

# ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان‌های محصور

Herbert Wang

مهسا جباری



THE  
GROUNDWATER  
PROJECT

# ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان‌های محصور

*The Groundwater Project*

i

دانلود رایگان از gw-project.org    هربرت اف. وانگ ©    پروژه آب زیرزمینی

همه می‌تواند از لینک gw-project.org استفاده کرده و به اشتراک بگذارد. توزیع مستقیم کتاب اکیدا ممنوع است.

وانگ، هربرت اف.  
پروفسور بازنشسته علوم زمین،  
دانشگاه ویسکانسین مدیسون،  
مدیسون، ویسکانسین، ایالات متحده آمریکا  
ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان‌های محصور

Mahsa Jabbari

*The Groundwater Project  
Guelph, Ontario, Canada*

تمامی حقوق محفوظ است. این نشریه به وسیله حق نشر محافظت شده است. هیچ بخشی از این کتاب را نمی‌توان به هیچ شکل یا به هر وسیله ای بدون اجازه کتبی از نویسندگان منتشر کرد (برای درخواست مجوز با: [permissions@gw-project.org](mailto:permissions@gw-project.org)). توزیع و نشر تجاری اکیدا ممنوع است. پروژه‌های GW را می‌توان به صورت رایگان از [gw-project.org](http://gw-project.org) دانلود کرد. هر کسی می‌تواند از پیوندهای [gw-project.org](http://gw-project.org) برای دانلود کارهای GW Project استفاده کرده و به اشتراک بگذارد. در دسترس قرار دادن اسناد پروژه GW در وب سایت های دیگر و یا ارسال کپی اسناد به طور مستقیم برای دیگران مجاز نیست.

حق نشر © Herbert F. Wang 2020 (نویسنده)

منتشر شده توسط پروژه آب زیرزمینی، گونلف، انتاریو، کانادا، 2020.

وانگ، هربرت اف.

ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی محدود/ وانگ، هربرت اف-گونلف، انتاریو، کانادا، 2020.

25 صفحه

شابک: 978-1-77470-092-1

“مهسا جباری، 2023، 43 صفحه”

لطفاً ثبت نام در لیست پستی پروژه آب زیرزمینی را در نظر بگیرید و از انتشار کتاب های جدید، رویدادها و راه های شرکت در پروژه آب زیرزمینی مطلع شوید. هنگامی که در لیست ایمیل ما ثبت نام می کنید، به ما کمک می کند تا یک جامعه جهانی آب های زیرزمینی بسازیم. Sign-up



ویراستاران اصلی: جان چری

و آیلین پوتر

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

کمیته راهبری: بین فن، آلن فریز، پل هسیه، اینکه کالویج، داگلاس مکی، استفن موران، اورتون دی اولیویرا، بت پارکر، آیلین پوتر، وارن وود و یان ژنگ.

تصویر جلد: دارتون (1900)

ترجمه شده به زبان فارسی توسط: مهسا جباری

iii

## تقدیم به:

به ایوان، میا و نوح؛ ملیا و کلویی. "حماسه ماسه سنگ داکوتای" پدربزرگ در زمانی شروع می شود که لورا اینگالز وایلدر در داکوتای جنوبی زندگی می کرد.

## فهرست مطالب

ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان‌های محصور.....	I
فهرست مطالب.....	V
پیشگفتار پروژه آب زیرزمینی.....	VI
پیشگفتار.....	VIII
قصدانی.....	IX
1. مقدمه.....	1
2. حماسه آبخوان داکوتا.....	3
3. راهحل تیس.....	11
4. فرمول تراکم پذیری جاکوب برای ذخیره آبخوان.....	15
5. معادله انتشار.....	21
6. خلاصه.....	23
7. تمرین.....	24
8. مراجع.....	26
9. درباره نویسنده.....	29
10. درباره مترجم.....	30

## پیشگفتار پروژه آب زیرزمینی

اعضا و شرکای آب سازمان ملل موضوع سالانه خود را از چند سال قبل تعیین می‌کنند. موضوع روز جهانی آب در 22 مارس 2022، "آب‌های زیرزمینی: قابل مشاهده کردن غیرقابل مشاهده" است. این موضوع برای اولین کتاب‌های پروژه آب‌های زیرزمینی (پروژه GW) در سال 2020 مناسب‌تر است، که هدف آن قابل مشاهده کردن آب‌های زیرزمینی است.

پروژه GW، یک سازمان غیردولتی است که در سال 2019 در کانادا ثبت شده است، متعهد به کمک به پیشرفت در آموزش است و رویکرد جدیدی را برای ایجاد و انتشار دانش برای درک و حل مشکلات به ارمغان می‌آورد. پروژه GW وبسایت <https://gwproject.org/> را به عنوان یک پلتفرم جهانی برای عمومی‌سازی کردن دانش آب‌های زیرزمینی اداره می‌کند و بر این اصل بنا شده است که:

«دانش باید رایگان باشد و بهترین دانش باید دانش رایگان باشد.» ناشناس

ماموریت پروژه GW ارائه مطالب آموزشی قابل دسترس، جذاب، با کیفیت بالا، به صورت آنلاین و رایگان به زبان‌های مختلف، برای همه کسانی است که می‌خواهند در مورد آب‌های زیرزمینی بیاموزند و بفهمند که چگونه آب‌های زیرزمینی با سیستم‌های اکولوژیکی و بشریت ارتباط دارد و از آن‌ها حمایت می‌کند. این نوع جدیدی از تلاش‌های آموزشی جهانی است که بر اساس متخصصان داوطلب از رشته‌های مختلف است و شامل دانشگاهیان، مشاوران و بازنشستگان می‌شود. پروژه GW شامل صدها داوطلب مرتبط با بیش از 200 هزار سازمان از بیش از 14 کشور و شش قاره می‌باشد.

پروژه GW یک تلاش مداوم است و صدها کتاب در سال‌های آینده به صورت آنلاین منتشر خواهد شد، ابتدا به زبان انگلیسی و سپس به زبان‌های دیگر، برای دائلود از هر کجا که اینترنت در دسترس باشد. انتشارات پروژه GW همچنین شامل مواد پشتیبانی مانند فیلم‌ها، سخنرانی‌ها، نمایش‌های آزمایشگاهی، و ابزارهای یادگیری علاوه بر ارائه یا پیوند به نرم افزارهای عمومی برای برنامه‌های مختلف آب زیرزمینی است که از فرآیند آموزشی پشتیبانی می‌کند.

پروژه GW یک تلاش مستمر و مداوم است و صدها کتاب در سال‌های آینده به صورت آنلاین منتشر خواهد شد، ابتدا به زبان انگلیسی و سپس به زبان‌های دیگر، از هر کجا که اینترنت در دسترس باشد، قابل دائلود است. انتشارات پروژه GW همچنین شامل موارد پشتیبانی مانند فیلم‌ها، سخنرانی‌ها، ارائه‌های آزمایشگاهی، و ابزارهای یادگیری علاوه بر ارائه یا پیوند به نرم افزارهای عمومی برای برنامه‌های مختلف آب زیرزمینی است که از فرآیند آموزشی پشتیبانی می‌کند.

پروژه GW موجودیت زنده دارد، بنابراین نسخه‌های بعدی کتاب‌ها هر از گاهی منتشر می‌شود. از کاربران دعوت می‌شود تا اصلاحات را پیشنهاد دهند.

ما از شما برای اینکه بخشی از انجمن پروژه GW هستید سپاسگزاریم. امیدواریم تجربیات شما در استفاده از کتاب‌ها و مطالب مرتبط را از شما بشنویم. ما از ایده‌ها و داوطلبان استقبال می‌کنیم!

The GW-Project Steering Committee

November 2020



## پیشگفتار

علم آب‌های زیرزمینی به عنوان یک رشته مدرن در سال 1856 آغاز شد، زمانی که هنری داری "قانون" خود را برای رابطه ساده بین سرعت جریان حجمی و گرادیان هد هیدرولیکی منتشر کرد. کمی پس از آن، منجر به توصیفات ریاضی جریان ثابت به چاه‌های آبخوان‌های افقی همگن شد. اما دهه‌ها می‌گذشت تا اولین توصیفات ریاضی برای جریان ناپایدار به چاه‌ها در سفره‌های زیرزمینی محصور توسط C.V منتشر شود. تیس (1935) از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده. برای اینکه تیس بتواند این توصیف را توسعه دهد، باید منشأ آب پمپاژ شده از چاه‌های آبخوان محصور را درک کند. شناخت منشأ این آب مبهم بود زیرا باید از دانش موجود در سطح مشترک بین هیدرولیک آبخوان و ژئومکانیک اقتباس می‌شد و برای دستیابی به این امر، شهود علمی باید به تفکر کمی توسط دانشمندان برجسته آب زیرزمینی آن زمان تبدیل می‌شد.

این کتاب: ذخیره‌سازی آب زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی محصور نوشته هربرت اف وانگ توضیح می‌دهد که آب حاصل از ذخیره‌سازی در سفره‌های زیرزمینی دانه‌ریز محصور از فشرده‌سازی ساختمان آبخوان و انبساط آب با کاهش فشار آب در طول پمپاژ به دست می‌آید. این کتاب نه تنها اصول و فرآیندهای مربوط به آن را توضیح می‌دهد، بلکه تاریخچه جالب این کشف را به عنوان حماسه غرب وحشی ارائه می‌کند تا نشان دهد چگونه از روش علمی برای حل معمای منشأ آب سفره‌های محدود استفاده شده است. نویسندگان این کتاب چندین دهه تحقیقات معتبر بین‌المللی انجام داده است. تدریس او بر مکانیک سنگ و هیدروژئولوژی متمرکز شده است و این سابقه تاریخی درک آشکار از ذخیره‌سازی آبخوان، سخنرانی مورد علاقه او است.

John Cherry, Groundwater Project Leader

Guelph, Ontario, Canada, November, 2020

## قدردانی

از فرصتی که برای تبدیل سخنرانی خود در مورد ذخیره آب های زیرزمینی به کتابی برای پروژه آب های زیرزمینی به دست آمد بسیار قدردانی می‌کنم. نسخه خطی به طور قابل توجهی در دقت و خوانایی با موارد زیر بهبود یافته است. خطاها و ابهامات باقی مانده همه از آن من است.

- ❖ Kamini Singha, Professor, Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA;
- ❖ J. F. Hermance, Professor Emeritus, Brown University, Providence, Rhode Island, USA;
- ❖ Charlie Fitts, Fitts Geosolutions, Scarborough, Maine, USA:
- ❖ Giuseppe Gambolati, Professor Emeritus, School of Engineering, University of Padova, Padua, Veneto, Italy;
- ❖ Pietro Teatini, Associate Professor, Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Padova, , Padua, Veneto, Italy;
- ❖ David McWhorter, Emeritus Professor of Chemical and Biological Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA; and
- ❖ Wolfgang Kinzelbach, Professor, ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Zurich, Zurich, Switzerland.

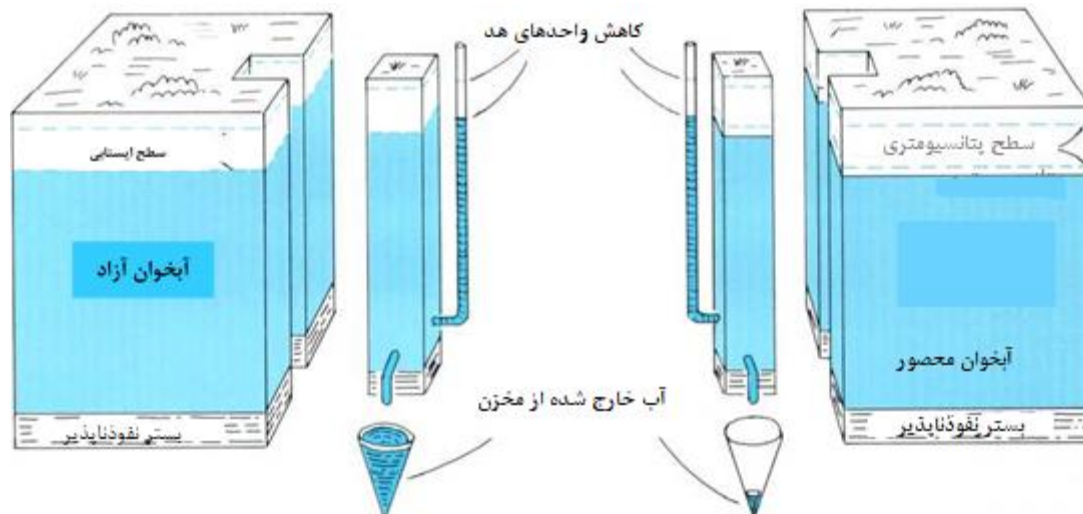
من از کمک‌های آیلین پوتر و ایراستار پروژه GW قدردانی می‌کنم. من از نظارت آماندا سیلز بر این کتاب و از الهانا دایک برای ویرایش هر دو پروژه زیرزمینی، گوئلف، انتاریو، کانادا سپاسگزارم. من از ویرایش صفحه آرایشی و تولید این کتاب توسط آیلین پوتر قدردانی می‌کنم. در نهایت، من از حمایت مالی ارائه شده توسط سیستم بازنشستگی ویسکانسین و اداره تامین اجتماعی سپاسگزارم.

Herbert Wang

## 1 مقدمه

موضوع این کتاب کشف و کمی‌سازی مفهوم ذخیره آب‌های زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی محصور است. همه سفره‌های زیرزمینی حامل آب و نفوذپذیر هستند، اما ماهیت ذخیره‌سازی بین سفره‌های زیرزمینی محصور و غیرمحصور به‌طور مشخصی متفاوت است همانطور که در کتاب‌های پروژه GW درباره آب‌های زیرزمینی در چرخه آب ما نوشته پوتر و همکاران (2020)، اصول و ویژگی‌های هیدرولوژیکی مواد زمین و جریان آب زیرزمینی اثر ووسنر و پوتر (2020) بحث شده است. همانطور که در هر دو کتاب پروژه GW مورد بحث قرار گرفته است، سطح بالایی یک آبخوان غیرمحصور، سطح ایستابی است. پمپاژ از یک سفره آب محصور، آب را از فضای خالی اشباع آن تخلیه می‌کند و سطح آب را پایین می‌آورد. با توجه به اینکه آب غشایی بر اثر کشش سطحی به دانه‌های سنگ می‌چسبند، پارامتر ذخیره‌سازی یک آبخوان محصور نشده در مقیاس یک حجم ابتدایی معرف (REV) (کوچک‌ترین حجمی که در آن خواص با خواص کل یکسان است) نسبت حجم خالی آن به حجم REV، یعنی تخلخل است. REV و تخلخل در کتاب پروژه GW توسط Woessner and Poeter (2020) مورد بحث قرار گرفته است. پارامتر ذخیره‌سازی برای یک آبخوان غیرمحصور را آبدهی ویژه می‌نامند. ماهیت مکانیسم ذخیره‌سازی نسبتاً ساده است.

یک آبخوان محصور، همانطور که از نامش پیداست، یک واحد سنگی نفوذپذیر است که بین لایه‌های غیرقابل نفوذ قرار گرفته است. در جایی که بیرون می‌آید تغذیه می‌شود و جریان محدود می‌شود تا در واحد باقی بماند. هد در هر مقطعی از آبخوان محصور در تمام عمق آن یکسان است و بالاتر از آبخوان قرار دارد. پمپاژ از یک آبخوان محصور، آب را از فضای خالی آن خارج می‌کند، اما فضای خالی اشباع باقی می‌ماند. سطح ایستابی برای پایین آوردن وجود ندارد. وجه اشتراک یک آبخوان محصور با یک آبخوان غیرمحصور این است که پمپاژ هد را پایین می‌آورد (شکل 1). ذخیره‌سازی در یک آبخوان محصور در تراکم پذیری سنگ و آب است که فضای منافذ را در پاسخ به تغییرات فشار یا هد آب زیرزمینی پر می‌کند. نقطه عطف جالبی رخ می‌دهد اگر هد به پایین تر از سطح آبخوان محدود شود، زیرا آبخوان محصور پس از آن غیرمحصور می‌شود و پارامتر ذخیره‌سازی مرتبه‌های بزرگی را از مقدار محدود خود به مقدار نامحدود آن تغییر می‌دهد.



شکل 1 ذخیره سازی غیرمحمور در مقابل ذخیره سازی محصور. مقدار آب آزاد شده از ذخیره سازی به ازای کاهش واحد هد در یک سفره آب غیرمحمور چندین مرتبه بیشتر از یک سفره آبخوان محدود است (هیت، 1983). هنگامی که یک REV در یک آبخوان محصور در پاسخ به تغییر هد هیدرولیکی<sup>1</sup> آب اضافه یا کاسته می‌شود، این تغییر در ذخیره سازی باید در معادله تعادل جرم برای حرکت آب زیرزمینی لحاظ شود. در نتیجه، پاسخ آبخوان محصور به پمپاژ یا سایر اختلالات گذرا است و به معادله جریان آب زیرزمینی وابسته به زمان منجر می‌شود. بحث دقیق‌تر در مورد هد هیدرولیک، تعادل جرم و معادله جریان آب زیرزمینی وابسته به زمان در کتاب پروژه GW توسط Woessner و Poeter (2020) ارائه شده است. بنابراین، ویژگی ذخیره سازی برای درک در دسترس بودن و حرکت آب‌های زیرزمینی ضروری است. ذخیره سازی آب‌های زیرزمینی احتمالاً از نظر اهمیت پس از قانون داریسی با محوریت آن برای هیدروژئولوژی در رتبه دوم قرار دارد.

این کتاب نگاهی تاریخی به ذخیره سازی در سفره های زیرزمینی دارد. مقالات معیار، که حدود نیم قرن از مطالعات را در بر می‌گیرند، رشته هایی از هیدروژئولوژی، ژئومکانیک، و مهندسی نفت را با دوخت های صحافی از ریاضیات و فیزیک به هم می‌بافند. هدف درک مفهوم ذخیره سازی به معنای عمیق تر از آنچه که از تعریف صرف آن به دست می‌آید، است. داستان با بررسی یک تناقض در رابطه با منشأ آب آبیاری زیرسطحی در قلمرو داکوتا در بخش شمالی مرکزی قاره ایالات متحده آغاز می‌شود. نقاط عطف مهم بررسی میدانی سیستم هیدروژئولوژیک (دارتون، 1896، 1901، 1909)، ایجاد ارتباط بین تغییر شکل آبخوان و خروج سیال منفذی (Meinzer، 1928)، حل ریاضی پاسخ هد به یک چاه پمپاژ در قیاس با انتقال گرما (Theis، 1935)، و در نهایت استخراج معادله حاکم وابسته به زمان برای حرکت آب‌های زیرزمینی از نظر سفره آب و تراکم پذیری آب "از پیش‌نویس" (جاکوب، 1940).

<sup>1</sup> در این کتاب هد به معنای هد هیدرولیک است.

## 2 حماسه آبخوان داکوتا

قانون اسکان کشاورزان در سال 1862 شمالی‌ترین بخش خرید لوئیزیانا ایالات متحده در سال 1803 را برای اسکان باز کرد. خانه داران می‌توانند 160 جریب (0.65 کیلومتر مربع) زمین را به قیمت 18 دلار خریداری کرده و این تعهد را داشته باشند که به مدت پنج سال کشاورزی کنند. بخش جنوبی قلمرو داکوتا از حدود 10000 نفر در سال 1870 به نزدیک به 100000 نفر در سال 1880 افزایش یافت (فابری، 2016). بارندگی زیاد در دهه 1870 منجر به این باور عمومی شد که "باران از شخم می‌آید". با این حال، خشکسالی 1886-1889 منجر به حفر چاه‌های زیادی برای آبیاری شد. چاه آرتزین معروف در وونسوکت، داکوتای جنوبی، ایالات متحده آمریکا (جلد کتاب) در سال 1888 حفر شد و فشار اولیه هد چاه 250 psi (1.7 مگاپاسکال) و جریان 8000 گالن در دقیقه (30 متر مکعب در دقیقه) داشت. خشکسالی 1886-1889 به دلیل پیامدهای آن بر آینده کشاورزی در ایالت‌های جدید داکوتای شمالی و جنوبی مورد توجه کنگره ایالات متحده قرار گرفت. جان وسلی پاول، دومین مدیر سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده دو سال پس از تأسیس، برای شهادت فراخوانده شد<sup>2</sup>.

در حالی که ماسه سنگ داکوتا یکی از مهم‌ترین مخازن شناخته شده آرتزین است، مقدار زمینی که می‌توان از طریق آن به کشاورزی باز خرید کرد، هنوز آنقدر کم است که اگر انتظار زیادی از آن وجود داشته باشد، ممکن است نتایج فاجعه‌باری به دنبال خواهد داشت. «(آبخوان‌های آرتزین در کتاب پروژه GW توسط Woessner and Poeter (2020) مورد بحث قرار گرفته است).

پیچیدگی شرایط به قدری است و خطر فاجعه‌ی بهره برداری پرهزینه در غفلت از شرایط واقعی آنقدر زیاد است که موضوع، ماهرانه‌ترین تحقیق را می‌طلبد.

- شهادت پاول (1890)

در واقع، تحقیقات ماهرانه‌ای توسط دارتون<sup>3</sup> N. H. (1896، 1901، 1909) انجام شد و در طول قرن بیستم توسط هیدروژئولوژیست‌های برجسته سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) ادامه یافت. از این میان، Bredehoeft و همکاران. دارتون را در پاراگراف آغازین مقاله خود در سال 1983 ستایش کردند.

آبخوان داکوتا در داکوتای جنوبی یکی از آبخوان‌های آرتزینی کلاسیک است. بسیاری از ایده‌های مدرن در مورد سفره‌های زیرزمینی آرتزین از تحقیقات N. H. Darton درباره آبخوان داکوتا در دهه‌های 1890 و اوایل دهه 1900 ناشی می‌شوند. این مقاله تا حد زیادی بر اساس داده‌های دارتون است و ادای احترامی به توانایی دارتون به عنوان یک آب‌شناس است.

<sup>2</sup> پاول اکسپدیشن معروف رودخانه کلرانو و گراند کنیون را در سال 1869 رهبری کرد. والاس استگنر (1954) Beyond the 100th Meridian و جان اف راس (2018) The Promise of the Grand Canyon گزارش‌های کاملی را ارائه می‌دهند.

<sup>3</sup> پس از ملاقات با زمین‌شناس دیگری در یک رخنمون، مرد دیگر گفت: من حدس زدم که این سازند چیست. حدس شما چیست؟» دارتون پاسخ داد: «من هرگز حدس نمی‌زنم، من حقایق را پیدا می‌کنم و می‌دانم.»

Bredehoeft و همکاران (1983) چندین نقل قول دیگر از دارتون (1909، صفحه 60) را به کار برد. از دو موردی که در زیر آمده است، اولی مستقیماً بخشی از داستان این کتاب است و دومی درون پرائنزی است. اولین مورد، مفهوم سازی دارتون از چگونگی رخنمون‌ها در بلک هیلز در قسمت غربی داکوتای جنوبی است (همانطور که در کتاب پروژه GW توسط Woessner و Poeter (2020) مورد بحث قرار گرفته است) برای جریان به سمت شرق، جایی که هزاران چاه آبیاری وجود دارد.

"شواهد این فشار، همانطور که در بسیاری از چاه‌ها در شرق داکوتای جنوبی یافت شد، قطعی است که آب تا صدها مایل در زیر زمین جریان دارد. چنین فشارهایی را می‌توان تنها با تأثیر هیدرواستاتیکی ستونی از آب که تا ارتفاع بالا در غرب گسترش می‌یابد توضیح داد. اگر خروج آب به سمت شرق و جنوب نبود، هد ابتدایی که آب‌های حاصل از اراضی مرتفع منطقه آبیگر در زیر کل منطقه ادامه می‌یافت، اما به دلیل این نشت، سرچشمه حفظ نمی‌شد. و یک کاهش تدریجی به سمت شرق وجود دارد که به عنوان "درجه هیدرولیک" شناخته می‌شود، شبیهی که توسط اصطکاک آب در عبور از لایه‌ها حفظ می‌شود."

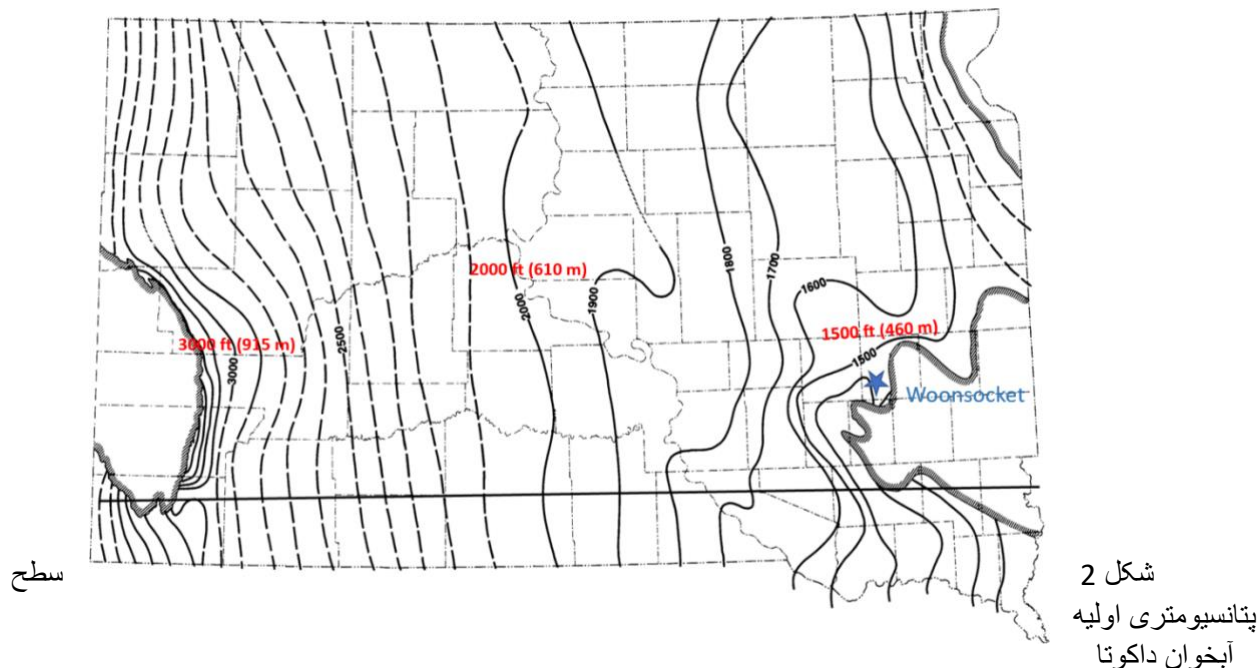
"شواهد" دارتون در نقشه ای از سطح پتانسیومتری سیستم آبخوان داکوتا موجود بود (شکل 2). از این نقشه و توضیح T.C. Chamberlin (1885) از اصول زمین‌شناسی و فیزیکی که شرایط آرتزین را توضیح می‌دهد، دارتون یک مدل مقطعی از سیستم آبخوان داکوتا ترسیم کرد (شکل 3)، که اغلب در کتاب‌های درسی در زمینه هیدروژئولوژی گنجانده شده است. نقل قول دوم توسط Bredehoeft و همکاران (1983) ابراز تاسف کرد که تشخیص دارتون از نشت از طریق یک لایه محصور برای چندین دهه فراموش شده بود.

"یکی دیگر از عواملی که بدون شک درجه هیدرولیک را در منطقه دشت بزرگ تا حدودی تحت تأثیر قرار می‌دهد، مقدار مشخص اما ناشناخته نشت عمومی از طریق به اصطلاح لایه‌های نفوذ ناپذیر است، به ویژه زمانی که تحت فشار زیاد باشد."

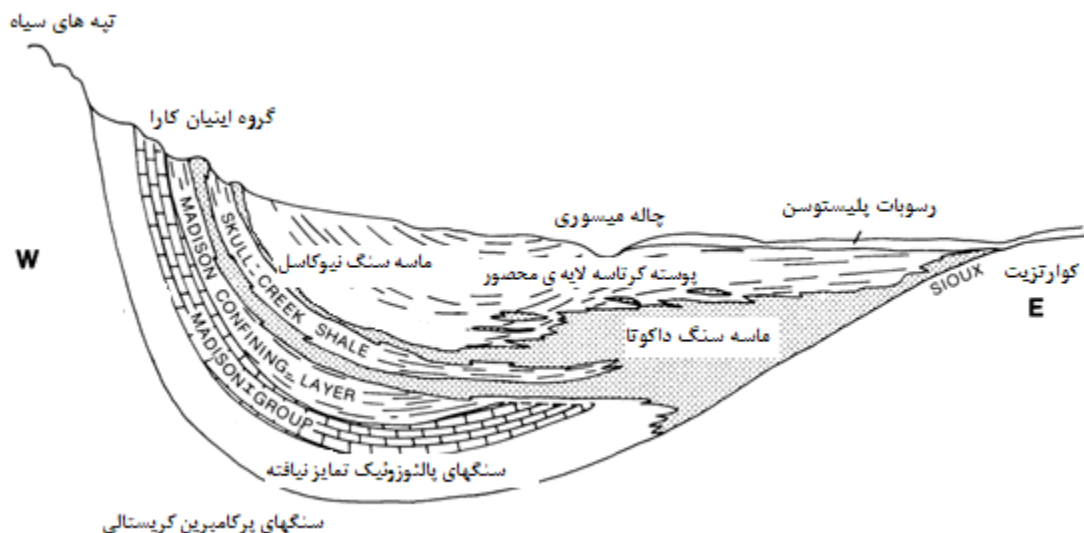
تا سال 1923 حدود 10000 حلقه چاه در داکوتای جنوبی حفر شد و در نهایت 15000 چاه در سال 1958 حفر شد (دیویس و همکاران، 1961). فشار اولیه در چاه Woonsocket تا سال 1892 به 130 psi (0.9 مگاپاسکال) کاهش یافت و جریان آن به 1150 گالن در دقیقه (4.3 متر مکعب در دقیقه) کاهش یافت. تا سال 1915 فشار بیشتر به 45 psi (0.3 مگاپاسکال) و در سال 1923 به 35 psi (0.24 مگاپاسکال) کاهش یافت (Meinzer and Hard، 1925). با گذشت 35 سال، ماینزر و هارد در مورد شهادت پاول در سال 1890 تأمل کردند.

"بسیار جالب و خوشحال کننده است که توجه داشته باشید که در مارس 1890، زمانی که غلیان بر سر چاه‌های آرتزین باید به حداکثر رسیده باشد، سرگرد جی دبلیو پاول، مدیر سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، بیانیه‌ای را در مورد این موضوع بیان کرد. کمیته آبیاری مجلس نمایندگان که باید در آن زمان بیش از حد محافظه‌کار به نظر می‌رسید، اما

به وضوح ویژگی موقتی فشارها و دبی‌های بالا را نشان می‌داد و تخمینی از عملکرد دائمی ارائه می‌داد که پس از 34 سال توسعه و زوال آرتزین به‌طور قابل‌توجهی دقیق به نظر می‌رسد.



شهر Woonsocket (ارتفاع = 1307 فوت (400 متر)) به عنوان یک ستاره نشان داده شده است. خطوط سایه دار به ترتیب نشان دهنده تغذیه مجدد در بلک هیلز در جنوب غربی داکوتای جنوبی و تخلیه‌ی چاه‌ها در جنوب شرقی داکوتای جنوبی است. خط افقی نمایه‌ای از مقطع در شکل 2 زیر است (برگرفته از Bredehoeft و همکاران، 1983؛ اصلی از Darton، 1909).



شکل 3 مقطع غرب شرق سیستم آبخوان داکوتا را نشان می‌دهد (از Bredehoeft و همکاران، 1983).

گرچه گزارش ماینزر و هارد عمدتاً بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های متعدد فشار و جریان در چاه‌های آبیاری را در طول زمان خلاصه می‌کرد، بخش چهار صفحه‌ای با عنوان «برداشت آب ذخیره‌شده و فشردگی ماسه‌سنگ داکوتا»، سنگ بنای مقاله‌ی ماینزر در سال 1928 را به نام «تراکم‌پذیری و کشش آبخوان‌های آرتزی» شد. مشکلی که ماینزر در آن مقاله به آن پرداخت، مشکل تعادل جرم بود.

1. بین سال‌های 1886 و 1923، میانگین برداشت آب زیرزمینی 3000 گالن در دقیقه<sup>4</sup> (گالن در دقیقه یا gpm) (11.4 متر مکعب در دقیقه) از یک ردیف از 18 شهرستان (R65 - R48W) بود، که در آن یک شهرستان 6 مایل در 6 مایل است.
2. اما جریان جانبی حالت پایدار از طریق سطح مقطع معرف آبخوان بر اساس قانون داریسی،  $Q = KiA$ ، تنها 500 گالری در دقیقه (1.9 متر مکعب در دقیقه) را به شهرها می‌آورد. قانون داریسی در کتاب پروژه GW توسط Woessner and Poeter (2020) مورد بحث قرار گرفته است.

— هدایت هیدرولیکی)  $K = 6.25 \times 10^{-4} \text{ ft/s}$  ( $1.9 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ )

— بر اساس نقشه پتانسیومتری (شیب هیدرولیکی از شکل 1)  $i = 5 \text{ ft/mile}$  ( $\sim 1 \text{ m/km}$ )

— (نماینده سطح مقطع آبخوان یک شهرک برابر ضخامت آبخوان (است)  $A = 6 \text{ miles}$  ( $\sim 10,000 \text{ m}$ )  $\times 60 \text{ ft}$  ( $\sim 20 \text{ m}$ )

<sup>4</sup> در واقع، نرخ استخراج از 10000 گالن در دقیقه در سال 1910 به 5000 در سال 1915 به 2000 در سال 1920 به 1000 در سال 1923 کاهش یافت.



$$Q = KiA = (6.25 \times 10^{-4} \text{ ft/s}) (5 \text{ ft/mi}) (6 \text{ mi} \times 60 \text{ ft}) (60 \text{ s/min}) (7.5 \text{ gal/ft}^3) = 500 \text{ gallons/minute} (\sim 2000 \text{ liters/minute})$$

شهرستان را قطع می‌کند)

محاسبات (1) و (2) در بالا مشکل یافتن تقریباً 2500 گالن در دقیقه (9.5 متر مکعب در دقیقه) را ایجاد می‌کند که تفاوت بین سرعت استخراج 3000 گالن در دقیقه (11.4 متر مکعب در دقیقه) و سرعت جریان مقطعی 500 گالن در دقیقه (1.9 متر مکعب در دقیقه) است.

ماینزر به این نتیجه رسید که تولید اضافی باید از آب ذاتی موجود در منافذ آبخوان گرفته شود. ماینزر از مشاهدات هیدرومکانیکی مختلف شواهدی برای این رفتار به دست آورد:

1. F.H. King (1892، صفحات 67-69) نوشت که «یکی از مشاهدات شگفت‌انگیز انجام شده در این مطالعه این است که یک قطار در حال حرکت با بارهای سنگین قدرت برهم زدن سطح آب در فضاهای غیر مویرگی خاک را دارد، اما به راحتی نمی‌توان فهمید که چگونه این اتفاق می‌افتد.» (واکنش سطح آب در شکل 4 این کتاب به دنبال این بحث از شواهد نشان داده شده است). ... قوی‌ترین افزایش سطح آب توسط قطارهایی با بارهای سنگین ایجاد می‌شود که نسبتاً آهسته حرکت می‌کنند. هرگز مشاهده نشده است که یک موتور یک رکورد از خود به جای بگذارد، و قطارهای مسافری که به سرعت در حال حرکت هستند، فقط یک حرکت جزئی ایجاد می‌کنند یا اصلاً هیچ حرکتی ندارند.

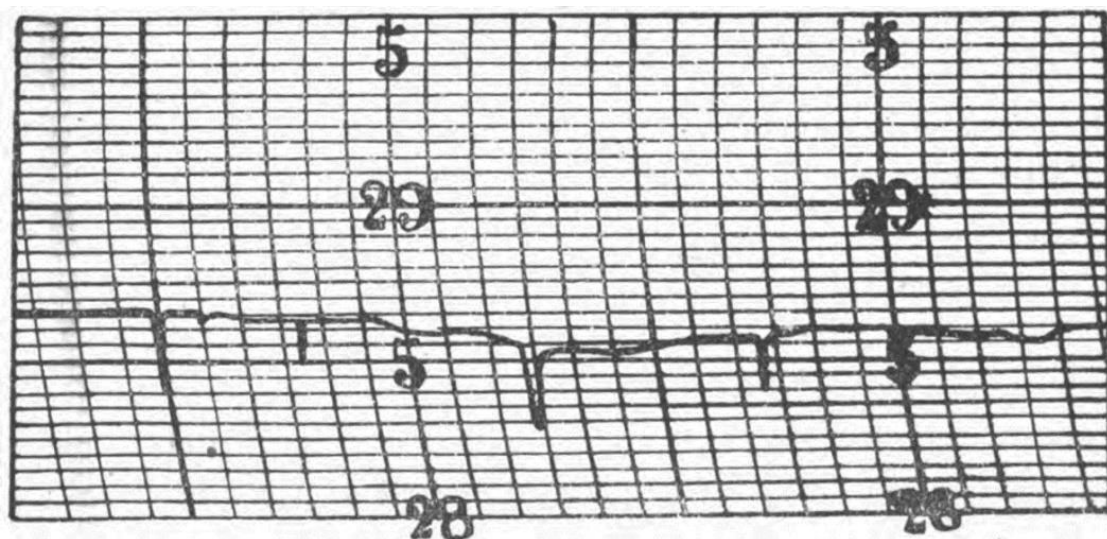
2. ترزاقی (1925) آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام داد که در آن تخلخل (حجم خالی تقسیم بر حجم کل) یک ماسه از پیش فشرده شده در پاسخ به تغییرات تنش محوری (نیرو در واحد سطح) اندازه‌گیری شد (پاسخ فشار در شکل 5 این کتاب نشان داده شده است. نمونه چندین چرخه بارگذاری و تخلیه را طی کرد، اگرچه تخلیه باعث تراکم دائمی شد، بارگیری مجدد روند اولیه را پس از رسیدن به تنش محوری چرخه قبلی دنبال کرد. مربوط به ماینزر این بود که کاهش تخلخل بین نقاط a و b در شکل 5 مشابه آنچه برای محاسبه حجم آب از دست رفته در محاسبه او لازم بود.

3. Schureman (1926) داده‌هایی را ارائه کرد که نشان می‌داد سطح آب در چاه عمیق 800 فوتی در لانگپورت، نیوجرسی در فاز جزر و مد اقیانوس ثبت شده در شهر آتلانتیک در هفت مایلی شمال شرقی است. این دو مکان بر روی یک جزیره حائل به عرض حدود 1000 فوت (305 متر) در اقیانوس اطلس در سواحل شرقی ایالات متحده قرار دارند (واکنش‌های جزر و مد و سطح آب چاه در شکل 6 این کتاب در ادامه این بحث آمده است. این همبستگی باید به دلیل یک اثر بارگذاری مکانیکی باشد زیرا 300 فوت (90 متر) خاک رس میانی به این معنی است که احتمالاً آب نمی‌تواند مستقیماً با ماسه عمیق ارتباط برقرار کند (Thompson, 1926).

4. پرات و جانسون (1926) فرونشست زمین در گوس کریک در خلیج گالوستون را به استخراج نفت، گاز و آب از منافذ سنگ در سازندهای زیرین نسبت دادند (نشست در شکل 7 این کتاب در پی این بحث از شواهد نشان داده شده است). سه نمونه‌ی اول، بار مکانیکی اعمال شده یک پاسخ فشار سیال مرتبط با کاهش حجم منافذ ایجاد کرد. فرونشست در گوس کریک نشان داد که عکس

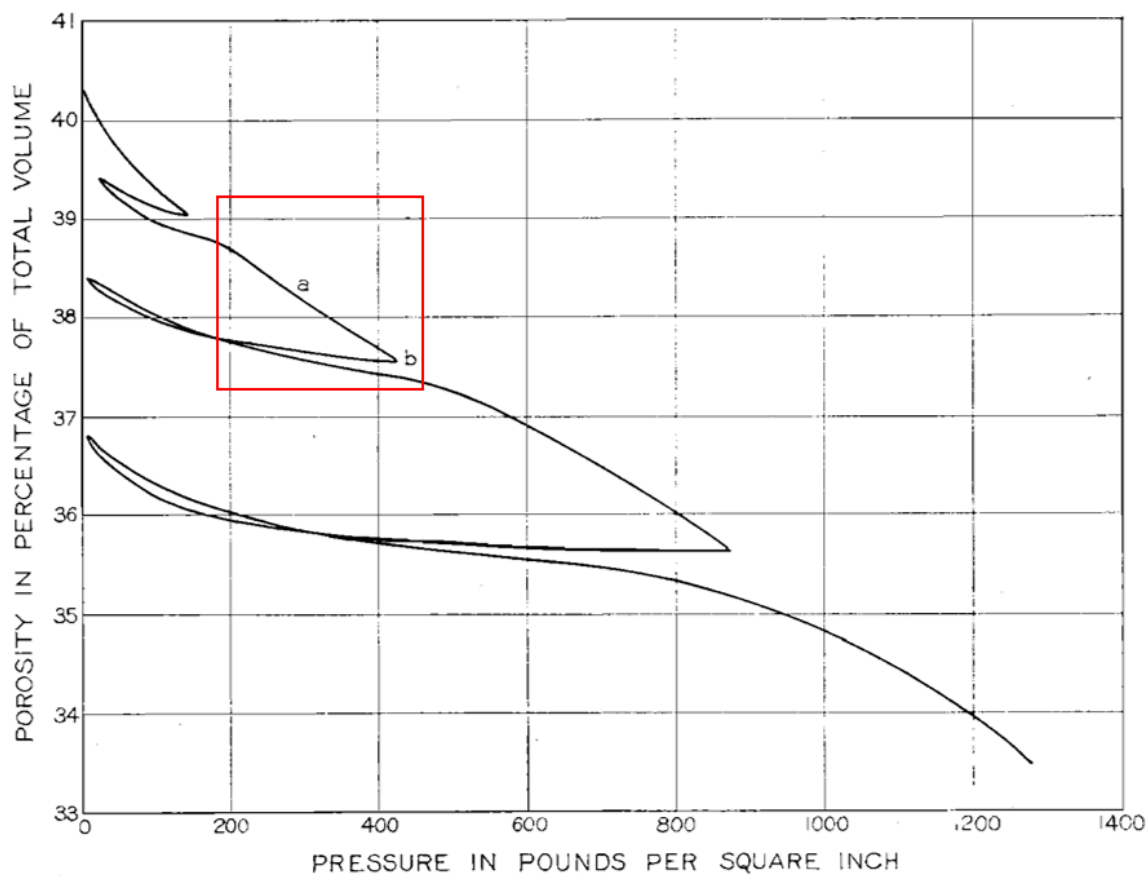
این موضوع نیز صادق است، یعنی استخراج مایع می‌تواند منجر به از دست دادن حجم منافذ شود.

ماینزر نتیجه گرفت که تفاوت بین حجم استخراج و حجم تغذیه را می‌توان با کاهش حجم آبخوان حل کرد. در نظر گرفته شد که تغییر در حجم آبخوان تنها از طریق تثبیت عمودی رخ می‌دهد، که در آن  $\Delta V_{pore}/V_{pore} = \Delta b/b$ ، نشان دهنده تغییر یا تفاوت بین حجم منافذ قبل و بعد از پمپاژ است،  $V_{pore}$  حجم منافذ اولیه است.  $b$  ضخامت اولیه آبخوان است. محدود کردن تغییر شکل به یک بعد، ایده‌آلی‌سازی یک مسئله سه بعدی است، اما اغلب برای سفره‌های زیرزمینی با وسعت منطقه‌ای زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض کرنش جانبی صفر (کرنش اندازه‌گیری تغییر نسبی در طول، مساحت یا حجم است) مسئله را فقط به بعد عمودی با کرنش عمودی که  $\epsilon_v = -db/b = 4.4$  (Meinzer, 1928, page 281)  $\epsilon_v = 0.6\%$  تعریف شده است کاهش می‌دهد. که در آن قرارداد علامت برای  $\epsilon_v$  این است که فشردگی مثبت در نظر گرفته می‌شود. کرنش عمودی 0.6 درصد به این معنی است که کاهش تخلخل مورد نیاز از 38.2 درصد اولیه به 37.6 درصد است. با این تعاریف، استدلال ماینزر حاکی از آن است که آب جابجا شده توسط 4.4 اینچ (0.11 متر) از تراکم آبخوان در 648 مایل مربع (1680 کیلومتر مربع) از 18 شهرستان برای تولید 2500 گالن در دقیقه (9.5 متر مکعب در دقیقه) به مدت 38 سال کافی است. بنابراین، "تراکم پذیری آبخوان‌های آرتزین" در عنوان مقاله ماینزر مشکل تعادل جرم را حل کرد. این توضیح واضحی از اساس فیزیکی ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی در یک آبخوان محدود ارائه می‌کند.

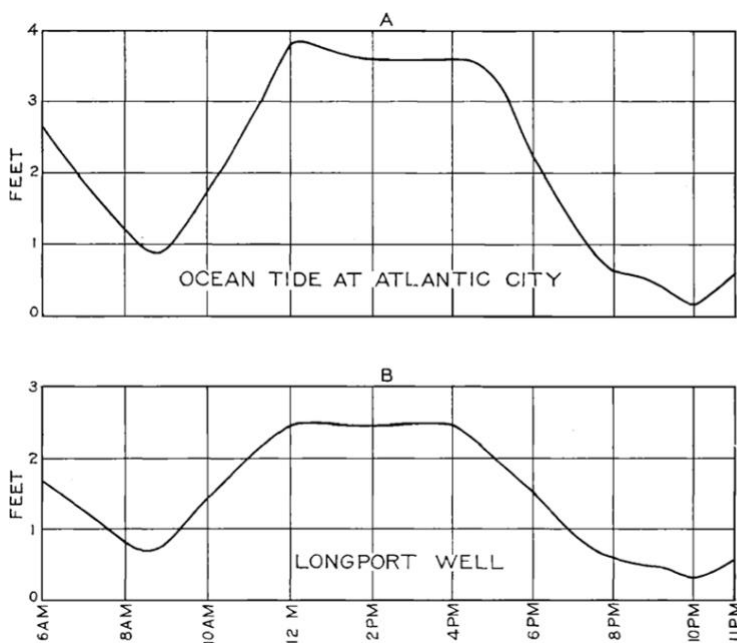


شکل 4  
تغییرات

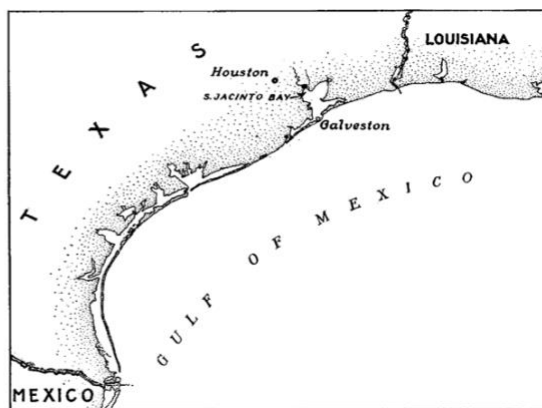
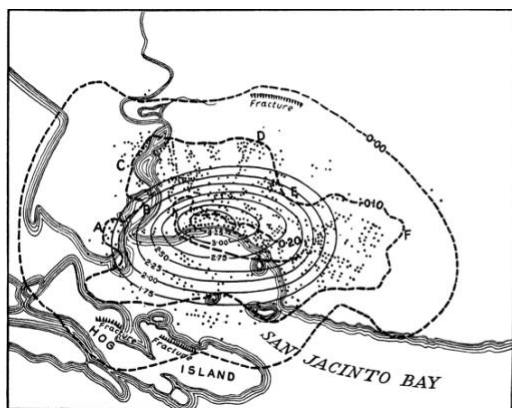
در سطح آب (در نقطه ای در حدود 40 فوت (12 متر) عمق و 140 فوت (43 متر) از ریل قطار) ناشی از حرکت قطارها که توسط یک شناور متصل به بازوی اهرمی با قلمی که روی استوانه ای عمودی که با گذشت زمان در بالای چاه می‌چرخد تا افزایش سطح آب را به عنوان حرکت رو به پایین قلم ثبت کند (کینگ، 1892).



شکل 5 کاهش تخلخل با افزایش تنش عمودی (لیبل "فشار" برای محور افقی). ناحیه جعبه‌ای بین نقاط a و b تقریباً با کاهش فشار سیال در آبخوان داکوتا مطابقت دارد (باز ترسیم شده توسط Meinzer (1928) از Terzaghi (1925)).



شکل 6 سمت چپ: جزر و مد اقیانوس (نمودار A) در 22 ژانویه 1926 در آتلانتیک سیتی، نیوجرسی، 7 مایلی (11 کیلومتری) شمال شرقی جایی که سطح آب (نمودار B) در چاهی با عمق 800 فوت در لانگپورت، نیو ثبت شد، اندازه گیری شد. جرسی (باز ترسیم شده توسط Meinzer (1928) از Schureman (1926)). پاسخ فازی سطوح چاه به جزر و مد اقیانوس گواه بارگذاری مکانیکی است زیرا اگر سطح آب به جریان سیال پاسخ دهد، زمان تاخیر مشهود است. سمت راست: نقشه از تامپسون (1926). نوار سایه‌دار بیرون آمده سازند کرکوود است که اعتقاد بر این بود که ماسه‌ای در عمق 800 فوتی چاه لانگپورت را شامل می‌شود.



شکل 7 چند فوت فرونشست (کاهش ارتفاع زمین) در نتیجه استخراج نفت، گاز، آب و ماسه از میدان نفتی گورس کریک در خلیج گالوستون رخ داد (پرات و جانسون، 1926). سمت چپ: خطوط بیضی شکل با فاصله نزدیک برای دوره 8 ساله هستند. خطوط چین دار و نامنظم برای دوره یک ساله هستند. چاه‌های منفرد به صورت نقطه نشان داده می‌شوند. ایالت تگزاس پس از غرق شدن میدان به دلیل داشتن مالکیت زمین در زیر آب، تلاش کرد تا مالکیت خود را ادعا کند. سمت راست: نقشه از پرات و جانسون (1926).

### 3 راه حل تیس

مفهوم ذخیره سازی اغلب در هیدروژئولوژی به عنوان پارامتر "S" در راه حل تیس (1935) مشاهده می شود. او مسئله افت چاه را در شرایط رسانش گرما در نظر گرفت، که در مکاتبه با همکلاسی سابق خود، کلارنس لوبین، که استاد ریاضیات دانشگاه سینسیناتی شده بود، بیان کرد (فریز، 1985).

"جریان آب زیرزمینی شباهت‌های زیادی به انتقال گرما دارد. ما در تئوری آب‌های زیرزمینی تشابهات دقیقی برای گرادیان حرارتی، هدایت حرارتی و گرمای ویژه داریم. من فکر می‌کنم یک رویکرد نزدیک به حل برخی از مشکلات ما احتمالاً قبلاً در تئوری انتقال گرما کار شده است. آیا این مشکل در جریان شعاعی حل شده است؟ با توجه به صفحه‌ای با ضخامت ثابت معین و با ویژگی‌های حرارتی ثابت در دمای اولیه یکنواخت برای محاسبه دماها در سرتاسر صفحه در هر زمان پس از معرفی سینک در دمای صفرنگه داشته شده؟ و یک مورد ارزشمندتر از دیدگاه ما: با توجه به صفحه یکسان در شرایط یکسان برای محاسبه دما پس از معرفی یک سینک که گرما با سرعت یکنواخت در آن جریان دارد؟ فراموش کردم بگویم که این صفحه ممکن است با وسعت منطقه‌ای بی نهایت در نظر گرفته شود."

لوبین با توجه به بنکس (2015) راه حلی را از کارسلاو<sup>5</sup> (1921) به تیس ارائه کرد که تیس به درستی در مقاله خود به آن اشاره کرد. همانطور که در نامه قبلی خود به لوبین انجام داد، این قیاس جریان گرما را به وضوح بیان کرد.

"قانون داری مشابه قانون جریان گرما از طریق رسانش است، فشار هیدرولیک مشابه دما، گرادیان فشار به گرادیان حرارتی، نفوذپذیری نسبت به هدایت حرارتی، و آبدهی ویژه نسبت به گرمای ویژه [مورب اضافه شده است]. بنابراین، نظریه ریاضی هدایت گرما که توسط فوریه و نویسندگان بعدی ایجاد شد، تا حد زیادی در نظریه هیدرولیک قابل استفاده است. این قیاس حداقل از زمان کار اسلیشتر<sup>6</sup> به رسمیت شناخته شده است، اما ظاهراً هیچ تلاشی برای معرفی تابع زمان در ریاضیات هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی صورت نگرفته است."

"در رسانش گرما مقدار مشخصی از گرما همزمان و آنی با کاهش دما از دست می رود. به نظر می‌رسد که به طور مشابه، در سفره‌های آب‌های آرتزینی الاستیک، با کاهش فشار، مقدار مشخصی آب به‌طور آنی از ذخیره‌سازی خارج می‌شود [مورب اضافه شده است]."

برای ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی، تیس از متغیر S استفاده کرد که در اصل آن را «آبدهی ویژه» در نقل قول بالا نامید و نباید با «آبدهی ویژه» یک سفره آبخوان محدود اشتباه شود. به طور واضح، تشبیه به

H.S<sup>5</sup>. کتاب Carslaw و J. C. Jaeger «رسانایی گرما در جامدات» (ویرایش دوم) که توسط Clarendon Press در سال 1959 منتشر شد، منبع غنی تئوری و راحل‌های تحلیلی قابل استفاده در هیدروژئولوژی کمی است.

<sup>6</sup> تاریخچه اسلیچر در سال 1987 توسط H. F. Wang در مقاله "چارلز سامنر اسلیشتر: مهندس در لباس ریاضیدان" در تاریخ ژئوفیزیک، جلد 3، تاریخچه هیدرولوژی، ویرایش شده توسط ادوارد آر. لاند و سایمون اینس، صفحات 103-112 خلاصه شد.

گرمای ویژه<sup>7</sup> برخلاف توصیف کوتاهی از معنای فیزیکی ضریب انتقال پذیری T تنها ویژگی ارائه شده توسط تیس برای S است. این یک ویژگی استنباط شده از قیاس جریان گرما بود. با این حال، تیس بعداً در یادداشت نویسنده‌ای که در سال 1952 به چاپ مجدد انجمن زمین شناسی ایالات متحده (USGS) از مقاله خود در سال 1935 اضافه شد، S را توضیح داد.

"عامل S در معادلات داده شده در متن مقاله "آبدهی ویژه" نامیده می‌شود. بررسی‌های بعدی نشان داده است که بهتر است این اصطلاح را «ضریب ذخیره» آبخوان بنامیم و آن را به‌عنوان مقدار آبی بر حسب فوت مکعب تعریف کنیم که از هر منشور عمودی آبخوان با مساحت پایه‌ای برابر با 1 فوت مربع تخلیه می‌شود. ارتفاع برابر با ارتفاع آبخوان هنگامی که سطح آب یک فوت پایین می‌آید." در اینجا، تیس از استفاده از اصطلاح "آبدهی ویژه" برای یک آبخوان محصور پشتیبانی می‌کند. امروزه، «ذخیره‌پذیری» مترادف با «ضریب ذخیره» استفاده می‌شود، و تعریف شفاهی تیس همان چیزی است که معمولاً در کتاب‌های درسی ارائه می‌شود و برای یک آبخوان محصور در شکل 1 نشان داده شده است. تعریف تیس از ضریب ذخیره برای جریان دوبعدی است. در حالت سه بعدی، آنالوگ گرمای ویژه ذخیره‌ی ویژه است، که در آن مقدار آب حذف شده از یک REV حجم اولیه در واحد کاهش هد با حجم REV نرمال می‌شود. برای دقت، تعریف تحت اللفظی به یک معادله ترجمه می‌شود، اگرچه بیشتر کتاب‌های درسی هیدروژئولوژی از تیس پیروی می‌کنند و از انجام آن صرف نظر می‌کنند. یک کمیت کلیدی برای تعریف، افزایش محتوای سیال،  $\zeta$  (معادله 1) است که منشأ آن در مکانیک خاک و تئوری منفذ الاستیسیته است (Biot, 1941؛ وانگ، 2000).

$$\zeta = \frac{\Delta V_w}{V} \quad (1)$$

جایی که:

$\Delta V_w$  = حجم آب اضافه شده یا خارج شده از ذخیره در یک REV ( $L^3$ )

$V$  = حجم معرف حجم اولیه

مقدار  $\Delta V_w$  وقتی آب به آبخوان اضافه می‌شود مثبت و وقتی آب از سفره خارج می‌شود منفی است. کمیت  $\Delta V_w$  حجم آب منتقل شده به یا از یک منبع خارجی را با فشار مرجع، معمولاً فشار اتمسفر، نشان می‌دهد، زیرا فشارسنج‌ها معمولاً تفاوت بین فشار مطلق و فشار اتمسفر ("فشار گیج") را اندازه‌گیری می‌کنند. بنابراین،  $\Delta V_w$  افزایش حجم آب است که به آبخوان اضافه یا از آن خارج می‌شود، به همان اندازه که ممکن است پول به یک حساب بانکی اضافه یا از آن برداشت شود. مقدار آب اضافه شده یا خارج شده از آبخوان توسط حجم  $V$  از REV نرمال می‌شود. سپس با ترجمه کلمات تیس به یک معادله، یک تعریف ریاضی برای ذخیره ویژه همانطور که در معادلات a2 و b2 نشان داده شده است، به دست می‌دهد.

$$S_s = \frac{\zeta}{\Delta h} \quad (2a)$$

<sup>7</sup> او بعداً در مقاله خود از اصطلاح «گرمای ویژه در واحد حجم» استفاده می‌کند که مشابه «ذخیره ویژه» است که به عنوان ظرفیت ذخیره‌سازی در واحد حجم تعریف می‌شود. از آنجا که "ویژه" به طور کلی به مقدار در واحد جرم یک کمیت اشاره دارد، "گرمای ویژه در واحد حجم" را "ظرفیت گرمایی جمعی" می‌گویند.

ذخیره ویژه SS دارای واحدهای ارتفاع معکوس، مانند معکوس متر،  $1/m$  است. این تعریف همچنین به دلیل  $\Delta p = \rho_w g \Delta h$  می‌تواند برای تغییر فشار سیال بیان شود. هد ( $h$ ) در کتاب پروژه GW توسط Woessner and Poeter (2020) تعریف و مورد بحث قرار گرفته است.

$$S_s = \rho_w g \frac{\zeta}{\Delta p} \quad (2b)$$

که در آن:

$$\rho_w = \text{چگالی آب (M/L}^3\text{)}$$

$$g = \text{شتاب ناشی از جاذبه زمین (L/T}^2\text{)}$$

در جریان شعاعی دوبردی، ذخیره‌سازی S، برای یک سفره آب محصور با ضخامت b، و ذخیره ویژه،  $S = S_s b$  است. زیرا ذخیره‌سازی در تعریف تیس مقدار آب خارج‌شده از هر منشور عمودی آبخوان واحد سطح در واحد کاهش هد است. ضریب ذخیره بدون بعد است زیرا بعد S طول معکوس است. این بازگویی راه حل تیس 1935 برای تخلیه به دلیل وجود یک چاه پمپاژ در یک آبخوان افقی، نقش مهمی را که قیاس انتقال گرما در توسعه مفهوم ذخیره‌ی هیدروژئولوژیک ایفا کرد، نشان می‌دهد. این قیاس هم فیزیکی و هم ریاضی است (جدول 1). هد/دما پتانسیل‌های محرک برای جریان آب/جریان گرما طبق قانون داری/فوری هستند. ذخیره ویژه (حجم آب تخلیه شده از مخزن در واحد حجم آبخوان به ازای واحد کاهش در هد) آنالوگ گرمای ویژه در واحد حجم (افزودن گرمای لازم برای افزایش دمای واحد حجم ماده‌ی یک درجه) است. یک تضاد جالب بین این جفت آنالوگ این است که تعریف ذخیره ویژه معمولاً به صورت منفی دوگانه (دبی در هر کاهش) با توجه به اهمیت استخراج آب از یک سفره زیرزمینی بیان می‌شود، در حالی که تعریف گرمای ویژه به صورت مثبت مضاعف بیان می‌شود (افزودن به بالابردن). جدول 1 هنوز کامل نشده است زیرا معادلات حاکم زوجی در بخش 5 در رابطه با معادله انتشار مورد بحث قرار خواهند گرفت.

جدول 1 - مقادیر مشابه در جریان آب زیرزمینی و جریان گرما (وانگ و اندرسون، 1982؛ وانگ، 2000؛ اندرسون، 2007).

جریان آب زیرزمینی	جریان گرما
$h = p / (\rho_w g) + z$ هد سیال	$T [^{\circ}\text{K}]$ دما
$\Delta V_w$ [m <sup>3</sup> ] آب به مخزن اضافه می‌شود	$\Delta Q$ [J] گرما
$q$ [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s = m/s] جریان آب زیرزمینی	$q$ [J/(m <sup>2</sup> s) = W/m <sup>2</sup> ] جریان گرما
$K$ [m/s] هدایت هیدرولیکی	$K$ [J/(m °K s) = W/(m °K)] هدایت گرمایی
$S_s = S/b$ [1/m] ذخیره ویژه	$\rho c$ [J/(°K m <sup>3</sup> )] ظرفیت گرمایی ویژه
$K/S_s$ [m <sup>2</sup> /s] انتشار هیدرولیک	$K/(\rho c)$ [m <sup>2</sup> /s] انتشار حرارتی (در اینجا K هدایت حرارتی است، به بالا مراجعه کنید)
$q = -K(dh/dx)$ قانون داری	$q = -K(dT/dx)$ قانون فوری





## 4 فرمول تراکم پذیری جاکوب برای ذخیره آبخوان

پیشرفت عمده بعدی در درک ذخیره‌سازی هیدروژئولوژیکی توسط سی. ای. جاکوب (تیتوس، 1973) در مقاله‌ای در سال 1940 انجام شد که در آن مفهوم ذخیره‌سازی تیس به‌عنوان ویژگی مشابه ظرفیت گرمایی را با تحلیل ماینزر از آب ذخیره‌شده در آبخوان داکوتا به دلیل تراکم پذیری آبخوان مرتبط کرد. همانطور که اعتراف<sup>8</sup> او روشن می‌کند، ژاکوب ایده‌های خود را با همکارش، سی. وی. تیس، در انجمن زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) در میان گذاشت. هدف جاکوب استخراج معادل آب زیرزمینی معادله دیفرانسیل جزئی برای جریان حرارت وابسته به زمان و در نتیجه قرار دادن توصیف ریاضی جریان آب زیرزمینی در میدان فیزیکی محکم‌تر از یک قیاس قابل قبول بود.

"نویسنده پیشنهاد می‌کند که معادله دیفرانسیل بنیادی حاکم بر جریان آب در یک سفره آبخوان آرتزین الاستیک را «از ابتدا» استخراج کند، و به نوبه خود هر یک از مفروضاتی را که برای استخراج معادله ضروری هستند، در نظر می‌گیرد."

جاکوب تعادل جرم را در یک REV در یک مرحله زمانی محاسبه کرد که در آن تغییری در فشار  $\Delta p$  وجود داشت. استنتاج او بر سه اصل فیزیکی استوار بود: (1) کاهش فشار سیال معادل افزایش موثر تنش عمودی است. (2) کاهش فشار سیال، حجم آب را برابر از دست دادن تخلخل مرتبط با تراکم پذیری آبخوان خارج می‌کند. (3) کاهش فشار سیال به دلیل تراکم پذیری خود آب منجر به انبساط حجمی آب در منافذ می‌شود.

1. عنوان مقاله ماینزر در سال 1928 توجه را به نقش "تراکم پذیری و کشش آبخوان‌های آرتزین" جلب کرد. او به عنوان مدرک، آزمایش ترزاقی را ارائه کرد که در آن یک تنش عمودی باعث از بین رفتن تخلخل در ماسه سنگ شد (شکل 5). اثر کاهش فشار منفذی برای داشتن همان اثر افزایش برابر در تنش عمودی به تصویر کشیده شده است (شکل 8). همانطور که در معادله 3 نشان داده شده است، این مفهوم به طور رسمی به عنوان "قانون تنش موثر" بیان شده است.

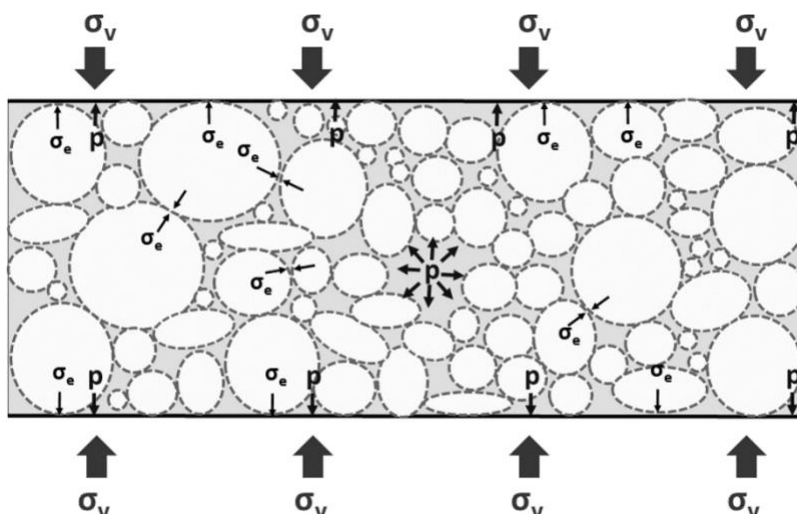
$$\varepsilon_v = \beta_v(\sigma_v - p) = \beta_v \sigma_e \quad (3)$$

جایی که:

$$\varepsilon_v / \sigma_v = \beta_v = \text{تراکم پذیری عمودی برای } p = 0 \text{ (شرایط تخلیه)}$$

$\sigma_e = \sigma_v - p = \text{تنش عمودی موثر به عنوان تفاوت بین تنش عمودی و فشار منفذی تعریف می‌شود. علامت قراردادی این است که تنش فشاری مثبت است.}$

<sup>8</sup> نویسنده بسیار مدیون پیشنهادات و انتقادات به موقع همکاران خود در سازمان زمین‌شناسی و به ویژه سی. وی. تیس است، زیرا بسیاری از ایده‌های بیان شده در اینجا از ارتباطات شخصی وی با نویسنده گرفته شده است.



شکل 8 - قانون تنش موثر می‌گوید که تنش عمودی موثر  $\sigma_e = \sigma_v - p$  کرنش عمودی را کنترل می‌کند (پس از اتکینسون، 2000).

2. جاکوب استدلال کرد که استخراج آب از یک سفره آب، تنش عمودی کل را تغییر نمی‌دهد. با ثابت تنش عمودی کل، افزایش تنش موثر برابر است اما مخالف کاهش فشار سیال است، یعنی  $\Delta\sigma_e = -\Delta p$ ، بنابراین رابطه 3 تبدیل به معادله 4 می‌شود.

$$\Delta\varepsilon_v = -\beta_v \Delta p \quad (4)$$

قرارداد علامت این است که کرنش عمودی و تنش عمودی در فشار مثبت هستند. با توجه به فرض کرنش جانبی صفر، کرنش عمودی برابر با کاهش تخلخل است، با این نکته که تراکم‌پذیری دانه‌های جامد ناچیز است. به عبارت دیگر،  $\Delta\varepsilon_0$  برابر است با حجم آب در واحد حجم یک REV که به دلیل تراکم‌پذیری آبخوان از مخزن خارج می‌شود.

3. علاوه بر این، گسترش حجم آب منفذی در پاسخ به کاهش فشار سیال باید در بیلان آب برای یک REV لحاظ شود (معادله 5).

$$\frac{\Delta V_w}{V_w} = -\beta_w \Delta p \quad (5)$$

جایی که:

$$\beta_w = \text{تراکم‌پذیری آب} \quad (4.5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1})$$

$$nV = V_w \quad n, \text{تخلخل و } V, \text{حجم REV}$$

با اضافه کردن دو منبع آب آزاد شده از مخزن برای کاهش فشار منفذی  $\Delta p$ ، جاکوب عبارتی برای ضریب ذخیره  $S$  به دست آورد که شامل تراکم‌پذیری آبخوان و تراکم‌پذیری آب و همچنین ضخامت و تخلخل آبخوان همانطور که در معادلات  $a_6$  و  $b_6$  نشان داده شده است، می‌باشد.

$$S = \rho_w g b (\beta_v + n\beta_w) \quad (6a)$$

با تقسیم بر ضخامت آبخوان، ذخیره ویژه بدست می‌آید.

$$S_s = \rho_w g (\beta_v + n\beta_w) \quad (6b)$$

سیستم بین المللی واحدها (SI) برای  $S_s$ ،  $\frac{1}{m}$  است که در معادله 2 نشان داده شده است.

سپس جیکوب از بقای جرم معادله دیفرانسیل جزئی را برای جریان شعاعی در آبخوانی با ضخامت  $b$  به دست آورد که از نظر شکل با آنچه تیس با قیاس با انتقال گرما استنباط کرد، یکسان بود. تفاوت این بود که ضریب ذخیره  $S$  بر حسب تراکم پذیری بیان می‌شد نه به عنوان کمیتی که توسط قیاس تعریف می‌شد. از آزمایش ترزاقی (شکل 5 و معادله 6 ب) می‌توان برای تخمین ذخیره ویژه ماسه سست استفاده کرد. تراکم پذیری عمودی  $\beta_v$  بین نقاط  $a$  و  $b$  از شیب  $7 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  پس از تبدیل از واحدهای انگلیسی محاسبه می‌شود.

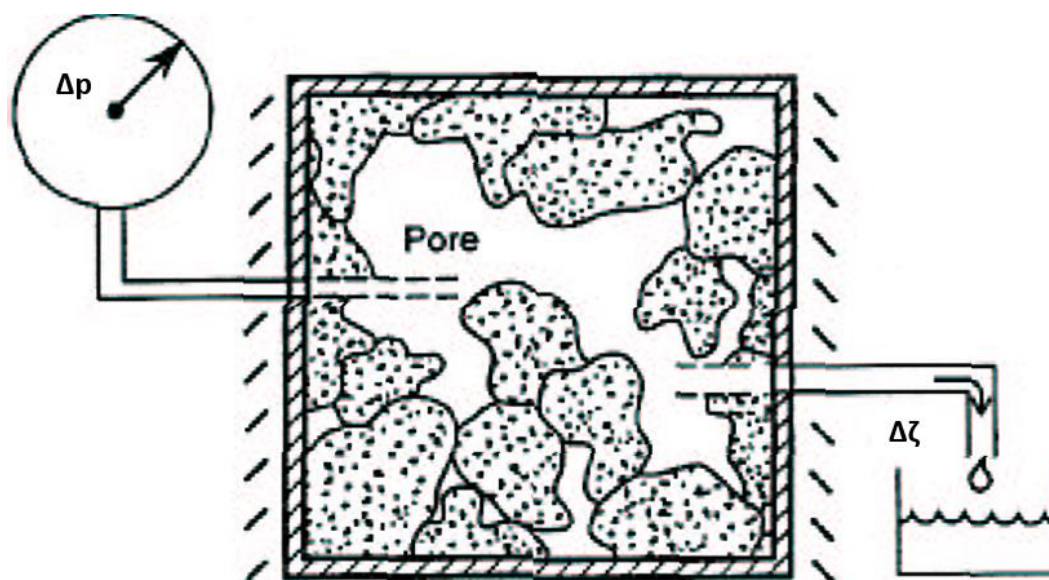
عبارت  $n\beta_w = 2 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  برای تخلخل 38% است. با افزودن عبارتها و ضرب در ضریب  $\rho_w g$ ، ذخیره ویژه  $2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  و نسبت تراکم پذیری ماسه به آب 3.5 است. مقادیر ذخیره ویژه به نوع سنگ و همچنین تنوع در سنگ شناسی بستگی دارد. باتوجه به این آگاهی‌ها، جدول 2 مقادیر مرتبه بزرگی را برای مجموعه کوچکی از مواد زمین شناسی ارائه می‌کند. مقدار آبی که برای آبیاری از آبخوان داکوتا به دست می‌آید، روشن می‌کند که حجم زیادی از آب را می‌توان در خاکی با قابلیت تراکم بالا ذخیره کرد. با این وجود، مقادیر ذخیره ویژه در جدول 2، مقادیر کوچک‌تر از آبدهی ویژه سفره‌های زیرزمینی محصور هستند که مقادیر آن‌ها تخلخل آبخوان است.

جدول 2 تراکم پذیری سنگ و ذخیره سازی خاص چند ماده زمین شناسی (Palciauskas and Domenico, 1989). تراکم پذیری سنگ و مقادیر ذخیره سازی خاص برای تنش محدود کننده همسانگرد است نه تنش عمودی. مقادیر از منابع مختلفی می‌آیند. اندازه گیری سنگ آهک برای بارومتری یا جزر و مدی است. مقادیر دیگر از کتاب‌های راهنما آمده و با فرضیات محاسبه شده‌اند. ذخیره ویژه بر حسب هد از مقدار آن بر حسب فشار با استفاده از  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  و  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  محاسبه شد. برای مقایسه، تراکم پذیری آب  $\beta_w = 4.5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

نخیره سازی خاص از نظر هد	ذخیره ویژه از نظر فشار	تراکم پذیری سنگ	مواد زمین شناسی
$S_s, 10^{-6} \text{ m}^{-1}$	$S_s/(\rho_w g), 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	$\beta, 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	
159	162	160	خاک رس
5.3	5.4	4.6	گل سنگ
1.2	1.2	1.1	ماسه سنگ کاپینتا
0.93	0.95	0.3	سنگ آهک

در هیدروژئولوژی، تراکم پذیری آبخوان به طور معمول مهم تر از تراکم پذیری آب است. از طرف دیگر، مهندسان نفت عموماً مخازن نفت را تراکم ناپذیر می‌دانستند زیرا در عمق بیشتری قرار دارند. جاکوب این فرض را برای میدان نفتی تگزاس شرقی که توسط مسکات (1937) در رساله کلاسیک خود جریان سیالات همگن از طریق محیط متخلخل توصیف شده است، بررسی کرد. این میدان 500 میلیون بشکه (80 میلیون مترمکعب) نفت با افت فشار 375 psi (2.6 مگاپاسکال) تولید کرد. با فرض یک مخزن صلب، مسکات نیاز داشت که نفت در محل باید حاوی گاز محلول کافی باشد تا تراکم پذیری سیال را تا ضریب 20 افزایش دهد تا این مقدار فقط از تراکم‌پذیری سیال تولید شود، حتی اگر نفت اشباع نشده بود. جاکوب در عوض پیشنهاد کرد که تراکم پذیری ماسه مخزن وودبین و بسترهای رسی مرتبط به احتمال زیاد عامل تولید است.

لازم به تاکید است که ضرایب ذخیره  $S$  و  $SS$  در معادله  $a_6$  یا  $b_6$  را می‌توان به طور مستقیم در میدان از آزمایش پمپاژ یا در آزمایشگاه با رعایت تعریف آن به عنوان نسبت حجم آب حذف شده از مخزن به دلیل تغییر فشار منفذی اندازه‌گیری کرد. (شکل 9). با این حال، انجام دقیق این اندازه‌گیری مستقیم دشوار است، زیرا ذخیره سیال در لوله‌های متصل به حجم منافذ نمونه سنگ باید لحاظ شود.



شکل 9 اندازه‌گیری ذخیره ویژه بر حسب تغییر فشار سیال معادله  $b_6$  (وانگ، 2000).

علاوه بر معادله  $a_6$ ، جاکوب معادلاتی را برای پاسخ سطح آب به بارگذاری آبخوان توسط جزر و مد آب یا تغییرات فشار هوا، همچنین از نظر آبخوان و تراکم پذیری آب استخراج کرد که می‌تواند اندازه‌گیری غیرمستقیم ضریب ذخیره را ارائه دهد. گستره افقی بزرگ فرضی بارگذاری باعث ایجاد فشار سیال در آبخوان می‌شود زیرا سیال در حین بارگیری نمی‌تواند فرار کند. در مکانیک خاک به آبخوان زهکشی نشده

گفته می‌شود. در بارگذاری جزر و مدی یا بارومتري، تنش عمودی قطعاً ثابت نیست. هنگامی که تنش عمودی علاوه بر تغییر فشار منفذی اعمال می‌شود، می‌توان آب را به مخزن اضافه یا از آن خارج کرد (مقایسه با معادله b2). بنابراین، به طور کلی، افزایش محتوای سیال باید بر حسب تغییرات تنش عمودی و فشار منفذی بیان شود. ساده‌ترین شکل برای یک معادله این است که افزایش محتوای سیال را تابع خطی هر دو متغیر در نظر بگیریم.

$$\zeta = -\beta_v \Delta \sigma_v + \rho_w g S_s \Delta p \quad (7a)$$

علامت قراردادی این است که وقتی آب به REV اضافه می‌شود مثبت است و وقتی REV متراکم می‌شود  $\Delta \sigma_v$  مثبت است. اولین عبارت در سمت راست در معادله a7 افزایش محتوای سیال مرتبط با تغییر در تنش عمودی زمانی است که تغییری در فشار سیال وجود ندارد. جاکوب این فرض را مطرح کرد که حجم آب ذخیره شده در یک REV به همان میزان کاهش می‌یابد که حجم خود REV کاهش می‌یابد، یعنی تغییر آب در ذخیره منفی کرنش است، به همین دلیل است که ضریب  $\Delta \sigma_v$  در معادله 7a،  $\beta_v$  است. عبارت دوم در سمت راست در معادله a7 افزایش محتوای سیال مرتبط با تغییر فشار سیال زمانی است که هیچ تغییری در تنش عمودی وجود ندارد، که دقیقاً تعریف ذخیره ویژه است (مقایسه با معادله 2).

معادله a7 یکی از دو معادله اساسی تشکیل دهنده منفذ الاستیسیته برای مورد خاص بارگذاری عمودی گسترده و منطقه ای است (وانگ، 2000). معادله سازنده دیگر به صورت خطی کرنش عمودی را به تغییرات تنش عمودی و فشار منفذی مرتبط می‌کند.

$$\Delta \varepsilon_v = \beta_v \Delta \sigma_v - \beta_v \Delta p \quad (7b)$$

معادله b7 کرنش عمودی را به عنوان مجموع دو جمله به دست می‌دهد. عبارت اول بیان می‌کند که کرنش عمودی، کرنش عمودی ناشی از تغییر در تنش عمودی در زمانی است که تغییری در فشار سیال وجود ندارد و عبارت دوم، کرنش عمودی است که با تغییر فشار سیال در زمانی که تغییری در تنش عمودی وجود ندارد. ضریب تناسب برای هر دو عبارت با قانون تنش مؤثر  $\beta_v$  است، یعنی معادله b7 به سادگی بیان مجدد معادله 3 است.

پاسخ فازی سطوح آب در یک آبخوان به جزر و مد اقیانوس (شکل 6) توسط ماینزر به عنوان شواهدی از کشش آبخوان ذکر شده است. نسبت افزایش سطح آب در چاه به افزایش سطح اقیانوس را بازده جزر و مدی، T.E. می‌گویند. این نسبت برابر است با نسبت  $\Delta p / \Delta \sigma_v$ . با فرض اینکه هیچ آبی به دلیل وسعت منطقه‌ای زیاد بارگذاری وارد آبخوان یا از آن خارج نمی‌شود و با وارد کردن شرایط زهکشی نشده،  $\zeta=0$ ، در معادله a7، پاسخ فشار منفذی زهکشی نشده را  $\Delta p = \beta_v \sigma_v / (\rho_w g S_s)$  می‌دهد. سپس با جایگزینی معادله b6 به جای SS، معادله 8 به دست می‌آید.

$$T.E. = \frac{\beta_v}{\beta_v + n\beta_w} \quad (8)$$

راندمان بارومتريک، B.E.، به طور مشابه به عنوان نسبت افزایش سطح آب به افزایش تنش عمودی (بیان شده به عنوان افزایش هد معادل) تعریف می‌شود. تفاوت با راندمان جزر و مدی از نظر پاسخ چاه این است

که تغییر  $\Delta p$  در فشار اتمسفر به طور مستقیم سطح آب در چاه را با  $\Delta p / \rho_w g$  تغییر می‌دهد. این باید به مقدار ناشی از بارگذاری اتمسفر در آبخوان اضافه شود، همانطور که در مورد بارگذاری جزر و مدی وجود دارد. بدین ترتیب،  $B.E. = 1 - T.E.$  و می‌توان آن را به صورت معادله 9 بیان کرد.

$$B.E. = \frac{n\beta_w}{\beta_v + n\beta_w} \quad (9)$$

عبارات مربوط به راندمان جزر و مدی و راندمان بارومتري شامل همان ویژگی‌های آبخوان به عنوان ذخیره ویژه هستند، یعنی تراکم پذیری عمودی، تراکم پذیری آب و تخلخل. اندازه گیری T.E. یا B.E. و با فرض معلوم بودن n و  $\beta_w$  به این معنی است که  $\beta_v$  و بنابراین، Ss را می‌توان از معادله 8 یا 9 به دست آورد و نسبت سهم تراکم پذیری آب،  $n\beta_w$ ، به تراکم پذیری آبخوان،  $\beta_v$ ، را می‌توان محاسبه کرد.

جاکوب (1941) از بازده جزر و مدی برای محاسبه غیرمستقیم ضریب ذخیره استفاده کرد زیرا آسانتر از راندمان فشارسنجی تعیین می‌شد. او سهم نسبی کشش آبخوان و تراکم پذیری آب از پاسخ های جزر و مدی (به عنوان مثال، شکل 6) را با آزمایش‌های پمپاژ در اعماق بین 715 تا 800 فوت در شن‌های لوید در لانگ آیلند ایالات متحده مقایسه کرد. نسبت تراکم پذیری آبخوان به تراکم پذیری آب به دست آمده از راندمان جزر و مدی 1.7 بود در حالی که از آنالیز آزمایش پمپاژ 2.8 بود.

## 5 معادله انتشار

مطالعه انتشار گرما تاریخچه طولانی و طولانی در فیزیک ریاضی دارد که با فوریه در سال 1822 آغاز شد. البته سرعت انتقال گرما از طریق یک ماده به هدایت حرارتی و همچنین ذخیره سازی بستگی دارد، زیرا سرعت تغییر دما در یک REV بستگی به این دارد که چه مقدار گرما باید منتقل شود تا دمای آن تغییر کند. برای همان رسانایی حرارتی، انتشار گرما برای ظرفیت گرمایی بالا کندتر از ظرفیت گرمایی کم است. بنابراین، ظرفیت گرمایی چیزی شبیه فویل به هدایت حرارتی است. این نقش معکوس ذخیره به رسانایی در تعیین سرعت انتشار با گرفتن نسبت آن‌ها به دست می‌آید. در انتقال حرارت به آن انتشار حرارتی می‌گویند،  $\kappa = K/(\rho c)$ ، که در آن  $K$  هدایت حرارتی،  $\rho$  چگالی،  $c$  ظرفیت گرمایی ویژه، و  $\rho c$  گرمای ویژه در واحد حجم است. آنالوگ آب زیرزمینی برای جریان دو بعدی و افقی  $\kappa = T/S$  است و  $\kappa = K/S_s =$  برای جریان خطی یک بعدی. انتشاردهنده‌ها دارای واحدهای  $m^2/s$  هستند. تعاریف نفوذ هیدرولیکی و حرارتی در جدول 3 نشان داده شده است که ادامه جدول 1 است. این معادله در مقاله او در سال 1935 معادله انتشار را شامل نمی‌شود، احتمالاً به این دلیل که در فیزیک ریاضی بسیار شناخته شده بود و بنابراین در جدول 3 گنجانده شده است. با این حال، تیس این استنتاج لوپین از رامحل حرارتی مشابه چاه پمپاژ را ارائه کرد. استنتاج با رامحل برای "منبع خط آبی منطبق با محور  $z$  قدرت  $Q^9$ " شروع شد (جدول 3). راه حل مشابه برای هد،  $h$ ، یکسان است اگر  $Q$  به ازای واحد طول به یک چاه اضافه شود، تفسیر می‌گردد.

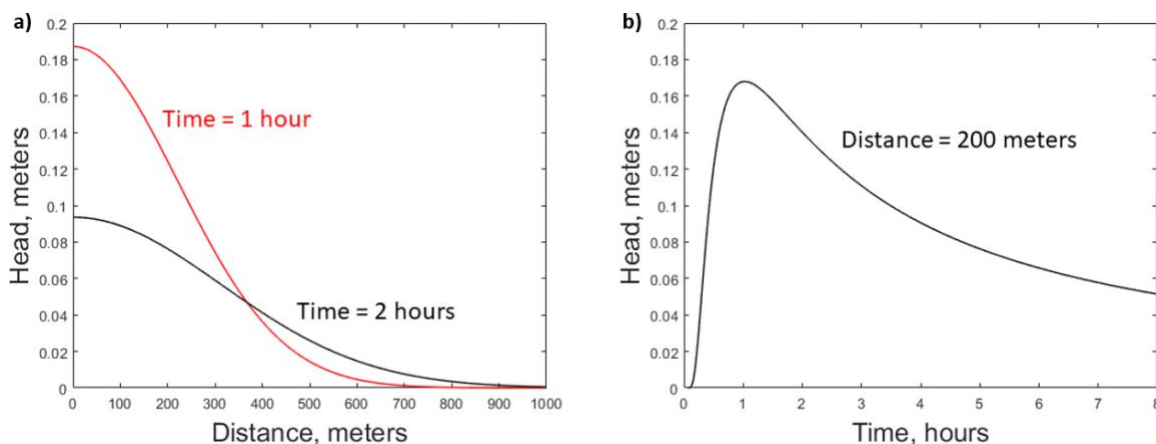
جدول 3 معادله انتشار و رامحل تیس برای جریان آب زیرزمینی و جریان گرما.

جریان گرما	جریان آب زیرزمینی
انتشار حرارتی $K/(\rho c)$ [ $m^2/s$ ]	$K/S_s$ [ $m^2/s$ ] نفوذ هیدرولیک
$\kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$	معادله حاکم برای جریان دو وجهی $\kappa \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}$
$T = \frac{Q}{4\pi K t} e^{-(x^2+y^2)/4\kappa t}$	رامحل منبع خط $h = \frac{Q}{4\pi S t} e^{-(x^2+y^2)/4\kappa t}$
$Q$ مقدار گرمایی است که به ازای واحد طول در یک خط در مبدا به صفحه اضافه می‌شود	$Q$ حجم آب در واحد طول در یک خط در مبدا به آبخوان اضافه می‌شود
	زمان تقریبی انتشار برحسب $x$ $t = x^2/(2K)$

مطابقت یک به یک بین ستون‌های جداول 1 و 3، قیاس فیزیکی و ریاضی است که تیس مورد استفاده قرار گرفته است. دما و هد هر دو توسط معادله انتشار کنترل می‌شوند. در جریان شعاعی دو بعدی، قابلیت انتقال بالا به این معنی است که سیال به سرعت در فضا منتقل می‌شود. از سوی دیگر، ذخیره‌سازی بالا

<sup>9</sup> "Q" در جدول 3 با تیس متفاوت است، زیرا تعریف "Q" او شامل تقسیم بر گرمای ویژه در واحد حجم به جای ترکیب صریح آن همانطور که در اینجا انجام می‌شود، می‌گردد. همچنین، تیس، به پیروی از کارسلو، از "v" به جای "T" برای دما استفاده کرد.

حرکت را به تأخیر می‌اندازد، زیرا مایع بیشتری باید به داخل یا خارج از مخزن منتقل شود تا تغییر هد مشخص گردد. در نهایت، اگر یک سیستم آبخوان ذخیره صفر داشته باشد، هر گونه تغییر شرایط مرزی داخلی یا خارجی در جریان یا فشار به سرعت با یک حالت پایدار جدید سازگار خواهد شد. نفوذ هیدرولیک تعیین می‌کند که چگونه یک اختلال، مانند تزریق ناگهانی یک اسلاگ به چاه یا شروع پمپاژ یک چاه یا تغییر شرایط مرزی، در یک آبخوان با چه سرعتی منتشر شود. ماهیت انتشار این است که یک لبه اولیه در هد گسترش و دامنه آن کاهش می‌یابد. انتشار "شیب را صاف می‌کند" به طوری که رویکرد سیستم به حالت پایدار درمی‌آید (شکل a10). در همین حال، در هر نقطه دور از منبع، اختلال با گذشت زمان افزایش می‌یابد، به اوج می‌رسد و سپس تحلیل می‌رود (شکل b10). زمان رسیدن قله در  $t = x^2/(2K)$  در مورد جریان خطی یک بعدی رخ می‌دهد. این مقدار  $t$  زمان مشخصی است برای مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک تغییر ناگهانی در مبدا فروپاشی و تا فاصله  $x$  گسترش یابد. در مثال شکل b10، حدود یک ساعت طول می‌کشد تا قله به فاصله 200 متری برای انتشار 6.8 متر مربع بر ثانیه برسد.



شکل 10 راه حل برای یک اسلاگ آبی تزریق شده به چاه آبخوان با نفوذ هیدرولیکی  $6.8 \text{ m}^2/\text{s}$ . الف) نمایه‌هایی در زمان‌های مختلف که نشان می‌دهند چگونه نفوذ هیدرولیکی شیب را صاف می‌کند. ب) تاریخچه زمانی که نشان دهنده تأخیر تقریباً یک ساعته برای رسیدن قله به فاصله 200 متری است.



## 6 خلاصه

شناخت ذخیره‌سازی آبخوان و مبنای فیزیکی آن برای حل دو مشکل در درک منشاء و حرکت آب‌های زیرزمینی کلیدی بود. Meinzer (1928) نشان داد که تراکم پذیری آبخوان و کاهش حجم منافذ ناشی از کاهش فشار منفذی حدود 80 درصد از آب مصرف شده توسط آبیاری در داکوتای جنوبی را در یک دوره 40 ساله در حدود قرن بیستم تشکیل می‌دهد. تیس (1935) از خاصیت ذخیره‌سازی بر اساس قیاس با انتقال گرما استفاده کرد تا مشکل تغییر وابسته به زمان در هد ناشی از پمپاژ چاه را حل کند. جاکوب (1940) معادله جریان آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن صریح پایه فیزیکی ذخیره‌سازی از نظر تراکم پذیری آبخوان و آب، از ابتدا استخراج کرد. این روایت در سه مرحله، درک جریان آب زیرزمینی را از حالت ماندگار به غیرماندگار، «غیر تعادلی» تغییر داد.

## 7 تمرین

### تمرین 1

Singha (2008) یک تمرین یادگیری فعال را برای معرفی مفهوم استخراج آب‌های زیرزمینی از آبخوان-های محدود ارائه می‌دهد. این تمرین از یک ظرف آب میوه به عنوان یک آنالوگ ساده برای یک فضای منفذدار محصور استفاده می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه کاهش فشار سیال ناشی از پمپاژ باعث افزایش تنش مؤثر با فرض تنش کل ثابت می‌شود. به طور خلاصه، یک کیسه آب میوه برای نشان دادن منافذ در یک آبخوان محدود استفاده می‌شود. از آزمایشگر خواسته می‌شود تا نیروی رو به پایین را در بالای ظرف آبمیوه اعمال کند تا وزن مواد سرباره را نشان دهد و این نیروی ثابت را در حین ادامه‌ی آزمایش حفظ کند. این نیرو نشان دهنده‌ی تنش کل است. آزمایشگر به این فکر می‌کند: (1) چرا ظرف در پاسخ به نیرو فرو نمی‌ریزد. و (2) اتفاقی که با نی می‌افتد در ظرف قرار می‌گیرد. سپس آزمایشگر یک نی (معادل حفاری آبخوان محصور) وارد می‌کند. سپس، در حالی که نیرو را حفظ می‌کنند، با نوشیدن آب از نی، آبخوان را پمپاژ می‌کنند. آزمایشگر متوجه می‌شود که حجم ظرف آب میوه کاهش می‌یابد و از او خواسته می‌شود آنچه را که در "آبخوان" اتفاق می‌افتد در نظر بگیرد. آزمایشگر خواهد دید که ظرف قبل از پمپاژ وقتی نیروی سرباره اعمال می‌شود فرو نمی‌ریزد زیرا تنش مؤثر آبخوان (ظرف)، و فشار سیال در منافذ (آب میوه) بر وزن سرباره فشار وارد می‌کند (دستش). بسته به بزرگی نیروی سرباره و طول نی، ممکن است زمانی که نی وارد می‌شود، آب آن بیرون بیاید که مشابه یک چاه آرتزینی جاری است. اگر نیرو به این اندازه نباشد، آب میوه در نی بالای ظرف بالا می‌آید، اما از نی خارج نمی‌شود. Singha (2008) جزئیات بیشتری را ارائه می‌دهد.

## تمرین 2

هدف از این آزمایش اندازه‌گیری  $S_s$  یک بالون است که خاصیت ارتجاعی آبخوان را شبیه‌سازی می‌کند. این آزمایش برای ارائه معنای مشاهده‌ای به متغیر، افزایش محتوای سیال و تأثیر وضعیت تنش بر ذخیره ویژه طراحی شده است.

به طور خلاصه، یک بالون بر روی انتهای یک بورت که به یک چوب متری بسته شده و به پایه حلقه بلند متصل شده است کشیده می‌شود. بالون و بورت با حجم مشخصی از آب تا ارتفاع دلخواه روی میله متر پر می‌شوند به طوری که می‌توان حجم بالون را تعیین کرد. سپس حجم اندازه‌گیری شده آب اضافه می‌شود و با فرض کمبود تراکم پذیری آب و بورت، حجم آب باید به داخل بالون یا بورت برود. حجم ورودی به بالون را می‌توان با دانستن حجم وارد شده به داخل بورت که از سطح آب در بورت تعیین می‌شود، تعیین کرد. سپس خواص ذخیره سازی سه بعدی بالون با افزودن آب و توجه به تغییر سر در بورت تعیین می‌شود. این را می‌توان چندین بار تکرار کرد تا مشخص شود مقدار ذخیره ثابت است یا خیر. آب را می‌توان حذف کرد و فرآیند را تکرار کرد تا مشخص شود که آیا بالون الاستیک است یا خیر. در نهایت، آزمایش را می‌توان با بالون که به صورت جانبی در یک لوله پلکسی گلاس محبوس شده است، تکرار کرد تا ذخیره ویژه یک بعدی ( $S_s$ ) بالون را به دست آورد که می‌تواند با اندازه‌گیری در مورد انبساط سه بعدی بالون مقایسه شود.

جزئیات تمرین (از جمله نمودارها) و همچنین اطلاعاتی در مورد استفاده از تمرین برای آموزش مفهوم، در مرکز منابع آموزش علوم در وب سایت کالج کارلتون موجود است. فایل پی دی اف تمرین آزمایشگاهی با عنوان "کشسانی آبخوان و ذخیره ویژه" در اینجا موجود است. نظریه اساسی در این کتاب و همچنین در یک فصل کتاب درسی توسط هربرت اف. وانگ که در همان وب سایت موجود است (فصل کتاب درسی) مورد بحث قرار گرفته است.

## 8 مراجع

- Anderson, M.P., 2007, Introducing groundwater physics. *Physics Today*, volume 60, issue 5, pages 42-47, <https://doi.org/10.1063/1.2743123>.
- Atkinson, J., 2000, Based on part of the GeotechniCAL reference package by Professor John Atkinson, <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/stresses/stresses.htm#EFFECTIVE>.
- Banks, D., 2015, Horatio Scott Carslaw and the origins of the well function and line source heat function. *Scottish Journal of Geology*, volume 51, issue 1, pages 100-104, <http://dx.doi.org/10.1144/sjg2014-021>.
- Biot, M.A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, volume 12, pages 155-164, <https://doi.org/10.1063/1.1712886>.
- Bredehoeft, J.D., C.E. Neuzil, and P.C.D. Milly, 1983, Regional Flow in the Dakota Aquifer: A Study of the Role of Confining Layers. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2237, 45 pages, <https://pubs.usgs.gov/wsp/2237/report.pdf>.
- Carslaw, H.S., 1921, Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids, second edition. Macmillan and Company, London, United Kingdom, 152 pages, [https://books.google.com/books/about/Introduction\\_to\\_the\\_Mathematical\\_Theory.html?id=yco-AAAAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com/books/about/Introduction_to_the_Mathematical_Theory.html?id=yco-AAAAIAAJ&redir_esc=y).
- Carslaw, H.S., and J.C. Jaeger, 1959, Conduction of Heat in Solids, second edition. Clarendon Press, Oxford, United Kingdom.
- Chamberlin, T.C., 1885, The requisite and qualifying conditions of artesian wells. United States Geological Survey Annual Report, number 5, pages 125-173.
- Darton, N.H., 1896, Preliminary report on artesian waters of a portion of the Dakotas. United States Geological Survey Annual Report, number 17, part 2, pages 609-691, [https://books.google.com/books/about/Preliminary\\_Report\\_on\\_Artesian\\_Waters\\_of.html?id=WjgAzOEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com/books/about/Preliminary_Report_on_Artesian_Waters_of.html?id=WjgAzOEACAAJ&redir_esc=y).
- Darton, N.H., 1900, United States Geological Survey Field photo of Woonsocket Well.
- Darton, N.H., 1901, Geology and water resources of the southern half of the Black Hills and adjoining regions in South Dakota and Wyoming. United States Geological Survey Annual Report, number 21, part 4, pages 489-599, <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/621007>.
- Darton, N.H., 1909, Geology and Underground Waters of South Dakota. United States Geological Survey Water-Supply Paper 227, 156 pages, <https://pubs.usgs.gov/wsp/0227/report.pdf>.

- Fabry, M., 2016, Now You Know: Why Are There Two Dakotas? Time Magazine, United States, <https://time.com/4377423/dakota-north-south-history-two/>.
- Freeze, R.A., 1985, Historical correspondence between C.V. Theis and C.I. Lubin, *Eos*, volume 66, number 20, May 14, 1985, page 442.
- Heath, R.H., 1983, Basic Ground-Water Hydrology. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86 pages, <https://pubs.usgs.gov/wsp/2220/report.pdf>.
- Jacob, C.E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Transactions of the American Geophysical Union, volume 21, number 2, pages 574-588, <https://doi.org/10.1029/TR021i002p00574>.
- Jacob, C.E., 1941, Notes on the elasticity of the Lloyd sand on Long Island, New York. *in* Transactions of the American Geophysical Union, volume 22, number 3, pages 783-787.
- King, F.H., 1892, Observations and experiments on the fluctuations in the level and rate of movement of ground-water on the Wisconsin agricultural experiment station farm and at Whitewater, Wisconsin. Bulletin of the United States Weather Bureau, volume 5, Washington, D.C. <https://books.google.com/books?id=VuifAAAAMAAJ>.
- King, P.B., 1949, Memorial to Nelson Horatio Darton: Proceedings of the Geological Society of America. Annual Report for 1948, pages 145-170.
- Meinzer, O.E. and H.A. Hard, 1925, The Artesian Water Supply of the Dakota Sandstone in North Dakota, with Special Reference to the Edgeley Quadrangle, *in* Contributions to the Hydrology of the United States 1923-1924. United States Geological Survey Water-Supply Paper 520, Washington, District of Columbia, United States, pages 73-95, <https://doi.org/10.3133/wsp520E>.
- Meinzer, O.E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Economic Geology*, volume 23, number 3, pages 263-291.
- Muskat, M., 1937, The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. McGraw-Hill, New York, United States, 763 pages.
- Palciauskas, V.V. and P.A. Domenico, 1989, Fluid pressures in deforming porous rocks. *Water Resources Research*, volume 25, issue 2, pages 203-213, <https://doi.org/10.1029/WR025i002p00203>.
- Pratt, W.E. and D.W. Johnson, 1926, Local subsidence of the Goose Creek Oil Field. *Journal of Geology*, volume 34, pages 577-590.
- Ross, J. F., 2018, The Visionary John Wesley Powell Had a Plan for Developing the West, But Nobody Listened. Smithsonian Institution, <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/visionary-john-wesley-powell-had-plan-developing-west-nobody-listened-180969182/>.
- Schureman, P., 1926, Tides in wells. *Geographical Review*, volume 16, number 3, pages 479-483.

- Singha, K., 2008, An active learning exercise for introducing ground-water extraction from confined aquifers, *Journal of Geoscience Education*, volume 56, number 2, pages 131-135, <https://people.mines.edu/ksingha/wp-content/uploads/sites/44/2018/12/singha2008.pdf>.
- Stegner, W., 1954, *Beyond the Hundredth Meridian: John Wesley Powell and the Second Opening of the West*. Houghton Mifflin, 438 pages.
- Terzaghi, C., 1925, Principles of soil mechanics: VI – Elastic behavior of sand and clay. *Engineering News Record*, volume 95, pages 987-990 (reprinted in *History of Progress, 2003: Selected Papers in Geotechnical Engineering*, edited by W. Allen Marr American Society of Civil Engineers, pages 26-29), [https://www.google.com/books/edition/\\_vGCqACNvq7UC?gbpv=1](https://www.google.com/books/edition/_vGCqACNvq7UC?gbpv=1).
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysical Union Transactions*, volume 16, pages 519-524, <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>.
- Thompson, D.G., 1926, Ground-water problems on the barrier beaches of New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, volume 37, pages 463-474, <https://doi.org/10.1130/GSAB-37-463>.
- Titus, F.B., 1973, Memorial to Charles Edward Jacob; 1914-1970. *Geological Society of America*, volume 2, pages 76-78.
- Wang H.F., 1987, Charles Sumner Slichter: An engineer in mathematician's clothing, in *History of Hydrology*, volume 3, E.R. Landa and S. Ince, editors, pages 103-112.
- Wang, H.F., 2000, *An Introduction to the Linear Theory of Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*. Princeton University Press, 287 pages.
- Wang, H. F. and M.P. Anderson, 1982, *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. Academic Press, Appendix D3, 222 pages.
- Woessner, W.W. and E.P. Poeter, 2020, *Hydrologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 207 pages, <https://www.gw-project.org/books/27/hydrologic-properties-of-earth-materials-and-aquifers-and-principles-of-groundwater-flow>.

## 9 درباره نویسنده



دکتر هربرت وانگ پروفیسور ممتاز علوم زمین در دانشگاه ویسکانسین مدیسون است، که در سال 1972 به این دانشکده پیوست. تحقیقات اخیر او در زمینه سیستم‌های پیشرفته زمین گرمایی (EGS) بوده است. تحقیق دیگر او در مورد حسگر توزیع اکوستیک (DAS) که در آن کابل فیبر نوری حسگر امواج لرزه‌ای می‌باشد. تدریس دکتر وانگ شامل هیدروژئولوژی، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، تکتونوفیزیک، مکانیک سنگ و عدالت محیطی است. او استاد مشاور 15 دانشجوی دکتری بوده است. و کتابهایی در مورد مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و منافذ الاستیسیته (به مراجع بالا مراجعه کنید) و تقریباً 100 مقاله تحقیقاتی به چاپ رسانده است. او در سال 2003 جایزه تدریس ممتاز را از فصل فی بتا کاپا آلفای ویسکانسین و جایزه هیئت علمی ممتاز سال 2004 را از هیئت بازدیدکنندگان بخش علوم زمین دریافت کرد.

## 10 درباره مترجم



دکتر مهسا جباری، فارغ التحصیل رشته مهندسی منابع آب از دانشگاه تهران، ایران است. او در آزمون ورودی مقطع دکتری در سال 2017 موفق به کسب رتبه 2 شد. رساله دکتری او در زمینه‌ی بررسی عدم-قطعیت در مدل‌سازی آب زیرزمینی ست. دکتر جباری سابقه‌ی تدریس در دیپارتمان‌های مهندسی آب، مهندسی محیط زیست از دانشگاه تهران و نیز دیپارتمان مهندسی عمران از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان را دارد. تدریس دکتر جباری در زمینه‌ی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، هیدرولیک کانال‌های روباز است.



لطفاً ثبت نام در لیست پستی پروژه GW را در نظر بگیرید و از انتشار کتاب های جدید، رویدادها و راه های شرکت در پروژه GW مطلع شوید. هنگامی که در لیست ایمیل ما ثبت نام می کنید، به ما کمک می کند تا یک جامعه جهانی آب های زیرزمینی بسازیم. [Sign up](#) ↗.

