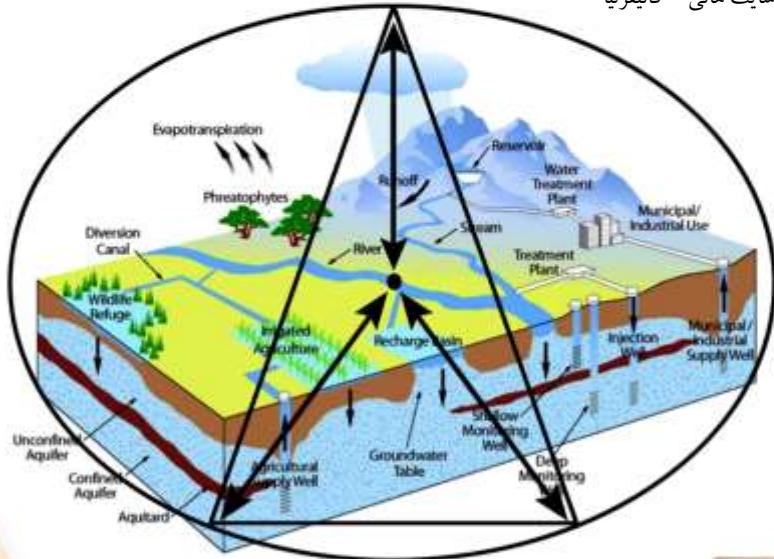


# مدلسازی آب و محیط زیست

## تراکم سیستم آبخانه و نشست زمین (اندازه گیری، آنالیز و شبیه سازی)

مطالعه موردی

استان البرز و سایت هالی - کالیفرنیا



مؤلفان:

**دکتر فرهاد دلیری** مشاور سدسازی و هیدرولوژیست  
مدرس دوره های تخصصی پردیس فنی مهندسی  
آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی



**دکتر حسن سید سراجی** مشاور سدسازی و مکتیک سبالات

عضو هیئت علمی پردیس فنی مهندسی  
آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی



چاپ اول ۱۴۰۰

www.absam.ir

# به نام خدا

*Knowledge is empty of limit,  
so we have not enough time to learn every thing if you want to deep it in the real world.  
Farhad Daliri, 2015*



**شرکت مهندسين آبسام**  
(طرح و ساخت)

**مدلسازی آب و محیط زیست**  
(تراکم سیستم آبخانه و نشست زمین)

**تالیف:**

**دکتر فرهاد دلیری مشاور سدسازی و هیدرولوژیست**

مدرس دوره‌های تخصصی دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

و

**دکتر حسن سید سراجی مشاور سدسازی و مکانیک سیالات**

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

چاپ اول ۱۴۰۰

سرشناسه	: دلیری، فرهاد. متولد تهران -/1354
عنوان و نام پدید آور	: مدلسازی آب و محیط زیست (تراکم سیستم آبخانه و نشست زمین) /تالیف فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی
مشخصات نشر	: تهران: شرکت مهندسين آبسام، ۱۴۰۰ چاپ اول.
مشخصات ظاهري	: ۱۰۳ ص: مصور، جدول، نمودار چاپ اول.
شابک	: ۹۷۸-۶۰-۶۹۲۳-۲۱-۵
وضعیت فهرست	: فیا
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: اندازه گیری -- فرونشست زمین - سطح سفره
موضوع	: آنالیز -- تحلیل سیستم - هیدرودینامیک
موضوع	: شبیه سازی -- مدلسازی سیستم - رفتار سیستم
شناسه افزوده	: شرکت مهندسين آبسام (طرح و ساخت)
رده بندی کنگره	: ۱۴۵TC۱۳۹۳ ۵/۴م
رده بندی دیویی	: ۶۲۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۶۳۴۴۸۵

"کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مهندسين آبسام می باشد"



**مدلسازی آب و محیط زیست (تراکم سیستم آبخانه و نشست زمین)**

تالیف: فرهاد دلیری / حسن سیدسراجی

ویراستار و صفحه‌بند: ناشر

نوبت چاپ: چاپ نخست ۱۴۰۰.

ناشر: چاپ حسینی، کرج روبروی دانشگاه تهران

شمارگان: ۵۰۰ جلد

شابک: 5 - 21 - 6923 - 600 - 978

سفارش: [www.absam.ir](http://www.absam.ir)

بهاء بارگذاری در سایت آبسام

## شرح حال مولفان

"این کتاب به کسانی تقدیم می‌شود که هدف آنها مدیریت آب و زمین است"

فرهاد دلیری متولد تهران

تخصص: دکتری مهندسی هیدرولوژی

تجارب و تحقیقات از ۱۳۸۰: سدسازی، کنترل سیل، آب زیرزمینی، تخلیه رسوب سد، آبخیزداری، نشست زمین، خشکسالی، رواناب شهری.

سوابق تحصیلی (دانشگاه تهران)

Ph.D. (2016) دکتری مهندسی عمران-آب: مدلسازی پیش بینی اثر هیدرولیکی سیل آلوده سد روی آب زیرزمینی، فرصت مطالعاتی استرالیا.

MSc (۱۳۸۵) ارشد برنامه ریزی مخازن سدها، "منحنی فرمان آبسطحی و آب زیرزمینی جهت طراحی ارتفاع سد خاکی علویان با برنامه نویسی"

BSc (۱۳۸۰) لیسانس هیدرولوژی، "محاسبات سیل با روش شماره منحنی دلیری، اندازه گیری جریان نهر آبریز مرتعی با ردیابی و اشل Rod"

سوابق تدریس دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی عمران آب و محیط زیست عباسپور، دوره های آموزش تخصصی آب منطقه ای های کشور از ۱۳۹۰

- مدیریت و مدلسازی آب زیرزمینی، بهره برداری چاه شرب و آزمایش پمپاژ

- پیش بینی و کنترل سیل، رواناب شهری، آنالیز و تحلیل آمار، مدیریت رسوب سد، ریزگرده و فرسایش خاک حوضه، نصب و بهره برداری ادوات آب

- بحران آب، خشکسالی و برنامه ریزی کمی - کیفی پیوسته منابع آب - منابع طبیعی، آبخیزداری و ارزیابی زیست محیطی، رادار

- هیدرولوژی، هیدرولیک و هیدروژئولوژی - آموزشکده محیط زیست، دانشگاه علمی کاربردی کرج ۱۳۸۶

تالیفات (کتاب و مقالات) به جز متن حاضر سه کتاب دیگر به فارسی و دو کتاب به زبان انگلیسی داللود رایگان از سایت [www.absam.ir](http://www.absam.ir) با عناوین:

1. F.Daliri. "Uncertainties in Flood Forecasting Systems Modeling", 2020, Absam EPC Co. press. 250p, Rivis 1.

2. F.Daliri. "Principle of Damming", Absam EPC Co. press. 2020, 55p, Edit 1.

۳. فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (کنترل سیل، تامین آب، مدیریت آب زیرزمینی)، شهری و روستایی - محاسبات عددی، دانشگاه شهید عباسپور چاپ دوم ۱۳۹۸.

۴. فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی. "هیدرولوژی شهری (رواناب رگبار - سازه هیدرولیکی، مدیریت رواناب آلوده)، حمایت شرکت مهندسین آبسام ([www.absam.ir](http://www.absam.ir))، ۱۴۰۱ چاپ اول.

۵. فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (تخلیه رسوب سد)، حمایت شرکت مهندسین آبسام ([www.absam.ir](http://www.absam.ir))، ۱۴۰۱ چاپ اول.

- چندین مقاله ISI با نوآوری (روش تصمیم گیری نیمه فازی دلیری DSM، روش ابداعی CN سیل، روش استوکستیک رواناب IUDRN در طراحی سدها و خشکسالی، توسعه روش شناسی

مفهوم بیلان سفره و برداشت مجاز، توسعه روش شناسی برآورد زمان تمرکز و کاربرد مهندسی زمان ذخیره در کنترل سیل، تعریف سیستمی آبخیزداری و برنامه نویسی مدیریت یکپارچه حوضه

JWRM، توسعه مفاهیم برآورد سیل، توسعه مفاهیم واستنجهی مولفه های بیلان، بررسی تیپ رگبار در سیل و اصلاح تجربی اثر ذوب برف در مدل HEC-HMS، عدم قطعی پیش بینی سیل و ...

- بیش از ۶۰ گزارش فنی در مشاوران معتبر مانند مهتاب قدس (کمیته فنی اسبق)، سکو و ...

### خلاصه بیوگرافی کاری

ایشان از سال ۱۳۸۰ به عنوان هیدرولوژیست شرکت های مشاور آغاز به کار کرده و از سال ۱۳۸۹ همزمان در دفتر ارتباط با صنعت واحد سنجش آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف به عنوان

مدیر گروه آب، مشاور و داور مهندسین مشاور، دانشگاه و سازمانها در تهیه دستورالعمل، با بررسی گزارش، مدیر بخش و مدیر پروژه مهندسی رودخانه شرکت های مشاور، کمیته راهبری

شکست سدها و تامین آب زیرزمینی برخی از آب منطقه ای های کشور ... مشغول بوده و از سال ۱۳۹۳ به عنوان ناظر فنی و عضو کمیته آبیگری و رسوب در تیم نظارت عالی پروژه اجرایی

سد (ECRD) و نیروگاه رودبار لرستان شرکت سکو و از سال ۱۳۹۶ به عنوان مدیرعامل و رئیس هیئت مدیره شرکت مشاور و پیمانکار مهندسین آبسام (طرح و ساخت) مشغول هستند.

حسن سید سراجی متولد تبریز

تخصص: دکتری مهندسی مکانیک سیالات

تجارب و تحقیقات از 1366: هیدرولیک، مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، ارزیابی زیست محیطی، رودخانه

### بیوگرافی

○ کمیته فنی بخش آب- انرژی و محیط زیست شرکت مشاور و پیمانکار مهندسین آبسام (EPC) از سال ۱۳۹۶

○ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی از ۱۳۶۸ و تدریس در سایر دانشگاه های دولتی و آزاد از ۱۳۷۰ تا زمان حاضر

○ کارشناس سدسازی در سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی و سازمان برنامه و بودجه بین سال های ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۸

○ ارائه خدمات مشاوره ای در شرکت های مهندسی مشاور از ۱۳۶۶ تا حال

○ مشاور طرح های تخصصی و مطالعاتی رسته منابع آب و وزارت نیرو، همایش های تخصصی و عضو هیأت تحریریه مجله سامانه منابع آب ایران از سال ۱۳۹۲

### سوابق تحصیلی

Ph.D دکتری مهندسی مکانیک سیالات از دانشگاه کان فرانسه. رفتارهای هیدرودینامیکی عملیات رسوب زدائی سدها.

MSc زمین شناسی مهندسی از دانشگاه پاریس 7. بررسی پایداری خاک های آلی کناره های دریا خزر.

BSc مهندسی آبیاری و آبادانی از دانشگاه تبریز.

صفحه	بخش اول: اندازه گیری	تعاریف
۸		۱. خلاصه
۹		۲. مقدمه
۹		۲-۱ افت و خیز تشکیلات و سطح آب
۹		۲-۲ انتخاب مدل
۱۰		۲-۲-۱ سیستم شماره گذاری چاه ها
۱۰		۲-۳ نتایج مدلسازی دشت آنتلپ کالیفرنیا
۱۱		۲-۴ دلایل عمده فرونشست زمین
۱۲		۲-۵ اندازه گیری ۷ ساله دشت
۱۳		۲-۶ توسعه آبهای زیرزمینی و فرونشست زمین
۱۴		۳. مطالعه پایه تراکم آبخانه
۱۴		۳-۱ ژئولوژی، هیدروژئولوژی و ژئوفیزیک
۱۶		۳-۲ مدل مفهومی سیستم آبخانه
۱۹		۳-۲-۱ تراز سفره
۲۳		۳-۲-۲ تراکم سیستم آبخانه
	<b>بخش دوم: آنالیز</b>	
۲۷		۴. روش های تحلیلی
۶۳		۴-۱ تنش موثر
۶۶		۴-۲ ذخیره ویژه (حد الاستیک و پلاستیک)
۶۶		۴-۳ ضرائب ذخیره آبخانه
۶۷		۴-۴ تئوری تحکیم هیدرودینامیک
۶۸		۵. برآورد دامنه پارامترها
۶۸		۵-۱ هدایت هیدرولیکی عمودی
۶۹		۵-۲ تنش موثر مجاز
۷۰		۵-۳ ذخیره ویژه
	<b>بخش سوم: شبیه سازی</b>	
۷۴		۶. مدل عددی سایت هالی
۷۶		۶-۱ گسسته سازی زمان - مکان
۷۶		۶-۲ شرایط مرزی
۷۸		۶-۳ شرایط اولیه
۷۸		۶-۴ معیارهای همگرایی و بیلان جرمی
۷۹		۶-۵ فرضیات و محدودیت ها
۸۰		۶-۶ اجرای مدل و واسنجی
۸۳		۶-۷ آنالیز حساسیت و صحت سنجی
۸۵		۷. شبیه سازی نشست زمین و سناریو سازی ها
۸۸		۸. ملاحظات فنی (تعیین ضرائب آبخان - بیلان - کنترل فرونشست)
۱۰۰		منابع / پیوست (استانداردسازی متن)

## تعاریف

آبخوان یا آبخانه؟!

خوان در ادبیات فارسی به معنی سفره معادل TABLE می باشد و خان یا خانه به معنی مخزن یا انبار (AQUIFER). لذا اگر منظور از آبخوانه سطح سفره زیرزمینی بود کلمه آبخوان درست می بود که اینطور نیست. در اینجا آبخان یا آبخانه به معنی کل مجموعه تشکیلات و سفره بوده که معادل AQUIFER می باشد. لذا در فارسی معادل آن آبخان یا آبخانه درست است.

آبریز یا آبخیز؟!

حوزه در واقع معادل مرز یا BOUNDARY بوده و حوضه معادل لگن یا حوضچه یا BASIN می باشد. اما آبریز و آبخیز هیچ تفاوتی نداشته و هر دو معادل WATERSHED یا CATCHMENT هستند که اولی بیشتر در متون امریکایی و دومی در متون هندی و انگلیسی برای وسعت های کوچک تا بزرگ می آیند. البته ممکن است در برخی موارد حوزه آبریز معادل RIVER BASIN برای مساحت های بزرگ به کار گرفته شود اما اساساً" فرقی ندارند.

لذا به طور کلی کلمه حوضه آبریز یا حوضه آبخیز به دلیل قرار گرفتن دو کلنه هم معنی غلط هستند ولی حوزه آبریز و یا حوزه آبخیز هر دو درست و یک معنی دارند. مثال های زیر بیشتر موضوع را تشریح می کند:

- حوزه آبریز اترک (درست)
- حوضه آبریز اترک (غلط)
- حوضه اترک (درست)
- حوزه اترک (اگر منظور مرز حوضه باشد درست و اگر منظور کل مرز و سطح باشد غلط)
- حوزه آبخیز اترک (درست)
- آبخیز اترک (درست)

به طور کلی نشست زمین (LAND SUBSIDENCE) ممکن است ناگهانی یا بطئی باشد. همچنین نشست ممکن است در حد چاله ای با قطر چند متر که اغلب از نوع ناگهانی یا چند صد کیلومتر از نوع بطئی باشد. نشست های کوچک و سریع را نمی توان اغلب به برداشت سفره ها ارتباط داد. این نوع نشست ها مربوط به فرسایش انحلالی سازندهای آهکی در مناطق مرطوب بوده که نیاز به شرایط خاص شیب و فیزیوگرافی دارند. کنترل این نوع نشست ها و بررسی آنها در حیطه فرسایش آبی و علوم آبخیزداری می باشد. اگرچه این نوع نشست ها در مناطق شهری اساساً می تواند به دلیل حفاری ها غلط یا عملیات عمرانی یا عبور خطوط مترو، گاز و سایر خطوط لوله های شهری یا قنوات قدیمی نیز باشد و لذا ارتباطی با فرسایش آبی مذکور ندارد. با این وجود این نوع فرونشست می تواند در انواع کوچک و نوع فرسایش آبی اثر تشدید کننده گذاشته و در مناطق سنگی باعث توسعه سرعت ایجاد درز و شکاف و شکستگی ها گردد. همچنین در سطوح ساخت دست بشر مانند مسیر باند فرودگاه ها و جاده ها این مسئله معطل بوده و هر ساله خساراتی به لوله های انتقال یا کف کانال ها وارد می شود.

در این متن منظور نشست های بطئی در سطح وسیع ناشی از برداشت آب از سفره ها و افت سطح ایستابی و پیرومتری آبخانه های آزاد و تحت فشار می باشد. عمده روش های کنترل این نوع نشست ها می تواند بر اساس روش های مدیریت برداشت سفره، آبخیزداری و آبخانداری، پخش سیل، تغذیه مصنوعی یا تامین کمبودها از سایر منابع آب معطوف شود. علاوه بر این تغییر الگوی کشت، واردات نیازها از سایر استان یا کشورها، اصلاح ژنتیک بذر، حذف گیاهان پر مصرف و .. ممکن است به عنوان روش های غیر مستقیم مدیریت فرونشست زمین باشد.

بر اساس اندازه گیری در دشت های کالیفرنیا برای هر متر افت نامناسب سفره ۲,۲ سانتی متر فرونشست ثبت شده است (۲). این رقم در دشت البرز توسط دلیری (۱۳۹۵) طی گزارش فنی برای آب منطقه ای البرز بر اساس آنالیز رادار روش تداخل نگار D-INSAR و تحلیل و مقایسه با اطلاعات اندازه گیری شبکه ثبت نشست زمین (سازمان نقشه برداری کشور) بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که نشست سالانه در نقاط مختلف این استان از ارقام کمتر و بیشتر از رقم مذکور در نوسان بودند. لازم به توضیح است نرخ و شدت نشست زمین در اثر افت سفره به صورت عمودی متفاوت بوده و با توجه به جنس سازند و تشکیلات فرق می کند. برای ۷ سال در کالیفرنیا در عمق های مختلف طی تحقیقاتی سطح آب و نشست زمین همزمان اندازه گیری و تحلیل شده که در این مجموعه به آن پرداخته می شود.



## ۲-۱ افت و خیز تشکیلات و سطح آب

اساساً یک نوع از روند سطح آب سفره به صورت سال به سال بوده که ممکن است روند صعودی (کمتر دیده می شود)، نزولی (عمدتاً به دلیل برداشت های غلط) یا ثابت باشد. در طی سال نیز عموماً "چه در سال تر یا خشک نوسان پله ای (Steplike Variations) در ارتباط با بهره برداری در فصول کاشت (افت تراز آب و جمع شدن یا انقباض تشکیلات) و فصول بارش (خیز تراز آب و اتساع تشکیلات) دیده می شود. اگرچه در شرایط افت شدید حتی پس از احیا و تغذیه سفره در زمستان، برگشت و انبساط تشکیلات دیده نمی شود و تنها تراکم تشکیلات با شدت کمتر دیده می شود. البته همیشه دلیل این موضوع به افت شدید آب مرتبط نمی شود بلکه به ذات آبخانه بر می گردد. اساساً رفتار سیستم آبخانه غیر خطی و بطئی است. به این صورت که اثر و نتیجه زهکشی سفره در ماه های قبل با تاخیر روی برگشت تشکیلات منعکس می شود. این مسئله در تشکیلات آکیتارد (جنس رسی و ضخامت اهمیت دارد) شدید تر است و ممکن است انقباض تشکیلات چند ماه پس از تخلیه و در زمان تغذیه نمایان شود و لذا علی رغم تغذیه سفره طی فصل پرآب، شاهد برگشت و اتساع تشکیلات نبوده و تنها شدت نشست زمین کمتر می شود.

## ۲-۲ انتخاب مدل

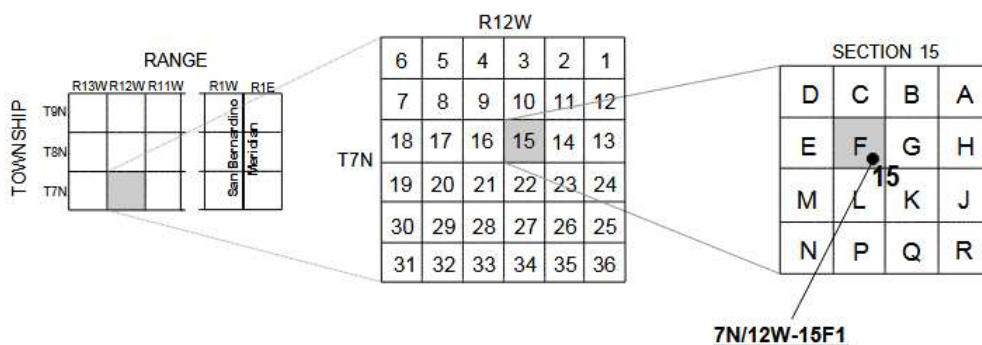
اگر هدف پیش بینی نشست زمین باشد ابتدا باید جنس سیستم آبخانه بررسی تا پارمترهای هیدرودینامیک موثر در رفتار نشست که در ارتباط با نوسان سطح آب می باشد مشخص شود. لذا مدل سازی نوسانات سطح آب در ارتباط با نشست زمین مد نظر است. سپس می توان نوع مدل عددی جهت ارزیابی و تدقیق پارامترها انتخاب شود. بحث وسیعی در خصوص انتخاب مدل و مدل سازی آبهای زیرزمینی در مرجع ۳ ارائه شده است. به عنوان مثال اگر سیستم تشکیلات آبخانه از نوع آکی تارد باشد باید مبانی محاسبات آنالیز و شبیه سازی برای این نوع سیستم زهکشی تعریف شود. جهت مدل سازی نیاز به یک دوره واسنجی و یک دوره صحت سنجی است تا بتوان با دقت معین پیش بینی رفتار نمود. مدل انتخابی در اینجا مدل یک بعدی MODFLOW بر پایه تئوری زهکشی آبخوان های آکی تارد (Helm, 1975) پایه ریزی شده که در سال های اخیر پکیج های جدید آن در مدل GMS نیز وجود دارد. لازم به توضیح است که مدل های چند بعدی نتایج بهتری را مشروط به وجود داده های مناسب خواهند داد و لذا در صورت نبود داده مناسب، بهتر است مدل یک بعدی و ساده تر بر اساس حداقل داده های موجود موثر در هدف مدل سازی انتخاب گردد.

مسئله دیگر در مدل سازی نشست انتخاب مدل منطقه ویژه (Specific) و مدل ناحیه ای (Regional) است. مدل ناحیه ای می تواند برای جریان و کمی وسیع تر و مدل خاص با پهنای کمتر یا برابر برای نشست انتخاب گردد.

مسئله بعدی کوپل کردن مدل جریان سفره با مدل اسکلت تشکیلات زمین است. در این حالت باید قابلیت فشردگی به دو دسته حد الاستیک و حد غیر برگشت پذیر یا غیر الاستیک در مدل ساختمانی تعریف تا با مدل جریان جفت شوند (Leake, 1990).

### ۲-۲-۱ سیستم شماره گذاری چاه ها

باتوجه به موقعیت هر چاه می توان کدهایی برای استانداردسازی تعریف کرد. به طور کلی هر چاه دارای مالکیت، مختصات طول و عرض جغرافیایی و شمال و جنوب، در یک سیستم مثلا "سیستم مستطیلی می باشد. در شکل ۱ برخی از حروف از نقشه شکل ۲ و سایر موارد بر اساس قرارداد تعیین شده و کد چاه معادل 7N/12W-15F1 شده است.

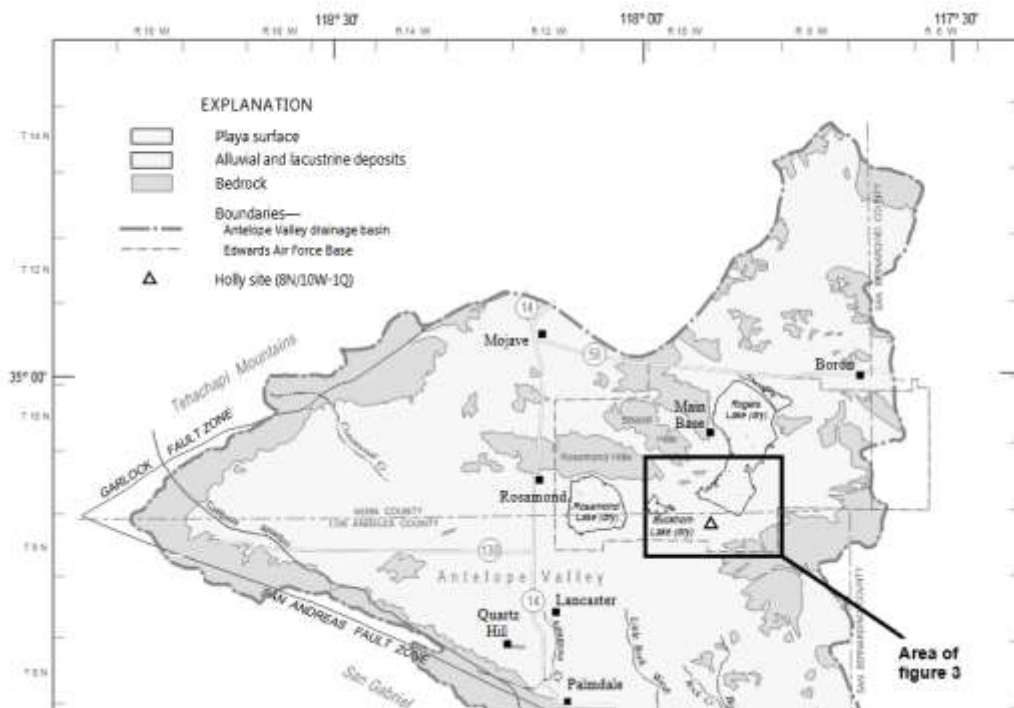


شکل ۱: سیستم شماره گذاری چاه [2]

### ۲-۳ نتایج مدل سازی دشت آنتلپ کالیفرنیا (The Holly Site, Edwards Air Force Base)

در این منطقه سیستم از نوع آکی تارد با رسوبات دریاچه ای و آبرفتی بود (شکل ۲) و لذا گمانه های اندازه گیری و نمونه برداری داخل این سیستم که حدود ۴۰ متر و ۲۰ متر ضخامت داشت تعبیه شد و برای ۷ سال اندازه گیری های تراز آب و نشست برداشت شد. نتایج حاکی از آن بود که اگر طی ۷ سال افت تراز آب برابر ۹ متر از وضع موجود ابتدایی باشد، طی ۳۰ سال اتی حدود ۵ سانتی متر نشست زمین رخ می دهد. این نتیجه نشان از تاخیر رفتار سیستم بود. همچنین اگر تراز سال اول طی ۷ سال تغییری نکند، نشست زمین طی ۳۰ سال اتی کمتر و حدود ۲ سانتی متر می شود. در این خصوص بررسی ها نشان داد اگر حتی احیا و تغذیه آبخانه صورت بگیرد و لذا سطح تراز آب از سال مبنا حدود ۹ متر بیشتر نیز شود باز هم ممکن است نشستی حدود ۱,۴ سانتی متر طی ۳۰ سال آتی دیده شود.

لذا باتوجه به نوع سیستم آبخانه، جهت مدیریت آب و زمین و ساخت و ساز این موضوع اهمیت دارد که به تاخیر بازخورد رفتار سیستم طی سال های اتی توجه شود به طوریکه اثر باقی مانده نشست زمین به دلیل تاخیر حرکت جریان در آبخانه های آکی تارد ممکن است تا ۳۰ سال اتی نیز خود را نشان دهد.



شکل ۲: نقشه موقعیت منطقه دشت آنتلپ کالیفرنیا و محدوده هالی با علامت (Δ) [2]

در شکل ۱ کد دشت آنتلپ سایت 8N/10W-10 بر اساس معیارهای استانداردسازی (پیوست) تهیه می شوند. همچنین برای استانداردسازی شماره چاه ها در فرایند مدلسازی ممکن است روشی که در کالیفرنیا استفاده می شود به کار گرفته شود (شکل ۱ بند ۳-۱).

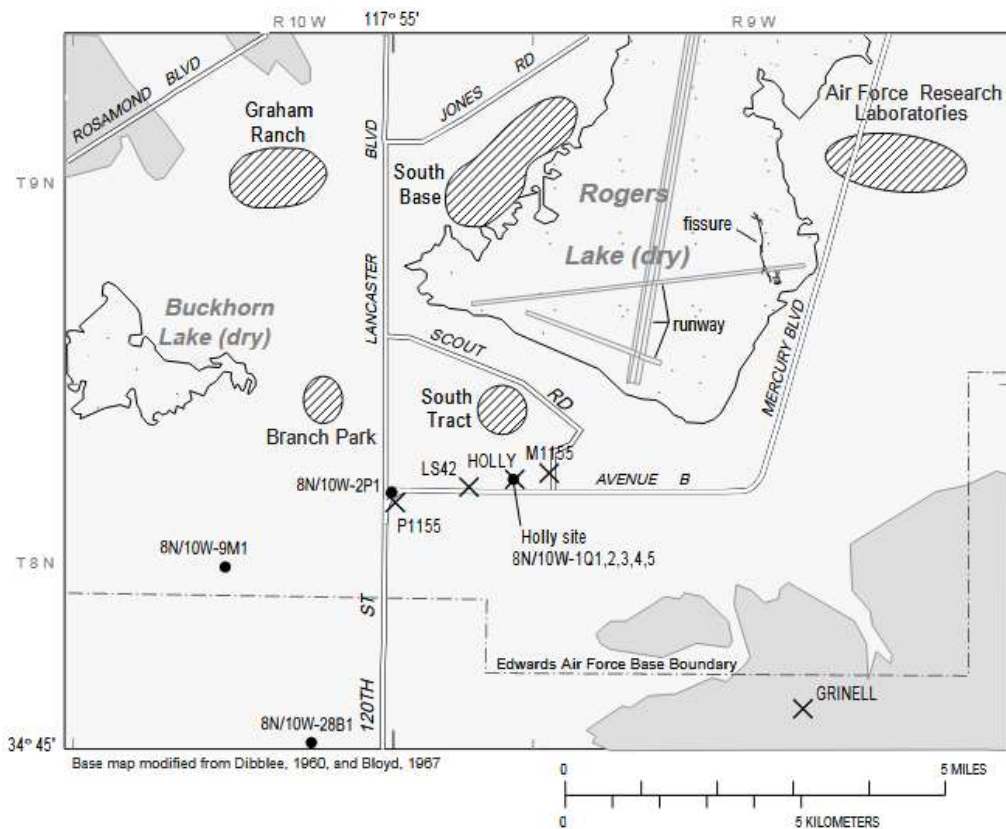
## ۲-۴ دلایل عمده فرونشست زمین

فرونشست هایی مانند دشت اصفهان یا بیشتر نقاط کشور (بند ۱ مطالعه شود جهت شناسایی فرونشست مورد نظر در متن حاضر) که مورد نظر این مجموعه مطالب حاضر هستند عمدتاً "به دلیل برداشت غیر برنامه ریزی شده و غیر فنی برای تامین آب عمدتاً" کشاورزی و در مواردی سایر نیازها (شرب و ...) می باشند. در این خصوص اگر برداشت ها

بر اساس معیارهای بهره برداری پایدار (مرجع ۳) تنظیم و اجرایی می شد با چنین بحران هایی روبرو نمی شدیم. این موضوع در نقاط مختلف دنیا مانند برخی از دشت های امریکا نیز دیده شده است. بطوریکه طی یک دوره پمپاژ ۲۳ ساله برداشت نامناسب از سفره ها، به منظور تامین کمبود آب کشت محصولات کشاورزی مشخص شد به طور متوسط طی ۶۶ سال نشست بیش از ۲,۷ سانتی متر در سال رخ داده است. این مسله باعث شد ضخامت برخی از آبخان ها تا ۱۲ سانتی متر نیز کاهش یابد. برخی از دلایل کلی نشست و منطقه البرز در بند ملاحظات فنی ارائه شد.

### ۲-۵ اندازه گیری ۷ ساله دشت آنتلپ کالیفرنیا

در این خصوص یک کشش سنج (Extensometer) در عمق حدود ۲۶۰ متری گمانه و ۴ پیزومتر در دشت آنتلپ تعبیه شد. همچنین طی ۷ سال تغییرات سطح آب و نشست زمین نسبت به یک مرجع افقی و عمودی ژئودتیک رصد و ثبت شد (شکل ۳). در این خصوص از آنالیز رادار (InSAR) برای تفسیر جابجایی ها بهره گرفته شد (۱۹۹۵).



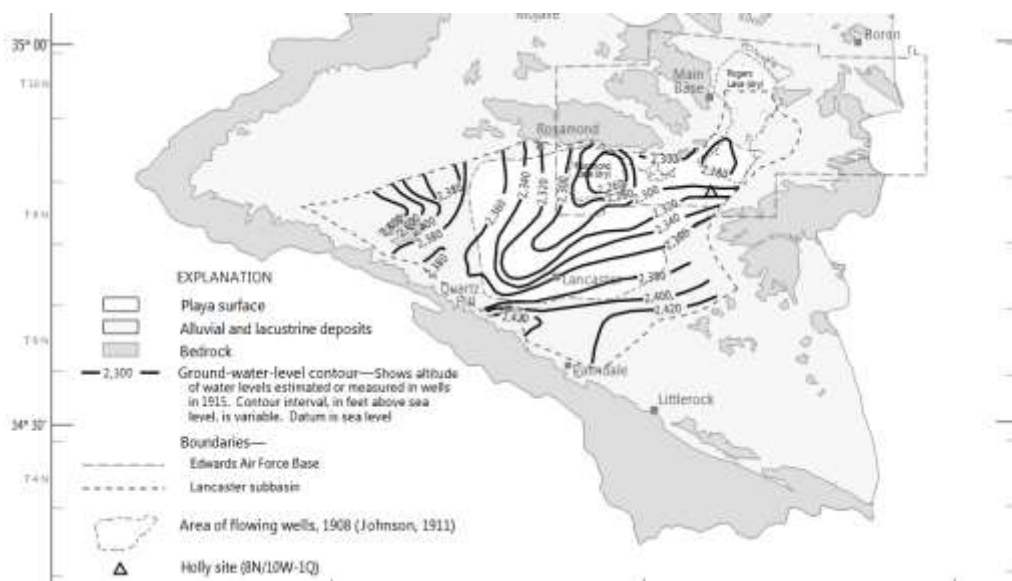
شکل ۳: موقعیت پنج مارک ها با شماره و نام (x)، چاه های مشاهده ای با شماره (●) و مناطق توسعه چاه

باتوجه به اندازه گیری ۷ ساله داده های سطح آب و نشست زمین، شبیه سازی نشست زمین (Land Subsidence) و تراکم (Compaction) آبخان برای ۸۹ سال از سال ۱۹۰۸ الی ۱۹۹۷ در دشت آنتلپ محدود شد. سرانجام از روی مدل واسنجی شده، نشست زمین و تراکم سیستم تا سال ۲۰۲۶ با فرض سناریو افت تراز آب از ۱۹۹۰ الی ۲۰۰۰ شبیه سازی شد. همچنین دو سناریو دیگر نیز با فرض ثابت بودن افت و تراز صعودی (تغذیه) تا سال ۲۰۹۶ شبیه سازی شد. تا اثرات برداشت آب در نشست زمین و تراکم ضخامت سفره ناشی از نوع تشکیلات و ضخامت آکی تارد رسی با رسوبات دریاچه ای و آبرفتی با توپوگرافی از تپه تا کوهستان در مرزها و بارش سالانه حدود ۹۰ تا ۱۰ سانتی متر برای اقلیم خشک تا نیمه خشک با مساحت ۶۲۱۶ کیلومتر مربع دره دشت همراه کاربرهای مختلف از جمله شهرها بررسی شود. علت توجه به این دشت ها به خاطر کاربرد فرودهای اضطراری هواپیما یا فرود شاتل های فضایی عنوان شده است.

## ۲-۶ توسعه آبیهای زیرزمینی و فرونشست زمین

در مرکز و جنوب دشت آنتلپ و اطراف آن قبل از اینکه ۳۰۰ حلقه چاه حفر شود، بهره برداری از چاه های آرتزین بدون نیاز به پمپاژ در مساحتی (Well field) حدود ۶۲۰ کیلومتر مربع صورت می گرفت (شکل ۴). این برداشت ها که برای تامین آب شرب و کشاورزی و دام ها در سطح محدود کفایت می کرد طی سال ها به صورت حقا به مشخص در آمده بود. البته در این مناطق به دلیل خاک قلیایی اغلب توسعه کشاورزی محدود می شد و لذا برداشت آب نیز برای کشاورزی محدود و ناچیز بود. با این وجود کم کم با رشد جمعیت در بالادست دشت در محل مخروط افکنه ها، آنتلپ برای توسعه باغات خود نیاز آب را از انحراف جریان های سطحی روی مخروط افکنه ها تامین و لذا بخشی از تغذیه طبیعی آبخوانه ها نیز به این صورت کسر شد. در این وضعیت اگرچه سطح زیر کشت توسعه یافت ولی به دلیل غیر مطمئن و پایدار بودن آبسطحی، مجدداً آنتلپ به سمت برداشت از سفره و حفر بیشتر و عمیق تر چاه ها جهت حفظ باغاب و اراضی کشاورزی خود شدند. در این حالت چاه های جریانی قبلی طی حدود ۴۰ سال برداشت بی رویه از سفره های آرتزین به تدریج افت کرده و به حالت آزاد در سطحی کمتر از ۱۰ کیلومتر مربع در آمدند که بالغ بر ۴۹۰ میلیون متر مکعب برداشت آب کشاورزی در سال تا سال ها ۱۹۶۰ گزارش می شد. همچنین بعد از مدتی حدود ۲۰ سال به دلیل افت سفره و افزایش هزینه های پمپاژ، مجدداً توسعه کشاورزی کاهش یافت. با این وجود اگرچه برداشت کشاورزی ناچیز شد و به حدود ۲۰ درصد گذشته خود رسید ولی به دلیل رشد جمعیت و توسعه صنعت مجدداً فشار برداشت های این نوع تامین آب تا سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰ درصد افزایش یافت.

اگرچه در خصوص توسعه چاه و سفره اصول و روش های بهره برداری پایدار به معنی دهه اخیر وجود نداشت ولی حتی اصول اولیه برداشت معادل تغذیه نیز رعایت نشده بود (دلیری ۱۳۹۸).



شکل ۴: نمایش تراز سطح آب سال ۱۹۱۵ محدوده سایت هالی در زیر حوضه لانکستر و دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

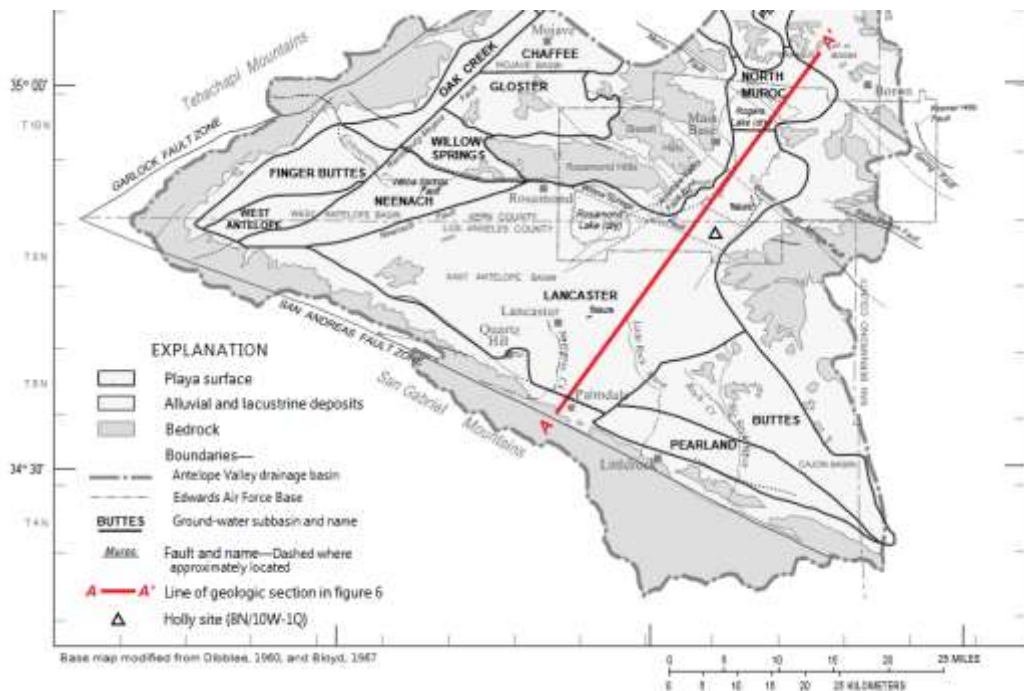
### ۳. مطالعه پایه تراکم آبخانه

اگر از ایتم های پیش نیاز هواشناسی و آبهای سطحی و ابزار دقیق در این متن عبور کنیم، جهت مطالعات و مدلسازی آینده فرونشست تحت شرایط موجود و یا ارزیابی سناریوهای مدیریتی طرح گزینه در کنار چالش های اقلیمی و محیط زیستی، حداقل نیاز نخصی در این خصوص حضور متخصصین زیر می باشد:

- مهندسی آب (هیدرولوژیست های آبخیزداری و آبیاری و عمران)
- مکانیک (عمران و ژئوفیزیک و ژئوتکنیک)
- زمین شناسی (ژئوفیزیک و مهندسی زمین شناسی)

### ۳-۱ ژئولوژی و هیدروژئولوژی و ژئوفیزیک

در این ایتم کارشناس زمین شناسی در مورد خصوصیات چون وضعیت کف آبخانه و عمق آن، گسترش گسل ها، و شکل کاسه آبخانه از مرزهای بالا تا محدوده پایاب دشت به صورت عرضی و طولی و عمقی به مطالعه می پردازد. بدیهی است زهکشی رودخانه ها، و سایر مولفه ای برداشت مانند چاه و قنوت و چشمه نیز می بایست روی این مدل مفهومی ساختاری زمین شناسی در کنار سایر لایه کاربری های وضع موجود از جمله راه ها، پوشش گیاهی، انواع سازه و .. تا حد مورد نیاز پیاده سازی شود. لذا می بایست اطلاعات ژئولوژی زیر سطحی و ژئوفیزیک از گمانه های موجود استخراج و تفسیر گردد (شکل ۵).



شکل ۵: نمایش زمین شناسی سطحی، و موقعیت زیرحوضه های آب زیرزمینی و مقاطع زمین شناسی دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

از شکل ۵ مشخص است که زیرحوضه های سفره (زیرحوضه غرب آنتلپ، زیرحوضه موجاو و ..)، این دره از ۵ لایه رسوبات روی هم قرارگرفته تشکیل شده که توسط گسل های توسعه یافته از یکدیگر جدا شده اند. این رسوبات عمدتاً "مربوط به دوره کواترنری و سوم بوده که ضخامتی حدود ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ متر دارند. اگرچه مطالعات نقل سنجی مشخص کرد که ممکن است در شرق دره حوضه آنتلپ ضخامت رسوبات بیش از ۳۰۰۰ متر بوده که به صورت شمال به جنوب با توزیع نسبتاً یکنواخت قرار گرفته است. برخی از زیر حوضه ها مانند زیرحوضه کرامر نیز بدون شکل مشخص توزیع شده اند. همچنین در برخی از حوضه ها مسله لغزش و برخورد گسل ها و پیچش به عنوان ساختار اصلی زمین شناسی نمایان است. سنگ بستر این محدوده اغلب پیچیده بوده ولی در کل اغلب از سنگ های آذرین و رسوبات دوره سوم تحکیم شده تشکیل شده است.

نتایج لوگ ها نیز حاکی از آن است که روی این سنگ بسترها از رسوبات با دانه بندی ضعیف، کنگلامرای سخت، ماسه سنگ؛ سیلت، شیل، سنگ اهک، دلومیت، توف، و برش تشکیل شده است. روی این رسوبات نیز از آبرفت های کواترنر تحکیم نشده ناشی از سیلاب های سراب و مخروط افکنه ها ناشی از انواع فرسایش آبی طی قرن ها دپو شده است. دانه بندی این رسوبات نیز جور نشده بوده و از گراول، شن، سیلت، رس دوران های مرطوب (Pluvial)

تشکیل شده اند. اگرچه این رسوبات در اعماق کمی نسبت به رسوبات جوان تر بالایی محکم تر شده اند و همچنین ممکن است دانه بندی ریزتری داشته و لذا دارای رس بیشتر نیز باشند.

مطالعات ژئوفیزیک شامل عملیات میدانی ثقل سنجی، لرزه نگاری، و سونداژ الکترونیک و لوگ حفاری و لیتولوژی می تواند در این مرحله بر اساس داده های موجود و یا در مرحله مطالعات تفصیلی با دقت بیشتر انجام شود. این عملیات جهت استخراج اطلاعات مناسب تر از اعماق در خصوص کف بستر، دانه بندی ذرات ریز و درشت، شرایط پتانسیل محدوده سفره از نظر آبدهی و نشست زمین در سطح مورد نظر صورت می گیرد. این اطلاعات در کنار داده های گمانه های موجود یا حفر شده جدید در مناطق مورد نیاز باعث تکمیل و اصلاح نتایج به منظور تفسیر نهایی نقشه های زمین شناسی از کاسه آبخانه انجام می پذیرد. همچنین تغییرات سری زمانی این اطلاعات در سطح و عمق می تواند تغییرات تراکم سفره و نشست زمین را نیز مشخص کند. این اطلاعات برای سایت هالی نیز تعمیم و تفسیر شد.

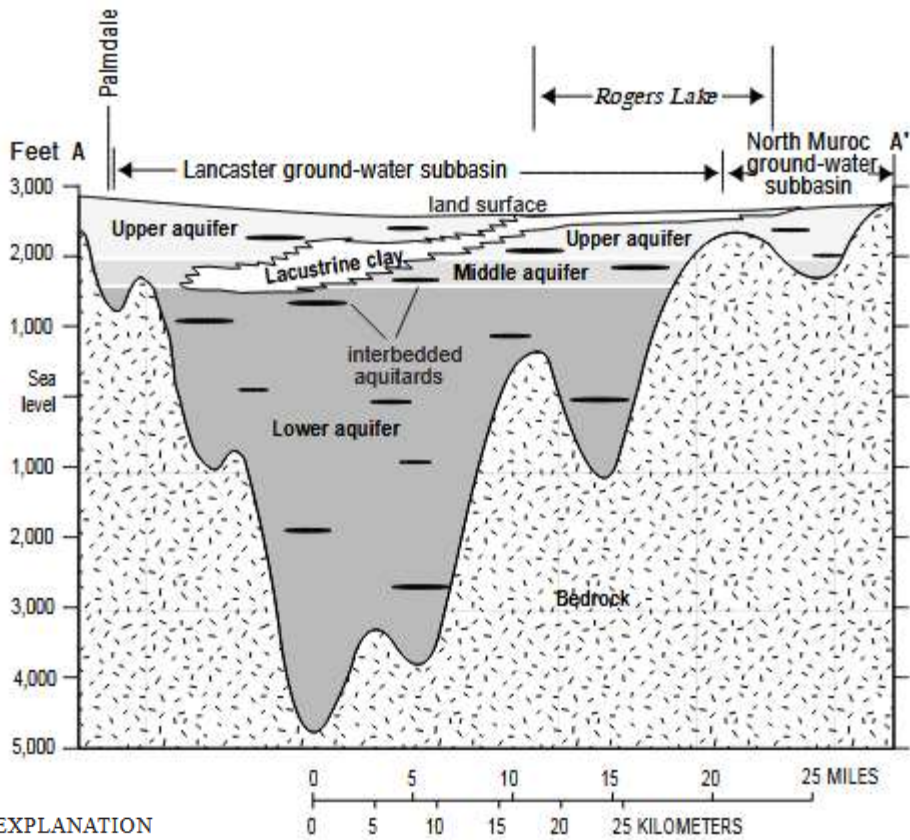
### ۳-۲ مدل مفهومی سیستم آبخانه






در فازهای اول مطالعات می توان مدل کیفی مفهومی سیستم را طراحی کرد ولی در فازهای بعدی می توان به کمک روش های تحلیلی و تجربی و به کمک ترفیق اطلاعات، مدل مفهومی را کمی نیز نمود. ترفیق کمی اطلاعات مدل مفهومی ممکن است تا مراحل مدل سازی عددی و صحت سنجی و واسنجی ادامه پیدا کند.

قبل از اثر بهره برداری بی رویه روی سیستم آبخانه، در منطقه مورد مطالعه، همیشه بخش های قابل توجهی به صورت مانداب و دریاچه و چشمه ها و چاه های ارتزین باعث تخلیه طبیعی به صورت تبخیر و تعرق سفره می شدند. منبع اصلی تغذیه سفره های دره انتلپ، نفوذ جریان های سطحی ورودی رودخانه های کوهستانی در سطح مخروط افکنه ها می باشد. مقدار حجم تغذیه طبیعی سالانه برآوردی حدود ۵۰ تا ۷۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. این شرایط پس از برداشت های بی رویه باقی نماند و سفره ها به صورت هیدرولیکی جدا شده و برخی با سنگ بستر نیمه نشتی با سفره های زیر تماس هیدرولیکی دارند. سه زیر حوضه برای این سفره ها تشکیل شد (شکل ۶):

- سفره های با ضخامت کم و آزاد (آبخانه های بالا) با تولید کم
  - سفره های تحت فشار با ضخامت بیشتر (آبخانه های میانی) با بیشترین سهم تولید آب
  - سفره های عمیق تحت فشار با ضخامت کم و تولید کمتر از سفره های میانی
- در شکل ۶ مقطع زمین شناسی عمقی خط A شکل ۵ نمایش داده شده است. و مشخص است که سفره به سه بخش اسکلتی و زیر حوضه های سفره قابل تقسیم است.

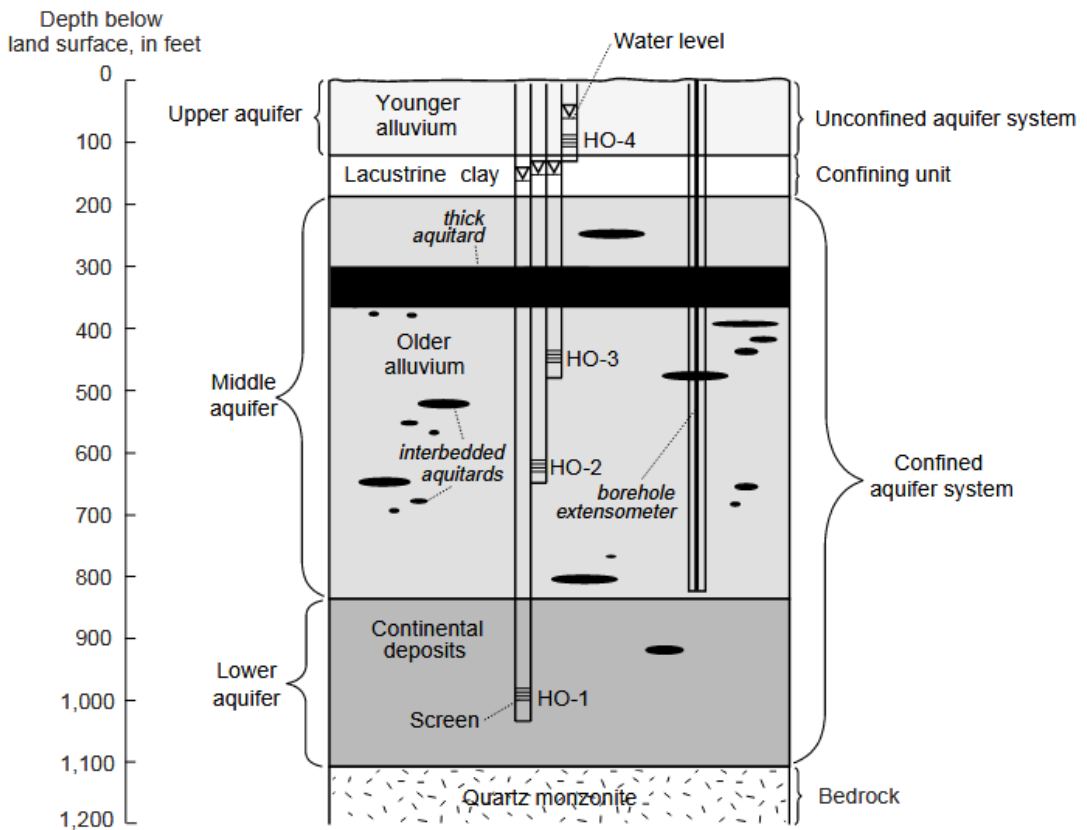




-  Younger alluvium
-  Older alluvium
-  Continental deposits
-  Lacustrine clay deposits
-  Bedrock

شکل ۶: نمایش مقطع عمقی زمین شناسی دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

سیستم آبخانه هالی از بخش های از دشت لانکستر تشکیل شده که آن نیز شامل دو زیرحوضه آزاد و تحت فشار است. مدل مفهومی سایت هالی در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این سیستم آبخانه بالایی آزاد بوده و سطح سفره آب در عمق ۱۶,۷ متری با ضخامت اشباع ۲۰ متر می باشد. زیرحوضه آبخانه دوم تحت فشار با ضخامتی حدود ۲۷۴ متر و عمق ۳۳۵ متری از سطح زمین با یک سنگ بستر هوازده قرار دارد. در داخل این آبخانه تحت فشار نیز ممکن است آبخانه های میانی و تحتانی باشند که مشخصات تراز و شیمیایی و فیزیکی آنها از روی داده ها لوگ و ژئوفیزیک تعیین می شود. همچنین شرایط واقعی برداشت پمپاژ چاه ها از هر یک از آبخانه ها مشخص می شود.



شکل ۷: مدل مفهومی آبخانه های سایت هالی (8N/10W-1Q)، ۴ پیزومتر (HO) و کشش سنج، دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

جهت درک کمی مدل کیفی مفهومی بالا برخی از ضرائب هیدرولیکی محدوده سایت هالی آکیفر میانی که بر اساس نتایج آزمایش پمپاژ به صورت حوضه مجزا یا ترکیبی به دست آمده در ادامه داده شده است. بدیهی است این پارامترها در طی مطالعات و مراحل واسنجی تدقیق می شود.

آبگذری T (Transmissivity): دامنه ۴۲۷ تا  $2400 \text{ m}^2/\text{d}$  که برای آبخانه تحتانی کمتر می باشد.

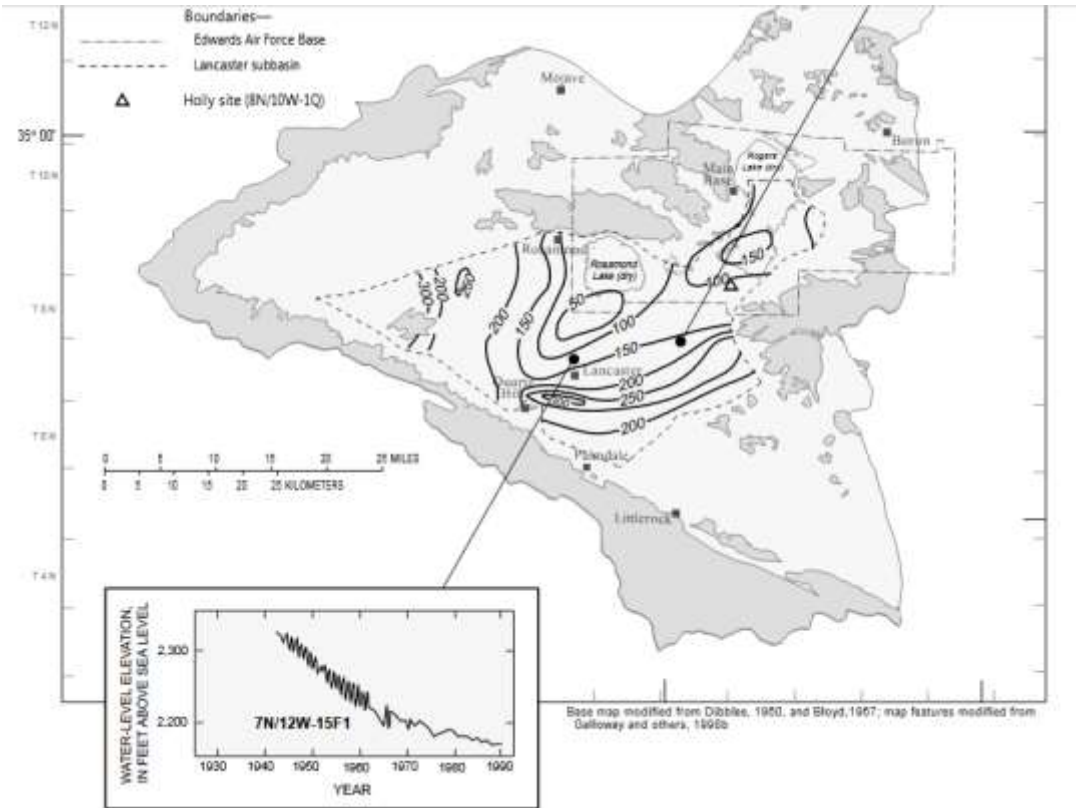
ضریب ذخیره Sc (Storage coefficient): حدود  $2,3 \times 10^{-3}$

هدایت هیدرولیکی عمودی واحد محصور (Kv):  $2,7 \times 10^{-2}$  الی  $0,5 \times 10^{-2} \text{ m/d}$

ذخیره ویژه: از تقسیم ضریب ذخیره به عمق لایه آبدار در محل چاه آزمایش به دست می آید. در اینجا حدود  $2,5 \times 10^{-5} \text{ m/d}$ .

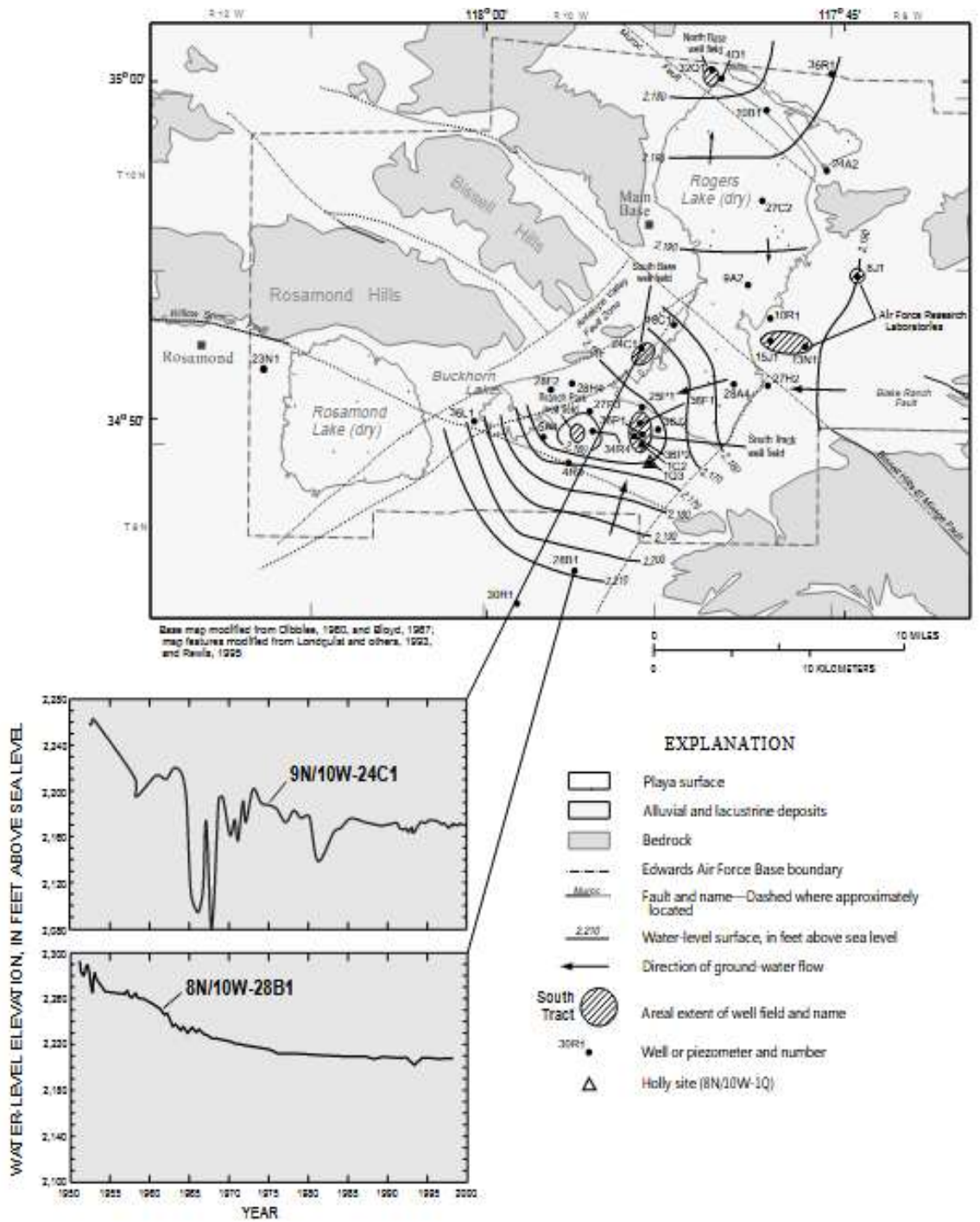
### ۳-۲-۱ تراز سفره

پس از طی ۷۶ سال پمپاژی رویه طی سال های ۱۹۱۵ الی ۱۹۹۱ سطح سفره لانگستر بیش از ۳۰ متر افت متوسط در سطح سفره و در حاشیه ها حتی بیشتر از ۹۰ متر افت نیز مشاهده شد. هیدروگراف چاه معرف در دشت مذکور با شماره استاندارد 7N/12W-15F1 در شکل ۸ نوسان فصلی و روند سالانه این افت کاهشی را نمایش می دهد.

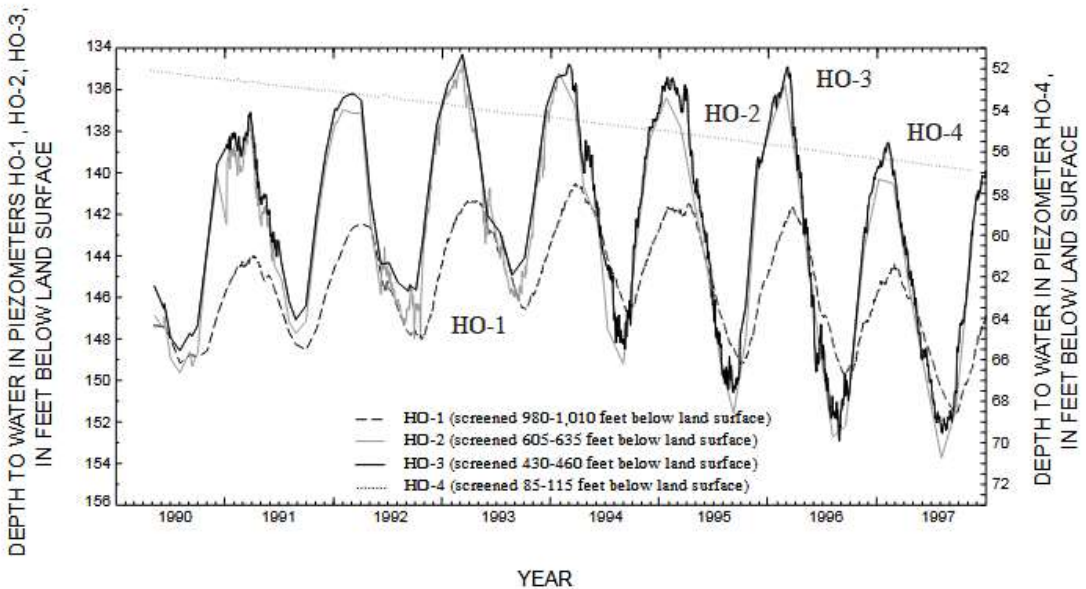


شکل ۸: نوسانات سطح آب در سفره لانگستر - دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

افت سالانه این سفره حدود ۴۰ سانتی متر در سال است در حالیکه در ایران این نرخ بسیار بیشتر و اغلب بیش از ۰٫۵ متر در سال در بهترین شرایط گزارش می شود. در شکل های ۹ الی ۱۱ نمایشی از رفتار سطح آب برای شرایط مخالف ارائه شده است.



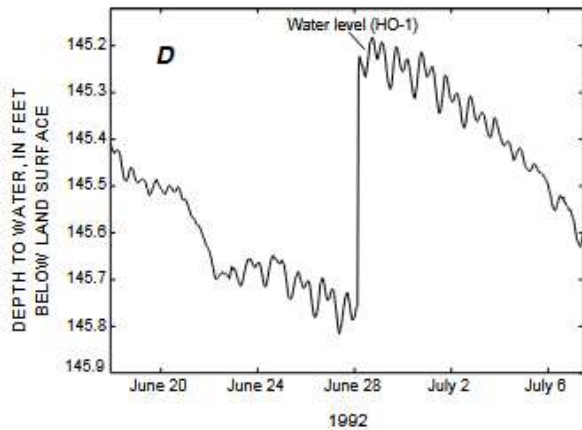
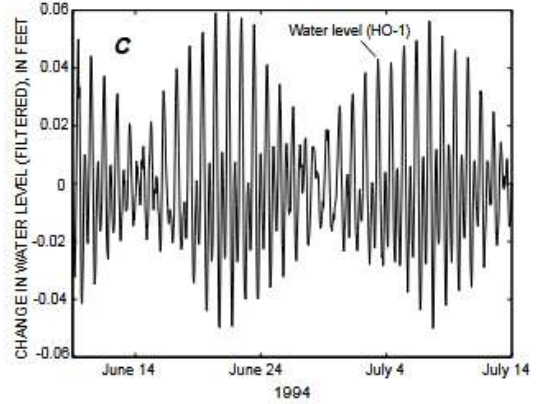
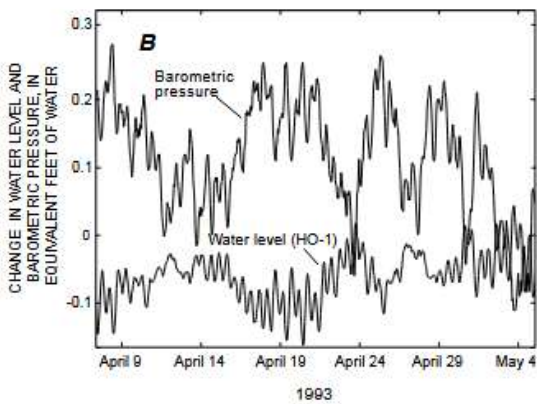
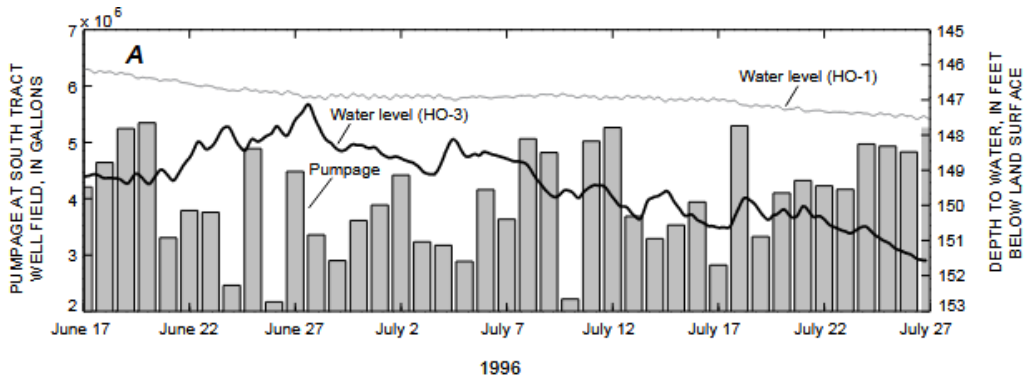
شکل ۹: سطح آب سفره بهار سال ۱۹۹۲ همراه موقعیت چاه ها - دره آنتلوب کالیفرنیا [2]



شکل ۱۰: سطح آب در ۴ پیزومتر ۱ الی ۴ سال های ۱۹۹۰ الی ۱۹۹۷ - دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

این اطلاعات نوسان تراز آب سفره به پاسخ پمپاژهای روزانه در کنار سایر بازخوردهای سیستم مانند اثر زلزله، فشار بارومتریک، اثر جذر و مد در کنار داده های تراکم آبخان، جهت محاسبه ضرائب ذخیره الاستیک آبخانه، که از اندازه گیری عکس العمل سیستم به کشش و بار (Stress/Strain) ایجاد می شود، جهت محاسبات تراکم و فرونشست زمین نیاز می باشد. روش های آنالیز این موارد در بخش بعد ارائه شده است.

اثر مواردی چون تغییر فشار اتمسفر سطح زمین روی سطح آب چاه های نفوذ کرده در آبخانه های تحت فشار و آزاد وجود دارد و ثابت شده است (Jacob, 1940). این مقادیر برای چاه های با دهانه باز بین ۲,۴ تا ۱۵ سانتی متر در روز مشاهده شده است. با این وجود اثر جذر و مد بیشتر روی پیزومترهای ۱ الی ۳ دیده شد تا پیزومتر شماره ۱ که نزدیک به سطح زمین بود. این تغییرات در نوسان حدود ۰,۶ تا ۱,۵ سانتی متر اندازه گیری شده است. همچنین اثر زلزله با قدرت  $M_L=7.3$  روی پیزومتر شماره ۱ باعث افزایش ترازوی پله ای معادل ۱۶,۱ سانتی متر شد. این مسله باعث کشش فشرده گی معادل  $10^{-6} \times 0.8$  روی سیستم شد (Roeloffs & et.al 1995).



شکل ۱۱: نوسان در ۴ پیژومتر پاسخ به (A) پمپاژ در میدان سوئ تریکت، (B) فشار بارومتریک، (C) جزر و مد، (D) اثر زلزله دره آنتلپ کالیفرنیا [2]

### ۲-۲-۳ تراکم سیستم آبخانه

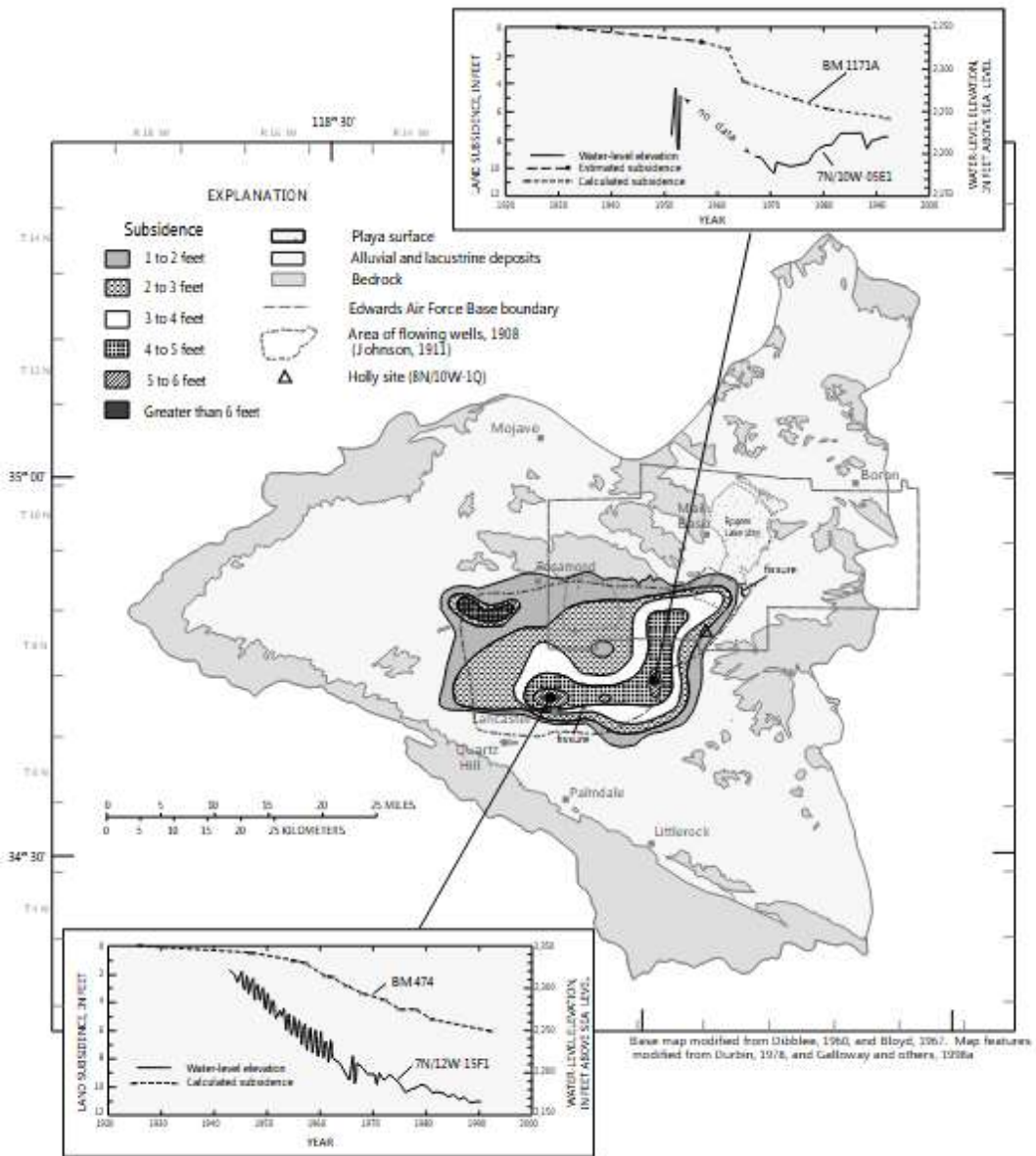
تخلیه آب از منافذ موثر شروع جمع شدگی تشکیلات بوده و سپس شروع انواع نشست های موقت و دائم زمین با شدت های مختلف است. اگرچه این برگشت آبخانه دارای درجاتی از حد برگشت پذیری (قابل احیا در صورت تغذیه) و یا برگشت ناپذیری (نشست دائم) دارد. این مسئله در آبخانه های آکی تارد شدیدتر دیده می شود و هم دارای یک نشست باقی مانده دازمدت است. به این معنی که حتی با برداشت فشار ناشی از برداشت آب و حتی در دوره احیا، ممکن است بخشی از نشست سفره تا سال ها بعد همچنان ادامه پیدا کند. لذا ارتباط بین داده های نوسان تراز آب سفره و فرونشست زمین عموماً " غیر خطی بوده و اغلب با یک فاز تاخیری همراه است. این داده ها ممکن است به کمک ابزار GPS و برداشت تراز سفره نیز به صورت ناحیه ای مقایسه شود. استفاده از روش های دورسنجی رادیومتریکی رادار روش InSAR نیز می تواند در تعیین توزیع و بزرگی نشست های پهنه های وسیع در صورت عدم وجود اطلاعات دقیق اندازه گیری نقطه ای استفاده شود(۲).

به طور کلی مناطقی که دارای رسوبات غیر تحکیم یافته و ریز بافت با قابلیت فشرده شدن هستند مستعد نشست بیشتر می باشند. در این مناطق حتی رابطه معنی دارتری بین افت تراز آب سفره و نشست زمین با تاخیر فاز کمتر ایجاد می شود. این مسئله در منطقه طرح نیز ثابت شد. به عنوان مثال در غرب و جنوب دره آنتلپ با وجود برداشت شدید آب از سفره، نشست قابل توجهی مشاهده نشده است. که دلیل آن می تواند به دلیل کمبود رسوبات ریز قابل فشرده شدن یا نبود سفره های آکی تارد در تشکیلات باشد(شکل ۱۲).

برخی از علائم و عوارض نشست در منطقه شامل تغییر شیب رودخانه ها، افزایش شکست سنگ ها، تشدید فرسایش و سیلابی شدن منطقه می باشد.

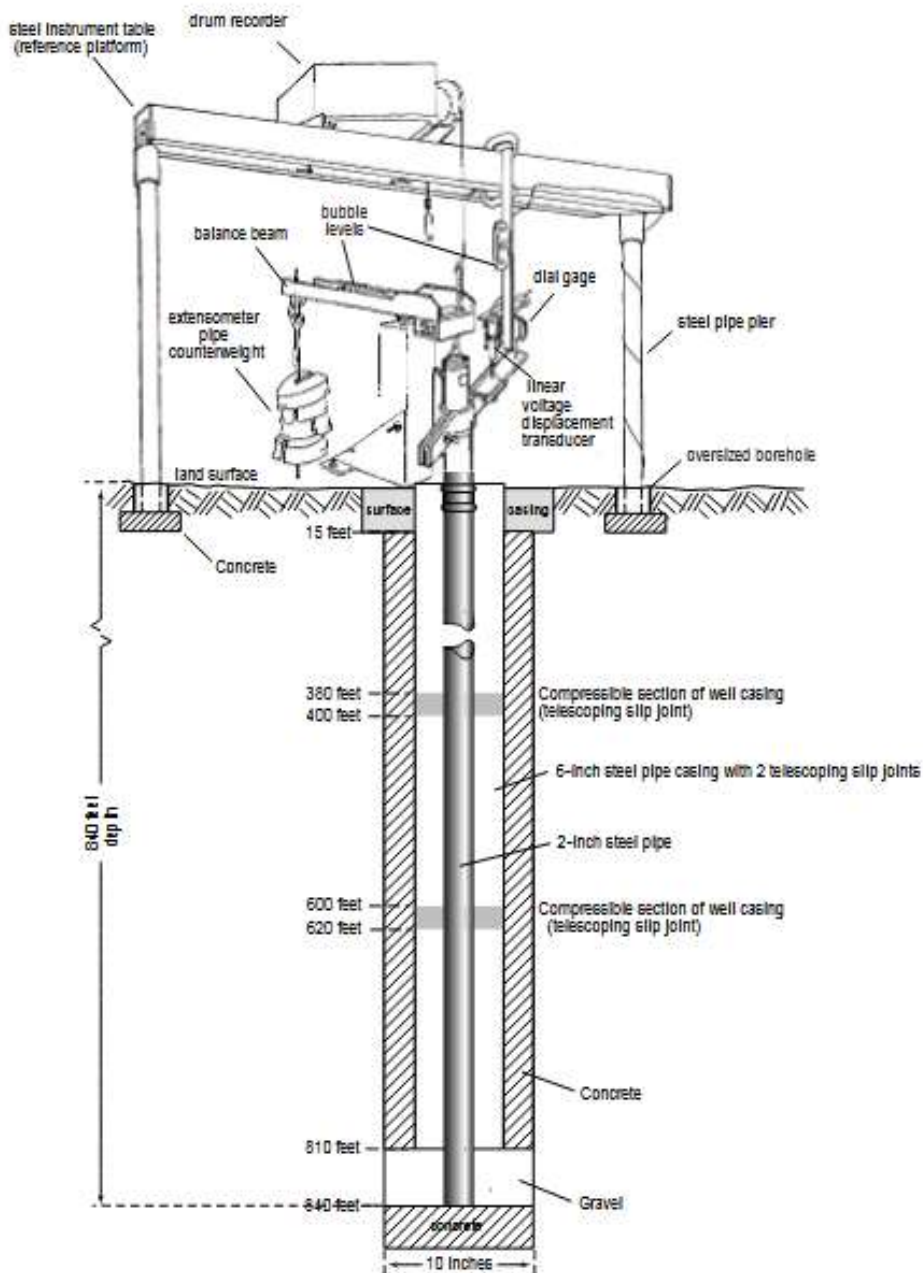
از سال ۱۹۹۰ توسط USGS اندازه گیری های همزمان سطح آب با ۴ پیزومتر و تراکم تشکیلات با یک کشش سنج در اعماق ۴ تا ۲۵۶ متری با دقت حدودی ۰,۳ میلیمتر انجام گرفت(شکل ۱۳). نتایج ۷ ساله اندازه گیری ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. این نتایج با دیتا لوگ ها نیز مقایسه شده است. اگرچه برخی از اندازه گیری ها به دلیل خراب شدن کشش سنج یا خطای ابزار از دست رفته است. برخی از بازخوردهای نشست مربوط به تنش های فصلی است. اما نشست های مهم مربوط به افت های شدید برداشت در تابستان است. همچنین برخلاف تغذیه سفره در حدود ۳ متر طی زمستان، به جز یک مورد، در سایر موارد نشست ادامه داشته است.

تغییر شکل آبخانه به شدت وابسته به پمپاژهای روزانه بوده و این مورد واضح و نمایان است. البته اثرات ناچیز دما و فشار اتمسفر نیز روی فرونشست وجود دارد. جهت حذف این اثرات تمهیداتی در ابزار کشش سنج دیده شد. نتایج حاکی از آن است که نشست متوسط سایت هالی به طور متوسط در سال حدود ۱,۳ سانتی متر بر اساس این ۷ سال اندازه گیری بوده است. بر این اساس خطای ابزار GPS حدود ۵ سانتی متر و حتی بیشتر برای نشست های عمودی می باشد. که این موضوع یعنی ابزار GPS برای مطالعات جزئی مناسب نیست.

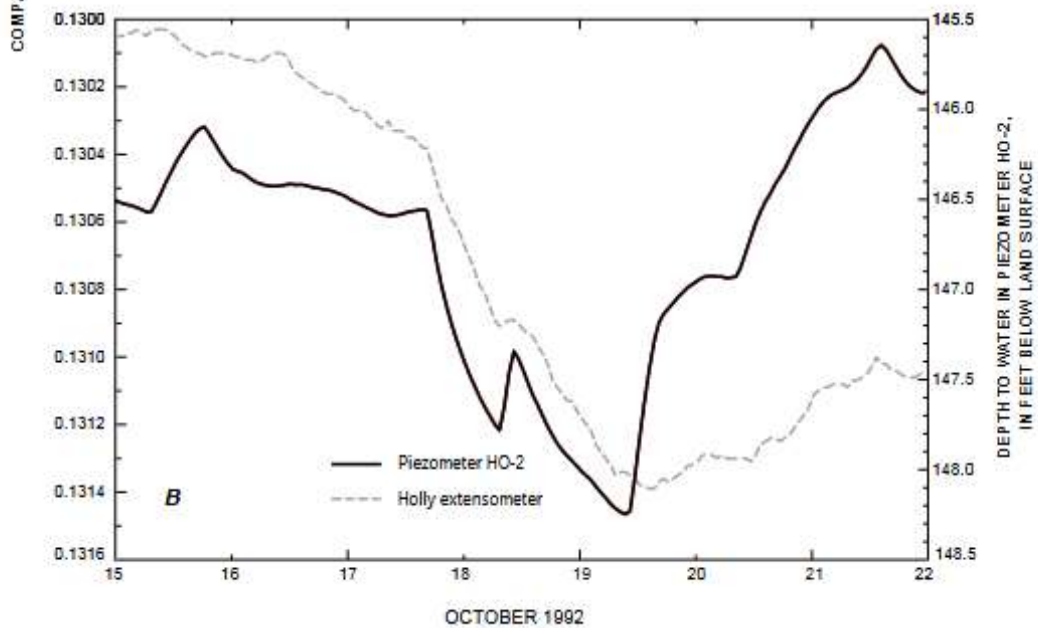
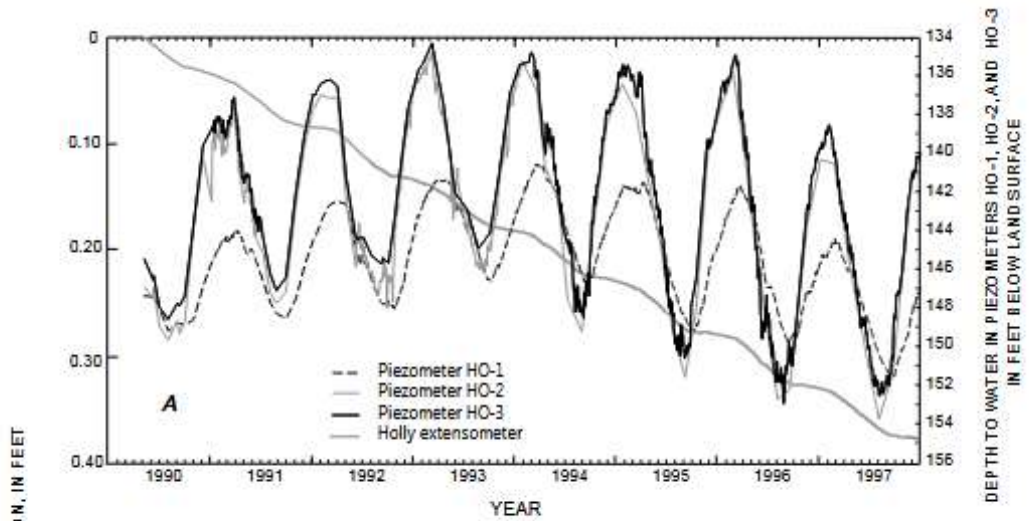


شکل ۱۲: نمایشی از میدان های چاه، توزیع و بزرگی فرونشست، دو شکستگی مهم برای دوره ۱۹۳۰ الی ۱۹۹۲ همراه  
 هیدروگراف چاه های معرف و نشست های معادل آنها در پنج مارکها  
 دره آنتلپ کالیفرنیا [2]





شکل ۱۳: گمانه کشش سنج در سایت هالی [2]



شکل ۱۴: مقایسه نتایج اندازه گیری تراکم با گمانه کشش سنج و تراز آب در سایت هالی [2]

نشست در روش InSAR طی سال ۱۹۹۳ الی ۱۹۹۵ حدود ۱,۹ سانتی متر در سال به در محدوده مذکور هالی سایت به دست آمده است. خطای روش راداری InSAR حدود ۰,۹ الی ۲ سانتی متر توسط Galloway (۱۹۹۸) گزارش شد. دلیل این اختلاف ارقام در نتایج روش های مختلف کشش سنج و رادار می تواند این باشد که خیلی از نشست ها به درستی در ابزار کشش سنج به ویژه در اعماق و سطح وسیع به دلیل محدودیت تکنولوژی ابزار، خطا یا خرابی دیده نشده باشد. حتی ممکن است بخش مهمی از تراکم زیر عمق کشش سنج رخ داده باشد.

خطای روش تداخل نگاری راداری InSAR با داده های Sentinel\_1 باند C حدود ۴ میلی متر توسط دلیری (۱۳۹۵) در گزارش فنی البرز گزارش شده است. علت این تفاوت و دقت بهتر، مربوط به نوع داده ها و تکنولوژی جدید تر داده های سنتینل باند C می باشد.

همچنین نتایج دو روش اندازه گیری با کشش سنج و روش رادار توسط Galloway و روش رادار با داده های سنتینل باند C در البرز و مقایسه نتایج با IPGN های سازمان نقشه برداری توسط دلیری قابل مقایسه و قبول گزارش شده است.

#### ۴. روش های تحلیلی

قبل از کنترل نشست زمین (Land subsidence) می بایست اطلاعاتی در خصوص میزان و شدت نشست نسبت به زمان در کنار مهمترین خصوصیات هیدرودینامیک آبخانه شامل موارد زیر پیدا نمود.

- ذخیره ویژه
- تنش موثر
- تراز سطح آب

از نظر مکانیکی مسئله نشست عمدتاً در آبخانه های با تشکیلات آبرفتی تحکیم نشده یا نسبتاً سست (رس و سیلت تحکیم نشده) مشاهده می شود. تراکم مواد ممکن است تا عمق ۳۰۰ متر نیز اتفاق بیفتد. در مناطقی نشست زمین حدود ۳ متر گزارش شده است. نشست زمین ممکن است در اثر بهره برداری بیش از حد مجاز از آبخانه اتفاق بیفتد. به طوری که سالانه بین ۱ سانتی متر و حتی ۲۵ سانتی متر (دشت تهران، ۱۳۹۴) نشست کند. نشست های حدود ۱ سانتی متر باعث شکستگی پوشش بتونی کانال های آبیاری و بیشتر از آن ممکن است باعث ایجاد شکاف های عمیق در سطح زمین، کج شدن و سبز شدن چاه، خرابی تاسیسات راه آهن، ساختمان ها و... گردد.

- معرفی روش تحلیلی لومن در پیش بینی فرونشست زمین

در روش های تحلیلی مقدار نشست الاستیک زمین بر حسب متر ممکن است از رابطه زیر محاسبه شود (لومن، ۱۹۶۱):

$$L_s = \Delta p \left( \frac{S}{\gamma_w} - nH\beta \right)$$

$\Delta p$ : افت فشار آکیفر (نیوتن بر متر مربع)،  $n$ : ضریب تخلخل و  $H$  ضخامت لایه (متر). بقیه عوامل مانند رابطه ضریب ذخیره ( $S$ ) است. افت فشار از رابطه فشار ( $P = \gamma h$ ) محاسبه می شود.

ضریب ذخیره (Storage coefficient)  $S$  یا  $S$

اگر ضریب ذخیره آبخانه تحت فشار  $S$  و ضریب ذخیره آبخانه آزاد  $S_u$  باشد، داریم:

$$S_u = S_y + S$$

در آبخانه های آزاد ضریب ذخیره  $S$  نسبت به ضریب تخلخل موثر یا آبدهی مخصوص  $S_y$  بسیار کوچک است لذا نیازی به جمع کردن این دو ضریب نیست و در عمل فقط از تخلخل موثر استفاده می شود. در آبخانه های تحت فشار ضریب ذخیره کاربرد دارد لذا این ضریب متناظر با تخلخل مفید  $S_y$  (آبدهی مخصوص) در آبخانه های آزاد است. ضریب ذخیره شامل میزان حجم آب قابل برداشت در سطح واحد و عمق واحد از آبخانه وقتیکه فشار به میزان یک واحد طول افت می نماید، است. اما عمده تفاوت آن با تخلخل مفید این است که وقتی از ۱ متر مکعب تشکیلات مقداری آب برداشت شود فضای آن مقدار آب برداشت شده در سفره تحت فشار پر می گردد. لذا ضریب ذخیره در آبخانه تحت فشار بسیار کم است. در این حالت باید توجه نمود با برداشت آب در آبخانه تحت فشار دو اتفاق می افتد. اول آنکه فشار کم شده و لذا مایع کمی منبسط می شود. اگر یک اتمسفر برابر ۱۰ متر فشار آب باشد هر یک متر افت برابر ۰٫۱ اتمسفر کاهش فشار دارد. علاوه بر این خود تشکیلات نیز قابلیت فشرده شدن و انبساط دارند که با برداشت آب و کاهش فشار، ذرات به یکدیگر نزدیک می شوند. حالت تشدید شده (پلاستیک/ نشست برگشت ناپذیر) این فرآیند همان نشست زمین است که به ویژه در آبخانه های با تشکیلات متوسط به پایین حساس تر است. این مفاهیم در آبخانه های آزاد نیز وجود دارند اما با توجه به ناچیز بودن اثر آنها نسبت به تخلخل موثر، معمولاً محاسبه نمی شوند.

در آبخانه های تحت فشار و آزاد عامل قابلیت  $T$  (ضریب انتقال حاصل ضرب لایه آبدار در هدایت هیدرولیکی یا  $T=Kb$ ) بسیار اهمیت دارد. لذا در آکیفرهای تحت فشار در اثر تغییر فشار و فشرده شدن مواد تشکیل دهنده آبخانه و یا قابلیت اتساع خود آب، مقدار بسیار کمی آب از آکیفر خارج می گردد که در این شرایط ژاکوب مقدار ضریب

ذخیره را که نسبت حجم خروج آب به واحد حجم آکیفر با افت واحد سطح پیزومتری است با رابطه زیر عنوان نمود:

$$S = \gamma_w \cdot b(\alpha + n\beta)$$

$\gamma_w$ : وزن مخصوص آب ( $m^3$ ) برای دمای مشخص.

b: ضخامت لایه آبدار (متر)

n: ضریب تخلخل آبخانه

$\beta$ : قابلیت انبساط آب یا عکس مدول حجمی الاستیک آب  $m^2 / N$

$\alpha$ : قابلیت فشرده شدن مواد لایه آبدار یا عکس مدول حجمی الاستیک مواد آکیفر. مدول الاستیک آب حدوداً  $2.1 \times 10^9$  نیوتن بر متر مربع است.

مدول الاستیک برخی مواد تشکیل دهنده لایع آبدار بر حسب  $N/m^2$ :

سنگ‌های شکافدار و ترک خورده:  $10^9 - 10^{11}$

شن یا گراول متراکم:  $10^8 - 10^{10}$

شن نرم:  $10^7 - 10^9$

رس:  $10^6 - 10^8$

**مثال:** فرض کنید مقدار افت پیزومتری پیش‌بینی شده آبخانه‌ای تحت فشار (ضخامت ۳۰ متر) با تخلخل ۳۰ درصد (ضریب ۰,۳)، حدود ۷۰ متر باشد، اگر ضریب ذخیره و الاستیک آب به ترتیب  $2 \times 10^{-4}$  و  $2.1 \times 10^9 N/m^2$  باشد، مقدار نشست احتمالی و نوع خسارات را تعیین نمایید؟ (جواب: ۰,۱۱، ۰ متر)

این مقدار نشست (۱۱ میلیمتر) ممکن است باعث ترک خوردگی و خسارت سازه‌های بتونی مانند کانال‌های انتقال آب، برخی از لوله‌های انتقال که به خوبی برای اینگونه نیروهای ناشی از بارگذاری زمین طراحی نشده‌اند و همچنین سقف ساختمان‌ها، جاده‌ها و امثال آن گردد.

با توضیحات مذکور مشخص شد اگر برداشت آب از تخلخل موثر و ضریب ذخیره تحت شرایط الاستیک باشد پس از تغذیه آبخانه، سیسم احیا شده و دوباره برگشت و اتساع تشکیلات رخد می دهد. لذا عمده مسئله و پیامد فرونشست وقتی است که شرایط برداشت بی رویه باعث شود تشکیلات آبخانه از حد الاستیک گذشته و در شرایط

غیر قابل برگشت و احیا قرار بگیرند. در این شرایط نشست های اولیه، میانی و باقی مانده بسته به بافت تشکیلات ممکن است تا سال ها حتی پس از تغذیه نیز اگرچه با روند کمتر مشاهده شود. روش های مختلفی در زمینه پیش بینی و ارزیابی نشست وجود دارد که مولف آنها را در گروه ها و کلاس های عمده زیر تقسیم نمود:

- روش های مکانیک آبخانه - مطالعه موردی سایت هالی کالیفرنیا
- روش های هیدرولوژیکی - مقایسه هیدروگراف سفره با فرونشست متناظر (مطالعه موردی البرز و هالی)
- روش های دورسنجی رادار (Radar) - مطالعه موردی البرز
- تلفیق روش ها و توسعه روش آنالیز آماری و یا مدلسازی عددی - مطالعه موردی سایت هالی کالیفرنیا

روش های مکانیکی:

در روش های مربوط به مکانیک آبخانه می بایست به وضعیت کوئیک (Quick)، نیروهای جریان و منتجه نیروها، سربار، تنش کل و موثر و چسبندگی خاک نیز به صورت مستقیم توجه شود. سپس می توان از روش های آنالیز تنش (افت هیدرولیکی) - کرنش (افت عمودی پیکره آبخان) یا روش تحکیم شامل برآورد نسبت هدایت هیدرولیکی قائم به ضریب تحکیم رابطه بین تغییرات تراز سفره را با مشخصات تنش موثر محاسبه و فرونشست را پیش بینی نمود. در این خصوص روش های اندازه گیری در سایت هالی در بخش اول و در بخش های بعدی نتایج مدلسازی و تحلیل ها ارائه شده است.

روش های هیدرولوژیکی:

در این روش ها مسئله به صورت غیرمستقیم یا اندازه گیری صحرائی قابل ارزیابی و بررسی است. این روش ها شامل برآورد پارامترهای لازم از آزمایش پمپاژ (روش مستقیم) یا محاسبه پارامترها از مدل های کالیبره شده می باشد. همچنین می توان نوع نشست را از روی آنالیز سری زمانی منحنی نشست فصلی در مقابل افت سفره یا تغییرات تنش موثر حدس زد. به عنوان مثال اگر دو منحنی مذکور روی یکدیگر انداخته شود و فرضاً نشست از انواع الاستیک (برگشت پذیر) باشد قطعاً در زمان تغذیه و کاهش تنش موثر با برگشت سطح سفره باید منحنی نشست زمین نیز متناسب عکس العمل نشان داده و تغییرات صعودی آن با یک تاخیر فاز منطقی (فصل یا سال) محسوس باشد در غیر اینصورت نشست های زمین در محدوده تغییر شکل پلاستیک (غیرقابل برگشت) قرار داد و این روند تا جایی ادامه می یابد که رسوبات کاملاً تحکیم شوند.

به طور کلی اگر نوسانات فصلی بدون روند مشاهده شود نشست زمین مربوط به تغییر ذخیره ویژه الاستیک آبخان است و اگر سری نشست دارای روند با شیب زیاد و نوسانات ناچیز فصلی باشد سهم نشست پلاستیک و تغییر ضریب ذخیره ویژه پلاستیک خاک بسیار بیشتر است. اساساً در این شرایط با توجه به اینکه مقدار ضریب ذخیره الاستیک ۱۰

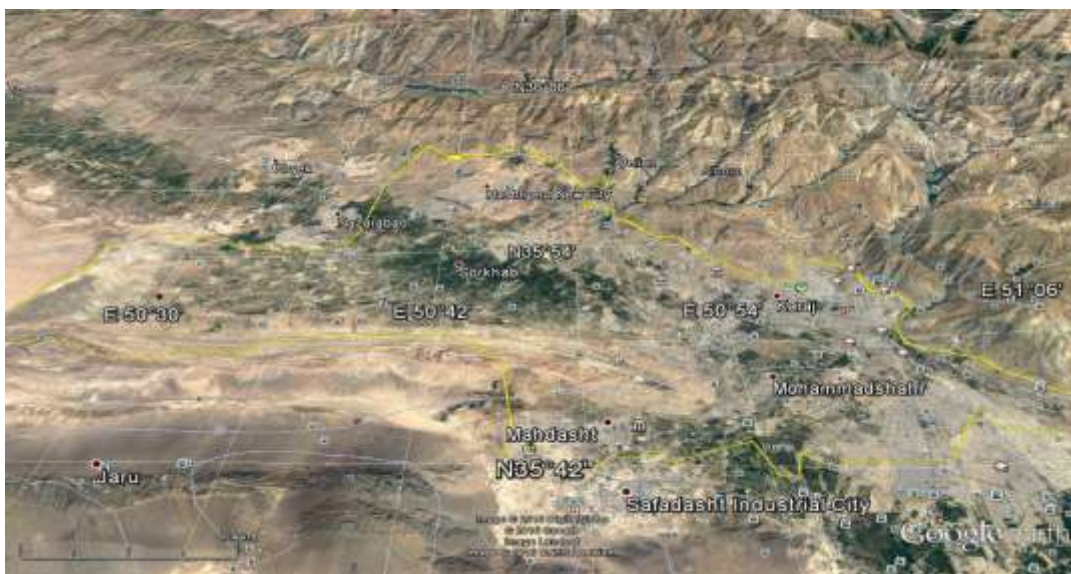
تا ۱۰۰ برابر کوچکتر از ضریب ذخیره پلاستیک است لذا سهم آن در نشست های پلاستیک به دلیل ناچیز بودن قابل اغماض است.

برآورد مقدار و روند فرونشست بر اساس روش های دورسنجی راداری (Radar Analysis):

در این خصوص یکی از تکنیک های به روز در سال ۱۳۹۵ روش INSAR می باشد. یکی از ماهواره هایی که می تواند در این مورد کاربرد داشته باشد تصاویر ماهواره ای Sentinel\_1 بوده که با طول موج باند C بر اساس مطالعات دلیری و پاکدامن (فرونشست آبخانه های البرز، ۱۳۹۵) دقتی حدود ۴ میلیمتر در دشت های البرز داشته است. فرایند مطالعات فرونشست با آنالیز رادار و اطلاعات میدانی در گزارش فنی البرز (دلیری، ۱۳۹۵) به شرح زیر خلاصه شده است:

مطالعات موردی البرز – فرهاد دلیری، ۱۳۹۵

محدوده مطالعاتی شامل پهنه ی آبخوانه های مرتبط با شهرستان فردیس می باشد. موقعیت فردیس در ضلع شرقی شکل زیر قرار دارد. مطالعه فرونشست در این محدوده ها به کمک آنالیز تصاویر راداری، مطالعات میدانی و آنالیز داده های نقشه برداری صورت می پذیرد. سایر محدوده ها واقع در قسمت غربی فردیس شامل کرج، ساوجبلاغ و نظرآباد می باشد که باتوجه به ارتباط هیدرولیکی فی مابین، مطالعه و بررسی آنها ناگزیر است. مشخصات فنی نقشه های GIS که در این پروژه تولید شده است شامل سیستم تصویر UTM با مبنای WGS84 و جزئیات فایل پروژکشن (سیستم تصویر) به نام لایه boundry\_t به شرح زیر می باشد:



Projected Coordinate System: WGS\_1984\_UTM\_Zone\_39N

Projection: Transverse\_Mercator

False\_Easting: ۵۰۰۰۰۰

False\_Northing:...../°

Central\_Meridian:۵\

Scale\_Factor: ۰/۹۹۹۶

Latitude\_Of\_Origin:...../°

Linear Unit: Meter

Geographic Coordinate System: GCS\_WGS\_1984

Datum: D\_WGS\_1984

Prime Meridian: Greenwich

Angular Unit: Degree

جهت تحلیل و نتیجه گیری در گزارش البرز از مجموعه اطلاعات زیر استفاده شده است:

-سایت های مرتبط همچون سایت سازمان نقشه برداری و زمین شناسی تهران و غیرو

- آمار هیدروگراف واحد دشت ها

-برداشت های صحرائی کاربری و ابنیه محدوده پیژومترها و دهانه سبز شده چاه ها

-برداشت اطلاعات GPS

-برداشت اطلاعات مربوط به خسارات نسبی، علائم فرونشست و کاربری در شعاع تاثیر

-لایه های GIS محدوده استان و شهرستان ها و سایر لایه های مرتبط(جاده، تقاطع، تراز، خطوط راه آهن، چاه های بهره

برداری

-اطلاعات نیولمان سکوهای مبنای نقشه برداری (Benchmark)

-اطلاعات شبکه دائمی GPS کشور (IPGN) از سازمان نقشه برداری

-اطلاعات و نقشه های وزارت معادن و صنایع کشور

### داده های مبنا جهت صحت سنجی روش راداری -مطالعات موردی البرز

عمده ترین داده های مبنای محدوده فردیس جهت کنترل نتایج آنالیز رادار با روش INSAR شامل پیژومتر واقع در داخل فردیس و

چند مبنای نقشه برداری در محدوده به همراه پیژومترهای واقع در محدوده دشت های مجاور دشت فردیس می باشد که این اطلاعات

نیز مربوط به مبنای نقشه برداری بوده و عمدتاً "نشست کرده اند. لذا می بایست مبناهای تغییر نکرده را مبنا و مبناهای نشست کرده

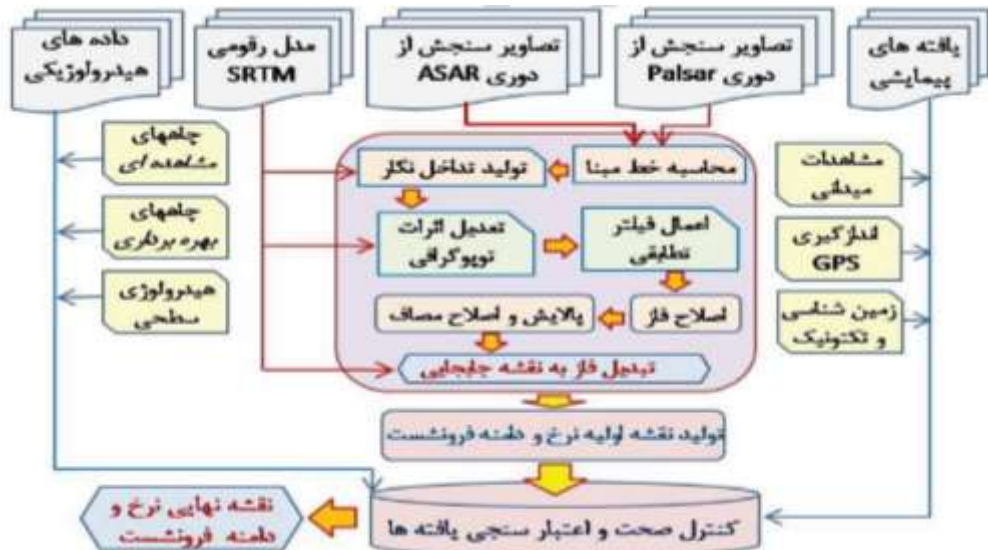
محدوده فردیس را در صورت نیاز کارفرما به روز رسانی نمود. با این وجود باتوجه به اطلاعات نیولمان محدوده هر پیژومتر که در پروژه

حاضر مورد نظر است نیز امکان برآوردی کلی از محدوده دشت ها به صورت نقطه ای و با خطا فراهم می گردد. علاوه بر این استفاده از

داده های IPGN نیز در صورت نیاز کارفرما مورد توجه قرار می گیرد



شماتیک فرایند روش شناسی کار در خصوص برآورد مقدار و پهنه فرونشست به شرح شماتیک زیر است:



### نرم افزارهای مورد نیاز طرح

در این مرحله انتخاب نرم افزار مناسب آنالیز سنجنده رادار مناسب و همچنین دوره زمانی و باندهای مناسب بسیار اهمیت دارد. در این خصوص پرسنل این مشاور تجربه کار با مدل ILWIS (رستر-وکتور) که در کارهای آبخیزداری کشور هلند و ایران توسعه و کاربرد دارد، PCI-Geomatica (رستر) که در عمده کارهای بزرگ تصاویر ماهواره ای کاربرد دارد و IDRISI (رستر-وکتور) که در مطالعات جنگلداری، مرتعداری، شهرسازی و غیره توسعه یافته است دارند. جزئیات برخی از تجارب کار با مدل های مذکور در مراجع ارائه شده است. علاوه بر این مدل ها، می توان به مدل ERDAS IMAGING، مدل SNAP (خاص آنالیز رادار به ویژه رادارهای نسل جدید ۲۰۱۵) و SARSCAPE خاص آنالیز تداخل سنجی نیز اشاره نمود. دو مدل اخیر حرفه ای ترین مدل های آنالیز تصاویر غیراپتیک راداری می باشند که در این پروژه به عنوان ابزار اصلی در کنار سایر ابزار GIS و RS بهره گرفته شد. لازم به ذکر است که استفاده از ابزار فوق به عنوان پیشرفته ترین ابزار تصاویر راداری (HIGH TECH) در سال ۱۳۹۵ نام برده می شود.

در این خصوص این مشاور باتوجه به کامل بودن ماژول ها و ابزار مدل اردس (Erdas) و انوی (Envi) و همچنین حساسیت نوع مطالعات از مدل های مذکور جهت محاسبات، اصلاح خطاها و آنالیز رادار استفاده نمود.

جهت ارتباط بین آنالیز رادار اینسار با اطلاعات رقومی GIS و تهیه نقشه های رقومی نرم افزار ARC GIS ورژن ۱۰,۳ باتوجه به نیاز مطالعات استفاده شد.

در این خصوص نتایج نهایی قابل استفاده از آنالیز رادار در محیط ARCGIS در فولدر RADARANALYSIS و زیرفولدری به نام IW برای کل منطقه با فرمت DISP ارائه شده که در محیط GIS قابل استفاده می باشد.

### پارامترهای موثر در انتخاب تصاویر خام مورد نیاز آنالیز INSAR

تصاویر راداری اساساً دارای طول موج میلیمتر و سانتی متر بوده و نسبت به تصاویر ماهواره ای اپتیک بلند موج محسوب می شوند و لذا قابلیت های متفاوتی جهت تفسیر اطلاعات خواهند داشت. تصاویر راداری می تواند در محاسبات هواشناسی اتمسفری و دریا، سیلاب، آتش سوزی، تعیین نوسانات سطح آب دریا و موج سونامی، تهیه مدل رقومی ارتفاع و غیره کاربرد داشته باشد علاوه بر این در چند سال اخیر تکنولوژی جدیدی از رادار امکان بررسی تغییرات موضعی و ناحیه ای سطح زمین (Deformation) در حد سانتی و میلی متر را نیز فراهم کرده است. مدار این ماهواره ها از مسیر نزدیک به قطبین عبور می کند لذا دارای برداشت های پایین گذر (DES) و بالاگذر (ASE) می باشد همچنین این ماهواره ها برخلاف تصاویر اپتیک همچون Landsat و ETM+ که از نادیر (Nadir) (نقطه دید زیر سنجنده) خود برداشت می کنند راست نگر (R-Looking) هستند.

جهت آنالیز فرونشست عوارض بهتر است فاصله مکانی (SB) رادار اصلی با رادار پیرو برعکس محاسبات DEM تا حد ممکن کم باشد. مقدار طول موج نیز روی خطای عمودی و همچنین رزولیشن و حساسیت عارضه اثر دارد. طول موج بالا باعث افزایش خطای عمودی و کاهش رزولیشن مکانی (اثر منفی) و البته کاهش حساسیت (اثر مثبت) می گردد. ماهواره هایی که ممکن است قابلیت ارسال اطلاعات تغییر عارضه باشند همچون TerraSAR وجود دارد اما مهمترین ماهواره های راداری قابل دسترس که ممکن است مناسب اهداف طرح حاضر نیز باشند شامل:

ENVISAT, ALOS\_1, Sentinel\_1 TO 3, Cosmo Sky می باشند.

ماهواره Cosmo Sky اگرچه دارای باند X با طول موج ۳,۵ سانتی متر و حداکثر پایه (TB) زمانی ۱۵۰ روز است اما مسیر عبور آن از مجاور منطقه طرح با فاصله زیاد همراه است (شکل ۱). ماهواره ALOS\_1 محصول مشترک امریکا و ژاپن بوده و دارای باند L با طول موج بسیار زیاد (۱۵ - ۲۳ cm) و پایه زمانی تا ۵ سال است. لذا نمی تواند به عنوان گزینه اولیه انتخاب شود. اما دو ماهواره اروپایی Envisat و Sentinel هر دو دارای سنسورهای با باند C (طول موج ۵,۵ سانتی متر) با TB تا ۳ سال به ترتیب با سنسور ASAR و Sentinel\_1 هستند. با این وجود برداشت سنجنده ASAR مربوط به دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ می باشد که باتوجه به نیاز طرح از شرایط فرونشست فعلی منطقه بسیار دور خواهد بود. در عوض برداشت سنجنده Sentinel\_1 از سال ۲۰۱۵ تا حال بوده که با داده های هیدروگراف سفره، نقشه برداری و

همچنین شرایط فعلی برداشت ها و مشاهدات صحرایی نیز به روز و هماهنگ تر است. علاوه بر این طول بر اساس تجارب کارشناسی موجود طول موج باند C باعث خطایی بین ۲,۷ تا ۱,۳ میلیمتر می شود که نسبت به سایر باندها برای اهداف طرح مناسب می باشد. اگرچه تنوع کاربری منطقه (شهری، پوشش درختی تا مرتع، زراعی، باغی) زیاد است و لذا موضوع کاهش طول موج باعث افزایش حساسیت کاربری و عملیات تفسیر می گردد اما طول موج این نوع سنسور از جنبه رزولیشن مکانی و دقت مورد نیاز و همچنین نفوذ (Penetration) نیز قابل قبول است. باتوجه به مطالب بالا و هدف طرح مناسب ترین سنسور ماهواره جهت برآورد نرخ و مقدار فرونشست طی سال اخیر، اطلاعات راداری ماهواره Sentinel\_1 جهت آنالیز با روش INSAR می باشد.

جهت تهیه تصویر راداری Sentinel\_1 می بایست قطبیدگی (Polarization) و نوع تولید (Product Type) شامل فاز (Phase) و شدت بازتابش (Amplitude) نیز مورد توجه باشد. در این پروژه با توجه به نیاز طرح تصاویر دارای فاز و شدت بازتابش با علامت (SLC) برای ۱۲ ماه اخیر تا برج ۶ سال ۹۵ موجود بود.



همپوشانی اطلاعات

- زمان عبور و سری زمانی برداشت تصاویر. این سنجنده حدوداً ۲۵ روز برداشت می کند.

- نیاز اطلاعات جهت صحت سنجی. در این خصوص می بایست حتی الامکان زمان انطباق تصاویر با برداشت های مبنا تا حد ممکن یکسان باشد.

-نیاز پیش بینی نرخ روند فرونشست در شرایط حال. نرخ نشست از سالی به سال دیگر متفاوت است لذا مناسب ترین سری مربوط به اطلاعات سال اخیر خواهد بود. اگرچه با ۲ و ۳ سری امکان تعیین نرخ و مقدار نیز وجود دارد اما جهت تعیین تغییرات منحنی نشست یکسال آماری نیاز است که این موضوع نیز مورد توجه قرار گرفت.

-توجه به آمار مرتبط با فرونشست. در اینجا باتوجه به ابعاد طرح و اطلاعات در دسترس از آمار هیدروگراف واحد سفره آب زیرزمینی (Unit Hydrograph) و پیژومترهای معرف هر یک از دشت های معرف جهت تفسیر استفاده شد. لذا تاریخ و سری موجود این آمار نیز در انتخاب سال و ماههای تصاویر لحاظ شد.

### ملاحظات فنی غربال کردن نهایی تصاویر خام مورد نیاز آنالیز INSAR

از آنجا که سنجنده های راداری متعدد هستند لذا انتخاب معیارهای مناسب جهت خرید سنجنده و مشخصات فنی ماهواره یکی از گام های مهم قبل از فرایند پردازش و نتیجه گیری موثر می باشد. این معیارها به نوع سنجنده و اهداف طرح بستگی دارد. این تصاویر دارای طول موج های سانتی متر و میلی متر با فرکانس پایین بوده و سنجنده آن اغلب فعال است. لذا جهت مطالعه تغییرات سطح زمین در حد سانتی متر ممکن است مناسب باشد. پس از انتخاب ماهواره SENTINEL\_1 سری آرشیو موجود تصاویر انتخاب شد. سپس در ادامه اقدام به بررسی کیفی جهت نگهداری و یا حذف تصاویر نامناسب به شرح ذیل شد:

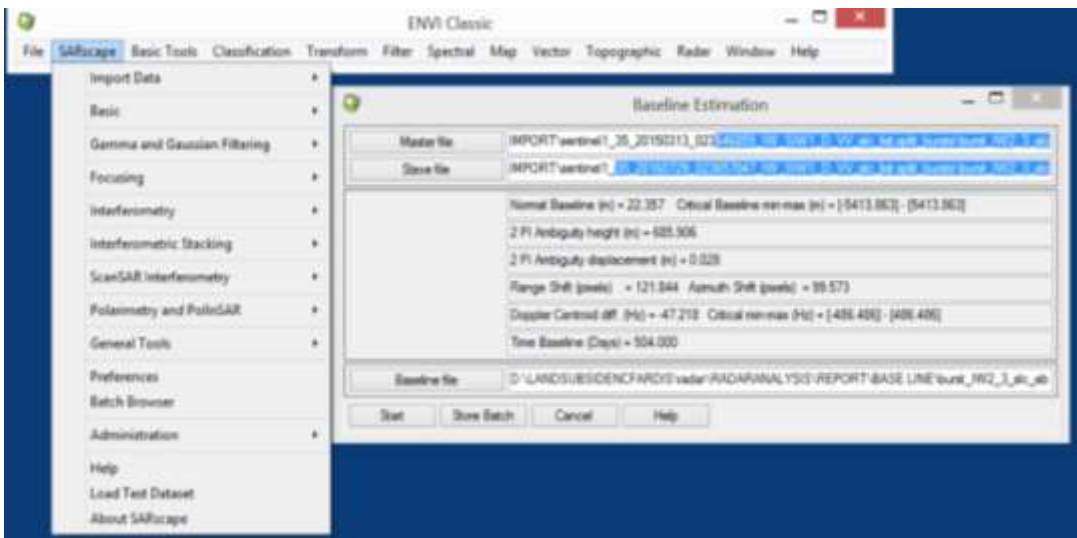
-زمان خرید (سال و فصل). در اینجا دوره موجود تصاویر عبور کرده از منطقه از سال ۲۰۱۵/۰۳/۱۳ (۲۳ اسفند ۹۳) به عنوان تصویر اصلی (MASTER) و سال ۲۰۱۶/۰۷/۲۹ (۸ مرداد ۹۵) به عنوان تصویر پیرو (SLAVE) انتخاب شد. بدیهی است که اطلاع از فرونشست ماه های اخیر بسیار ضروری است. همچنین جهت محاسبه روند و تغییرات دوره ای می بایست تصاویر یک سال آبی نزدیک انتخاب شود.

-مقایسه اربیت (Orbit) تصاویر خام و روی هم قرارگیری پارت IW هر یک از تصاویر اصلی و پیرو. شماره اربیت تصاویر طرح ۳۵ می باشد. اما برخی از پارت IW تصاویر تطابق نداشتند. در این حالت پارت های نامناسب حذف یا جایگزین شدند.

-بررسی خط مبنای مکانی:

مقدار مجاز فاصله مکانی دو ماهواره بستگی به هدف طرح دارد. اگر هدف محاسبه مدل ارتفاعی (DEM) باشد بهتر است این فاصله تاحدی بیشتر و اگر محاسبه فرونشست (DEF) یا جابجایی (فرسایش لغزش، سولیفکسیون، حرکت گسل یا جاده، بدنه سد و ...) باشد بهتر است تا حدی کمتر باشد. مقدار این فاصله به صورت تجربی در عارضه های ثابت و بیابانی ۴۰۰ متر و در عارضه منطقه طرح کمتر از ۱۰۰ متر می باشد. این پارامتر به شدت روی همدوسی تصاویر تاثیر دارد. بطوریکه هرچه فاصله مکانی و زمانی دو تصویر بیشتر شود همبستگی کمتر می گردد. پوشش برف، حرکت گیاهان در اثر وزش باد، و شرایط اتمسفری (تروپوسفر و یونسفر) و آب و هوا (باد شدید، برف و بارندگی، روز خیلی گرم و بخار آب) روی

تاخیر فاز و نه بازتابش اثر منفی دارند. این عوامل نیز در مجموع باعث کاهش همدوسی شده و لذا باعث می شود تا تصاویر با فاصله مکانی کمتر مناسب تر باشند. همچنین اگر چه آنالیز دو تصویر با فاصله زمانی سال برای محاسبه فرونشست کلی مناسب است اما باعث کاهش همبستگی بین تصاویر می گردد. این موضوع می تواند توسط بخار آب و سایر موارد مذکور تشدید نیز شود که تحت شرایطی باعث عدم کاربرد تصاویر می گردد. اساساً شب خشک سرد بهتر از روز گرم با بخار آب می باشد. در این خصوص مقدار فاصله مکانی ( $\Delta S_b$ ) و زمانی ( $T_b$ ) دو ماهواره مذکور به ترتیب حدود ۲۲,۳ متر و ۵۰۴ روز می باشد (شکل زیر). لذا مقدار فاصله مکانی تصاویر مناسب ادامه آنالیز می باشد.



ارائه نتیجه محاسبه فاصله مکانی - زمانی دو ماهواره راداری مستر و پیرو

- خطاهای راداری مهم و خطای اتمسفری در بند خطاهای داده های راداری به صورت کمی ارزیابی شده و در صورت عدم قابلیت تصحیح از ادامه آنالیز حذف شدند. کلیه مستندات مدلسازی در مسیر Landsubsidence Fardis 95/ Report/Radar به صورت فایل های اصلی نرم افزار SAR SCAPE قرار گرفته اند. باتوجه به آنالیز کیفی فوق در انتها ۱۲ داده راداری به شرح جدول ۱ جهت ادامه فرایند آنالیز انتخاب شد.

جدول شماره ۱: آرشیو داده های راداری منتخب (میلادی)

کد دوره	تاریخ	کد داده	تاریخ
۱	۱۵۰۳۱۳	۷	۱۶۰۳۰۷
۲	۱۵۰۵۲۴	۸	۱۶۰۳۳۱
۳	۱۵۱۲۰۲	۹	۱۶۰۴۲۴
۴	۱۵۱۲۲۶	۱۰	۱۶۰۵۱۸
۵	۱۶۰۱۱۹	۱۱	۱۶۰۶۱۱
۶	۱۶۰۲۱۲	۱۲	۱۶۰۷۲۹

۱۵ معادل ۲۰۱۵ و ۱۶ معادل ۲۰۱۶

### بررسی خطاهای داده های راداری

خطاهای عمومی و خطاهای خاص رادار: خطاهای عمومی در تصاویر اپتیک و رادار وجود دارد. اما برخی از خطاها خاص رادار و برخی خاص ماهواره و سنسوری است که با آن آنالیز انجام می شود.

-در تصاویر اپتیک خطاهای مرسوم شامل رادیومتری و نویز، راه راه شدگی، خطوط اسکن (کنتراست)، برازش درجه معادله تطبیق هندسی (درجه ۱ میانمایی خوب، درجه ۲ اغلب دیده می شود و بیشتر مناسب نیست) دیده می شود. در اینجا برخی از این خطاها وجود دارد و برخی صرفاً" در داده های راداری دیده می شود. به عنوان مثال در رادار پیرو فوق خطای Burst (نوعی راه راه شدن) وجود داشت. نرم افزار SAR SCAPE اغلب این خطا را به صورت خودکار (Debrust) از بین می برد. اما برخی اوقات این خطا در شبه تصویر راداری دیده می شود. در این حالت یا باید تصویر پیرو را عوض کرد و یا از آن چشم پوشی کرده و با تمهیداتی که در فرایند پردازش انجام شد اثر ناچیز آن در نتایج حذف شد. لازم به ذکر است این خطا مختص تصاویر Sentinel می باشد لذا هر نوع داده راداری ممکن است خطاهای خاص خود را نیز داشته باشد.

- خطای عدم تطابق محل گذر آزیموت (Foot Print)

دو تصویر فوق دارای عدم تطابق بالا بودند بطوریکه حتی نرم افزار اجازه پردازش نداد. لذا به جای برج ۳ برج ۵ سال ۲۰۱۵ با برج ۱۲ سال ۲۰۱۶ انتخاب و آنالیز شد. این فرایند برای هر دو داده راداری تکرار می شود.

-تصحیح و تبدیل هندسی

تصحیح و تبدیل هندسی به منظور قرارگرفتن یک داده راداری یا اپتیک روی زمین و اصلاح خطاهای چرخشی و شیفت افقی و عمودی استفاده می شود. بدین منظور روش های مختلفی را می توان نام برد. اما این روش ها برای تصاویر اپتیک

می تواند در ۲ کلاس تصویر به تصویر و روش تصویر به نقشه طبقه بندی نمود. در این جا روش تصویر به نقشه ( Image to Map) با توجه به هدف طرح استفاده شد. نقشه مورد نظر مدل رقومی ارتفاع (DEM) محاسبه شده از SRTM می باشد. این نقشه با تراز ۳۰ متر نمونه (Resample) شده است. سایر روش ها شامل تصحیح و تبدیل هندسی دو روش انطباق هندسی تصویر به هندسه نقشه (Rectification) یا ژئورفرنس و روش ارتوژئورفرنس (Orthorectification) که در آن تصویر از یک پروژکسیون ارتو (عمودی) نیز برخوردار می شود. جهت تطبیق هندسی (Rectification) تصاویر اپتیک از دو کلاس پارامتری (مداری و غیرمداری) و غیرپارامتری استفاده می شود. روش های پارامتری که بسیار پیچیده نیز هستند در حال حاضر اغلب نتایج مناسبی را ارائه نداده اند. در این خصوص ممکن است از اطلاعات dgn لایه های رقومی نقشه های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری به عنوان اطلاعات نظارت نشده و اطلاعات برداشت میدانی از نقاط کنترل زمینی (GCP) با برداشت میدانی GPS شامل تقاطع ها و نقاط شاخص (کنتراست بالا، کوچک، ثابت در زمان) به عنوان داده های نظارت شده استفاده شد. تعداد این نقاط باید آقدر باشد که برای تشکیل یک معادله چند جمله ای درجه اول کافی باشد. در طرح حاضر با استفاده از تصاویر فرینچ شده، DEM و تصاویر راداری بازتابش (Power) عملیات تطابق با حداقل ۱۰ نقطه در مناطق پست صورت پذیرفت. در تصاویر اپتیک به کمک مدل رقومی ارتفاع دقیق می توان ایجاد تصویر ارتو (Orthorectification) نمود که با عملیات فوق نباید اشتباه گرفته شود.

### Rectification (تطبیق هندسی)

در تصاویر اپتیک جهت بررسی و ارزیابی تطبیق هندسی پس از اینترپولاسیون با یک معادله مناسب (درجه آن باید ارزیابی و تعیین شود)، خطای باقی مانده (Residual) هندسی شامل خطای سیستماتیک یا شیفت در جهات طول و عرض (x,y) یا توزیع مکانی خطا (بردار خطا) در کنار جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) کنترل می شود. پس از عملیات اینترپوله (درون یابی)، تبدیل نسبی یا Affine Transformation صورت می گیرد. در این حالت دو تغییر اصلی تصویر باید کنترل شود. این موضوع در تصاویر راداری ممکن است به اشکال زیر دیده شود:

#### الف- تغییرات هندسی

این حالت که نتیجه آن اصلاح شیفت و چرخش می باشد ممکن است باعث تغییرات نامناسب دیگری چون کشیدگی و واکشیدگی، تغییر اندازه و تعداد پیکسل نیز باشد. در تصاویر راداری و روش فوق نیازی به این کنترل نیست.

#### ب- تغییرات رقومی پیکسل ها (DN) در اثر نمونه گیری مجدد (Resampling)

این حالت بسیار حساس است. باید معادلات انتقال و اینترپوله طوری انتخاب شود که کمترین انحراف DN در اثر فیلترگذاری مشاهده شود. اگرچه می توان صحت سنجی هندسی یا موقعیت عوارض را با روش انطباق (Overlay) وکتور-رستر کنترل و تایید یا رد نمود.

## - Orthorectification (تطبیق هندسی عمودی)

قسمت عمده خطاهای هندسی با روش تبدیل نسبی نقاط کنترل گام قبل اصلاح می شود. اما اختلاف پستی و بلندی، دوری از خط نادیر (زاویه دید سنجنده) و اثر کرویت زمین باعث خطای جابجایی (Relief Displacement) شده بطوریکه حتی با معادلات درجه بالای هندسی اصلاح نمی شوند. در این خصوص استفاده از مدل DTM یا تفکیک تصاویر هر دشت ناگزیر است. تنها پس از این اصلاحات یا تدابیر می توان از داده های استخراج شده در پایگاه اطلاعاتی GIS استفاده نمود. در طرح حاضر با توجه به خطای اریب (Bias Error)، نوع تصویر و ریلیف منطقه مطالعه، موضوع تصحیح عمودی و جابجایی (Ortho) به صورت نسبی لحاظ شد اما خطای کرویت بر اساس GCP (نقاط کنترل زمینی) حاصل از DEM محاسبه شد.

## پردازش تصاویر رادار (RADAR Image Processing)

کلیه مستندات مدلسازی در مسیر Landsubsidence Fardis 95/ Report/Radar به صورت فایل های اصلی نرم افزار SAR SCAPE قرار گرفته اند. لذا از ذکر جزئیات آنالیز که اغلب به صورت فایل های کدینگ یا اطلاعاتی هستند به جز چند مورد نمونه جهت نمایش خود داری شده است. لازم به ذکر است که آنالیز تنها یک پارت (کل محدوده مرز زرد با ۴ پارت به نام IW2\_3 ، IW3\_3 ، IW3\_4 و IW3\_4 پوشش داده می شود) از رادار منطقه برای یک مرحله آنالیز (برج ۵ سال ۲۰۱۵ با برج ۱۲ سال ۲۰۱۶) برای داده های راداری اصلی و پیرو حدود ۲۳ گیگ فضا بدون لحاظ داده های خام (هر سال ۳،۵ گیگ) اشغال می کند. باتوجه به این موضوع مشخص است که فضای پردازش و نگهداری اطلاعات راداری بسیار زیاد می باشد. شکل زیر موقعیت تحت پوشش هر پارت را نسبت به مرز کلی دشت های البرز و دشت فردیس نشان داده است.

## - تداخل سنجی با روش INSAR

بسیاری از خطاها باتوجه به نوع داده مورد نیاز از رادار ممکن است اهمیت پیدا کند. مثلاً در این طرح خطاها و نویزهای (Noise) اتمسفری روی فاز تصویر اثر می گذارد. مقادیر فاز تصویر در آنالیز پدیده هایی مانند فرونشست بسیار اهمیت دارد. این نوع خطاها ممکن است در مرحله پردازش بررسی، اصلاح یا حذف شود.





موقعیت ۲ پارت رادار (مرز قرمز) و مرز دشت های البرز (مرز زرد) با فردیس  
(پارت ۳ و ۴ متناظر با دو پارت ۱ و ۲ در کنار و سمت چپ قرار می گیرند)

اختلاف فاز کل دو داده راداری در زمان های  $t_1$  و  $t_2$  از تفاضل مقدار فاز هر یک معادل  $\phi_1$  و  $\phi_2$  و رابطه زیر محاسبه می شود:

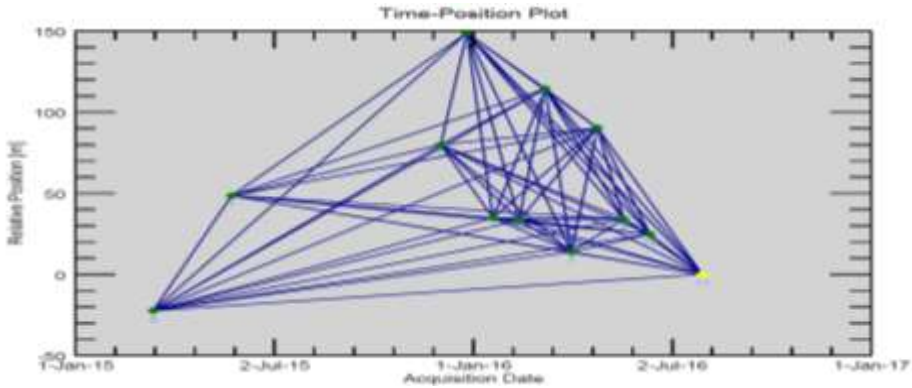
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$$

مقادیر فاز هر تصویر بسته به شرایط محیطی، عارضه و زمان ممکن است شامل سایر فازهای توپوگرافی، اتمسفر (اثر یونوسفر و تروپوسفر که باعث ناهمدوسی به ویژه در طول موج های پایین می شود)، نویز، فاز مداری، فاز انواع جابجایی در جهت دید سنجنده (LOS) باشد. همچنین ممکن است فاز نویز خود به سایر مولفه ها نیز تقسیم شود و تا ۷ نوع فاز نیز بررسی شود. در صورت می بایست این خطاها به تفکیک محاسبه و سپس از فاز کل کسر شده تا فاز جابجایی در خط دید سنجنده محاسبه شود. آنالیز خود دارا چندین روش است. در این پروژه روش تداخل سنجی تفاضلی یا DINSAR جهت آنالیز فاز انتخاب شد. این روش بر اساس رابطه زیر پایه ریزی شده است:

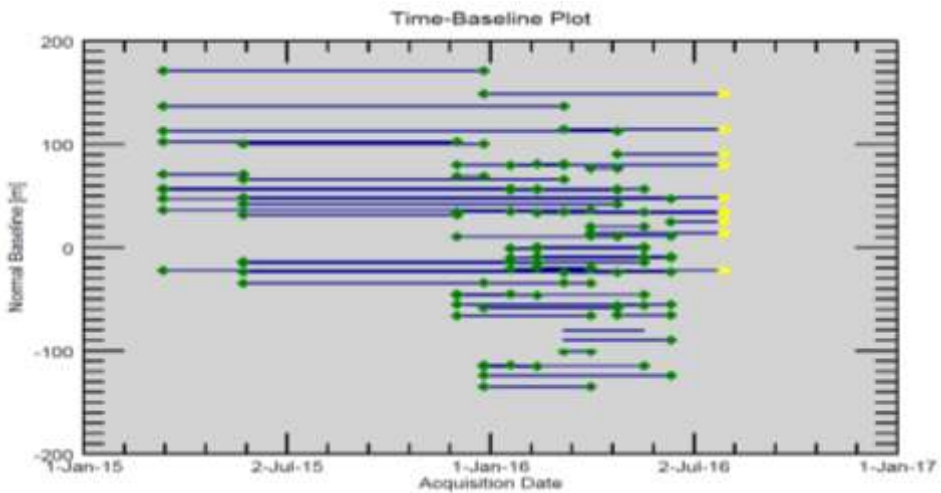
$$\phi_{Total} = \phi_{topo} + \phi_{am} + \phi_{orbit} + \phi_{noise} + \phi_{def} / LOS$$

پس از این گام می بایست فاز جابجایی مورد نظر که در اینجا جابجایی عمودی است محاسبه و سپس نقشه های لازم استخراج گردد. مراحل کار برای هر پارت منطبق و برای جفت داده ماهواره ای راداری مستر و پیرو ممکن است انجام شود اما ابتدا باید پارت های مناسب به شرح زیر انتخاب گردد:

- انتخاب پارت های منطبق، پارت های غیر منطبق قابل آنالیز نیستند. در نمودار های ۱ و ۲ همانطور که مشخص است مقدار فاصله زمانی و مکانی ماهواره های مستر و پیرو ترسیم شده است. پس از این گام باید فوت پرینت دو تصویر نیز کنترل شود که در صورت مناسب بودن عمل آنالیز آغاز می گردد.



نمودار ۱: موقعیت نسبی زمانی داده های راداری



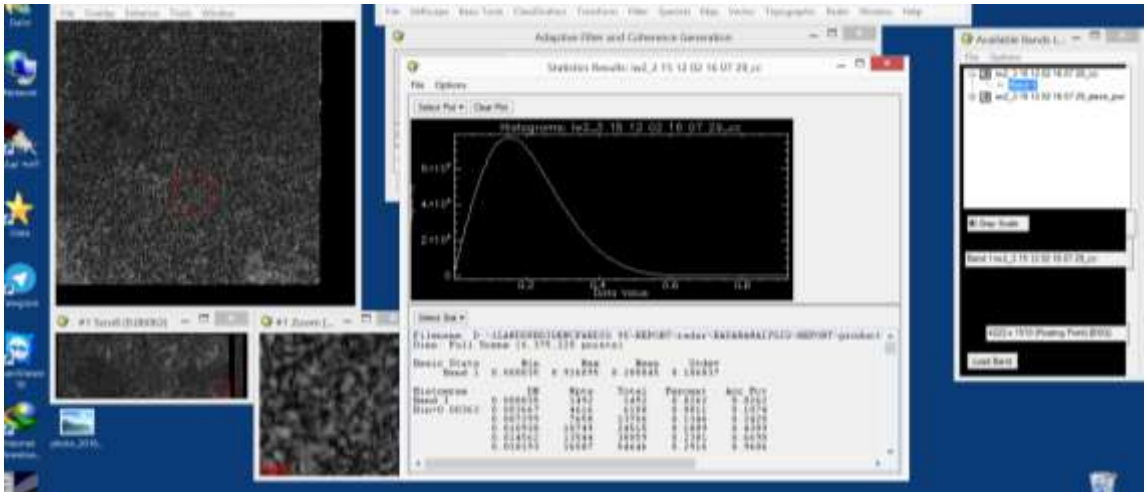
نمودار ۲: موقعیت مکانی زمانی داده های راداری

بر این اساس تصویر پیرو با کد ۱۲ و تصویر اصلی با کد ۳ از جدول ۱ انتخاب شد.

- تولید تداخل نگار در این گام بر اساس الگوریتم تفاضلی تداخل سنجی، نقشه های رستری با حجم زیاد از اطلاعات راداری شامل اختلاف فاز کل، فاز توپوگرافی و فاز باقی مانده به صورت رستری تولید می گردد.

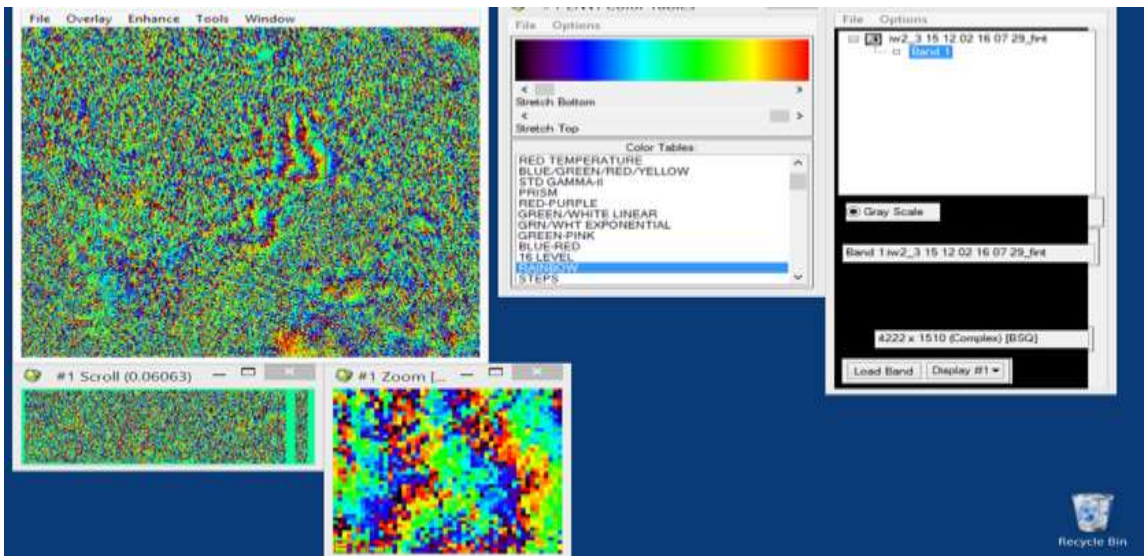
- تولید فایل همدوسی و فیلتر گذاری

حال از روی نقشه های گام قبل می توان به کمک عملیات فیلتر گذاری و الگوریتم های همبستگی تولید فایل های همدوسی و فیلتر شده نمود. همانطور که از شکل زیر و نتایج آنالیز آماری پیکسل های دو تصویر راداری نیز مشخص است مقدار همدوسی بین دو داده حدود ۰,۲ می باشد. این مقدار همدوسی باتوجه به فاصله زمانی دو سری داده بدیهی است.



نمایش صفحه آماری محاسبات همدوسی و فیلترگذاری به عنوان نمونه-پارت ۱

باتوجه به پذیرش حداقل همدوسی می توان نقشه فاز باقی مانده یا جابجایی در خط دید سنجنده را با اعمال فیلتر به نقشه ای که دارای سیکل تغییرات رنگی مشخص تری نام فرینچ است تبدیل نمود. در شکل زیر مفهوم این نقشه فرینچ نمایش داده شده است.



نمایش نقشه فیلتر شده و فرینچ جابجایی پارت ۱ به عنوان نمونه در مدل SARscape

همانطور که از شکل بالا و پنجره Fint\_ و یا Zoom نیز مشخص است دو سیکل فرینچ نمایان است. در رادار Sentinel\_1 هر فرینچ معادل ۲٫۸ سانتی متر جابجایی در افق دید سنجنده است. مولفه ای از این جابجایی به سمت پایین مورد نیاز و سوال طرح حاضر می باشد.

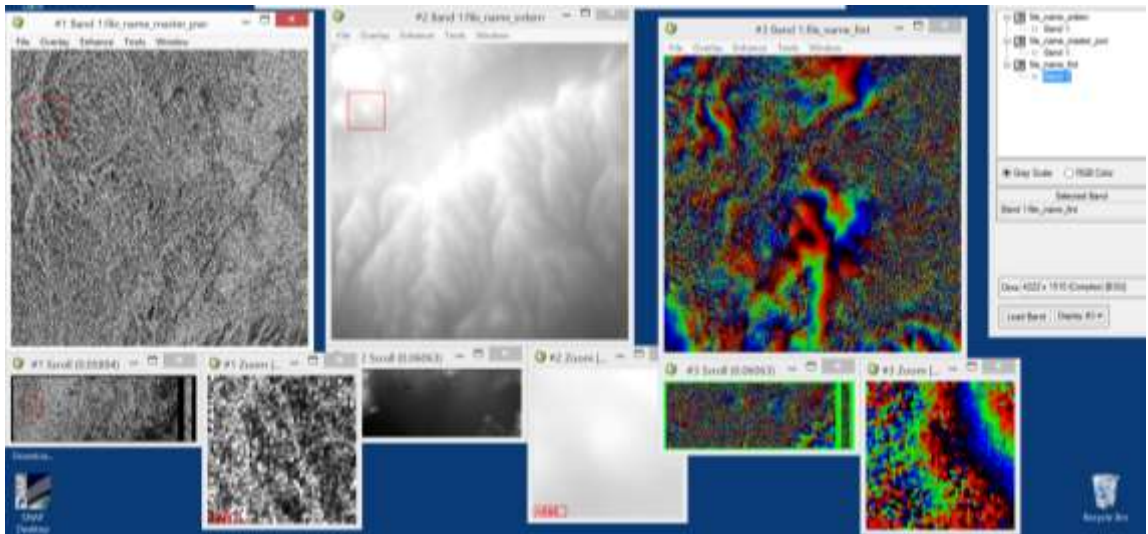
#### - واکاوی فازها

در واقع در این گام تولیدات فازهای محصور گام قبل را از دامنه صفر تا ۱ یا  $2\pi$  تا صفر به کمک مضرپی از  $n$  تبدیل یا واکاوی می کند. این نقشه به خصوصیات جابجایی بسیار نزدیک است. اما این جابجایی در افق دید سنجنده می باشد و مولفه عمودی آن که در اثر فرونشست ایجاد شده مورد نیاز طرح می باشد. این مولفه و همچنین اصلاحاتی که در ادامه نیاز است در ادامه فرآیند پردازش می گردد.

#### - پالایش و حذف اثر کرویت زمین

در این مرحله می بایست به کمک نقشه رستری فرینچ و نقشه مدل ارتفاعی اسلانت رنج (slant range) و نقشه پاور شدت تابش اقدام به تهیه نقاط GCP (حداقل ۱۰ نقطه) جهت تصحیح اثر کرویت و حذف و پالایش برخی

از خطاهای باقی مانده خاص راداری همچون خطای سایه، کوتاه شدگی و روی هم افتادگی عوارض نمود. در شکل زیر فرایند انتخاب نقاط را جهت پالایش و حذف اثر کرویت با ۳ نقشه رستری در پارت ۲ نمایش می دهد.



فرایند انتخاب نقاط GCP از نقشه های فرینج-Srdem و بازتابش در مدل SARscape

#### - مرحله تبدیل فاز و ژئوکدینگ

این مرحله در فرآیند آنالیز فاز بسیار مهم بوده و در واقع گام آخر تبدیل جابجایی می باشد. در این مرحله نقشه های رستری جابجایی در افق دید سنجنده به نقشه های تغییر ناشی از فرونشست مورد نظر هدف طرح تهیه می گردد. در این خصوص سایر اطلاعات اضافه بر نقشه در بند مربوطه ارائه شده است.

روش شناسی بالا برای تمام پارت ها و سری های زمانی منطبق انجام می گردد. خروجی روند مذکور اطلاعات مورد نیاز طرح را جهت برآوردی از فرونشست و روند آن به همراه اطلاعات اضافی مانند مقایسه با داده های هیدروگرافی سفره ایجاد می نماید. میزان دقت روش شناسی حاضر در بند صحت سنجی ارائه شده است.

#### برآورد مقدار و نرخ خطی فرونشست منطقه البرز

نرخ خطی در واقع بر اساس آنالیز یک دوره زمانی عبور ۲ ماهواره (در اینجا ۲۴۰ روز) محاسبه می شود. محدودیت های فنی و اطلاعات موجود روی این بازه اثر می گذارد. در هر صورت این دوره ممکن است مربوط به پر و خالی شدن مخزن باشد. لذا ممکن است نشست های کم مربوط به شرایط الاستیک و یا پلاستیک باشد. تفکیک این نوع فرونشست صرفاً از طریق آنالیز روند فرونشست در بند متعاقب و در صورت وجود داده های کافی امکان پذیر است. در این بند سعی شده است تا نتایج آنالیز

همچون نقشه های هم تراز فرونشست از نقشه های رستری جابجایی با رنگ بندی کلاس های فرونشست، پروفیل از مسیرهای خاص، نمودار و جداول آماری و نقاط حداکثر فرونشست هر پارت با آدرس روی Google مشخص گردد.

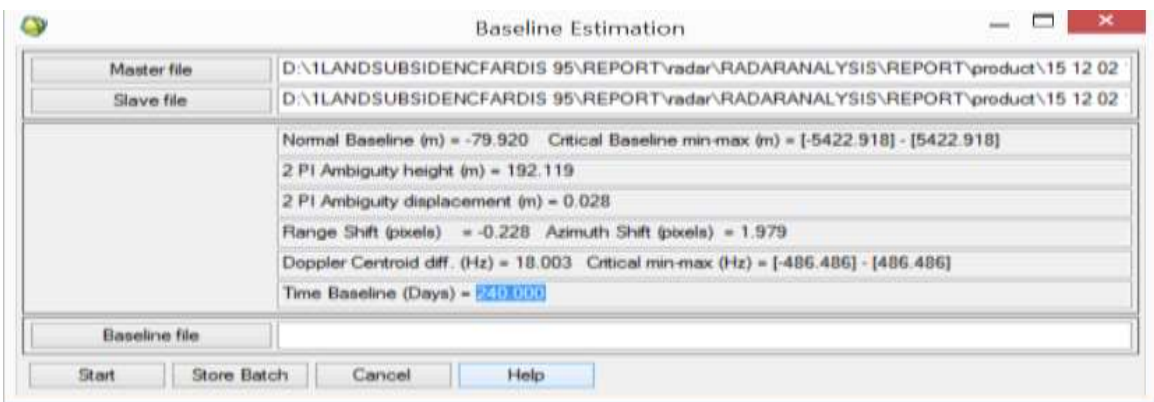
پارت ۲ (Part 2) از شکل ۳: مقدار و نرخ خطی فرونشست شهرستان فردیس

-موقعیت IW2\_4 برای دو ماهواره مستر و پیرو مورخ ۱۵ ۱۲ ۰۲ و ۱۶ ۰۷ ۲۹ (میلادی) در شکل زیر روی تصویر لندست نسبت به موقعیت شهر فردیس و کاربری محدوده نمایش داده شده است.



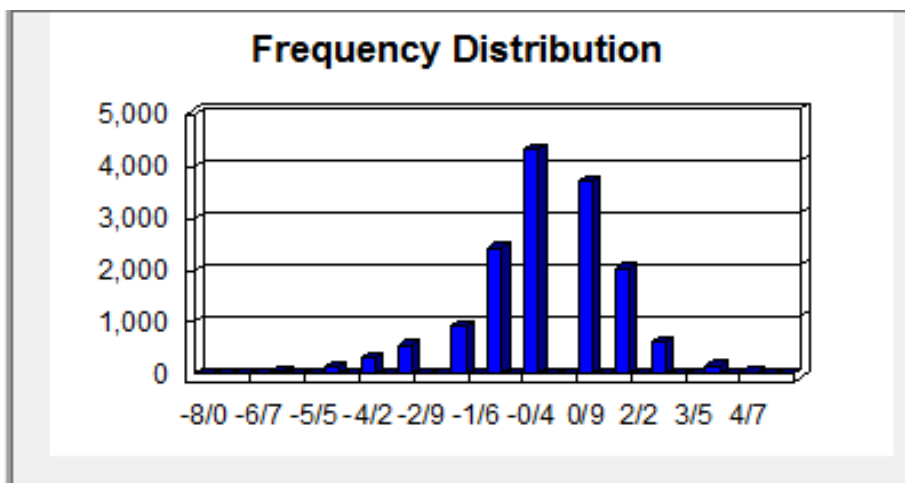
مرز دشت ها (رنگ زرد) و مرز داده های راداری IW2\_4 (رنگ قرمز)

مقدار بیشینه فرونشست در محدوده مرز مشترک داده های راداری IW2\_4 با مرز دشت های محدوده طرح در شکل بالا حدود ۸ سانتی متر طی ۲۴۰ روز از مورخ ۱۵ ۱۲ ۰۲ تا ۲۷ ۰۹ ۲۰۱۶ (علامت ستاره) محاسبه شد. مختصات این نقطه معادل  $35^{\circ}45'25'' N$  و  $50^{\circ}58'33'' E$  بوده که موقعیت آن روی شکل بالا با علامت ستاره و روی شکل ۱۲ مطالعات البرز مشخص شده است. با توجه به شکل ۸ البرز و مولفه زمانی ۲۴۰ روز دو ماهواره مستر و پیرو حداکثر نرخ فرونشست فعلی در محدوده این نقطه ۱۲ سانتی متر در سال می باشد.



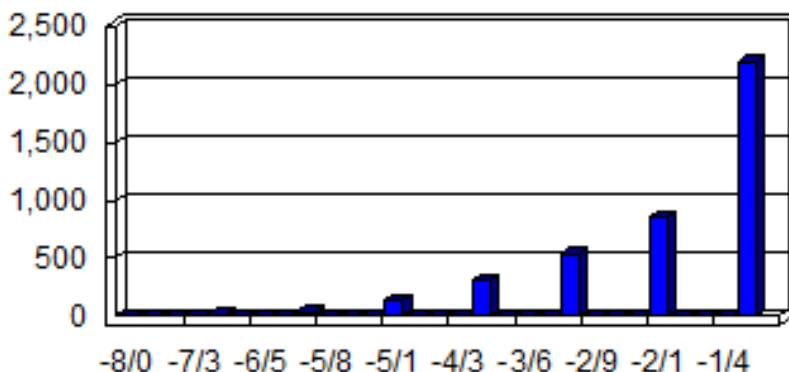
شکل ۸ البرز: حدود فاصله زمانی - مکانی عبور ماهواره ها و دوره محاسباتی سری ۳ با ۱۲

مقدار حداکثر فرونشست مذکور تنها مربوط به یک نقطه و با مساحت بسیار کم و طول ناچیز ۱,۲ کیلومتر مرتبط است لذا مقدار دامنه فرونشست در این محدوده با توجه به نمودار شکل ۹ با لحاظ مناطق دارای برآمدگی و یا بدون فرونشست بین ۰,۴ تا ۴ سانتی متر در دوره زمانی فوق با بیشترین فراوانی می باشد.



شکل ۹ البرز: هیستوگرام توزیع فرونشست و برآمدگی در محدوده IW2\_4 بر حسب سانتی متر

## Frequency Distribution



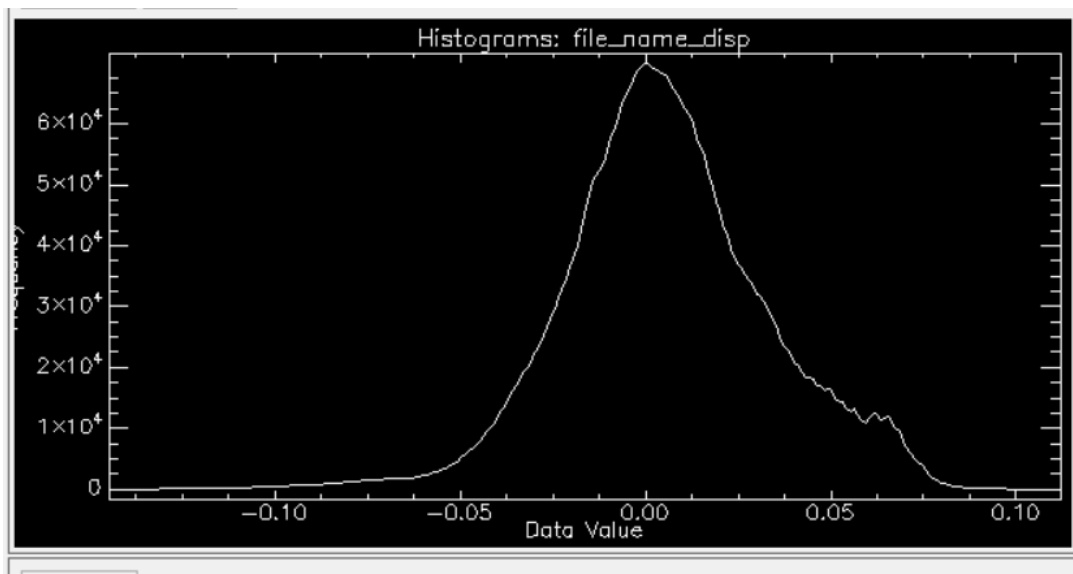
شکل ۱۰ البرز: هیستوگرام توزیع فرونشست در محدوده IW2\_4 بر حسب سانتی متر

مقدار متوسط فرونشست محدوده IW2\_4 بر اساس شکل ۹ و ۱۰ بدون لحاظ مناطق دارای تغییرات صفر و برآمدگی، معادل ۲ سانتی متر با انحراف معیار ۱,۲ سانتی متر در دوره ۲۴۰ روزه مذکور می باشد. لذا متوسط نرخ فرونشست خطی این محدوده طی سال اخیر حدود ۳ سانتی متر در سال گزارش می گردد.

نمودار شکل ۱۱ مقدار توزیع فرونشست را با لحاظ محدوده آبخانه بیرون دشت فردیس (شکل ۷) نشان می دهد. همانطور که مشخص است خارج از محدوده دشت های البرز حداکثر فرونشستی حتی تا ۱۱ سانتی متر نیز طی ۲۴۰ روز در دوره مذکور با نرخ حدود ۱۶,۷ سانتی متر در سال مشاهده می گردد. از مقایسه تصویر لندست شکل ۷ با نتایج رستری تولید شده از رادار در محدوده نیز مشخص می شود عمده فرونشست ها مربوط به کاربری های از نوع کشاورزی آبی متمرکز شده است.

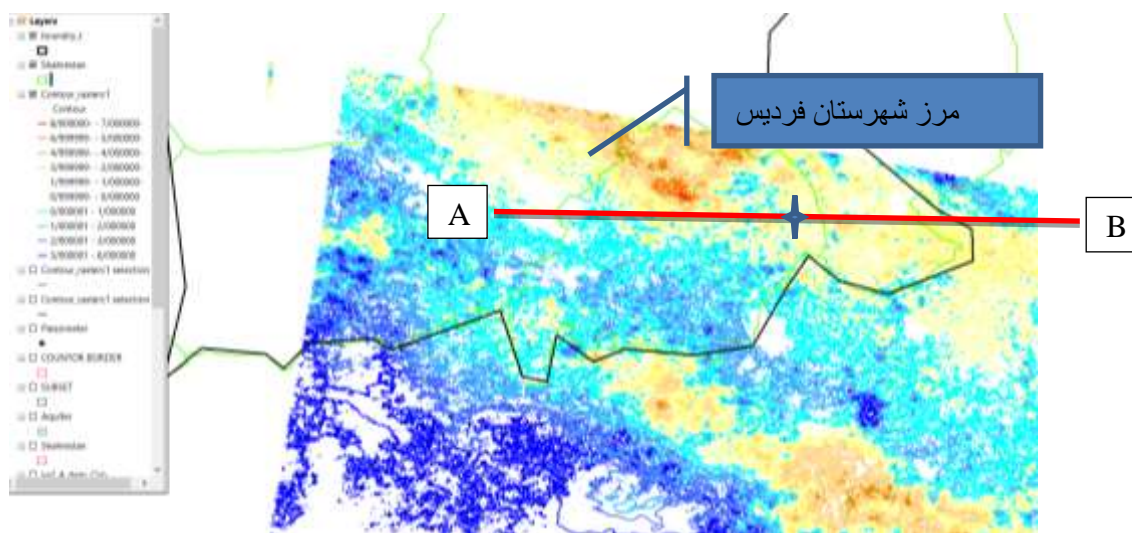
در شکل ۱۲ مناطق دارای فرونشست با رنگ های زرد و کرم روشن (فرونشست کم) تا قرمز پر رنگ (فرونشست زیاد) مشخص شده است. از مقایسه شکل ۱۲ و تصویر لندست شکل ۷ نیز مشخص است که عمده مناطق با فرونشست کم و زیاد در داخل محدوده طرح و بیرون محدوده البرز با کاربری های اراضی کشاورزی آبی و چاه های بهره برداری منطبق شده است.





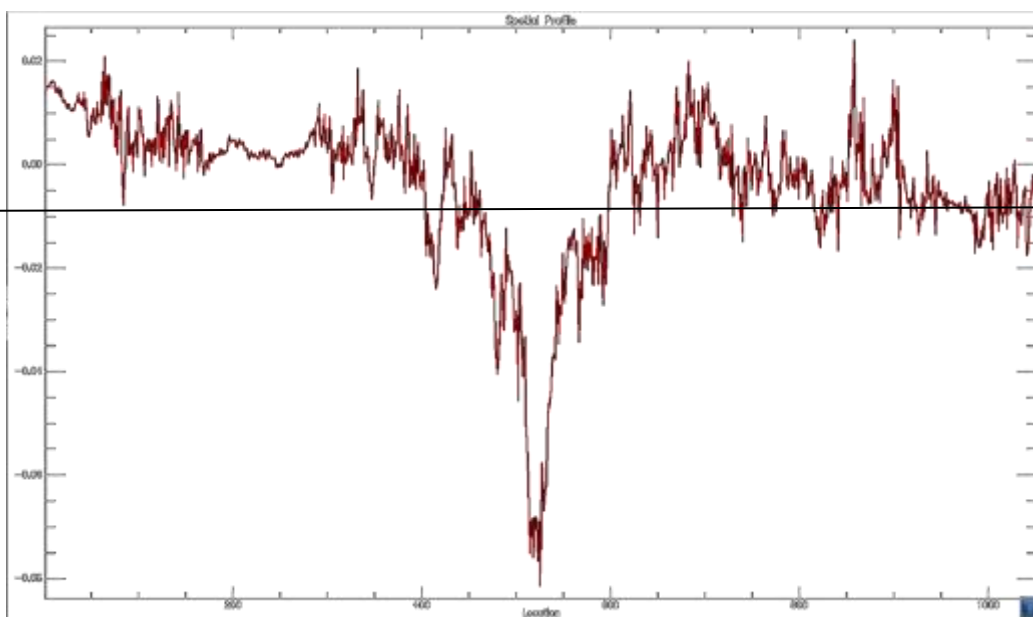
شکل ۱۱ البرز: هیستوگرام توزیع فرونشست با لحاظ آبخانه محدوده IW2\_4 در بیرون از طرح بر حسب متر

پهنه ها و خطوط هم فرونشست در محدوده و دوره مذکور در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲ البرز: خطوط هم فرونشست محدوده آبخانه های شهرستان فردیس بر حسب سانتی متر طی ۸ ماه اخیر

جهت درک بهتر از وضعیت توپوگرافی محدوده IW2\_4 روی شکل ۱۲ پروفیل AB به شرح شکل ۱۳ زده شد.



شکل ۱۳ البرز: پروفیل مکانی AB تغییرات فرونشست محدوده IW2\_4 بر حسب پیکسل (۲۵ متر)

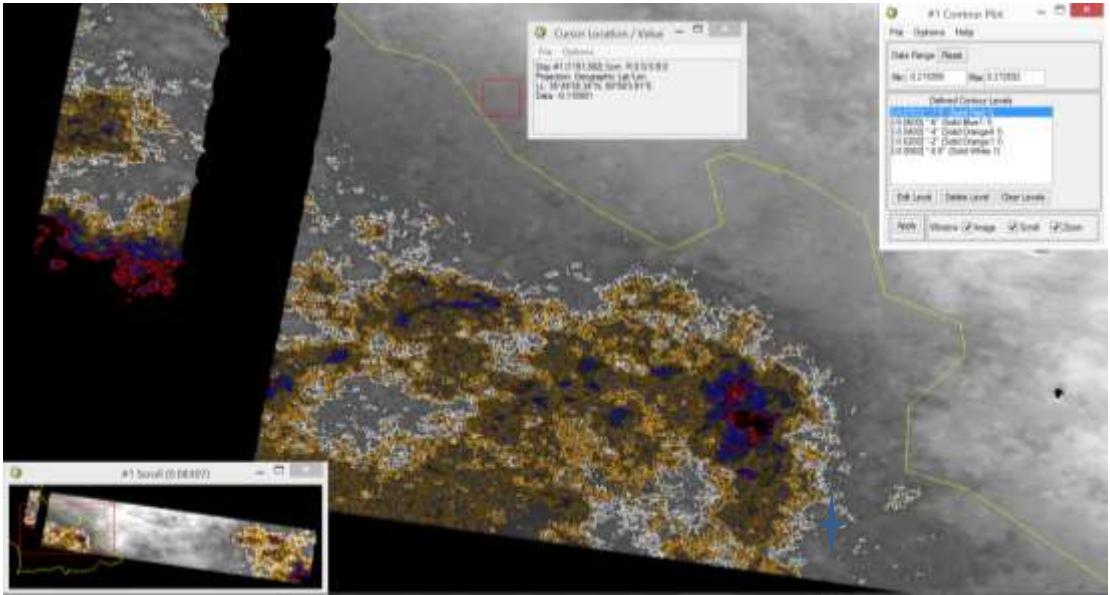
همانطور که از شکل ۱۳ نیز مشخص است هرچه از مرکز رنگ قرمز نقشه شماتیک شکل ۱۲ فاصله گرفته می شود مقدار فرونشست کم و کمتر می گردد.

پهنه بندی مقادیر هم فرونشست آبخانه های محدوده فردیس شامل کرج، هشتگرد (ساوج بلاغ) و نظر آباد

باتوجه به شکل ۷ دشت های محدوده فردیس داخل مرز زرد رنگ نمایش داده شده اند. باتوجه به روش شناسی مذکور نقشه رستری محدوده دشت های فردیس برای یک پارت بالای فردیس و دو پارت سمت چپ تهیه و سپس نقشه هم فرونشست ۸ ماهه اخیر هر پارت تهیه و ترسیم شد. بر این اساس مقدار فرونشست ۸ ماه اخیر و متوسط نرخ خطی فرونشست سالانه برای هر پارت به شرح ذیل برآورد شد:

پارت ۱ (Part 1) از شکل ۳: (بالای دشت کرج و بخش کوچکی از ساوجلاغ)

همانطور که از راهنمای شکل ۱۴ نیز مشخص است بیشترین مقدار فرونشست طی ۲۴۰ روز گذشته به میزان ۱۱ سانتی متر در نقطه با مختصات  $35^{\circ}48'38'' N$  و  $50^{\circ}58'04'' E$  (علامت ستاره) با ۱۶,۷ سانتیمتر بیشینه سالانه رخ داده است.



شکل ۱۴ البرز: شماتیک نقشه رستری و خطوط هم فرونشست محدوده IW2\_3 پارت ۱

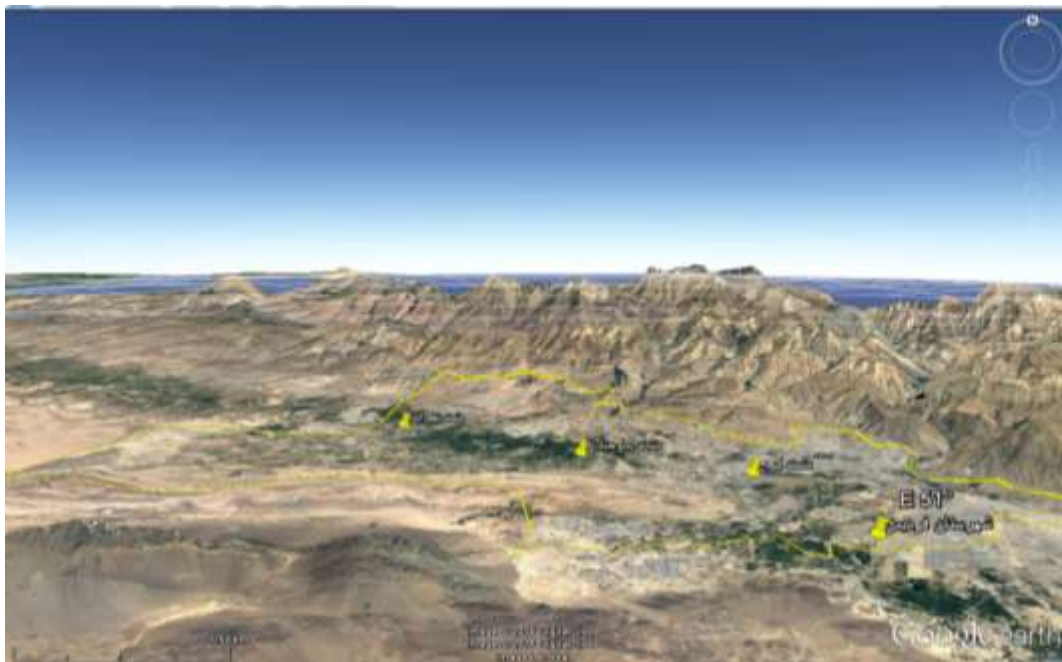
دامنه متوسط فرونشست محدوده فوق از ۰,۶ سانتی متر (مرز سفید) تا بالای ۷,۵ سانتی متر (مرز قرمز) با متوسط ۳ سانتی متر طی ۲۴۰ روز اخیر در نوسان است. لذا متوسط سالانه فرونشست خطی طی سال اخیر در محدوده پارت ۱ حدود ۴,۵ سانتی متر در سال برآورد و گزارش می شود.

سایر پارت ها در اینجا گزارش نشد و به صورت نقشه کلی شکل ۱۷ نتایج ارائه شد.

### جمع بندی نتایج (جدول و نقشه پیوست)

مقدار فرونشست خطی، طی یک سال اخیر در دشت شهرستان فردیس و محدوده ای از دشت میانی کرج (شکل ۱۲ پارت ۲) به طور متوسط حدود ۳ سانتی متر در سال، در محدوده بالایی دشت کرج و بخش کوچکی از ساوج بلاغ (شکل ۱۴ پارت ۱) حدود ۴,۵ سانتی متر در سال و در دو پارت کناری (شکل ۱۵ پارت ۳ و ۴) شامل محدوده گوشه پایینی دشت کرج، بخش عمده ساوج بلاغ و کل دشت

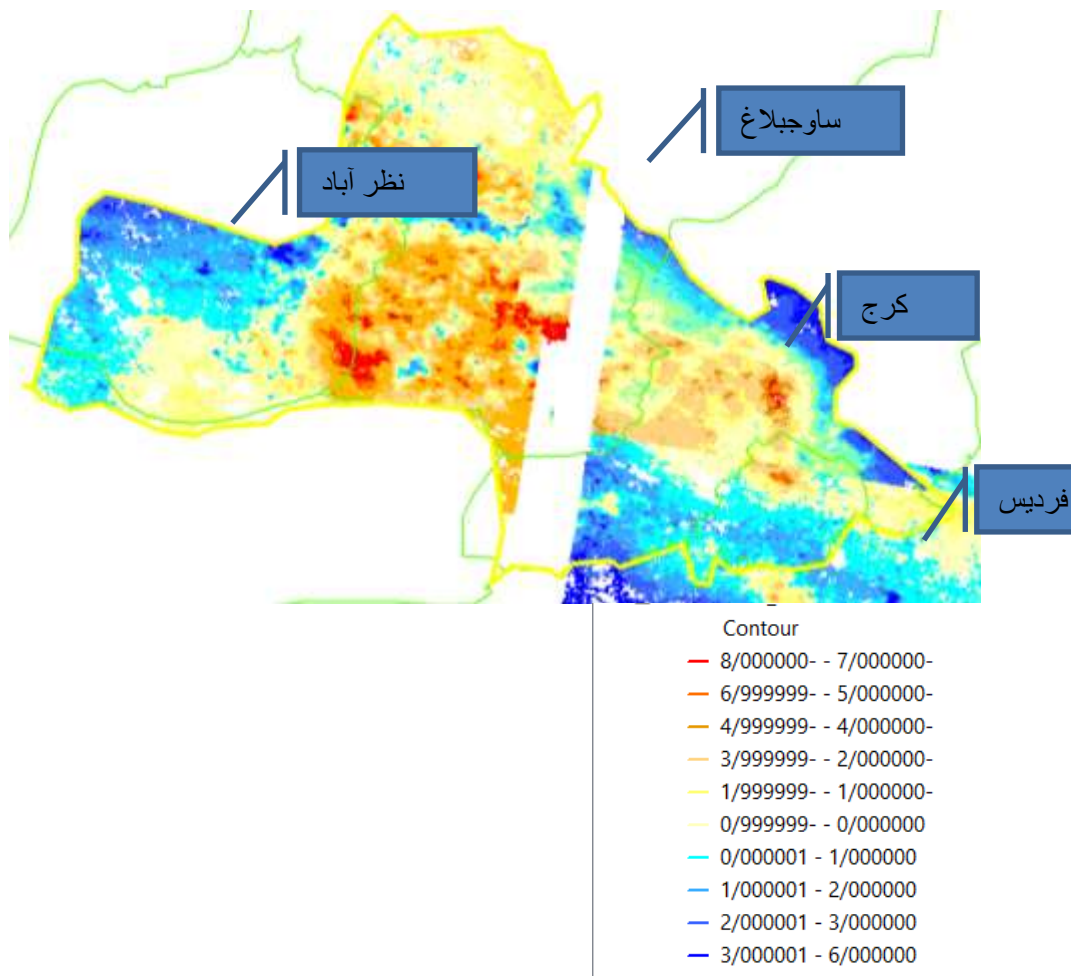
نظر آباد حدود ۵ سانتی متر در سال برآورد و گزارش می شود (شکل ۱۶ جهت مشاهده موقعیت دشت ها و اراضی کشاورزی و جدول و نقشه پیوست).



شکل ۱۶ البرز: شماتیک محدوده دشت ها و اراضی آبی استان البرز

بدیهی است که نرخ بیشینه فرونشست در منطقه بسیار بیشتر می باشد. در این خصوص نرخ بیشینه فرونشست در محدوده فردیس حدود ۱۲ سانتی متر در سال (شکل ۱۲ البرز)، در بالای دشت فردیس و داخل دشت کرج حدود ۱۶,۷ سانتی متر در سال (شکل ۱۴ البرز) و حدود ۱۳ سانتی متر در سال (شکل ۱۵ البرز) برای دو دشت ساوج بلاغ و نظرآباد تعیین و گزارش می گردد.

شکل ۱۷ البرز جهت مقایسه بین دشت ها مقدار خطوط هم فرونشست کل محدوده را نمایش داده است. مرز زرد معرف کل محدوده طرح و مرز سبز معرف مرز آبخانه شهرستان مربوط می باشد.



شکل ۱۷ البرز: مقدار هم فرونشست دشت های منطقه طرح بر حسب سانتی متر طی ۸ ماه گذشته از مرداد ۱۳۹۵ به قبل

رنگ های به سمت آبی اغلب نشان از پستی و بلندی همراه بالآمدگی زمین یا بدون فرونشست و رنگ های به سمت کرم و قهوه ای تا قرمز نشان از فرونشست بیشتر هستند. اگر تنها معیار اصلی پهنه بندی خطر مقدار فرونشست باشد همانطور که از راهنمای شکل ۱۷ نیز قابل تفسیر است بیشترین نشست مربوط به محدوده ساوجبلاغ (قرمز رنگ) می باشد. این موضوع به لحاظ پهنه و فراوانی نیز با محدوده دشت مذکور همخوانی دارد. لذا دشت ساوجبلاغ صرفاً از منظر مقدار فرونشست از سایر دشت های محدوده طرح بحرانی تر گزارش می گردد. با این وجود این موضوع در بند مخاطرات باتوجه به معیارهای دیگر نیز ارزیابی می گردد. همچنین باتوجه به اینکه این مقدار فرونشست مربوط به سال اخیر است لذا نرخ فرونشست حال حاضر دشت نیز تقریباً از همین الگو تبعیت می نماید.

## صحت سنجی و دقت نتایج راداری روش INSAR

باتوجه به اینکه روش مذکور در حال حاضر در جامعه دانشگاهی در حال بررسی می باشد لذا صحت سنجی نتایج قبل از کاربردی شدن ضروری است. در این خصوص از روش های زیر جهت کنترل نتایج استفاده شد:

۱- استفاده از نتایج مطالعات پهنه بندی فرونشست دشت های کشور- سازمان زمین شناسی کشور



شکل ۱۸ البرز: مقدار بیشینه نرخ فرونشست زمین در تعدادی از دشت های کشور تا سال ۱۳۸۷

همانطور که از شکل ۱۸ نیز مشخص است فرونشست دشت ساوجبلاغ که با بخشی از مطالعات حاضر نیز مشترک است در سال ۱۳۸۷ نرخ بیشینه ای حدود ۲۲ سانتی متر در سال داشته است. در مطالعات حاضر مقدار بیشینه نرخ حدود ۱۳ سانتی متر در سال (شکل ۱۵) برای دو دشت ساوج بلاغ و نظرآباد برآورد شد. علت این اختلاف مربوط به تغییر شرایط تشکیلات آبخانه از حدود الاستیک به محدوده پلاستیک می باشد که می تواند هشداری از شرایط بحرانی تشکیلات محدوده البرز و ضرورت عملیاتی شدن طرح های علاج بخشی باشد. در واقع باتوجه به افت متوالی تراز سفره در دو دهه اخیر همواره لایه های با بفت ریز به تدریج تحکیم یافته و مقدار فرونشست نیز کم می شود. برای جلوگیری از این شرایط بغرنج تغذیه سفره ها و کنترل برداشت ها ناگزیر است.

در جنوب باختر تهران بزرگ، اندازه گیری های انجام شده توسط سازمان نقشه برداری کشور نشستی به میزان حدود یک ونیم متر را در ۹ سال گذشته در منطقه ۱۸ و ۱۹ شهرداری و متوسط ۱۶۶ سانتی متر به صورت سالانه نشان داده است. بر این اساس اعداد آنالیز رادار طرح حاضر در دامنه منطقی قرار گرفته است اما نمی توان بر اساس این اطلاعات اظهار نظر قطعی نمود.

## ۲- استفاده از اطلاعات نقشه برداری طرح حاضر

باتوجه به اینکه نشست پیژومترها اساساً قابل انتظار نیست و لذا تنها می توان بر اساس محدوده زمین اطراف چاه هایی که لوله آنها سبز شده است صرفاً اظهار نظر کلی نسبت به فرونشست تاریخی از زمان تاسیس نمود. بر این اساس نتایج بازدید میدانی و نقشه برداری حاکی از آن است که لوله های سبز شده در سطح منطقه به دلیل به هم خوردگی محدوده هر چاه تحت شرایط خاکبرداری فعالیت های انسان و یا جابجایی های طبیعی خاک قابل ردیابی یا مشاهده نبودند و لذا تنها روش صحت سنجی داده های روش آنالیز راداری با INSAR استفاده از داده های ثبت نشست زمین توسط سازمان نقشه برداری به شرح بند ۸-۳ می باشد. با این وجود نگاه کلی به مقادیر جدول شماره ۲ می تواند نگرش کلی نسبت به شرایط داشته باشد. زیرا عمده اختلاف تراز پیژومترها مربوط به روش اندازه گیری گزارش شده است.

کنترل شبکه پشته و دامنه و بررسی و تکمیل شبکه از شبکه

جدول شماره ۲: اختلاف تراز پیژومترها در محدوده البرز (عکس شماره ۳)

FID	مکان	CODE	مقیاس	X	Y	تراز سابق	CODE	مقیاس	X	Y	تراز جدید	تفاوت تراز	توضیح
1	شاه عباسی	4133	1369	49902	398291	1338/56	PJZ01	1395	489918	3982917	1337/845	-0.72	پهن دامنه
2	گلشهر	4133	1368	49483	398495	1281	PJZ02	1395	494589	3983981	1280/142	-0.838	سخت متر
3	بندگاه	4133	1368	49178	398844	1286/2	PJZ03	1395	481790	3988447	1/111	1285/089	سخت متر
4	حسن آباد	4133	1368	49158	398509	1253/2	PJZ04	1395	481589	3985088	1/582	1253/818	سخت متر
5	مهرشهر	4133	1370	48991	398092	5235/74	PJZ05	1395	489910	3980929	1/821	1233/819	سخت متر
6	چمن	4133	1384	49326	398048	1235/2	PJZ06	1395	483324	3980409	-1/209	1256/409	سخت متر
7	فرمانس	4133	1385	49920	395510	1251/8	PJZ07	1395	498340	3955386	2/87	1249/73	سخت متر
8	مرب آباد	4133	1368	48190	398569	1212/86	PJZ08	1395	481901	3985682	2/303	1250/757	سخت متر
9	راه شرف نامه	4133	1368	47990	398274	1246/8	PJZ09	1395	479904	3982740	-0/348	1247/148	سخت متر

## ۳- استفاده از اطلاعات IPGN سازمان نقشه برداری کشور

اطلاعات شبکه دائمی GPS کشور برای رصد تغییرات عمودی زمین قابل خریداری است. ادعای دقت اطلاعات IPGN در سطح ۰,۱ میلیمتر است. دقت ادعا شده روش و تصاویر راداری گزارش حاضر برای طول موج باند C باند حدود ۲,۷ تا ۱,۳ میلیمتر و به طور متوسط حدود ۵,۶ میلیمتر می باشد. شکل ۱۹ پراکنش و موقعیت نقاط IPGN کشور را نشان می دهد.



شکل ۱۹ البرز: پراکنش مکانی نقاط ثبات IPGN در داخل منطقه مطالعاتی

بر اساس شکل ۱۹ می توان از ۳ نقطه مکانی داده های ثبات IPGN با پراکنش مذکور، به منظور صحت سنجی نتایج راداری استفاده نمود. نقطه قرمز رنگ مربوط به داده های ایستگاه نجم آباد (NAJM) در ضلع غربی منطقه، نقطه سبز رنگ مربوط به داده های ایستگاه HSGD (هشتگرد) در ضلع شمالی منطقه و نقطه آبی رنگ مربوط به ایستگاه FOPM (فرودگاه پیام) در میانه منطقه می باشد.

- ارزیابی نتایج رادار بر اساس ایستگاه نجم آباد

مشخصات شناسنامه ای ایستگاه GPS دائمی نجم آباد شامل مختصات و سایر مشخصات فنی آن در جدول ۲ و شکل ۲۰ ارائه شده است.



جدول ۳: شناسنامه ایستگاه IPGN نجم آباد

شناسنامه ایستگاه دائمی GPS نجم آباد

نام کامل ایستگاه	تاریخ راه اندازی	کد استاندارد
نجم آباد	2005/04/23	NAJM

مختصات در سیستم WGS84 (تاریخ محاسبه: ۱۳۸۹)

NAJM	$\varphi$			$\lambda$			h
	35	51	3.64049	50	30	34.87334	
							1161.9583

تجهیزات مورد استفاده در ایستگاه

تاریخ	صفحه خورشیدی	سنسور هواشناسی	تیلت متر	گیرنده	آنتن
2005(113) – 2014(222)				ASHTECH UZ-12	ASH701945G_M
2014(320) – 999(999)	-	MET3A	-	SOUTH NETS8+	HXCGG486A

اطلاعات مورد استفاده در محاسبات

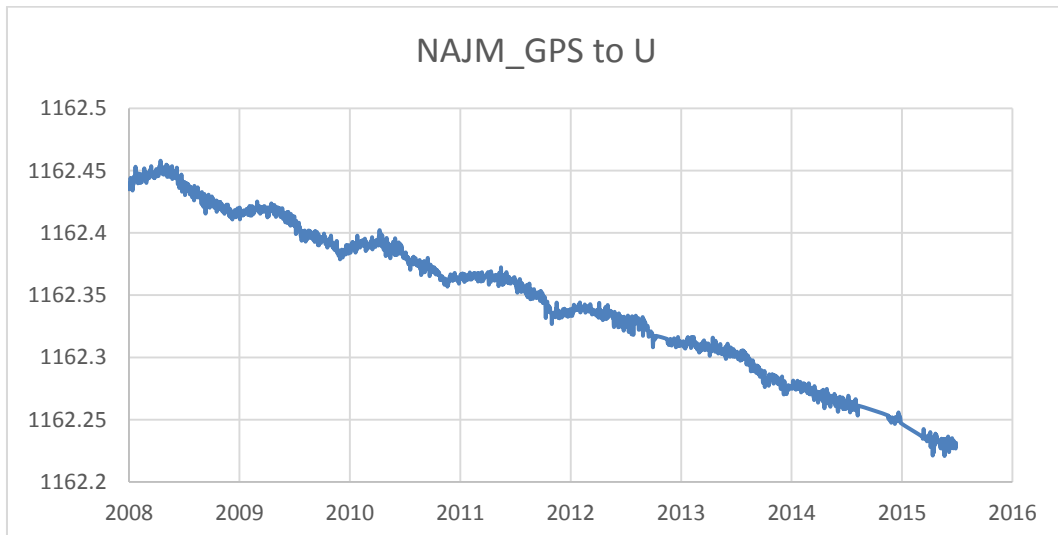
تاریخ	آنتن	Phase center offset(vertical) L2	Phase center offset(vertical) L1	ارتفاع آنتن
2005(113) – 2014(222)	ASH701945G_M	0.1202	0.0915	0.144
2014(320) – 999(999)	HXCGG486A	0.1421	0.1159	0.144

- داده ها بصورت ۲۴ ساعته و یا نرخ ۳۰ ثانیه پردازش می شوند.
- پردازش با استفاده از پارامترهای مداری دقیق (igs) انجام می شود.



شکل ۲۰: موقعیت ایستگاه GPS دائمی نجم آباد روی نقشه راه ها

تغییرات و نرخ درازمدت و سالانه فرونشست در محدوده ایستگاه نجم آباد بر اساس اطلاعات ثبت شده این ایستگاه در شکل ۲۱ ترسیم شد.



شکل ۲۱ البرز: روند و نرخ سالانه فرونشست در محدوده ایستگاه GPS دائمی نجم آباد (دلیری، ۱۳۹۵)

بر اساس نمودار شکل ۲۱ مشخص می شود که مقدار نرخ فرونشست سالانه در طی یک سال اخیر (سال ۲۰۱۴ تا اواسط ۲۰۱۵) در محدوده ایستگاه نجم آباد حدود ۳,۴- سانتی متر در سال است. در همین ایستگاه نرخ فرونشست درازمدت طی ۷,۵ سال گذشته (۲۰۰۸ الی ۲۰۱۴) حدود ۲,۷- سانتی متر در سال مشاهده و اندازه گیری شده است.

"نکته مهم از شکل ۲۱ این است که حد الاستیک در محدوده ایستگاه نجم آباد از سال های ۲۰۰۸ الی ۲۰۱۱ تا حدی حفظ شده به طوریکه با تغذیه، انبساط هرچند کم در تشکیلات دیده می شود. این شرایط بعد از سال ۲۰۱۱ به ویژه از سال ۲۰۱۴ به بعد کاملاً خطی و بدون برگشت بوده که حاکی از ایجاد شرایط پلاستیک (Rigid) تشکیلات ریز بوده و لذا امکان احیای آبخانه حتی با تغذیه سفره وجود ندارد. لازم به ذکر است شرایط غیر الاستیک (پلاستیک یا برگشت ناپذیری) در اثر برداشت بی رویه آب برای تشکیلات ریز با قابلیت فشرده شدن ایجاد می شود لذا این مسله در تشکیلات ماسه ای و درشت آبخانه ناچیز و قابل اغماض می باشد."

همانطور که از خطوط هم فرونشست رادار در نقطه نجم آباد مشخص است مقدار فرونشست طی یک سال اخیر حدود ۳ سانتی متر برآورد می شود. لذا باتوجه به مقدار فرونشست اندازه گیری شده با داده های IPGN و برآورد شده توسط رادار

به ترتیب برابر مقدار عدد ۳,۴ و ۳ سانتی متر میزان اختلاف حدود ۰,۴ - سانتی متر یا ۴- میلیمتر معادل ۱۱,۷- درصد گزارش می گردد. لذا مقدار ۴- میلیمتر با ادعای روش راداری که حدود ۵ میلیمتر به طور متوسط است همخوانی دارد.

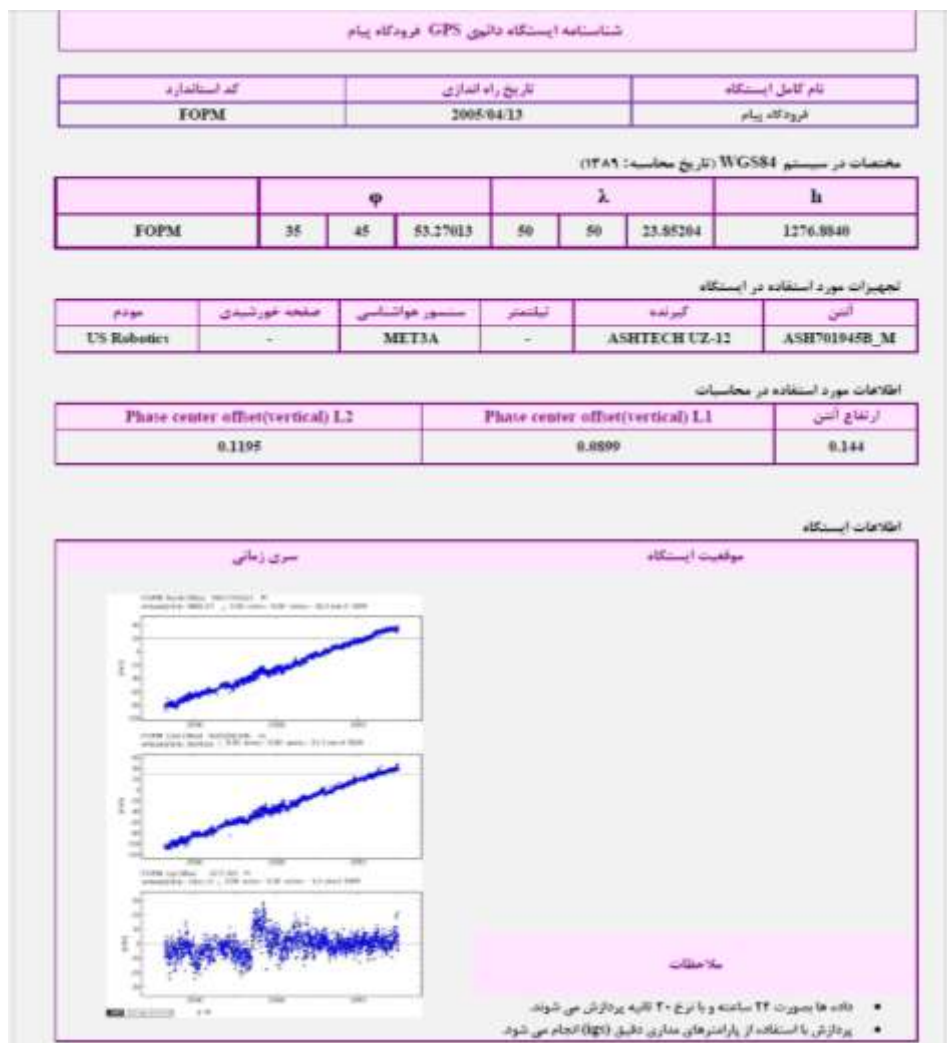
- ارزیابی نتایج رادار بر اساس ایستگاه های فرودگاه پیام و هشتگرد

بر اساس نتایج ثبت شده ایستگاه های مذکور مقدار فرونشست صفر و اغلب مقدار برآمدگی غالب می باشد. این موضوع توسط نتایج راداری نیز در نقاط مذکور همخوانی دارد. (شکل های ۲۳ و ۲۴).

بر این اساس باتوجه به مقایسه نتایج آنالیز راداری با روش تداخل نگاری D-Insar در منطه البرز که در یک نقطه با روند فرونشست، خطایی حدود ۴ میلیمتر داشت و همچنین همخوانی روند برآمدگی در ۲ نقطه ثبت شده دیگر می توان اذعان نمود روش تداخل سنجی D-INSAR برای اهداف مطالعه منابع طبیعی و منابع آب، صحت سنجی لازم (Validation) و لذا دقت کافی را دارا می باشد. علت برآمدگی، اغلب مربوط به خصوصیات تشکیلات و یا رفتارهای دینامیک زمین شناسی و یا تغذیه سفره می باشد. در این جا علت برآمدگی مربوط به رفتار زمین شناسی است.

بر اساس بررسی های انجام شده مشخص شد که بیش از نیمی از ۶۰۰ دشت موجود کشور در معرض فرونشست هستند اما تنها در ۲۰ دشت پژوهش انجام شده است. اندازه گیری با دستگاه GPS دائمی نیز تنها در اطراف تهران و چند دشت کشور صورت می گیرد. این اطلاعات نیز صرفاً "نقطه ای و با هزینه ای زیاد انجام می شود لذا اطلاعات اندازه گیری فقط جهت تدقیق و صحت سنجی نتایج راداری اغلب کاربرد دارند. اندازه گیری میزان و دامنه مکانی پدیده فرونشست از تکنیک و اطلاعات ماهواره ای روش نوینی در پایش این پدیده طی دهه پیشین 1990s به شمار می رود.

تداخل سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) تا کنون یکی از دقیق ترین و کم هزینه ترین روش های سنجش از دور برای شناسایی و نمایش جابه جایی های عمودی سطح زمین از فواصل دور فضایی می باشد. علاوه بر این در این روش به واسطه بهره گیری از داده های ماهواره ای و قابلیت تکرارپذیری آن، پایش پدیده فرونشست در مکان و زمان مورد نظر با سهولت و در کوتاه ترین زمان و بهینه ترین هزینه اجرایی، صورت می پذیرد (شریفی کیا، ۱۳۹۱).



شکل ۲۳: موقعیت ایستگاه فرودگاه پیام همراه نمودار نوسانات ثبت شده زمین با نرخ غالب برآمدگی-نمودار U



روش‌های آنالیز آماری:

یک روش این است که بین نشست زمین و پارامترهای موثر در آن ارتباط برقرار نمود. به عنوان نمونه اگر در نقطه یا نقطه‌های معرف آبخانه، مقدار نشست سالانه برای یک دوره حداقل ۳ یا ۴ ساله اندازه‌گیری شده باشد می‌توان به کمک آنالیزهای آماری همبستگی کلاسیک یا فازی بین نشست با برداشت آبخانه، تشکیلات ریز سازند، افت سفره و بارش سالانه یا ترکیب پارامترهای مناسب دیگر رابطه ریاضی تعیین نمود. در این شرایط اگر روند تغییرات نشست با سایر پارامترها و زمان به صورت منحنی بود می‌توان از ریشه‌های مختلف آنها جهت خطی شدن نمودار استفاده نمود تا امتداد آن جهت پیش‌بینی با خطای کمتری همراه باشد. البته اگر پیش‌بینی متغیرهای مستقل (نیازها و برداشت‌ها) نیز امکان‌پذیر باشد می‌توان پیش‌بینی را بر اساس آنها انجام داد و سپس مقادیر سال به سال نشست را از معادله همبستگی برآورد نمود.

با فرض برداشت ثابت از سفره، می‌توان اثر فصل‌ها و سال‌های خشکسالی را در زمان آینده  $t$  روی تراز سفره به کمک واکنش نمایی سیستم آبخانه نسبت به خشکسالی هیدرولوژیکی، که توسط Malik & Banerjee (۱۹۷۹) روی ذخیره آبخانه‌های تحت فشار کم ضخامت مطالعه شده، محاسبه و برای سایر آبخانه‌ها نیز برآورد اولیه نمود.

$$h = h_0 e^{-dt}$$

$h$  تراز سفره نسبت به سطح دریا بعد از زمان  $t$ ،  $h_0$  رقوم اولیه سفره نسبت به سطح دریا. در این خصوص با توجه به تاخیر فاز زمانی بین افت تراز و فرونشست (این تاخیر در سازندهای ریز (رس و سیلت) وجود دارد اما در سازندهای متوسط به بالا اغلب رفتار سیستم خطی است بطوریکه با نوسان سطح آب در زمین تراکم یا تورم متناسب با نوسان دیده می‌شود اما در سازندهای ریز این عکس‌العمل در درزآمدت و سالانه مشخص می‌گردد) ممکن است همیشه نتایج رضایتمندی به ویژه جهت پیش‌بینی درازمدت حاصل نگردد اگرچه مقدار نهایی نشست به دلیل تاخیر باقی مانده نشست نهایی تشکیلات ریز حتی در شرایط تغذیه در زمان مشخصی رخ خواهد داد. علاوه بر این نرخ تحکیم در مراحل میانی بیشتر از نرخ تحکیم مراحل ابتدایی و انتهایی است که این موضوعات روی توسعه یک رابطه ساده اثر می‌گذارد. لذا مقدار ضریب ذخیره بویژه در سفره‌های با افت قابل توجه در طول زمان و مکان (افقی و عمودی) با نرخ متغیر در حال تغییر می‌باشد.

پیش‌بینی تغییرات سیستم با مدل‌های ریاضی و یا فازی:

اساس این روش روی نتایج پیش‌بینی مدل ریاضی آبخانه پایه‌ریزی می‌شود. به این صورت که پارامترهای موثر در نشست زمین به کمک مدل، پیش‌بینی و سپس از روابط مناسب مقدار نشست زمین پیش‌بینی می‌شود (بخش سوم).

برای تحلیل مکانیکی فرونشست آبخانه های از نوع آکی تارد (مطالعه موردی آنتلپ کالیفرنیا-سایت هالی) که در ادامه متن حاضر مورد نظر است، قواعد ممکن است بر اساس مفاهیم زیر برای سیستم آبخانه پایه ریزی شود:

- اصول تنش موثر برای برآورد ذخیره ویژه
- اصل یک بعدی هیدرودینامیک تحکیم خاک برای شبیه سازی فرونشست

این مفاهیم که در ادامه تشریح می شود برای برآورد ذخیره ویژه جهت محاسبات فرونشست در آکیفر و آکی تاردها در این متن در ادامه استفاده شده است.

#### ۴-۱ تنش موثر

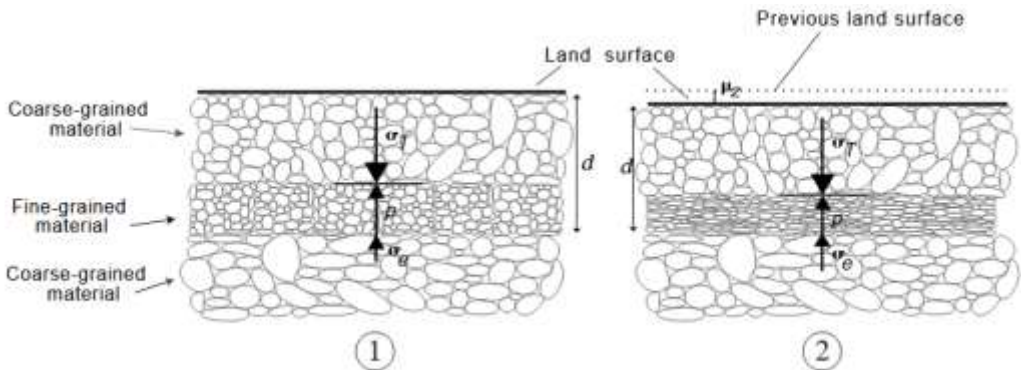
با کاهش فشار منفذی سیال ( $p$ )، ابتدا سیال به دلیل افت فشار، اتساع یافته و لذا مقدار تنش یا فشار داخلی دانه ها یا همان تنش موثر ( $\sigma_e$ )، طبق رابطه زیر (Terzaghi, 1925) زیاد می شود زیاد شدن تنش موثر یعنی انقباض و نزدیک شدن دانه های تشکیلات به یکدیگر که پاسخ سیستم به افت تراز آب می باشد. در این رابطه  $\sigma_T$  تنش کل شامل انواع بار استاتیکی زمین، وزن واحد سطح سنگ و سیال می باشد.

$$\sigma_e = \sigma_T - p,$$

$$h = p / (\rho g),$$

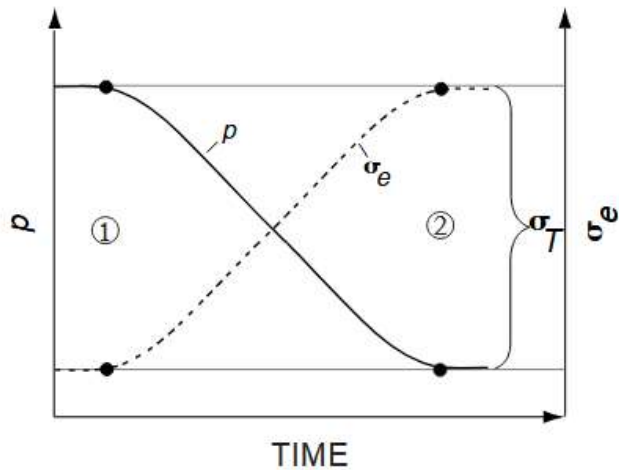
طبق این رابطه با فرض ثابت بودن تنش کل، با تغییر فشار منفذی، یک تغییر متناسب در تنش موثر ایجاد می شود. البته این تغییرات در تنش موثر، برای تشکیلات قابل فشرده شدن بافت ریز می باشد زیرا در تشکیلات بافت درشت این تغییرات قابل چشم پوشی بوده و یا وجود ندارد. با افزایش فشار منفذی، یک کاهش در تنش موثر و لذا انبساط دانه های تشکیلات (بالا آمدگی زمین) تحکیم نشده در دامنه رفتار الاستیک مشاهده می شود. برعکس وقتی افت تراز (کاهش فشار منفذی) ایجاد می شود، تنش موثر افزایش می یابد. اگر این مقدار تنش موثر، بیش از حد تنش موثر حداکثر تحمیل شده در دوران توسعه تشکیلات نباشد (Preconsolidation stress یا تنش مجاز)، تشکیلات آبخانه یک انقباض یا جابجایی عمودی برگشت پذیر ( $\mu_z$ ) یا فرونشست قابل احیا در محدوده الاستیک (برگشت پذیری) خواهد داشت. در صورتیکه کاهش تراز سفره شدید باشد و لذا باعث ایجاد یک تنش موثر بیش از حد آستانه گردد، به دلیل جابجایی و تغییر آرایش تشکیلات سیستم، دیگر جابجایی عمودی به صورت موقت نبوده و این فرونشست در محدوده شرایط پلاستیک (Virgin یا Rigid) سیستم رخ می دهد. البته این شرایط نیز خود بسته به نوع تشکیلات و دانه بندی مواد، ممکن است شامل نشست های اولیه (با سرعت و مقدار بیشتر)، میانی و نهایی

باشد. که اغلب در مرحله نهایی نرخ نشست کم بوده ولی ممکن است سال ها حتی پس از تغذیه سفره نیز ادامه پیدا کند. در این حالت ضریب ذخیره سفره کمتر از حالت قبل از نشست پلاستیک می شود و هیچوقت نمی توان ظرفیت سفره را بازیابی نمود.



شماتیک اصول تنش موثر و کاربرد آن در مطالعه فرونشست زمین در یک ستون فرضی یک بعدی محیط اشباع زمین شناسی [2]

این شکل همچنین حاکی از آن است که اگرچه از نظر تئوری نشست در لایه های بافت درشت قابل اغماض است اما به دلیل وجود لایه های با بافت ریز و آبخانه های مرکب، نشست کل سیستم به دلیل نشست لایه های میانی همیشه امکان پذیر خواهد بود.

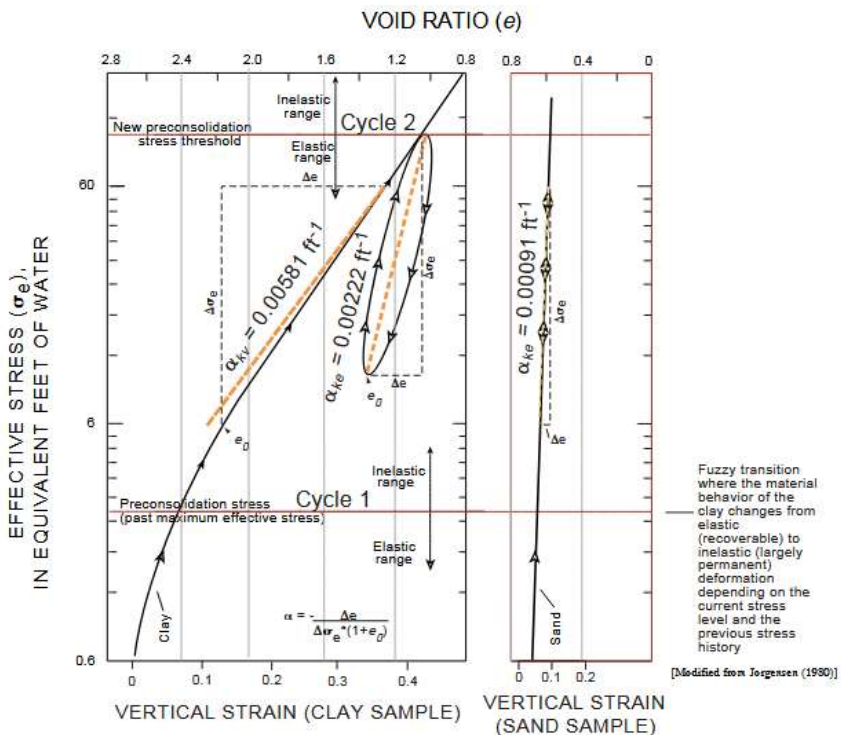


نمایش رابطه افت تراز با تنش موثر در یک آبخانه با قابلیت فشردگی [2]



## تنش مجاز (Preconsolidation stress)

لذا تعیین دامنه تنش موثر مجاز و آستانه بحرانی آن، یک معیار کلیدی در شبیه سازی و مطالعه فرونشست جهت درک مکانیک آبخانه می باشد. به طور کلی تنش موثر مجاز، حداکثر تنش وارد شده به سیستم در دوران تشکیل رسوبات سیستم می باشد. لذا در محدوده بیشتری از این تنش، ممکن است سیستم تغییر شکل داده و دانه بندی ها مجدداً "آرایش جدید بگیرند". در شکل زیر روی نمونه های سیستم آبخانه، در آزمایشگاه برای شرایط دره آنتلوپ به صورت یک بعدی (جهت عمودی)، با ایجاد دوره ای بار (Stress) و کشش (Strain) ایجاد شده و اطلاعات رفتاری برای دانه بندی شن و رس ثبت شده و نتایج به صورت خط و شکست منحنی و سپس لوپ ترسیم شده است. محل شکست در نمونه های بافت ریز، حاکی از آغاز ورود به دامنه تنش از الاستیک به پلاستیک بوده و در جایی آغاز حد یا آستانه تنش مجاز مشخص شده است که از آنجا به بعد در واقع ورود به محدوده پلاستیک یا رفتار دائم سیستم مشخص می شود. قبل از ورود سیستم به محدوده پلاستیک، در صورتیکه فشار و تنش ها زیر این محدوده به صورت دوره ای باشد یک لوپ ایجاد شده است. این لوپ در واقع حاکی از چرخه و دوران رفتار سیستم حول آستانه حد الاستیک و پلاستیک در اثر تغذیه و برداشت های فصلی است. این نمودار برای بافت درشت قابل ترسیم نبود زیرا این نوع تنش ها برای بافت های درشت ناچیز می باشد.



نمایش ترسیم پلات بار/ کرنش نسبت به تنش موثر در بافت های ریز و درشت نمونه آبخانه آنتلوپ در آزمایشگاه [2]

این آزمایشات در شرایط هد ثابت انجام شد لذا طبق رابطه (Terzaghi, 1925) تنش موثر و تنش کل متناسب و برابر یگدیگر بودند. در شرایط طبیعی، وقتی تراز سفره به پایین ترین سطح خود طی تاریخ می رسد پس از تعادل بین سیستم ها (آبخانه های مرکب آزاد و تحت فشار)، حداکثر تنش ایجاد می گردد. رسیدن به تعادل بین سیستم ها از نظر تئوری یک معیار پیچیده است اما در عمل، با فرض ثابت بودن هد، و جایکه تنش کل و تنش موثر برابر می شوند، حداقل تراز تاریخی سفره می تواند تقریب رده اول از تنش موثر مجاز باشد. در شرایط طبیعی هد نیز ثابت نبوده و در این شرایط تنش موثر نیز ثابت نبوده بطوریکه در فصول تغذیه و تخلیه شبیه لوپ در محدوده تنش مجاز مانند شکل بالا در نوسان می باشد. در این شرایط اگر حداکثر تنش وارده بیش از تنش مجاز نباشد، سیستم در حال رفت و آمد در محدوده الاستیک و پلاستیک در تنش های فصلی می باشد.

#### ۴-۲ ذخیره ویژه (حد الاستیک و پلاستیک)

تغییر رفتار سیستم در محدوده های الاستیک و پلاستیک در شکل بالا نمایش داده شد. این مسئله در محدوده های مجاز صرفاً باعث تغییر موقت تخلخل موثر و ضریب ذخیره سفره می شود. ذخیره ویژه معرف حجم آب موجود یا رها شده از یک واحد حجم مواد آبخانه برای یک واحد افت است. به طور کلی برداشت آب یا آب آزاد شده آبخان، حاصل انقباض و اتساع بدنه خود آب و مواد تشکیلات است. همچنین در تشکیلات آکیفر ممکن است لایه های الاستیک و پلاستیک یا شرایط میانی ایجاد شده باشد. روابط زیر بیان ساده ریاضی موارد مذکور هستند.

$$S_{sk} = \begin{cases} S_{ske} = \alpha'_{ke} \rho g, & \sigma_e < \sigma_{e(max)} \\ S_{skv} = \alpha'_{kv} \rho g, & \sigma_e > \sigma_{e(max)} \end{cases}$$

#### ۴-۳ ضرائب ذخیره آکیفر

هیدرولوژیست در یک سیستم می بایست اثر تمام ضرائب ذخیره ساختار آکیفر و آکی تارد ( $S_k$ ) لایه ها و ذخیره ویژه بدنه آب به ترتیب برای آکیفر  $S_w$  و آکی تارد  $S'_w$  برای شرایط الاستیک و غیر الاستیک جمع کند. بیان ریاضی این روابط به شکل زیر می باشد:

$$S_k = \begin{cases} S_{ke} = S_{ske}(\Sigma b'), & \sigma_e < \sigma_{e(max)} \\ S_{kv} = S_{skv}(\Sigma b'), & \sigma_e > \sigma_{e(max)} \end{cases}$$

$$S_k = S_{ke} = S_{ske}(\Sigma b),$$

در اینجا  $b'$  و  $b$  به ترتیب ضخامت لایه آکی تارد و آکیفر بوده و اندیس  $e$  و  $v$  معرف شرایط الاستیک و غیرالاستیک هستند. لذا ضریب ذخیره کل سیستم یا  $S^*$ :

$$S^* = S_{k+} + S_{k+} + S_w + S'_w$$

روابط بالا با فرضاتی برای یک بعد عمودی نوشته شده است. همچنین اگرچه تغییرات افقی لایه ها قطعا" در فرونشست اثر دارد ولی هنوز تحقیقات ثابت شده منوط بر اهمیت لحاظ اثرات افقی در روابط بالا وجود ندارد و دقت مورد نظر برای حالت یک بعدی به دست می آید.

همانطور که تشریح شد در تنش ها و افت های غیر مجاز، ضریب ذخیره برای همیشه کاهش و حتی با تغذیه سفره دیگر به مقدار اولیه خود باز نمی گردد لذا ظرفیت و پتانسیل آبدهی و نگهداری سفره برای همیشه کم می شود.

#### ۴-۴ تئوری تحکیم هیدرودینامیک

مسئله تعادل بین آبخانه های مرکب (در اینجا آکیفر و آکی تارد) مطرح می شود. در واقع تعادل فشار سیال بین دو سیستم آکیفر و آکی تارد یک معیار بحرانی در محاسبه و برآورد پارمترها می باشد. این موضوع توسط تئوری تحکیم هیدرودینامیک (Terzaghi, 1925) توضیح داده می شود. در واقع مسئله تراکم باقی مانده و نشست با تاخیر در زهکشی تشکیلات آکی تارد در اثر افت تراز آب توسط این تئوری تشریح می شود. معادله فرایند زهکشی به کمک معادله انتشار یک بعدی (عمودی) برای جریان سفره نوشته می شود:

$$\partial^2 h / \partial z^2 = (S_s / K_v) \partial h / \partial t ,$$

در اینجا  $S_s$  ذخیره ویژه آکیفر و  $S'_s$  ذخیره ویژه آکی تارد که تقریباً با  $S'_{skv}$  (شرایط پلاستیک) برابر می باشد.  $K'_v$  هدایت هیدرولیکی عمودی آکی تارد، و نسبت ذخیره به هدایت هیدرولیکی  $(S_s / K'_v)$  نیز در اینجا معکوس ضریب پخش هیدرولیکی عمودی آکی تارد می باشد.

باتوجه به ضخامت و ضریب پخش هیدرولیکی عمودی آکی تارد  $(S_s / K'_v)$ ، تعادل فشار منفذی و تراکم سیستم و افت تراز آب در آکیفرهای همجوار با تاخیر مشاهده می شود. زمان ثابت لازم برای اینکه ۹۳ درصد نشست نهایی یک آکی تارد برای یک گام افزایش بار تکمیل شود از رابطه زیر (Riley (1969), Scott, 1963) محاسبه می شود:

$$\tau = S_s (b/2)^2 / K'_v ,$$

در واقع این بار معادل یک افت تراز از آکیفرهای همجوار بوده و فرایند برداشت آب و تراکم و مقاومت جریان در مسیر از آکی تارد را شامل می شود. از رابطه بالا، تناسب زمانی تاخیر نشست، معادل مجذور نصف ضخامت آکی تارد می شود.

محققانی چون Riley, 1969 و دلیری، ۱۳۹۵ (مقیاسه هیدروگراف سفره و فرونشست) نشان دادند که چگونه می شود یک تقریب جهت محاسبه زمان تراکم مورد نیاز کل سیستم از روی داده های سری زمانی اندازه گیری افت سفره (هیدروگراف) و تراکم آکیفر به دست آورد. محقق اول بر اساس ترکیب اطلاعات ثابت زمانی رابطه بالا با ذخیره در شرایط پلاستیک که از داده های تنش - کرنش نمونه برداری شده و همچنین تعداد و ضخامت فرونشست آکی تاردها توانست برآوردی از هدایت هیدرولیکی عمودی در شرایط پلاستیک سفره به دست آورد. از این مفاهیم آقای Helm (1975, 1978) جهت مدلسازی زهکشی آکی تارد و فرونشست استفاده کرد و ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی تحت شرایط پلاستیک را برآورد نمود. لذا در مدیریت فرونشست و بهره برداری از سفره ها باید توجه به تاخیر زمانی فرونشست نهایی سفره باید برنامه ریزی صورت بگیرد.

## ۵. برآورد دامنه پارامترها

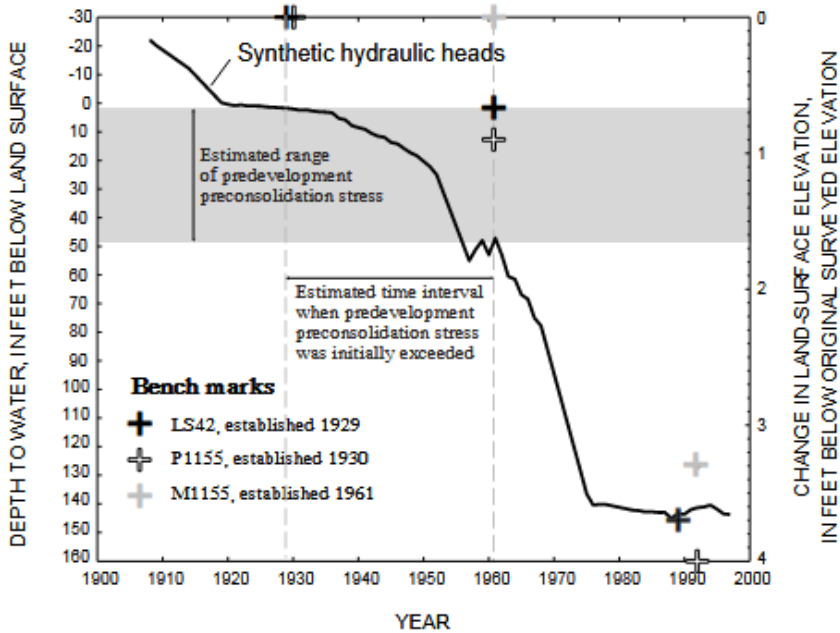
پارامترهای اصلی ورودی مدل عددی برای مطالعات فرونشست شامل هدایت هیدرولیکی عمودی، تنش موثر مجاز، و ضرائب ذخیره الاستیک و پلاستیک (ذخیره ویژه) می باشند. هدایت هیدرولیکی آکیفر و آکی تارد در سایت هالی بر اساس اطلاعات مدل های موجود، آزمایش پمپاژ و نمونه های آزمایشگاهی در محدوده نزدیک سایت هالی برآورد می شود. مقدار تنش موثر قبل از توسعه بهره برداری (آستانه تنش) بر اساس آنالیز داده های همزمان تراز سفره و فرونشست چاه های معرف و پنج مارک ها متناظر تقریب زده می شود. ضریب ذخیره الاستیک و پلاستیک در سایت هالی بر اساس روش اصلاح شده روش آنالیز تنش - کرنش Riley, 1969 برآورد شد. سپس ضرائب ویژه معادل با توجه به ضخامت آکیفر و آکی تارد که از داده های ژئوفیزیک تعیین شده، محاسبه می شود.

## ۵-۱ هدایت هیدرولیکی عمودی

بر اساس داده های پیژومترهای HO-1 و پیژومتر میانی و روش پاسخ فراوانی به نوسانات اثر زمین و بار اتمسفر روی سطح آب، مقدار هدایت هیدرولیکی عمودی آبخان محدوده حدود  $10^{-2} \times 0,58 \text{ m/d}$  و از نتایج نمونه گیری رس های آکی تارد محدوده مقدار هدایت هیدرولیکی در دامنه  $10^{-6} \times 0,54$  تا  $10^{-3} \times 0,3 \text{ m/d}$  قرار گرفت. برای لایه واحد تحت فشار نیز ارقام متفاوتی محاسبه شد که مقدار  $10^{-2} \times 0,36 \text{ m/d}$  برای شبیه سازی استفاده شد.

## ۲-۵ تنش موثر مجاز

یک روش تعیین تنش پیش از تحکیم در شرایط اولیه، مقایسه همزمان چاه ها با پنج مارک های متناظر فرونشست می باشد. شکست شیب طی سری ها در هر دو منحنی می تواند نشانی از اولین تنش بزرگ تاریخی و معیاری برای تعیین آستانه تنش موثر باشد. در این خصوص برای سایت هالی یک هیدروگراف مرکب معرفی محاسبه شد.



نمایش ترسیم نوسان هیدروگراف معرف عمق میانی آبخان سایت هالی در مقابل نشست متناظر [2] (بند شرایط مرزی)

در اینجا ۴ پنج مارک برای اندازه گیری فرونشست زمین استفاده شد. نتایج در جدول زیر ارائه شده است. در نقشه های بند ۲-۵ شکل ۳ موقعیت پنج مارک ها نمایش داده شده است. با بررسی شکل بالا می توان تشخیص داد در شروع سال ۱۹۶۱ در عمق ۱۵ متری شیب منحنی شدید شده و لذا ممکن است بتوان دوره ۱۹۲۹ الی ۱۹۶۱ را محدوده تنش تسلیم و الاستیک و قبل از شرایط پلاستیک تعریف نمود.

جدل مشخصات برداشت و برآورد سری زمانی فرونشست محدوده هالی [2]

Bench mark	Time interval	Land subsidence, in feet	Method
LS42	1929-61	0.7	Differential leveling
	1961-89	3.03	Differential leveling
	1929-89 (total)	3.7	
P1155	1930-61	.9	Estimated <sup>1</sup>
	1961-92	3.1	Differential leveling
	1930-92 (total)	4.0	Estimated <sup>1</sup>
M1155	1961-92	3.3	Differential leveling
	1992-98 <sup>2</sup>	.45	Differential GPS
	1992-98 <sup>3</sup>	.58	Differential GPS
HOLLY	1992-98 <sup>2</sup>	.38	Differential leveling
	1992-98 <sup>3</sup>	.51	Differential leveling

<sup>1</sup>See Ikehara and Phillips (1994) for description of estimation technique.

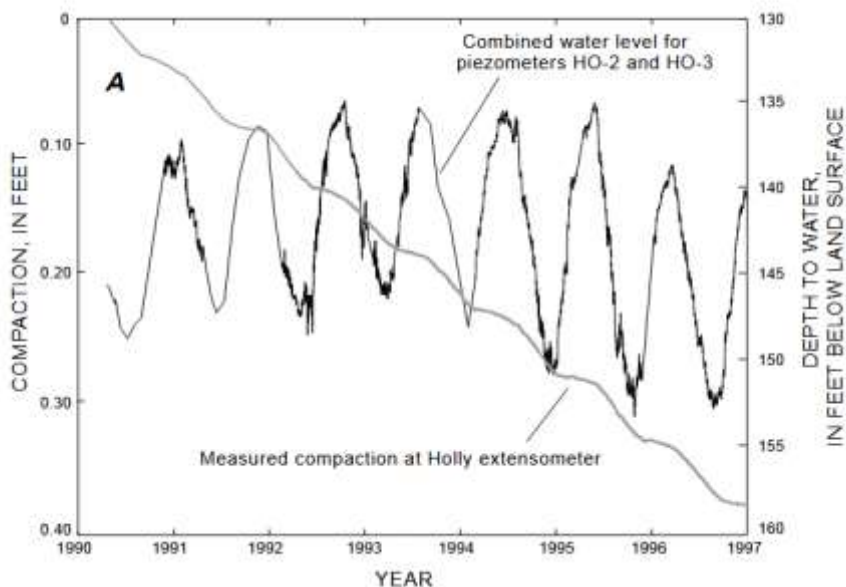
<sup>2</sup>August 1992-January 1998.

<sup>3</sup>August 1992-August 1998.

### ۵-۳ ذخیره ویژه

بر اساس روش آنالیز تنش - کرنش اصلاح شده توسط Riley, 1969 و نمونه های سایت در آزمایشگاه یکسری پلات ترسیم و سپس ضرائب تراکم پذیری شامل ضریب ذخیره الاستیک و پلاستیک محاسبه و سپس باتوجه به ضخامت لایه آبدار آکی تارد و آکیفر در عمق اندازه گیری کشتش سنج، ذخیره ویژه محاسبه می گردد. در اینجا تنش معادل بار هد هیدرولیکی روی محور مختصات و کرنش در بعد عمودی شامل تراکم یا جابجایی عمودی روی محور دیگر ترسیم می گردد. تغییر در بار هد باعث تغییر در تنش موثر روی سیستم با یک تنش کل ثابت می شود. Riley, 1969 نشان داد وقتی تعادل فشار بین دو سیستم آکیفر و آکی تارد سریع ایجاد شود، شیب معکوس روند منحنی خطی بار - تراکم سیستم می تواند معیار اندازه ای از ضرائب ذخیره ساختار سیستم باشد. اما به دلیل وجود تاخیر در پاسخ تعادل بین این دو سیستم در سایت هالی، روش مذکور قابل استفاده نبود و نیاز به اصلاح و تفکیک شرایط حدی داشت. این رفتار تاخیری در شکل زیر و داده های اندازه گیری شده سایت هالی مشخص است.

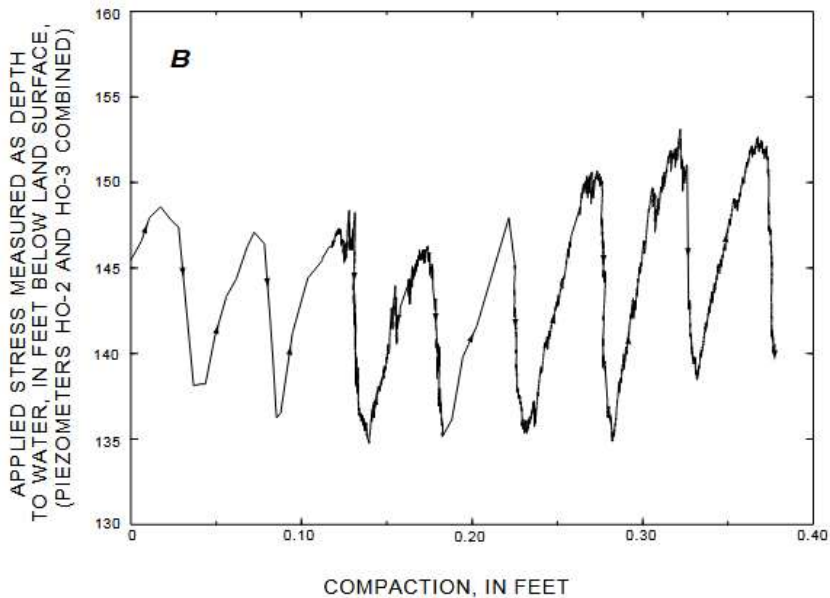
همانطور که از شکل زیر نیز مشخص است علی رغم تغذیه سفره در زمستان، روند نشست خالص و تجمعی سیستم همچنان ادامه دارد. این پاسخ می تواند به خاطر عدم تعادل انبساط سریع الاستیک فی مابین آکیفر با لایه نازک آکی تارد و ممتد بودن روند نشست لایه نازک یا ضخیم آکی تارد با زهکشی تاخیری و آرام باشد.



نمایش ممتد بودن تراکم تجمعی عمودی سیستم در زمستان حتی پس از شرایط تغذیه سفره [2]

تاخیر زهکشی و پاسخ سیستم همچنین از شکل بعدی نیز از روی شیب منحنی (لوپ باز) به دست آمده بین نوسان تراز سفره با تراکم سیستم قابل تفسیر است. این شرایط مانند لوپ بسته ایجاد شده تنش فصلی در محدوده قبل از شرایط پلاستیک شکل های تفسیر شده قبلی می باشد. جهت اصلاح این خطا در روش مذکور با تجزیه و ترکیب پاسخ های مکانیکی سیستم در شرایط الاستیک و پلاستیک بر پایه نتایج فصلی و بین پاییز و بهار (به دلیل تعادل نسبی سطح سفره) طی یک دوره ۸۰ روزه استفاده شد. در واقع می توان از انتهای نمودار خطی برای پاسخ لایه های آکی تارد نسبت به نشست نهایی استفاده کرد اما این اتفاق در عمل ممکن است ده ها سال طول بکشد. نوسانات فصلی اغلب در چرخه الاستیک رفتار سیستم قرار دارند زیرا هنوز بازگشت و برگشت سیستم مشاهده می شود. اگرچه ده ها زمان نیاز است تا نشست نهایی سیستم آکی تارد مشخص شود ولی با توجه به روش های موجود و دانش و محدودیت های فعلی این روش جهت تخمین ضرائب قابلیت فشردگی سیستم ناگزیر است. این ضرائب در شرایط عادی از روش های آزمایش پمپاژ محاسبه می شود. در اینجا ابتدا باید پلات ها برای ۴ کلاس اصلی جایجایی

عمودی مانند زیر جدا و تفسیر شوند. سپس از شیب معکوس منحنی خطی غالب تنش-نشست ضرائب محاسبه می شوند. این کار می تواند برای چندین فصل انجام شود.



پلات تنش و تراکم فصلی در سایت هالی - کالیفرنیا [2]

۱ جابجایی الاستیک در زمستان

۲ جابجایی الاستیک در تابستان

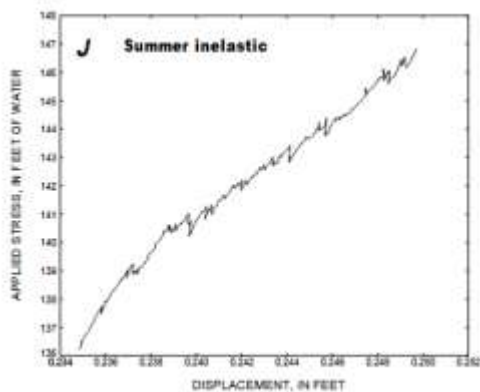
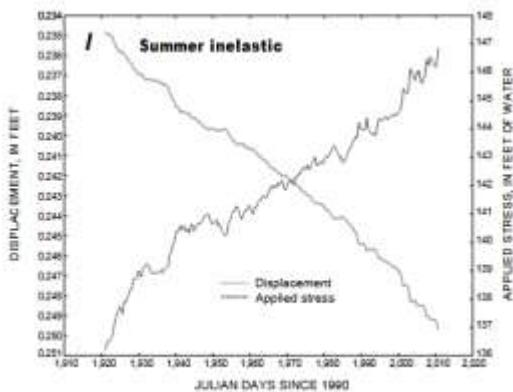
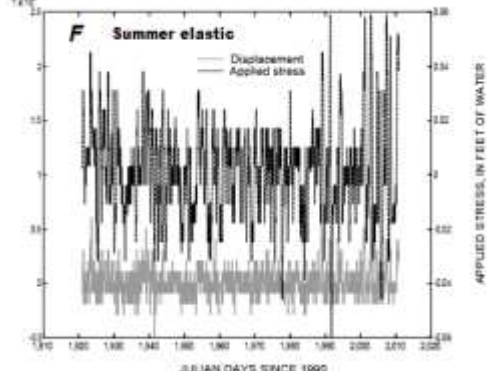
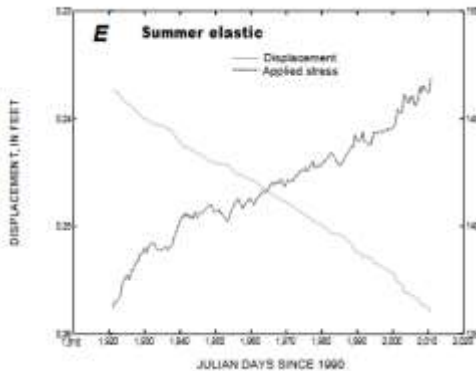
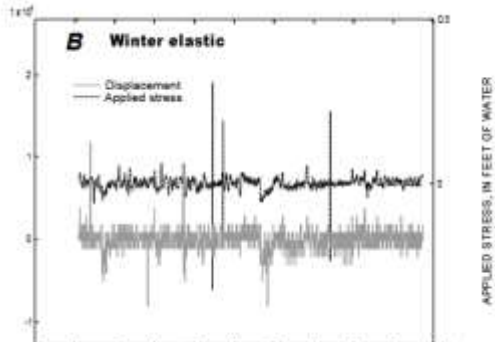
۳ جابجایی پلاستیک در زمستان (این داده ها دسترس نبود)

۴ جابجایی پلاستیک در تابستان.

ابندا این دوره ها از سری زمانی ۸۰ روزه مشخص و جدا شده و سپس تفسیر می شوند. به طور کلی جدا کردن این شرایط برای مطالعه و درک بهتر ضروری است. به عنوان مثال در طبیعت و در زمان تغذیه سفره در زمستان بخشی از اکیفر تغذیه و سریع تر (برگشت الاستیک) نسبت به بخش دیگر آکی تارد پاسخ می دهد. در این شرایط قسمتی از نشست سیستم آکیتارد ضخیم تر (نشست پلاستیک) که همچنان ادامه دارد به خاطر خیز تشکیلات آکیفر، نمایان نمی شود (Mask) و لذا نشست واقعی سیستم آکی تارد کمتر از واقعیت برآورد می شود. این مفهوم برای سایر



شرایط نیز وجود دارد و لذا باید این شرایط حدی از پلات ها تفکیک و مطالعه شوند. برخی از پلات های آنالیز تنش - کرنش روش اصلاح شده در ادامه و نتایج در جدول زیر برای سه حالت مجزا محاسبه شده و سپس بر اساس عمق کشش سنج، ذخیره ویژه محاسبه شد.



پلات های روش اصلاح شده آنالیز تنش - کرنش سایت هالی - کالیفرنیا [2]

نتایج برآورد ضرائب ذخيره الاتيك و پلاستيك سايت هالي [2]

[ft<sup>-1</sup>, per foot]

Type of response	Number of data sets	Skeletal storage coefficients		Skeletal specific storage (ft <sup>-1</sup> )
		Mean	Standard deviation	
Winter elastic .....	6	$7.4 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-7}$
Summer elastic .....	4	$5.9 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-5}$	$7.2 \times 10^{-7}$
Summer inelastic .....	4	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-5}$

مقدار ضريب ذخيره الاستيك زمستان و تابستان براي سيستم آكيفر و مقدار ذخيره پلاستيك تابستان براي ذخيره پلاستيك سيستم آكيفر انتخاب شد.

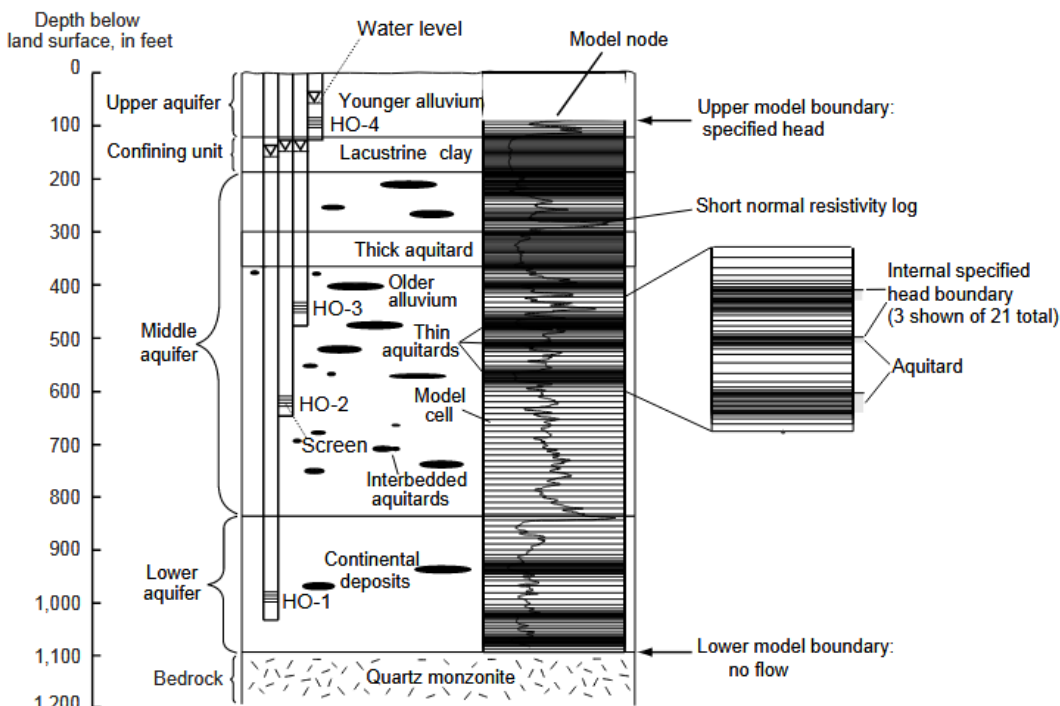
## ۶. مدل عددي سايت هالي

مراحل مدل‌سازی آبهای زیرزمینی در مرجع ۳ توسط مولف به تفصیل ارائه شده است. در اینجا هدف از توسعه مدل، شبیه سازی رفتار مکانیکی آبخانه در پاسخ به نوسانات سطح آب سفره با اثر زهکشی آکی تاردهای میانی و موارد زیر می باشد:

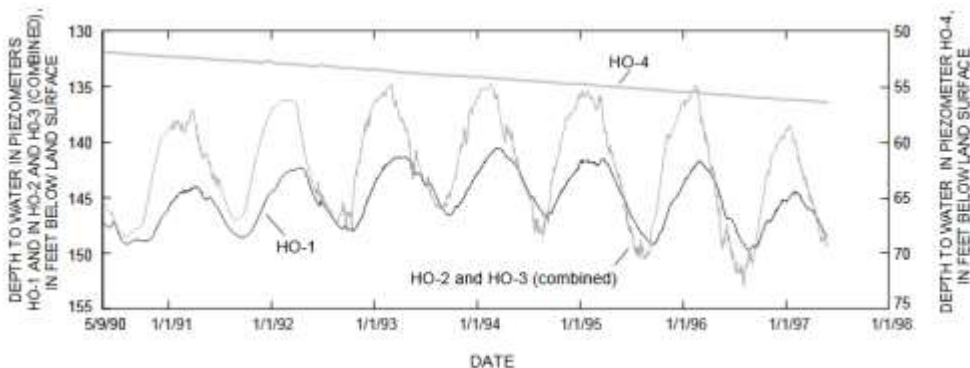
بازبینی و اصلاح پارامترهای کنترل کننده فرونشست،  
پیش بینی آینده فرونشست برای ۳ سناریوهای مورد نظر.

مدل انتخابی Modflow-96 (مدل زهکشی آکی تارد، ۱۹۸۸) و پکیج داخل این مدل به نام IBS1 (مدلسازی تراکم، ۱۹۹۱) با حالت یک بعدی تفاضل محدود جهت شبیه سازی همزمان فرونشست و جریان سفره به عنوان تابعی از عمق و زمان با شرایط مرزی هد ثابت می باشد. همچنین پارامترهای مدل در دامنه مجاز مدل مفهومی منطقه ارزیابی و تدقیق شد تا مناسب ترین ارزش پارامترها برای تطابق با اطلاعات اندازه گیری فرونشست به دست آید. برای اجرای مدل عددی و شبیه سازی رفتار تشکیلات (فشردگی و انبساط) نسبت به پاسخ نوسانات سفره، باید مدل مفهومی کیفی که در بخش های پیش برای سايت هالي توسعه داده شد به صورت مدل مفهومی کمی ایجاد شود. برای این کار باید از اطلاعات هیدروژئولوژی، هیدرولوژی و هیدرولیک سفره (پیزومترها) در کنار داده های استراتیگرافی به دست آمده از داده های لیتولوژی، ژئوفیزیک (لوگ ها) و مکانیک سفره (کشش سنج) استفاده و مدل مفهومی کمی شکل زیر را توسعه تا مدل های جفت شده جریان و تشکیلات توسعه یابند. اطلاعات توزیع افقی

تشکیلات در بخش های قبلی ارائه شده است. دو دوره شبیه سازی شامل ۹۷-۱۹۰۸ داده های تاریخی و دوره اندازه گیری اخیر ۱۹۹۰ الی ۹۷ انتخاب شد. همچنین از نتایج مدل تاریخی برای شرایط مرزی غیر دائم مدل اخیر در سال ۱۹۹۰ استفاده شد. دو دوره بحرانی جهت بررسی تراکم سفره انتخاب شد. یک دوره تاریخی با فرض توسعه آب زیرزمینی و روند برداشت ثابت و یک دوره با نوسانات فصلی سفره.



رابطه مدل عددی و مدل مفهومی کمی در کنار لوگ حفاری - سایت هالی - کالیفرنیا [2]



اطلاعات پیزومترهای استفاده شده در مدل عددی - سایت هالی - کالیفرنیا [2]

## ۶-۱ گسسته سازی زمان - مکان

در این گام باید قلمرو (Domain) مدل مشخص شود. در حالت سه بعدی گسسته سازی مکانی شامل ردیف، لایه و ستون به صورت حجمی می شود. در اینجا با توجه به انتخاب یک بعدی (عمودی) مدل، گسسته سازی مکانی به ضخامت لایه ها مربوط می شود. گسسته سازی زمانی در اینجا شامل دوره های تنش و گام های زمانی می باشد. بحث های مناسبی در مرجع ۳ توسط مولف در خصوص معیارهای پایداری مدلسازی و گام های زمانی و انتخاب دوره های تنش و بحرانی ارائه شده است.

گام های زمانی برای محاسبه و تبادل جرمی میان سلول های کناری مدل نیاز است. بدیهی است ضرایب الاستیک و پلاستیک برای بافت ها ریز و ضرایب الاستیک برای بافت های درشت جهت بررسی اثر فشردگی سیستم نیاز است. لایه اکری تارد برای ضخامت های نازک (کمتر از ۱,۵ متر به صورت غیر صریح جمعا" ۱۱ متر) و برای ضخامت های برابر و بیشتر از ۱,۵ متر جمعا" معادل ۶۶ متر به صورت صریح مدل شد. لایه های نازک فرض شد سریع تر به تعادل برسند. تا پیچیدگی های مدل کمتر شود.

فواصل مکانی حدود ۳۰ سانتی متر و فواصل زمانی حداقل برای آکری تارد و مرزهای بین آن تا حد ممکن لحاظ شد. ابعاد سلول در آکیفرها به طور متوسط ۱,۵ متر لحاظ شد. برای جلوگیری از ناپایداری های عددی به معیارهای مرتبط توجه شد و دقت شد تا اختلاف فواصل مجاور بیش از ۵۰ درصد نباشد.

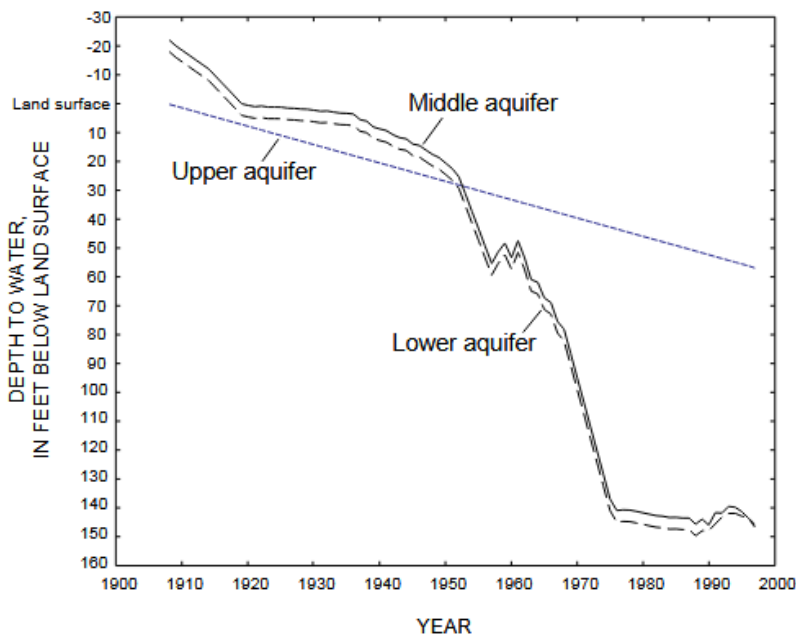
به کمک مدل IBS1 برای مدلسازی تراکم با فرض تعادل لحظه بین سیستم ها به جای تاخیر زهکشی، شبیه سازی انجام شد. گام های زمانی برای مدل تاریخی ۳۰ روز و برای مدل اخیر ۱ روز لحاظ شد تا اثر رفتار تراکم بین فواصل لحاظ شود.

## ۶-۲ شرایط مرزی

شرایط مرزی یا شرایط جریان در مدل یک بعدی منطقه شامل هد ویژه متغیر نسبت به زمان (بار هیدرولیکی) که از پیزومترها یا برآوردها به دست می آید و یا مرز بدون جریان در سنگ کف می باشد. در اینجا برای هر یک از آکیفر بالایی، میانی و پایینی یک هد ویژه تعریف شد. برای آکیفر بالایی هد ویژه متغیر به زمان برآورد یا از پیزومتر اندازه گیری شد. این مرز حدود ۶,۴ متر بالای واحد آکیفر و ۲۸ متر زیر سطح زمین می باشد. لایه بالای در شبیه سازی تراکم و حرکت تاخیر آکری تارد وارد محاسبات نشد و فقط هد جریان برای آن تعریف شد. این خطا در بند فرضیات تشریح شده است.

مرزهای درونی مدل شامل هد ویژه متغیر به زمان برای آکیفرهای میانی و تحتانی برآورد یا از پیزومترها اندازه گیری و تعریف شدند. در عمق ۳۳۲ متری از سطح زمین شرایط مرزی بدن جریان برای سنگ کف تعریف شد.

بار هیدرولیکی در ۴ پیزومتر شکل بالا از سال ۱۹۹۰ الی ۱۹۹۷ به عنوان شرایط مرزی متغیر به زمان برای سراسر اعماق لایه های مختلف اندازه گیری شد. این اطلاعات برای شبیه سازی ۷ سال دوره بالا استفاده شد. به عنوان مثال سطح آب پایش شده پیزومتر HO-4 به عنوان حد اکیفر بالایی انتخاب شد. دو پیزومتر شماره ۳ و ۲ که شبکه (Screen) آنها در میانه آکيفرهای میانی قرار دارد نیز سطح آب را در لایه اصلی تولیدی پایش می کنند. این دو اختلاف زیادی ندارند و لذا ترکیب شده آنها طبق شکل زیر محاسبه و وارد مدل شد. پیزومتر شماره ۱ نیز این اطلاعات را برای اکیفر تحتانی برداشت می کردند.



نمایش سه هیدروگراف آبخانه های بالایی، میانی و تحتانی طی ۷ سال اندازه گیری - سایت هالی کالیفرنیا [2]

اطلاعات شرایط مرزی برای نقاط و زمان هایی که داده وجود نداشت با روش های درون یابی و آماری برای مدل تولید شد. سپس این نتایج در آنالیز حساسیت برای شیفیت های مختلف بررسی شد. در نهایت ۲۱ هد ثابت برای آبخانه درشت محصر شده بین لایه های آکی تارد تعریف شد.

### ۳-۶ شرایط اولیه

شرایط غیر دائم سفره (جریان و فرونشست) قبل از سال های ۱۹۹۰ نامشخص است لذا یک مدل تاریخی برای درک بهتر شرایط غیر دائم توسعه یافت. شرایط اولیه این مدل تاریخی نیز به صورت دائم در سال ۱۹۰۸ برآورد شد. شرایط اولیه مدل اخیر ۷ ساله (۱۹۹۰ الی ۱۹۹۷) نیز از مدل تاریخی گرفته شد.

بارهای هیدرولیکی اولیه برای هر سه آکیفر به وسیله سه هیدروگراف شکل بالا که از پیژومترها اندازه گیری شدند به صورت زیر تعریف شد. شرط مرزی اولیه در آبخانه بالایی (سفره آزاد) برای سال ۱۹۰۸ برابر سطح زمین، در آبخانه میانی و تحتانی (هر دو تحت فشار) به ترتیب حدود ۶,۷ و ۵,۵ متر بالای سطح زمین تنظیم شد. برای واحد نازک محصور شرایط اولیه متغیری به صورت خطی از بالا تا پایین بین سطح زمین تا ۷ متر بالای سطح زمین بررسی شد. برای سایر آکی تاردها هد اولیه آبخانی که محصور کرده لحاظ شد.

در خصوص هد متناظر تنش های پیش تسلیم (آستانه تنش مجاز) یا اولین تنش های با نشست اولیه مهم که در جدول محاسبه تنش موثر مجاز ارائه شد، همانطور که قبلاً" بررسی شد، هد مربوط به این آستانه مربوط به دوره ۱۹۲۹ تا ۱۹۶۱ می باشد لذا هدهای این دوره برای شرایط اولیه تنش های موثر در مدل لحاظ و با آنالیز حساسیت این ارقام تدقیق و بررسی شد. برآورد اولیه هد متناظر با تنش موثر از صفر در سطح زمین تا ۱۵,۲ متر زیر سطح زمین لحاظ شد که مطابق با دوره بالا و زمانی که نشست زمین به صورت قابل توجهی آغاز شد بود. هدهای پیش تسلیم یا تنش مجاز برای آبخانه های میانی و تحتانی به ترتیب با ۶ و ۶,۷ متر زیر سطح زمین واسنجی شدند. برای واحد نازک محصور و سایر آکی تاردها نیز مانند شرایط اولیه بالا هد متناظر با تنش مجاز انتخاب و واسنجی و آنالیز حساسیت انجام شد. برای آبخانه بالایی با توجه به اینکه دانه های ریز مرتبط با فرونشست در آن دیده نشد و لذا برای شرایط اولیه تنش موثر، هد متناظر با تنش مجاز یا تنش تسلیم برای این لایه انتخاب نشد.

### ۶-۴ معیارهای همگرایی و بیلان جرمی

روش حل پکیج (SIP5) در مدل Modflow-96 برای حل معادلات همزمان گره های مدل هالی تا به دست آمدن یک همگرایی ۰,۰۰۰۰۳ میلیمتر اختلاف در تکرارهای اول و اخر ادامه پیدا کرد.

نتایج محاسبات جریان با پکیج های BCF5 و IBS1 در مدل Modflow-96 جهت محاسبه بیلان جرمی طی دوره تنش برداشت آب جهت ایجاد یک تقریب مناسب در درستی محاسبات کلی حل عددی استفاده شد. مولفه های بیلان جریان برای ورود و خروج از گره ها و حجم ذخیره سلول ها در مدل قرار دارد. همچنین محاسبات IBS1 برای تغییرات ذخیره الاستیک و پلاستیک ساختاری آکیفرها و اثر ذخیره انبساط و انقباض آب با BCF5 محاسبه شد. سپس نتایج و اختلاف بین بیلان آب در هر دوره تنش با مدل مقایسه و تدقیق شد. سرانجام اختلافات به کمتر از ۰,۱ درصد رسید.

## ۵-۶ فرضیات و محدودیت ها

بدیهی است که تبدیل یک سیستم پیچیده به یک سیستم مدل دیجیتالی ریاضی پر از خطا به دلیل ساده سازی باشد و لذا این محدودیت و فرضیات تاجایی که خطاهای قابل اصلاح و مشخص ایجاد کند برای اهداف مطالعه قابل قبول است. در این خصوص تک بعدی کردن مسئله و سیستم تشکیلات آکی تارد یکی از این موارد است. سایر موارد:

- فرضیات جریان داری به صورت عمودی در آکی تارد و لایه ها
- فرضیات زهکشی در داخل آکی تاردها و بین سیستم ها
- ناچیز فرض کردن جریان های جانبی در مقابل تغییرات ذخیره
- فرضیات موجود در پکیج IBS1 در خصوص تغییرات تنش موثر که تنها تابعی از بار هیدرولیکی بوده و لذا تغییرات بار ژئواستاتیک ناچیز و تنش کل صفر است.
- در یک آبخانه تحت فشار که روی آن یک واحد محصور و آکیفر آزاد قرار دارد فرضیات آن باعث یک افزایش در برآوردهای مربوط به تنش موثر و تغییر شکل تشکیلات ناشی از افت سفره آزاد می شود. و برای حالت خیز آب این موضوع برعکس می شود (Leake and Prudic, 1991).
- مقدار تراکم برآورد در مدل تاریخی ممکن است کمی زیاد حساب شود زیرا مقدار افت تراز آب حدود ۱۷ متر (حدود ۱۸ درصد بار ژئواستاتیک در آبخانه بالایی) در طول دوره شبیه سازی اتفاق افتاده است. البته این خطار در دوره ۷ ساله اخیر با افت تراز حدود ۱,۳ متر ناچیز است.
- مسله فرنشست زمین و تغییر تنش موثر در آبخانه های آزاد به دلیل تغذیه های فصلی نسبت به آبخانه های بافت ریز تحت فشار ناچیز بوده و لذا این مورد شبیه سازی نشد.
- هیچ پیرومتری در داخل لایه آکی تارد بالایی قرار نگرفت و ممکن است خطا ایجاد شده باشد.
- فرض خطی بودن تناسب بین تنش موثر با ضریب الاستیک درست است اما با تنش پلاستیک این تناسب لگاریتمی است. با این وجود این مسله به ویژه در اعماق زمین خطای کمی ایجاد می کند زیرا با کاهش افت تغییر تنش موثر و ضرایب در رسوبات اعماق بسیار ناچیز است.
- در مدل ۷ ساله اخیر، افزایش در تنش موثر مربوط به یک درصد کوچکی از شرایط اولیه تنش های سیستم می باشد لذا هر خطایی در این خصوص کوچک است. در IBS1 فشرده پذیری دانه های خاک صفر است اما این محدودیت در مدل هالی به ویژه مدل اخیر به دلیل نشست کم اهمیت ندارد.
- در پکیج IBS1 ذاتاً تعادل در تغییرات بار هیدرولیکی بین سیستم ها و آکی تاردها در یک گام زمانی ساده و کوچک به دست می آید که در واقعیت درست نیست و زمان بیشتری نیاز است. این محدودیت باعث کم برآورده شدن تغییرات ذخیره و تراکم در زمان های بعدی (عدم لحاظ نشست نهایی در گام های

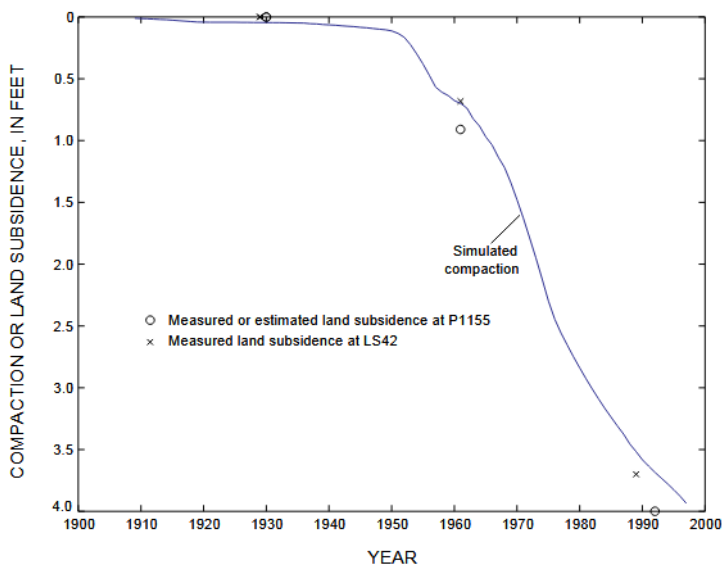
زمانی اگرچه در انتهای محاسبات نشست نهایی دیده می شود) و افزایش برآوردها در زمان های ابتدایی می شود. در آکی تاردهای منطقه با ضخامت حداقل ۱,۵ متر به بالا ابعاد سلول ها تا حد امکان کوچک گرفته شد تا با حل ضمنی اثر این خطا حداقل شود.

- به طور کلی هدایت هیدرولیکی عمودی و ذخیره ویژه در مدل حاضر نسبت به زمان ثابت فرض شده که این نیز در واقعیت خیلی درست نیست. اگرچه این خطا در مدل ۷ ساله اخیر به دلیل نشست ناچیز اهمیت ندارد ولی به طور کلی این محدودیت روی محاسبه نشست زمین اثر گذار است.

- در پکیج IBS1 محاسبات نشست در سلول هایی که هد ویژه تعریف می شود انجام نمی گیرد. لذا در کارهای بزرگ این خطا مهم و زیاد می شود. در این مطالعات نیز برای رفع مسئله، ابعاد این سلول ها تا حد ممکن کوچک شد و همچنین از تغییر تراز بار هیدرولیکی برای تغییر سرعت انتقال بین سلولی استفاده شده است.

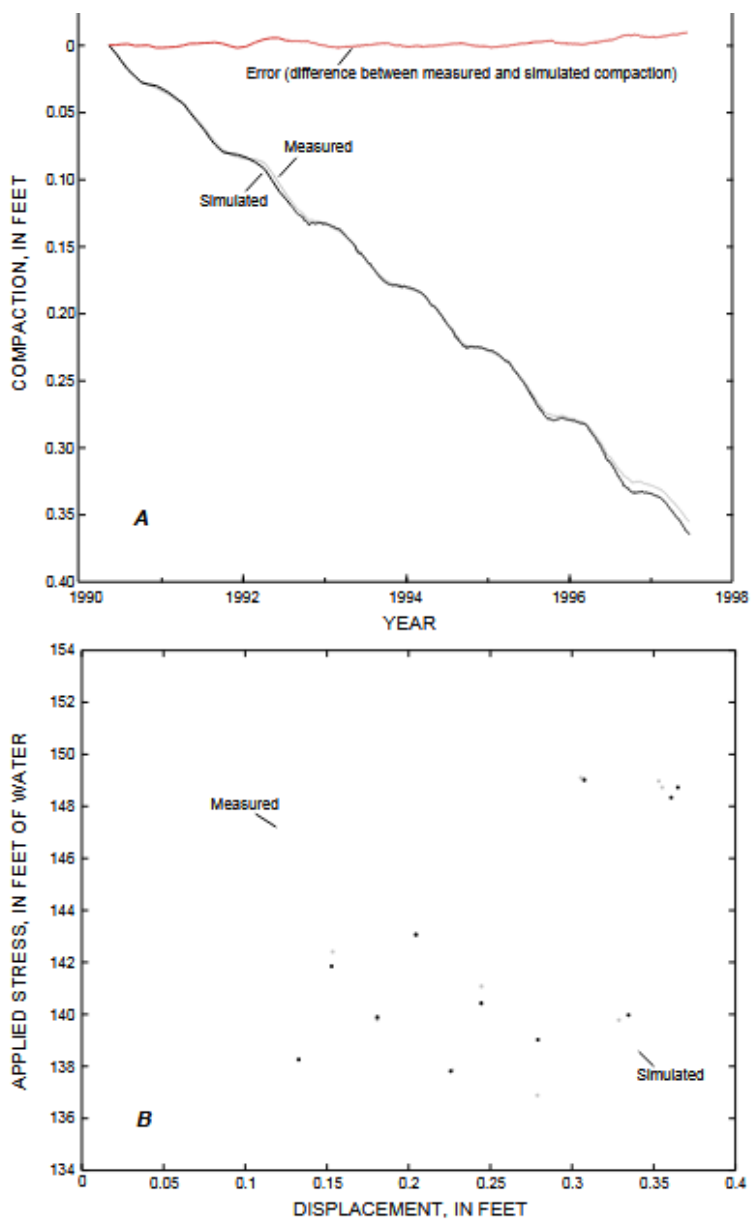
## ۶-۶ اجرای مدل و واسنجی

دو مدل مجزا دوره ۷ ساله اخیر و مدل تاریخی برای تغییرات فصلی و روند درزآمدت تراز آب و تراکم آبخانه توسعه و واسنجی و سپس با یکدیگر وصل شد تا پارامترهای یکپارچه سیستم محاسبه شود (شکل ها و جدول). مدل جریان ۷ ساله اخیر سه بعدی اجرا شد و ضمناً "باتوجه به داده های اندازه گیری اخیر نتایج این مدل اعتماد بیشتری دارند.



نمایش نتایج اندازه گیری و شبیه سازی و برآوردی تراکم زمین با مدل، کشش سنج و روش آماری-سایت هالی کالیفرنیا [2]





نتایج مدل تاریخی و اندازه گیری ها. A: مقایسه نتایج تراکم شبیه سازی و اندازه گیری شد. B: پلات بین بار و تراکم [2]

در جدول زیر نتایج پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده حاصل از مقایسه و تطابق مدل شبیه سازی تراکم و اندازه گیری ها ارائه شده است:

جدول مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از مقایسه بین شبیه سازی تراکم سیستم سفره و ارقام برآوردی و یا اندازه گیری تراکم در سایت هالی-کالیفرنیا [2]

[ft, foot; ft/d, foot per day; ft <sup>-1</sup> , per foot]	
Hydraulic parameters	Value
Vertical hydraulic conductivity, aquifer .....	3.0x10 <sup>-2</sup> ft/d
Vertical hydraulic conductivity, aquitard (less than or equal to 18 ft thick) .....	1.5x10 <sup>-5</sup> ft/d
Vertical hydraulic conductivity, confining unit (120 to 186 ft below land surface).....	1.2x10 <sup>-5</sup> ft/d
Vertical hydraulic conductivity, aquitard (302 to 365 ft below land surface)	1.5x10 <sup>-5</sup> ft/d
Skeletal elastic specific storage, aquifer system .....	1.7x10 <sup>-6</sup> ft <sup>-1</sup>
Skeletal inelastic specific storage, aquitards (less than or equal to 18 ft thick).....	4.0x10 <sup>-5</sup> ft <sup>-1</sup>
Skeletal inelastic specific storage, aquitards (greater than 18 ft thick).....	3.5x10 <sup>-4</sup> ft <sup>-1</sup>
Specific storage, water .....	4.2x10 <sup>-7</sup> ft <sup>-1</sup>

مراحل واسنجی ممکن است به کمک معادلات یا نرم افزار PEST و یا به صورت دستی صورت بگیرد. فرایند تطابق (History Matching) شامل تطابق داده های مورد اعتماد فرونشست (اندازه گیری شده یا برآوردی) با نتایج شبیه سازی به کمک آزمون و خطا و تغییر پارامترها در دامنه به دست آمده از مطالعات تحلیلی فاز اول صورت بگیرد. این کار تا به دست آمدن یک سری مناسب از پارامترها ادامه پیدا می کند. نتایج اولیه حاکی از برآورد کم فرونشست در سال های انتهایی ۱۹۸۰ الی ۱۹۹۰ بوده است. اگرچه در کل نتایج شبیه سازی رضایت مند بود ولی اقدام به اصلاح پارامترهای حساس و مشکوک برای بزرگی تراکم (ضرائب) و زمان (زهکشی) با توجه به نتایج اندازه گیری انجام شد.

ارزش های واسنجی هدایت هیدرولیکی عمودی نسبتاً با نتایج تحلیل فاز مطالعات پایه تطابق داشت ولی ارزش ضریب ذخیره الاستیک حدوداً دو برابر بزرگ تر از نتایج به دست آمده از روش آنالیز تنش - کرنش بود البته با نتایج دیگر مدل های موجود تطابق داشت. همچنین ارزش های ضرائب ذخیره پلاستیک دو آکی تارد ضخیم و

نازک تر به ترتیب ۲۱ و ۲ برابر بزرگتر از روش برآوردی آنالیز تنش - کرنش بود. لذا نتایج روش تحلیلی تنش - کرنش این پارامتر نمی تواند برای آکی تاردهای با تاخیر زهکشی زیاد قابل قبول باشد. اگرچه برای آکی تاردهای نازک تر نتایج بهتر بود.

در آکی تاردهای با ضخامت حدود ۱,۵ تا ۵,۵ متر هدایت هیدرولیکی عمودی و ذخیره ویژه پلاستیک اسکلت سیستم (Skeletal) از جدول بالا به دست آمده از مراحل واسنجی استفاده شد.

زمان ثابت مورد نیاز تعادل زهکشی بر اساس رابطه تحلیلی که قبلاً ارائه شد در اینجا بررسی بیشتر شد. این زمان برای آکی تاردی با دامنه ضخامت مذکور، حدود ۱۷ تا ۲۱۶ روز می باشد. این زمان برای آکی تارد با ضخامت ۱۹ متر و با تراز اعماق لایه بالایی و پایینی ۹۲ تا ۱۱۱ متر زیر سطح زمین زمان ثابت تعادل حدود ۶۰ سال، و برای واحد محصور در تراز اعماق ۳۶ تا ۵۶ متر زیر سطح زمین محاسبه نشد ولی حدود ۳۵۰ سال برآورد شد.

هد متناظر با تنش موثر تسلیم قبل از نشست های مهم دائم، در آکیفر میانی معادل ۱۲,۸ (۴۲ ft) متر افت تراز سفره با فرض اینکه بار هیدرولیکی در آکیفر میانی حدود ۶,۷ متر بالای سطح زمین باشد محاسبه شد.

## ۶-۷ آنالیز حساسیت و صحت سنجی

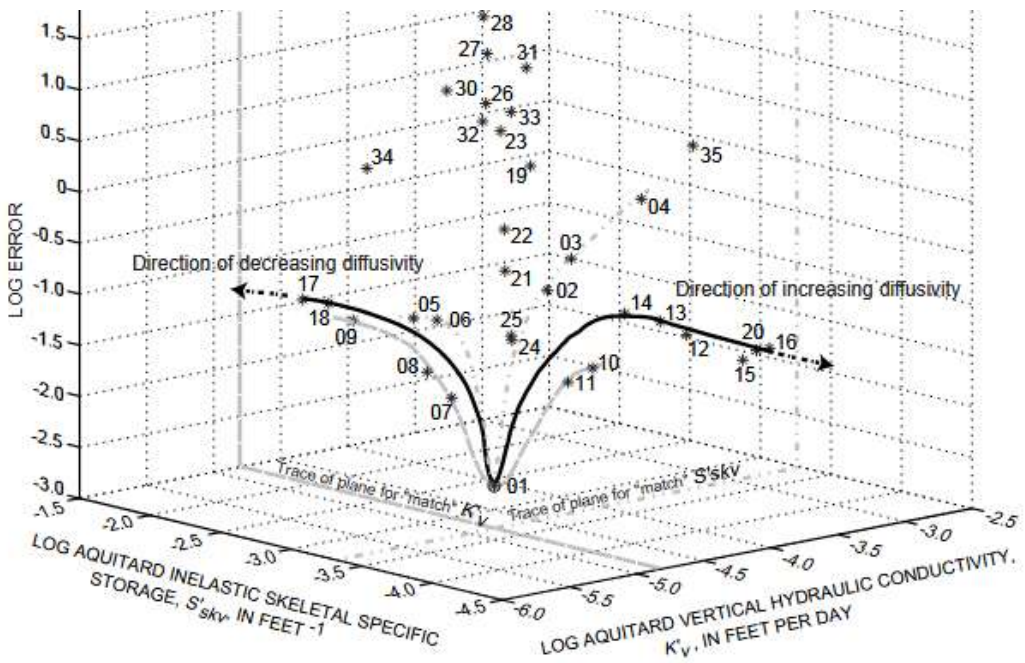
پارامترها منتخب برای مدل هالی جهت آنالیز حساسیت موارد زیر بودند:

- تنش پیش از تحکیم اولیه (تنش مجاز) به کمک مدل تاریخی
- ذخیره الاستیک و پلاستیک با مدل ۷ ساله اخیر
- هدایت هیدرولیکی عمودی با مدل ۷ ساله لخبیر

مشخص شد بزرگی فرشتت زمین در مطالعه سایت هالی، بیشترین حساسیت را به پارامتر تنش موثر یا همان آستانه تنش قبل از آغاز تراکم مهم، دارد.

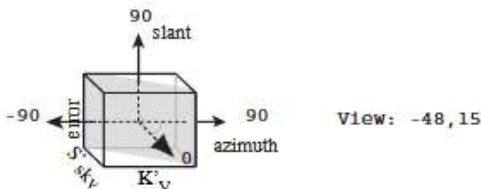
به طور کلی آنالیز حساسیت بر اساس خطای محاسبه شده (Sce) از رابطه زیر بین جابجایی شبیه سازی شده ( $\mu_{zs}$ ) و اندازه گیری شده ( $\mu_{zo}$ ) در کشش سنج و  $n=1.751$  انجام شد:

$$Sce = \sqrt{[(\sum(\mu_{zo} - \mu_{zs})^2) / (n - 1)]},$$



#### EXPLANATION

- Error surface in plane of "match" value of  $S'_{skv}$
- Error surface in plane of "match" value of  $K'_v$
- Error surface through "match" value of aquitard vertical hydraulic diffusivity in plane perpendicular to plane of constant diffusivity
- ⊕ Parameter values from history match
- \* Parameter values used in sensitivity analysis
- 35 Model run number

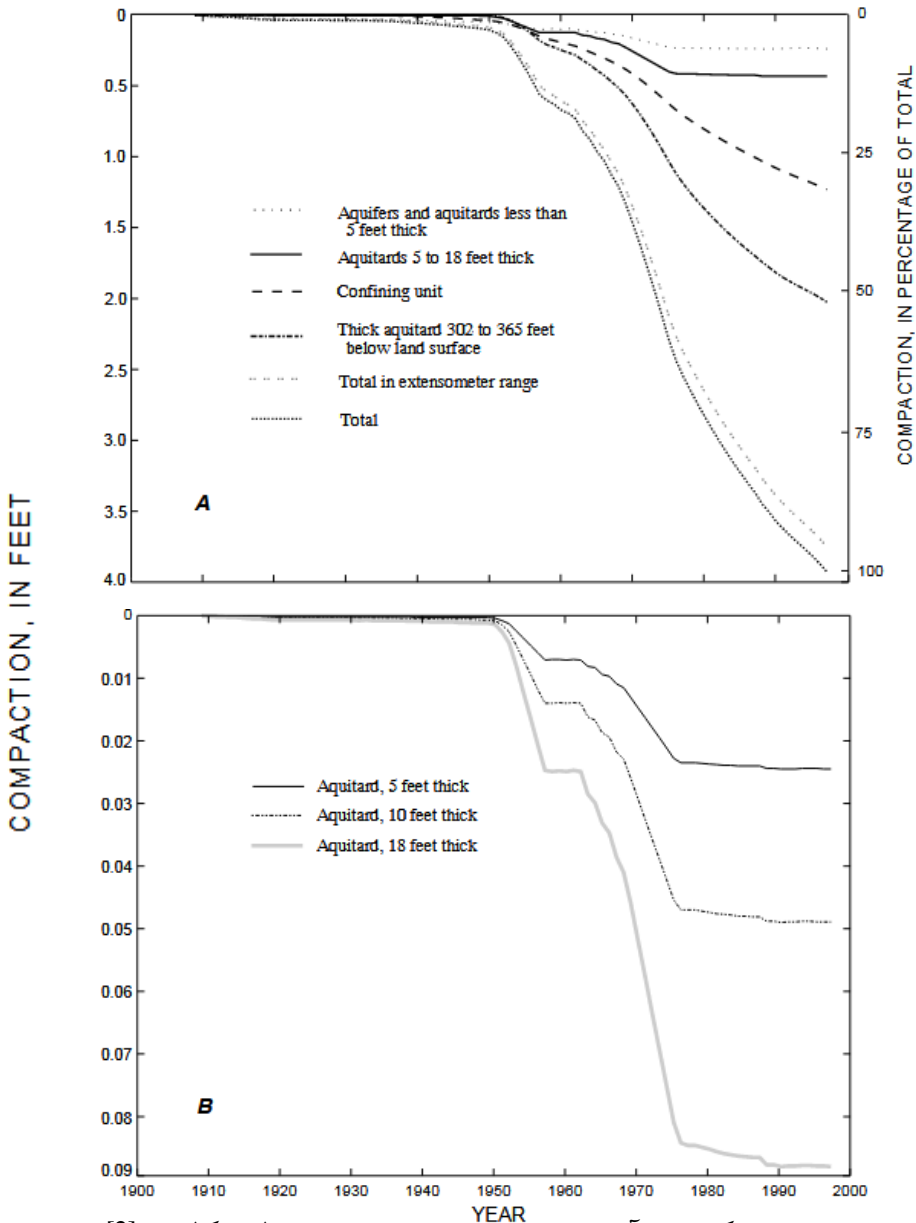


بررسی روند خطاها برای پخش هیدرولیک عمودی و ذخیره با تطابق ارزش های لوگ این پارامترها [2]

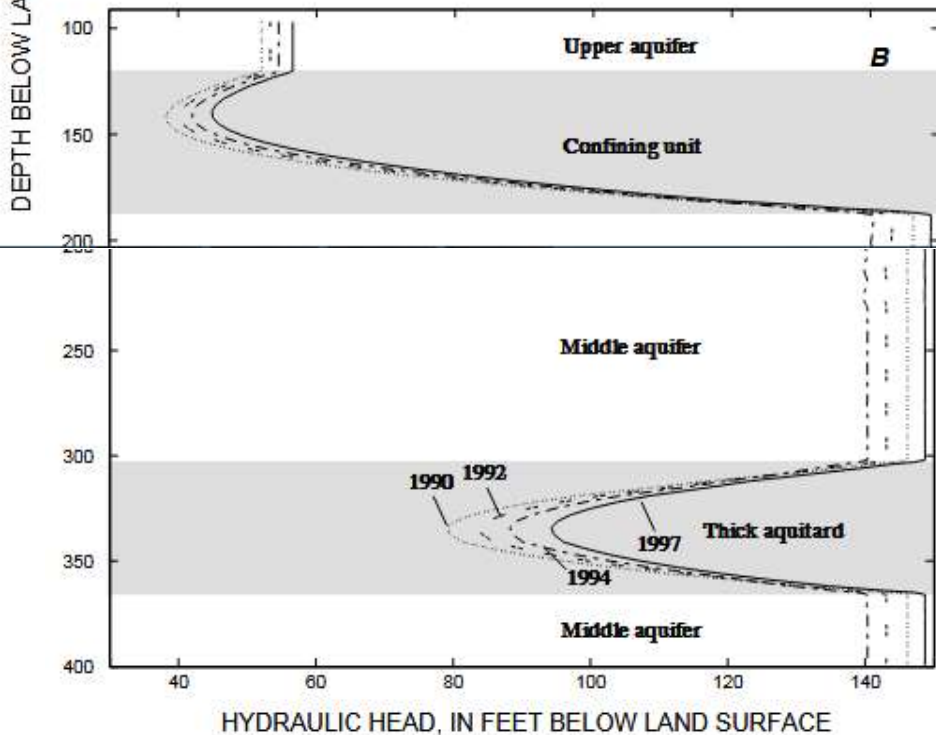
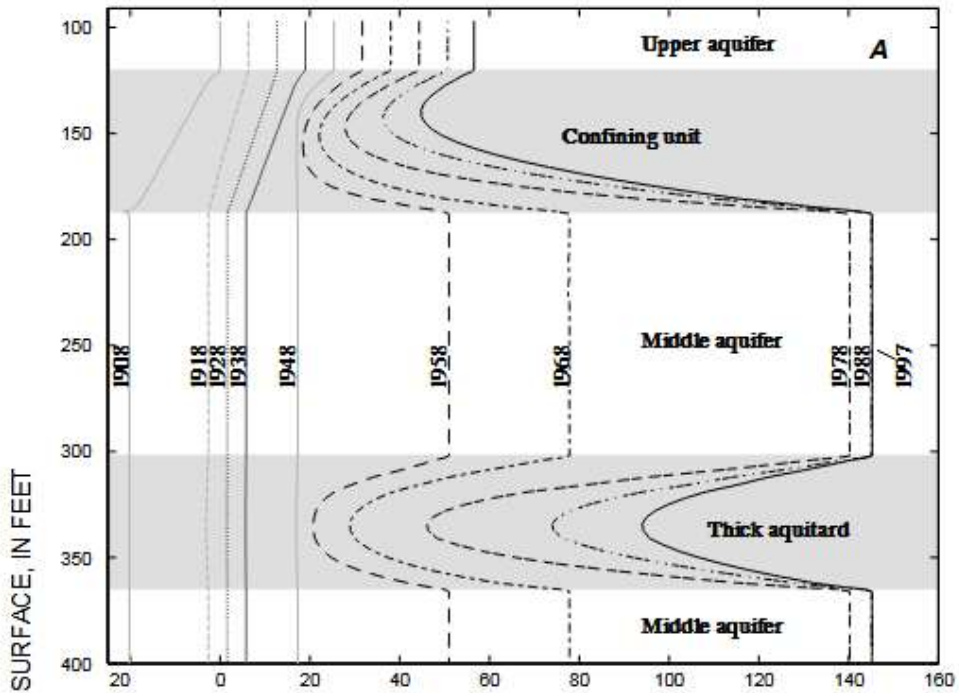
نتایج آنالیز حساسیت حاکی از آن است که مدل هالی، به تغییرات پارامترهای  $K'_v$ ,  $S'_{skv}$  و هدایت هیدرولیکی عمودی آکی تاردها بسیار حساس می باشد. این پارامترها نقش مهمی در شبیه سازی نشست باقی مانده و بهبود تخمین فرونشست آینده دارند.

## ۷. شبیه سازی نشست زمین و سناریو سازی ها

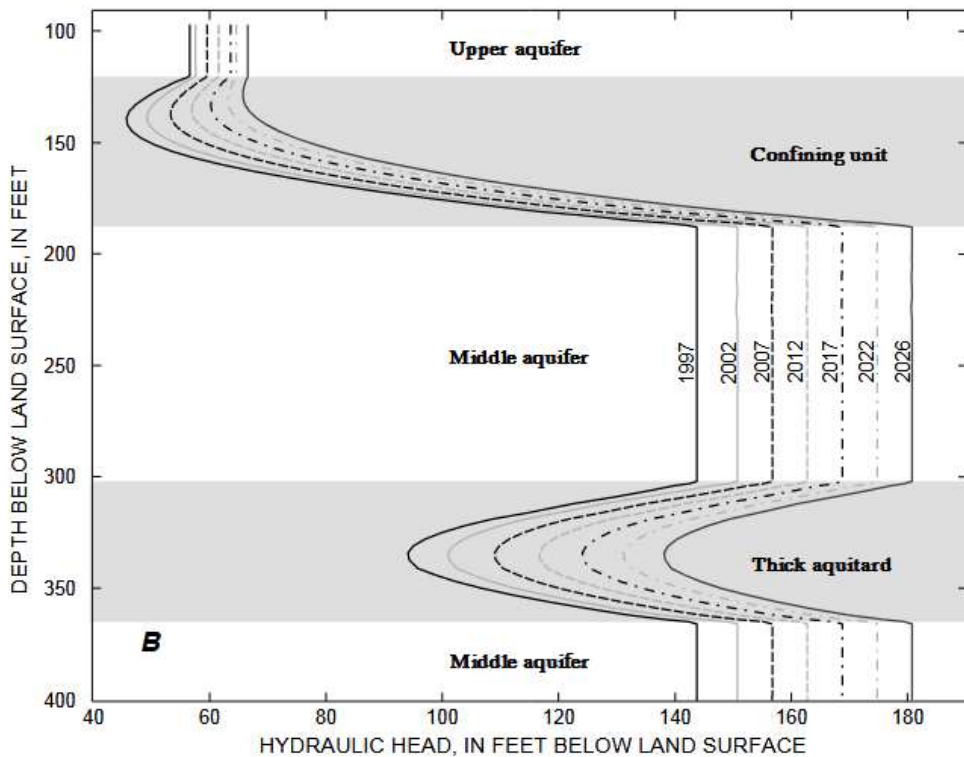
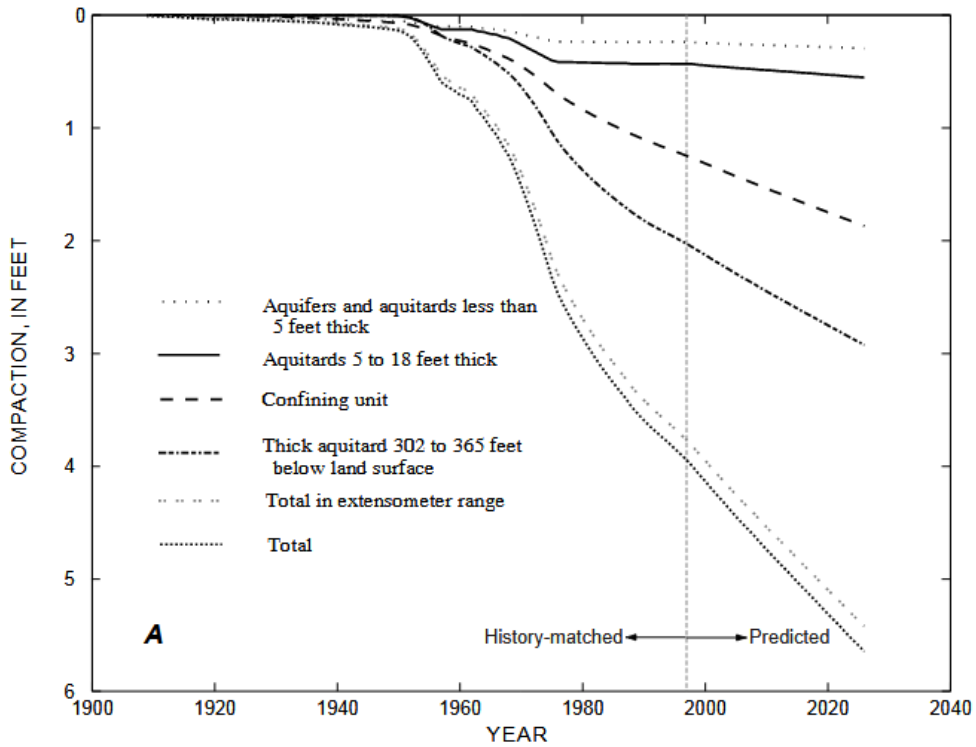
نتایج شبیه سازی اطلاعات خوبی در خصوص چگونگی فرایند نشست در اثر برداشت آب در درزآمدت و اثرات فصلی تغذیه و برداشت ۷ سال اخیر از اکیفر و آکی تارد ها جهت مدیریت سفره منطقه هالی فراهم نمود. مقدار تراکم شبیه سازی شده به وسیله مدل تاریخی مقدار نشست را در دوره ۱۹۰۸ الی ۱۹۹۷ حدود ۱,۲ متر که ۹۵ درصد آن (۱,۱۴ متر) مربوط به عمق میانی کشش سنج بود نشان داد. نتایج در شکل های زیر به تفکیک سهم هر لایه و آبخانه مشخص شده است.



نتایج شبیه سازی تراکم سیستم آبهای زیرزمینی و فرونشست زمین سایت هالی - کالیفرنیا [2]



نتایج پلات بار هیدرولیکی و فرونشست زمین سایت هالی مدل تاریخی و اخیر - کالیفرنیا [2]



[2] نتایج سناریو سازی بار هیدرولیکی و نشست سایت هالی (سناریو دوم تا سال ۲۱۰۰ شبیه سازی شد) - کالیفرنیا

نتایج حاکی از آن است که بخشی از فشار هیدرولیکی عمودی مازاد در آکی تاردها عامل اصلی نشست تا حدود حداقل ۳۰ درصد از نشست نهایی است که در سال های ۱۹۹۷ رخ می دهد. سناریوهای آینده بر اساس احتمال وضعیت توسعه و پمپاژها صورت گرفت که می شود از این مدل برای مدیریت و برنامه ریزی نیز استفاده نمود.

## ۸. ملاحظات فنی (تعیین ضرائب آبخانه - بیلان - کنترل فرونشست)

بیلان و ضرائب سفره

شرکت های آب منطقه ای باید توجه کنند که استفاده از نتایج پمپاژ قدیمی در تدقیق ضرائب هیدرلیکی سفره ها زمانی اعتبار داشت که بهره برداری بی رویه و نشست ها رخ نداده باشد. لذا برنامه ریزی بیلان آب کشور بر اساس اطلاعات قدیمی از آزمایشات پمپاژ، (تحلیل های زمین شناسی به هیچ عنوان نمی تواند پاسخگوی این تغییرات باشد و تنها از روش های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی می بایست اصلاحات ذکر شده در متن حاضر صورت بگیرد) باعث صدمات دیگری به پیکره آبخان های کشور خواهد شد. در این خصوص نیاز به طراحی و انجام تهیه ضرائب جدید آبخان ها بر اساس مفاهیم مجموعه حاضر ناگزیر است.

به طور کلی باتوجه به عدم توجه به مفاهیم ارائه شده بهره برداری پایدار در مرجع ۳ تهیه شده توسط مولف حاضر و تاکید بر برداشت معادل تغذیه سالانه سفره ها از مجموعه شرکت های آب منطقه در سال های گذشته و از آن بدتر عملیاتی نشدن همین معیار هر چند نادرست، دلیل عمده شرایط حاضر بوده که امید است این مجموعه ها در راستای نتایج علمی در زمان مناسب اقدام نمایند.

دلایل فرونشست و روش های کنترل نشست به صورت کلی

ابتدا باید علت نشست و نوع آن مشخص شود. اساساً در آبخانه های آزاد و تحت فشار پس از افت سفره، تنش موثر زیاد می شود. اگرچه نشست های آبخانه های آزاد و درشت در کوتاه مدت زیاد نیست ولی در درازمت می تواند نشست های مهم را ایجاد کند به ویژه اینکه مانند دشت هالی سایت (Holly Site) ممکن است آبخانه ها مرکب باشند و لذا اثر آکی تاردها در کوتاه مدت مشخص شود. البته نشست های مهم و نهایی آکی تاردها با بافت ریز نیز در درازمدت مشخص می شود.

به طور کلی همانطور که در بخش های قبلی نیز تشریح شد تنش موثر متناسب با حاصل کسر فشار منفذی (معادل افت یا خیز هیدرولیکی سفره) از تنش کل است. بطوریکه با کاهش تراز هیدرولیکی و خالی شدن منافذ از آب، نیروی مربوط به شناوری ذرات کم شده و به تناسب وزن کم شده، فشار بیشتری بر ذرات خاک در اثر افزایش نیروی سربار لایه های بالایی ایجاد می شود. اما در آبخانه های تحت فشار در اثر کاهش تراز پیژومتری نیروی وارده از آبخانه به لایه محصور کننده (پایین به بالا) کم شده و لذا وزن سربار لایه فوقانی باعث افزایش تنش موثر می



گردد. اگر این تغییر تنش موثر بیش تر از فشارهای تجربه شده قبلی ذرات خاک نباشد (آستانه مجاز) بطوریکه با کاهش تراز تغییری در وضع قرارگیری ذرات نسبت به یکدیگر مشاهده نشود فرونشست از نوع الاستیک (برگشت پذیر) و در غیر اینصورت فرونشست غیرالاستیک (پلاستیک) خواهد بود. که اغلب برای این نوع فرونشست نمی توان برنامه احیا تهیه نمود. یک روش عمده جهت پیش گیری از فرونشست های الاستیک نزدیک به شرایط پلاستیک زمین، مدیریت برداشت بر اساس آبدهی پایدار آبخانه باتوجه به معیار تنش موثر مجاز (تنش پیش تحکیمی) است (معیارهای آبدهی برداشت مجاز پایدار توسط دلیری، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ در مرجع ۳ برای ۱۳ معیار کامل تشریح شده است در اینجا یک معیار تنش موثر مجاز بررسی شده است) بطوریکه همیشه حداکثر افت تراز سفره قبل از آستانه ایجاد تنش پیش تحکیمی آبخانه قرار گیرد. در این حالت نشست ها بسیار نامحسوس و قابل کنترل و احیا هستند.

یک روش عمده در احیای آبخانه پس از فرونشست برگشت پذیر، تغذیه مصنوعی، پخش سیل و مصرف بهینه برداشت ها در کنار تکنولوژی روش های آبیاری، فرهنگ سازی، انتقال آب، و ... است. که این تکنیک ها در بندها و فصول مرجع ۳ مولف تشریح شده است. اما باید توجه نمود اساساً احیای آبخانه در خصوص آلودگی و نشست زمین با موفقیت پایین همراه است. اگر مواد آکیفر فشرده شوند دیگر به آسانی به شرایط اولیه خود باز نمی گردند و لاقل آبدهی شرایط اولیه را پیدا نخواهند کرد. در خصوص آلودگی نیز با توجه به سرعت پایین آب های زیرزمینی و همچنین شرایط محیط خاک و ضریب اضمحلال برخی آلاینده ها، اغلب احیای کیفی سفره ممکن است سال ها به طول انجامد.

#### شناسایی عوامل موثر بر فرونشست به صورت کلی در البرز

در این قسمت ابتدا محیط های زمین شناسی با پتانسیل فرونشست بررسی می شود. سپس عوامل کلیدی و موثر در فرونشست بیان می شود. در ادامه ارتباط بین ۲ عامل کلیدی تراکم چاه های بهره برداری و افت سفره در منطقه طرح با فرونشست تحلیل می گردد. سرانجام علل اصلی و موثر در فرونشست منطقه فهرست می شود:

محیط های زمین شناختی دارای پتانسیل فرونشست شامل موارد زیر هستند:

۱ (سنگهای انحلال پذیر (سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک) که توسط نهشته های تحکیم نیافته مدفون شده اند یا فروچاله های کهن پر شده با نهشته های تحکیم نیافته که فشار هیدرواستاتیکی رو به بالا (Buoyancy) آب زیرزمینی در نگهداری آنها موثر است. باتوجه به رخساره های ژئومورفولوژی موجود در منطقه، سازندهای از این جنس ناچیز بود.

۲ (نهشته های جوان تحکیم نیافته و رسوبات آواری نیمه تحکیم یافته با تخلخل زیاد که در زیر نهشته های آبرفتی، دریاچه ای و یا نهشته های دریایی کم عمق واقع شده اند. در این مطالعه فرونشست های اتفاق افتاده در این کلاس هستند.

## دلایل کلی فرونشست البرز

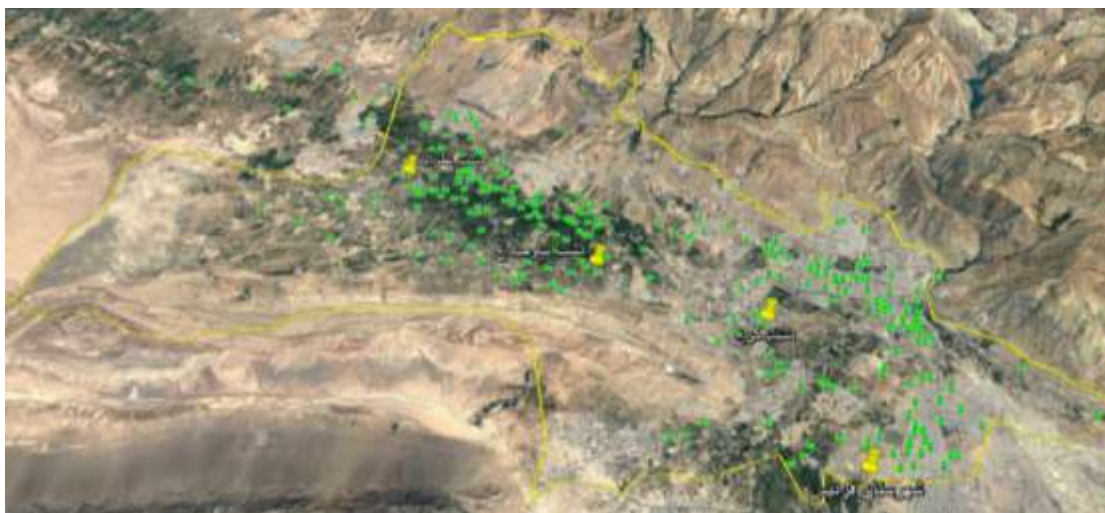
به طور کلی افزایش روز افزون بهره برداری از آب های زیرزمینی، به ویژه در حوضه هایی که با نهشته های آبرفتی، دریایی کم عمق یا دریاچه ای تحکیم نیافته (Unconsolidated) انباشته شده اند، می تواند به فرونشست سطح زمین منجر شود.

طبق تعریف انستیتو زمین شناسی ایالات متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین است که می تواند دارای بردار اندک جابجایی افقی باشد. حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر محدود نبوده و فرونشست می تواند در اثر پدیده های طبیعی زمین شناختی مانند انحلال، جنس سازند، آب شدن یخ ها و تراکم نهشته ها، حرکت های آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین، آتشفشان، زمین لرزه، گسل، رانش قاره ای، آتش سوزی، انفجار زیرزمینی و یا فعالیتهای انسانی نظیر معدنکاری، برداشت آبهای زیرزمینی و یا استخراج نفت و گاز و معادن، ساخت و ساز و یا نشست لوله های فاضلاب، تغییر فشار اتمسفر و بارندگی ایجاد شود. نشست های عمودی مذکور ممکن است برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر باشند. حالت های اخیر با بررسی ذخیره ویژه پلاستیک و الاستیک آبخانه به کمک تفسیر همزمان اطلاعات لوگ چاه، پیزومترها و آنالیز رادار ارزیابی گردد.

## رابطه تراکم چاه های کشاورزی با فرونشست در البرز

جهت بررسی اینکه در منطقه حاضر علت اصلی فرونشست ها مربوط به تخلیه بیش از حد مجاز سفره است می بایست با توجه به نوع کاربری چاه ها و طبقه بندی دبی تخلیه روی نقشه هم فرونشست و تفسیر لوگ چاه ها معلول را تایید یا رد نمود. در این خصوص تفسیر لوگ چاه خارج از خدمات می باشد لذا فرض بر این است که مناطق با کاربری اراضی آبی احتمالا دارای سازندهای ریزدانه هستند که فرض دور از واقعیتی نیز نیست. در این خصوص ابتدا چاه های با کاربری کشاورزی و دبی بالاتر از ۲۲ لیتر بر ثانیه (حداکثر دبی پمپاژ حدود ۸۰ لیتر بر ثانیه مشاهده شد) با تخلیه سالانه بیش از ۶۰۰ هزار مترمکعب تفکیک و روی اراضی محدوده منطقه قرار گرفت (شکل زیر).

مقایسه شکل بازیر با سایر نقشه های شماتیک فرونشست در محدوده طرح حاکی از آن است که عمده فرونشست های منطقه طرح تقریبا در محدوده اراضی آبی و چاه های کشاورزی با تخلیه نسبی بیشتر متمرکز شده است. لذا این موضوع می تواند حاکی از اثر تراکم چاه های برداشت سفره روی تشدید و یا عامل محرکه فرونشست منطقه باشد.



انطباق چاه های کشاورزی با اراضی آبی-البرز دلیری ۱۳۹۵

رابطه افت سفره با میزان فرونشست-البرز

باتوجه به نتایج آنالیز هیدروگراف معرف واحد دشت هشتگرد (شکل زیر) همانطور که مشخص است بر اساس آمار تاریخی، نوسان سطح سفره روندی منفی با نرخ  $0.87-$  متر در سال از سال ۱۳۷۶ تا حال دارد. به لحاظ تئوری اگر افت سفره بیش از  $0.5$  متر در سال باشد باید برنامه ریزی منابع آب مورد بازبینی و کنترل قرار گیرد. زیرا برای بیش از این مقدار می بایست تمهیدات مدیریتی جهت حفظ منابع آب زیرزمینی لحاظ گردد.



هیدروگراف واحد آبخانه آبرفتی هشتگرد به عنوان معرف دشت های محدوده

ضمناً" شیب افت سفره در سال های پس از ۱۳۸۸ که بیشتر شده است حاکی بر دو موضع است. یک اینکه شدت برداشت ها زیاد بوده و یا به دلیل نشست و کاهش ضریب ذخیره، افت واحد سفره شدید تر شده است. با انطباق تاریخ سری زمانی هیدروگراف معرف سفره با اطلاعات اندازه گیری فرونشست IPGN سازمان نقشه برداری در نقطه نجم آباد (شکل های بخش قبل) می توان رابطه بین میزان افت سفره و اثر آن در مقدار فرونشست را تفسیر نمود. باتوجه به نمودار نشست زمین اندازه گیری شده در ایستگاه نجم آباد (شکل بخش قبل) نشست زمین از مقدار فرونشست طی ۷,۵ سال گذشته یعنی حدود سال ۸۷ تا ۹۴ به طور متوسط برابر ۲,۷ سانتی متر در سال می باشد. مقدار افت سفره از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۳ نیز حدود ۱,۱ متر در سال به طور متوسط می باشد. لذا با نادیده گرفتن تاخیر بین توابع افت- فرونشست برای سری های درازمدت، می توان عنوان نمود برای هر ۱ متر افت واحد سفره در محدوده طرح به طور متوسط ۲,۵ سانتی متر و برای هر ۰,۵ متر افت سفره حدود ۱,۲۲ سانتی متر فرونشست طی ۶ تا ۷ سال اخیر تجربه شده است. از این نسبت می توان برای ارزیابی سایر نقاط آبخان نیز باتوجه به افت هیدروگراف ها بهره برد تا شرایط گذشته و آینده ریسک و آسیب پذیری فرونشست نیز تحلیل گردد. این موضوع توسط شریفی، ۱۳۹۱ در دشت نوق-بهرمان تحقیق شده است. در این دشت به ازای ۰,۵ متر افت سطح آب حدود ۱۵ سانتی متر نشست گزارش شده است. لذا آبخانه های دشت محدوده طرح به احتمال زیاد در انتهای فشرده سازی ساختمانی هستند و یا لایه های میانی تشکیلات محدوده بیشتر رس می باشد. تفسیر قطعی این مورد با انطباق لوگk چاه امکان پذیر است.

علاوه بر موارد بالا اگر نمودار نشست نجم آباد با دقت بیشتری ارزیابی شود مشخص می گردد که شدت قوس نوسان مربوط به افت و خیز سطح زمین تا سال ۲۰۱۰ (۱۳۸۹) بسیار ملموس بوده به طوریکه منحنی سینوسی واضحی مشاهده می گردد. در این حالت رابطه تنش موثر (افت و تغذیه سفره) با فرونشست در محدوده الاستیک قرار دارد. لذا تا قبل از سال ۱۳۸۹ شرایط تشکیلات آبخان های محدوده هنوز تحت مدول الاستیک کامل قرار داشتند و با پر و خالی شدن سفره برگشت کامل مشاهده می شده است. اما سال ۲۰۱۱ (۱۳۹۰) این نوسان کم تر شده به طوریکه از سال ۲۰۱۲ (۱۳۹۱) به بعد می توان اذعان نمود برگشت تشکیلات بسیار ناچیز ثبت شده است. علت این عدم برگشت می تواند به عدم تغذیه طبیعی یا برداشت بیش از حد سال های پس از ۱۳۹۱ نیز مرتبط باشد. در صورتیکه برداشت ها ثابت و تغذیه طبیعی نیز وجود داشته است لذا شروع تحکیم لایه ها و شرایط پلاستیک مورد انتظار است. در این خصوص برای بررسی بیشتر با مراجعه به نمودار شکل هیدروگراف معرف بالا مشخص می گردد که از سال ۱۳۹۱ تا ۹۳ نوسان سینوسی سفره نیز مشاهده نشده است لذا احتمالاً "عدم برگشت طی این سال ها به شرایط هیدرولوژیکی مرتبط باشد. با این وجود سال ۱۳۹۳ به بعد مقدار نوسان سفره و لذا تغذیه طبیعی در نمودار مشاهده شده است اما متناظر آن در نمودار نشست و سال ۲۰۱۴ به بعد برگشتی مشاهده نشده است. لذا به احتمال زیاد در حال حاضر،

تشکیلات آبخانه های محدوده تحت شرایط پلاستیک و برگشت ناپذیر قرار دارند. این تفسیر باتوجه به یک برداشت اندازه گیری بوده اما قطعاً "زنگ خطری برای دولتمردان و تصمیم گیران می باشد.

نکته دیگر که می توان از نمودار هیدروگراف معرف تفسیر نمود شدت افت سفره نسبت به سال های قبل از ۱۳۸۷ و ۸۸ است. همانطور که مشخص است مقدار شدت و نرخ افت سفره نیز طی این سال ها بسیار زیاد می باشد. این موضوع با مقایسه نمودار نشست طی یک سال اخیر نیز همخوانی دارد زیرا بین برداشت و افت سفره و فرونشست یک تاخیر زمانی ۳ تا چند ساله وجود دارد. لذا با قطعیت می توان عنوان نمود علت اصلی فرونشست های پهنه ای محدوده طرح با افت و برداشت بی رویه سفره ها در ارتباط مستقیم است بطوریکه نرخ فرونشست برگشت ناپذیر یک سال اخیر در نقطه شاهد اندازه گیری نجم آباد با میزان ۳,۴ سانتی متر در سال بیشتر از نرخ متوسط ۷ سال اخیر به میزان ۲,۷ سانتی متر در سال می باشد. که این ارقام خود حاکی از آن است که هنوز آبخانه به طور کامل همجوش نشده و نقطه ای نور امید اگرچه ناچیز جهت حفظ بخشی از پتانسیل واقعی آبخانه ها هنوز باقی مانده است.

بنابراین انتظار است نرخ فرونشست منطقه نیز با روندی کنونی تحت شرایط حاضر و بدون اعمال برنامه ریزی روی سفره های زیرزمینی همچنان ادامه یافته و سپس تحکیم و کل پتانسیل آبخانه سفره از بین می رود. بر این اساس دلایل اصلی فرونشست در منطقه طرح به شرح زیر فهرست می گردد:

به طور کلی می توان دلایل اصلی فرونشست را در محدوده شهر فردیس و دشت های حومه به عامل اصلی برداشت بی رویه از سفره ها به شرح ذیل نسبت داد:

- انحراف دبی برداشت سفره ها از دبی فنی چاه (برداشت غیر مجاز یک چاه مجاز)
- انحراف دبی برداشت سفره ها از دبی آبدی مجاز پایدار (محاسبه نامناسب تعیین مقدار مجاز برای چاه های مجاز)
- احتمال وجود سازندهای ریزدانه با شرایط الاستیک در تشکیلات زیر اراضی آبی و عدول از آستانه مجاز تنش موثر و ایجاد کرنش
- وجود چاه های مجاز و غیر مجاز (احتمالاً) با تراکم زیاد و تداخل شعاع چاه ها و ایجاد افت بیش از حد تداخلی
- عدم توجه ذی نفعان به لحاظ ایجاد عواقب ناشی از مازاد برداشت و سایر موارد اجتماعی
- عدم ایجاد تسهیلاتی که به لحاظ اجتماعی، ذی نفعان از روی میل و آگاهانه رعایت حدود برداشت از سفره را بنمایند.

- عدم وجود یا ناکافی بودن و ناکارآمد بودن برنامه های مدیریتی اجرایی جهت حفظ یا توسعه منابع آب زیرزمینی به لحاظ فنی و/یا اجرایی (کنترل برداشت ها، تعادل در بیلان ورودی و خروجی، تغذیه مصنوعی و.. در سال های قبل.

- تغییرات اقلیمی (Climate Change). این موضوع از روی شکل ۲۶ به خوبی مشخص است. در واقع بخشی از فرونشست مربوط به کاهش ورودی باران و تغذیه طبیعی است که در اثر دوره های خشک ایجاد شده است. همانطور که از نمودار هیدروگراف معرف مشخص است این دوره ها با نوسان حدود ۷ تا ۹ ساله با سیکل های میان

مدت در اثر پدیده های جوی، لکه های خورشیدی و غیره ایجاد شده اند که اغلب این تغییرات طبیعی اقلیمی (Climate Variable) بواسطه توسعه صنایع و تمدن بشر در کشورهای در حال توسعه و پیشرفته تشدید شده است. -عدم یکپارچگی در ساختار مدیریت منابع طبیعی (آب-خاک-زمین بستر تولید) و کشاورزی (برداشت) به لحاظ هماهنگی بین سازمانی.

شناسایی مخاطرات فرونشست و ارائه راهکار با رویکرد پدافند غیر عامل-البرز جهت شناسایی نقاط حساس در شرایط حال و آینده با فرض اینکه شرایط بهره برداری و نرخ فرونشست سفره تغییری نکند ابتدا مناطق در معرض فرونشست مشخص و سپس باتوجه به ساختار سازه یا نوع عارضه، حساسیت نسبی نقاط باتوجه به بازدیدهای میدانی تعیین شد. سپس راهکارهای کاربردی باتوجه به نیاز و اهداف طرح به شرح بندهای زیر ارائه گشت:

شناسایی مخاطرات فرونشست بر اساس بازدیدهای میدانی-البرز  
-مخاطرات کلی ناشی از فرونشست

فرونشست و شکافهای زمین (Fissure) که به آهستگی و به تدریج گسترش می یابند شاید همان تاثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه باری چون سیل و زلزله را نداشته باشند. لذا موضوع پدافند در این مبحث بویژه از منظر محیط زیست شاید بسیار ناملموس به نظر آید. در منطقه در حال فرونشست شاید خرابی به طور گسترده مشاهده نشده و حتی آثار سطحی حاصل از آن نیز به راحتی قابل تشخیص نباشند، با این وجود به طور معمول بر طرف کردن آسیب های ناشی از فرونشست و شکافهای زمین پر هزینه و دشوار است. برای نمونه، فرونشست ها می توانند به تخریب سیستم های آبیاری و نابودی خاکهای حاصلخیز کشاورزی ( با کاهش تخلخل آنها ) منجر شوند و یا در صورت شدید شدن به صورت پهنه ای باعث سیل گیر شدن مناطقی شود که قبلاً "سیل گیر نبودند. وارد آمدن آسیب به چاهها در مناطق فرونشست روستایی و شهری کاملاً متداول بوده و سبب خرابی چاهها و بروز پدیده ای می شود که در اصطلاح به آن رشد چاه (سبز کردن) گفته می شود. مناطق شهری به سبب تراکم جمعیت، وجود ساختمان ها و جریان های حیاتی به طور ویژه در برابر فرونشست آسیب پذیرتر و حساس تر می باشند این پدیده می تواند به خیابان ها، پل ها و بزرگراه ها آسیب وارد آورده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان ها آسیب رسانده و موجب ترک خوردگی در آنها شود. در این حالت سازه هایی که پی گسترده تر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب پذیرترند. خطوط راه آهن، سدهای خاکی، تصفیه خانه ها و کانالها از ریسک بیشتری برخوردارند. پدیده فرونشست موضعی با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می تواند سبب بروز تغییرات

عمده ای در هیدرولوژی منطقه شود. به عنوان مثال در این مناطق ممکن است سیلاب های مخربی به وقوع بپیوندد در حالی که پیش از ایجاد فرونشست از چنین پیشینه ای بر خوردار نبوده است. از سوی دیگر این پدیده می تواند با ایجاد تغییر در وضعیت زمین، آشناختی منطقه نظیر جهت و سرعت جریان آب زیر زمینی، بیلان آب زیر زمینی و غیره پی آمدهای ناهنجار بیشتری در کنار از دست رفتن ظرفیت آبخان به عنوان مهمترین منبع تامین آب بسیاری از مناطق به همراه داشته باشد.

ایجاد فروچاله و فرونشست، جابجایی پی، شکست و ترک در ساختمان و تاسیسات زیربنایی، کج شدن تاسیسات، آسیب دیدن تاسیسات کشاورزی، چاه های بهره برداری و کانال ها و شبکه سطحی، شکستگی و ترک یا انهدام پل ها، جاده ها، از عمومی ترین خسارات و مخاطرات ناشی از فرونشست هستند که باتوجه به بازدیدهای میدانی و پرسش و پاسخ از اهالی کشاورزی در خصوص ماسه دهی چاه ها در منطقه طرح (البرز) این عوارض کنترل و بازرسی شدند. ترکیب این عوامل با مناطق با پتانسیل خطر زمین لرزه نیز می تواند باعث تشدید مخاطرات و آسیب پذیری گردد(شریفی کیا ۱۳۹۰).

-مخاطرات ناشی از فرونشست در منطقه طرح (البرز) بر اساس علائم و بازدید صحرائی جهت تعیین نقاط با حساسیت بالا از نظر آسیب دیدگی (۱ حساسیت کم و ۱۰ بسیار حساس) و شناسایی مخاطرات ناشی از فرونشست ابتدا نقشه کاربری های مهم منطقه تهیه شد. سپس با انطباق نقشه کاربری و نقشه فرونشست در نقاط با متوسط و پیشینه فرونشست، مناطق در معرض فرونشست شناسایی و سپس باتوجه به نوع عارضه و خصوصیات سازه ای، درجه حساسیت نسبی آنها تعیین شد. نتایج شامل موقعیت و نقاط بازدید در جدول زیر ارائه شده است. سپس می توان از این جدول نقشه ای تهیه نمود (نقشه ها و عکس های نمونه).

جدول شماره ۴: اثر و علائم فرونشست و حساسیت نسبی کاربری و عارضه های محدوده طرح به فرونشست

ردیف	X_UTM	Y_YTM	عارضه یا کاربری	فرونشست سالانه (۱۳۹۵) cm	فرونشست (۲۴-) روز اخیر cm	اثر و علائم فرونشست	حساسیت نسبی کارشناسی ۱-۱-	نوع مخاطره	توضیحات	شماره عکس
۱	۴۹۱۶۹۲	۳۹۶-۳۸۷	خطوط برق بزرگراه مهرتپه	-2.5	-1.7	کج شدن نامحسوس دکل	۷	مالی - جانی	از بین رفتن خطوط برق و قطع برق سراسری	۱
۲	۴۹۷۲۷-	۳۹۵۸۱۲۹	پمپ بنزین مشکین دشت	-8.3	-5.5	ترک خوردگی دیوار	۵	مالی و محیط زیست	خطر نشست مواد آلی و آلودگی	۲
۳	۴۹۷۳۳۱	۳۹۵۸۱۹۶	پیزومتر مشکین دشت	-8.8	-5.8	جابجایی عمودی	۳	بی اثر بودن کارایی پیزومتر	پیزومتر نشان دهنده نشست زمین و خطر آن	۳
۴	۴۹۳۸۱۹	۳۹۵۲۷۱۶	باند فرودگاه (محدوده شهرک ناز)	-1.5	-1	غیر قابل تشخیص	۴	نشست باند و مالی جانی	خطر ایجاد ترک در باند فرودگاه	۴
۵	۴۹۹۸-۴	۳۹۵۹-۱۱	تقاطع راه آهن جاده قلمستان	-11.8	-7.8	غیر قابل تشخیص	۴	مالی و جانی	باعث قطع راههای ارتباطی و خطرات انسانی	۵
۶	۴۹۴۱۹۶	۳۹۶۳۴۵۹	تقاطع جاده و مناطق مسکونی مهرتپه	-2.4	-1.6	ترک خوردگی	۶	خطر مالی و جانی	این نوع نشست باعث خطر انسانی میشود	۶
۷	۴۸۹۶۸۱	۳۹۶۵۹۶۸	تقاطع راه آهن جاده خرم دشت	-4.2	-2.8	غیر قابل تشخیص	۴	مالی	باعث قطع راههای ارتباطی و خطرات انسانی و مالی	۷
۸	۴۸۵۵۳-	۳۹۶۴۵۳۳	خطوط برق اصلی چهار باغ	-4.5	-3	غیر قابل تشخیص	۷	خطرات مالی	خطر جانی قطع برق سراسری	۸
۹	۴۷۸-۴۳	۳۹۶۸۳۸۶	خطوط برق فشار قوی لشگر آباد	-6	-4	غیر قابل تشخیص	۷	مالی - جانی	خطر جانی به علت مجاورت با منطقه مسکونی	۹
۱۰	۴۸-۵۱۵	۳۹۷۱۶۶۶	تقاطع راهن جاده پل عبوری حمیدیه	-10.6	-7	غیر قابل تشخیص	۶	جانی و مالی	قطع راههای ارتباطی و خطر جانی و مالی	۱۰
۱۱	۴۷۳۳۳۶	۳۹۷۹۳۵۵	پمپ بنزین هشنگرد	-3.65	-2.4	ترک خوردگی دیوار	۵	مالی و محیط زیست	خطر نشست مواد آلی و آلودگی	۱۱
۱۲	۴۷۵۳۴۵	۳۹۷۸۶۷۱	دکل های برق فشار قوی و تصفیه خانه فاضلاب هشنگرد	-9.1	-6	غیر قابل تشخیص	۵	جانی مالی	خطر نشست دکل های برق فشار قوی در مجاورت تصفیه خانه هشنگرد	۱۲



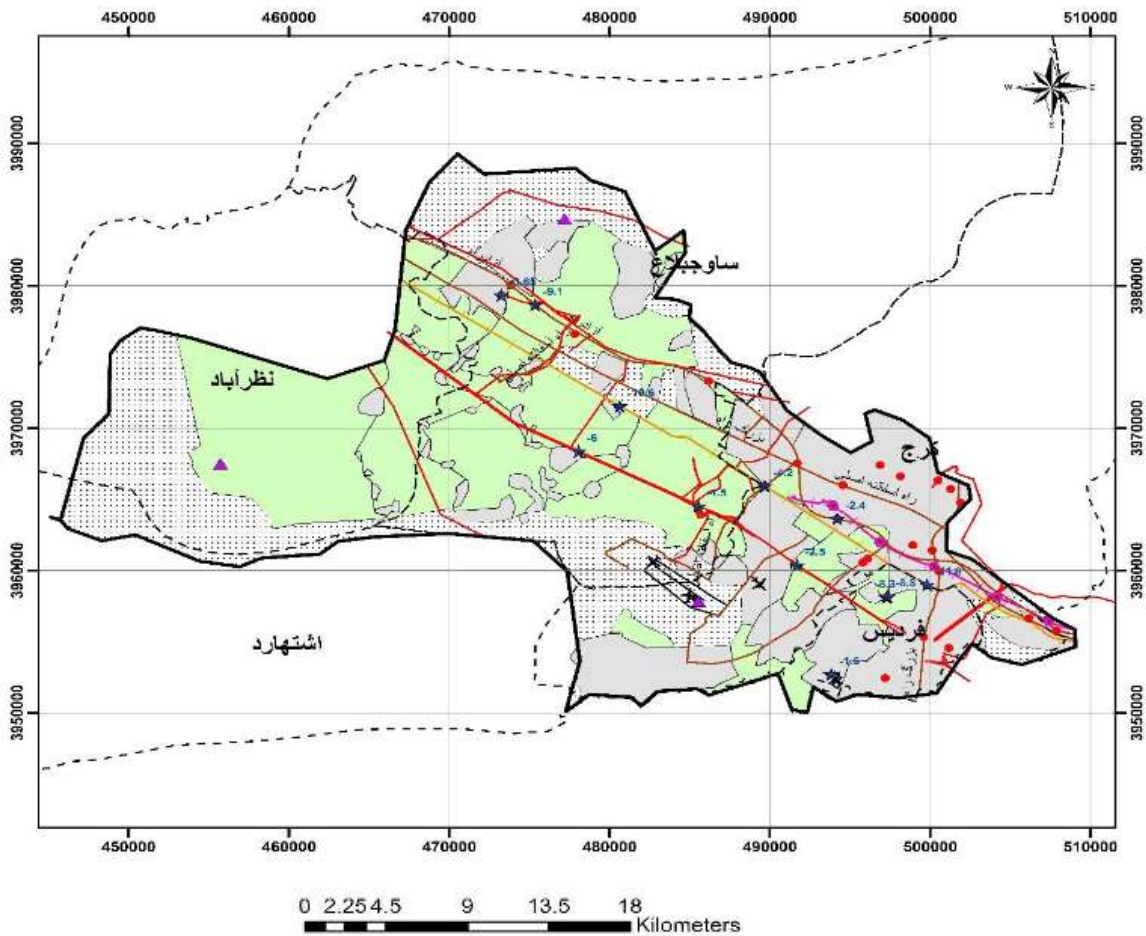


عکس شماره ۲: پمپ بنزین

**جدول پیوست: مقایسه نتایج فرونشست در قسمت های مختلف محدوده مطالعاتی**

توضیحات	بیشینه فرونشست طی سال اخیر (cm)	نرخ فرونشست سالانه (cm)	نقشه ارگه شده محدوده ها در گزارش
محدوده بالایی دشت کرج و بخش کوچکی از ساوجبلاغ	۱۶٫۷ سانتی متر در سال	۴٫۵ سانتی متر در سال	پارت ۱
دشت شهرستان فردیس و محدوده ای از دشت میانی کرج	۱۲ سانتی متر در سال	۲ سانتی متر در سال	پارت ۲
بخش عمده ساوجبلاغ و کل دشت نظرآباد	۱۲ سانتی متر در سال	۵ سانتی متر در سال	پارت ۳
محدوده گوشه پایینی دشت کرج	۱۲ سانتی متر در سال	۵ سانتی متر در سال	پارت ۴





مقیاس: 1/350000

عنوان طرح: مطالعه پهنه بندی و بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین در شهرستان فردیس

عنوان نقشه: نقشه روی هم گذاری لایه های کاربری اراضی موجود با نقاط بازدید فرونشست



کارفرما: آب منطقه ای استان البرز

مدیر پروژه: فرهنگ دلیری

## منابع

۱. فرهاد دلیری (۱۳۹۵)، مدیر پروژه و کارشناس فنی مطالعات فرونشست دشت های البرز با آنالیز رادار روش تداخل نگار D-INSAR، بررسی علت فرونشست و راهکار پدافند غیر عامل، شرکت مهندسين آبسام (همکار).
2. Michelle Sneed and D.L.Galloway., (2000)., Aquifer – System Compaction and Land Subsidence: measurement, analyses, and simulations – the Holly site, Edwards air force base, Antelope valley, California. USGS.
۳. فرهاد دلیری، حسن سيد سراجی (۱۳۹۸)، مدل‌سازی آب و محیط زیست (کنترل سيل، تامین آب، مدیریت آب زیرزمینی)، محاسبات عددی، چاپ دوم، حمایت شرکت مهندسين آبسام (طرح و ساخت).

پیوست

## استاندارد سازی متن

جدول ضریب تبدیل واحدها

Multiply	By	To obtain
acre-foot (acre-ft)	1,223	cubic meter
acre-foot per year (acre-ft/yr)	1,223	cubic meter per year
foot (ft)	0.3048	meter
foot per day (ft/d)	0.3048	meter per day
foot per foot (ft/ft)	1.000	meter per meter
foot per year (ft/yr)	0.3048	meter per year
foot squared per day (ft <sup>2</sup> /d)	0.0929	meter squared per day
inch (in.)	25.4	millimeter
mile (mi)	1.609	kilometer
square mile (mi <sup>2</sup> )	2.590	square kilometer

$$^{\circ}\text{F}=1.8(^{\circ}\text{C})+32.$$

معادله تبدیل دما بر حسب سانتی گراد به فارنهایت

سطح مبنا: در هر کشور و مکان بر اساس شرایط ژئودزی انتخاب می شود. مثلا سطح دریا.

### مخفف ها

BAS5	Basic package, version 5 of MODFLOW-96
BCF5	Block-Centered Flow package, version 5 of MODFLOW-96
EAFB	Edwards Air Force Base
FHB1	Transient Specified-Flow and Specified-Head Boundaries package of MODFLOW-96
GPS	Global Positioning System
IBS1	Interbed Storage package of MODFLOW-96
InSAR	interferometric synthetic aperture radar
LVDT	linear voltage displacement transducer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SIP5	Strongly Implicit Procedure Solution package, version 5 of MODFLOW-96
SWP	State Water Project
ft/°C	foot per degree Celsius
ft <sup>-1</sup>	per foot

علامت ها

$\sigma_e$	effective or intergranular stress
$\sigma_T$	total stress
$\rho$	pore-fluid pressure
$\mu_z$	vertical displacement
$\alpha_{je}$	elastic skeletal compressibility
$\alpha_{kv}$	inelastic skeletal compressibility
$h$	hydraulic head
$\rho$	fluid density
$g$	gravitational acceleration
$\Delta$	change (for example, $\Delta\sigma_T$ means change in total stress)
$S_{sk}^*$	aquifer system skeletal specific storage
$\alpha_{sk}^*$	aquifer system skeletal compressibility
$S_{sk}$	aquitard skeletal specific storage
$S_{sje}$	aquitard elastic skeletal specific storage
$\alpha'_{je}$	aquitard elastic skeletal compressibility
$\sigma_{e(max)}$	past maximum effective or intergranular stress
$S_{skv}$	aquitard inelastic skeletal specific storage
$\alpha'_{kv}$	aquitard inelastic skeletal compressibility
$S_{sk}$	aquifer skeletal specific storage
$S_{sje}$	aquifer elastic skeletal specific storage
$\alpha_{je}$	aquifer elastic skeletal compressibility
$\alpha_{kv}$	aquifer inelastic skeletal compressibility
$\Sigma b'$	aggregate thickness of aquitards
$\Sigma b$	aggregate thickness of aquifers
$S'_k$	aquitard skeletal storage coefficient
$S_k$	aquifer skeletal storage coefficient
$S'_{je}$	aquitard elastic skeletal storage coefficient
$S'_{kv}$	aquitard inelastic skeletal storage coefficient
$S_{je}$	aquifer elastic skeletal storage coefficient
$\beta_f$	fluid compressibility of water
$S_w$	aquifer-system storage attributed to the pore water
$S_{sw}$	specific storage of water of aquitards
$S_{sw}$	specific storage of water of aquifers
$n'$	porosity of the aquitards
$n$	porosity of the aquifers
$S^*$	aquifer-system storage coefficient
$\gg$	much greater than
$S^*_v$	aquifer system inelastic storage coefficient
$=$	approximately equal to
$\epsilon_{volume}$	volume strain
$\epsilon_z$	vertical strain
$\epsilon_x$	horizontal strain, x direction
$\epsilon_y$	horizontal strain, y direction
$\partial$	partial derivative
$z$	coordinate in z direction (vertical)
$S'_s$	aquitard specific storage
$K'_v$	aquitard vertical hydraulic conductivity
$t$	time
$K'_v/S'_s$	aquitard vertical hydraulic diffusivity
$\tau$	time constant
$b'$	aquitard thickness
$Sc_e$	computed error
$\Sigma$	sum
$\mu_{zo}$	measured displacement (vertical)
$\mu_{zs}$	simulated displacement (vertical)
$n$	1,751

سیستم شماره گذاری چاه ها در مدل

این روش ها با توجه به امکانات مدل و پیچیدگی سیستم

متفاوت است. در متن حاضر موضوع با مثال تشریح

شده است.



AbSam  
EPC Co.  
Research, Design & Construction  
[www.ab.sam.ir](http://www.ab.sam.ir)

**Environmental & Water Modeling**  
**Aquifer – System Compaction and Land Subsidence**  
**(Measurements, Analyses, Simulations)**

1 th Print 2021

**BY:**

**Dr. Farhad Daliri , Dam Consultant & Hydrologist**

Instructor

Water & Environment Eng. Campus of  
Shahid Beheshti University

**Dr. Hassan Seyed Seraji , Dam Consultant & Fluid Mechanics**

Assistant Professor

Water & Environment Eng. Campus of  
Shahid Beheshti University





AbSam EPC Co.

Research, Design & Construction

# Environmental & Water Modeling

## Aquifer – System Compaction and Land Subsidence (Measurements, Analyses, Simulations)

1 th Print 2021

By:

**Dr. Farhad Daliri** Dam Consultant and Hydrologist  
Instructor Water & Environment Eng. Campus of  
Shahid Beheshti University  
info@absam.ir

**Dr. Hassan Seyed Seraji** Dam Consultant and Fluid Mechanics  
Assistant Professor Water & Environment Eng. Campus of  
Shahid Beheshti University  
mhseraji@pwut.ac.ir

### شرکت مهندسين آيسام (طرح و ساخت)

شرکت مهندسين مشاور و پيمانکار آيسام (طرح و ساخت) از تركيب شرکت مهندسين مشاور مهار سيل کشتمان (سال ۱۳۸۵) با شرکت پيمانکار آبنگار کارون (سال ۱۳۷۵) در سال ۱۳۹۶ تاسيس شده است. زمينه های کاری:

۱. مشاور و پيمانکار آب - انرژی و محیط زیست (سد، رودخانه، نفت و گاز، آبیاری و ...)
  ۲. مشاور و پيمانکار راه و ساختمان
  ۳. نقشه برداری و IT , GIS
  ۴. تهیه، نصب و راه اندازی ادوات و ابزار و هوشمندسازی
  ۵. صدور خدمات فنی و مهندسی ارزش و روابط بين الملل
- جزئیات در سایت رسمی شرکت [www.absam.ir](http://www.absam.ir) قابل دسترسی می باشد.

**\* کليه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مهندسين آيسام می باشد.\***



شماره: ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۳-۲۱-۵

Download: [www.absam.ir](http://www.absam.ir)

مدل سازی آب و محیط زیست

مؤلفان: دکتر فرهاد دلیری، دکتر حسن سید سراجی

