساس ژرفای یکسان تعداد زیادی از گمانه‌هایی با همان ژرفا، ارائه کرده است.

جدول 6-2: تراز پیزومتری مشاهده شده در ونیز در سال 1905

ژرفای اندازه‌گیری شده (متر)	تراز سطح پیزومتریک (متر) (بالای تراز میانگین آب دریا)
56	2/95
91	3/80
112	4/55
135	4/90
155	5/60
170	6/25
198	6/70

جدول 6-3: تلفیق داده‌های چند چاه در گستره‌ی ونیز

لایه	تراز سطح پیزومتریک (متر) (بالای تراز میانگین آب دریا)	
	سال 1940	سال 1966
2	1/5	
4	1/0	-3/0
6	2/5	
11	2/0	-6/0
13	4/0	-4/5

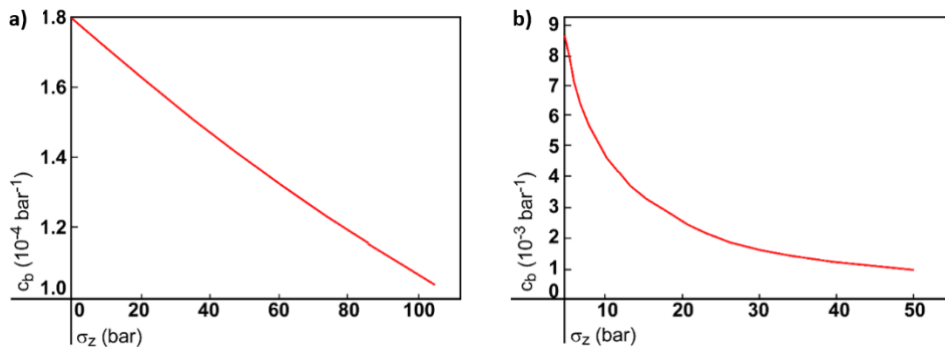
در سال 1969 لفران و کلاوسینگ¹ تحلیلی را بر روی خاک‌های تحکیم نیافته (همانند خاک‌های تالاب ونیز) در ژرفای 230 متری و با تخلخل‌های 0/35 تا 0/55 و با مقادیر میانگین 0/4 انجام دادند. میانگین وزن مخصوص دانه‌ای جامد در مطالعات مشابه دارای بازه‌ی 2680 تا 2730 کیلوگرم بر مترمکعب بود. میانگین تخلخل 0/4 و وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک 2700 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد.

مشکل مهمتر انتخاب مقادیر میانگین قابلیت تراکم‌پذیری ماسه‌ها و رس‌ها به دلیل بازه‌ی گسترده‌ی آن‌ها است. شکل "1a-6" رفتار "cb" را در برابر " σ_z " برای ماسه‌ها و شکل "1b-6" این رفتار را برای رس‌ها نشان می‌دهد. باید به این نکته توجه داشت که مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل "1a-6" بر روی نمونه‌ای در شرایط آزمایشگاهی انجام شده که اجازه‌ی انبساط جانبی به نمونه‌ها داده شده است در صورتی که تراکم درجا (میدانی) بدون انبساط جانبی رخ می‌دهد (شرایط تحکیمی)، بنابراین مقادیر شکل "1a-6" بایستی با اعمال ضریب، اصلاح شوند.

$$\frac{1 + v}{3(1 - v)}$$

این ضریب 0/55 بوده و نسبت پواسون " $v = 0.25$ " می‌باشد.

¹ Lofgren & Klausning



شکل 1-6: تراکم‌پذیری وابسته به تنش (a) ماسه و (b) رس‌ها در نواحی ساحلی ونیز

(اصلاح شده توسط گامبولاتی/1972)

محاسبات فرونشست برای دوره‌ی زمانی 1952 تا 1969 انجام و در دسترس می‌باشد. جدول شماره‌ی 4-6 نشانگر تنش اولیه " σ_{z0} " برای هر بازه‌ی از ژرفا در جدول 2-6 ارائه شده است. این نتایج با فرض اشباع شدگی کامل و قابلیت تراکم‌پذیری از شکل (1a-6) برای ماسه‌ها و از شکل " (1b-6) " برای رس‌ها برآورد شده است. مقادیر عددی برای میانه‌ی صفحه‌ی هر چینه در محاسبات استفاده شده است.

جدول 4-6: تنش اولیه و تراکم‌پذیری برای لایه‌های توالی چینه‌شناسی سنگی در ونیز

لایه	σ_{z0} (bar)	$C_b (10^{-4} \text{bar}^{-1})$
1	3/0	50/0
2	7/0	0/96
3	9/0	50/0
4	10/0	0/94
5	11/0	45/0
6	13/5	0/93
7	15/5	33/0
8	16/5	0/91
9	19/5	0/90
10	21/0	25/0
11	22/5	0/89
12	24/0	22/0
13	26/5	0/87
14	29/0	18/0

داده‌های جدول‌های 3-6 و 4-6 برای اعلان‌نظر صریح کاهش تراز سطح پیزومتریک در آبخوان‌ها کافی نیستند. به هر صورت می‌توان گفت دو آبخوان بسیار ژرف به طور تقریبی دارای کاهش برابر با تراز سطح پیزومتریک در بین سال‌های 1940 تا 1966 بوده‌اند اما افت دو برابری در لایه‌هایی با ژرفای 100 متری در آن‌ها ثبت شده است، بنابراین فرض منطقی این است که دو آبخوان با شرایط هیدرولیکی متمایز به وسیله‌ی یک لایه‌ی رسی در ژرفای 210 متری از یکدیگر جدا شده باشند. (لایه‌ی 10 در جدول‌های 2-6 و 5-6)

چکیده‌ی تحلیل‌ها و ارزیابی داده‌های تراز سطح پیزومتریک، در جدول 5-6 ارائه شده است. در برخی موارد مقادیر با داده‌های جدول‌های 3-6 و 4-6 متفاوت هستند، اگر چه آن‌ها تنها تأثیر کمی بر روی محاسبات نهایی فرونشست دارند ولی این موارد به طور چشمگیری بوسیله‌ی اختلاف بین ترازهای سطح پیزومتریک و دوره‌های زمانی متوالی، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. تفاوت بین مقادیر مورد استفاده برای محاسبات کاربردی، در جدول 6-6 ارائه شده است. بین سال‌های 1900 تا 1944، از سال 1944 تا 1966 و از سال 1966 به بعد، فرض می‌کنیم که یک وابستگی زمانی خطی در تراز سطح پیزومتریک وجود دارد.

جدول 5-6 : داده‌های به دست آمده برای کاهش ترازهای سطح پیزومتریک در آبخوان ونیز

لایه (تنها آبخوان) (متر)	تراز سطح پیزومتریک (متر) (بالای میانگین سطح آب دریا)		
	سال 1900	سال 1944	سال 1966
2	3/0	1/5	-3/0
4	5/0	1/5	-3/0
6	5/0	1/5	-3/0
8	5/0	1/5	-3/0
11	5/0	3/0	-5/0
13	5/0	3/0	-5/0

جدول 6-6 : محاسبه‌ی تراکم لایه‌های زیرین خاک و فرونشست کلی زمین در گستره‌ی ترونکتو در ونیز

لایه	C _v (مترمربع در سال)	تغییرات تراز سطح پیزومتریک از 1952 تا 1969 (متر)	تراکم از سال‌های 1952 تا 1969 (سانتی متر)
1			3/95
2		-3/5	0/10
3	0/45		1/20
4		-3/5	0/03
5			0/90
6		-3/5	0/10
7	0/45		0/75
8		-3/5	0/03
9			0/07
10	0/45		0/87
11		-6/4	0/08
12	0/45		1/10
13		-6/4	0/13
14			0/28
فرونشست کلی زمین از سال 1952 تا 1969 (سانتی متر)			9/60

در نهایت برای استفاده از این داده‌ها بایستی مقادیر ضریب تحکیم " C_v " را برای رس‌ها مشخص نماییم. با مراجعه‌ی دوباره به تجربیات لفران و کلاوسینگ (1969)، مقادیر " $C_v = 0.45$ " مترمربع در سال برای رس‌ها در ژرفای زیاد در نظر می‌گیریم. برای لایه‌های بالایی از وجود تأخیر صرف نظر کرده و می‌توانیم این فرض‌ها را به چینه‌های نازک لایه با تناوب ماسه و رس، همبسته سازیم زیرا ضخامت لایه‌های رسی کم است.

برای هر لایه‌ی ماسه‌ای و رسی، تراکم از سال 1952 تا 1969 با استفاده از داده‌های جدول‌های (6-6-2، 5-6 و 6-6) محاسبه گردید. برای لایه‌های رسی 3، 7، 10، 12 محاسبات با استفاده از داده‌های جدول 6-6 و نتایج تراکم بین سال‌های 1900 تا 1952 و 1900 تا 1969 صورت گرفته است. این محاسبات با استفاده از شکل 2-7 و با توزیع کاهش متناسب تراز سطح پیزومتریک در سال‌های 1900 تا 1910، 1910 تا 1920، 1920 تا 1930، 1930 تا 1940، 1940 تا 1944، 1944 تا 1952، 1952 تا 1960 و 1960 تا 1969 انجام شده است. فرض بر این است که کاهش تراز سطح پیزومتریک در هر دوره‌ی زمانی به صورت لحظه‌ای در زمان شروع رخ می‌دهد. همچنین فرض بر این است که تأثیر استخراج در ژرفای پایین‌تر از 290 متری انتشار نمی‌یابد (ژرفترین چاه در تالاب گستره‌ی ونیز). نتایج محاسبات در جدول 6-6 ارائه شده است. میزان فرونشست محاسبه شده‌ی 9/6 سانتی‌متر بوده که در مقایسه با میزان 12 سانتی‌متر اندازه‌گیری شده در ونیز در دوره‌ی زمانی 1952 تا 1962، کاملاً رضایت بخش است.

7 - نتیجه‌گیری

بیش از یک قرن از شناخت فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی در ارتباط با تولید سیالات از بخش‌های زیرسطحی زمین می‌گذرد. برداشت آب‌های زیرزمینی اولین و مهم‌ترین علت این پیامدها می‌باشد. اگر چه امروزه کل خسارت سالانه پیرامون یک میلیارد دلار است (بورچرز و کارپنتر¹/2014) ولی انتظار می‌رود به دلیل رشد جمعیت و شرایط اقتصادی، این رقم افزایش یابد. در کشورهای توسعه یافته فرونشست زمین مسئله‌ای است که بررسی و ارزیابی آن‌ها توسط حکومت‌ها و افکار عمومی صورت می‌گیرد. پیامد این پدیده شامل کاهش ظرفیت انتقال کانال‌ها، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، کاهش اثربخشی خاکریزها و سدها، خسارت به جاده‌ها، راه‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها، چاه‌های آب، خطوط لوله و سایر سازه‌ها و زیر ساخت‌های سطحی می‌گردد. افزایش آسیب‌پذیری به آبخوان‌ها، نفوذ آب‌های شور، آلودگی آبخوان‌های سطحی ناشی از گسستگی‌های زمین و سیلاب در مناطق ساحلی و نواحی شهری و درون سرزمینی (در نیواورلئان در لوئیزیانا و مکزیکویستی) اجتناب‌ناپذیر است. پیامدهای زیست محیطی فرونشست زمین در دهه‌های گذشته از ساختگاه‌های روستایی و صنعتی (مانند دره‌ی آنته لوب² کالیفرنیا و یا دلتای رودخانه پو³ در ایتالیا) به مراکز شهرها (مانند شانگهای چین و مکزیکویستی) تغییر مکان یافته و علت آن افزایش جمعیت و رشد کلان‌شهرها بوده است. نکته‌ی قابل توجه اینکه در سال 1950 شهر نیویورک تنها شهری بود که 10 میلیون نفر جمعیت داشت ولی امروزه بیش از 30 شهر در جهان دارای جمعیت بیش‌تر از 10 میلیون نفر هستند و بیشتر آن‌ها در مناطق ساحلی کشورها گسترش یافته‌اند.

هنگام برآورد پیامدهای فرونشست زمین بر روی آبخوان‌های چندگانه، رویکرد اولیه‌ی استفاده از جابجایی‌های عمودی یک بعدی نشست زمین $\eta = \Delta p c_b s_0$ است. (یعنی برابر با تراکم واحد پمپاژ شده η با ضخامت اولیه‌ی s_0 و قابلیت تراکم‌پذیری عمودی تک‌محوری c_b تحت تأثیر کاهش فشار منفذی ΔP می‌باشد). اگر تراکم ذرات خاک‌های رسی و یا سیلتی (به نام آبخوان کم تراوا، طبقات محصور شده و یا عدسی‌های پراکنده‌ی رسی و یا سیلتی) مناسب باشند، در نتیجه فرونشست زمین در ارتباط با تراکم سازه‌های ماسه‌ای پمپاژ شده می‌تواند دارای تأخیر زمانی باشد. در نتیجه فرونشست زمین می‌تواند پس از توقف پمپاژ، همچنان ادامه داشته باشد. برگشت پذیری به دلیل تغذیه‌ی آبخوان و تحت فشار قرار گرفتن دوباره‌ی آبخوان‌های کم تراوا (به صورت طبیعی و یا مصنوعی) می‌تواند تنها بخش کوچکی از فرونشست کلی زمین را جبران نماید، زیرا فرونشست به صورت cb در حالت انبساط معمولاً کوچکتر از cb بکر در حالت فشاری است (بویره در واحدهای سیلتی و یا رسی)

سازوکار زیربنایی فرآیندهای اساسی بخوبی شناخته شده و توافق جهانی در این مورد وجود دارد و الگوسازی ریاضی رخدادهای گذشته و انتظارات آینده در چنین مواردی به خوبی تأیید و تثبیت شده است. فن آوری‌های نوین رایانه‌ای امکان شبیه‌سازی هندسی پیچیده‌ی زمین‌شناسی حوضه‌های لغزشی، توزیع نرخ پمپاژ مورد نیاز، ناهمگنی، ناهمسانی و غیرخطی بودن ویژگی‌های محیط‌های متخلخل، را فراهم آورده است. اندازه‌گیری و پایش فرونشست‌های زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی اکنون در مرحله‌ی بسیار پیشرفته‌ای قرار دارد (بویره با استفاده از فن آوری‌های راداری). دانشمندان می‌توانند به مسئولین و تصمیم گیرندگان جهت پیش بینی، جلوگیری و یا دست کم در کاهش موفقیت آمیز فرونشست‌های زمین کمک نمایند

¹ Borchers & Carpenter³ Po² Antelope

ولی در مناطق خاص، انجام بررسی‌ها و پژوهش‌های زیادی برای پیش‌بینی‌ها ضروری است. این پژوهش‌ها شامل تعیین تغییرات سه بعدی و تنش‌های میدانی در ارتباط با پمپاژ آب‌های زیرزمینی و برخاستگی زمین به علت تزریق آب و واسنجی معکوس نرخ فرونشست می‌باشد. نرخ فرونشست زمین در برخی از مناطق جهانی به صورت قابل توجهی کاهش یافته است (به عنوان مثال: ونیز در ایتالیا، توکیو در ژاپن و به تازگی شانگهای در چین که به دلیل بهره‌برداری بیشتر از منابع آبی جایگزین به جای آب‌های زیرزمینی بوده است). به این ترتیب، دسترسی به این هدف در بسیاری از کلان‌شهرهای دیگر کار ساده‌ای نیست و به همین دلیل فرونشست زمین به تازگی یکی از مهمترین تهدیدها برای توسعه پایدار بشمار می‌رود (برنامه‌ی هشتم آب‌شناسی بین‌المللی یونسکو/2014-2020).

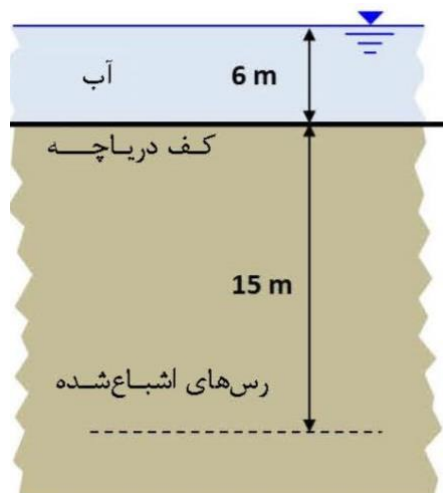
پیشرفت‌های بزرگ در پژوهش‌ها نیازمند پیش‌بینی‌های دقیق‌تر شکاف‌ها و ترک خوردگی‌های زمین، شکستگی‌های هیدرولیکی، فعال شدن گسل‌ها و لرزه‌خیزی‌های القایی می‌باشد. فرآیند الگوسازی در این موارد تاکنون به رویکردهای توسعه‌ای در زمینه‌ی مکانیک ناپیوسته و رویکردهای علوم زمین محدود بوده است. ولی امروزه پیشرفت‌های چشمگیری در شناسایی ساز و کارهای جدید رخ داده است. با این حال، پایش رخداد آنها، مشخص کردن خواص رئولوژیکی¹ آنها و توسعه الگوهای عددی قابل اعتماد و دقیق همچنان چالش‌های عمده‌ای را برای تلاش‌های پژوهشی در آینده‌ی نزدیک، ایجاد خواهد کرد.

¹ Rheological

8- تمرین‌ها

تمرین 1

تنش کل، تنش مؤثر عمودی و فشار منفذی را در ژرفای 15 متری زیر کف دریاچه‌ای با ژرفای 6 متری محاسبه کنید. خاک زیر کف دریاچه شامل رس‌های نرم با ضخامت بیش از 15 متر می‌باشد (شکل تمرین 8-1). تخلخل رس 40 درصد و وزن مخصوص خاک 2700 کیلوگرم بر مترمکعب است. اگر سطح آب دریاچه به 4 متر کاهش یابد، تغییر تنش مؤثر چگونه خواهد بود؟



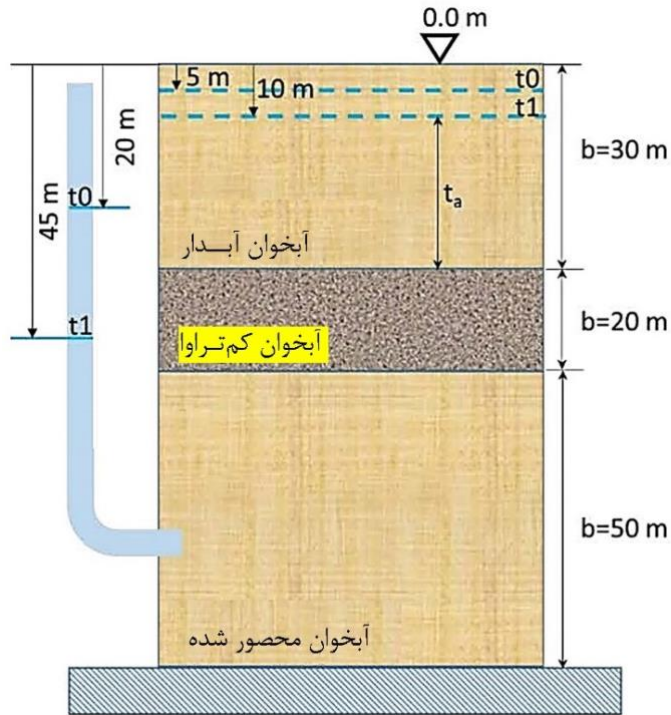
شکل تمرین 8-1: برش عرضی تمرین 1

تمرین 2

سامانه‌ی آبخوانی در شکل تمرین 8-2 نشان داده شده که تحت تأثیر پمپاژ آب‌های زیرزمینی قرار گرفته است. کاهش تراز سطح ایستابی و فشار ارتفاع پیزومتریک پس از یک ماه ثبت شده که در شکل نمایش داده شده است. اطلاعات دیگری در دسترس می‌باشد.

- آبخوان کم تراوا: تراکم‌پذیری خاک " $C_b = 10^{-3}$ "
- آبخوان آبدار: تخلخل 35 درصد، میزان رطوبت 10 درصد، " $C_b = 10^{-4}$ "
- آبخوان محصور: " $C_b = 2 \times 10^{-5}$ "

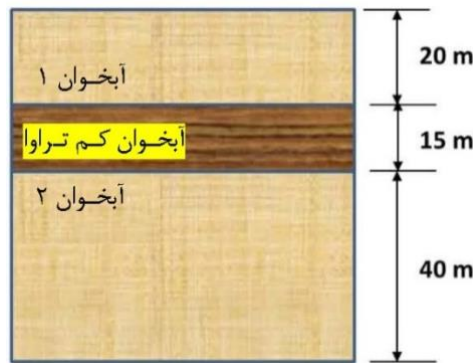
فرونشست تجمعی زمین را پس از یک ماه و 10 سال و با فرض ثابت ماندن کاهش فشار در سفره‌های زیرزمینی و اینکه هدایت هیدرولیکی آبخوان کم‌تراوا سه برابر کوچکتر از آبخوان‌های دیگر است، را محاسبه کنید.



شکل تمرین 2-8: برش عرضی تمرین 2

تمرین 3

پمپاژ آب‌های زیرزمینی از دو آبخوان محصور شده، در شکل تمرین 3-8 ارائه شده است. پس از یک سال فرونشست تجمعی برابر 0/1 متر اندازه‌گیری شده است. افت تراز سطح پیزومتریک ثبت شده در آبخوان‌های 1 و 2 به ترتیب 20 متر و 15 متر می‌باشد. با فرض ثابت بودن فشار در شرایط پیوسته در آبخوان کم‌تراوا و اگر نسبت بین قابلیت تراکم‌پذیری " $c_{b,aquifer1}=2c_{b,aquifer2}$ " و " $c_{b,aquifer1}=0.1 c_{b,aquitar}$ " باشد، قابلیت تراکم‌پذیری سه لایه‌ی خاک را محاسبه کنید.



شکل تمرین 3-8: برش عرضی تمرین 3

9- کتابنامه

دسترسی به اصل مقالات

- Allen, S.A., 1984, Types of land subsidence. in, Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Ground-Water Withdrawal, editor, J.F. Poland. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris, France, pages 291–305.
- Allis, R., C. Bromley, and S. Currie, 2009, Update on subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, volume 38, pages 169–180.
- Amelung, F., D. Galloway, J.W. Bell, H.A. Zebker, and R.J. Lacznia, 1999, Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer system deformation. *Geology*, volume 27, pages 483–486.
- Aobpaet, A., M.C. Cuenca, A. Hooper, and I. Trisirisatayawong, 2013, InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, volume 34, number 8, pages 2969–2982.
- Baisch, S., R. Vörös, E. Rother, H. Stang, R. Jung, and R. Schellschmidt, 2010, A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, volume 47, pages 405–413.
- Bankher, K.A., and A.A. Al-Harthia, 1999, Earth fissuring and land subsidence in Western Saudi Arabia. *Natural Hazards*, volume 20, pages 21–42.
- Baú, D., M. Ferronato, G. Gambolati, and P. Teatini, 2002, Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Géotechnique*, volume 52, number 8, pages 605–616.
- Bear, J., 1972, *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York.
- Bell, J.W., F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, and F. Novali, 2008, Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer system response to groundwater pumping and artificial recharge. *Water Resources Research*, volume 44, W02407, doi:10.1029/2007WR006152.
- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, volume 40, number 11, pages 2375–2383.
- Biot, M.A., 1941, A general theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, volume 12, number 2, pages 155–164.
- Biot, M.A., 1955, Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, volume 26, number 2, pages 182–185.
- Borchers, J.W., and M. Carpenter, 2014, Land subsidence from groundwater use in California, Full Report of Findings. California Water Foundation, 151 pages.

- Buckley, S.M., P.A. Rosen, S. Hensley, and B.D. Tapley, 2003, Land subsidence in Houston, Texas, measured by radar interferometry and constrained by extensometers. *Journal of Geophysical Research*, volume 108, number B11, page 2542, doi:[10.1029/2002JB001848](https://doi.org/10.1029/2002JB001848).
- Budhu, M., 2008, Mechanisms of earth fissures using the Mohr-Coulomb failure criterion. *Environmental Engineering and Geoscience*, volume 14, number 4, pages 281–295.
- Cabral-Cano, E., T.H. Dixon, F. Miralles-Wilhelm, O. Díaz-Molina, O. Sánchez-Zamora, and R.E. Carande, 2008, Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, volume 120, number 11-12, pages 1556-1566.
- Carpenter, M.C., 1993, Earth-fissure movements associated with fluctuations in ground-water levels near the Picacho Mountains, south-central Arizona, 1980-84. United States Geological Survey, Professional Paper, series 497, chapter H, 49 pages.
- Carréon-Freyre, D., M. Cerca, R. Gutierrez-Calderon, and M.H.L. de Guevara, 2010, Monitoring of land subsidence and fracturing in Iztapalapa, Mexico City, *in*, Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development, editors, D. Carréon-Freyre, M. Cerca, and D.L. Galloway. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Publication, volume 339, Wallingford, United Kingdom, pages 44–50.
- Carreon-Freyre, D., M. Cerca, G. Ochoa-Gonzalez, P. Teatini, and F.R. Zuñiga, 2016, Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence and hydraulic gradient in the Valley of Queretaro, Mexico. *Hydrogeology Journal*, volume 24, number 3, pages 657-674.
- Castelletto, N., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti, and P. Teatini, 2008, Can Venice be raised by pumping water underground? A pilot project to help decide. *Water Resources Research*, volume 44, W01408, doi:[10.1029/2007WR006177](https://doi.org/10.1029/2007WR006177).
- Chaussard, E., S. Wdowinski, E. Cabral-Cano, and F. Amelung, 2014, Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of the Environment*, volume 140, pages 94-106.
- Chen, C.T., J.T. Hu, C.Y. Lu, J.C. Lee, and Y.C. Chan, 2007, Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. *Engineering Geology*, volume 95, pages 30-47.
- Chilingarian, G.V., and L. Knight, 1960, Relationship between pressure and moisture content of kaolinite, illite, and montmorillonite clays. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, volume 44, pages 101-106.
- Cian, F., J.M.D. Blasco, and L. Carrera, 2019, Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: A methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. *Geosciences*, volume 9, page 124; doi:[10.3390/geosciences9030124](https://doi.org/10.3390/geosciences9030124).

- Colazas, X.C., and R.W. Strehle, 1995, Subsidence in the Wilmington oil field, Long Beach, California, USA, *in*, Subsidence Due to Fluid Withdrawal, editors, G.V. Chilingarian, E.C. Donaldson, and T.F. Yen. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pages 285-335.
- Collins, P.M., 2007, Geomechanical effects on the SAGD process. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering, volume 10, number 4, pages 367-375.
- Comerlati, A., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti, and P. Teatini, 2004, Saving Venice by sea water. Journal of Geophysical Research, Earth Surface, volume 109, F03006, doi:10.1029/2004JF000119 ↗.
- Conway, B.D., 2014, Land subsidence monitoring. Arizona Department of Water Resources Technical Report 2, Phoenix, Arizona, 35 pages.
- Cooper, H.H., Junior., 1966, The equation of groundwater flow in fixed and deforming coordinates. Journal of Geophysical Research, volume 71, number 20, pages 4785-4790.
- Da Lio, C., P. Teatini, T. Strozzi, and L. Tosi, 2018, Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations. Remote Sensing of the Environment, volume 205, pages 56-70.
- Dang, V.K., C. Doubre, C. Weber, N. Gourmelen, and F. Masson, 2014, Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data. Natural Hazards and Earth System Science, volume 14, pages 657-674.
- DeWiest, R.J.M., 1966, On the storage coefficient and the equations of groundwater flow. Journal of Geophysical Research, volume 71, number 4, pages 1117-1122.
- Dong, S., S. Samsonov, H. Yin, and S. Ye., 2014, Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. Environmental Earth Sciences, volume 72, number 3, pages 677-691.
- Du, J., S.J. Brissenden, P. McGillivray, S.J. Bourne, P. Hofstra, E.J. Davis, W.H. Roadarmel, S.L. Wolhart, S. Marsic, R.W. Gusek, C.A. Wright, 2008, Mapping reservoir volume changes during cyclic steam stimulation using tiltmeter-based surface deformation measurements. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering, volume 11, number 1, pages 63-72.
- Ellsworth, W.L., 2013, Injection-induced earthquakes, Science, volume 341, pages 142-147.
- Erban, L.E., S.M. Gorelick, and H.A. Zebker, 2014, Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. Environmental Research Letters, volume 9, 084010, doi: https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084010 ↗.
- Ezquerro, P., C. Guardiola-Albert, G. Herrera, J.A. Fernández-Merodo, M. Béjar-Pizarro, and R. Bonì, 2017, Groundwater and subsidence modeling combining geological and multi-satellite SAR data over the Alto Guadalentín aquifer (SE Spain). Geofluids, Article identification document 1359325, doi:10.1155/2017/1359325 ↗.
- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 39, number 1, pages 8-20.

- Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, 2011, A new algorithm for processing interferometric data-stacks: Squee-SAR™. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 49, number 9, pages 3460–3470.
- Ferronato, M., G. Gambolati, C. Janna, and P. Teatini, 2008, Numerical modelling of regional faults in land subsidence prediction above gas/oil reservoirs. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, volume 32, pages 633–657.
- Ferronato, M., N. Castelletto, G. Gambolati, C. Janna, and P. Teatini, 2013, II cycle compressibility from satellite measurements. Géotechnique, volume 63, number 6, pages 479–486.
- Feth, J.H., 1951, Structural reconnaissance of the Red Rock Quadrangle, Arizona. United States Geological Survey Open File Report 51–199, 32 pages.
- Finol, A., and Z.A. Sancevic, 1995, Subsidence in Venezuela, *in*, Subsidence Due to Fluid Withdrawal, editors, G.V. Chilingarian, E.C. Donaldson, and T.F. Yen. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pages 337–372.
- Freeze, R.A., 2000, Social decision making and land subsidence. *in*, Proceedings of sixth International Symposium on Land Subsidence, volume 1, editors, L. Carbognin, G. Gambolati, and A.I. Johnson. La Garangola Publication, Padova, Italy, pages 353–384.
- Fuller, M., 1908, Summary of the controlling factors of Artesian flows, United States Geological Survey, Bulletin 319, 44 pages.
- Gabriel, A.K., R.M. Goldstein, and H.A. Zebker, 1989, Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research, volume 94, number B7, pages 9183–9191.
- Gabrysch, R.K., and R.J. Neighbors, 2000, Land-surface subsidence and its control in the Houston-Galveston region, *in* Proceedings of sixth International Symposium on Land Subsidence, volume 2, editors, L. Carbognin, G. Gambolati, and A. I. Johnson. La Garangola Publication, Padova, Italy, pages 91–92.
- Galloway, D., and F.S. Riley, 1999, San Joaquin Valley, California: Largest human alteration of the Earth's surface, *in*, Land Subsidence in the United States, United States Geological Survey, Circular 1182, editors, D. Galloway, D.R. Jones, and S.E. Ingebritsen. United States Geological Survey, Denver, Colorado, pages 23–34.
- Galloway, D.L., and J. Hoffmann, 2007, The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. Hydrogeology Journal, volume 15, pages 133–154.
- Galloway, D., D.R. Jones, and S.E. Ingebritsen, editors, 1999, Land subsidence in the United States. United States Geological Survey, Circular 1182, 177 pages.
- Gambolati, G., 1972, Estimate of subsidence in Venice using a one-dimensional model of the subsoil. IBM Journal of Research and Development, volume 16, number 2, pages 130–137.

- Gambolati, G., 1973a, Equation for one dimensional vertical flow of groundwater: 1. The rigorous theory. *Water Resources Research*, volume 9, number 4, pages 1022–1028.
- Gambolati, G., 1973b, Equation for one dimensional vertical flow of groundwater: 2. Validity range of the diffusion equation. *Water Resources Research*, volume 9, number 5, pages 1385–1395.
- Gambolati, G., 1974, Second order theory of flow in three dimensional deforming media. *Water Resources Research*, volume 10, number 6, pages 1217–1228.
- Gambolati, G., and R. A. Freeze, 1973, Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 1. Theory. *Water Resources Research*, volume 9, number 3, pages 721–733.
- Gambolati, G., P. Gatto, and R. A. Freeze, 1974, Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 2. Results. *Water Resources Research*, volume 10, number 3, pages 563–577.
- Gambolati, G., P. Gatto, and G. Ricceri, 1984, Land subsidence due to gas/oil removal in layered anisotropic soils by a finite element model, *in*, Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence, International Association of Hydrological Sciences Publication, volume 151, editors, A.I. Johnson, L. Carbognin, and L. Ubertini, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, United Kingdom, pages 29–41.
- Gambolati, G., G. Ricceri, W. Bertoni, G. Brighenti, and E. Vuillermin, 1991, Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna. *Water Resources Research*, volume 27, number 11, pages 2899–2918.
- Gambolati, G., P. Teatini, L. Tomasi, and M. Gonella, 1999, Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence. *Water Resources Research*, volume 35, number 1, pages 163–184.
- Gambolati, G., P. Teatini, D. Baú, and M. Ferronato, 2000, The importance of poro-elastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy. *Water Resources Research*, volume 36, number 9, pages 2443–2459.
- Gambolati, G., P. Teatini, and M. Ferronato, 2005, Anthropogenic land subsidence, *in*, Encyclopedia of Hydrological Sciences, editor, M. G. Anderson. John Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom, volume four, chapter 158, pages 2444–2459.
- Gambolati, G., and P. Teatini, 2014, Venice Shall Rise Again - Engineered Uplift of Venice Through Seawater Injection. Elsevier Insights, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 100 pages.
- Gan, Q., and D. Elsworth, 2014, Thermal drawdown and late-stage seismic-slip fault-reactivation in enhanced geothermal reservoirs, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, volume 119, pages 8936–8949.
- Geerstma, J., 1973, Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. *Journal of Petroleum Technology*, volume 25, pages 734–744.
- Gebremichael, E., M. Sultan, R. Becker, M. El Bastawesy, O. Cherif, and M. Emil, 2018, Assessing land deformation and sea encroachment in the Nile Delta: A radar

- interferometric and inundation modeling approach, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, volume 123, pages 3208–3224.
- Gloe, C.S., 1984, Case history number 9.1. Latrobe Valley, Victoria, Australia, *in*, *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Ground-Water Withdrawal*, editor, J. F. Poland. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, pages 145–153.
- González, P.J., K.F. Tiampo, M. Palano, F. Cannavó, and J. Fernánde, 2012, The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading, *Nature Geoscience*, volume 5, pages 821–825.
- Häring, M.O., U. Schanz, F. Ladner, and B.C. Dyer, 2008, Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system, *Geothermics*, volume 37, pages 469–495.
- He, Z., B. Ma, J. Long, H. Zhang, K. Liang, and D. Jiang, 2017, Recent ground fissures in the Hetao basin, Inner Mongolia, China. *Geomorphology*, volume 295, pages 102–114.
- Hermann, R.B., and S.K. Park, 1981, The Denver earthquake of 1967–1968. *Bulletin of the Seismological Society of America*, volume 71, pages 731–745.
- Hermansen, H., H.A. Landa, J.E. Sylte, and L.K. Thomas, 2000, Experiences after 10 years of waterflooding the Ekofisk Field, Norway. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, volume 26, pages 11–18.
- Hernandez-Marin, M., and T.J. Burbey, 2010, Controls on initiation and propagation of pumping-induced earth fissures: Insights from numerical simulations. *Hydrogeology Journal*, volume 18, number 8, pages 1773–1785.
- Hernandez-Marin, M., and T.J. Burbey, 2012, Fault-controlled deformation and stress from pumping-induced groundwater flow. *Journal of Hydrology*, volumes 428–429, pages 80–93.
- Hertz, H., 1881, On the contact of elastic solids, *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, volume 92, pages 156–171.
- Higgins, S.A., I. Overeem, M.S. Steckler, J.P.M. Syvitski, L. Seeber, and S.H. Akhter, 2014, InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, volume 119, pages 1768–1781, [doi:10.1002/2014JF003117](https://doi.org/10.1002/2014JF003117).
- Hoffmann, J., H.A. Zebker, D.L. Galloway, and F. Amelung, 2001, Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resources Research*, volume 37, number 6, pages 1551–1556.
- Hoffmann, J., D.L. Galloway, and H.A. Zebker, 2003, Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resources Research*, volume 37, number 2, 1031 pages, [doi:10.1029/2001WR001252](https://doi.org/10.1029/2001WR001252).
- Holland, A., 2013, Earthquakes triggered by hydraulic fracturing in south-central Oklahoma. *Bulletin of the Seismological Society of America*, volume 103, pages 1784–1792.
- Holzer, T.L., and S.N. Davis, 1976, Earth fissures associated with water-table declines. *Geological Society of America Abstract Programs*, volume 8, number 6, pages 923–924.

- Holzer, T.L., S.N. Davis, and B.E. Lofgren, 1979, Faulting caused by groundwater extraction in southcentral Arizona. *Journal of Geophysical Research*, volume 84, number B2, pages 603–612.
- Holzer, T.L., 1981, Preconsolidation stress of aquifer systems in areas of induced land subsidence. *Water Resources Research*, volume 17, number 3, pages 693–704.
- Holzer, T.L., and D.L. Galloway, 2005, Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States, *in*, *Humans as Geologic Agents, Reviews in Engineering Geology*, volume 26, editor, J. Ehlen, W.C. Haneberg, and R.A. Larson. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pages 87–99.
- Holzer, T.L., and E.H. Pampeyan, 1981, Earth fissures and localized differential subsidence, *Water Resources Research*, volume 17, number 1, pages 223–227.
- Horton, S., 2012, Disposal of hydrofracking waste fluid by injection into subsurface aquifers triggers earthquake swarm in central Arkansas with potential for damaging earthquake. *Seismological Research Letters*, volume 83, pages 250–260.
- Huizar-Álvarez, R., L.M. Mitre-Salazar, S. Marín-Córdova, J. Trujillo-Candelaria, and J. Martínez-Reyes, 2011, Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: Implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. *Geofísica Internacional*, volume 50, number 3, pages 255–270.
- Hung, W-C., C. Hwang, J.C. Liou, Y.S. Lin, and H.L. Yang, 2012, Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan. *Engineering Geology*, volumes 147–148, number 6, pages 78–90.
- Hwang, C., W.C. Hung, and C.H. Liu, 2008, Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan high speed rail operation. *Natural Hazards*, volume 47, pages 1–16.
- Ikeda, H., S. Kunisue, D. Nohara, K. Ooba, and T. Kokubo, 2015, In-situ formation compaction monitoring in deep reservoirs by use of fiber optics, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, volume 372, pages 393–394, [doi:10.5194/piahs-372-393-2015](https://doi.org/10.5194/piahs-372-393-2015).
- Ikehara, M.E., S.P. Phillips, 1994, Determination of land subsidence related to groundwater level declines using global positioning system and leveling surveys in Antelope Valley, Los Angeles and Kern Counties, California. United States Geological Survey Water - Resources Investigations Report, series 94-4184.
- Ikehara, M.E., S.K. Predmore, and D.J. Swope, 1997, Geodetic network to evaluate historical elevation changes and to monitor land subsidence in Lower Coachella Valley, California, 1996. United States Geological Survey Water-Resources Investigations Report, series 97-4237.
- Ingerson, I.M., 1941, The hydrology of the of the Southern San Joaquin Valley, California, and its relation to important water supplies. *Transaction AGU*, volume 22, number 1, pages 20–45.

- Jachens, R.C., and T.L. Holzer, 1979, Geophysical investigations of ground failure related to groundwater withdrawal - Picacho Basin, Arizona. *Ground Water*, volume 17, number 6, pages 574–585.
- Jacob, C.E., 1940, On the flow of water in elastic artesian aquifer, *Transaction AGU*, volume 21, number 2, pages 574–586.
- Jha, B., and R. Juanes, 2014, Coupled multiphase flow and poromechanics: A computational model of pore pressure effects on fault slip and earthquake triggering. *Water Resources Research*, volume 50, number 5, pages 3776–3808.
- Kanamori, H., and D.L. Anderson, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, volume 65, pages 1073–1095.
- Khan, A.S., D.S. Khan, and D.M. Kakar, 2013, Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. *Environmental Earth Science*, volume 70, pages 2719–2727.
- Kim, W.Y., 2013, Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, volume 118, pages 3506–3518.
- Leonards, G.A., 1962, Engineering properties of soils, in *Foundation Engineering*. editor, G. A. Leonards. McGraw-Hill, New York, pages 66–240.
- Liu, J., Y. Wang, Y. Lu, J. Wei, and D. Kanungo, 2017, Application of distributed optical fiber sensing technique in monitoring the ground deformation. *Journal of Sensors*, article number 6310197, doi:[10.1155/2017/6310197](https://doi.org/10.1155/2017/6310197).
- Lofgren, B.E., and R.L. Klausning, 1969, Land subsidence due to groundwater withdrawal-Tulare Wasco area, California. *United States Geological Survey paper 437-B*.
- Lofgren, B.E., 1971, Significant role of seepage stresses in compressible aquifer systems, *EoS Transaction AGU*, volume 52, number 11, page 832.
- Lohaman, S.W., 1961, Compression of elastic artesian aquifers, *United States Geological Survey Professional Paper*, series 424-B, pages B47–B49.
- Mahmoudpour, M., M. Khamehchiyan, M.R. Nikudel, and M.R. Ghassemi, 2013, Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. *Geopersia*, volume 3, number 2, pages 49–62.
- Maltman, A., editor, 1994, *The Geological Deformation of Sediments*. Springer Science and Business Media, Dordrecht.
- Mazzoldi, A., A.P. Rinaldi, A. Borgia, and J. Rutqvist, 2012, Induced seismicity within geological carbon sequestration projects: Maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, volume 10, pages 434–442.
- Meinzer, O.E., and H.A. Hard, 1925, The artesian-water supply of the Dakota Sandstone in the North Dakota with special reference to the Edgeley quadrangle. *United States Geological Survey Water-Supply Paper*, series 520-E, pages 73–95.

- Meinzer, O.E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Economic Geology*, volume 23, number 3, pages 263–291.
- Miller, M.M., and M. Shirzaei, 2015, Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift in Phoenix using InSAR time series and wavelet transforms. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, volume 120, pages 5822–5842, doi:[10.1002/2015JB012017](https://doi.org/10.1002/2015JB012017).
- Ng, A.H.M., L. Ge, X. Li, H.Z. Abidin, H. Andreas, and K. Zhang, 2012, Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, volume 18, pages 232–242.
- Ortiz-Zamora, D., and A. Ortega-Guerrero, 2010, Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, volume 46, W01513, doi:[10.1029/2008WR007398](https://doi.org/10.1029/2008WR007398).
- Pacheco, J., J. Arzate, E. Rojas, M. Arroyo, V. Yutsis, and G. Ochoa, 2006, Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. *Engineering Geology*, volume 86, pages 143–160.
- Paris, A., P. Teatini, S. Venturini, G. Gambolati, and A.G. Bernstein, 2010, Hydrological effects of bounding the Venice (Italy) industrial harbour by a protection cut-off wall: A modeling study. *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 15, number 11, pages 882–891.
- Pepe, A., and F. Calò, 2017, A review of interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. *Applied Sciences*, volume 7, page 1264, doi:[10.3390/app7121264](https://doi.org/10.3390/app7121264).
- Phien-wej, N., P.H. Giao, and P. Nutalaya, 2006, Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, volume 82, pages 187–201.
- Pierce, R.L., 1970, Reducing land subsidence in the Wilmington Oil field by use of saline waters. *Water Resources Research*, volume 6, number 5, pages 1505–1514.
- Poland, J.F., and G.H. Davis, 1969, Land subsidence due to withdrawal of fluids, *in*, *Reviews in Engineering Geology*, volume 2, editor, D.J. Varnes, and G. Kiersch. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pages 187–269.
- Poland, J.F., editor, 1984, *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, 305 pages.
- Poland, J.F., and B.E. Lofgren, 1984, San Joaquin valley, California, U.S.A., *in* *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal*, editor, J. F. Poland. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, pages 263–277.
- Pratt, W.E., and D.W. Johnson, 1926, Local subsidence of the Goose Creek oil field, *Journal of Geology*, volume 34, number 7, Part 1, pages 577–590.
- Qu, F., Q. Zhang, Z. Lu, C. Zhao, C. Yang, and J. Zhang, 2014, Land subsidence and ground fissures in Xian, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. *Remote Sensing of the Environment*, volume 155, pages 366–376.

- Raffensperger, J.P., and R.E. Ferrell Jr., 1991, An empirical model of intrinsic permeability in reactive clay-bearing sands. *Water Resources Research*, volume 27, number 11, pages 2835-2844.
- Rappleye, H.S., 1933, Recent areal subsidence found in releveling. *Engineering News-Record*, volume 110, page 848.
- Raspini, F., C. Loupasakis, D. Rozos, and S. Moretti, 2013, Advanced interpretation of land subsidence by validating multi-interferometric SAR data: The case study of the Anthemountas basin (Northern Greece). *Natural Hazards and Earth System Science*, volume 13, pages 2425–2440.
- Riley, F.S., 1986, Developments in borehole extensometry, *in*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Land Subsidence. International Association of Hydrological Sciences Publication, volume 151, editors, Arnold Ivan Johnson, Laura Carbognin, and Lucio Ubertini. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, United Kingdom, pages 169–186.
- Rintoul, W., 1981, The case of disappearing land, *in*, *Drilling Ahead: Tapping California's Richest Oil Field*, Valley Publishers, Santa Cruz, California, pages 116–137.
- Rivera, A., E. Ledoux, and G. de Marsily, 1991, Nonlinear modeling of groundwater flow and total subsidence of the Mexico City aquifer-aquitard system, *in*, Proceedings of 4th International Symposium on Land Subsidence, International Association of Hydrological Sciences Publication, volume 200, editor, A. I. Johnson. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, United Kingdom, pages 44–58.
- Schenato, L., 2017, A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications. *Applied Sciences*, volume 7, page 896; [doi:10.3390/app7090896](https://doi.org/10.3390/app7090896).
- Schenato, L., L. Palmieri, M. Camporese, S. Bersan, S. Cola, A. Pasuto, A. Galtarossa, P. Salandin, and P. Simonini, 2017, Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. *Scientific Reports*, volume 7, article number 14686, [doi:10.1038/s41598-017-12610-1](https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1).
- Schmidt, D.A., and R. Burgmann, 2003, Time dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara Valley, California, from a large InSAR data set. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, volume 108, number B9, page 2416, [doi:10.1029/2002JB002267](https://doi.org/10.1029/2002JB002267).
- Schultz, R., R. Wang, Y.J. Gu, K. Haug, and G. Atkinson, 2017, A seismological overview of the induced earthquakes in the Duvernay play near Fox Creek, Alberta. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, volume 122, pages 492–505.
- Segall, P., and S.D. Fitzgerald, 1996, A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs. *Tectonophysics*, volume 289, pages 117–128.
- Shau, P., and P.K. Sikdar, 2011, Threat of land subsidence in and around Kolkata City and East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Journal of Earth System Science*, volume 120, number 3, pages 435–446.

- Sheng, Z., and D.C. Helm, 1998, Multiple steps of earth fissuring caused by ground-water withdrawal, *in*, Current Research and Case Studies: Proceedings of the Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence, editor, J. Borchers. Star Publishing Company, Belmont, California, pages 229–238.
- Sheng, Z., D.C. Helm, and J. Li, 2003, Mechanisms of earth fissuring caused by groundwater withdrawal. *Environmental Engineering and Geoscience*, volume 9, number 4, pages 313-324.
- Shi, X., Y. Xue, S. Ye, J. Wu, Y. Zhang, and J. Yu, 2007, Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. *Environmental Geology*, volume 52, number 1, pages 27–40.
- Sreng, S.L., H. Sugiyama, T. Kusaka, and M. Saitoh, 2011, Upheaval phenomenon in clay ground induced by rising groundwater level. *Poromechanics*, DEStech Publications, Lancaster, Pennsylvania, volume 4, pages 196–203.
- Stancliffe, R.P.W., and M.W.A. van der Kooij, 2001, The use of satellite-based radar interferometry to monitor production activity at the Cold Lake heavy oil field, Alberta, Canada. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, volume 85, number 5, pages 781–793.
- Taylor, D.W., 1948, *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley, New York, 700 pages.
- Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, E. Cairo, D. Marzorati, D. Colombo, A. Ferretti, A. Bagliani, F. Bottazzi, 2011a, Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*, volume 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793↗.
- Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, and L. Tosi, 2011c, A new hydrogeological model to predict anthropogenic Venice uplift. *Water Resources Research*, volume 47, W12507, doi:10.1029/2011WR010900↗.
- Teatini, P., N. Castelletto, and G. Gambolati, 2014, 3D geomechanical modelling for CO₂ geological storage: A case study in an offshore northern Adriatic reservoir, Italy. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, volume 22, pages 63–76.
- Teatini, P., M. Ferronato, G. Gambolati, and M. Gonella, 2006, Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research*, volume 42, W01406, doi:10.1029/2005WR004242↗.
- Teatini, P., G. Gambolati, M. Ferronato, T. Settari, and D. Walters, 2011b, Land uplift due to fluid injection. *Journal of Geodynamics*, volume 51, pages 1–16.
- Teatini, P., L. Tosi, and T. Strozzi, 2012, Comment on "Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar" by Y. Bock, S. Wdowinski, A. Ferretti, F. Novali, and A. Fumagalli. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, volume 13, Q07008, doi:10.1029/2012GC004191↗.

- Teatini, P., L. Tosi, T. Strozzi, L. Carbognin, U. Wegmüller, and F. Rizzetto, 2005, Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sensing of the Environment*, volume 98, number 4, pages 403-413.
- Terzaghi, K., 1923, Die berechnung der durchlassigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hidrodynamischen span-nungserscheinungen akademie der wissenschaften in wien. *Mathematisch-Naturwissen-Schaftliche Klasse*, volume 132, pages 125-138.
- Terzaghi, K., and R.B. Peck, 1948, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley, New York, 566 pages.
- Teufel, L.W., D.W. Rhett, and H.E. Farrell, 1991, Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk field, North Sea, in, the thirty--second United States Symposium on Rock Mechanics, editor, J.C. Roegiers. American Rock Mechanics Association paper 91-063.
- The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, 2012, *Shale Gas Extraction in the UK: A Review of Hydraulic Fracturing*. London, United Kingdom, <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/shale-gas-extraction-in-the-uk>.
- Theis, C.V., 1935, The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transaction American Geophysical Union*, volume 16, pages 519–524.
- Thu, T.M., and D.G. Fredlund, 2000, Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 37, pages 621–637.
- Todd, D.K., 1960, *Groundwater Hydrology*. second edition, John Wiley, New York, 552 pages.
- Tokunaga, T., 2008, Groundwater potential in the central district of Tokyo, *in*, *Groundwater Management in Asian Cities - Technology and Policy for Sustainability*, editor, S. Takizawa. Springer, pages 61–78.
- Tosi, L., P. Teatini, L. Carbognin, and J. Frankenfield, 2001, A new project to monitor land subsidence in the Northern Venice coastland (Italy). *Environmental Geology*, volume 52, pages 889-898.
- Tosi, L., C. Da Lio, T. Strozzi, and P. Teatini, 2016, Combining L- and X-band SAR Interferometry to assess ground displacements in heterogeneous coastal environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy. *Remote Sensing*, volume 8, page 308, [doi:10.3390/rs8040308](https://doi.org/10.3390/rs8040308).
- USEPA, 2002, Technical program overview: Underground control regulations, United States Environmental Protection Agency Technical Report 816-R-02-025, Washington, District of Columbia, 81 pages.
- van Thienen-Visser, K., and J.N. Breunese, 2015, Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. *The Leading Edge*, June, pages 664–671, [doi:10.1190/tle34060664.1](https://doi.org/10.1190/tle34060664.1).
- Vasco, D.W., A. Rucci, A. Ferretti, A. Novali, R.C. Bissell, P.S. Ringrose, A.S. Mathieson, and I.W. Right, 2010, Satellite-based measurements of surface deformation reveal flow

- associated with the geological storage of carbon dioxide. *Geophysical Research Letters*, volume 37, L03303, doi:[10.1029/2009GL041544](https://doi.org/10.1029/2009GL041544).
- Verruijt, A., 1969, Elastic storage of aquifers, in, *Flow Through Porous Media*, editor, R. De Wiest. Academic Press, New York, pages 331–376.
- Ye, S., Y. Xue, J. Wu, and Q. Li, 2012, Modeling visco-elastic-plastic deformation of soil with modified Merchant model. *Environmental Earth Sciences*, volume 66, number 5, pages 1497-1504.
- Ye, S., Y. Luo, J. Wu, X. Yan, H. Wang, X. Jiao, and P. Teatini, 2016, Three-dimensional modeling of land subsidence in Shanghai, China. *Hydrogeology Journal*, volume 24, number 3, pages 695-709.
- Ye, S., A. Franceschini, Y. Zhang, C. Janna, X. Gong, J. Yu, and P. Teatini, 2018, A novel approach to model earth fissure caused by extensive aquifer exploitation and its application to the Wuxi case, China. *Water Resources Research*, volume 54, doi:[10.1002/2017WR021872](https://doi.org/10.1002/2017WR021872).
- Yi, L., F. Zhang, H. Xu, S. Chen, W. Wang, and Q. Yu, 2011, Land subsidence in Tianjin, China. *Environmental Earth Sciences*, volume 62, pages 1151–1161.
- Yu, J., Z. Li, and J. Wu, 2009, Land subsidence in the Changzhou-Wuxi region mapped by InSAR/GPS integration approach. *Progress in Natural Science*, volume 19, number 11, pages 1267–1271.
- Yu, J., G. Wang, T.J. Kearns, and L. Yang, 2014, Is there deep-seated subsidence in the Houston-Galveston area? *International Journal of Geophysics*, volume 2014, number 11, doi:[10.1155/2014/942834](https://doi.org/10.1155/2014/942834).
- Wang, G.Y., G. You, and B. Shi, 2009, Earth fissures triggered by groundwater withdrawal and coupled by geological structures in Jiangsu Province, China. *Environmental Geology*, volume 57, number 5, pages 1047–1054.
- Wegmüller, U., C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann, 2004, Multitemporal interferometric point target analysis, in *Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, Series Remote Sensing, volume 3, editors, P. Smits and L. Bruzzone. World Science, Hoboken, New Jersey, pages 136–144.
- Wu, J., X. Shi, S. Ye, Y. Xue, Y. Zhang, Z. Wei, and Z. Fang, 2010, Numerical simulation of viscoelastoplastic land subsidence due to groundwater overdrafting in Shanghai, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 15, number 3, pages 223–236.
- Wu, J., H. Jiang, J. Su, B. Shi, Y. Jiang, and K. Gu, 2015, Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring. *Journal of Civil and Structure Health Monitoring*, volume 5, pages 587–597.
- Xue, Y., Y. Zhang, S. Ye, J. Wu, and Q. Li, 2005, Land subsidence in China. *Environmental Geology*, volume 48, number 6, pages 713–720.
- Zaman, M.M., A. Abdulraheem, and J.C. Roegiers, 1995, Reservoir compaction and surface subsidence in the North Sea Ekofisk field, in *Subsidence Due to Fluid Withdrawal*, editors,

- E.C. Donaldson, G.V. Chilingarian, and T.F. Yen. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pages 373–423.
- Zanello, F., P. Teatini, M. Putti, and G. Gambolati, 2011, Long term peatland subsidence: Experimental study and modeling scenarios in the Venice coastland. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, volume 116, F04002, doi:10.1029/2011JF002010 ↗.
- Zhang, Y., H. Gong, Z. Gu, R. Wang, X. Li, and W. Zhao, 2014, Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China. *Hydrogeology Journal*, volume 22, number 2, pages 397–409.
- Zhang, Y., J. Wu, Y. Xue, Z. Wang, Y. Yao, X. Yan, and H. Wang, 2015, Land subsidence and uplift due to long-term groundwater extraction and artificial recharge in Shanghai, China. *Hydrogeology Journal*, volume 23, pages 1851–1866.
- Zhao, C., X. Ding, Q. Zhang, Z. Lu, and Z. Li, 2008, Monitoring of recent land subsidence and ground fissures in Xian with SAR interferometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume 37, part B1, pages 147–150.
- Zhu, L., H. Gong, X. Li, R. Wang, B. Chen, Z. Dai, and P. Teatini, 2015, Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, volume 193, number 2, pages 243–255, doi:10.1016/j.enggeo.2015.04.020 ↗.
- Zhu, H.H., B. Shi, and C.C., Zhang, 2017, FBG-based monitoring of geohazards: current status and trends. *Sensors*, volume 17, page 452; doi:10.3390/s17030452 ↗.
- Ziaie, A., K. Kumarci, A.R. Ghanizadeh, and A. Mahmudinejad, 2009, Prediction of earth fissures development in Sirjan. *Research Journal of Environmental Science*, volume 3, number 4, pages 486–496.
- Zimmerman, R., 1991, Compressibility of sandstones. *Developments in Petroleum Science*, volume 29, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 183 pages.
- Zoback, M.D., 2007, *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 452 pages.

10 - جعبه‌ها

1-10-1-1 - جعبه‌ی 1- توجیه اصل ترزاقی

برای توجیه عبارت 3، " $\sum A_i \ll 1$ " می‌توانیم محاسبه‌ی تقریبی زیر را ارائه نماییم. فرض می‌کنیم دانه‌های جامد کروی بوده و شعاع آن‌ها را با " r " نمایش می‌دهیم. براساس نظریه‌ی هرتز¹ در سال 1891، سطح تماس " A " دو کره‌ی تحت فشار بوسیله‌ی نیروی " P " می‌باشد:

$$A' = 1.23\pi \left(0.5 \frac{Pr}{E_r}\right)^{2/3} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 1-1})$$

در این رابطه " E_r " مدول یانگ² (نشانه‌ی سفتی یک ماده‌ی جامد که نسبت معکوس تنش کششی به کرنش محوری " $ML^{-1}T^{-2}$ " است) می‌باشد. یک محیط متخلخل ژرف (250 متر) و با شعاع کره‌های معادل " $r = 0.5$ " میلی‌متر و کاملاً اشباع شده را در نظر بگیرید. نیروی شناوری اعمال شده به وسیله‌ی وزن آب " P " با ارتفاع ستونی از ذرات " h " را در نظر بگیرید:

$$P = \frac{h}{2r} \gamma' \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 2-1})$$

$\gamma' =$ وزن مخصوص کره‌ها منهای نیروی بالا برنده‌ی شناوری
با استفاده از معادله‌ی جعبه‌ی (2-1)، " A' " در معادله‌ی جعبه‌ی "3-1" برابر خواهد بود:

$$A' = 1.23\pi r^2 \left(\frac{\pi h \gamma'}{3E_r}\right)^{2/3} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-1})$$

با جایگزینی " $h = 250$ " متر، " $\gamma' = 1.7 \times 10^4$ " نیوتن بر مترمکعب (در سامانه‌ی "SI" واحد نیرو " MLT^{-2} " و یک نیوتن برابر یک کیلوگرم متر بر مجذور ثانیه است) و " $E_r = 1 \times 10^{11}$ " نیوتن بر متر مربع است (در ارتباط با قابلیت تراکم‌پذیری حجمی دانه‌ها " $C_{b,r} = 0.16 \times 10^{-10}$ " مترمربع بر نیوتن و نسبت پواسون دانه‌ها " $\nu_r = 0.25$ " خواهد بود:

$$c_{b,r} = 3 \frac{1 - 2\nu_r}{E_r}$$

در نتیجه می‌توانیم معادله‌ی زیر را بدست آوریم:

$$A' = 1.23 \pi (0.5 \text{ mm})^2 \left(\frac{\pi}{3} \frac{250 \text{ m} \cdot 1.7 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}}{1 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \right)^{2/3} \cong 0.00121 \text{ mm}^2 \quad \text{میلیمتر مربع}$$

که این میزان معادل "0/121" درصد مساحت برآمدگی کره‌ها می‌باشد (تقریباً 1 میلی‌مترمربع). در نتیجه فرض می‌شود که " $\sum A_i \ll 1$ " کاملاً توجیه‌پذیر است.

¹ Hertz

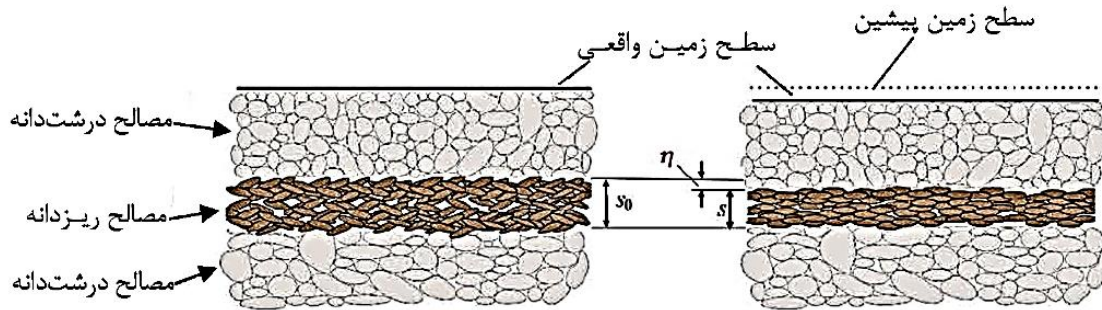
² Young Modulus

2-10-2-2-10-2- جمعیه 2- تجسم رابطه‌ی بین تنش مؤثر و نسبت پوکی

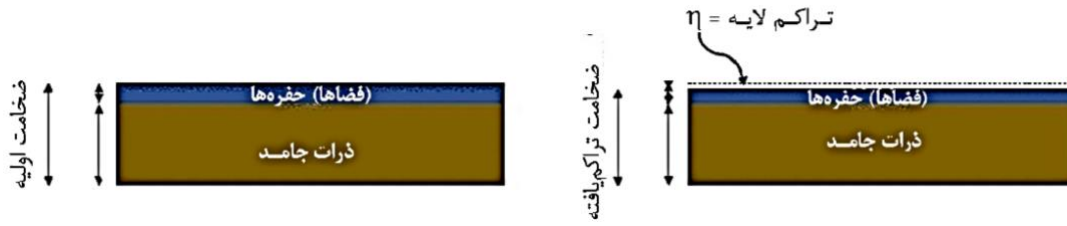
برای تجسم رابطه‌ی بین تراکم و نسبت پوکی (ارائه شده در شکل 10-1) و برای شناخت بهتر دوباره جزییات این شکل و تعاریف آن بیان می‌گردد. در نسخه‌ی چکیده، همه‌ی ذرات جامد بدون فضای منافذ بوده و همه‌ی فضای خالی حجم باقی‌مانده را اشغال می‌کنند. تراکم کلی " η " یک لایه در شکل 10-2 نشان داده شده است که ضخامت اولیه‌ی آن " s_0 " و نسبت پوکی اولیه‌ی " e_0 " به علت کاهش فضای منافذ است که در معادله‌ی 4 بازتاب دارد:

$$\eta = \Delta z \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (\text{تکرار معادله‌ی 4})$$

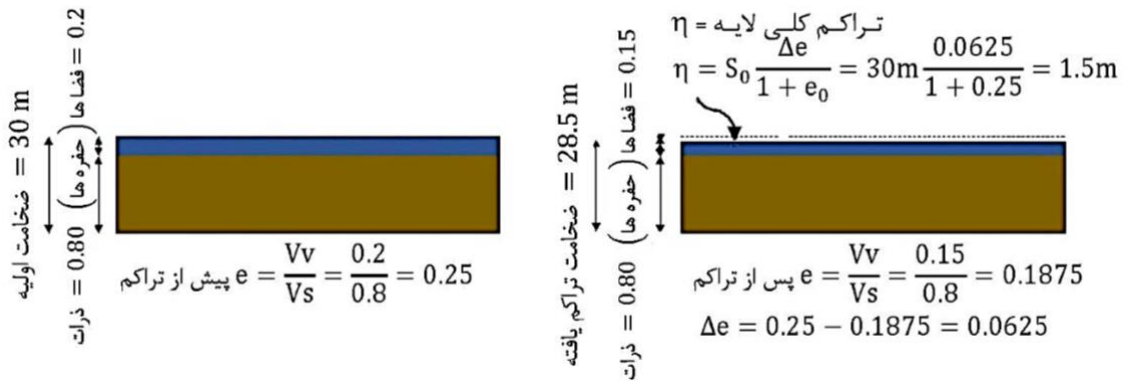
محاسبه‌ی تغییر تنش مؤثر برای کاهش تراز سطح پیزومتریک از نقطه‌ی "A" به "B" در درون یک آبخوان نامحصور، در شکل‌های 13 و شکل‌های 10-1 و 10-3 و 10-4 ارائه شده است.



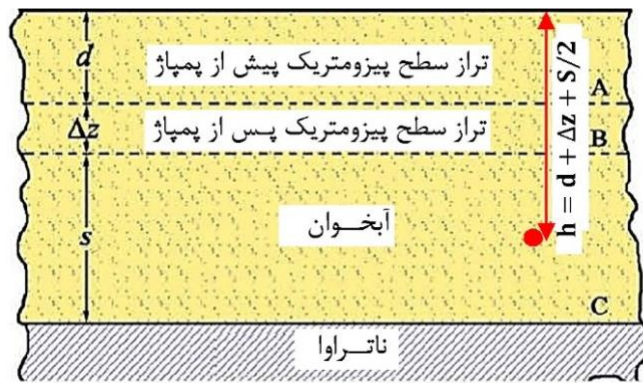
شکل 10-1: "یادآوری" - تراکم خاک " η " با کاهش فضای متخلخل (دانه‌های درشت برای تمامی اهداف تراکم ناپذیر هستند)



شکل 2-10: نمایش لایه‌ی ریزدانه‌ی شکل 2 که همگی ذرات متصل شده‌اند و فضای خالی وجود ندارد.



شکل 3-10: تراکم خاک "η" با استفاده از چکیده‌ی مثال ذرات ریزدانه‌ی ارائه‌شده در شکل 2-10.



شکل 4-10: نمایش معادله‌های 8 و 9

برای تراز سطح پیزومتریک A، تنش مؤثر در نقطه‌ی ● (معادله‌ی 9) برابر است با:

$$\sigma_{zA} = (1 - \phi)\gamma' (d + \Delta z + 3/2) \quad \text{وزن ذرات جامد پوشاننده}$$

کاهش بوسیله‌ی شناوری ذرات جامد اشباع پوشاننده:

$$-(1 - \phi)\gamma (\Delta z + S/2)$$

اضافه کردن وزن رطوبت در پهنه‌های اشباع نشده:

$$+\gamma\theta_w d$$

وقتی که تراز سطح پیزومتریک به "B" کاهش می‌یابد، تنش مؤثر در نقطه‌ی • برابر است با :

$$\sigma_{zB} = (1 - \phi)\gamma' (d + \Delta z + s/2) \quad \text{وزن ذرات جامد پوشاننده}$$

$$-1(1 - \phi)\gamma (s/2) \quad \text{کاهش بوسیله شناوری ذرات جامد اشباع پوشاننده:}$$

$$+\gamma \theta_w (d + \Delta z) \quad \text{اضافه کردن وزن رطوبت در پهنه‌های اشباع نشده :}$$

عبارت‌های آبی رنگ در ارتباط با ضخامت‌های متفاوت برای محاسبه تنش مؤثر برای ترازهای متفاوت

$$\Delta\sigma_{z(AtoB)} = \gamma\Delta z(1 - \phi + \theta_w) : 8 \quad \text{معادله‌ی 8 :}$$

مقادیر زیر را فرض نمایید :

$$d = 18m \quad \Delta z = 9m \quad s = 32m$$

$$\phi = 0.2 \quad \theta = 0.04 \quad \gamma' = 2650 \frac{kg}{m^3} \quad \gamma = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

برای تراز سطح پیزومتریک "A"، تنش مؤثر در نقطه‌ی • برابر است با :

$$\sigma_{zA} = (1 - 0.2)2650 \frac{kg}{m^3} (18m + 9 + 32/2m) \quad \text{وزن ذرات جامد پوشاننده:}$$

کاهش بعلت شناوری ذرات جامد اشباع شده‌ی پوشاننده:

$$-(1 - 0.2)1000 \frac{kg}{m^3} (9m + 32/2m)$$

اضافه کردن وزن رطوبت در پهنه‌ی غیر اشباع شده :

$$+1000 \frac{kg}{m^3} \times 0.04(18m) = 71.880 \quad kg/m^2$$

برای سطح پیزومتریک به "B" کاهش تنش مؤثر در نقطه‌ی • برابر است با :

$$\sigma_{zB} = (1 - 0.2)2650 \frac{kg}{m^3} (18m + 9m + 32/2m) \quad \text{وزن ذرات جامد پوشاننده:}$$

کاهش بعلت شناوری ذرات جامد اشباع شده پوشاننده :

$$-(1 - 0.2)1000 \frac{kg}{m^3} (32/2m)$$

اضافه کردن وزن رطوبت در پهنه‌ی غیر اشباع شده :

$$+1000 \frac{kg}{m^3} \times 0.04(18m + 9m) = 79440 \quad kg/m^2$$

$$\sigma_{zB} - \sigma_{zA} = 7560 \quad kg/m^2$$

رویه‌ی کنترل*:

$$\Delta\sigma_{z(AtoB)} = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9m(1 - 0.2 + 0.04) = 7560 \quad \frac{kg}{m^2}$$

* مراجعه به شکل 2-5

10-3-3- معادله‌های سه بعدی پوروالاستیک (متخلخل کشسانی)

از دیدگاه نظری، فرونشست زمین به بهترین شکل با نظریه‌ی تحکیم تحلیل می‌گردد. (بیوت¹/1941) تحکیم نمایش دهنده‌ی واکنش محیط متخلخل با قابلیت تراکم‌پذیری برای تغییرات در میدان جریان‌های درونی می‌باشد. یک واکاوی کامل از فرونشست زمین نیازمند تعیین میدان تغییر شکل‌های سه‌بعدی همراه با میدان جریان سه بعدی می‌باشد و بایستی در یک سامانه‌ی پیچیده‌ی آبخوان‌های چندگانه انجام گردد. مبانی اصلی فرآیند تحکیم را می‌توان به شرح زیر بیان کرد: در سال 1933 تزراقی اولین اصل را تحت عنوان شرایط تنش کل " σ_{tot} " ارائه نمود. که نشان می‌دهد در هر نقطه‌ای از یک محیط متخلخل برابر با حاصل جمع تنش‌های مؤثر بین دانه‌های " σ_{eff} " و فشار منفذی خنثی " P " است:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{eff} + P$$

تغییر شکل بدنه‌ی متخلخل بوسیله‌ی تمایز تنش‌های مؤثر " σ_{eff} " کنترل می‌شود. اگر تغییرات را نسبت به شرایط دست نخورده‌ی اولیه، متعادل در نظر بگیریم، معادله‌ی تعادلی کاوچی² می‌تواند به اثربخشی افزایش تنش مؤثر و فشار منفذی منجر گردد که در معادله‌ی جعبه‌ی 1-3 ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{(معادله‌ی جعبه‌ی 1-3)}$$

در این معادله:

σ_{xx} = افزایش تنش مؤثر طبیعی در جهت x می‌باشد.

σ_{yy} = افزایش تنش مؤثر طبیعی در جهت y می‌باشد.

σ_{zz} = افزایش تنش مؤثر طبیعی در جهت z می‌باشد.

و تنش‌های برشی افزایشی:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

رابطه‌ی افزایشی بین تنش کششی مؤثر " σ ". کرنش کششی افزایش " ϵ " برای محیط‌های همسان ژئومکانیکی در معادله‌ی جعبه‌ی 2-3 ارائه شده است:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yz} \end{bmatrix} \quad \text{(معادله‌ی جعبه‌ی 2-3)}$$

ماتریس " D^{-1} " در معادله‌ی جعبه‌ی 3-3 ارائه شده است:

¹ Biot

² Cauchy

$$D^{-1} = \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{(معادله‌ی ۳-۳)} \\ \text{جعبه‌ی)} \end{matrix}$$

در این معادله :

E = مدول یانگ است (سفتی یک ماده‌ی جامد به صورت نسبت بین تنش کششی به کرنش محوری " $ML^{-1} T^{-2}$ " است).

ν = ضریب پواسون است (بازتاب تغییر شکل یک ماده‌ی جامد در جهت عمود بر بارگذاری است، نسبت منفی کرنش عرضی به کرنش محوری بوده و بدون بعد است)

به طور متداول در سامانه‌های آبخوان‌های لایه‌ای که در یک محیط رسوبی برجای گذاشته شده‌اند، ویژگی‌های ژئومکانیکی در امتداد جهت عمودی " v " با جهت افقی " h " آن‌ها متفاوت است. ویژگی‌های ژئومکانیکی یک محیط متخلخل همسان عرضی با 5 عامل مستقل " $E_v, E_h, \nu_v, \nu_h, G_v$ " همراه با مدول برشی " G " به طور کامل تشریح می‌گردند. مدول " G_h " به " E_h, ν_h " وابسته است، معادله‌ی جعبه‌ی 3-4:

$$G_h = \frac{E_h}{2(1-\nu_h)} \quad \text{(معادله‌ی جعبه‌ی 3-4)}$$

استحکام گرما پویایی نیازمند قطعیت مثبت ماتریس " c^{-1} " در ارتباط با تنش کششی به کرنش کششی است (فرروناتو و همکاران/2013) :

$$1 - \nu_h^2 > 0 \quad \text{و} \quad 1 - \nu_h - 2\nu_h^2 \frac{E_v}{E_h} > 0$$

سپس می‌توان با معادله‌ی 3-5 نشان داد:

$$\nu = \frac{E_h}{E_v} \quad \text{(معادله‌ی جعبه‌ی 3-5)}$$

$$\eta = \frac{E_h}{2(1+\nu_h)G_v}$$

$$\alpha = \frac{1}{E_v} \left(1 - \frac{2\nu_h^2 E_v}{1-\nu_h E_h} \right)$$

با جایگزینی ماتریس " c^{-1} " (معادل D^{-1} برای محیط‌های همسان متقاطع) معادله‌ی جعبه‌ی 3-6 به دست می‌آید (فرروناتو و همکاران/2013)

$$C^{-1} = \frac{1}{(1-\nu_h^2)\alpha} \begin{bmatrix} C_1^{-1} & 0 \\ 0 & C_2^{-1} \end{bmatrix} \quad \text{(معادله‌ی جعبه‌ی 3-6)}$$

$$C_1^{-1} = \begin{bmatrix} \vartheta - v_v^2 & v_v^2 + \vartheta v_h & v_v(1 + v_h) \\ v_v^2 + \vartheta v_h & \vartheta - v_v^2 & v_v(1 + v_h) \\ v_v(1 + v_h) & v_v(1 + v_h) & 1 - v_v^2 \end{bmatrix}$$

$$C_2^{-1} = \frac{\vartheta(1 - v_h) - 2v_v^2}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\eta} \end{bmatrix}$$

ضریب "α" ارائه شده در معادله‌ی جعبه‌ی 3-5، قابلیت تراکم‌پذیری عمودی تحکیمی محیط است که از انبساط جانبی آن جلوگیری می‌کند (گامبولاتی و همکاران/1984)، با جایگزینی "v_v = v_h = E_v = E_h" و G_h = G_v در معادله‌ی جعبه‌ی 3-6 و تبدیل معادله‌ی 3-2 و "α" از معادله‌ی جعبه‌ی 3-7 به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{(1 + v)(1 - 2v)}{(1 - v)E} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-7})$$

معادله‌ی جعبه‌ی 3-7 تراکم‌پذیری عمودی یک خاک همسان می‌باشد. اگر رابطه‌ی بین تنش مؤثر و کرنش را در معادله‌ی کاوچی جایگزین کنیم، معادله‌ی تعادلی برای یک محیط متخلخل تحت فشار منفذی داخلی "P"، به دست می‌آید. با جایگزین "P" (در محیط‌های همسان) می‌توان معادله‌ی جعبه‌ی 3-8 را نوشت:

$$\begin{aligned} G\nabla^2 u + (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ G\nabla^2 v + (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial y} \\ G\nabla^2 w + (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-8})$$

در این معادله:

u, v, w = به ترتیب اجزای بردار موقعیت افزایشی در محورهای مختصات "x, y, z" می‌باشند.

∇^2 = عملکرد لاپلاس¹

λ = ثابت لامه² است که برابر با $\lambda = E / [(1 - 2v)(1 + v)]$ است.

ε = کرنش حجمی و یا اتساع³ "ε = ε_{xx} + ε_{yy} + ε_{zz}" است.

معادله‌های مشابه برای محیط‌های همسان عرضی وجود دارد و در اینجا به دلیل پیچیدگی‌های بیشتر آن‌ها ارائه نشده‌اند، بیشتر آن‌ها سه معادله با 4 مجهول هستند "u, v, w, p". معادله‌های اضافی موردنیاز برای سامانه‌ی آب‌های زیرزمینی موردنیاز است، تا بوسیله‌ی آن‌ها بتوان معادله‌ی جریان‌های زیرسطحی را در درون آبخوان‌ها کنترل نمود.

معادله‌ی جریان بر اساس اصل بقای جرم³ برای ذرات جامد و آب می‌باشد. همچنین قانون داریسی باید در ارتباط با سرعت نسبی سیالات در دانه‌های جامد بیان شود. کوپر⁴ در سال 1966 و گامبولاتی در سال 1973

¹ Laplace Operator

² Lamé

³ Mass Conservaton

⁴ Cooper

از معادله‌ی جریان با این فرض که سرعت ذرات صفر نیست و با مشتق‌گیری به دست می‌آید، (مشتق کلی و مشتق جزئی) آن را توسعه دادند. گسترش دادند. گامبولاتی در سال 1973 نشان داد که سرعت ذرات قابل صرف نظر کردن است و فرض می‌شود که برابر با صفر باشد و مادامی که نشست نهایی خاک بیش از 5 درصد ضخامت اصلی (اولیه‌ی) آبخوان بیشتر نگردد، این شرط کاربردی می‌باشد. در سال 1966 دویست¹ ملاحظات وابستگی به هدایت هیدرولیکی به وزن مخصوص آب "γ" را از طریق تراوایی ذاتی و وابستگی به "γ" را به شرایط تغییرانفشار افزایشی، را وارد این مجموعه کرد. گامبولاتی در سال 1973 دوباره نشان داد که تأثیر کم وابستگی "γ" به هدایت هیدرولیکی می‌تواند بسیار ناچیز باشد. بعدها در این چهارچوب معادله‌ی جریان آب زیرزمینی که توسط بیوت در سال‌های 1941 و 1955 گسترش یافته بود توسط ورویت² استفاده گردید و پس از اینکه معادله‌ی چهارمی به معادله‌ی جعبه‌ی 3-8 اضافه گردید، معادله‌ی جعبه‌ی 3-9 به دست آمد:

$$\frac{1}{\gamma} \nabla \cdot (K_{ij} \nabla P) = \phi \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-9})$$

در این معادله :

$$\nabla = \partial/\partial_x + \partial/\partial_y + \partial/\partial_z$$

$$K_{zz} \text{ و } K_{yy}, K_{xx} \text{ " } K_{ij} \gamma/\mu = k_{ij} \text{ " هدایت هیدرولیکی کششی همراه با اجزای } K_{zz} \text{ و } K_{yy}, K_{xx}$$

$$k_{ij} = \text{تراوایی کششی ذاتی}$$

$$\lambda = \text{گرانروی آب}$$

$$\phi = \text{تخلخل محیط}$$

$$\beta = \text{قابلیت تراکم پذیری آب}$$

معادله‌ی جعبه‌ی 3-8 به همراه معادله‌ی جعبه‌ی 3-9 بر مبنای رابطه‌ی ریاضی بیوت "رابطه‌ی دوگانه" نامیده می‌شوند که رابطه‌ی جریان آب زیرزمینی و تنش در محیط‌های متخلخل همسان را نشان می‌دهد. رویکرد این فرضیه‌ی بسیار پیچیده برای شبیه سازی فرونشست زمین‌ها در محیط‌های کشسان خطی به کار می‌رود. گامبولاتی در سال 1974 نشان داد که در هر نقطه‌ی "P" در یک محیط متخلخل، تغییر شکل ممکن است توسط مجموع 2 عامل بیان شود: 1- تغییر شکل نقطه‌ای ناشی از افزایش فشار منفذی و عملکرد آن بر روی "P" و 2- تغییر شکل ناشی از فشار "P" در بیرون از "P" می‌باشد که تحت عنوان باقیمانده‌ی محیطی بوده و گامبولاتی عامل دوم را "تأثیر سه بعدی" نامید که در محیط‌های یک بعدی، ناپدید می‌گردد. عامل اول با عبارت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{1}{E_v} \left(1 - \frac{2\nu_v^2}{1 - \nu_h} \frac{E_v}{E_h} \right) p = \alpha p$$

در یک محیط همسان عرضی ژئومکانیکی خواهیم داشت:

$$\varepsilon = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)E} p = \alpha p$$

¹ Dewiest

² Verruijt

در یک محیط همسان ژئومکانیکی که با "a" قابلیت تراکم‌پذیری عمودی بیشتر تعریف شده است. با جایگزینی معادله‌ی بالا برای "ε" (در معادله‌ی جعبه‌ی جریان 3-9)، معادله‌ی جریان و تنش که " از هم جدا¹ " نامیده شده، به دست می‌آید. در این عبارت معادله‌ی جریان برای "p" مستقل از معادله‌ی تنش می‌باشد و با توجه به تغییرات شیب فشار منفذی که بعدها در معادله‌های تعادلی یکپارچه‌سازی گردید (معادله‌ی جعبه‌ی 3-8)، به عنوان یک منبع بیرونی مقاومت شناخته شده است. معادله‌ی جریان از هم جدا در معادله‌ی جعبه‌ی 3-10 ارائه شده است.

$$\nabla \cdot (K_{ij} \nabla p) = \gamma(\alpha + \phi\beta) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-10})$$

فرض کنیم محیط همسان و هدایت هیدرولیکی بخوبی شناخته شده باشد و دارای محورهای هم بسته با جهت‌های اصلی ناهمسانی باشد، در نتیجه معادله‌ی جعبه‌ی 3-10 را می‌توان به صورت معادله‌ی جعبه‌ی 3-11 بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-11})$$

ضریب " $S_s = \gamma(\alpha + \phi\beta)$ "، ضریب ذخیره‌ی کشسانی ویژه‌ی² است که بیشتر به آن اشاره گردید. معادله‌ی "از هم جدا" بر پایه‌ی آب‌شناسی آب‌های زیرزمینی از همان ابتدای توسعه‌ی آب‌زمین‌شناسی کمی بوده است (تیس³ 1935، جاکوب⁴ 1940، تاد⁵ 1960 و بیر⁶ 1972)، که امروزه هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. برتری رویکرد دوگانه در پیش‌بینی فرونشست زمین ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی همیشه مورد اختلاف بوده است. (گامبولاتی در سال 2000 نشان داد که راه حل فشار رویکرد از هم جدا بیشتر برای پیش‌بینی فرونشست زمین در حوضه‌های رسوبی تراکم یافته استفاده می‌شود. رویکردهای دوگانه و از هم جدا به طور واقعی در هر زمانی قابل تشخیص نیستند.

ذکر این نکته ضروری است که در برخی از تعاریف اصول تحکیم عمودی و قابلیت تراکم‌پذیری خاک‌ها، پارامترهای اصلی کنترل‌کننده‌ی فرونشست زمین می‌باشند. فرض کنیم ویژگی‌های برگشت‌پذیری کشسانی در محیط‌های متخلخل وجود داشته باشد، مشکل تعیین قابلیت تراکم‌پذیری سنگ‌های مختلف به طور کامل توسط زیرمان⁷ در سال 1991 مورد بحث قرار گرفته است. در این واکاوی‌ها ما گفتگوهای خود را به مقایسه "α" (که بیشتر تعیین شده بود) و قابلیت تراکم‌پذیری "c_p" (به عنوان یک پدیده‌ی ژئوتکنیکی که به وسیله‌ی معادله‌ی 3-4 تعیین شده)، می‌پردازیم.

فرض کنیم نمونه‌ی خاکی یا طول اولیه‌ی "Δz" مورد آزمایش یک بعدی عمودی قرار می‌گیرد. (توسط دستگاه تحکیم)، تغییر شکل "δ(Δz)" خواهد بود. در نظریه‌ی کشسانی، تراکم‌پذیری عمودی "α" با معادله‌ی جعبه‌ی 3-12 معین می‌گردد:

$$\alpha = \frac{\delta(\Delta z)}{\Delta z} \frac{1}{p} = \frac{\epsilon}{p} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-12})$$

¹ Uncoupled² Specific Elastic Storage Coefficient³ Theis⁴ Jacob⁵ Todd⁶ Bear⁷ Zimmerman

در این معادله "P" برابر و مخالف تنش مؤثر افزایشی بوده و در نمونه‌ی تراکم، منفی " $\delta(\Delta z)$ " است. با استفاده از نسبت پوکی می‌توان معادله‌ی جعبه‌ی 3-13 را نوشت:

$$\delta(\Delta z) = [\Delta z + \delta(\Delta z)] \frac{e}{1+e} - \Delta z \frac{e_0}{1+e_0} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-13})$$

در این معادله "e" نسبت پوکی اولیه‌ی پیش از تراکم می‌باشد (شکل 2). در معادله‌ی جعبه‌ی 3-13 فرض بر این است که دانه‌های منفرد خاک تراکم‌ناپذیر هستند بنابراین حجم نمونه " $\delta(\Delta z)$ " برابر با تغییرات حجم تخلخل است (شکل 2). با تقسیم کردن دو طرف معادله‌ی جعبه‌ی 3-13 به " Δz " و مرتب سازی دوباره‌ی آن‌ها، معادله‌ی جعبه‌ی 3-14 به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{\delta(\Delta z)}{\Delta z} = \frac{e - e_0}{1 + e_0} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-14})$$

بنابراین

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{P} = \frac{e - e_0}{P(1 + e_0)}$$

و اگر " α " به "P" وابسته نباشد در نتیجه معادله‌ی جعبه‌ی 3-15 را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{de}{dP} = \alpha(1 + e_0) \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-15})$$

نسبت پوکی متناسب با فشار افزایشی "P" است (برای هر مقدار اولیه‌ی " e_0 ") که با جایگزینی معادله‌ی جعبه‌ی 3-15 در معادله‌ی 5 و داشتن " $dp = -d\sigma_z$ "، می‌توان معادله‌ی زیر را بازنویسی کرد:

$$c_b = \alpha \frac{1 + e_0}{1 + e} = \alpha \frac{1 + e_0}{1 + e_0 + \alpha p(1 + e_0)} = \frac{\alpha}{1 + \alpha p}$$

تنها هنگامی که فشار افزایشی "P" به سمت صفر باشد؛ " α " و " c_b " با یکدیگر همساز می‌گردند. به طول کلی 2 عامل قابلیت تراکم‌پذیری " α " و " c_b " با هم برابر نبوده و نمی‌توان آن‌ها را همزمان ثابت در نظر گرفت. عبارت " c_b " در برابر " ε " (با استفاده از معادله‌ی جعبه‌ی 3-14) در معادله‌ی جعبه‌ی 3-16 ارائه شده است:

$$c_b = \frac{1 + e_0}{1 + e} \frac{d\varepsilon}{dp} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dp} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-16})$$

اگر " α " ثابت و " $\alpha = \frac{d\varepsilon}{dp}$ " باشد، معادله‌ی جعبه‌ی 3-17 را می‌توان نوشت:

$$c_b = \frac{\alpha}{1 + \varepsilon} = \frac{\alpha}{1 + \alpha p} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-17})$$

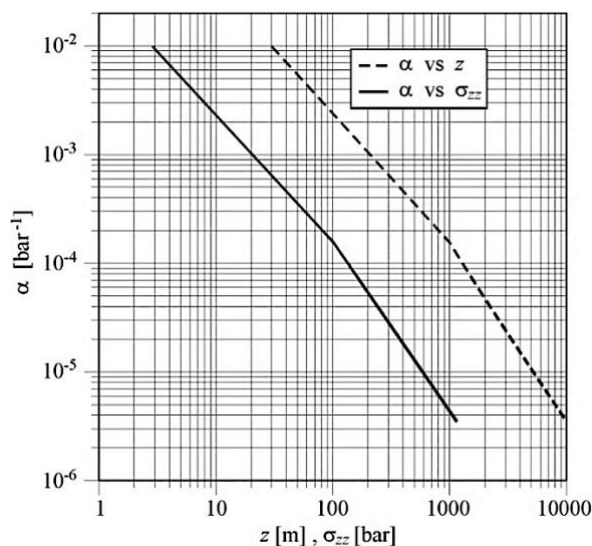
گامبولاتی در سال 1973 نشان داد که فرض ثابت " α " را می‌توان به سادگی حذف کرد. رابطه‌ی کلی بین " α " و " c_b " در معادله‌ی جعبه‌ی 3-18 ارائه شده است:

$$c_b = \frac{p \frac{d\alpha}{dp} + \alpha}{1 + \alpha p} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-18})$$

اگر " c_b " ثابت باشد، معادله‌ی جعبه‌ی 3-18 را می‌توان با انتگرال‌گیری " α " به شکل معادله‌ی زیر نوشت:

$$\alpha = \frac{\exp(p c_b) - 1}{p} \quad (\text{معادله‌ی جعبه‌ی 3-19})$$

فرض بر این است که دانه‌های منفرد تراکم ناپذیر بوده و با توجه به این حقیقت، قابلیت تراکم‌پذیری هر سامانه‌ی آبخوانی به مراتب بزرگتر از تراکم‌پذیری دانه‌های منفرد است. گیرستما¹ در سال 1973 میزان " $\alpha = 1.6 \times 10^{-6}$ " را برای دانه‌های سیلیکات‌ها تعیین کرد. در مقابل، تراکم‌پذیری سامانه‌ی آبخوان را به مراتب بزرگتر از تراکم‌پذیری دانه‌های منفرد اعلان نمود که در شکل جعبه‌ی 3-1 ارائه شده است این شکل نمونه‌ای از تراکم‌پذیری یک آبخوان را از نظر رابطه‌ی " α " در برابر ژرفا و تنش مؤثر عمودی بین دانه‌ی " σ_{zz} " در حوضه‌ی رسوبی رودخانه‌ی پو در ایتالیا را نشان می‌دهد (گامبولاتی و همکاران/1991 و 1999 کومرلاتی² و همکاران/2004). به این ترتیب، تا هنگامی که تراکم نسبی نهایی از 5 درصد واحد تراکم یافته بیشتر نشود (با توجه به شرایط سازندهای زمین‌شناسی و بویژه در سازندهای کم ژرفا)، اختلاف بین " α " و " c_b " بیش از 2 تا 3 درصد نخواهد بود و برای کاربردهای اجرایی این دو عامل قابل جایگزینی هستند. (گامبولاتی/1973، شکل 5-10).



شکل 5-10: قابلیت تراکم پذیری عمودی تک‌محوری "a" در برابر تنش مؤثر " σ_{zz} " و ژرفا "z"

در دشت رودخانه‌ی پو در ایتالیا (برگرفته از کومرلاتی و همکاران/2004)

سرانجام نکته‌ی با ارزش این است، هنگامی که ویژگی‌ها و مشخصات جامع و مفهومی از نتایج آزمون‌های میدانی و آزمایشگاهی در دسترس باشد، با در نظر گرفتن معادله‌های واقعی‌تر، رفتارهای پلاستیک و ویسکوپلاستیک ممکن است برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرونشست‌های زمین در حوضه‌های آبرفتی سست و دارای تحکیم یافتگی کم، مورد استفاده قرار گیرد. (یه و همکاران/2012).

¹ Geerstma

² Comerlati

11 - حل تمرین ها

حل تمرین 1

جهت یاد آوری وزن مخصوص آب $\gamma_w = 1000$ کیلوگرم بر مترمکعب و وزن مخصوص ذرات جامد $\gamma_{grain} = 2700$ کیلوگرم بر متر مکعب است. وزن مخصوص جامد خاک رس اشباع شده γ_s را می‌توان به شرح زیر محاسبه کرد:

$$\gamma_s = \phi \gamma_w + (1 - \phi) \gamma_{grain}$$

$$\gamma_s = 0.4(1000) + (1 - 0.4) 2700 = 2020 \quad \text{Kg/m}^3$$

در دریاچه‌ای با ژرفای 6 متر، میزان فشار "P" در 15 متری از کف دریاچه برابر است با:

$$P = (6 + 15)m \times 1000 \text{ Kg/m}^3 = 21.000 \quad \text{Kg/m}^2$$

واحد فشار معمولاً به صورت بار بیان می‌شود 9.8067×10^{-5} ، بار برابر با یک کیلوگرم بر مترمربع است، بنابراین:

$$P = 21000 \text{ Kg/m}^2 = 2.06 \quad \text{bars}$$

تنش زمین ایستایی برابر است با :

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 6m \times 1000 \text{ Kg/m}^3 + 15m \times 2020 \text{ Kg/m}^3 = 6000 \text{ Kg/m}^2 + 30300 \text{ Kg/m}^2 \\ &= 36.300 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_c = 3.56 \quad \text{bars}$$

با مرتب‌سازی اصل ترزاقی (معادله‌ی 3)، تنش مؤثر عمودی σ_c برابر است با :

$$\sigma_z = \sigma_c - p = 3.56 \text{ bar} - 2.06 \text{ bar} = 1.50 \text{ bar}$$

اگر تراز سطح آب به 4 متری افت نماید، هم فشار و هم تنش مؤثر عمودی به میزان مشابهی کاهش می‌یابند:

$$2m \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \frac{9.8067 \times 10^{-5} \text{ bars}}{1 \text{ Kg/m}^2} = 0.2 \text{ bar}$$

بنابراین σ_z تغییری نمی‌کند.

حل تمرین 2

سوال 1 : فرونشست زمین پس از یک ماه

به علت هدایت الکتریکی کم، می‌توان فرض کرد که کاهش فشار به طور چشمگیری در آبخوان کم‌تراوا انتشار نمی‌یابد، بنابراین همانند معادله‌ی 13، فرونشست کل " η_{tot} " برابر با مجموع تراکم آبخوان آبدار و آبخوان محصور است. " $\eta_{tot} = \eta_p + \eta_c$ "

میزان تراکم آبخوان آبدار " $\eta_p \cong t_p c_{b,p} \Delta\sigma_{z,p}$ " به همراه " t_p "، میانگین زمان ضخامت آبخوان در زیر سطح ایستابی (معادله‌ی 10) می‌باشد. قابل توجه است که تخلخل با " ϕ " و اشباع شدگی آب با " θ_w "، نمایش داده می‌شود. تغییر تنش مؤثر در معادله‌ی 7 محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{z,p} &= \gamma_w \Delta z_p (1 - \phi + \theta_w) = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 5 \text{ m} (1 - 0.35 + 0.10) \\ &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 3.75 \text{ m} = 3750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \frac{9.8067 \times 10^{-5} \text{ bar}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} = 0.37 \text{ bar} \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\eta_p = t_p c_{b,p} \Delta\sigma_{z,p} = \frac{1}{2} (25 + 20) \text{ m} \frac{1 \times 10^{-4}}{\text{bar}} 0.37 \text{ bar} = 0.00083 \text{ m} = 0.83 \text{ mm}$$

میزان تراکم آبخوان محصور به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$\eta_c = b_c c_{b,c} \gamma_w (\Delta z_c - \Delta z_p (\phi - \theta_w))$$

$$\eta_c = 50 \text{ m} \frac{2 \times 10^{-5}}{\text{bar}} \left(\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (25 \text{ m} - 5 \text{ m} (0.35 - 0.1)) \right) \frac{9.8067 \times 10^{-5} \text{ bar}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \right)$$

$$\eta_c = 50 \text{ m} \frac{2 \times 10^{-5}}{\text{bar}} \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (23.75 \text{ m}) \frac{9.8067 \times 10^{-5} \text{ bar}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \right)$$

$$\eta_c = 50 \text{ m} \frac{2 \times 10^{-5}}{\text{bar}} (2.33 \text{ bar})$$

$$\text{mm} \eta_c = 0.00233 \text{ m} = 2.33$$

$$\eta_{tot} = 0.83 + 2.33 = 3.16 \text{ mm} \quad \text{در نتیجه.}$$

سوال 2 : فرونشست زمین بعد از 10 سال

در این حالت، تراکم آبخوان کمتر او را به فرونشست زمین کمک می‌کند " $\eta_{tot} = \eta_p + \eta_{aqt} + \eta_c$ ". پس از 10 سال فرض می‌شود که فشار درون آبخوان کمتر او را به حالت توزیع متعادلی رسیده باشد و با تراکم نهایی آبخوان کمتر او را برابر شده باشد (معادله‌ی 28) :

$$\eta_{aqt} = \frac{1}{2} (\Delta\sigma_{z,p} + \Delta\sigma_{z,c}) t_{aqt} c_{b,aqt}$$

$$= 0.5(0.37\text{bar} + 2.33\text{bar}) 20\text{m} \frac{1 \times 10^{-3}}{\text{bar}} = 0.027\text{m} = 27\text{mm}$$

مجموع فرونشست تجمعی زمین برابر است با :

$$\eta_{tot} = 0.83 + 27.0 + 2.33 = 30.16 \text{ mm}$$

حل تمرین 3

مجموع فرونشست تجمعی زمین با توجه به تراکم سه لایه (معادله‌ی 13):

$$\eta_{tot} = \eta_{aqu1} + \eta_{aqt} + \eta_{aqu2}$$

تراکم هر آبخوان با استفاده از معادله‌ی 12 به دست می‌آید :

$$\eta_{aquifer1} = t_{aquifer1} c_{b,aquifer1} \Delta\sigma_{z,aquifer1}$$

$$\eta_{aquifer2} = t_{aquifer2} c_{b,aquifer2} \Delta\sigma_{z,aquifer2}$$

مقادیر تراکم نهایی آبخوان کم ترا او از معادله‌ی 28 محاسبه می‌شود:

$$\eta_{aquitard} = t_{aquitard} c_{b,aquitard} 0.5 (\Delta\sigma_{z,aquifer1} + \Delta\sigma_{z,aquifer2})$$

با جمع کردن خواهیم داشت:

$$\eta_{tot} = (t_{aquifer1} c_{b,aquifer1} \Delta\sigma_{z,aquifer1}) + (t_{aquitard} c_{b,aquitard} 0.5 (\Delta\sigma_{z,aquifer1} + \Delta\sigma_{z,aquifer2})) + (t_{aquifer2} c_{b,aquifer2} \Delta\sigma_{z,aquifer2})$$

با در نظر گرفتن روابط تراکم‌پذیری سه لایه:

$$c_{b,aquifer1} = 2c_{b,aquifer2} \text{ and } c_{b,aquifer1} = 0.1c_{b,aquitard}$$

می‌توانیم عبارت زیر را برای تراکم‌پذیری آبخوان 1 بنویسیم:

$$\eta_{tot} = (t_{aquifer1} c_{b,aquifer1} \Delta\sigma_{z,aquifer1}) + (t_{aquitard} 10 c_{b,aquifer1} 0.5 (\Delta\sigma_{z,aquifer1} + \Delta\sigma_{z,aquifer2})) + (t_{aquifer2} 0.5 c_{b,aquifer1} \Delta\sigma_{z,aquifer2})$$

با جایگزینی فرونشست معین شده (0/1 متر)، میزان کاهش فشار در آبخوان‌های 1 و 2 (20 و 15 متر) و تبدیل آن فشارها به ارتفاع آب (20/000 و 15/000 کیلوگرم بر مترمکعب) و ضخامت آن‌ها به ترتیب (20 و 40 متر) و ضخامت آبخوان کمتر او را که 15 متر است، پس در نتیجه :

$$0.1 \text{ m} = \left(20 \text{ m } c_{b,\text{aquifer1}} 20,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) + \left(15 \text{ m } 10 c_{b,\text{aquifer1}} 0.5 \left(20,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 15,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \right) + \left(40 \text{ m } 0.5 c_{b,\text{aquifer1}} 15,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$$

با توجه به اینکه یک کیلوگرم بر مترمربع معادل " 9.8067×10^{-5} " بار است، خواهیم داشت:

$$0.1 \text{ m} = (20 \text{ m } c_{b,\text{aquifer1}} 1.96 \text{ bar}) + (15 \text{ m } 10 c_{b,\text{aquifer1}} 0.5 (1.96 \text{ bar} + 1.47 \text{ bar})) + (40 \text{ m } 0.5 c_{b,\text{aquifer1}} 1.47 \text{ bar})$$

با ادامه‌ی محاسبات می‌توان نوشت :

$$0.1 \text{ m} = (39.2 \text{ m } \text{bar } c_{b,\text{aquifer1}}) + (257.4 \text{ m } \text{bar } c_{b,\text{aquifer1}}) + (29.4 \text{ m } \text{bar } c_{b,\text{aquifer1}})$$

$$0.1 \text{ m} = 326.1 \text{ m } \text{bar } c_{b,\text{aquifer1}}$$

$$c_{b,\text{aquifer1}} = \frac{0.1 \text{ m}}{326.1 \text{ m } \text{bar}} = 3.1 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$$

و به همین ترتیب می‌توان برای آبخوان 2 و آبخوان ناتراوا محاسبات را انجام داد.

$$c_{b,\text{aquifer2}} = 0.5 c_{b,\text{aquifer1}} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$$

$$c_{b,\text{aquitard}} = 10 c_{b,\text{aquifer1}} = 3.1 \times 10^{-3} \text{ bar}^{-1} .$$

12 - درباره‌ی نویسندگان



جوزیه گامبولاتی، استاد روش‌های عددی در مهندسی در دانشکده‌ی فنی دانشگاه پادوا¹ است و نگارنده‌ی بیش از 300 مقاله‌ی علمی، داور مجله‌های بین‌المللی و کتاب می‌باشد، همچنین او دو کتاب تحلیل‌ها و روش‌های عددی در مهندسی و علوم کاربردی را نوشته است که به عنوان کتاب درسی در دانشگاه پادوا تدریس می‌گردد. همراه با پیتر تیاتینی کتاب "ونیز دوباره بر می‌خیزد" را در 100 صفحه و در سال 2014 منتشر کردند، که مروری بر برخاستگی ونیز در اثر تزریق آب دریا به سازندهای ژرف زمین‌شناسی (ژرفای 650 تا 1000 متر) که در زیر مرداب ونیز قرار گرفته، پرداخته اند. او در سال 2008 جایزه‌ی مشارکت‌های عالی "IACMAG" را در ارتباط با فعالیت‌های

پژوهشی، دانشگاهی و خدمات مهندسی در نواحی مختلف جهان را به خود اختصاص داد. جوزیه همکار اتحادیه‌ی ژئوفیزیک آمریکا² "AGU" بوده و به دلیل مشارکت بر جسته در زمینه‌ی ژئومکانیک جریان سیال‌های زیرسطحی، توسط رئیس‌جمهور ایتالیا، جورجیو ناپولیتانو به عنوان افتخاری، فرمانده منصوب گردید. هم‌اکنون پژوهش‌های او بیشتر به جابجایی آلودگی‌های زیرسطحی، توسعه، اعتبار سنجی و اجرای روش‌ها و الگوهای عددی برای مشکلات جهانی، متمرکز شده است.



دکتر پیتر تیاتینی، دانشیار آب‌شناسی و مهندسی هیدرولیک در گروه عمران دانشکده‌ی مهندسی، محیط زیست و معماری دانشگاه پادوا در ایتالیا، مشغول به تدریس می‌باشد. در سال 1994 جایزه‌ی بین‌المللی پائولوگاتو³ را برای الگوسازی آبخوان لایه‌ی زیرین مرداب ونیز، به دست آورد. او بنیان‌گذار شرکت "M3E" و پژوهشگر ارشد همکار شورای پژوهش ملی ایتالیا⁴ و دانشمند همکار در آزمایشگاه مرجع شکاف‌های زمین و خطرات زمین‌شناسی⁵ (دانشگاه نانجینگ⁶ در چین) و آزمایشگاه پایش و جلوگیری از فرونشست زمین⁷ (دانشگاه شانگهای⁸ در چین) می‌باشد. امروزه او رئیس "IAHS/UNESCO-IHP" در نوآوری در فرونشست بین‌المللی زمین⁹ "LaSII" می‌باشد. پژوهش‌های تیاتینی بیشتر بر روی الگوهای ژئومکانیکی در ارتباط با برداشت

سیالات و تزریق به لایه‌های زیرسطحی و بویژه فرونشست و برخاستگی زمین، لرزه‌های القایی، ترک‌های لرزه‌ای زمین در ارتباط با فرونشست و همچنین مدیریت محیط‌های حد واسط و زمین‌های باتلاقی، تمرکز یافته است. او همچنین دارای بیش از 30 مقاله در مجله‌های معتبر علمی می‌باشد.

¹ Padova

² American Geophysical Union "AGU"

³ Paolo Gatto

⁴ Italian Notional Research Council

⁵ Key Lab of Earth Fissure & Geologic Hazards

⁶ Nanjing

⁷ Key Lab of Land Subsidence

⁸ Shanghai

⁹ Land Subsidence International Initiative

"LaSII"

فهرست کتاب‌هایی که توسط گروه توسعه و پژوهش "مهندسين مشاور پارس‌پياب" تاکنون به چاپ رسیده است:

پاییز 1397	1- ریخت‌شناسی رودخانه
بهار 1398	2- دستورالعمل تهیه انواع اسناد خرید (بانک توسعه اسلامی)
تابستان 1398	3- جلد اول: مهندسی نمک‌زدایی (مبانی، کیفیت آب و روش‌های آبگیری)
زمستان 1398	4- جلد دوم: مهندسی نمک‌زدایی (برنامه‌ریزی و طراحی)
پاییز 1399	5- جلد سوم: مهندسی نمک‌زدایی (محیط‌زیست و مدیریت هزینه)
تابستان 1400	6- آبیاری قطره‌ای و بارانی
پاییز 1400	7- کتاب دستی بررسی‌های ژئوتکنیکی و جداول طراحی
پاییز 1401	8- مدیریت و برآورد هزینه‌ها در پروژه‌های نمک‌زدایی (آب‌شیرین‌کن‌ها)

Please consider signing up to the GW-Project mailing list to stay informed about new book releases, events and ways to participate in the GW-Project. When you sign up for our email list it helps us build a global groundwater community. [Sign up](#).

