



پژوهشگاه نیرو

## تدوین دانش فنی شناسایی اثر فرونشست زمین بر عملکرد فونداسیون تجهیزات و سازه‌های شبکه انتقال و فوق توزیع

مدیر پروژه: امیر اکبری گرکانی

واحد مجری: گروه پژوهشی سازه‌های صنعت

NRI-ER-916-PCVNP18-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.349

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# تدوین دانش فنی شناسایی اثر فرونشست زمین بر عملکرد فونداسیون تجهیزات و سازه‌های شبکه انتقال و فوق توزیع

مدیر پروژه: امیر اکبری گرکانی

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

همکاران پروژه: محمدعلی جعفری صحنه سرایی، آرش یگانه فلاح، سهیل صاحب، سارا تهاجمی بنفشه ورق،  
مهدیه کلانتری، بهاره حیدری، سحر مختاری جوزانی، مهسا فراهانی و فرشته طریقت

واحد مجری: گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

انتشارات پژوهشگاه نیرو

مرداد ماه ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-916-PCVPN18-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.349

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

تدوین دانش فنی شناسایی اثر فرونشست زمین بر عملکرد فونداسیون تجهیزات و سازه‌های شبکه انتقال و فوق توزیع / مدیر پروژه: اکبری گرکانی، امیر. ویراستار: نام خانوادگی، نام. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۲۸۳ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. جعفری صحنه سرایی، محمدعلی، یگانه فلاح، آرش، صاحب، سهیل، تهاجمی بنفشه ورق، سارا، کلانتری، مهدیه، حیدری، بهاره، مختاری جوزانی، سحر، فراهانی، مهسا، طریقت، فرشته همکار پروژه. ۲. رهنورد، علیرضا، مدیر واحد مجری. ۳. گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق. ۴. محور پژوهشی طراحی فونداسیون‌های نوین سازه‌ها



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به نام پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: [www.nri.ac.ir](http://www.nri.ac.ir)

پست الکترونیک انتشارات: [publications@nri.ac.ir](mailto:publications@nri.ac.ir)



شماره:

تاریخ:

پیوست:

بسمه تعالی



پژوهشگاه نیرو

### فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب امیر اکبری گرکانی، مدیر پروژه تدوین دانش فنی شناسایی اثر فرونشست زمین بر عملکرد فونداسیون تجهیزات و سازه های شبکه انتقال و فوق توزیع، و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام ..... مرحله از ..... مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. محمدعلی جعفری صحنه سرایی

۲. آرش یگانه فلاح

۳. سهیل صاحب

۴. سارا تهاجمی بنفشه ورق

۵. مهدیه کلانتری

۶. بهاره حیدری

۷. سحر مختاری جوزانی

۸. مهسا فراهانی

۹. فرشته طریقت

## پیشگفتار

سوانح و مخاطرات طبیعی همواره زیستگاه‌های بشری را با چالش روبه‌رو کرده است. در کشور ایران پس از زلزله، سیلاب و خشکسالی، پدیده فرونشست را می‌توان یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین مخاطرات به شمار آورد. شدت فرونشست در برخی دشت‌های ایران از جمله تهران چند برابر بیشتر از بحرانی‌ترین شرایط در کشورهای توسعه‌یافته‌ی جهان است. فرونشست زمین در ایران به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای مخاطره آور فرونشست زمین، مسئله احتمال آسیب‌دیدگی خطوط انتقال و توزیع نیرو است. شکل‌گیری فرونشست زمین سبب وارد آمدن خسارت به سازه‌های سطحی همچون شبکه توزیع برق و دکل‌های انتقال نیرو می‌شود و همچنین ترک‌ها و شکاف‌های ایجادشده در سطح زمین در اثر این پدیده، خسارات زیادی را به خطوط انتقال زیرزمینی و مدفون برق وارد می‌آورد.

همبستگی همبستگی موجود میان فرونشست زمین از یک سو و کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و تغییر در ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های زیرسطحی از سوی دیگر، تا حد زیادی شناخته شده و تلاش‌های چندی برای شناخت کامل این پدیده صورت گرفته است. ولی تاکنون مدل جامع و دقیقی از پیش‌بینی فرونشست ارائه نشده است. این گزارش در چهار فصل تهیه شده و در آن تلاش شده تا ارتباطی میان علوم ژئوتکنیک، هیدروژئولوژی، ژئولوژی و سنجش از دور برای پیش‌بینی شدت و میزان فرونشست برقرار و یک دانش تلفیقی ایجاد شود. در فصل اول، اصول روش‌های داده کاوی به عنوان کوششی برای بدست آوردن اطلاعات مفید از میان داده‌های مختلف معرفی شده است. در فصل دوم و سوم، اصول پایه‌ای هر کدام از علوم هیدروژئولوژی، ژئولوژی، سنجش از دور و ژئوتکنیک و روش‌های کاربردی مختص هر یک در شناخت و پیش‌بینی فرونشست زمین تشریح شده است. در نهایت و در فصل چهارم، با انجام یک سری مطالعات با رویکرد سازه‌ای، ابتدا سازه‌های بحرانی خطوط انتقال در برابر خطر فرونشست شناسایی شده که در این بین، تأثیرپذیری دکل‌های مشبک و تونل‌های انتقال نیرو از خطر فرونشست زمین، از سایر موارد بیشتر تشخیص داده شد. سپس با انجام مطالعات پارامتریک بر روی عواملی چون فاصله دکل‌ها، سختی زمین، زاویه دکل‌ها، قطر تونل و غیره، میزان خطر پذیری دکل‌های مشبک و تونل‌های انتقال نیرو با عنایت به میزان نشست پی و اضافه نیروی ایجاد شده در اعضای سازه‌ای ناشی از فرونشست زمین بررسی و با توجه به توصیه‌های آیین نامه‌ای، متون فنی و قضاوت مهندسی، حدود عملکرد ایمن این سازه‌ها مشخص شدند.

گزارش حاضر نشان دهنده روش استفاده از داده‌های موجود بر اساس روش تحلیلی پیشنهاد شده برای مطالعه آسیب پذیری سازه‌های انتقال و فوق توزیع نیرو بوده و صرفاً مسیر و روند بررسی‌ها را نشان می‌دهد و قابل تعمیم به موارد مشابه نیز می‌باشد.

"این گزارش مربوط به پروژه تدوین دانش فنی شناسایی اثر فرونشست زمین بر عملکرد فونداسیون تجهیزات و سازه‌های شبکه انتقال و فوق توزیع است که پشتیبانی آن، بر عهده گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق و نظارت آن، بر عهده جناب آقای دکتر سید محسن حائری بوده است."

## فهرست مطالب

|    |                                                                                      |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۲ | ۱ تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی |
| ۱۳ | ۱-۱ مقدمه                                                                            |
| ۱۳ | ۱-۲ تعریف فرونشست                                                                    |
| ۱۴ | ۱-۳ محیط های زمین شناختی دارای پتانسیل فرونشست                                       |
| ۱۴ | ۱-۴ عوامل موثر بر فرونشست                                                            |
| ۱۵ | ۱-۴-۱ سنگ های انحلال پذیر (سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک)                               |
| ۱۵ | ۱-۴-۲ ذوب یخ لایه های منجمد دائمی اعماق زمین                                         |
| ۱۶ | ۱-۴-۳ نشست زمین در اثر معدنکاری                                                      |
| ۱۶ | ۱-۴-۴ برداشت سیالات                                                                  |
| ۱۷ | ۱-۴-۵ فعالیت های تکتونیکی                                                            |
| ۱۷ | ۱-۵ مکانیزم فرونشست زمین در اثر برداشت آب زیرزمینی                                   |
| ۱۸ | ۱-۵-۱ سفره آب زیرزمینی و انواع آنها                                                  |
| ۱۸ | ۱-۵-۱-۱ سفره آب آزاد                                                                 |
| ۱۹ | ۱-۵-۱-۲ سفره آب تحت فشار (آرتزین)                                                    |
| ۲۰ | ۱-۵-۱-۳ سفره آب ساحلی                                                                |
| ۲۱ | ۱-۵-۱-۴ سفره های آب تشکیلات آهکی و گچی                                               |
| ۲۱ | ۱-۵-۱-۵ میان بسترها                                                                  |
| ۲۱ | ۱-۵-۲ تنش در یک توده خاک                                                             |
| ۲۲ | ۱-۵-۲-۱ تنش های ژئواستاتیک                                                           |
| ۲۲ | ۱-۵-۲-۲ تنش ژئواستاتیک عمودی                                                         |
| ۲۲ | ۱-۵-۲-۳ تنش ژئواستاتیک افقی                                                          |
| ۲۳ | ۱-۵-۲-۴ تنش های اصلی                                                                 |
| ۲۳ | ۱-۵-۳ مفهوم فشار آب منفذی                                                            |
| ۲۴ | ۱-۵-۴ مفهوم تنش موثر                                                                 |
| ۲۷ | ۱-۵-۵ مبانی تئوری تحکیم                                                              |
| ۲۸ | ۱-۵-۵-۱ محاسبه نشست کشسان                                                            |
| ۳۰ | ۱-۵-۵-۲ مبانی تحکیم                                                                  |
| ۳۰ | ۱-۵-۵-۳ آزمایش تحکیم یک بعدی در آزمایشگاه                                            |
| ۳۲ | ۱-۵-۵-۴ تحکیم یافته عادی و پیش تحکیم یافته                                           |
| ۳۳ | ۱-۵-۵-۵ محاسبه نشست با استفاده از تحکیم اولیه یک بعدی                                |
| ۳۴ | ۱-۵-۵-۶ نشست تحکیمی ثانویه                                                           |
| ۳۵ | ۱-۵-۶ تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی                                                     |
| ۳۷ | ۱-۵-۷ وقوع پدیده فرونشست از دیدگاه تغییرات آب زیرزمینی                               |
| ۳۹ | ۱-۶ آسیب های ناشی از فرونشست                                                         |
| ۴۲ | ۱-۷ نتیجه گیری                                                                       |
| ۴۳ | ۱-۸ مقدمه                                                                            |
| ۴۳ | ۱-۹ انواع مدل های آب زیرزمینی                                                        |
| ۴۴ | ۱-۹-۱ مدل های فیزیکی                                                                 |
| ۴۴ | ۱-۹-۲ مدل های ریاضی                                                                  |
| ۴۵ | ۱-۹-۲-۱ مدل های تحلیلی                                                               |
| ۴۹ | ۱-۹-۲-۲ مدل عددی                                                                     |
| ۵۰ | ۱-۱۰ روش تفاضل محدود                                                                 |

|    |                                                                          |
|----|--------------------------------------------------------------------------|
| ۵۱ | ۱۱-۱ گام‌های مورد نیاز برای طراحی مدل عددی با استفاده از روش تفاضل محدود |
| ۵۱ | ۱۱-۱-۱ انتخاب برنامه کامپیوتری                                           |
| ۵۳ | ۱۱-۱-۲ طراحی مدل                                                         |
| ۵۳ | ۱۱-۱-۲-۱ مدل مفهومی                                                      |
| ۵۴ | ۱۱-۱-۲-۲ شبکه بندی آبخوان                                                |
| ۵۴ | ۱۱-۱-۲-۳ تعیین مرز زیرین آبخوان                                          |
| ۵۴ | ۱۱-۱-۲-۴ شرایط مرزی                                                      |
| ۵۵ | ۱۱-۱-۲-۵ گسسته سازی زمانی مدل                                            |
| ۵۵ | ۱۱-۱-۲-۶ بار هیدرولیکی اولیه                                             |
| ۵۵ | ۱۱-۱-۲-۷ ضریب هدایت هیدرولیکی                                            |
| ۵۵ | ۱۱-۱-۲-۸ ضریب آبدی ویژه                                                  |
| ۵۶ | ۱۱-۱-۳ مدل سازی فرونشست                                                  |
| ۵۶ | ۱۱-۱-۳-۱ پیش بینی فرونشست با استفاده از بسته نرم افزاری IBS              |
| ۵۷ | ۱۱-۱-۳-۲ پیش بینی فرونشست با استفاده از بسته نرم افزاری SUB              |
| ۶۰ | ۱۱-۱-۴ آنالیز حساسیت                                                     |
| ۶۱ | ۱۱-۱-۵ واسنجی مدل                                                        |
| ۶۱ | ۱۱-۱-۶ روش دستی (سعی و خطا)                                              |
| ۶۱ | ۱۱-۱-۷ روش خودکار (اتوماتیک)                                             |
| ۶۱ | ۱۱-۱-۸ صحت سنجی مدل                                                      |
| ۶۲ | ۱۱-۱-۹ مطالعات انجام شده در زمینه فرونشست توسط روش تفاضل محدود           |
| ۶۲ | ۱۱-۱-۱۰ روش اجزای محدود                                                  |
| ۶۴ | ۱۱-۱-۱۱ فرمول بندی اجزاء محدود معادلات تحکیم یک بعدی ترزاقی              |
| ۶۴ | ۱۱-۱-۱۲ فرمول بندی اجزاء محدود معادلات تحکیم سه بعدی Biot                |
| ۶۵ | ۱۱-۱-۱۳ مطالعات انجام شده در زمینه فرونشست توسط روش اجزاء محدود          |
| ۶۶ | ۱۱-۱-۱۴ روش یادگیری ماشین                                                |
| ۶۶ | ۱۱-۱-۱۵ تقسیم بندی در مسائل یادگیری                                      |
| ۶۶ | ۱۱-۱-۱۶ یادگیری با نظارت                                                 |
| ۶۷ | ۱۱-۱-۱۷ یادگیری تقویتی                                                   |
| ۶۷ | ۱۱-۱-۱۸ یادگیری بدون نظارت                                               |
| ۶۷ | ۱۱-۱-۱۹ یادگیری نیمه نظارتی                                              |
| ۶۷ | ۱۱-۱-۲۰ داده کاوی                                                        |
| ۶۸ | ۱۱-۱-۲۱ ابر صفحه                                                         |
| ۶۸ | ۱۱-۱-۲۲ نمونه هایی از انواع روش یادگیری ماشین                            |
| ۶۸ | ۱۱-۱-۲۳ شبکه های عصبی مصنوعی                                             |
| ۶۹ | ۱۱-۱-۲۴ الگوریتم های ژنتیکی                                              |
| ۶۹ | ۱۱-۱-۲۵ ماشین بردار پشتیبان (SVM)                                        |
| ۷۱ | ۱۱-۱-۲۶ ماشین بردار پشتیبان در حالت چند کلاسه                            |
| ۷۲ | ۱۱-۱-۲۷ مطالعات انجام شده در زمینه فرونشست توسط روش ماشین بردار پشتیبان  |
| ۷۲ | ۱۱-۱-۲۸ سنجش عملکرد                                                      |
| ۷۳ | ۱۱-۱-۲۹ مقایسه ماشین بردار پشتیبان و شبکه های عصبی                       |
| ۷۳ | ۱۱-۱-۳۰ روش تابع تاثیر                                                   |
| ۷۵ | ۱۱-۱-۳۱ روش ALPRIFT برای ارزیابی آسیب پذیری فرونشست                      |
| ۷۷ | ۱۱-۱-۳۲ نتیجه گیری                                                       |
| ۷۹ | ۱۱-۱-۳۳ مقدمه                                                            |
| ۷۹ | ۱۱-۱-۳۴ روش های عددی                                                     |
| ۷۹ | ۱۱-۱-۳۵ روش تفاضل محدود                                                  |
| ۸۰ | ۱۱-۱-۳۶ روش اجزای محدود                                                  |

|     |                                                                                                                      |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۸۰  | ۳۷-۱ روش یادگیری ماشین                                                                                               |
| ۸۱  | ۳۸-۱ روش تابع تاثیر                                                                                                  |
| ۸۱  | ۳۹-۱ نتیجه گیری                                                                                                      |
| ۸۱  | <b>۲ تعیین روش سنجش و پیشبینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای</b> |
| ۸۲  | ۱-۲ کلیات تحقیق                                                                                                      |
| ۸۲  | ۱-۱-۲ مقدمه                                                                                                          |
| ۸۳  | ۲-۱-۲ طرح مسئله                                                                                                      |
| ۸۵  | ۳-۱-۲ ضرورت انجام تحقیق                                                                                              |
| ۸۵  | ۴-۱-۲ اهداف و سوالات تحقیق                                                                                           |
| ۸۵  | ۵-۱-۲ ساختار پژوهش                                                                                                   |
| ۸۷  | ۲-۲ تصویربرداری رادار با روزنه مجازی و اصول تداخل سنجی راداری                                                        |
| ۸۷  | ۱-۲-۲ مقدمه                                                                                                          |
| ۸۷  | ۲-۲-۲ ویژگی های سیگنال های رادار                                                                                     |
| ۸۷  | ۳-۲-۲ امواج الکترومغناطیس                                                                                            |
| ۸۸  | ۱-۳-۲-۲ طیف الکترومغناطیس                                                                                            |
| ۸۸  | ۴-۲-۲ طول موج و فرکانس های ماکروبو                                                                                   |
| ۸۹  | ۳-۲-۲ بررسی برخی عوامل تاثیرگذار در سیگنال راداری بازگشتی از جسم                                                     |
| ۸۹  | ۱-۳-۲-۲ شکل هندسی                                                                                                    |
| ۹۰  | ۲-۳-۲-۲ ثابت دی الکتریک                                                                                              |
| ۹۰  | ۳-۳-۲-۲ زاویه ی برخورد محلی                                                                                          |
| ۹۱  | ۴-۲-۲ رادار                                                                                                          |
| ۹۲  | ۱-۴-۲ تصویربرداری در جهت رنج و آزیموت                                                                                |
| ۹۳  | ۲-۴-۲ تصویر مختلط SAR                                                                                                |
| ۹۴  | ۳-۴-۲ اسپکل                                                                                                          |
| ۹۵  | ۴-۴-۲ توان تفکیک تصاویر راداری                                                                                       |
| ۹۷  | ۵-۴-۲ دریچه ی مصنوعی و ویژگی های هندسی                                                                               |
| ۹۸  | ۶-۴-۲ اعوجاجات هندسی                                                                                                 |
| ۹۸  | ۱-۶-۴-۲ سایه در تصاویر راداری                                                                                        |
| ۹۹  | ۲-۶-۴-۲ هم پوشانی در تصاویر راداری                                                                                   |
| ۱۰۰ | ۳-۶-۴-۲ کوتاه شدگی در تصاویر راداری                                                                                  |
| ۱۰۱ | ۵-۲-۲ تداخل سنجی راداری                                                                                              |
| ۱۰۳ | ۱-۵-۲ تداخل سنجی تک مسیر                                                                                             |
| ۱۰۳ | ۲-۵-۲ تداخل سنجی با تکرار مسیر                                                                                       |
| ۱۰۵ | ۳-۵-۲ شرط تداخل سنجی راداری                                                                                          |
| ۱۰۵ | ۴-۵-۲ استخراج ارتفاع زمین با استفاده از تداخل سنجی                                                                   |
| ۱۰۷ | ۵-۵-۲ استخراج تغییر شکل زمین با استفاده از تداخل سنجی                                                                |
| ۱۰۸ | ۶-۲-۲ تئوری تداخل سنجی تفاضلی                                                                                        |
| ۱۰۹ | ۱-۱-۶-۲ روش تداخل سنجی دو عبوره                                                                                      |
| ۱۱۰ | ۲-۱-۶-۲ روش تداخل سنجی سه عبوره                                                                                      |
| ۱۱۱ | ۳-۱-۶-۲ روش تداخل سنجی چهار عبوره                                                                                    |
| ۱۱۱ | ۲-۶-۲ کیفیت تداخل نما                                                                                                |
| ۱۱۱ | ۱-۲-۶-۲ هم دوسی به عنوان معیار کیفیت تداخل نما                                                                       |
| ۱۱۱ | ۲-۲-۶-۲ منابع کاهش هم دوسی                                                                                           |
| ۱۱۵ | ۳-۶-۲ اساس روش طول باز کوتاه                                                                                         |
| ۱۱۵ | ۱-۳-۶-۲ تعریف زیر مجموعه های روش طول باز کوتاه                                                                       |
| ۱۱۶ | ۲-۳-۶-۲ روش کمترین مربعات                                                                                            |
| ۱۱۷ | ۴-۶-۲ فن تداخل سنجی رادار مبتنی بر پراکنشگرهای دائم                                                                  |

- ۱۱۹ ۲-۷ پیشینه تحقیق
- ۱۱۹ ۲-۷-۱ مقدمه
- ۱۱۹ ۲-۷-۲ مطالعات فرونشست انجام شده در جهان و انواع روشهای تداخلسنجی راداری
- ۱۲۹ ۲-۷-۳ مطالعات فرونشست انجام شده در ایران
- ۱۳۰ ۳-۱-۷-۳ تاریخچه مطالعات فرونشست در تهران
- ۱۳۴ ۲-۷-۳-۲ تاریخچه مطالعات تغییر شکل پوسته‌ی زمین در دیگر نقاط ایران
- ۱۳۸ ۲-۷-۴ بحث و بررسی
- ۱۳۹ ۲-۸ روش شناسایی فرونشست
- ۱۳۹ ۲-۸-۱ مقدمه
- ۱۴۰ ۲-۸-۲ مراحل روش تداخلسنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائم
- ۱۴۱ ۲-۸-۲-۱ استفاده از خط مبنای مکانی و زمانی بلند
- ۱۴۲ ۲-۸-۲-۲ حذف خطاهای مداری و اثر توپوگرافی
- ۱۴۲ ۲-۸-۲-۳ انتخاب نقاط پراکنشگر دائم کاندید و تقریب اولیه از پارامترهای مجهول
- ۱۴۴ ۲-۸-۲-۴ برآورد تصویر فاز ناشی از اتمسفر
- ۱۴۵ ۲-۸-۲-۵ افزایش تراکم نقاط و برآورد نهایی مجهولات
- ۱۴۵ ۲-۹ بحث و بررسی
- ۱۴۶ **۳ تعیین روش سنجش و پیشبینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات ژئوتکنیکی**
- ۱۴۷ ۳-۱ تحلیل نظری فرونشست زمین ناشی از اثرات زیست محیطی
- ۱۴۷ ۳-۱-۱ مقدمه
- ۱۴۷ ۳-۱-۲ تحکیم خاک های چند لایه اشباع ناشی از پمپاژ چاه آبکشی
- ۱۴۷ ۳-۱-۲-۱ راهحلهای تحلیلی برای خاک تک لایه
- ۱۵۳ ۳-۱-۲-۲ روش های عددی خاک های لایه ای
- ۱۵۴ ۳-۱-۲-۳ صحت سنجی روش فعلی
- ۱۵۶ ۳-۱-۲-۴ نتایج مدلسازی عددی و مطالعات پارامتریک
- ۱۶۰ ۳-۱-۲-۵ پمپاژ و تزریق آب به چاه
- ۱۶۳ ۳-۱-۳ محاسبه فرونشست زمین با استفاده از تئوری سیستم لایه بندی الاستیک
- ۱۶۵ ۳-۱-۴ محاسبه فرونشست زمین با استفاده از تئوری تحکیم Biot
- ۱۶۷ ۳-۱-۴-۱ ویژگی های کلی معادلات Biot
- ۱۶۷ ۳-۱-۴-۱-۱ اصل ترکیب بارگذاری ها و پمپاژها
- ۱۶۹ ۳-۱-۴-۱-۲ جداسازی دستگاه معادلات Biot
- ۱۷۱ ۳-۱-۴-۱-۳ تغییر مکان الاستیک غیر دورانی
- ۱۷۵ ۳-۱-۵ نتیجه گیری
- ۱۷۵ ۳-۲ روش های پیش بینی فرونشست زمین
- ۱۷۵ ۳-۲-۱ مقدمه
- ۱۷۶ ۳-۲-۲ پیش بینی فرونشست زمین با استفاده از یک مدل همبسته خزش - نشست - تحکیم پیشنهادی توسط Miao et al. (2011)
- ۱۷۷ ۳-۲-۳ راهحل تحلیلی ارائه شده برای فرونشست زمین در لایه رسی
- ۱۸۰ ۳-۲-۴ مدلسازی عددی ارائه شده توسط Zu-jiang and Feng (2011) بر اساس تئوری ویسکوالاستیک- پلاستیک تحکیم Biot
- ۱۸۲ ۳-۲-۵ نتیجه گیری
- ۱۸۳ ۳-۳ مکانیک شکل گیری شکاف های زمین ناشی از پمپاژ آب زیر زمینی
- ۱۸۳ ۳-۳-۱ مقدمه
- ۱۸۶ ۳-۳-۲ مکانیک تشکیل شکاف های زمین
- ۱۹۱ ۳-۳-۳ مفاهیم نظری حالت های تنش برای شروع شکل گیری شکاف های زمین
- ۱۹۱ ۳-۳-۳-۱ حالت های تنش و کرنش
- ۱۹۲ ۳-۳-۳-۲ شکل گیری شکاف زمین و اثرات مقدار طول مشخصه
- ۱۹۵ ۳-۳-۳-۳ تأثیر شرایط مرزی در شکل گیری شکاف های زمین
- ۱۹۶ ۳-۳-۳-۴ شکاف های زمین با یک آبرفت سیمانته شده در بالا
- ۱۹۷ ۳-۳-۴ اجرا و پیاده سازی

|     |                                                                                                                                                                                          |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۲۰۱ | ۴-بررسی میزان آسیب پذیری فونداسیون سازه های انتقال و فوق توزیع از مقدار فرونشست زمین                                                                                                     |
| ۲۰۲ | ۱-۱-۴-مقدمه                                                                                                                                                                              |
| ۲۰۲ | ۲-۴-انتخاب سازه های بحرانی خطوط انتقال و فوق توزیع در برابر فرونشست زمین بر مبنای شواهد و قرائن خرابی های گذشته و تعیین معیارهای عملکردی آنها بر اساس استانداردها و مستندات مربوطه موجود |
| ۲۰۲ | ۱-۲-۴-مقدمه                                                                                                                                                                              |
| ۲۰۳ | ۲-۲-۴-روش شناسی پژوهش                                                                                                                                                                    |
| ۲۰۳ | ۳-۲-۴-فرضیات لحاظ شده و حدود کاربرد این پژوهش                                                                                                                                            |
| ۲۰۴ | ۴-۲-۴-فرونشست زمین                                                                                                                                                                       |
| ۲۰۵ | ۵-۲-۴-سازه های انتقال نیرو                                                                                                                                                               |
| ۲۰۷ | ۱-۵-۲-۴-سوابق خرابی های ناشی از فرونشست بر سازه های صنعت برق در ایران و جهان                                                                                                             |
| ۲۱۰ | ۱-۱-۵-۲-۴-سوابق خرابی های ناشی از فرونشست بر دکل های انتقال نیرو در ایران و جهان                                                                                                         |
| ۲۱۱ | ۲-۱-۵-۲-۴-سوابق خرابی های ناشی از فرونشست بر تونل های انتقال نیرو در ایران و جهان                                                                                                        |
| ۲۱۱ | ۶-۲-۴-انتخاب بحرانی ترین سازه های انتقال نیرو در برابر فرونشست زمین                                                                                                                      |
| ۲۱۲ | ۷-۲-۴-مکانیزم اثر فرونشست بر دکل های انتقال نیرو                                                                                                                                         |
| ۲۱۲ | ۸-۲-۴-تعیین حد خطرپذیری دکلها براساس توصیه های آیین نامه ای                                                                                                                              |
| ۲۱۵ | ۹-۲-۴-انتخاب نرم افزار مناسب برای حل مساله                                                                                                                                               |
| ۲۱۵ | ۱-۹-۲-۴-نرم افزار SAP2000                                                                                                                                                                |
| ۲۱۶ | ۲-۹-۲-۴-نرم افزار Plaxis                                                                                                                                                                 |
| ۲۱۶ | ۱۰-۲-۴-مشخصات مصالح استفاده شده در دکلها، تونلها و مشخصات خاک                                                                                                                            |
| ۲۱۶ | ۱-۱۰-۲-۴-اعضای فولادی دکل های انتقال                                                                                                                                                     |
| ۲۱۶ | ۲-۱۰-۲-۴-کابل های هادی                                                                                                                                                                   |
| ۲۱۷ | ۳-۱۰-۲-۴-تونل های انتقال                                                                                                                                                                 |
| ۲۱۸ | ۴-۱۰-۲-۴-مشخصات خاک زیر پی دکلها و اطراف تونل های انتقال نیرو                                                                                                                            |
| ۲۱۸ | ۱۱-۲-۴-تجویس مدل سازی فرونشست در دکل های انتقال نیرو                                                                                                                                     |
| ۲۲۱ | ۱۲-۲-۴-جمع بندی                                                                                                                                                                          |
| ۲۲۱ | ۳-۴-اثر مقادیر و مودهای فرونشست محتمل زمین بر سازه های منتخب                                                                                                                             |
| ۲۲۱ | ۱-۳-۴-مقدمه                                                                                                                                                                              |
| ۲۲۱ | ۲-۳-۴-فرضیات حل مسئله                                                                                                                                                                    |
| ۲۲۳ | 3-4-تجویس مدل سازی دکل های خط انتقال نیرو و فرونشست خاک                                                                                                                                  |
| ۲۲۵ | ۴-۳-۴-رابطه ی فرونشست با کاهش سختی خاک غیراشباع و افت تراز آب زیرزمینی                                                                                                                   |
| ۲۲۸ | ۵-۳-۴-الگوی اعمال فرونشست به صورت کاهش سختی اولیه ی خاک زیر پی دکل های انتقال نیرو                                                                                                       |
| ۲۳۱ | ۶-۳-۴-یافته های حاصل از مدل سازی دکل های انتقال نیرو                                                                                                                                     |
| ۲۳۱ | ۱-۶-۳-۴-اثر فرونشست با اعمال کاهش سختی یکنواخت در دهانه ی ۳۰۰ متری                                                                                                                       |
| ۲۳۴ | ۲-۶-۳-۴-تاثیر پذیری نشست پی دکلها از سختی اولیه ی خاک                                                                                                                                    |
| ۲۳۵ | ۳-۶-۳-۴-اثر فرونشست با اعمال کاهش سختی یکسان در پایه های دکل در دهانه های ۳۰۰ متری                                                                                                       |
| ۲۳۶ | ۴-۶-۳-۴-اثر فاصله دهانه دکلها در خط انتقال نیرو                                                                                                                                          |
| ۲۳۷ | ۵-۶-۳-۴-اثر فرونشست بر خط با وجود دکل زاویه ای                                                                                                                                           |
| ۲۳۹ | ۶-۶-۳-۴-اثر فرونشست به صورت کاهش سختی غیریکنواخت پایه در محل هر دکل                                                                                                                      |
| ۲۴۰ | ۷-۶-۳-۴-نیروی ایجاد شده در کابل های هادی انتقال نیرو ناشی از فرونشست پی دکلها                                                                                                            |
| ۲۴۱ | ۱-۷-۶-۳-۴-اثر فرونشست بر کابلها با اعمال کاهش سختی یکنواخت و یکسان در دهانه ی ۳۰۰ متری                                                                                                   |
| ۲۴۲ | ۲-۷-۶-۳-۴-اثر فرونشست بر کابلها با تغییر در سختی اولیه ی خاک                                                                                                                             |
| ۲۴۲ | ۳-۷-۶-۳-۴-اثر فرونشست بر کابلها در فواصل دهانه مختلف                                                                                                                                     |
| ۲۴۴ | ۴-۷-۶-۳-۴-اثر فرونشست بر کابلها در خطوط دارای دکل زاویه ای                                                                                                                               |
| ۲۴۶ | ۵-۷-۶-۳-۴-اثر فرونشست بر کابلها با اعمال کاهش سختی غیریکنواخت در محل هر دکل                                                                                                              |
| ۲۴۶ | ۷-۳-۴-یافته های حاصل از مدل سازی تونل انتقال نیرو                                                                                                                                        |
| ۲۴۸ | ۴-۴-تحلیل اثر مقادیر و مودهای فرونشست محتمل زمین بر سازه های منتخب در بند ۳ - ۱                                                                                                          |
| ۲۴۸ | ۱-۴-۴-مقدمه                                                                                                                                                                              |

|     |                                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۲۴۸ | ۴-۲-۴ تحلیل نتایج مدلسازی فرونشست خاک و ارتباط آن با سختی خاک                                         |
| ۲۵۰ | ۴-۳-۴ تحلیل نتایج مدلسازی دکل‌های انتقال نیرو                                                         |
| ۲۵۰ | ۴-۳-۱ مقایسه‌ی اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر مقدار O.S.R و $\Delta Z$ در انواع اعمال کاهش سختی مختلف      |
| ۲۵۳ | ۴-۳-۲ اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر رخداد مقادیر حداکثر O.S.R، $\Delta Z$ و $R_c$                         |
| ۲۵۵ | ۴-۳-۳ مقایسه‌ی اثر زاویه (a) در اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی                                              |
| ۲۵۵ | ۴-۳-۴ مقایسه‌ی اثر طول دهانه در اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی                                              |
| ۲۵۶ | ۴-۳-۵ مقایسه‌ی اثر سختی اولیه خاک در اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی                                         |
| ۲۵۷ | ۴-۴-۴ تحلیل نتایج مدلسازی تونل‌های انتقال نیرو                                                        |
| ۲۵۸ | ۴-۴-۱ اثر عمق مدفون تونل انتقال نیرو و ضخامت لایه تحکیم‌پذیر بر مقدار فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک   |
| ۲۵۹ | ۴-۴-۲ اثر شعاع تونل انتقال نیرو بر مقدار فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک                                |
| ۲۶۰ | ۴-۴-۳ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک بر برش، نیروی محوری و لنگر ایجاد شده در مقطع تونل انتقال نیرو |
| ۲۶۱ | ۴-۴-۴ اثر کاهش سختی خاک بر مقدار O.S.R، برش، نیروی محوری و لنگر ایجاد شده در مقطع تونل انتقال نیرو    |
| ۲۶۲ | ۴-۴-۵ اثر فرونشست بر پست‌های انتقال نیرو                                                              |
| ۲۶۳ | ۴-۵ تعیین حدود عملکردی سازه و تجهیزات منتخب بند ۳ - ۱ در برابر فرونشست زمین اطراف آن                  |
| ۲۶۴ | ۴-۵-۱ مقدمه                                                                                           |
| ۲۶۴ | ۴-۵-۲ محاسبه‌ی حدود عملکردی دکل‌ها و تونل‌های انتقال نیرو                                             |
| ۲۶۴ | ۴-۵-۱-۲ حدود عملکردی دکل‌های انتقال نیرو                                                              |
| ۲۶۶ | ۴-۵-۲-۲ حدود عملکردی تونل‌های انتقال نیرو                                                             |
| ۲۶۶ | ۴-۶ پنجم: نتیجه‌گیری                                                                                  |
| ۲۶۹ | ۵ مراجع                                                                                               |



## فهرست جداول

|     |                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|
| ۲۹  | جدول ۱-۱ تغییرات $DfB, \mu s, LB$ با $If$                                  |
| ۳۴  | جدول ۲-۱ روابط تجربی برای شاخص تراکم $Cc$ و شاخص تورم $Cs$                 |
| ۵۵  | جدول ۳-۱ مقادیر معمول ضریب آبدهی ویژه برای خاک های مختلف                   |
| ۷۵  | جدول ۴-۱ اطلاعات مورد نیاز مدل ALPRIFT                                     |
| ۸۸  | جدول ۱-۲ دامنه‌های استاندارد امواج ماکروویو                                |
| ۱۴۶ | جدول ۲-۲ نرم‌افزارهای مورد استفاده در تداخل‌سنجی راداری                    |
| ۲۰۸ | جدول ۱-۴ نرخ فرونشست، آسیب ها و دلایل آن در مناطق مختلف جهان و ایران [۱۹۲] |
| ۲۱۳ | جدول ۲-۴ معیارهای خرابی و گسیختگی پی دکل‌های انتقال نیرو [۳]               |
| ۲۱۶ | جدول ۳-۴ مشخصات فولاد مورد استفاده در مدل‌سازی اعضای دکل‌های انتقال [۲۰۲]  |
| ۲۱۷ | جدول ۴-۴ مشخصات هادی هوایی کرلو مورد استفاده در مدل‌سازی خط انتقال [۲۰۳]   |
| ۲۱۷ | جدول ۵-۴ مشخصات پوشش تونل مورد استفاده در مدلسازی خط انتقال [۲۰۱]          |
| ۲۱۸ | جدول ۶-۴ مقدار سختی عمودی خاک زیر سازه‌هایی با پی انعطاف‌پذیر [۲۰۴]        |
| ۲۲۷ | جدول ۷-۴ مقادیر $S.R.F$ هم‌ارز ارتفاع افت تراز آب زیرزمینی ب               |
| ۲۴۷ | جدول ۸-۴ مقادیر فرونشست اطراف تونل های انتقال                              |
| ۲۵۰ | جدول ۹-۴ انواع الگوهای اعمال فرونشست و شرایط آنها                          |
| ۲۶۵ | جدول ۱۰-۴ تعیین حدود بحرانی کاهش سختی در حالات مختلف رخداد فرونشست         |

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمایش قسمت‌های مختلف سفره آبدار آزاد  
شکل ۲-۱ نمایش قسمت‌های مختلف سفره تحت فشار و سطح پیزومتریک در آبخوان فرضی  
شکل ۳-۱ نمایش سطح تداخل آب شور و شیرین در آبخوان ساحلی فرضی [14]  
شکل ۴-۱ نمایش تنش در سیستم ذره ای.  
شکل ۵-۱ نمایش آزمایش دارسی- عبور جریان ماندگار از فیلتر ماسه ای استوانه ای  
شکل ۶-۱ نیمرخ نشست کشسان و فشار تماسی در رس (الف) پی انعطاف پذیر؛ (ب) پی صلب.  
شکل ۷-۱ نیمرخ نشست کشسان و فشار تماسی در ماسه (الف) پی انعطاف پذیر؛ (ب) پی صلب.  
شکل ۸-۱ نمودار زمان-تغییر شکل طی آزمایش تحکیم به ازای افزایش بار.  
شکل ۹-۱ نمودار متداول  $e$  بر حسب  $\log \sigma'$   
شکل ۱۰-۱ کاهش حجم لایه ریزدانه و نازک شدن آن در اثر زهکشی  
شکل ۱۱-۱ مکانیزم ایجاد شکاف در منطقه ای که سنگ کف، بالاست [24].  
شکل ۱۲-۱ شکاف زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی [24].  
شکل ۱۳-۱ پدیده رشد چاه در اثر فرونشست زمین.  
شکل ۱۴-۱ نزدیکی خطوط انتقال برق به شکاف‌های ایجاد شده در اثر فرونشست  
شکل ۱۵-۱ شبکه بندی‌های (الف) مرکز بلوکی و (ب) مرکز شبکه ای روش تفاضل محدود.  
شکل ۱۶-۱ مراحل مدلسازی فرونشست با استفاده از روش تفاضل محدود [39].  
شکل ۱۷-۱ انواع المان در روش اجزاء محدود.  
شکل ۱۸-۱ ابرصفحه حداکثر کننده حاشیه.  
شکل ۱۹-۱ مخروط افت ایجاد شده و صفحات دایره ای دربرگیرنده این مخروط.  
شکل ۲۰-۱ روند نمای محاسبه فرونشست با استفاده از نرم افزار توسط روش اجزای محدود.  
شکل ۱-۲ نمونه‌ای از برج‌های انتقال (سمت چپ و میانه)، تیرهای چوبی (سمت راست) و دیگر مؤلفه‌های خطوط انتقال نیرو [۹۰]  
شکل ۲-۲ موج الکترومغناطیس [۹۴]  
شکل ۳-۲ محدوده طیف الکترومغناطیس [۹۴]  
شکل ۴-۲ انعکاس حجمی در تصویربرداری راداری [۹۵]  
شکل ۵-۲ تأثیر زاویه برخورد محلی بر میزان روشنایی تصویر [۹۶]  
شکل ۶-۲ ساختار کار SAR [۹۷]  
شکل ۷-۲ ساختار رادار جانب نگر [۹۸]  
شکل ۸-۲ اثر اسپکل در تصاویر راداری [۱۰۰]  
شکل ۹-۲ نمایش توان تفکیک تصویر راداری در راستای رنج [۱۰۱]  
شکل ۱۰-۲ ساختار رادار با دریچه مصنوعی SAR [۱۰۲].  
شکل ۱۱-۲ مفهوم سایه در تصویر راداری [۲۷]  
شکل ۱۲-۲ مفهوم هم‌پوشانی در تصاویر راداری [۱۰۳]  
شکل ۱۳-۲ مفهوم کوتاه‌شدگی در تصاویر راداری [۱۰۳]  
شکل ۱۴-۲ نمایش اعوجاجات هندسی روی تصویر SAR [۱۰۴]  
شکل ۱۵-۲ هندسه تداخل سنجی راداری [۱۰۵]  
شکل ۱۶-۲ هندسه تداخل سنجی تک مسیری  
شکل ۱۷-۲ هندسه تصویربرداری تداخل سنجی با تکرار مسیر [۱۰۵]  
شکل ۱۸-۲ هندسه تداخل سنجی SAR به منظور استخراج توپوگرافی [۱۰۱]  
شکل ۱۹-۲ هندسه تداخل سنجی سه عبوره [۱۰۱]  
شکل ۲۰-۲ خطای مداری در امتداد مسیر پرواز، عمود بر مسیر پرواز، شعاعی [۹۸]  
شکل ۲۱-۲ سه زیرمجموعه با طول باز کوتاه [۵]  
شکل ۲۲-۲ رفتار فاز در پیکسل‌های تصویر SAR.  
شکل ۲۳-۲ (a) جابجایی‌های تأثیرگذار در جهت خط دید سنجنده بر ساختمان  
شکل ۲۴-۲ جابجایی تجمعی از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲.  
شکل ۲۵-۲ (الف) سری زمانی نقشه‌های فرونشست منطقه‌ای

- شکل ۲-۲۶- نقشه‌ی فرونشست مرتبط با استخراج آب‌های زیرزمینی. ۱۳۷
- شکل ۲-۲۷- نمودار انحراف معیار فاز و پراکندگی دامنه [۱۰۹] ۱۳۳
- شکل ۳-۱- تحکیم یک لایه خاک ناشی از استخراج آب از یک چاه آبکشی ۱۴۸
- شکل ۳-۲- خاک چند لایه شامل چاه آبکشی ۱۵۳
- شکل ۳-۳- مقایسه بین نتایج مدل‌سازی عددی آباکوس و محاسبات تئوری ۱۵۶
- شکل ۳-۴- تاثیر طول چاه آبکشی بر تغییرمکانهای سطحی ۱۵۷
- شکل ۳-۵- تاثیر نفوذپذیری ناهمسان بر تغییرمکان های سطح و اضافه فشار حفره ای آبخوان ۱۵۸
- شکل ۳-۶- مقایسه بین خاک های لایه ای و یک لایه خاک واحد با پارامترهای وزنی ۱۵۹
- شکل ۳-۷- تاثیر لایه های مختلف چاه آبکشی بر تغییرمکان های سطحی ۱۶۰
- شکل ۳-۸- تاثیر مقدار تزریق آب بر تغییرمکان های سطحی ۱۶۱
- شکل ۳-۹- تاثیر نرخ دوره ای پمپاژ بر تغییرمکان های سطح در نقطه  $r = 0.5$  و اضافه فشار حفره ای در نقطه  $r = 0.5$  از سطح افقی  $z = \Delta H1$  ۱۶۲
- شکل ۳-۱۰- خاک تک لایه تحت بار متقارن ۱۶۴
- شکل ۳-۱۱- شماتیکی از تحکیم خاک به دلیل تغییر در سطح آب زیرزمینی ۱۷۹
- شکل ۳-۱۲- شکاف زمین از میان مزرعه ای در نزدیکی شهر فینیکس آریزونا ۱۸۴
- شکل ۳-۱۳- سطح مخروطی و المان نامحدود، A و ستون خاکی نامتناهی، B، به کار رفته در مدل های کانتینیوم ۱۸۶
- شکل ۳-۱۴- تنش های روی المان حجمی محدود آبرفت آبخوان ۱۸۷
- شکل ۳-۱۵- (a) تغییرات تنش ایجاد شده در یک المان حجمی از آبرفت آبخوان ناشی از افت سطح آب زیرزمینی (b) بارگذاری قسمت I (c) بارگذاری قسمت II (d) تراکم ایزوتروپیک (e) برش ساده در صفحات قائم بعلاوه چرخش ۱۸۹
- شکل ۳-۱۶- تغییر در تنش های برشی و نیروهای نرمال در صفحه ZX المان حجم محدود ۱۹۰
- شکل ۳-۱۷- برش ساده بر روی (a) صفحات افقی (b) صفحات قائم ۱۹۱
- شکل ۳-۱۸- کرنش های دایره مور برای برش ساده ۱۹۲
- شکل ۳-۱۹- تنش های دایره مور برای مشخصه های طول مختلف ۱۹۴
- شکل ۳-۲۰- فاصله های تئوری از دیواره چاه با ترک های زمین شکل گرفته براساس پروفیل های آب زیرزمینی ۱۹۵
- شکل ۳-۲۱- مکان های احتمالی شکاف زمین و تأثیر مقادیر برش و چرخش در شکل گیری شکاف های واحد و یا چندین شکاف به طور همزمان ۱۹۶
- شکل ۳-۲۲- شکاف احتمالی زمین ناشی از فشار جانبی آبرفت آبخوان ۱۹۷
- شکل ۳-۲۳- مقایسه محل تخمین زده شده برای شکاف زمین ۲۰۱
- شکل ۴-۱- مراحل انجام پژوهش ۲۰۳
- شکل ۴-۲- اعضای مختلف یک دکل انتقال نیرو: [۱۹۳] ۲۰۷
- شکل ۴-۳- اثر فرونشست بر دکل برق (حوزه رودخانه آرنو، ایتالیا) [۱۹۲] ۲۱۰
- شکل ۴-۴- تهدید دکل‌های انتقال نیرو ته در حریم خط انتقال دشت ورامین [۱۹۲] ۲۱۰
- شکل ۴-۵- خرابی‌های دکل‌های انتقال نیرو ناشی از فرونشست در خط انتقال دشت اشتهارد [۱۹۲] ۲۱۱
- شکل ۴-۶- مقایسه‌ی تغییر شکل ناشی از اعمال فرونشست ۲۲۰
- شکل ۴-۷- طرح کلی خط انتقال نیروی مدل شده در نرم‌افزار ۲۲۳
- شکل ۴-۸- مقطع قائم خاک در معرض فرونشست ۲۲۴
- شکل ۴-۹- منحنی نگهداشت آب - خاک (SWCC) مورد استفاده [۱۶] ۲۲۵
- شکل ۴-۱۰- تغییرات مدول الاستیسیته غیراشباع خاک در اعماق بالای سطح آب زیرزمینی ۲۲۵
- شکل ۴-۱۱- مقطع قائم نمونه خاک ریزدانه مدل‌سازی شده در نرم افزار Plaxis ۲۲۷
- شکل ۴-۱۲- مقادیر فرونشست در مقطع قائم نمونه خاک ریزدانه ۲۲۷
- شکل ۴-۱۳- حالات اعمال فرونشست بر پی هر دکل ۲۲۸
- شکل ۴-۱۴- نحوه اعمال الگوی فرونشست B1C2 مربوط به اثر کاهش سختی یکنواخت ۲۲۹
- شکل ۴-۱۵- نحوه اعمال الگوی فرونشست BC مربوط به اثر کاهش سختی یکسان ۲۳۰
- شکل ۴-۱۶- نماهایی از خطوط مدل شده در نرم‌افزار SAP ۲۳۱
- شکل ۴-۱۷- نمودارهای مربوط به نسبت تنش اضافی حداکثر، ناشی از فرونشست در مدل های مختلف با دهانه های ۳۰۰ متری ۲۳۲
- شکل ۴-۱۸- نمودارهای مربوط به فرونشست حداکثر در مدل‌های مختلف با دهانه‌های ۳۰۰ متری ۲۳۳
- شکل ۴-۱۹- مقادیر نسبت تنش اضافی حداکثر هم‌ارز با مقادیر فرونشست ۵ سانتی‌متر در الگوها ۲۳۴
- شکل ۴-۲۰- نمودارهای مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌هایی با مقدار سختی اولیه متفاوت (۲) نسبت تنش حداکثر ناشی از فرونشست ۳ و ۴) فرونشست حداکثر در مدل‌های مختلف ۲۳۵

- شکل ۴-۲۱ مقایسه مقادیر در مدل‌های دهانه‌ی ۳۰۰ متری : (۱ و ۳ و ۴) حداکثر نسبت تنش متناظر با فرونشست یکسان پایه ۵ و ۷ و ۸) فرونشست حداکثر یکسان پایه ۲۳۶
- شکل ۴-۲۲ مقایسه مقادیر در مدل‌های دهانه‌ی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۴۰۰ متری : (۱ و ۳ و ۴) حداکثر نسبت تنش متناظر با فرونشست پایه ۵ و ۷ و ۸) فرونشست حداکثر ۲۳۷
- شکل ۴-۲۳ پلان خط دارای دکل زاویه‌ای ۲۳۸
- شکل ۴-۲۴ مقایسه مقادیر در مدل‌های دهانه‌ی ۳۰۰ متری با وجود دکل زاویه‌ای : (۱ و ۳ و ۴) حداکثر نسبت تنش ۵ و ۷ و ۸) فرونشست حداکثر ۲۳۹
- شکل ۴-۲۵ نحوه‌ی مدل‌سازی الگوی C2(80%) - B1(95%) فرونشست به صورت کاهش سختی بستر پی غیریکنواخت ۲۳۹
- شکل ۴-۲۶ یسه مقادیر در مدل‌های دهانه‌ی ۳۰۰ متری با وجود اثر فرونشست غیریکنواخت در محل هر دکل : (۱ و ۳ و ۴) حداکثر نسبت تنش ۵ و ۷ و ۸) فرونشست حداکثر ۲۴۰
- شکل ۴-۲۷ موقعیت کابل‌های متصل به هر دکل در مقطع شمالی-جنوبی ۲۴۱
- شکل ۴-۲۸ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای کاهش سختی یکنواخت و یکسان در دهانه‌ی ۳۰۰ متری ۲۴۱
- شکل ۴-۲۹ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای کاهش سختی یکنواخت در دهانه‌ی ۳۰۰ متری با سختی اولیه‌ی 2000 kN/m ۲۴۲
- شکل ۴-۳۰ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای کاهش سختی یکنواخت در دهانه‌ی ۳۰۰ متری با سختی اولیه‌ی 8000 kN/m ۲۴۲
- شکل ۴-۳۱ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دهانه‌ی ۱۰۰ متری ۲۴۳
- شکل ۴-۳۲ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دهانه‌ی ۴۰۰ متری ۲۴۳
- شکل ۴-۳۳ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای دکل زاویه‌ای با زاویه‌ی انحراف  $a = 30^\circ$  ۲۴۴
- شکل ۴-۳۴ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای دکل زاویه‌ای با زاویه‌ی انحراف  $a = 60^\circ$  ۲۴۵
- شکل ۴-۳۵ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای دکل زاویه‌ای با زاویه‌ی انحراف  $a = 90^\circ$  ۲۴۶
- شکل ۴-۳۶ مقایسه مقادیر RC کابل‌ها در مدل‌های دارای کاهش سختی غیریکنواخت در محل هر دکل و در دهانه‌ی ۳۰۰ متری ۲۴۶
- شکل ۴-۳۷ مقاطع قائم و عرضی نمونه خاک ریزدانه مدل‌سازی شده در نرم افزار Plaxis با فرض:  $Hcon = 60$  m,  $H_0 = 20$  m و  $S.R.F = 60\%$  و تونلی با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر. ۲۴۷
- شکل ۴-۳۸ کانتور مقادیر فرونشست (SModeling) در مقاطع قائم و عرضی نمونه خاک ریزدانه مدل‌سازی شده در نرم افزار Plaxis با فرض:  $H_0 = 20$  m,  $Hcon = 60$  m و  $S.R.F = 60\%$  و تونلی با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر. ۲۴۸
- شکل ۴-۳۹ رابطه‌ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در دو حالت مدلسازی با  $Hcon = 60$  m و  $Hcon = 100$  m ۲۴۹
- شکل ۴-۴۰ رابطه‌ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و نسبت  $Hcon/HW$  در دو حالت مدلسازی با  $Hcon = 60$  m و  $Hcon = 100$  m ۲۵۰
- شکل ۴-۴۱ رابطه‌ی بین افت تراز آب زیرزمینی (HW) و فرونشست تحکیمی محاسبه شده در دو حالت  $Hcon = 60$  m و  $Hcon = 100$  m ۲۵۰
- شکل ۴-۴۲ بررسی اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر مقدار O.S.R در حالت‌های مختلف ۲۵۱
- شکل ۴-۴۳ کانتور تنش اعضای دکل A بر حسب  $kN/m^2$  ناشی از فرونشست ۲۵۲
- شکل ۴-۴۴ بررسی اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر فرونشست در حالت‌های مختلف ۲۵۳
- شکل ۴-۴۵ مقایسه‌ی تعداد الگوهای مدلسازی شده دارای O.S.R بیش از ۳۵٪ در حالات مختلف مدلسازی شده با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی ۲۵۴
- شکل ۴-۴۶ مقایسه‌ی تعداد حالات مدلسازی شده دارای فرونشست بیش از ۱۰ سانتی متر در حالات مختلف مدلسازی شده با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی ۲۵۴
- شکل ۴-۴۷ مقایسه‌ی تعداد حالات دارای حداکثر مقادیر O.S.R بیشتر از ۳۵٪ در اعضای دکل‌ها و RC در کابل‌ها ۲۵۵
- شکل ۴-۴۸ اثر زاویه انحراف خط بر تعداد حالات مدلسازی شده با حداکثر مقدار  $O.S.R > 35\%$  ۲۵۵
- شکل ۴-۴۹ اثر طول دهانه بر تعداد حالات مدلسازی شده با حداکثر مقدار  $O.S.R > 35\%$  ۲۵۶
- شکل ۴-۵۰ اثر طول دهانه بر تعداد حالات مدلسازی شده با حداکثر مقدار  $O.S.R < 35\%$  ۲۵۷
- شکل ۴-۵۱ رابطه‌ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در دو حالت مدلسازی با  $Hcon = 60$  m و  $Hcon = 100$  m در شرایط وجود تونل با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر ۲۵۷
- شکل ۴-۵۲ رابطه‌ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در دو حالت مدلسازی با  $Hcon = 60$  m و  $Hcon = 100$  m در شرایط وجود تونل با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر ۲۵۸
- شکل ۴-۵۳ اثر تغییر عمق مدفون تونل بر فرونشست ناشی از اعمال ضریب کاهش سختی (S.R.F) (قطرتونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۲ متر می‌باشد) ۲۵۹
- شکل ۴-۵۴ اثر تغییر شعاع تونل بر فرونشست ناشی از اعمال ضریب کاهش سختی (S.R.F) (عمق مدفون تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۱۰ متر می‌باشد) ۲۵۹
- شکل ۴-۵۵ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات عمق مدفون بر حداکثر مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (شعاع تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۲ متر می‌باشد) ۲۶۰
- شکل ۴-۵۶ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات شعاع تونل بر حداکثر مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (عمق مدفون تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۱۰ متر می‌باشد) ۲۶۱
- شکل ۴-۵۷ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات عمق مدفون بر O.S.R مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (شعاع تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۲ متر می‌باشد) ۲۶۲

شکل ۴-۵۸ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات شعاع تونل بر O.S.R مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (عمق مدفون تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۱۰ متر می‌باشد)

## ۱ تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی

بخش اول: بررسی وقوع پدیده فرونشست از دیدگاه تغییرات آب زیرزمینی

## ۱-۱ مقدمه

رشد جمعیت همراه با گسترش بی رویه بهره برداری از آب در مقاصد کشاورزی و صنعت، با اثرات نامطلوب زیادی در جنبه های کمی و کیفی منابع آب همراه بوده است. افزایش روز افزون بهره برداری از آب های زیرزمینی می تواند به نشست و یا فروریزش سطح زمین منجر شود. فرونشست زمین از جمله مخاطرات و تهدیداتی است که منابع مختلف طبیعی و انسانی را با خطرات جدی مواجه نموده است. پدیده فرونشست که از آن به عنوان "مرگ پنهان خاک" یاد می شود، پدیده ای خزنده و کند بوده که در درازمدت منجر به از بین رفتن سکونت گاه های بشری و زیرساخت های آنها می شود. این پدیده با ایجاد تغییر در وضعیت مورفولوژیکی مناطق، می تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در خصوصیات هیدرولوژیکی آنها شود. آگاهی از پتانسیل بروز فرونشست در مناطق مستعد باید وجود داشته باشد و اقدامات جلوگیری یا کنترل آن، به موقع صورت گیرد. در این بخش به معرفی پدیده فرونشست، عوامل موثر در وقوع این پدیده، آسیب های ناشی از آن و نحوه ایجاد فرونشست در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی پرداخته شده است.

## ۱-۲ تعریف فرونشست

بنا به تعریف یونسکو، فرونشست عبارتست از فروریزش و یا نشست سطح زمین که به علت های متفاوتی در مقیاس بزرگ روی می دهد. به طور معمول این اصطلاح به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می تواند با بردار افقی اندک همراه باشد، گفته می شود. این تعریف، پدیده هایی همچون زمین لغزش ها را به دلیل اینکه حرکت آنها دارای بردار افقی قابل توجهی است و همچنین نشست در خاک های دستی، که دارای مکانیزم متفاوتی می باشد، شامل نمی شود [1]. از نظر انستیتو زمین شناسی ایالت متحده آمریکا، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می تواند دارای جابجایی افقی کمی باشد. حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر محدود نمی باشد [2].

این پدیده در اثر خالی شدن آب بافت های متراکم و لایه های زیرین سطح زمین رخ می دهد و در اثر آن سطح زمین به صورت تدریجی و در برخی موارد به صورت ناگهانی فرو می نشیند. در اثر برداشت آب زیرزمینی متراکم شدن مواد تا عمق ۳۰۰ متر فراهم می گردد و هرچه بیشتر برداشت شود تراکم مواد بیشتر خواهد بود.

پدیده فرونشست در اصل به فرورفتگی در سطح زمین اطلاق می شود، و نشست سطح زمین به سمت پایین بدون محدودیت در سرعت، بزرگی، یا ناحیه وقوع پدیده می باشد که در صورت گسترش، عواقب شدید زیست محیطی و اقتصادی را در پی خواهد داشت [3].

ترک و شکاف‌های زمین<sup>۱</sup> که ناشی از فرونشست هستند شاید همان تاثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه بار مانند سیل و زلزله را نداشته باشند، ولی همچون سرطانی آرام و بی صدا گسترش می‌یابد. از این رو خسارت‌های ناشی از فرونشست و شکاف‌های زمین ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند. از سوی دیگر این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت آبشناختی منطقه از قبیل جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، بیلان آب زیرزمینی و غیره نتیجه‌های ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد [4].

### ۱-۳ محیط های زمین شناختی دارای پتانسیل فرونشست

رویدادهای فرونشست بطور معمول در دو محیط امکان پذیر است:

- سنگ‌های انحلال پذیر (سنگهای آهک، دولومیت، گچ و نمک) که توسط رسوب‌های تحکیم نیافته مدفون شده‌اند، یا فرو چاله‌های کهن پر شده با رسوب های تحکیم نیافته که فشار هیدرواستاتیکی رو به بالای آب زیر زمینی در نگهداری آنها موثر است.
- رسوب‌های جوان تحکیم نیافته و نیمه تحکیم یافته با تخلخل بالا که در زیر رسوب‌های آبرفتی، دریاچه‌ای یا رسوب‌های دریایی کم عمق واقع شده‌اند. این محیط‌ها شامل آبخوان‌های بسته یا نیمه بسته ماسه‌ای یا شنی همراه با میان لایه های رسی است که تحت تاثیر تنش‌های بکر<sup>۲</sup> حاصله از اثر برداشت بی رویه سیالاتی مانند آب یا نفت، تنش موثر در آنها افزایش یافته و لایه های رسی به دلیل پدیده تحکیم<sup>۳</sup> فرونشست پیدا می‌کنند [5].

### ۱-۴ عوامل موثر بر فرونشست

دلایل ایجاد فرونشست در زمین متفاوت بوده و از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به افت سطح آب زیرزمینی اشاره نمود. نشست زمین به دلیل افت سطح آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف جهان خصوصا در دهه های اخیر گزارش گردیده است. این پدیده در رسوبات آبرفتی با تراکم‌پذیری کم در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد. فرونشست زمین در برخی نقاط خشک و کم باران ایران که در سال‌های اخیر به دلیل برداشت بی رویه از سفره‌های زیرزمینی، افت شدید سطح آب زیرزمینی وجود داشته، گزارش شده است. در دهه‌های اخیر توجه به پدیده فرونشست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. اهمیت مطالعه و بررسی این پدیده با توجه به خطراتی است که این حادثه دارا می‌باشد.

نشانه اولیه فرونشست زمین به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، همیشه قبل از وقوع ریزش مشاهده نمی‌گردد. به این دلیل تشخیص و نمایان سازی مناطقی که مستعد فرونشست هستند به دلیل خطر پذیری و به مخاطره انداختن زندگی انسان، ضروری به نظر می‌رسد. عوامل متعددی باعث ایجاد این پدیده می‌شوند:

<sup>1</sup> Earth Fissure

<sup>2</sup> Virgin stress

<sup>3</sup> consolidation



۱. عوامل طبیعی: فرونشست ناشی از فرآیندهای طبیعی<sup>۴</sup> به فرونشست در اثر فعالیت های تکتونیکی، فوران های آتشفشانی، انحلال سنگ ها، تراکم رسوبات عمیق، آب شدگی یخ ها و دیگر فرآیندهای طبیعی تقسیم می شود.
۲. فعالیت های انسانی: فرونشست در اثر فعالیت های انسانی<sup>۵</sup> شامل فرونشست در اثر برداشت بی رویه سیالات و معدن کاری، ریزش سازه های زیرزمینی مانند تونل ها، تحکیم لایه های خاک تحت تاثیر وزن لایه های فوقانی، انجام خاکریزی و احداث ساختمان های سنگین می شود که ناشی از تعامل انسان و محیط زمین شناسی موجود می باشد [3].

از مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر پدیده فرونشست می توان به موارد زیر اشاره کرد:

#### ۱-۴-۱ سنگ های انحلال پذیر (سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک)

مناطق که حاوی سنگ های قابل انحلال مانند سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک هستند زمانی که تحت تاثیر هوازدگی شیمیایی توسط آب زیرزمینی قرار می گیرند غارهای زیرزمینی در آنها ایجاد می گردد. اگر این غارهای زیرزمینی تا حدی گسترش یابند که تحمل روباره را نداشته باشند و یا اینکه تحت تاثیر استرس خاصی قرار گیرند (مانند بارگذاری از طریق ساخت و ساز و یا امواج لرزه ای) به طور ناگهانی فرو می ریزند [6]. اکثر حفرات زیرزمینی در سنگ های آهکی با نفوذپذیری کم که حاوی شکستگی های زیاد، جهت توسعه عبور جریان آب زیرزمینی هستند ایجاد می شود [3]. میزان انحلال سنگ های آهکی ارتباط مستقیمی با مقدار بارندگی، دی اکسید کربن موجود در آب زیرزمینی، فعالیت گیاهان و رستنی ها و فعالیت باکتریایی درون پوشش خاک دارد [7].

سنگ نمک ممکن است به صورت لایه های گسترده در توالی های رسوبی به وجود آید. این ماده در اثر چرخش سریع آبهای زیرزمینی دچار انحلال می شود و این عامل باعث فرونشست طبیعی و آرام می گردد. بهره برداری و استخراج بی ضابطه آب های شور و نمکی بوسیله پمپاژ بی رویه و کنترل نشده از جریان های آب بسیار شور سبب تشدید رخدادهای فرونشست خطی شده که ممکن است در طی سال ها شکل گیرد. میزان انحلال ژئیس به مراتب کمتر از نمک بوده و غارهای موجود در آن کوچکتر و نادرتر از غارهای موجود در سنگ های آهکی است. بنابراین خطر فرونشست چشمگیر نبوده و تا حد زیادی با انحلال ناحیه ای در مرز سنگی مرتبط می باشد [3].

#### ۱-۴-۲ ذوب یخ لایه های منجمد دائمی اعماق زمین

ذوب یخ و ناپدید شدن لایه های منجمد دائمی اعماق زمین در منطقه منجمد طی دهه های اخیر تسریع گردیده است. این مسئله موجب فرونشست زمین در حد وسیع و در نتیجه وارد آمدن خسارت به سازه ها و ساختارهای زیربنایی

---

<sup>4</sup> Endogenic Subsidence

<sup>5</sup> Exogenic Subsidence

در این نواحی گردیده است [8]. بسیاری از ساختارهای زیربنایی احداث شده در مناطق شمالی کره زمین در نواحی بیشترین پتانسیل خطر واقع شده‌اند و می‌توانند تحت تاثیر فرونشست ناشی از ذوب یخ در خلال گرم شدن کره زمین قرار گیرند [9].

### ۳-۴-۱ نشست زمین در اثر معدن‌کاری

نشست سطح زمین در معادن بر حسب روش معدن‌کاری متفاوت بوده و پدیده‌ای غیر قابل اجتناب و در عین حال، قابل پیش بینی است. بعد از معدن‌کاری و برداشت ماده معدنی و رها کردن معادن بدون در نظر گرفتن نگهدارنده و یا تخریب ستون‌های معادنی که در اثر هوازدگی، فرسایش و یا بار بیش از حد فوقانی نازک شده باشند فرونشست اجتناب ناپذیر است. هزینه‌های ناشی از خسارات حاصل از این گونه شکست‌ها اغلب بیش از درآمدهای حاصل از استخراج کامل مواد معدنی می‌باشد. همچنین در معادن جدید که معدن‌کاری به روش جبهه کار طولانی<sup>۶</sup> برای استخراج کامل لایه‌های نازک زغال سنگ صورت می‌گیرد، بلافاصله بعد از استخراج سطح زمین دچار فرونشست می‌شود [3].

بیشترین فرونشست را می‌توان در معادن زغال سنگ مشاهده نمود و دلیل عمده‌ای که در این رابطه وجود دارد، این است که اغلب معادن زغال سنگ، بین لایه‌های سست پوسته نظیر لایه های رسی، آهکی، ماسه ای و غیره قرار دارد و وجود لایه‌های مذکور، باعث تضعیف سقف معادن شده و و احتمال از بین رفتن ستون‌های تقویتی را افزایش می‌دهد [10].

### ۴-۴-۱ برداشت سیالات

یکی دیگر از انواع فرونشست‌هایی که از فعالیت‌های انسان ناشی می‌شود، استخراج سیالات از منابع زیرزمینی می‌باشد. دو نوع سیال زیرزمینی شامل آب زیرزمینی و منابع هیدروکربنی (نفت و گاز) می‌باشد، که توسط انسان برداشت می‌گردد. با این وجود در قسمت‌هایی از دنیا مشاهده شده که در اثر استخراج زیاد نفت و گاز از میادین نفتی و همچنین برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی پدیده‌ای که بارها و بارها مشاهده می‌شود، پدیده فرونشست و ایجاد ترک و شکاف در سطح زمین می‌باشد. معمولاً این نوع فرونشست در مقیاس ناحیه‌ای و به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد [11]. ذخایر نفت و گاز به صورت تله های زمین شناسی شبیه به آبخوان محصورند<sup>۷</sup> و این سیالات تحت فشار در زیر سطح زمین نگه داشته می‌شوند. به عنوان مثال برداشت این سیالات در حوضه نفتی ویلمنگتون<sup>۸</sup> در کالیفرنیا باعث شده که در منطقه ای به وسعت ۵۰ کیلومتر مربع فرونشست اتفاق بیفتد و میزان فرونشست در مرکز حوضه به بیش از ۹ متر برسد [12].

6 Longwall face

7 Confined aquifer

8 Wilmington

## ۵-۴-۱ فعالیتهای تکتونیکی

فاجعه بارترین وضعیت محتمل برای نواحی در معرض فرونشست، همزمانی سانحه فرونشست با زمین لرزه است. زمین لرزه از یک سو عامل ماشه ای برای سانحه فروریزش<sup>۹</sup> در مناطقی که مستعد فرونشست هستند، به شمار می رود و از سوی دیگر، پیامدهای پدیده فرونشست مانند کاهش رطوبت و ذخایر آبی لایه های زیرین قادر است موج ناشی از رخداد زمین لرزه را مخرب تر ساخته و فاجعه ایجاد کند. واقعیت علمی آنکه تخلیه لایه های زیرین از آب، موجب تعدیل اثرات فیزیکی خاصیت دی-الکتریک در شتاب موج زمین لرزه شده، اثرات و توان خسارت زایی آن را در سطح زمین شدت می بخشد. از سوی دیگر، ایجاد گسیختگی در لایه های زیرین و ناپایداری در مقاومت خاک بستر سکونتگاه ها و تاسیسات، پایداری بسیاری از سازه ها را کاهش و آنها را در معرض تخریب قرار می دهد. بدین سبب همزمانی رویداد زمین لرزه در مناطق در معرض فرونشست می تواند نتایج ناشی از رویداد یک زمین لرزه غیرمخرب و یا نسبتاً مخرب را به یک زلزله خسارت بار و پر تلفات تغییر داده، فاجعه انسانی به دنبال داشته باشد. چنین فاجعه ای بسیاری از کانون های جمعیتی کشور را به سبب حضور آنها در اراضی در معرض فرونشست و استقرار در نقاط پر خطر زمین لرزه تهدید می نماید. دشت های زرنده، رفسنجان، بهرمان و تهران نمونه هایی از دشت های در معرض فرونشست و واقع در کانون های پرخطر زمین لرزه هستند [13].

ریزش سازه های زیرزمینی مانند تونل ها (برای گسترش مترو)، تغییر کاربری زمین، احداث و یا بارگذاری سازه های مهندسی، زهکشی خاک های آلی و نفوذ آب شور در امتداد سواحل نیز از جمله عوامل دیگری هستند که می توانند در ایجاد پدیده فرونشست موثر باشند. عمده رخدادهای فرونشست زمین در ایران بیشتر در اثر عواملی همچون افت سطح آب زیرزمینی، انحلال تشکیلات زیرسطحی و ریزش کارست به وجود می آیند. در شهر تهران، یکی از مهم ترین علل نشست زمین در اثر حفر تونل برای گسترش خطوط مترو است. از میان عوامل تشکیل فرونشست زمین در ایران، کارستی شدن علاوه بر ایجاد خطرات طبیعی، مشکلات پیچیده ای در عملکرد مهندسی و همچنین ارتباطات ایجاد می کند. فرونشست زمین به عنوان یکی از پیامدهای کارستی شدن ممکن است به صورت فرونشست ناگهانی و یا نشست های تدریجی بروز کند. علاوه بر خطرات ناشی از ریزش سنگ ها و تاثیر آن بر سازه های مهندسی، نشست آب از مخازن سدها و یا تجمع آب های زیرزمینی و فشار ناشی از آنها بر دیواره داخلی تونل های زیرزمینی، از دیگر خطرات عمده ای هستند که در طراحی و عملیات اجرایی این سازه ها نمی توان نادیده گرفت.

## ۵-۱ مکانیزم فرونشست زمین در اثر برداشت آب زیرزمینی

کاهش سطح آب زیرزمینی در سفره موجب متراکم شدن سفره می گردد. این تراکم، نتیجه رابطه ساده بین کاهش سطح ایستابی و افزایش فشار عمودی ناشی از عدم تحمل بار طبقات بالایی توسط آبخوان است. این تراکم پیامد افزایش تنش موثری است که در نتیجه کاهش فشار آب منفذی بوجود می آید [3]. به منظور بررسی این پدیده، ابتدا به معرفی

<sup>9</sup> Collapsing

سفره آب زیرزمینی و بررسی مفاهیم تنش کل، تنش موثر و فشار آب منفذی، مبانی تئوری تحکیم و تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی<sup>۱۰</sup> و تئوری تحکیم بایو<sup>۱۱</sup> پرداخته می‌شود.

### ۱-۵-۱ سفره آب زیرزمینی و انواع آنها

جمع شدن آب در زیرزمین و تشکیل آب های زیرزمینی، بستگی به قابلیت نفوذ و تخلخل زمین دارد. آب در زمین تا عمق معینی نفوذ می‌کند و بر روی طبقه غیر قابل نفوذ ذخیره می‌شود. به قسمتی از لایه خاک که آب در آن ذخیره می‌شود، آبخوان<sup>۱۲</sup> یا لایه آبدار گفته می‌شود [14].

بخشی از آب های سطحی در اثر نیروی جاذبه وارد محیط متخلخل خاک شده و به سمت پایین حرکت می‌کنند. لایه های مختلف زمین از مواد و ترکیبات مختلف خاک شکل گرفته و در زمان های مختلف به وجود آمده اند. مجموعه عواملی نظیر جنس و اندازه دانه ها، میزان تخلخل، میزان تراکم، میزان ترک خوردگی و ... باعث می‌شوند بخش های مختلف لایه های خاک زیرزمین، ظرفیت های متفاوتی برای جذب، ذخیره و انتقال آب داشته باشند. به بیانی دیگر، لایه هایی از زمین که به صورت نسبی ظرفیت بالاتری دارند آبخوان یا لایه آبدار یا سفره آب نامیده می‌شوند. به دلیل نفوذپذیری بیشتر این لایه ها، بخش اعظم آب نفوذ کرده در عمق زمین، به صورت طبیعی جذب آنها می‌شود. بسته به شرایط، یک آبخوان می‌تواند مانند یک مخزن زیرزمینی آب را ذخیره یا مانند یک رودخانه زیرزمینی آب را به لایه های مجاور و عمیق تر منتقل نماید. ابعاد این مخازن یا رودخانه های زیرزمینی می‌تواند از چند ده متر تا چند صد کیلومتر متفاوت باشد [15]. به طور کلی شکل سطح ایستابی غالباً از شکل سطح زمین پیروی می‌کند، ولی برآمدگی های آن هموارتر است. بنابراین سطح ایستابی در نواحی پست در نزدیک سطح زمین و در تپه ها و کوه ها در عمق زیادتر قرار دارد. انواع سفره های آب زیرزمینی عبارتند از : سفره آب آزاد<sup>۱۳</sup> و سفره آب تحت فشار<sup>۱۴</sup>.

#### ۱-۵-۱-۱ سفره آب آزاد

این نوع از سفره ها از یک طبقه غیرقابل نفوذ در زیر و یک طبقه قابل نفوذ در بالا تشکیل شده اند و شبیه دریاچه های زیرزمینی در مواد متخلخل می‌باشند. در بالای آبخوان، لایه رس و یا سایر مصالح محدود کننده وجود ندارد. بنابراین سطح آب زیرزمینی به طور آزاد بالا و پایین می‌رود. قسمت فوقانی یک آبخوان آزاد، سطح سفره آب<sup>۱۵</sup> است که عبارت است از صفحه ای که در روی آن فشار آب زیرزمینی برابر با فشار اتمسفر است و چون فشار آب را معمولاً نسبت به فشار اتمسفر می‌سنجیم فشار آب زیرزمینی در سطح سفره آب، صفر در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع سطح سفره آب، عبارتست از ارتفاع سطح آب ایستا نسبت به سطح مبدا در چاه هایی که در آبخوان حفر شده اند [14]. به منطقه قرار

<sup>10</sup> Terzaghi

<sup>11</sup> Biot

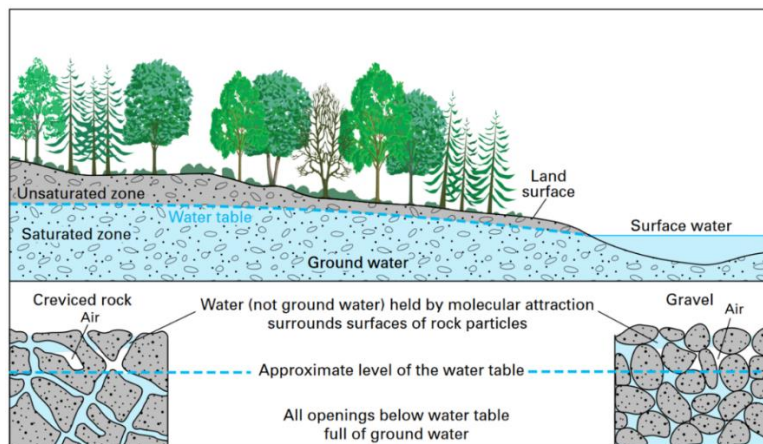
<sup>12</sup> Aquifer

<sup>2</sup>Unconfined

<sup>14</sup> Confined

<sup>15</sup> Water table

گرفته در زیر سطح ایستابی، منطقه اشباع<sup>۱۶</sup> و به منطقه بالای آن، منطقه غیر اشباع<sup>۱۷</sup> گفته می شود. شکل ۱-۱ قسمت های مختلف یک آبخوان آزاد را نشان می دهد.



شکل ۱-۱ نمایش قسمت های مختلف سفره آبدار آزاد

## ۲-۱-۵-۱ سفره آب تحت فشار (آرتزین)

سفره های تحت فشار یا آرتزین در محلی تشکیل می شوند که آب زیرزمینی به وسیله لایه ای نسبتاً نفوذناپذیر از بالا محدود شود و در نتیجه تحت فشاری بیش از فشار اتمسفر باشد. علت اینکه در سفره های تحت فشار، آب در صورت حفر چاه فوران می کند این است که سطح فوقانی منطقه اشباع در محل تغذیه سفره، یعنی منطقه ای که از طریق آن آب سفره تامین می شود، در ارتفاعی بالاتر از سطح فوقانی منطقه اشباع در محل حفر چاه دارد [14]. اگر چاه هایی در این نوع سفره حفر شوند، سطح آب در چاه ها بالا خواهد آمد و به یک سطح فرضی خواهد رسید که سطح آب این چاه ها را به هم وصل می کند و سطح پیزومتری<sup>۱۸</sup> نامیده می شود. چنانچه سطح پیزومتر از سطح زمین بالاتر باشد، آب چاه خود به خود فوران خواهد کرد و چون این پدیده اولین بار در منطقه آرتوز<sup>۱۹</sup> فرانسه مشاهده شده، سفره های تحت فشار را سفره های آرتزین نیز می گویند [14]. شکل ۲-۱ قسمت های مختلف آبخوان محصور و سطح پیزومتریک را در یک آبخوان فرضی نشان می دهد.

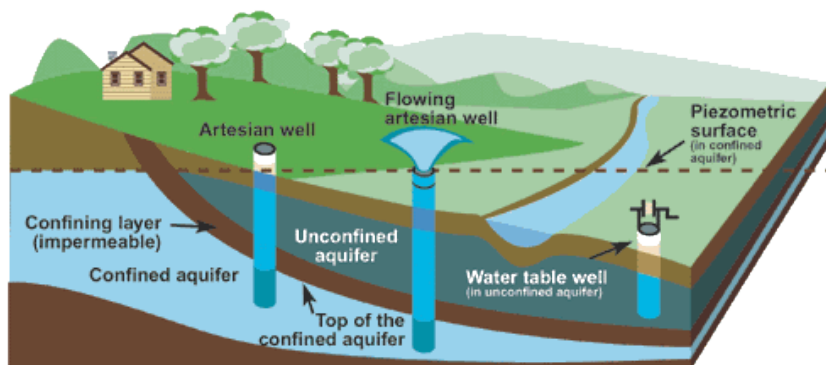
<sup>16</sup> Saturated zone

<sup>17</sup> Unsaturated zone

<sup>18</sup> Piezometric surface

<sup>19</sup> Artois

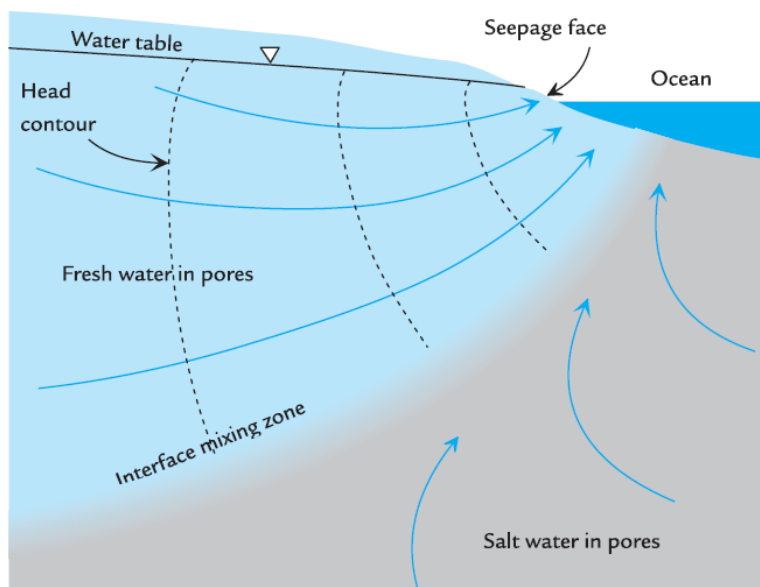
تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی ۲۰



شکل ۲-۱ نمایش قسمت های متخلف سفره تحت فشار و سطح پیزومتریک در آبخوان فرضی

### ۳-۱-۵-۱ سفره آب ساحلی<sup>۲۰</sup>

سفره های آب شیرین در کنار دریا و دریاچه، دارای وضعیت ویژه ای هستند که به ساختمان زمین شناسی محل بستگی دارد. چون وزن مخصوص آب شیرین از آب دریا کمتر است، آب شیرین ساحلی در روی آب شور دریا قرار می گیرد. به این صورت که آب شور واقع در زیر سفره آب شیرین، هم سطح آب دریا واقع نمی شود و هرچه از طرف دریا به طرف ساحل پیش برویم، سطح آب شور پایین تر می رود و ضخامت آب شیرین بیشتر می شود [14]. شکل ۳-۱-۳



شکل ۳-۱-۳ نمایش سطح تداخل آب شور و شیرین در آبخوان ساحلی فرضی [14]

<sup>20</sup> Coastal Aquifer

<sup>21</sup> Interface mixing zone

#### ۴-۱-۵-۱ سفره های آب تشکیلات آهکی و گچی

در زمین های آهکی و گچی نیز ممکن است سفره های آبدار تشکیل شوند، به این نحو که آب از طریق درزها و شکاف های بزرگ زمین وارد شده و با جمع شدن در آنجا تشکیل یک سفره آبدار را می دهد. درزها و شکاف های بزرگ زمین، در نتیجه تاثیر آب های انیدرید کربنیک<sup>۲۲</sup> دار و فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی آب در طول زمان ایجاد می شود. نمونه های بارز آن را می توان در جلگه های آهکی واقع در ساحل دریای آدریاتیک<sup>۲۳</sup> یافت [14]. در نقاط مختلف کشور ما بویژه در منطقه غرب (زاگرس) نیز نمونه هایی از آن دیده می شود [15].

#### ۴-۱-۵-۱-۵ میان بسترها<sup>۲۴</sup>

میان بسترها به یک بستر با نفوذپذیری بسیار کم در یک آبخوان نسبتاً نفوذپذیر گفته می شود. بیشتر میان بسترها مشخصات زیر را دارند:

- حاوی رسوبات رس و سیلتی بسیار تراکم پذیر می باشند به طوری که آب در جهت عمودی به بسترهای درشت دانه تر جریان می یابد.
- گستردگی جانبی آن در حدی است که به عنوان یک واحد محصور جدا کننده آبخوان های مجاور در نظر گرفته می شود.
- ضخامت نسبتاً کمی در مقایسه با طول جانبی اش دارد.
- هدایت هیدرولیکی آن کمتر از رسوبات اطرافش است، با این وجود به اندازه کافی متخلخل و نفوذپذیر است تا در پاسخ به تغییرات هد هیدرولیکی در آبخوان های مجاور، آب آزاد یا به آن وارد شود.

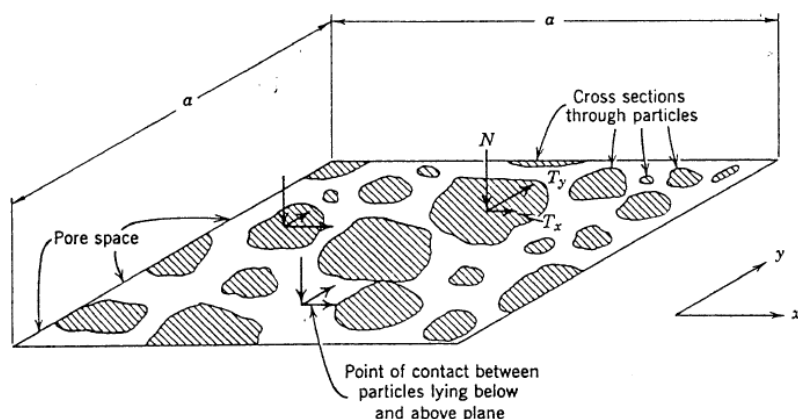
#### ۲-۵-۱ تنش در یک توده خاک

با عبور یک صفحه فرضی از میان خاک، بخش هایی از این صفحه بین دانه های جامد و قسمت های دیگر از فضای خالی خواهند گذشت. حتی ممکن است این صفحه از یک یا چند نقطه تماس بین ذرات عبور کند. در هر نقطه که این صفحه از میان ذرات عبور می کند، نیروی انتقال یافته از میان اسکلت ساختمانی می تواند به مولفه های عمودی و مماس بر صفحه تجزیه شود. مولفه های مماسی می توانند مجدداً به یک جفت مولفه واقع در امتداد دو محور مختصات عمود بر هم تجزیه شوند. این مولفه های متفاوت در شکل ۱-۴ رسم شده اند. از تقسیم مجموع مولفه های عمود بر سطح تمام نیروها بر مساحت صفحه، تنش نرمال  $\sigma$  که بر صفحه اثر می کند بدست می آید. به طور مشابه، تقسیم مجموع تمام مولفه های مماسی در روی صفحه در جهت  $X$  بر مساحت صفحه، تنش برشی  $\tau_X$  در جهت  $X$  را می دهد. تنش تماسی، تنش در نقاط تماس بین ذرات می باشد. این تنش ها بسیار بزرگ خواهند بود [16].

<sup>22</sup> Carbonic Anhydride

<sup>23</sup> Adriatic

<sup>24</sup> Interbeds



شکل ۴-۱ نمایش تنش در سیستم ذره ای.

### ۱-۵-۲-۱ تنش های ژئواستاتیک

الگوهای تنش های ناشی از وزن خود خاک می تواند پیچیده باشد. وزن خاک با در نظر گرفتن افقی بودن سطح زمین و تغییرات اندک طبیعت خاک در جهت افقی، به یک الگوی بسیار ساده تنش تبدیل می شود. در این وضعیت به تنش ها، تنش های ژئواستاتیکی گفته می شود [16].

### ۱-۵-۲-۲ تنش ژئواستاتیک عمودی

تنش ژئواستاتیک عمودی در هر عمق می تواند با در نظر گرفتن وزن خاک بالای آن عمق به سادگی محاسبه شود. اگر وزن مخصوص خاک نسبت به عمق ثابت باشد [16]:

$$\sigma_v = z\gamma \quad 1-1$$

که  $z$  عمق خاک و  $\gamma$  وزن مخصوص کل خاک است. تنش عمودی به شکل خطی با عمق تغییر خواهد کرد. اگر خاک به صورت لایه لایه باشد و وزن مخصوص هر لایه متفاوت از بقیه باشد، تنش عمودی را می توان به صورت معادله ۱-۲ محاسبه کرد:

$$\sigma_v = \Delta z\gamma \quad 2-1$$

### ۱-۵-۲-۳ تنش ژئواستاتیک افقی

نسبت تنش افقی به عمودی با فاکتوری تحت عنوان نسبت تنش جانبی بیان می شود و با  $K$  مشخص می گردد [16]:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad 3-1$$

این تعریف چه تنش ها ژئواستاتیک باشند و چه نباشند، استفاده می شود. در مواردی که کرنش جانبی در زمین وجود ندارد، از ضریب تنش جانبی در حالت سکون یا  $K_0$  استفاده می کنیم. اگر یک خاک در گذشته به طور اضافی



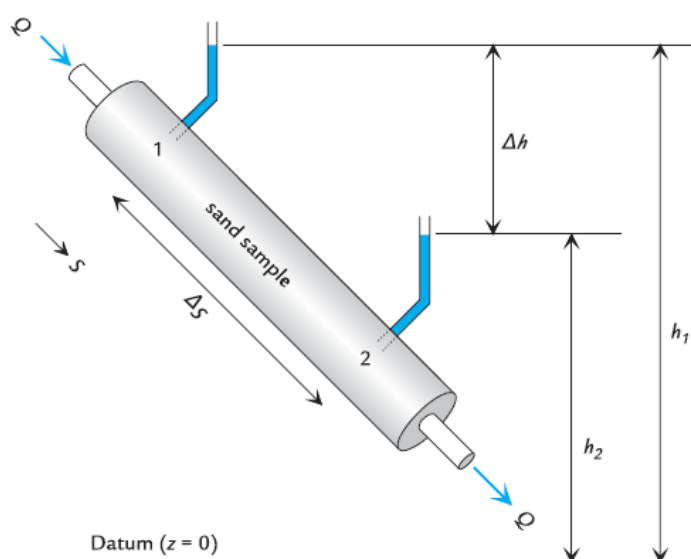
بارگذاری شده باشد، تنش افقی می تواند از تنش عمودی تجاوز نماید، زیرا تنش های افقی با برداشتن بار ناپدید نخواهد شد.

#### ۱-۵-۲-۴ تنش های اصلی

در هر نقطه تحت تنش، سه صفحه متقابلاً عمود بر هم وجود دارد که تنش های برشی روی آنها صفر است. این صفحات، صفحات تنش های اصلی نامیده می شوند. تنش های نرمالی که بر این سه صفحه اثر می کند، تنش های اصلی می باشند. تنش های برشی بر روی هر دو صفحه عمود بر هم از لحاظ عددی با یکدیگر برابرند. فرض می شود تنش ها وقتی مثبت هستند که فشاری باشند [16].

#### ۱-۵-۳ مفهوم فشار آب منفذی

به طور کلی همه منافذ در خاکها به یکدیگر مرتبط می باشند. در خاک های درشت دانه و حتی لای، غیرممکن است که منفذی غیر مرتبط با منافذ کنار آنها وجود داشته باشد. در خاک های رسی به دلیل اینکه ساختار دانه های صفحه ای دارند، ممکن است درصد کمی از منافذ غیرمرتبط وجود داشته باشند. از آنجا که منافذ موجود در خاکها با یکدیگر مرتبطند، آب می تواند در داخل متراکم ترین خاک های طبیعی نیز جریان یابد. در سال های دهه ۱۸۳۰، هنری دارسی<sup>۲۵</sup> جریان عبوری از یک فیلتر ماسه ای استوانه ای را مورد مطالعه قرار داد که در شکل ۱-۵ قابل نمایش است [16].



شکل ۱-۵ نمایش آزمایش دارسی- عبور جریان ماندگار از فیلتر ماسه ای استوانه ای

او بطور تجربی دریافت که دبی عبوری با تغییرات ارتفاع آب متناسب است:

$$۴-۱$$

$$Q = KiA = K \Delta h L A$$

که  $Q$  جریان ورودی به نمونه،  $K$  ضریب نفوذپذیری،  $i$  گرادیان هیدرولیکی که برابر نسبت اختلاف ارتفاع آب به طول نمونه می باشد،  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع سطح آب در دو پیزومتر، و  $L$  طول نمونه است.

در مطالعه جریان سیالات، هر دو انرژی حرکتی و پتانسیل را به صورت ارتفاع که انرژی بر واحد جرم است، بیان می کنیم. سه ارتفاع برای مسائلی که در ارتباط با جریان سیال می باشند در نظر گرفته می شود:

- ارتفاع فشار  $h_p$  که برابر با فشار تقسیم بر وزن مخصوص سیال می باشد.
- ارتفاع رقوم  $h_e$  که فاصله نسبت به سطح مبنا می باشد.
- ارتفاع کل  $h$  که مجموع ارتفاع فشار و ارتفاع رقوم می باشد.

اگر هدف مطالعه جریان در لوله ها و کانال های باز باشد، ارتفاع سرعت نیز باید در نظر گرفته شود. گرادیانی که در قانون دارسی مورد استفاده است از تفاوت در ارتفاع کل محاسبه می شود.

در مکانیک خاک فشار آب منفذی از ارتفاع فشار قابل محاسبه است. ارتفاع فشار هم می تواند مستقیماً توسط پیزومتر اندازه گیری شود (ارتفاع فشار اندازه گیری شده توسط پیزومتر مجموع ارتفاع فشار و ارتفاع رقوم می باشد) و هم با استفاده از قوانین جریان سیالات محاسبه گردد.

#### ۴-۵-۱ مفهوم تنش موثر

تنش موثر ارتباط بسیار نزدیکی با رفتار خاک دارد. این مولفه به اختلاف بین تنش کل و فشار آب منفذی بستگی دارد. این تنش توسط نیروهای تأمین می شود که ذرات خاک در محل تماس با هم ایجاد می کنند و این نیروها نه به مساحت دانه های جامد بلکه به مساحت کل در تراز مورد نظر تقسیم می شوند، لذا تنش موثر از تنش تماسی (واقعی) بین ذرات خاک کمتر است. تنش کل روی کل مساحت مورد نظر اعمال می شود و فشار آب منفذی نیز روی مساحت های که در آن آب در تماس با کل محیط مورد نظر می باشد اعمال می شود (مساحت کل منهای مساحت تماسی ذرات خاک) [16].

علاوه بر تنش کل که دارای دو مولفه در راستای افقی و قائم می باشد، فشار منفذی نیز دارای دو مولفه است اما چون در ارتفاع یکسان روی همان کوچک اندازه گیری شده است با هم برابر می باشند. لذا تنش موثر در راستای قائم و افقی به صورت معادلات ۵-۱ تا ۷-۱ قابل تعریف است:

$$۵-۱$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u$$

$$۶-۱$$

$$\bar{\sigma}_h = \sigma_h - u$$

$$۷-۱$$

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_v - u$$

مولفه تنش جانبی نیز بر مبنای تنش موثر بجای تنش کل به صورت رابطه ۸-۱ قابل تعریف است:

$$k = \frac{\bar{\sigma}_h}{\bar{\sigma}_v} \quad ۸-۱$$

افزایش تنش موثر، باعث متراکم تر شدن خاک می شود. به عبارت دیگر افزایش یکسان تنش کل و فشار آب منفذی باعث ثابت ماندن تنش موثر می شود (تاثیر بسیار کمی روی ذرات دارد یا بی تاثیر است). این نتیجه با آزمایش های زیادی ثابت شده است.

ارتباط صحیح استاتیکی تنش های نرمال اعمال شده به یک سطح به صورت معادله ۹-۱ قابل تعریف است [16]:

$$\sigma = \bar{\sigma} a_m + u_a a_a + u_w a_w + R - A \quad ۹-۱$$

$\bar{\sigma}$ : تنش تماسی بین ذرات (به دلیل سطح تماس بسیار کوچک، این تنش، بسیار بزرگ می باشد. در خاک های دانه ای بارگذاری شده شدید، این تنش می تواند از مقاومت فشاری ذره نیز تجاوز کند).

$a_m$ : نسبت سطح تماس بین ذرات که برای خاک دانه ای کمتر از ۰/۰۳ و حتی کمتر از ۰/۰۱ می تواند باشد؛ به عبارت دیگر در خاک های رسی مونت مرلینت  $\bar{\sigma}$  و  $a_m$  صفر می تواند باشد.

$u_a$ : تنش تماسی بین هوا و ذرات یا بین هوا و هوا

$a_a$ : سطح تماس نسبی بین هوا و ذرات یا بین هوا و هوا که برای اشباع های  $a_a$  و  $u_a$  می تواند صفر باشد  
لذا  $1 = a_w + a_m$

$u_w, a_w = \frac{A_w}{d.d}$ : تنش تماسی و سطح تماس نسبی بین آب و ذرات یا بین آب و آب (این تنش، فشار منفذی اندازه گیری شده توسط فشارسنج<sup>۲۶</sup> است).

$R$ : دافعه الکتریکی بین ذرات

$A$ : جاذبه الکتریکی بین ذرات (بین هر دو نقطه که فشار آب منفذی اندازه گیری می شود یک فشار در نتیجه تمرکز یون مثبت ایجاد می شود. به عبارت دیگر می توان کل فشار جریان در دو نقطه مورد نظر را اختلاف یک مقدار مساوی با فشار جزئی از کاتیون های اضافی دانست. این اختلاف فشار در سیال - فشار تراوشی - بین دو نقطه برابر با دافعه الکتریکی بین ذرات است).

معادله ۱-۱۰ یک معادله کلی از تعادل تنش ها می باشد؛ در شرایط خاص این معادله کمی تغییر می کند:

▪ اگر خاک اشباع باشد:

$$\sigma = \bar{\sigma}a_m + u_w a_w + R - A \quad 11-1$$

▪ اگر خاک اشباع باشد و هیچ تماس ذره-ذره ای نداشته باشد: به عنوان مثال در سیستم های خیلی پلاستیک مثل خاک مونت موریلونت

$$\sigma = u_w + R - A \quad 12-1$$

▪ اگر خاک اشباع باشد و هیچ A و R خالصی نداشته باشد:

$$\sigma = \bar{\sigma}a_m + u_w a_w = \bar{\sigma}a_m + u_w(1 - a_m) \quad 13-1$$

بر این اساس می توان ۲ حالت را برای تنش موثر در نظر گرفت [16]:

-شرایطی که هیچ تماس بین ذره ای نداشته باشیم:

$$\bar{\sigma} = R - A \quad 14-1$$

-شرایطی که هیچ A و R خالصی نداریم:

$$\bar{\sigma} = (\bar{\sigma} - u_w)a_m \quad 15-1$$

چون  $\sigma$  بسیار بزرگ است می توان از اثر فشار آب منفذی صرفنظر کرده و تنش موثر را به صورت رابطه ۱۶-۱ محاسبه کرد:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}a_m \quad 16-1$$

لذا در سیستم های اشباع بسیار پلاستیک، تنش موثر برابر تنش الکتریکی خالص انتقال یافته بین ذرات بوده و در خاک های دانه ای در درجه بالای اشباع، تنش موثر برابر تنش تماسی در مساحت تماسی می باشد.

تنش موثر، رابطه نزدیکی با تنش انتقال داده شده از طریق اسکلت مواد معدنی خاک دارد؛ به همین دلیل این تنش را اغلب تنش میان دانه ای نیز می گویند. اگر بخواهیم معادله ۸ را در خاک نیمه اشباع به کار ببریم هوا نیز باید در معادله نیروها در نظر گرفته شود. برای خاک های نیمه اشباع، معادله تنش موثر توسط بیشاپ ارائه شده است (معادله ۲۰-۱) [16].

$$u^* = u_a a_a + u_w a_w \quad 17-1$$

$$1 = a_a + a_w \quad 18-1$$

$$u^* = u_a + (u_w - u_a)a_w \quad ۱۹-۱$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_a + (u_a - u_w)a_w \quad ۲۰-۱$$

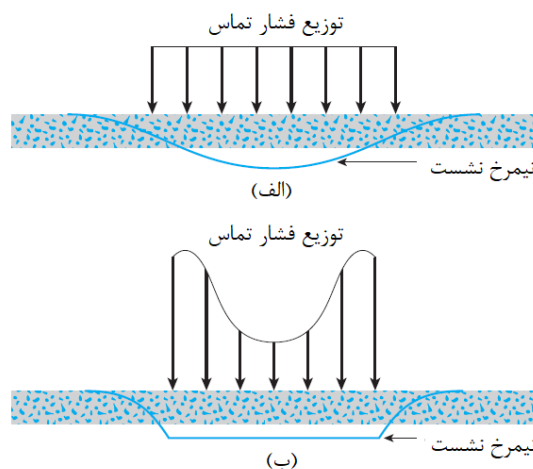
در مناطقی که با بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی و بیلان منفی حوضه آبریز روبرو هستیم، افزایش تنش موثر خاک می تواند عامل اصلی تراکم و فشردگی لایه های زمین شده و در نتیجه فرونشست در سطح زمین ظاهر شود.

### ۵-۵-۱ مبانی تئوری تحکیم

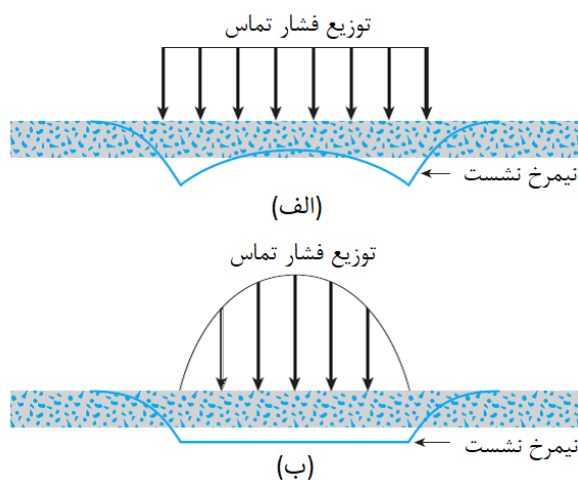
نشست کلی پی توسط رابطه ۱-۲۱ محاسبه می شود:

$$S_T = S_c + S_s + S_e \quad ۲۱-۱$$

که در آن  $S_c$  نشست تحکیمی اولیه (تغییر حجم خاک چسبنده اشباع در اثر خروج آب از منافذ)،  $S_s$  نشست تحکیمی ثانویه (تغییر حجم خاک های چسبنده اشباع در اثر اصلاح خمیری بافت خاک) و  $S_e$  نشست کشسان خاک (تغییر شکل کشسان خاک خشک و مرطوب و اشباع بدون تغییر رطوبت) می باشد [17]. در خاک هایی که مدول کشسانی آنها با تغییر عمق نسبتاً ثابت باقی بماند رفتار متفاوتی برای نشست پی های صلب و انعطاف پذیر در مواجهه با بارگذاری گسترده یکنواخت دارند. در پی انعطاف پذیر که روی خاک رس اشباع بنا شده است، با افزایش تنش، فشار تماسی به صورت یکنواخت و نیمرخ نشست پی به صورت فرورفته خواهد بود. در پی صلب نیز نشست به صورت یکنواخت و فشار تماسی باز توزیع خواهد شد. این دو حالت در شکل ۱-۶ قابل نمایش است. اما در خاک هایی مانند ماسه که مدول کشسانی با افزایش عمق افزایش می یابد، توزیع فشار تماسی و نیمرخ نشست متفاوت خواهد بود. در پی انعطاف پذیر چون لبه پی در سطح زمین محدودیت ندارد، ماسه در لبه پی به بیرون رانده شده و منحنی خیز پی به طرف پایین تقعر پیدا می کند. توزیع فشار تماس و منحنی نشست پی های صلب و انعطاف پذیر که روی ماسه بنا شده اند و در معرض بارگذاری یکنواخت قرار دارند در شکل ۱-۷ نشان داده شده است [17].



شکل ۱-۶ نیمرخ نشست کشسان و فشار تماسی در رس (الف) پی انعطاف پذیر؛ (ب) پی صلب.



شکل ۱-۷ نیمرخ نشست کشسان و فشار تماسی در ماسه الف) پی انعطاف پذیر؛ ب) پی صلب.

#### ۱-۵-۵-۱ محاسبه نشست کشسان

نشست کشسان در پی انعطاف پذیر به صورت رابطه ۱-۲۲ قابل محاسبه است:

$$S_e = \Delta\sigma(\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f \quad ۱-۲۲$$

که در آن  $\Delta\sigma$  فشار خالص وارد بر پی،  $\mu_s$  نسبت پواسون خاک،  $E_s$  مدول میانگین کشسانی خاک زیر پی که از  $z = 0$  تا  $z = 4B$  اندازه گیری می شود،  $B'$  برای مرکز پی برابر  $\frac{B}{2}$  و در گوشه پی برابر  $B$  می باشد،  $I_s$  ضریب شکل،  $I_f$  ضریب عمق و  $\alpha$  ضریبی وابسته به مکانی روی پی که نشست در آن مکان محاسبه می شود، می باشد. ضریب شکل معرفی شده توسط اشتین برن<sup>۲۷</sup> به صورت معادلات ۱-۲۲ تا ۱-۲۸ قابل محاسبه است [17]:

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\mu_s}{1 - \mu_s} F_2 \quad ۱-۲۳$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1) \quad ۱-۲۴$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2 \quad ۱-۲۵$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m' (1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} \quad ۱-۲۶$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad ۱-۲۷$$

$$A_2 = \frac{m'}{n' \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad 28-1$$

ضریب عمق نیز توسط فاکس<sup>۲۸</sup> به صورت معادله ۳۰-۱ محاسبه می شود [18]:

$$I_f = f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, \frac{L}{B}\right) \quad 29-1$$

تغییرات  $I_f$  با  $\frac{D_f}{B}, \mu_s, \frac{L}{B}$  در جدول ۱-۱ مشاهده می شود.

جدول ۱-۱ تغییرات  $I_f$  با  $\frac{D_f}{B}, \mu_s, \frac{L}{B}$

| $L/B$ | $D_f/B$ | $I_f$         |               |               |
|-------|---------|---------------|---------------|---------------|
|       |         | $\mu_s = 0.3$ | $\mu_s = 0.4$ | $\mu_s = 0.5$ |
| 1     | 0.5     | 0.77          | 0.82          | <b>0.85</b>   |
|       | 0.75    | 0.69          | 0.74          | <b>0.77</b>   |
|       | 1       | 0.65          | 0.69          | <b>0.72</b>   |
| 2     | 0.5     | 0.82          | 0.86          | <b>0.89</b>   |
|       | 0.75    | 0.75          | 0.79          | <b>0.83</b>   |
|       | 1       | 0.71          | 0.75          | <b>0.79</b>   |
| 5     | 0.5     | 0.87          | 0.91          | <b>0.93</b>   |
|       | 0.75    | 0.81          | 0.86          | <b>0.89</b>   |
|       | 1       | 0.78          | 0.82          | <b>0.85</b>   |

برای محاسبه نشست می توان دو حالت را در نظر گرفت:

- محاسبه نشست در مرکز پی:

$$\alpha = 4, m' = \frac{L}{B}, n' = \frac{H}{\frac{B}{2}} \quad 30-1$$

- محاسبه نشست در گوشه پی:

$$\alpha = 1, m' = \frac{L}{B}, n' = \frac{H}{\frac{B}{2}} \quad 31-1$$

اکثر نهشته های خاکی ناهمگن می باشند، لذا مدول کشسانی با عمق تغییر می کند. بولز<sup>۲۹</sup> استفاده از مقدار میانگین مدول کشسانی را به صورت معادله ۳۲-۱ توصیه کرد [19]:

<sup>28</sup> FOX

<sup>29</sup> Bowles

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی ۳۰

$$E_s = \frac{\sum E_{s(i)} \Delta z}{\bar{z}} \quad ۳۲-۱$$

که  $E_{s(i)}$  مدول کشسانی خاک در عمق  $\Delta z$  و  $\bar{z}$  برابر کوچکترین مقدار H یا 5B است. در پی صلب نیز نشست کشسان توسط رابطه ۳۳-۱ تعیین می‌شود:

$$S_{e(rigid)} \approx 0.93 S_{e(flexible, center)} \quad ۳۳-۱$$

## ۲-۵-۵-۱ مبانی تحکیم

در خاک ماسه‌دار بسیار نفوذ پذیر با افزایش تنش، به علت زهکشی سریع آب منفذی، نشست کشسان و تحکیم همزمان رخ می‌دهد. اما در لایه رس تراکم پذیر اشباع به علت نفوذپذیری کمتر آن نسبت به ماسه، فشار آب منفذی تولید شده در اثر افزایش تنش (بارگذاری) به تدریج رفع می‌شود. لذا نشست کشسان بلافاصله رخ داده، ولی تحکیم تا مدت‌ها پس از آن ادامه پیدا می‌کند. باید این نکته را در نظر گرفت که نشست ناشی از تحکیم رس می‌تواند چند برابر نشست کشسان باشد [17].

با فرض قرار گرفتن لایه رس اشباع در بین دو لایه ماسه، کرنش لایه رس اشباع را می‌توان این گونه تحلیل کرد که با اعمال افزایش لحظه ای تنش کل  $\Delta \sigma$ ، در لحظه صفر کل افزایش تنش کل توسط آب تحمل می‌شود یعنی  $\Delta \sigma = 0$ ،  $\Delta u$ ،  $\Delta \sigma' = 0$ ، لذا بر اسکلت خاک هیچ تنشی وارد نمی‌شود. پس از گذشت زمان، آب داخل منافذ به درون لایه ماسه نفوذ کرده و به تدریج فشار آب منفذی کاهش و تنش موثر افزایش می‌یابد. لذا مقدار  $\Delta u$ ،  $\Delta \sigma'$  به حداقل فاصله مسیر زهکشی تا هر یک از لایه‌های ماسه بستگی دارد. در لحظه  $t = \infty$  کل فشار آب منفذی زایل شده و همه افزایش تنش توسط خاک تحمل می‌شود. این فرآیند تدریجی زهکشی باعث می‌شود نشست در لایه رسی به زمان وابسته باشد [17].

## ۳-۵-۵-۱ آزمایش تحکیم یک بعدی در آزمایشگاه

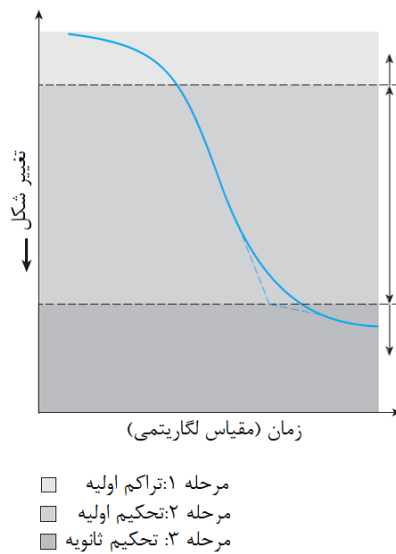
اولین بار توسط ترزاقی مطرح شد. این آزمایش توسط تحکیم سنج انجام می‌شود. در طول آزمایش نمونه زیر آب نگهداری شده و در هر ۲۴ ساعت بار اعمال، و تراکم توسط میکرومتر اندازه گیری می‌شود. در هر مرحله بار را ۲ برابر می‌کنند و اندازه گیری تراکم را ادامه می‌دهند. در پایان این آزمایش وزن نمونه خشک را تعیین می‌کنند. با توجه به نمودار تغییر شکل نمونه بر حسب زمان (شکل ۸-۱) می‌توان سه مرحله متمایز را تشخیص داد:

مرحله ۱: تراکم اولیه ناشی از پیش بارگذاری

مرحله ۲: تحکیم اولیه در اثر تبدیل فشار آب منفذی به تنش موثر

مرحله ۳: تحکیم ثانویه به سبب تنظیم دوباره خاصیت خمیری بافت خاک پس از برطرف شدن فشار آب منفذی





شکل ۸-۱ نمودار زمان-تغییر شکل طی آزمایش تحکیم به ازای افزایش بار.

پس از بدست آوردن نمودار زمان-تغییر شکل باید تغییرات نسبت تخلخل نمونه با تغییر فشار را بررسی کرد:

گام اول: محاسبه ارتفاع مواد جامد در نمونه خاک

$$H_s = \frac{W_s}{A G_s \gamma_w} \quad ۳۴-۱$$

در این معادله  $W_s$  وزن نمونه خشک،  $A$  سطح نمونه،  $G_s$  چگالی نسبی مواد جامد خاک و  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب می باشد.

گام دوم: محاسبه ارتفاع اولیه منافذ خاک

$$H_v = H - H_s \quad ۳۵-۱$$

که در آن  $H$  ارتفاع اولیه نمونه است.

گام سوم: محاسبه تخلخل اولیه نمونه

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{AH_v}{AH_s} = \frac{H_v}{H_s} \quad ۳۶-۱$$

گام چهارم: محاسبه تغییر نسبت تخلخل برای مرحله اول افزایش بارگذاری که سبب ایجاد تغییر شکل  $\Delta H_1$  می شود و محاسبه نسبت تخلخل جدید.

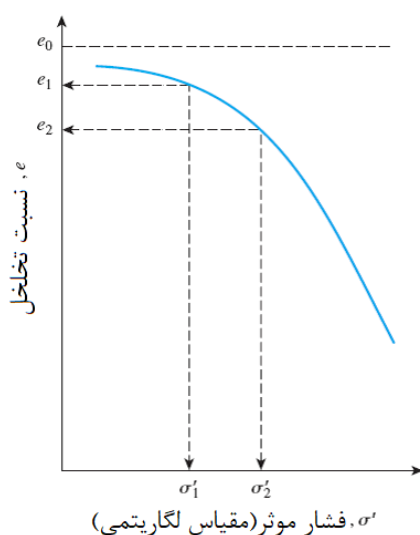
$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s} \quad ۳۷-۱$$

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

در بارگذاری بعدی،  $\sigma_2$  که مساوی بار تجمعی بر واحد سطح نمونه است، که سبب ایجاد تغییر شکل اضافی  $\Delta H_2$  می‌شود، نسبت تخلخل در پایان تحکیم را می‌توان به صورت معادله ۳۸-۱ محاسبه کرد:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s} \quad ۳۸-۱$$

به همین ترتیب می‌توان نسبت تخلخل را در پایان عمل تحکیم، به ازای همه افزایش بارها، بدست آورد [16]. شکل متداول چنین نموداری در شکل ۹-۱ نشان داده شده است.



شکل ۹-۱ نمودار متداول e بر حسب  $\log \sigma'$

#### ۴-۵-۵-۱ تحکیم یافته عادی و پیش تحکیم یافته

خاک واقع در عمق مفروض، در تاریخچه زمین شناختی خود در معرض فشار موثر پیشین ماکزیمی بوده است. هنگامی که این نمونه در معرض آزمون تحکیم قرار بگیرد اگر فشار موثر وارد بر نمونه از فشار سربار موثر ماکزیم پیشین خاک کمتر باشد، کمی تراکم رخ خواهد داد. اگر بیشتر باشد، تغییر تخلخل بیشتر و رابطه  $\log \sigma' - e$  خطی با شیب تندتر خواهد بود. اگر فشار سربار موثر فعلی خاک، حداکثر فشاری باشد که خاک در گذشته در معرض آن قرار گرفته است، به آن خاک رس عادی تحکیم یافته می‌گویند. اما اگر فشار سربار موثر فعلی کمتر از فشاری است که در گذشته بر خاک وارد شده است، خاک رس پیش تحکیم یافته است و فشار موثر پیشین خاک را فشار پیش تحکیم

گویند. کاساگرانده<sup>۳۰</sup> روشی ترسیمی جهت تعیین فشار پیش تحکیم با استفاده از منحنی های آزمایشگاهی پیشنهاد کرد [20]. نسبت پیش تحکیمی هر خاک را می توان به صورت معادله ۱-۳۹ تعیین کرد:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'} \quad ۳۹-۱$$

که  $\sigma'_c$  فشار پیش تحکیم نمونه و  $\sigma'$  فشار عمودی موثر فعلی است.

#### ۱-۵-۵-۵ محاسبه نشست با استفاده از تحکیم اولیه یک بعدی

نشست در لایه رس اشباع به ضخامت H و سطح مقطع A، زیر فشار سربار موثر میانگین  $\sigma'_0$ ، به علت افزایش فشار موثر  $\Delta\sigma'$  به صورت معادله ۱-۴۰ قابل محاسبه است [17]:

$$S_c = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad ۴۰-۱$$

که در آن  $e_0$  نسبت تخلخل اولیه در حجم  $V_0$  و  $\Delta e$  تغییر نسبت تخلخل است. در رس عادی تحکیم یافته به علت رابطه خطی  $e - \log \sigma'$  می توان نوشت:

$$\Delta e = C_c [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log(\sigma'_0)] \quad ۴۱-۱$$

که  $C_c$  شیب منحنی  $e - \log \sigma'$  (شاخص تراکم) می باشد. با جایگزین کردن معادله ۴۱-۱ در ۴۰-۱ نتیجه می گیریم:

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad ۴۲-۱$$

در رس پیش تحکیم یافته به ازای  $\sigma'_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$  شیب منحنی  $e - \log \sigma'$  با شیب منحنی باربرداری آزمایشگاهی تقریب زده می شود. شیب منحنی باربرداری را  $C_s$  یا شاخص تورم می نامند؛ لذا می توان نوشت:

$$\Delta e = C_s [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log(\sigma'_0)] \quad ۴۳-۱$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad ۴۴-۱$$

اگر  $\sigma'_c > \sigma'_0 + \Delta\sigma'$  آنگاه:

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}\right) + \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \quad ۴۵-۱$$

شاخص تراکم  $C_c$  و شاخص تورم  $C_s$  را می‌توان هم به روش ترسیمی توسط نمودار  $e - \log \sigma'$  و هم توسط روابط تجربی تعیین کرد. شاخص تورم عموماً از شاخص تراکم کوچکتر است. روابط تجربی جهت محاسبه شاخص تراکم و تورم در جدول ۱-۲ بیان شده است [17].

#### ۴-۵-۵-۱ نشست تحکیمی ثانویه

همانطور که قبلاً گفته شد، در پایان تحکیم اولیه به علت اصلاح خمیری بافت خاک، مقداری نشست مشاهده می‌شود. این مرحله از تحکیم را تحکیم ثانویه گویند [17]. شاخص تراکم ثانوی و نشست تحکیمی ثانویه در معادلات ۱-۴۶ تا ۱-۴۸ تعریف شده‌اند.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad ۴۶-۱$$

$$S_s = C'_\alpha H \log \frac{t_2}{t_1} \quad ۴۷-۱$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \quad ۴۸-۱$$

که  $C_\alpha$  شاخص تراکم ثانویه،  $\Delta e$  تغییر نسبت تخلخل،  $t$  زمان،  $e_p$  نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه و  $H$  ضخامت لایه رس می‌باشد.

جدول ۱-۲ روابط تجربی برای شاخص تراکم  $C_c$  و شاخص تورم  $C_s$

| مرجع                                            | شاخص تراکم                                                      | شاخص تورم | کاربردها         | مولفه‌ها       |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| اسکمپتون <sup>۳۱</sup><br>(۱۹۴۴)<br>[21]        | $C_c = 0.009(LL - 10)$                                          | -         | رس دست<br>نخورده | LL حد<br>روانی |
| رندون-<br>هررو <sup>۳۲</sup> (۱۹۸۸)<br>[22] (۳) | $C_c = 0.141 G_s^{1.2} \left(\frac{1 + e_0}{G_s}\right)^{2.38}$ | -         | رس<br>طبیعی      | -              |

<sup>31</sup> Skempton

<sup>32</sup> Randon-Herrero

|                           |                  |                                        |  |                                       |  |                                                  |
|---------------------------|------------------|----------------------------------------|--|---------------------------------------|--|--------------------------------------------------|
|                           |                  | $C_s = 0.0463 \frac{(LL\%)}{100}$      |  | $C_c = 0.2343 \frac{(LL\%)}{100} G_s$ |  | ناگراج و<br>مورتی <sup>۳۳</sup> (۱۹)<br>[23](۸۵) |
| PI                        | رس               | $C_s \approx \frac{PI}{370}$           |  | $C_c \approx \frac{PI}{74}$           |  | کولای و<br>ماین <sup>۳۴</sup> (۱۹۹)<br>[24](۰)   |
| شاخص<br>خمیری             | اصلاح<br>شده کام |                                        |  |                                       |  |                                                  |
| $n_0$ پوکی<br>خاک<br>درجا | -                | $C_c = \frac{n_0}{371.747 - 4.275n_0}$ |  |                                       |  | پارک و<br>کوموتو <sup>۳۵</sup> (۲۰)<br>[25](۰۴)  |

#### ۱-۵-۶ تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی

معادله هایی که تا اینجا معرفی شده اند، هیچ اطلاعاتی درمورد آهنگ تحکیم اولیه نمی دهند. ترزاقی (۱۹۲۵) نخستین نظریه را برای در نظر گرفتن آهنگ تحکیم یک بعدی برای خاک های رس اشباع ارائه داد [21]. فرضیاتی که ترزاقی برای اجرای این نظریه در نظر گرفت به شرح زیر است:

۱. سیستم رس-آب همگن است.
۲. خاک کاملاً اشباع است.
۳. از تراکم پذیری آب و دانه های خاک چشم پوشی می شود (دانه های خاک می توانند آرایش مجدد پیدا کنند).
۴. جریان آب یک جهته است (در جهت تراکم).
۵. قانون دارسی اعتبار دارد.

اگر حداکثر طول مسیر زهکشی برابر با  $H_{dr}$  باشد، ضخامت لایه رسی که به بین دو لایه ماسه نفوذپذیر واقع شده،  $2H_{dr}$  در نظر گرفته شده است. با افزایش فشار  $\Delta\sigma$ ، فشار آب منفذی در لایه رس افزایش خواهد یافت. اگر جریان آب را در یک المان خاکی در نظر بگیریم می توان نوشت [17]:

آهنگ تغییر حجم = آهنگ جریان ورودی آب - آهنگ جریان خروجی آب

$$\left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx dy - v_z dx dy = \frac{\partial V}{\partial t} \quad ۴۹-۱$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} dx dy dz = \frac{\partial V}{\partial t} \quad ۵۰-۱$$

<sup>33</sup> Nagaraj & Murty

<sup>34</sup> Kulhawy & Mayne

<sup>35</sup> Park & Koumoto

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی ۳۶

که  $V$  حجم جزء خاک و  $v_z$  سرعت جریان در امتداد  $z$  است. با استفاده از قانون داریسی می توان نوشت:

$$v_z = -ki = -k \frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad ۵۱-۱$$

که در آن  $u$  فشار آب منفذی مازاد ناشی از افزایش تنش می باشد. با جایگذاری این معادله در معادله ۵۰-۱ می توان نوشت:

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{dx dy dz} \frac{\partial V}{\partial t} \quad ۵۲-۱$$

در حین تحکیم، آهنگ تغییر حجم جزء خاک با آهنگ تغییر حجم منافذ خاک مساوی است. بنابراین:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t} = \frac{\partial (V_s + eV_s)}{\partial t} = \frac{\partial V_s}{\partial t} + V_s \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial V_s}{\partial t} \quad ۵۳-۱$$

که  $V_v$  حجم منافذ خاک و  $V_s$  حجم مواد جامد خاک است. با فرض تراکم ناپذیر بودن مواد جامد خاک می توان نوشت:

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} = 0 \quad ۵۴-۱$$

$$V_s = \frac{V}{1 + e_0} = \frac{dx dy dz}{1 + e_0} \quad ۵۵-۱$$

که  $e_0$  تخلخل اولیه خاک است. با ترکیب معادله های ۵۳-۱ تا ۵۵-۱ نتیجه می شود:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{dx dy dz}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad ۵۶-۱$$

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad ۵۷-۱$$

با فرض وجود رابطه خطی بین تغییر نسبت تخلخل و افزایش تنش موثر، می توان نوشت:

$$\partial e = \alpha_v \partial (\Delta \sigma') = -\alpha_v \partial u \quad ۵۸-۱$$

که در آن  $\alpha_v$  ضریب تراکم پذیری و  $\partial (\Delta \sigma')$  تغییر در فشار موثر می باشد. با ترکیب معادله های ۵۷-۱ و ۵۸-۱ می توان نوشت:

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\alpha_v}{1 + e_0} \frac{\partial u}{\partial t} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad ۵۹-۱$$

که  $m_v$  ضریب تراکم پذیری حجمی نام دارد. معادله دیفرانسیل پایه نظریه تحکیم ترزاقی به صورت معادله ۶۰-۱ تعریف می شود:

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad 60-1$$

که  $C_v$  ضریب تحکیم است:

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{k}{\left(\frac{\alpha_v}{1+e_0}\right) \cdot \gamma_w} \quad 61-1$$

معادله ۶۰-۱ را می توان با اعمال شرایط مرزی حل نمود. از آنجا که فرآیند تحکیم با برطرف شدن فشار آب منفذی مازاد کامل می شود، درجه تحکیم در هر فاصله  $z$  در هر زمان  $t$  برابر است با:

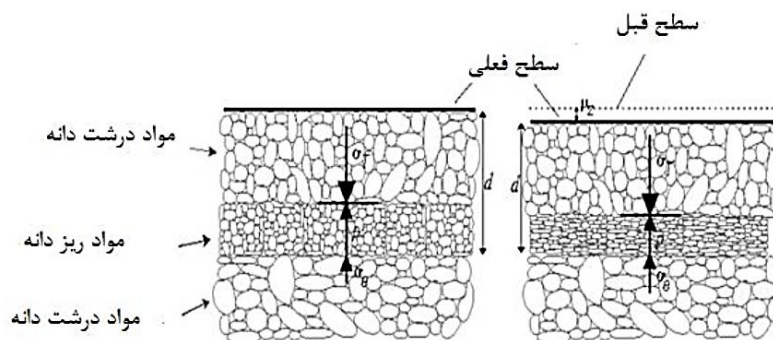
$$U_z = \frac{u_0 - u_z}{u_0} = 1 - \frac{u_z}{u_0} \quad 62-1$$

که  $u_z$  فشار آب منفذی مازاد در زمان  $t$  می باشد. عامل زمانی که متغیری بی بعد می باشد به صورت معادله ۶۳-۱ بیان می شود:

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2} \quad 63-1$$

## ۷-۵-۱ وقوع پدیده فرونشست از دیدگاه تغییرات آب زیرزمینی

فرونشست منطقه ای زمین به دلیلی افت سطح آب زیرزمینی به طور عمده در رسوب های تحکیم نیافته تا نیمه تحکیمی که در مجاورت لایه های شن و ماسه قرار دارند اتفاق می افتد. در این عمل، تراکم برگشت ناپذیر در آبخوان رخ می دهد. البته این عمل، زمان بر بوده و به آهستگی انجام می پذیرد. در اثر آن، زهکشی آب از لایه ریزدانه به دلیل افت فشار هیدرولیکی انجام می پذیرد. در چنین شرایطی یک تراکم غیر الاستیک به دلیل افزایش تنش موثر (اعمال تنش های بیش از تنش هایی که خاک، قبلاً تحمل نموده) در خاک رخ داده و چیدمان دانه های خاک به هم خورده و چیدمان جدید باعث کاهش حجم و ضخامت عمودی لایه ها و در نهایت فرونشست می گردد. این نکته لازم به یادآوری است که برگشت تراکم خیلی کم (در حدود ۱ تا ۵ درصد) لایه های خاک، در صورت برگشت سطح آب امکان پذیر می باشد [22]. شکل ۱۰-۱ کاهش حجم لایه ریزدانه و نازک شدن آن در اثر زهکشی را نشان می دهد.



شکل ۱-۱۰ کاهش حجم لایه ریزدانه و نازک شدن آن در اثر زهکشی

(شکل سمت چپ قبل از زهکشی و سمت راست مرحله بعد از زهکشی می باشد).

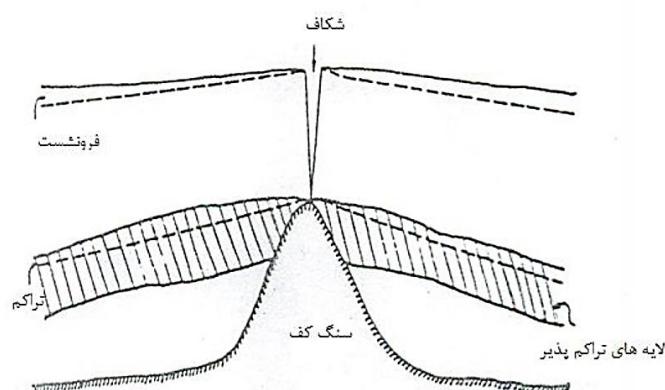
تنش موثر در هر عمقی از خاک از رابطه ۱-۶۴ محاسبه می شود:

$$\sigma_e = \sigma_t - P$$

۱-۶۴

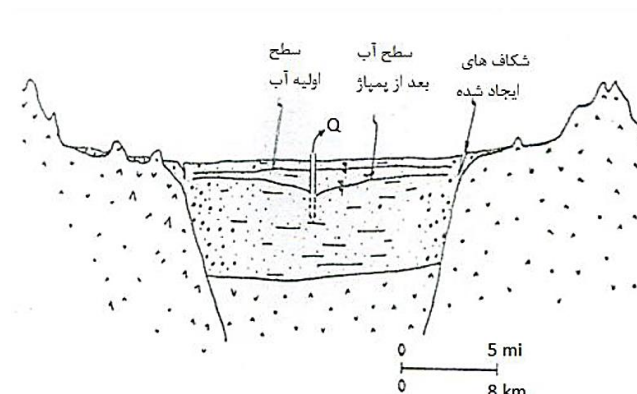
در این رابطه  $\sigma_e$  تنش موثر،  $\sigma_t$  تنش کل و  $P$  فشار منفذی در هر نقطه است. حال اگر به گونه ای  $P$  کاهش و یا  $\sigma_t$  افزایش یابد، مقدار تنش موثر نیز افزایش خواهد یافت. اکثر آبخوان ها به علت افزایش بهره برداری از منابع آب، با کاهش سطح ایستابی در آبخوان های آزاد یا کاهش فشار پیزومتری در آبخوان های تحت فشار مواجه هستند که هر دوی اینها به دلیل اینکه تنش کل ثابت می باشد، باعث کاهش فشار آب منفذی و در نتیجه افزایش تنش موثر و فرونشست می گردند [23]. حال اگر این فرونشست در محل برآمدگی سنگ کف باشد، در محل برآمدگی، گسیختگی در سطح زمین ایجاد می شود (شکل ۱-۱۱) و اگر فرونشست در دشت باشد در محل کناره های دشت و نزدیک به کوهپایه ها گسیختگی هایی به موازات خطوط تراز ارتفاعی ایجاد می شود (شکل ۱-۱۲).

همچنین جریان های رو به پایین آب، حتی اگر سطح آب افت نکند باعث کاهش  $P$  و افزایش  $\sigma_e$  شده و موجب فرونشست لایه ها می شوند. در جریان های تراوش افقی، فشار ناشی از تراوش باعث کرنش های افقی شده و شکاف هایی را به شکل هم مرکز با مخروط افت آب به وجود می آورند که رشد شکاف ها به صورت شعاعی بوده و به سمت کناره های مخروط کاهش می یابد [14].





شکل ۱-۱۱ مکانیزم ایجاد شکاف در منطقه ای که سنگ کف، بالاست [24].



شکل ۱-۱۲ شکاف زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی [24].

تغییرات تنش موثر در نتیجه تغییرات هد در آبخوان های محصور و آزاد متفاوت است. در آبخوان آزاد، تغییر در هد به زهکشی یا مرطوب شدن مجدد فضای خالی مربوط است و به تغییر در بار ژئواستاتیکی یا تنش کل روی نهشته های زیرین، در نهایت تغییر فشار آبی منفذی منتج می شود. تغییرات تنش موثر در بخش اشباع آبخوان آزاد به صورت معادله ۶۵-۱ قابل محاسبه است [25]:

$$\Delta \sigma'_{zz} = -\rho_w g (1 - n + n_w) \Delta h \quad ۶۵-۱$$

که  $\Delta \sigma'_{zz}$  تغییر در تنش موثر عمودی (مثبت در صورت افزایش تنش موثر)،  $n$  تخلخل،  $n_w$  درصد رطوبت در ناحیه غیر اشباع و  $\Delta h$  تغییر هد هیدرولیکی می باشد. توجه شود که تغییر در هد در آبخوان آزاد که تغییر در محل سطح آب در آبخوان را نشان می دهد، یک تغییر جرم در آن آبخوان می باشد که نشان دهنده تغییر در تنش کل برای همه آبخوان های محصور زیرین می باشد.

در آبخوان محصور، تغییرات تنش کل در مقابل تغییرات فشار آب منفذی در نتیجه تحکیم یا تراوش از محیط قابل صرف نظر کردن می باشد. لذا تغییر در تنش موثر برای یک تغییر مشخص در هد هیدرولیکی به صورت معادله ۶۶-۱ بیان می شود [25]:

$$\Delta \sigma'_{zz} = -\rho_w g \Delta h \quad ۶۶-۱$$

## ۱-۶ آسیب های ناشی از فرونشست

فرونشست سطح زمین نیروی قابل توجهی است که در بسیاری از نواحی تحمیل می شود و در صورت گسترش به ساختارهای زیربنایی موجود خسارت وارد می کند. این پدیده می تواند آسیب جدی به واحدهای صنعتی و منازل مسکونی وارد کند. شماری از خسارت های ناشی از وقایع فرونشینی در ایران، در نواحی مستعد این پدیده حاصل می شود. این گونه مناطق باید از پتانسیل بروز فرونشست آگاهی داشته باشند و نمایان سازی وضعیت و مقابله با آن به

منظور حفاظت و امنیت صورت گیرد. نشانه اولیه فرونشست زمین به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی همیشه قبل از وقوع ریزش مشاهده نمی‌گردد. به این دلیل شناسایی نواحی که مستعد فرونشست هستند، ضروری به نظر می‌رسد. از مهم ترین آسیب‌های ناشی از فرونشست می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها و تغییر الگوی مسیر جریان: از مهم‌ترین اثرات مخرب فرونشست زمین سیلاب بوجود آمده در منطقه در اثر کاهش ارتفاع و تغییر گرادیان توپوگرافی می‌باشد. از سوی دیگر این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت زمین آبشناختی منطقه از قبیل جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی نتیجه‌های ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد.
- ۲- تخریب سیستم‌های آبیاری، خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و رشد چاه‌ها: کاهش تخلخل خاک‌های حاصلخیز و خسارت به چاه‌ها در منطقه‌های روستایی و شهری از آسیب‌های متداول فرونشست می‌باشد. به طوری که باعث ایجاد پدیده‌ای به نام رشد چاه‌ها می‌شود. در این پدیده لوله چاه از سطح زمین بالا آمده، در حالی که لوله ثابت بوده و این سطح زمین است که پایین رفته است. ماسه دهی چاه‌ها نیز از دیگر اثرات مخرب فرونشست می‌باشد. فرونشست همچنین باعث آسیب‌دیدگی لوله جدار چاه های آب، تحت تاثیر عواملی همچون کشش، کمانش یا برش می‌شود. در پی وقوع چنین مشکلی، چاه‌های بهره برداری علی‌رغم هزینه احداث زیاد و اجرا، بدون استفاده رها می‌شوند، زیرا هزینه ترمیم لوله جدار آسیب دیده از حفر یک چاه جدید بیشتر است [26]. فرونشست خاک پیرامون یک چاه استخراج آب زیرزمینی و پیامدهای وقوع این پدیده در مراحل اولیه شامل کاهش فشار، افت تولید و انحراف از محور قائم لوله های جدار و به تله افتادن تجهیزات درون چاهی می‌باشد، و در مراحل حادثر به علت تغییر شکل زیاد، بریدگی لوله‌های جدار چاه را به دنبال دارد [13]. شکل ۱-۱۳ نمونه‌ای از رشد چاه ایجاد شده در اثر فرونشست زمین را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۳ پدیده رشد چاه در اثر فرونشست زمین.

۳- ترک ها و شکافها<sup>۳۶</sup>ی زمین: شکست ها باعث تخریب و نابودی ساختمان ها، خانه ها و تاسیسات مدفون در زمین می شود. علاوه بر شکستگی ها، درزها و شکاف ها نیز در اثر فرونشست و استخراج بی رویه آب زیرزمینی ایجاد می شوند. شکاف ها به آهستگی و به تدریج گسترش می یابند و خسارت های ناشی از آنها ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب می باشند. مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمانها و شریان های حیاتی به طور ویژه آسیب پذیرتر می باشند. این پدیده می تواند به خیابان ها، پل ها و بزرگراه ها آسیب زده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان ها آسیب رسانده و موجب ترک در آنها گردد. در این حالت سازه هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب پذیرترند. به عنوان نمونه کج شدن پایه های دکل های خطوط هوایی فشار قوی و در نتیجه قطع برق یکی از آسیب های جدی ناشی از فرونشست می باشد. به طوری که در صورت وقوع فرونشست و ایجاد شکاف، به دلیل آسیب به پی سازه های انتقال، احتمال افتادگی و آسیب به دکل های خطوط هوایی فشار قوی و سایر دکل های متصل به آنها وجود دارد. بیرون زدگی پایه های خطوط انتقال نیرو به تدریج پایداری پست های انتقال نیرو را از بین برده باعث سقوط آنها، قطع برق و آسیب های فراوان به شبکه انتقال نیرو می شود. شکل ۱-۱۴ نمونه ای از دکل فشار قوی قرار گرفته در نزدیکی شکاف ایجاد شده در دشت ورامین را نشان می دهد.



شکل ۱-۱۴ نزدیکی خطوط انتقال برق به شکاف های ایجاد شده در اثر فرونشست

۴- پیشروی امواج در مناطق پست ساحلی

۵- کاهش برگشت ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیر زمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها: این پدیده باعث کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی نیز می‌شود. به این پدیده اصطلاحاً مرگ آبخوان گفته می‌شود که پدیده جبران ناپذیری است.

## ۱-۷ نتیجه گیری

فرونشست زمین یک نشست تدریجی یا فرونشستن ناگهانی سطح زمین در مقیاس بزرگ به علت حرکت مواد دورن زمین است. این پدیده غالباً بر اثر سه روند متمایز و وابسته به آب اتفاق می‌افتد: فشردن (تراکم و تحکیم) لایه‌های رس و سیلت آبخوان، زهکشی و اکسیداسیون خاک های نباتی و از هم پاشیدگی و فروپاشی صخره های در معرض خطر ریزش.

فرونشست سطح زمین بر اثر استخراج بیش از اندازه زیاد آب های زیرزمینی از سالهای پیش به عنوان خطری جدی برای مناطق مختلفی از جهان شناخته شده است. این پدیده می تواند اثرات مخربی داشته باشد، از جمله تغییرات در الگوهای جریان زیرزمینی و جریان سطحی آب، کاهش ظرفیت ذخیره و محدودیت پمپاژ در مناطق مستعد فرونشست، وقوع سیلاب محلی، تخریب دیواره چاه ها و تغییرات در شیب کانالها، آسیب به سازه های انتقال نیرو و یا برش خوردن سازه ها است.

ایران به دلیل ادامه دار بودن خشکسالی، دخالت انسان در طبیعت و برداشت های بی‌رویه آب زیرزمینی از پدیده فرونشست در امان نمانده است. در بین عوامل موثر در ایجاد فرونشست، به نظر می رسد که برداشت بیش از حد مجاز از منابع آب زیرزمینی، ضخامت لایه رسوبی و ویژگی های مهندسی رسوبات، عوامل اصلی ایجاد فرونشست در بیشتر دشت های ایران هستند. بنابراین شناسائی و ارائه راهکارهایی جهت پیش بینی رفتار نشست و جلوگیری از افزایش نشست ها و کنترل آنها امری ضروری می باشد. مدیریت درست منابع آب و کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نقش کلیدی در جلوگیری از رخداد این پدیده دارد.

بخش دوم: روش های پیش بینی فرونشست در اثر برداشت آب زیرزمینی

## ۸-۱ مقدمه

با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی، شناخت این منابع از دیرباز مورد توجه پژوهشگران و محققان بوده است. برای شناخت این منابع باید وسیله و ابزار لازم تهیه گردد. هر اندازه این وسیله پیشرفته تر و منطبق تر بر شرایط حقیقی و واقعی باشد، تحلیل و در نتیجه، شناخت ما از مسائل آب زیرزمینی واقع بینانه تر و صحیح تر خواهد بود. به این وسیله و ابزار، مدل می گویند. هر قدر مدل مربوطه، پارامترها و خواص محیطی بیشتری را وارد مسئله نماید، تحلیلی که مدل ارائه می دهد، واقعی تر خواهد بود. به کمک مدل و با استفاده از داده های حفاری چاه های اکتشافی و نتایج ژئوفیزیکی، مدل مفهومی تهیه و در مدل ریاضی به کار می رود [27].

معادلات جریان آب زیرزمینی به صورت معادلات دیفرانسیل هستند که جز برای شرایط خیلی ساده از نظر شکل هندسی آبخوان، مشخصات هیدرودینامیکی، شرایط مرزی و شرایط اولیه، حل آنها به روش تحلیلی ممکن نیست. متأسفانه جریان آب زیرزمینی در اکثر آبخوان ها پیچیده بوده و نمی توان معادلاتی را که سیستم را تشریح می نمایند، به روش ریاضی حل نمود. در چند سال اخیر، تکنیک های مختلف به کار گرفته شده تا بتوان جواب تقریبی برای این معادلات به دست آورد. یکی از راه های بررسی وضع آبخوان زیرزمینی، مطالعه توسط مدل می باشد [10].

مدل آب زیرزمینی در واقع شکل ساده شده ای از یک سیستم واقعی آب زیرزمینی است که به طور تقریبی همبستگی بین عمل و عکس العمل هیدرودینامیکی را در یک سیستم ارائه می دهد [10]. مدل های آب زیرزمینی را می توان برای سه هدف کلی مورد استفاده قرار داد:

- پیش گویی و پیش بینی تغییرات طبیعی و یا مصنوعی مورد انتظار در سیستم آبخوان مورد مطالعه
- توصیف سیستم به منظور تجزیه و تحلیل مفروضات گوناگون درباره ی ماهیت و پویایی آن، مدل ها به درک بهتر سیستم و طراحی تحقیقات آتی کمک می کنند.
- ایجاد سیستم فرضی که برای مطالعه اصول جریان آب زیرزمینی مرتبط با مسائل گوناگون عام و یا خاص مورد استفاده قرار می گیرد [10].

در این بخش به معرفی روش های پیش بینی فرونشست شامل روش های تحلیلی، عددی، یادگیری ماشین، محاسبه آسیب پذیری آبخوان و ... پرداخته شده است.

## ۹-۱ انواع مدل های آب زیرزمینی

مدل آب زیرزمینی در واقع، شکل ساده شده ای از یک سیستم واقعی آب زیرزمینی است که به طور تقریبی همبستگی بین عمل و عکس العمل هیدرودینامیکی را در یک سیستم ارائه می دهد. مدل های آب زیرزمینی را می توان برای سه هدف کلی مورد استفاده قرار داد:

- برای پیش بینی و پیش گویی تغییرات طبیعی یا مصنوعی مورد انتظار در سیستم آبخوان مورد مطالعه.
- برای توصیف سیستم، به منظور تجزیه و تحلیل مفروضات گوناگون درباره ماهیت و پویایی آن، مدل ها به درک بهتر سیستم و طراحی تحقیقاتی آتی کمک می کنند.
- برای ایجاد یک سیستم فرضی که برای مطالعه اصول جریان آب زیرزمینی مرتبط با مسائل گوناگون عام یا خاص، مورد استفاده قرار می گیرد.

مدل های آب زیرزمینی بر اساس اصول متفاوتی تقسیم بندی شده اند، ولی به طور کلی دو گروه اصلی مدل های فیزیکی و ریاضی را می توان نام برد [28].

### ۱-۹-۱ مدل های فیزیکی<sup>۳۷</sup>

در مدل های فیزیکی، ساختن و تغییر دادن برخی از خواص هندسی و هیدروژئولوژیک یک آبخوان چند لایه که در معرض تنش هایی نظیر بارندگی، جریان آب های سطحی و فرونشست از لایه های عمیق زیرین قرار دارد، دشوار بوده و در نتیجه کاربرد مدل های فیزیکی واقعی به کاربردهای آموزشی و آزمایشی محدود می باشد. یک سیستم آب زیرزمینی را می توان با استفاده از قیاس نمودن بین جریان آب زیرزمینی و برخی فرآیندهای فیزیکی مشابه نظیر عبور جریان های الکتریکی از هادی ها شبیه سازی کرد. این گونه مدل ها را آنالوگ می نامند و پیش از توسعه ای مدل های رایانه ای عددی به طور گسترده ای در کارهای عملی هیدروژئولوژیک، مورد استفاده بوده اند [28].

### ۱-۹-۲ مدل های ریاضی<sup>۳۸</sup>

مدل های ریاضی از اواخر سال ۱۸۰۰ میلادی به کار گرفته شدند. در این مدل ها توصیف جریان آب زیرزمینی با استفاده از معادلات ریاضی صورت می گیرد. مدل ریاضی در واقع، شکل ریاضی معادله بیلان را در یک نقطه حل می کند. بسته به نوع معادلات، مدل های فوق را می توان به سه دسته تجربی، احتمالی و معین تقسیم بندی کرد. مدل های تجربی حاصل از داده های تجربی هستند که نوعی معادله ریاضی بر آنها برازش داده می شود. قانون دارسی<sup>۳۹</sup> مثال خوبی در این مورد است [28].

مدل های احتمالاتی بر اساس قوانین احتمالاتی و آماری<sup>۴۰</sup> می باشند. این مدل ها می توانند دارای شکل ها و پیچیدگی های گوناگون باشند که از توزیع احتمالاتی ساده یک خاصیت هیدرولوژیک مورد نظر، شروع و به مدل های پیچیده آماری وابسته به زمان ختم می شوند. عوامل عمده ای که استفاده گسترده از مدل های احتمالاتی را با محدودیت روبرو می سازند عبارتند از [10]:

<sup>37</sup> Physical Models

<sup>38</sup> Mathematical Models

<sup>39</sup> Darcy law

<sup>40</sup> Statistics

- نیاز به مجموعه بزرگی از داده ها دارند.
- از این مدل ها نمی توان برای پاسخگویی (پیش بینی) تعداد زیادی از متداول ترین سوالات ناشی از کارهای عملی هیدرولوژیک، نظیر اثرات پمپاژ در آینده استفاده کرد.

شرط اول برای ساخت یک مدل ریاضی ساده، ساده سازی فرضیات است، چراکه شرایط جهت شبیه سازی بسیار پیچیده است. برای واقعی تر ساختن مدل ریاضی، معمولا روش های عددی به کار گرفته می شوند. این کار بویژه با گسترش روز افزون کامپیوترهای دیجیتال باعث گردیده تا مدل عددی از جمله بهترین مدل ها برای شبیه سازی محسوب گردد [29].

هدف از مدل ریاضی یک سفره آب زیرزمینی، شبیه سازی شرایط طبیعی سفره با استفاده از مجموعه ای از روابط ریاضی است. در صورتی که بتوان شبیه سازی یک آبخوان را انجام و آن را با شرایط طبیعی تطبیق داد، به سهولت می توان با ایجاد تغییر در محل، مقدار و زمان برداشت، به بررسی اثرات برداشت بر روی سفره پرداخت. تنظیم و تطبیق مدل، این امکان را می دهد که با استفاده از کلیه داده ها و اطلاعات پایه ای که در مطالعات هواشناسی، زمین شناسی، ژئوفیزیکی و آب های زیرزمینی به دست آمده اند، یک مجموعه همخوان و مرتبط از مشخصات سیستم را طوری تعیین کرد که با قوانین حاکم بر جریان و اندازه گیری های انجام گرفته در صحرا، تطابق لازم را داشته باشد [15]. در مدل های معین فرض بر این است که واکنش های آینده سیستم آبخوان مورد مطالعه، با قوانین فیزیکی حاکم بر جریان آب های زیرزمینی تعیین می شوند (مانند توصیف جریان به طرف چاه در آبخوان تحت فشار). مدل های معین بر اساس معادله ریاضی آنها به دو گروه تحلیلی و عددی تقسیم بندی می شوند.

#### ۱-۹-۲-۱ مدل های تحلیلی ۴۱

مدل های تحلیلی، یکی از انواع مدل های ریاضی هستند که حل دقیقی از معادله ساده شده جریان پیچیده و سه بعدی آب های زیرزمینی ارائه می نمایند. به عبارت دیگر حل معادله که برای توصیف تغییرات در یک سیستم استفاده می شود، به صورت یک تابع تحلیلی ریاضی بیان می شود. مدل های تحلیلی، هر بار یک معادله جریان آب زیرزمینی را حل می کنند که نتیجه آن می تواند در یک نقطه یا مجموعه ای از نقاط به کار گرفته شود. مدل های تحلیلی زیادی برای پیش بینی فرونشست در اثر برداشت آب زیرزمینی ارائه شده است.

حل های تحلیلی اولیه عموماً از یک سری فرضیات محدود کننده استفاده کرده اند، به همین دلیل نمی توان از آن در شرایط صحرائی که تغییرات وسیعی وجود دارد یا سیستم مورد نظر ناهمگن است و شامل چندین مرز و تعداد زیادی چاه باشد استفاده نمود [29]. به عنوان مثال فرض تقارن شعاعی با کرنش قائم، تقارن شعاعی با صفر بودن تغییرات تنش کل عمودی یا فرض یکنواخت بودن توزیع فشار در آبخوان از ساده سازی های در نظر گرفته شده برای رسیدن به فرم بسته معادله بوده است. فرضیات در نظر گرفته شده برای رژیم تنش شامل در نظر گرفتن کرنش قائم و

صفر بودن تغییرات تنش کل عمودی، باعث تخمین بالاتری از فرونشست و فرض یکنواخت بودن فشار نیز منجر به تخمین پایین تری از فرونشست می شود [30].

از این نوع مدل عمدتاً در سه مورد استفاده می شود [15]:

- ارزیابی های اولیه از محدوده مطالعاتی که به دقت زیادی نیاز ندارند.
- طراحی جمع آوری داده پیش از شروع فعالیت های صحرایی
- بررسی مستقل نتایج شبیه سازی عددی

در ادامه به عنوان نمونه، دو مدل تحلیلی ارائه شده توسط Geertsma (1973) و Jayeoba et al. (2019) معرفی خواهند شد.

الف- مدل تحلیلی ارائه شده توسط Geertsma (1973) برای محاسبه فرونشست

در مدل تحلیلی انجام شده توسط Geertsma (1973)، فرضیات توزیع تنش سه بعدی، وجود کرنش قائم و افقی و عدم صفر بودن تنش کل عمودی در نظر گرفته شد. در مدل Geertsma یک معادله فرم بسته<sup>۴۲</sup> برای محاسبه فرونشست سطح زمین در مرکز آبخوان محصور استوانه ای بالای چاه برداشت با در نظر گرفتن تنش، کرنش و جابجایی و فرض تغییرات فشار یکنواخت ارائه شد. فرض یکنواخت بودن فشار در منطقه، باعث تخمین پایین تری از فرونشست می شود. این بدین دلیل است که افت فشار همه منطقه یکنواخت نیست، افت فشار در چاه برداشت بسیار بیشتر از نقاط دورتر از چاه در آبخوان می باشد [31].

توزیع فشار در آبخوان محصور توسط رابطه ۲-۱ محاسبه می شود [32, 33, 34]:

$$P(r, t) = \begin{cases} P_i - \frac{Q\mu}{4\pi kH} E_1\left(\frac{S\mu r^2}{4kt}\right), & 0 < t < t_c \\ P_i - \frac{Q\mu}{4\pi kH} \left[ \ln\left(\frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{r^2}{R^2} - \frac{3}{2} + \frac{4kt}{S\mu R^2} \right] F(R-r), & t > t_c \end{cases} \quad ۱-۲$$

که  $t$  زمان،  $P_i$  فشار اولیه یکنواخت آبخوان قبل از برداشت سیال از چاه،  $Q$  نرخ برداشت ثابت سیال،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیک سیال،  $k$  نفوذپذیری آبخوان،  $H$  ضخامت آبخوان،  $r$  فاصله شعاعی از چاه برداشت،  $S$  ضریب ذخیره ویژه آبخوان،  $R$  شعاع گسترده آبخوان،  $F(x)$  تابع یک هویساید،  $E_1(x) = -E_i(-x)$  و  $E_i(x)$  تابع انتگرال نمایی و  $t_c$  زمان مشخصه می باشد. زمان مشخصه، زمانی است که فشار برابر  $P_i$  در  $r=R$  باشد و برای  $t > t_c$  به صورت معادله ۲-۲ قابل محاسبه است:



$$t_c = \frac{S\mu R^2}{8k} \quad ۲-۲$$

$$S = \frac{\phi}{K_f} + \frac{(1-\alpha)(\alpha-\phi)}{K} + \alpha^2 C_m \quad ۳-۲$$

که  $\phi$  تخلخل،  $K_f$  مدول بالک سیال،  $\alpha$  ضریب Biot،  $K$  مدول بالک سنگ و  $C_m$  تراکم پذیری عمودی که به صورت معادله ۴-۲ قابل تعریف است [35]:

$$C_m = \frac{1}{3K} + \left( \frac{1+v}{1-v} \right) \quad ۴-۲$$

$v$  نسبت پواسون می باشد. کاهش سطح پیزومتریک در آبخوان برابر است با:

$$s = \frac{P_i - P}{\rho g} \quad ۵-۲$$

برای محاسبه فرونشست سطح زمین به علت تغییرات فشار یکنواخت، مصالح آبخوان همگن، همسان، نفوذپذیر و نیمه نفوذپذیر، همچنین خصوصیات الاستیک مصالح همانند خصوصیات مصالح آبخوان محصور فرض می شود. اگر توزیع فشار در آبخوان یکنواخت باشد معادله ۲-۱ به صورت معادله ۲-۶ کاهش پیدا می کند:

$$P = P_i - \frac{Qt}{\pi HSR^2}, \quad 0 \leq r \leq R \quad ۶-۲$$

و فرونشست در بالای چاه برداشت توسط رابطه ۲-۷ بدست می آید:

$$w = 2C_m H \alpha (P_i - P) (1-v) \left( 1 - \frac{D}{\sqrt{D^2 + R^2}} \right) \quad ۷-۲$$

که  $D$  عمق مرکز آبخوان از سطح زمین می باشد. با جایگذاری معادله ۲-۶ در ۲-۷ می توان نوشت:

$$w = \frac{2C_m \alpha (1-v) Q t}{\pi S R^2} \left( 1 - \frac{D}{\sqrt{D^2 + R^2}} \right) \quad ۸-۲$$

Geertsma (1973) همچنین حل های تحلیلی برای جابجایی در جهات شعاعی و عمودی  $u_r(r, z)$  و  $u_z(r, z)$ ، تنش های کلی جهات شعاعی، زاویه ای و عمودی  $\sigma_r(r, z)$ ،  $\sigma_\theta(r, z)$  و  $\sigma_z(r, z)$  و تنش  $\tau_{rz}(r, z)$  نیز ارائه کرد [31]. محاسبه این جواب های تحلیلی به مراتب نسبت به معادله ۲-۸ مشکل تر است زیرا شامل تخمین عددی از چندین انتگرال می باشد. تمام جواب های تحلیلی ذکر شده با  $(P_i - P)$  وابستگی خطی دارند.

ب- مدل تحلیلی ارائه شده توسط Jayeoba et al. (2019) برای محاسبه فرونشست

در ادامه توسعه مدل Geertsma et al. (2019), Jayeoba et al. معادله فرم بسته برای فرونشست سطح زمین در اثر نرخ ثابت برداشت سیال از آبخوان استوانه‌ای با نفوذپذیری محدود ارائه داد [30]. آنها برای اعمال توزیع فشار غیریکنواخت، از نرخ برداشت ثابت سیال از آبخوان با استفاده از بر هم نهی استفاده کرده‌اند. لذا می‌توان برای اعمال فشار غیر یکنواخت، فشار را گسسته‌سازی و از اصل بر هم نهی استفاده کرد. بدین منظور  $r \in [0, R]$  را به  $N$  بازه - لزومی به مساوی بودن بازه‌ها نیست - گسسته می‌کنیم.  $r_k; k = 1, 2, 3, \dots, N$  نقطه قرار گرفته در  $k$  امین بازه می‌باشد. لذا می‌توان نوشت:

$$w \approx \sum_{k=2}^N \tilde{w}(r_{k-\frac{1}{2}})(P_{k-1} - P_k) \quad 9-2$$

$$u_j(r, z) \approx \sum_{k=2}^N \tilde{u}_j(r, z, r_{k-\frac{1}{2}})(P_{k-1} - P_k) \quad 10-2$$

$$\sigma_j(r, z) \approx \sum_{k=2}^N \tilde{\sigma}_j(r, z, r_{k-\frac{1}{2}})(P_{k-1} - P_k) \quad 11-2$$

$$\tau_{rz}(r, z) \approx \sum_{k=2}^N \tilde{\tau}_{rz}(r, z, r_{k-\frac{1}{2}})(P_{k-1} - P_k) \quad 12-2$$

$$r_{k-\frac{1}{2}} = \frac{r_k + r_{k-1}}{2} \quad 13-2$$

با توجه به معادله ۱-۲، بسط  $E_1(x)$  به صورت رابطه ۱۴-۲ تعریف می‌شود [36]:

$$E_1\left(\frac{S\mu r^2}{4kt}\right) = -\gamma - \ln\left(\frac{S\mu r^2}{4kt}\right) + O\left(\frac{S\mu r^2}{4kt}\right) \quad 14-2$$

که  $\gamma = 0.5772$  می‌باشد. با جایگزین کردن معادله ۱۴-۲ در ۱-۲ می‌توان نوشت [36]:

$$P(r, t) = \begin{cases} P_i - \frac{Q\mu}{4\pi kH} \ln\left(\frac{r_e^2}{r^2}\right) F(r_e - r) + O\left(\frac{S\mu r^2}{4kt}\right), & 0 < t < t_c \\ P_i - \frac{Q\mu}{4\pi kH} \left[ \ln\left(\frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{r^2}{R^2} - \frac{3}{2} + \frac{4kt}{S\mu R^2} \right] F(R - r), & t > t_c \end{cases} \quad 15-2$$

که  $r_e$  شعاع تاثیر چاه برداشت می‌باشد:

$$r_e = \sqrt{\frac{4kte^{-\gamma}}{S\mu}} \quad 16-2$$

با در نظر گرفتن معادلات ۱۵-۲ و ۷-۲، حل دقیق برای  $w$  به صورت معادله ۱۷-۲ قابل تعریف است:

$$w = \int_0^R \tilde{w}(r) \frac{dP}{dr} dr \quad ۱۷-۲$$

با مشتق گرفتن از معادله ۱۵-۲ نسبت به  $r$  می توان نوشت:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{Q\mu}{2\pi kH} \begin{cases} \frac{1}{r} F(r_e - r) + O\left(\frac{S\mu r}{4kt}\right), & 0 < t < t_c \\ \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{R^2}\right) F(R - r) + \left(\frac{2kt}{S\mu R^2} - \frac{1}{4}\right) \delta(R - r), & t > t_c \end{cases} \quad ۱۸-۲$$

که  $\delta(x)$  تابع دلتای دیراک<sup>۴۳</sup> می باشد. با جایگذاری معادله مشتق فشار در معادله ۱۷-۲ می توان نوشت:

$$w_D = \begin{cases} 4 \ln \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\epsilon e^{-\gamma} t_D}{2}} \right) \right] & 0 < t_D < 1 \\ \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon}} \right) (t_{0D} + t_D), & t_D > 1 \end{cases} \quad ۱۹-۲$$

$$t_{0D} = \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon}} \right)^{-1} \left[ 4 \ln \left( \frac{1 + \sqrt{1 + \epsilon}}{2} \right) + \frac{4 + 5\epsilon}{\epsilon \sqrt{1 + \epsilon}} - \frac{4}{\epsilon} - 3 \right] \quad ۲۰-۲$$

$$w_D = \frac{4\pi k w}{Q\mu C_m \alpha (1 - v)} \quad ۲۱-۲$$

$$t_D = \frac{8kt}{S\mu R^2}, \quad \epsilon = \frac{R^2}{D^2} \quad ۲۲-۲$$

$w_D$  مقادیر فرونشست را درست بالای چاه برداشت محاسبه می کند.

#### ۱-۹-۲-۲ مدل عددی<sup>۴۴</sup>

یکی دیگر از انواع مدل های ریاضی که برای حل معادلات پیچیده جریان آب زیرزمینی از تقریب استفاده می کند و می تواند یک بعدی یا چند بعدی باشد، مدل عددی است. در این نوع مدل، محدوده مورد مطالعه به شبکه هایی از المان ها تبدیل می شود و هم چنین به گام های زمانی تفکیک می گردد و یک معادله پایه جریان برای نقاط واقع در هر سلول حل می شود. غالباً این نقاط را می توان در مرکز هر سلول یا محل های تقاطع سلول های مجاور و یا هر محل

<sup>43</sup> Dirac delta function

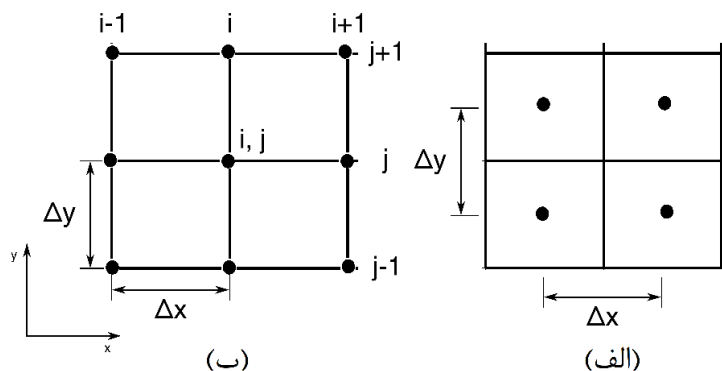
<sup>44</sup> Numerical Models

دیگری قرار داد. معادله دیفرانسیل پایه جریان آب زیرزمینی توسط یک معادله جبری جایگزین می‌شود. این سیستم معادلات جبری به صورت عددی از طریق فرآیند تکرار حل می‌گردند. این کار به ویژه با گسترش روزافزون کامپیوترهای دیجیتال، باعث گردیده تا مدل عددی از جمله بهترین مدل‌ها برای شبیه سازی محسوب گردد.

هرچه گام‌های زمانی و اندازه المان‌ها کوچکتر در نظر گرفته شود دقت مدل افزایش می‌یابد اما حدی برای آن وجود دارد. همچنین مدل عددی حساسیت خیلی زیادی به دقت داده‌های ورودی دارد. در این نوع مدل بر خلاف مدل تحلیلی می‌توان شبکه بسیار پیچیده و چند لایه از سفره آب زیرزمینی ارائه و به بررسی جریان آب زیرزمینی پرداخت [34]. امروزه کارآمدترین روش‌های عددی به کار رفته در حل معادلات جریان آب زیرزمینی، دو روش تفاضل محدود<sup>۴۵</sup> و اجزای محدود<sup>۴۶</sup> است.

## ۱۰-۱ روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یک روش عددی نسبتاً ساده و بسیار پر کاربرد در مدلسازی است. یکی از برنامه‌هایی که از روش تفاضل محدود استفاده کرده است، برنامه MODFLOW می‌باشد [37]. در روش تفاضل محدود، تنها از شبکه‌هایی که به روش‌های مرکز شبکه<sup>۴۷</sup> و مرکز بلوک<sup>۴۸</sup> شهرت دارند، استفاده می‌شود. در روش مرکز شبکه، گره‌ها در رئوس سلول‌ها قرار می‌گیرند، درحالی که در روش مرکز بلوک، گره‌ها در مرکز هر سلول قرار می‌گیرند. شکل ۱-۱۵ انواع شبکه بندی در روش تفاضل محدود را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۵ شبکه بندی‌های (الف) مرکز بلوکی و (ب) مرکز شبکه ای روش تفاضل محدود.

در روش تفاضل محدود به جای به کار بردن راه حل‌های تحلیلی برای معادلات عمومی جریان از یک سری معادلات جبری که بر مبنای قانون دارسی و بقای جرم نهاده شده است، استفاده می‌گردد. این معادلات جبری با هدهای نامعلوم و گره‌هایی که به صورت عمود برهم در شبکه‌ها قرار گرفته‌اند، حل می‌شوند [14]. این روش بر مبنای تئوری و بسط

<sup>45</sup> Finite Difference Method (FDM)

<sup>46</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>47</sup> Mesh-Centered

<sup>48</sup> Block-Centered

تیلور بنا نهاده شده است [15]. امکان ساخت مدل کامپیوتری با این روش و کاربرد نسبتاً ساده و همچنین دقت قابل قبول نتایج حاصله، سبب شده که از این روش به طور وسیعی در حل معادلات دیفرانسیل جزئی آبهای زیرزمینی استفاده گردد. این روش در حقیقت اولین روشی بود که برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی به کار رفت. هر چند ایده های اصلی و پایه ای توسط ریاضیدان های قرن ۱۸، همچون لاگرانژ ارائه و اثبات و به کار گرفته شده اند، استفاده از روش تفاضل محدود در حل مسائل مهندسی مرهون موفقیت دانشمندان قرن بیستم است [38].

## ۱-۱-۱ گام های مورد نیاز برای طراحی مدل عددی با استفاده از روش تفاضل محدود

برای طراحی مدل عددی با استفاده از روش تفاضل محدود و آغاز به کار، مراحل زیر باید انجام شود:

- انتخاب برنامه کامپیوتری
- طراحی مدل
- مدلسازی فرونشست
- آنالیز حساسیت
- واسنجی<sup>۴۹</sup> مدل
- صحت سنجی<sup>۵۰</sup> مدل

روند نمای<sup>۵۱</sup> مدلسازی در شکل ۱-۱۶ خلاصه شده است. در ادامه هر مورد به تفصیل شرح داده خواهد شد.

## ۱-۱-۱-۱ انتخاب برنامه کامپیوتری

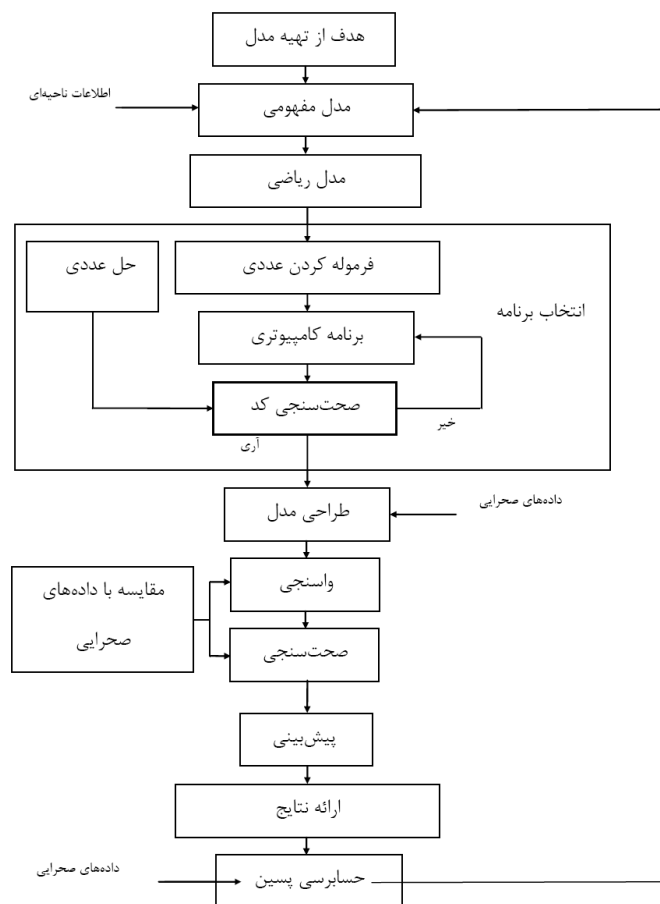
در میان کد های مختلف مدل سازی، مدلی که بیشترین کاربرد را در زمینه کمیت آب های زیرزمینی در کشورهای مختلف اعم از مراکز اجرایی، تحقیقاتی، دانشگاهی و مهندسی مشاور داشته است، کد MODFLOW می باشد. این برنامه در سالهای اولیه دهه ۱۹۸۰ میلادی به زبان FORTRAN نوشته شد و در محیط های Windows، DOS و Unix قابل استفاده است. برنامه MODFLOW که نتیجه سالها تحقیقات در سازمان تحقیقات زمین شناسی آمریکا<sup>۵۲</sup> می باشد، با توجه به قابلیت بالا و داشتن زیر برنامه های مختلف که در برگیرنده پارامترهای گوناگون تشکیل دهنده سیستم آب های زیرزمینی هستند، تقریباً مدل کاملی از نظر مدلسازی عددی یک سیستم در محیط اشباع و تشکیلات آبرفتی می باشد [15]. نرم افزار PMWIN، نرم افزار پیشرفته شبیه سازی جریان و حرکت مواد در محیط های متخلخل است که به صورت سه بعدی و با استفاده از روش تفاضل محدود، فرآیند مدلسازی را انجام می دهد.

<sup>49</sup> Calibration

<sup>50</sup> Validation

<sup>51</sup> Flow Chart

<sup>52</sup> USGS (United State Geological Survey)



شکل ۱-۱۶ مراحل مدلسازی فرونشست با استفاده از روش تفاضل محدود [39].

این نرم افزار توسط Chiang & Kinzelbach برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ منتشر شد و دارای چندین برنامه کاربردی است که مهمترین آن MODFLOW می باشد. سایر برنامه‌های آن عبارتند از:

PMPATH: برای ردیابی ذرات و ترسیم مسیر انتقال جریان به کار می‌رود.

MT3D: این مدل، جریان و آلودگی را به صورت دوبعدی و سه بعدی و به روش تفاضل محدود مدلسازی می‌کند و کاربرد وسیعی در حل مسائل آلودگی سفره در اکثر کشورهای دنیا بخصوص در سال‌های اخیر داشته و در دسترس عموم قرار دارد. لازم به ذکر است که این مدل توسط مهندسين مشاور پاپادوبولوس و شرکا<sup>۵۳</sup> در آمریکا طی سالهای ۱۹۹۸-۱۹۹۹ تهیه شده است [40].

UCODE و PEST: برای تخمین خودکار پارامترهای مجهول و جهت واسنجی خودکار به وسیله مدلسازی معکوس<sup>۵۴</sup> به کار می رود. PEST محاسبه آماری داده های مربوط به مقادیر پارامترهای بهینه شده را با سطح اطمینان ۹۵٪ همراه با کواریانس پارامترها و ماتریس ضریب همبستگی انجام داده و نمایش می دهد.

نسخه ۷ PMWIN PRO در سال ۱۹۹۸ منتشر شده است و به وسیله این نسخه، مدل هایی تا ۸۰ لایه آبدار با ۱۰۰۰ دوره زمانی می توان ساخت. هرلایه نیز می تواند متشکل از ۲۵۰۰۰۰ المان باشد [37].

مدل GMS نیز که خود از تلفیق چندین مدل، از جمله مدل های MODFLOW، MT3D و ... تشکیل شده است، جامع ترین مدل آب زیرزمینی است و روز به روز کاربرد آن در اکثر کشورهای دنیا بیشتر می شود. از ویژگی های مهم این نرم افزار، اشتراک داده ها با نرم افزار پرکاربرد GIS می باشد [41].

## ۲-۱۱-۱ طراحی مدل

### ۱-۱۱-۲-۱ مدل مفهومی

درک و بیان سیستم آب زیرزمینی در جهان واقعی، اولین گام فرآیند تحلیل و طراحی سیستم اطلاعاتی محسوب می شود. هدف از تهیه مدل مفهومی، ساده کردن وضعیت پیچیده حاکم بر طبیعت می باشد. مدل مفهومی یک آبخوان، شامل چهارچوب فیزیکی و هیدروژئولوژیک آن است. در چهارچوب فیزیکی ابتدا محدوده مرزی آبخوان مورد مطالعه و سپس توپوگرافی سطوح بالا و پایین لایه ها مشخص می گردند. در چهارچوب هیدروژئولوژیک، نوع رسوبات تشکیل دهنده آبخوان و عوامل بیلان از قبیل دریاچه ها، رودخانه ها، زهکش ها، چاه ها، مناطق تخلیه و تغذیه و مرزهای ورودی و خروجی به طور شماییک مشخص می شوند.

یکی از مهمترین مراحل مدلسازی، تهیه مدل مفهومی مناسب با طبیعت سفره آبدار می باشد و تهیه آن بستگی به اهداف مدلسازی، منابع موجود و آمار و اطلاعات میدانی دارد. فرضیاتی که در تهیه مدل مفهومی در نظر گرفته می شود شامل موارد زیر است:

- شکل هندسی مرزها
- نوع تشکیلات زمین شناسی آبخوان اعم از همگن و ناهمگن
- نگرش به جریان حاکم بر سفره (چند بعدی بودن جریان)
- بررسی تغییرات سطح آب و مساحتی که هرگونه برداشت از آن صورت می گیرد.
- تغذیه و تخلیه داخل سفره ها و مرزها به شکل نقطه ای مثل چاه و به شکل توزیعی مثل آبیاری، بارندگی و زهکشی.

## ۲-۲-۱۱-۱ شبکه بندی آبخوان

برای ساخت مدل، اولین گام و نقطه شروع در ساخت مدل کامپیوتری، شبکه بندی آبخوان مورد مطالعه برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی است. در MODFLOW که مدلی از نوع تفاضل محدود است، شبکه‌های مدل توسط خطوط موازی عمود برهم تشکیل می‌شوند. بلوک‌های تشکیل شده توسط خطوط مذکور، المان نامیده می‌شود. گره‌ها<sup>۵۵</sup> همان نقاطی هستند که در آن محاسبات بار هیدرولیکی صورت می‌گیرد. فرض بر این است که خواص هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی در محدوده یک المان یکسان است، در نتیجه هر المان توسط گره یا گره‌های وابسته به آن مشخص می‌شود. با این کار در واقع یک محیط پیوسته را به یک محیط گسسته (از نظر مکانی) تبدیل می‌نمائیم. هر چقدر ابعاد شبکه کوچکتر و تعداد سلول‌ها بیشتر باشد، دقت محاسبات افزایش می‌یابد [14]. افزایش تعداد المان‌ها بیش از یک حد، علیرغم صرف وقت و هزینه بیشتر، نه تنها موجب افزایش دقت نمی‌شود بلکه ممکن است نتیجه معکوس داشته باشد یا منجر به مشکلات مانند عدم همگرایی و ... شود. ضمن آنکه با افزایش تعداد اجزاء، داده‌های ورودی بیشتری مورد نیاز بوده و حجم عملیات محاسباتی به مراتب بیشتر می‌شود.

به طور خلاصه برای طراحی شبکه که یکی از حساس‌ترین مراحل مدلسازی است، می‌توان نکات زیر را بیان نمود [29]:

۱- حتی الامکان شبکه طوری طراحی شود که تمام منطقه مطالعاتی را در برگیرد.

۲- در مناطقی از داخل محدوده که ارتباط هیدرولیکی با سفره دارند (مثل رودخانه و دریاچه) اجزا کوچکتر انتخاب شوند.

۳- هرچه گرادیان هیدرولیکی بیشتر باشد، بهتر است فواصل کوچکتری انتخاب شوند. هرچه داده‌های بیشتر و با کیفیت تری در دسترس باشند، برای اخذ نتایج بهتر می‌توان ابعاد شبکه و المان‌ها را کوچکتر انتخاب کرد.

## ۲-۲-۱۱-۳ تعیین مرز زیرین آبخوان

موقعیت فضایی مرز زیرین آبخوان توسط ابزارهایی از جمله مشاهده مستقیم پی سنگ در ستون چینه شناسی مربوط به چاه‌ها و گمانه‌ها و همچنین مشاهده غیرمستقیم توسط روش‌های ژئوفیزیک تعیین می‌گردد.

## ۲-۲-۱۱-۴ شرایط مرزی<sup>۵۶</sup>

حل معادلات دیفرانسیل جزئی آب‌های زیرزمینی از طریق عددی مستلزم تعیین شرایط مرزی از نظر هیدرولیکی و استفاده از اطلاعات موجود در این مرزها می‌باشد.

<sup>55</sup> Nodes

<sup>56</sup> Boundary Condition



شرایط مرزی به دو دسته مرزهای فیزیکی<sup>۵۷</sup> (واقعی) و مرزهای هیدرولیکی (مصنوعی)<sup>۵۸</sup> تقسیم می شوند. مرزهای فیزیکی، سیمای مشخص زمین شناسی و هیدرولوژیکی است که به طور دائم بر الگوی جریان آب زیرزمینی موثر می باشند. عموماً مرزهای خارجی مدل به صورت مرزهای فیزیکی واقعی در نظر گرفته می شوند. مرزهای هیدرولیکی از شبکه جریان آب زیرزمینی به دست می آیند، در نتیجه مرزهای مصنوعی هستند که توسط طراح مدل ایجاد می شوند. مرزهای هیدرولیکی می توانند به صورت مرزهای فاقد جریان (خطوط جریان) و یا مرزهایی با بار هیدرولیکی معلوم (خطوط هم پتانسیل) مشخص شوند.

#### ۵-۲-۱۱-۱ گسسته سازی زمانی مدل

هنگام تهیه مدل، پارامترهای زمانی در شرایط غیرماندگار<sup>۵۹</sup> (وابسته به مدل) مشخص می شوند. گام های زمانی، فواصل زمانی محدودی هستند که نتایج حل در انتهای این زمان ها به دست می آیند. معمولاً هر چه طول گام زمانی کوتاه تر انتخاب گردد، دقت محاسبات بیشتر خواهد بود. ولی باید توجه داشت که کوتاه کردن گام های زمانی در صورتی میسر است که اطلاعات مورد نیاز برای هر گام در دسترس باشد.

#### ۶-۲-۱۱-۱ بار هیدرولیکی اولیه

برای اینکه مدل بتواند معادلات دیفرانسیل جزئی مربوط به جریان آب زیرزمینی را حل نماید نیاز به نقطه ای برای شروع محاسبات دارد که این از نظر مکانی توسط هد یا بار هیدرولیکی اولیه تعیین می گردد.

#### ۷-۲-۱۱-۱ ضریب هدایت هیدرولیکی<sup>۶۰</sup>

هدایت هیدرولیکی یکی از پارامترهای مهم و حساس در مدلسازی آب زیرزمینی است که دقت در اندازه گیری آن بسیار مهم است. لذا بهترین کار این است که مقدار حقیقی  $k$  توسط آزمایش های صحرایی به دست آید، ولی غالباً این اطلاعات به صورت دقیق و کامل در دسترس نیست.

#### ۸-۲-۱۱-۱ ضریب آبدهی ویژه

ضریب ذخیره و آبدهی ویژه حجم آبی است که سفره آب می تواند در واحد سطح آبخوان به ازاء تغییر یک واحد فشار در خود جای دهد یا خارج کند. ضریب ذخیره در سفره های محصور تابع قابلیت ارتجاع مواد سازنده سفره و آب است. این ضریب یکی دیگر از پارامترهای مهم در مدلسازی می باشد که مقادیر آن برای انواع خاک ها در

جدول ۱-۳ نشان داده شده است. ضریب آبدهی معمولاً از چاه های پمپاژ محاسبه می شود [14].

جدول ۱-۳ مقادیر معمول ضریب آبدهی ویژه برای خاک های مختلف

<sup>57</sup> Physical Boundaries

<sup>58</sup> Artificial Boundaries

<sup>59</sup> Transient

<sup>60</sup> Hydraulic Conductivity

| نوع خاک     | ضریب آبدهی ویژه |
|-------------|-----------------|
| رس          | ۰ - ۰/۰۵        |
| ماسه رس دار | ۰/۰۳ - ۰/۱۲     |
| سیلت        | ۰/۰۳ - ۰/۱۹     |
| ماسه ریز    | ۰/۱ - ۰/۲۸      |
| ماسه متوسط  | ۰/۱۵ - ۰/۳۲     |
| ماسه درشت   | ۰/۲ - ۰/۳۵      |
| شن ماسه دار | ۰/۲ - ۰/۳۵      |
| شن ریز      | ۰/۲۱ - ۰/۳۵     |
| شن متوسط    | ۰/۱۳ - ۰/۲۶     |
| شن درشت     | ۰/۱۲ - ۰/۲۶     |

### ۳-۱۱-۱ مدل سازی فرونشست

#### ۳-۱۱-۱-۱ پیش بینی فرونشست با استفاده از بسته نرم افزاری IBS<sup>61</sup>

بسته نرم افزاری IBS از زیربرنامه های MODFLOW می باشد. این بسته بر اساس تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی استوار است. این بسته نرم افزاری تراکم را بر اساس تغییرات تنش موثر محاسبه می کند [29]:

$$\Delta b_e = S_{ske} b_0 \Delta h \quad 23-2$$

$$\Delta b_i = S_{ski} b_0 \Delta h \quad 24-2$$

که  $\Delta b_e$  و  $\Delta b_i$  به ترتیب، تراکم های کشسان<sup>۶۲</sup> و مومسان<sup>۶۳</sup> هستند.  $\Delta h$  تغییر بار هیدرولیکی در مرکز لایه،  $b_0$  ضخامت لایه و  $S_{ske}$  و  $S_{ski}$  به ترتیب ذخیره های ویژه کشسان و مومسان هستند. بسته IBS ضرایب ذخیره کشسان و مومسان را ثابت فرض می کند، اما در واقع این ضرایب توابعی از تنش موثر هستند. در رسوبات عمیق، تنش کل مقدار بزرگی است و تغییرات فشار آب حفره ای که در اثر پمپاژ آب زیرزمینی حاصل می گردد، باعث تنها درصد کمی تغییر در تنش موثر می شود. در چنین حالتی مقادیر ضرایب ذخیره کشسان و مومسان، می توانند با خطای کمی ثابت فرض گردند. بدیهی است که بسته ی IBS فقط تراکم ناشی از افزایش تنش موثر در نتیجه تغییرات تراز آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار می دهد و فرونشست زمین در نتیجه عوامل دیگر را لحاظ نمی کند [15].

<sup>61</sup> Interbed Storage

<sup>62</sup> Elastic

<sup>63</sup> Plastic

## ۲-۳-۱۱-۱ پیش بینی فرونشست با استفاده از بسته نرم افزاری SUB<sup>64</sup>

این بسته جهت شبیه سازی تحکیم و فرونشست زمین با استفاده از روش تفاضل محدود می پردازد. این بسته تحکیم های کشسان و مومسان بسترهای خوب دانه بندی شده تراکم پذیر (میان بسترها<sup>۶۵</sup>) را شبیه سازی می کند [42]. اگر تنش در میان بستر کمتر از تنش تحکیمی باشد، نشست الاستیک، در غیر این صورت پلاستیک می باشد. بسته SUB، بسته IBS را به روز رسانی کرده است، به طوری که قادر به مدلسازی تاخیرهای زمانی و شبیه سازی تحکیم و زهکشی وابسته به زمان در میان بسترهایی با ضخامت بیشتر و آبخوان های محصور می باشد. این بسته تنها مولفه عمودی جابجایی را شبیه سازی می کند، در حالی که به صورت تئوری و عملی جابجایی های افقی در سیستم آبخوان در پاسخ به پمپاژ و تنش های تغذیه/ تخلیه فصلی وجود دارد [43]. این جابجایی ها عمدتاً در نزدیکی چاه های پمپاژ و حاشیه های آبخوان آب زیرزمینی وجود دارد. در مقیاس منطقه ای و مدل های تحکیم سیستم آبخوان، جابجایی های محلی افقی در تغییرات کلی ذخیره آب زیرزمینی نقش کمتری دارند، لذا در بسته SUB از آن صرف نظر می شود.

وقتی یک آبخوان همگن تراکم ناپذیر به عنوان منبع آب زیرزمینی در نظر گرفته می شود، بیشتر آب بدست آمده، ابتدا از ذخیره آبخوان، میان بسترهایی با ضخامت بیشتر و واحدهای محصور گرفته می شود. بعد از گذشت مدت زمان، هدهای پایین تر در آبخوان های مجاور، گرادیان هیدرولیکی عمودی بین آبخوان ها و بخش های داخلی میان بسترهای نفوذپذیر با ضخامت کم یا زیاد و واحدهای محصور ایجاد می کنند. آب زیرزمینی از میان بسترها و واحدهای محصور به آبخوان ها جریان می یابد. وقتی مقدار و گستره کاهش هد در آبخوان بزرگ شود، بخش عمده ای از آب تامین شده برای پمپاژ می تواند از آب رها شده از ذخایر در میان بسترها و واحدهای محصور بدست آید [44]. تمام آب بدست آمده از میان بسترها و واحد های محصور به علت تراکم پذیری ساختمان دانه ای<sup>۶۶</sup> می باشد.

به فرآیند کاهش ضخامت یک میان بستر افقی تحکیم گفته می شود. تحکیم منفی نشان دهنده افزایش ضخامت است. تراکم پذیری یک نهشته با ضریب  $\alpha$  نمایش داده می شود:

$$\alpha = - \frac{dV}{V d\sigma'} \quad 25-2$$

که  $dV$  تغییر حجم یک حجم کنترل با حجم اولیه  $V$  و  $d\sigma'$  تغییر در تنش موثر می باشد. با صرف نظر کردن از جابجایی های افقی، تراکم پذیری یک بعدی به صورت معادله ۲-۲۶ قابل تعریف است:

<sup>64</sup> Subsidence

<sup>65</sup> Interbeds

<sup>66</sup> Granular Skeleton

$$\bar{\alpha} = -\frac{\frac{db}{b}}{d\sigma'_{zz}} \quad ۲۶-۲$$

db ضخامت حجم کنترل با ضخامت اولیه b را نشان می دهد. اگر تغییر تنش موثر تنها ناشی از تغییر فشار آب منفذی باشد، می توان نوشت:

$$\rho_w g \bar{\alpha} b = S_{sk} b = S_k = -\frac{db}{dh} \quad ۲۷-۲$$

$$S_{sk} = \begin{cases} S_{ske} & \text{for } \sigma'_{zz} < \sigma'_{zz(max)} \\ S_{skv} & \text{for } \sigma'_{zz} \geq \sigma'_{zz(max)} \end{cases} \quad ۲۸-۲$$

که  $S_{sk}$  ذخیره ویژه،  $S_k$  ضریب ذخیره، dh تغییر هد هیدرولیکی،  $S_{ske}$  ذخیره ویژه الاستیک و  $S_{skv}$  ذخیره ویژه غیرالاستیک را نشان می دهد. برای بسیاری از نهشته های خوب دانه بندی شده،  $S_{skv}$  بزرگتر از  $S_{ske}$  می باشد. برای رسوبات خوب دانه بندی شده تراکم پذیری و نشست نهایی بیشتر از رسوبات دانه درشت می باشد. اگر تنش موثر بیشتر از تنش پیش تحکیمی باشد، نشست غیر الاستیک رخ می دهد که باعث آرایش مجدد فیزیکی دانه های نهشته می شود [45]. تحکیم غیر الاستیک نهشته های درشت دانه در مقایسه با نهشته های خوب دانه بندی شده قابل صرف نظر کردن است.

معادله مورد نیاز برای مدلسازی جریان آب زیرزمینی به صورت رابطه ۲۹-۲ قابل تعریف است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad ۲۹-۲$$

که  $x, y$  و  $z$  مختصات کارتزین،  $K$  هدایت هیدرولیکی در سه جهت  $x, y$  و  $z$ ،  $W$  دبی حجمی در واحد حجم منابع و (یا) تخلیه آب و  $S_s$  ذخیره ویژه آبخوان می باشد. اگر آبخوان شامل رسوبات تراکم پذیر باشد، مولفه سمت راست معادله در  $(1 - \gamma)$  ضرب می شود که  $\gamma$  کسر حجمی میان بسترهای تراکم پذیر سیستم آبخوان می باشد.

به دلیل هدایت هیدرولیکی عمودی کم سیلت و رس های خوب دانه بندی شده ای که در میان بسترها وجود دارند، تعادل هد هیدرولیکی در میان بسترهای یک آبخوان، تغییرات هد در آبخوان های مجاور را به تاخیر می اندازد. اتلاف تاخیر هدهای نامتعادل در میان بسترها را می توان با معادله انتشار یک بعدی توصیف کرد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S'_s}{K'_v} \frac{\partial h}{\partial t} \quad ۳۰-۲$$

که  $z$  مختصات مکانی عمودی،  $S'_s$  ذخیره ویژه و  $K'_v$  هدایت هیدرولیکی interbed میان بسترها می باشد. در مورد مسائل تحکیم و فرونشست، زمان تاخیر ایجاد شده ناشی از بین رفتن آهسته فشار اضافی ماندگار به صورت ثابت زمانی رابطه ۳۱-۲ محاسبه می شود:

$$\tau_0 = \frac{\frac{b_0^2}{2} \cdot S'_s}{K'_v} = \frac{\frac{b_0^2}{2}}{D'} \quad ۳۱-۲$$

که نشان دهنده مدت زمانی است که تقریباً ۹۳ درصد تحکیم نهایی برای کاهش مشخص در هد اتفاق می افتد [46]. چون  $\tau_0$  با  $S'_s$  متناسب است، که برای تغییر شکل های غیر الاستیک بسیار بزرگتر از حالت الاستیک می باشد، تغییر شکل الاستیک میان بسترها اغلب ناگهانی (بلافاصله) در نظر گرفته می شوند. لذا این معادله برای آن دسته از میان بسترهایی به کار می رود که ثابت زمانی شان از گام زمانی بیشتر باشد.

لذا در میان بسترهای بدون تاخیر زمانی فرض می شود که در هر مکان بلافاصله با هد آبخوان های اطراف متعادل می شود. این تئوری است که قبلاً در بسته IBS1 به کار گرفته شد [47]. برای این میان بسترها جریان در واحد حجم،  $\hat{q}$ ، برابر است با:

$$\hat{q} = \gamma S'_{sk} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{with} \quad S'_{sk} = \begin{cases} S'_{ske}; & \text{for } h > h_{min} \\ S'_{skv}; & \text{for } h \leq h_{min} \end{cases} \quad ۳۲-۲$$

که  $h_{min}$  برابر کمترین هد قبلی یا معادل هد پیش تحکیمی می باشد (تنش پیش تحکیمی که به صورت هد پیش تحکیمی بیان شده است). مولفه جریان به سمت راست معادله عمومی جریان آب زیرزمینی وارد می شود. دبی کلی،  $q$  (جریان در واحد سطح)، وارد شده به یا خارج شده از ذخیره الاستیک و (یا) غیر الاستیک در المان  $i$  و گام زمانی  $m$  برابر است با:

$$q_i^m = \frac{S'^m_k}{\Delta t^m} (h^m - H^{m-1}) + \frac{S'_{ke}}{\Delta t^m} (H^{m-1} - h^{m-1}) \quad ۳۳-۲$$

$$S'^m_k = \begin{cases} S'_{ke}, & \text{for } h^m > H^{m-1} \\ S'_{kv}, & \text{for } h^m \leq H^{m-1} \end{cases} \quad ۳۴-۲$$

$h^m$  و  $H^{m-1}$  به ترتیب هد در پایان گام زمانی  $m$  و هد پیش تحکیمی در پایان گام زمانی  $m-1$  می باشد.  $\Delta t^m$  نیز طول  $m$  امین گام زمانی است. تحکیم در المان  $i$  با ضرب  $q_i^m$  در  $\Delta t^m$  بدست می آید.

برای میان بسترهای دارای تاخیر زمانی، باید فرآیند از بین رفتن آهسته هد شبیه سازی شود. به دلیل وابستگی ذخیره ویژه به تاریخچه تنش (معادله ذخیره  $S_{sk}$ )، یک روش عددی برای حل معادله (جریان آب زیرزمینی) در هر گام زمانی باید استفاده شود. در واقعیت هر آبخوان ممکن است شامل تعداد زیادی میان بستر با ضخامت های مختلف باشد، لذا برای کاهش محاسبات، میان بسترهای دارای تاخیر زمانی با هدایت هیدرولیکی عمودی و ذخیره ویژه الاستیک و غیر الاستیک یکسان در یک مدل می توانند در یک گروه میان بسترهای با تاخیر تجمیع شوند. ضخامت معادل این گروه  $b_{equiv}$ ، به صورت معادله ۳۵-۲ محاسبه می شود:

$$b_{equiv} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i^2} \quad ۳۵-۲$$

جهت محاسبه صحیح مقدار تحکیم برای گروه میان بسترها، تحکیم و حجم آب مبادله شده با آبخوان های مجاور در فاکتور رابطه ۳۶-۲ ضرب می شود:

$$n_{equiv} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{b_{equiv}} \quad ۳۶-۲$$

با استفاده از دو معادله بالا، معادله ۲۹-۲ تنها یکبار آن هم برای یک میان بستر معادل با ضخامت  $b_{equiv}$  حل می شود و مقدار بدست آمده برای تحکیم و جریان عبوری از مرزهای میان بستر در فاکتور  $n_{equiv}$  ضرب می شوند. با نمایش میان بسترهای دارای تاخیر چندتایی با یک سیستم معادل، فرض می شود که هد در مرزهای بالا و پایین میان بسترها در همه گام های زمانی برابر هد آبخوان های مجاور است. به دلیل تقارن از دست رفتن هد و تحکیم حول صفحه مرکزی میان بستر ( $z=0$ )، تنها حل مسئله برای نصف آن کافی می باشد. با استفاده از تقریب تفاضل محدود برای حل مسئله ۲۹-۲، سیستم معادلات نهایی به صورت رابطه ۳۷-۲ قابل نمایش است:

$$[A]^m [h]^m = [r]^m \quad ۳۷-۲$$

که  $[A]^m$  ماتریس سه قطری متقارن NN در NN،  $[h]^m$  بردار مقادیر هد هیدرولیکی NN در ۱ و  $[r]^m$  بردار مقادیر معلوم NN در ۱ است. در ماتریس های  $[A]^m$  و  $[r]^m$  مولفه های  $S'_{sk}$  و  $h_j^m$  مجهول هستند لذا معادله بالا با روش تکراری باید حل شود. سیستم معادلات جریان در لایه های مدل و در میان بسترها به طور همزمان حل می شوند. معادلات جریان با استفاده از روش های محاسبه موجود در MODFLOW حل می شوند (مانند SIP<sup>67</sup> یا PCG<sup>68</sup>) و معادلات جریان در میان بسترها با یک روش مستقیم حل می شوند.

#### ۴-۱۱-۱ آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت فرآیندی است که طی آن، فرد مدل کننده تشخیص می دهد که مدل ساخته شده در فرآیند واسنجی (کالیبره)، به کدام پارامتر حساس تر است و در قبال تغییرات اندک آن، تغییرات گسترده و بزرگی دارد و هم چنین کدام پارامتر در مدل وجود دارد که در قبال تغییرات بزرگ آن، مدل حساسیت کمی از خود نشان داده و تغییر خاصی نمی کند. اگر مدل، نسبت به یک پارامتر حساسیت کمی داشته باشد، تغییرات خیلی زیاد و گاهی غیرمجاز آن پارامتر باعث واسنجی نادرست مدل می گردد، در حالی که می توان با تغییرات اندک پارامترهایی که مدل نسبت به آنها حساسیت زیادی دارد، مدل را به درستی واسنجی نمود و به نتایج قابل قبولی دست یافت.

<sup>67</sup> Strongly Implicit Procedure

<sup>68</sup> Preconditioned Conjugate Gradient

## ۵-۱۱-۱ واسنجی مدل

پس از مرحله آنالیز حساسیت و مشخص شدن پارامترهایی که مدل آب زیرزمینی به آن‌ها حساس‌تر است، نوبت به واسنجی مدل می‌رسد. در این مرحله مدل باید قابلیت باز تولید داده‌های مشاهداتی را داشته باشد. فرآیند واسنجی به دو روش دستی و خودکار انجام می‌پذیرد:

### ۱۲-۱ روش دستی (سعی و خطا)

روش سعی و خطا یک روش واسنجی در آب زیرزمینی می‌باشد که در عین حال که قدیمی است، روش بسیار مفیدی برای افراد با تجربه در واسنجی مدل می‌باشد. به این ترتیب که فرد ابتدا مقادیری را به مدل می‌دهد و بعد از اجرای مدل نتایج محاسباتی را با مشاهداتی مقایسه می‌کند و با توجه به تجربه مقادیر را اصلاح کرده و مجدداً به مدل می‌دهد و این عمل را آن قدر تکرار می‌کند تا مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تقریباً یکی شوند. این روش به شدت تحت تاثیر تجربه استفاده کننده از مدل می‌باشد و همیشه انجام این نوع از واسنجی توصیه نمی‌شود.

### ۱۳-۱ روش خودکار<sup>۶۹</sup> (اتوماتیک)

در این روش برای واسنجی مدل، از روش معکوس حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌شود. در حل معکوس، مقادیر سطح آب و بعضی از پارامترها به عنوان مقادیر معلوم و ورودی به مدل داده می‌شوند و ضرایب هیدرودینامیکی سفره یا پارامترهای تغذیه و برداشت و شرایط مرزی و اولیه به عنوان مجهولات و خروجی‌های مدل خوانده می‌شوند. سپس نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از مشاهدات مقایسه می‌شود، تا جایی که کمترین اختلاف را داشته باشند.

واسنجی اتوماتیک دارای مزیت‌های زیر است [41]:

- سرعت عمل بالا و صرف وقت کم
- اجتناب از خطاهای ناشی از کاربر

کد PEST<sup>۷۰</sup> یکی از کدهای بسیار مناسب برای تخمین پارامتر است که توسط دوهرتی، بربر و وایت<sup>۷۱</sup> ۱۹۹۴ برای MODFLOW تهیه شده است [37].

## ۱۴-۱ صحت سنجی مدل

<sup>69</sup> Automatic

<sup>70</sup> Parameter estimation

<sup>71</sup> Doherty, Berber and Whyte

یک مدل، زمانی صحت سنجی شده است که ثابت شود صحت و قابلیت پیش بینی آن در محدوده قابل قبولی از آزمون های مستقل از داده های واسنجی واقع شده است [29]. در واقع صحت سنجی نشان می دهد که آیا ترکیب پارامترها در ساخت مدل به درستی انجام گرفته است یا خیر. اگر مدل بتواند با داده های صحت سنجی، فرآیند شبیه سازی را به درستی انجام دهد، و نمودارهای مربوطه، خطای کمی را نشان دهند، می توان به درستی شبیه سازی پی برد. در غیر این صورت باید از ابتدا شروع به مدلسازی نمود و پارامترهای به کار رفته را از نو مورد واسنجی قرار داد.

## ۱-۱۵ مطالعات انجام شده در زمینه فرونشست توسط روش تفاضل محدود

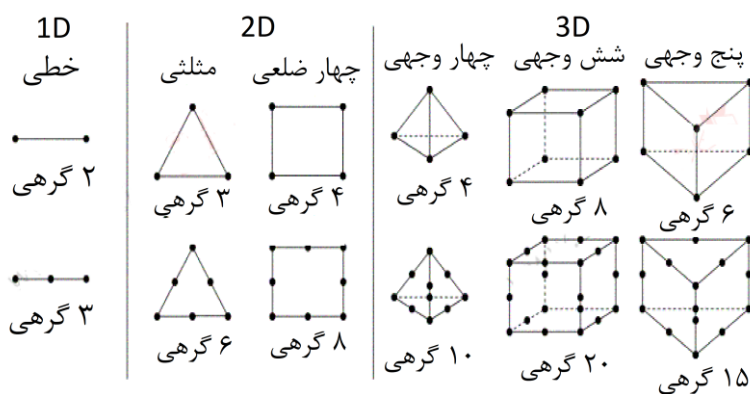
تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه فرونشست با استفاده از روش تفاضل محدود انجام شده است. محمودپور و همکاران در سال ۲۰۱۶ شبیه سازی سطح آب زیرزمینی و فرونشست دشت جنوب غربی تهران ناشی از برداشت آب زیرزمینی را با استفاده از نرم افزار PMWIN انجام داده اند. آنها نتایج بدست آمده را با استفاده از داده های InSAR و هدهای مشاهداتی بهینه و از مدل محاسباتی و کالیبره شده برای ارزیابی نحوه پیشرفت فرونشست زمین و پیش بینی فرونشست استفاده کردند [48]. رزمگیر و همکاران در سال ۱۳۹۰ به مدلسازی فرونشست دشت ورامین تهران با استفاده از نرم افزار PMWIN pro7 بر اساس برنامه MODFLOW (استفاده از روش تفاضل محدود) پرداخته اند. روش محاسباتی استفاده شده در MODFLOW در این مطالعه DE45 در نظر گرفته و واسنجی توسط بسته نرم افزار PEST و محاسبه نشست توسط زیر برنامه IBS انجام شده است. هم چنین پیش بینی برای ۵ سال آینده با در نظر گرفتن روند مشابه قبل برای استفاده و بهره برداری از مخازن آب زیرزمینی انجام گرفت. همچنین جهت بهینه کردن و اعتبار سنجی مدل، مقادیر فرو نشست توسط داده های InSAR تهیه شد [49]. نیکخو و همکاران نیز در سال ۱۳۹۲ به بررسی فرونشست دشت هشتگرد استان البرز ناشی از استخراج بی رویه آب زیرزمینی توسط نرم افزار PMWIN PRO7 پرداخت. در این مطالعه شبیه سازی فرو نشست زمین با استفاده از بسته نرم افزاری IBS، واسنجی خودکار با استفاده از بسته نرم افزاری PEST انجام گرفته است. واسنجی نتایج توسط بسته نرم افزاری PEST، بر طبق نتایج حاصل از مدلسازی و افت سطح آب زیرزمینی در ۲۸ چاه مشاهداتی انجام گرفت. پس از واسنجی و صحت سنجی داده ها، مدل قابلیت پیش بینی فرونشست را پیدا کرده و فرونشست برای ۵ سال بعد از دوره مدلسازی، با فرض ۳ سناریوی مختلف پیش بینی شده است [39]. از مدل MODFLOW برای پیش بینی سطح آب زیرزمینی [50] و بسته IBS1 در MODFLOW برای مدل سازی فرو نشست و تعیین ضریب تراکم خاک در شهر Banos-Kettleman کالیفرنیا استفاده شده است [51]. هافمن و همکاران نیز از مدل سازی معکوس در MODFLOW و بسته SUB برای شبیه سازی فرونشست و تخمین ضریب ذخیره الاستیک و ثابت زمان در Antelope Valley کالیفرنیا استفاده کردند [52].

## ۱-۱۵-۱ روش اجزای محدود

این روش مبتنی بر تقسیم مدل به قسمت های کوچکتر و تجزیه و تحلیل آن می باشد. اساسا تقسیم یک مسئله به قسمت های کوچکتر، به طوری که مقادیر فیزیکی و قوانین علمی به سادگی برای آن قسمت ها قابل بیان باشد در آب زیرزمینی، بسیار پرکاربرد و مفید است. در این روش، مبنای کار، تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی با استفاده از انتگرال



است. منطقه مطالعاتی به یک مجموعه اجزاء<sup>۷۲</sup> تقسیم و این اجزا توسط یک مجموعه گره به هم متصل می گردند. اجزاء می توانند مثلثی یا مربعی باشند. معمولاً هد ارتفاعی آب به عنوان مجهول در گره ها انتخاب می شود و مقادیر فشار آب در داخل هر سلول با درونیابی تعیین می شود. در این روش، اولین قدم به دست آوردن معادله انتگرالی است که نشان دهنده معادله دیفرانسیل جزئی مربوطه می باشد. حل این انتگرال با تقسیم آبخوان به اجزاء محدود به دست می آید. مقدار انتگرال برای هر جزء محاسبه می شود و سپس این مقادیر با توجه به شرایط مرزی با همدیگر ترکیب می شوند. در نتیجه، مجموعه ای از معادلات خطی دیفرانسیل مرتبه اول در زمان مورد نظر به دست می آید. در روش اجزاء محدود، طراحی شبکه بسیار مشکل تر و حساس تر از روش تفاضل محدود است، ولی با توجه به انعطاف پذیری این روش، محدوده مدل به خوبی پوشش داده می شود [14]. شکل ۱-۱۷ نمایی از انواع المان در روش اجزای محدود را نشان می دهد.



شکل ۱-۱۷ انواع المان در روش اجزاء محدود.

برای به کار بردن این روش می توان هم مستقیماً کد نویسی انجام داد و هم از نرم افزارهای مربوطه که از این روش برای حل معادلات استفاده کرده اند، کمک گرفت. نرم افزارهایی که از روش المان محدود برای حل معادلات بهره برده اند عبارتند از:

- مدل AQUA: این مدل توسط مهندسين مشاور در کشور ایسلند<sup>۷۳</sup> در سال ۱۹۸۱ تهیه شده است و جریان و آلودگی را به صورت دو بعدی و سه بعدی به روش اجزاء محدود مدل می کند و در دسترس عموم قرار دارد [40].
- مدل ASM: توسط دانشگاه کاسل<sup>۷۴</sup> آلمان در سال ۱۹۸۶ تهیه شده است که جریان و آلودگی را به صورت دو بعدی به روش تفاضل محدود مدل می کند. این مدل در دسترس عموم قرار دارد و بیشتر جنبه آموزشی دارد [44].

<sup>72</sup> Elements

<sup>73</sup> Island

<sup>74</sup> University of Kassel, Germany

- مدل FEMWATER و LEWASTE: توسط آزمایشگاه بین المللی اکرایج<sup>۷۵</sup> در سال های ۱۹۸۷-۱۹۸۹ تهیه شده است که جریان و آلودگی را به صورت دو بعدی و سه بعدی در محیط های اشباع و غیراشباع به روش اجزاء محدود مدل می کند. بیشترین کاربرد این مدل در اروپا و آمریکا و در موضوع تحقیقات اثرات فاضلاب ها بر روی آبخوان بوده و در دسترس عموم قرار دارد [44].
- مدل SUTRA: این مدل توسط سازمان تحقیقات زمین شناسی آمریکا در سال ۱۹۸۶ تهیه شده که جریان و آلودگی های دو بعدی محیط های درز و شکاف دار یک یا چند لایه را به روش اجزاء محدود مدل می کند. یکی از مهم ترین کاربردهای این مدل بررسی تداخل آب شور و شیرین است [53].

## ۲-۱۵-۱ فرمول بندی اجزاء محدود معادلات تحکیم یک بعدی ترزاقی

به عنوان نمونه فرمول بندی اجزاء محدود معادله دیفرانسیل مربوط به تحکیم یک بعدی ترزاقی به شکل روابط ۲-۳۸ تا ۲-۴۰ ارائه شده است [54]:

$$\left( [k_{\alpha}] + \frac{1}{\Delta t} [k_t] \right) \{u_n\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [k_t] \{u_n\}_t \quad 2-38$$

$$[k_{\alpha}] = \int_{z_1}^{z_2} [B]^T C_v [B] dz \quad 2-39$$

$$[k_t] = \int_{z_1}^{z_2} [N]^T [N] dz \quad 2-40$$

که  $[B]$  ماتریس انتقال کرنش- تغییر مکان و  $[N]$  ماتریس توابع درونیاب است.

## - فرمول بندی اجزاء محدود معادلات تحکیم سه بعدی Biot

فرمول بندی اجزاء محدود تحکیم سه بعدی Biot به شکل معادلات ۲-۴۱ تا ۲-۴۶ ارائه شده است [55]:

$$\begin{bmatrix} [K] & [L] \\ [L]^T & -\beta \Delta t [\phi] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta d\} \\ \{\Delta u\}_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta R\} \\ (Q + [\phi] \{u\}_t) \Delta t \end{Bmatrix} \quad 2-41$$

$$[k] = \int_{vol} [B]^T [D'] [B] dV \quad 2-42$$

$$[L] = \int_{vol} [B]^T \{m\} [N_u] dV \quad 2-43$$

$$\{\Delta R\} = \{\Delta R\}_1 + \{\Delta R\}_2 = \int_{vol} [N]^T \{\Delta F\} dV + \int_{surf} [N]^T \{\Delta T\} dS \quad 44-2$$

$$\{m\}^T = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\} \quad 45-2$$

$$[\phi] = \int_{vol} \frac{[B_u]^T [k] [B_u]}{\gamma_f} dV \quad 46-2$$

در این روابط  $[B]$  و  $[B_u]$  ماتریس انتقال کرنش- تغییر مکان،  $[D']$  ماتریس تنش-کرنش زهکشی شده،  $\{F\}$  بردار نیروی وزن،  $\{T\}$  بردار نیروی سطحی و  $[k]$  ماتریس نفوذپذیری می باشد. از ضریب  $\beta$  در رابطه تحکیم سه بعدی برای بیان نمودن رفتار فشار آب حفره ای در طی زمان استفاده می شود که می تواند بین صفر تا یک تغییر کند. برای اطمینان از پایداری روند محاسبات ضروری است که  $\beta \geq 0.5$  در نظر گرفته شود [56].  $\gamma_f$  چگالی سیال بین حفره ای می باشد. اگر نفوذپذیری ها ثابت نباشند و با تنش یا کرنش تغییر کنند، آنگاه ماتریس  $[k]$  و به دنبال آن  $[\phi]$  در هر گام تغییر می کند. در این حالت در نظر گرفتن ملاحظات خاص برای حل معادلات حاصل ضروری می باشد.

### ۳-۱۵- مطالعات انجام شده در زمینه فرونشست توسط روش اجزاء محدود

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه فرونشست توسط روش اجزای محدود انجام شده است. در زیر به تعدادی از این مطالعات اشاره شده است:

توفیق و شفیع ثابت در سال ۱۳۷۴ با استفاده از یک مدل تحکیم اجزاء محدود، فرونشست دشت کرمان را برای یک دوره ۱۰ ساله پیش بینی نمودند. این مقدار، بین ۰ تا ۱۵ سانتی متر به ازای هر یک سال در مناطق مختلف دشت بود. حل معادلات تحکیم الاستیک و الاستوپلاستیک با استفاده از روش المان محدود توسط Sloan and Abbo در سال ۱۹۹۲ انجام شده است. در این مطالعه برای حالت الاستیک، جابجایی و فشار آب منفذی در هر بازه زمانی بدون تکرار محاسبه شده است. در حالت الاستوپلاستیک نیز، چون روابط غیر خطی حاکم اند، نیاز به حل با روش تکراری دارند [57]. Sayyaf و همکاران در سال ۲۰۱۴ به مدلسازی دشت رفسنجان ایران با استفاده از روش اجزاء محدود پرداختند [58]. مدلسازی آنها شامل دو بخش بود: ابتدا آنالیز استاتیک برای محاسبه حل ماندگار توزیع تنش و فشار آب منفذی انجام گرفت سپس با استفاده از این حل به عنوان شرایط اولیه، محاسبات غیرماندگار معادلات تحکیم در طول دوره پمپاژ انجام شد. نتایج عددی مدل آنها نشان داد که اگر نرخ پمپاژ، ثابت بماند فرونشست در دشت رفسنجان تا سال ۲۰۲۲، به میزان ۱۱۰ سانتی متر افزایش خواهد یافت. Lou and Zeng نیز در سال ۲۰۱۱ با استفاده از معادلات الاستوپلاستیک و تئوری تحکیم Biot و حل توسط روش المان محدود، فرونشست و ترک های حاصل از آن را در شهر کانگژو چین بررسی شد [59]. آنها هم چنین به محاسبه زمان تاخیر ایجاد شده نیز پرداختند. نتایج نشان داد زمان تاخیر بین فرونشست و کاهش سطح آب زیرزمینی در شهر مورد نظر، یک ماه است.

## ۱۶-۱ روش یادگیری ماشین<sup>۷۶</sup>

یادگیری ماشین به تنظیم و اکتشاف شیوه‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که بر اساس آنها رایانه‌ها و سامانه‌ها توانایی یادگیری پیدا می‌کنند. یادگیری ماشین عبارتست از اینکه چگونه می‌توان برنامه‌ای نوشت که از طریق تجربه یادگیری کرده و عملکرد خود را بهتر کند. یادگیری ممکن است باعث تغییر در ساختار برنامه و یا داده‌ها شود. هدف یادگیری ماشین این است که بتواند به تدریج و با افزایش داده‌ها بازدهی بالاتری در وظیفه مورد نظر پیدا کند. گستره‌ی این وظیفه می‌تواند از تشخیص خودکار چهره و یا دیدن چند نمونه از چهره مورد نظر تا فراگیری شیوه گام برداری برای ماشین‌های دوپا با دریافت سیگنال پاداش و تنبیه باشد. کنترل ماشین‌ها، داده کاوی، تشخیص گفتار، شناسایی متن و پردازش داده‌های اینترنتی از کاربردهای گسترده و رو به پیشرفت یادگیری ماشین می‌باشد.

اولین الگوریتم برای طبقه بندی و دسته بندی الگوها در سال ۱۹۳۶ توسط فیشر<sup>۷۷</sup> ارائه شد و معیار آن برای بهینه بودن، کم کردن خطای طبقه بندی الگوهای آموزشی بوده است. بسیاری از الگوریتم‌ها و روش‌هایی که تاکنون نیز برای طراحی طبقه کننده‌ها ارائه شده است، از همین استراتژی پیروی می‌کنند. در سال ۱۹۶۳ محقق روسی به نام ولادیمیر واپنیک<sup>۷۸</sup> گامی بسیار مهم در طراحی طبقه کننده‌ها برداشت. وی نظریه یادگیری آماری<sup>۷۹</sup> را به منظور پیدا کردن ساده‌ترین تابع ممکن برای شناسایی و دسته بندی داده‌ها به صورت مستحکم تری بنا نهاد و ماشین‌های بردار پشتیبان را بر این اساس ارائه داد [60].

## ۱۷-۱ تقسیم بندی در مسائل یادگیری

یکی از تقسیم بندی‌های متداول در یادگیری ماشین، تقسیم بندی بر اساس نوع داده‌های در اختیار عامل هوشمند است:

- یادگیری با نظارت<sup>۸۰</sup>
- یادگیری تقویتی<sup>۸۱</sup>
- یادگیری بدون نظارت<sup>۸۲</sup>
- یادگیری نیمه نظارتی<sup>۸۳</sup>

## ۱۸-۱ یادگیری با نظارت

<sup>76</sup> Machine Learning

<sup>77</sup> Fisher

<sup>78</sup> Veladimir Vapnik

<sup>79</sup> Statistical Learning

<sup>80</sup> Supervised Learning

<sup>81</sup> Reinforcement Learning

<sup>82</sup> Unsupervised Learning

<sup>83</sup> Semi-supervised Learning

یادگیری با نظارت یک روش عمومی در یادگیری ماشین است که در آن به یک سیستم، مجموعه جفت های ورودی-خروجی ارائه شده و سیستم تلاش می کند تا تابعی از ورودی به خروجی را فراگیرد. یادگیری تحت نظارت نیازمند تعدادی داده ورودی به منظور آموزش سیستم است. در الگوریتم های یادگیری با نظارت هدف از داده کاوی مشخص است و می دانیم که به دنبال چه نوع دانشی می گردیم، مانند دسته بندی.

## ۱-۱۹ یادگیری تقویتی

در یادگیری تقویتی، سیستم تلاش می کند تا تقابلات خود با یک محیط پویا را از طریق آزمایش و خطا بهینه نماید. یادگیری تقویتی مسئله ای است که یک عامل که می بایست رفتار خود را از طریق تعاملات آزمایش و خطا با یک محیط پویا فراگیرد، با آن مواجه است. در یادگیری تقویتی هیچ نوع زوج ورودی-خروجی ارائه نمی شود. به جای آن پس از اتخاذ یک عمل، حالت بعدی و پاداش به عامل ارائه می شود. هدف اولیه برنامه ریزی عامل ها با استفاده از تنبیه و تشویق است بدون آنکه ذکر از چگونگی انجام وظیفه آنها شود.

## ۱-۲۰ یادگیری بدون نظارت

در حالت یادگیری با نظارت، قرار بود ماشین، ورودی ها را به خروجی ها مرتبط کند. در یادگیری بدون نظارت، هدف ارتباط ورودی و خروجی نیست، بلکه تنها دسته بندی آنها است. این نوع یادگیری بسیار مهم است، چون دنیای ماشین پر از ورودی هایی است که کسی برچسبی به آنها اختصاص نداده اما به وضوح جزئی از یک دسته هستند.

## ۱-۲۱ یادگیری نیمه نظارتی

در این یادگیری ماشین می تواند هم به خودی خود و بدون نظارت یاد بگیرد و هم اینکه هنگامی که شما او را راهنمایی می کنید، سعی کند از آن تجارب استفاده و از آموزش شما بهره بیشتری ببرد. ترکیبی که عامل هوشمند هم از داده های بدون برچسب و هم از داده های برچسب دار استفاده می کند.

## ۱-۲۲ داده کاوی<sup>۸۴</sup>

یکی از شاخه های یادگیری ماشین، داده کاوی است. داده کاوی عبارت است از اقتباس یا استخراج دانش از مجموعه ای از داده ها. به بیان دیگر، فرآیندی است که با استفاده از تکنیک های هوشمند، دانش را از مجموعه ای از داده ها استخراج می کند. برای اینکه الگوریتم داده کاوی بتواند عمل استخراج دانش را به خوبی انجام دهد، نیاز به یک سری پیش پردازش ها بر روی مجموعه آموزشی و یکی سری پس پردازش ها بر روی الگوهای استخراج شده دارد. روش های به کار گرفته شده برای داده کاوی عبارتند از:

- دسته بندی: در این روش یک نمونه به یکی از چند دسته از پیش تعریف شده دسته بندی می شود.
- رگرسیون<sup>۸۵</sup>: پیش بینی یک مقدار متغیر مبتنی بر متغیرهای دیگر.
- خوشه بندی<sup>۸۶</sup>: نگاشت یک دسته داده به یکی از چند خوشه. خوشه ها گروه بندی های دسته های داده ای هستند که بر اساس شباهت برخی از معیارها بوجود می آیند.
- کشف قواعد وابستگی<sup>۸۷</sup>: روابط وابستگی بین خصیصه های مختلف را بیان می کند.

دو مشکل اصلی که اکثر سیستم های داده کاوی با آن مواجه هستند عبارتند از:

- حجم بالای داده آموزشی
- وجود عدم قطعیت در اطلاعات

## ۲۳-۱ ابر صفحه<sup>۸۸</sup>

ابرف صفحه یک مفهوم در هندسه است، یک تعمیم از یک صفحه در تعداد متفاوتی از ابعاد. یک ابر صفحه یک زیر فضای  $k$  بعدی در یک فضای  $n$  بعدی تعریف می کند که  $k < n$ . مثلاً در یک، دو و سه بعد، ابر صفحه به ترتیب نقطه، خط و صفحه نامیده می شود. برای بعدهای بیشتر، از واژه کلی ابر صفحه استفاده می شود.

## ۲۴-۱ نمونه هایی از انواع روش یادگیری ماشین

تاکنون روش های گوناگونی به عنوان روش های یادگیری ماشین معرفی شده اند که از جمله شناخته شده ترین آنها می توان به روش شبکه های عصبی مصنوعی<sup>۸۹</sup>، برنامه ریزی ژنتیکی (الگوریتم های ژنتیکی)<sup>۹۰</sup> و ماشین های بردار پشتیبان<sup>۹۱</sup> اشاره کرد.

## ۲۵-۱ شبکه های عصبی مصنوعی

برای اولین بار مفهوم شبکه های عصبی مصنوعی توسط Rumelhart D.E., McClelland J.L. (1986) توسعه یافت [61]. شبکه عصبی مصنوعی روشی عملی برای یادگیری توابع گوناگون نظیر توابع با مقادیر حقیقی، توابع با مقادیر گسسته و توابع با مقادیر برداری می باشد. یادگیری شبکه عصبی در برابر خطاهای داده های آموزشی مصون بوده و اینگونه شبکه ها با موفقیت به مسائلی نظیر شناسائی گفتار، شناسائی و تعبیر تصاویر و یادگیری روبات اعمال شده

<sup>85</sup> Regression (Predictive)

<sup>86</sup> Clustering (Descriptive)

<sup>87</sup> Association Rule Discovery

<sup>88</sup> Hyperplane

<sup>89</sup> Artificial Neural Networks

<sup>90</sup> Genetic Algorithm

<sup>91</sup> Support Vector Machine (SVM)

است. روشی برای محاسبه است که بر پایه اتصال به هم پیوسته چندین واحد پردازشی ساخته می شود. شبکه از تعداد دلخواهی سلول یا گره یا واحد یا نرون تشکیل می شود که مجموعه ورودی را به خروجی ربط می دهند [62].

به منظور پیش بینی سطح ایستابی آبخوان دشت بیرجند توسط Mohtasham et al. (2010)، از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج نشان داد شبکه عصبی آموزش یافته بر اساس اطلاعات ۱۶ پیژومتر، قادر به تخمین سطح آب زیرزمینی با دقت قابل قبول تا ۱۲ ماه بعد است [63]. انگورانی و همکاران نیز در سال ۱۳۹۴ به معرفی روشی جدید برای پیش بینی میزان فرونشست زمین با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته و کارایی این روش را در منطقه دشت جنوب تهران بررسی کرده اند [64]. Shahin et al. (2003) نیز با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی، مدلی را برای پیش بینی نشست پی های سطحی بر روی خاک های دانه ای ارائه داد که نتایج وی از کارایی و دقت مناسب تری نسبت به روش های تجربی برخوردار بود [65].

## ۲۶-۱ الگوریتم های ژنتیکی

الگوریتم ژنتیک اولین بار به وسیله جان هالند در سال ۱۹۷۵ ارائه شد [66]. این الگوریتم، روی جمعیتی از جواب های بالقوه عمل کرده و با به کارگیری بقای برتر، تقریب بهتری از حل مورد نظر را ارائه می دهد [67]. مدل سازی الگوریتم ژنتیک بر این اساس است که در نهایت، ژن ها و کروموزوم های بهتر و قوی تر باقی مانده و ژن های ضعیف تر از بین می روند، یا همان ایده تکامل داروین که موجودات ضعیف تر از بین می روند و موجودات قوی تر باقی می مانند [68]. این الگوریتم چندین نسخه مختلف از برنامه های حل مسئله به صورت تصادفی تولید و این مجموعه به صورت همزمان در هر محله بهبود می یابد. به عبارت دیگر الگوریتم آموزش به جای آموزش تنها یک نسخه از ماشین پایانی، وظیفه آموزش چندین نسخه را به صورت همزمان به عهده دارد. همین تفاوت باعث می گردد که الگوریتم ژنتیک به صورت ذاتی از یادگیری مرتبه دوم برخوردار باشد. سطح مرتبه صفرم از یادگیری صرفاً یک ماشین حل مسئله و بیانگر یکی از گونه ها در الگوریتم ژنتیک است. در سطح اول یادگیری ماشینی قرار می گیرد که وظیفه انتخاب بهترین گونه را از بین مجموعه ای مشخص از گونه ها بر عهده دارد. در نهایت الگوریتم ژنتیک ماشینی از سطح دوم یادگیری برخوردار خواهد بود. در این ماشین هر حالت بیانگر مجموعه ای از گونه ها است. در هر گذر این ماشین به بررسی گونه های موجود در حالت فعلی خودش می پردازد و تعدادی از آنها را جهش می دهد یا ادغام می کند. همچنین اگر بهترین گونه موجود در مجموعه، جوابی قابل قبول تولید نماید پردازش ماشین خاتمه می یابد. زمان پردازش این ماشین برابر تعداد نسل هایی است که الگوریتم ژنتیک برای تولید جواب بهینه پیموده است. هم چنین خروجی اولیه ماشین مرتبه دوم شمال تمام گونه هایی است که در آخرین نسل وجود داشته است، در نتیجه برای یافتن بهترین گونه باید ماشین مرتبه اول حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک را به صورت جداگانه اجرا نمود [69].

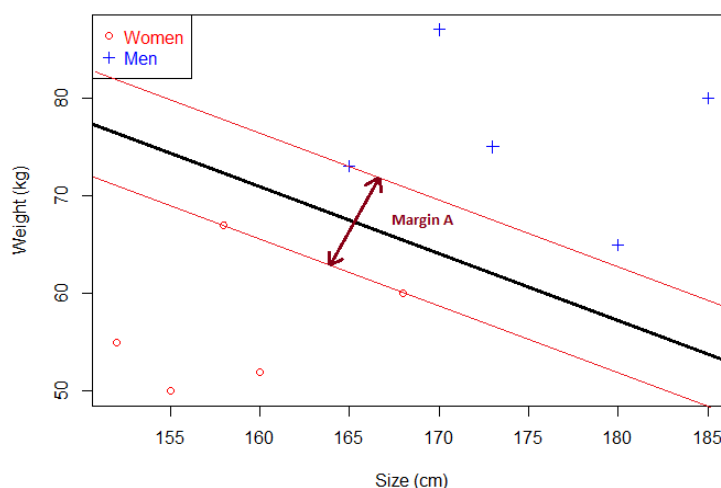
## ۲۷-۱ ماشین بردار پشتیبان (SVM)

این روش یک مجموعه از روش های یادگیری با نظارت است که برای طبقه بندی و رگرسیون استفاده می شود. ماشین بردار پشتیبان در سال ۱۹۹۲ توسط Vapnik و Chervonenkis بر پایه تئوری یادگیری آماری معرفی شد

[70]. در اصل ماشین بردار پشتیبان یک موجودیت ریاضی (یک الگوریتم برای ماکزیمم کردن تابع ریاضی با توجه به مجموعه داده های داده شده) است. شهرت آن به خاطر موفقیتش در تشخیص حروف دست نویس است که با شبکه های عصبی پیچیده قابل قیاس است. SVM با استفاده از روش گرسیون مبتنی بر آنالیز حساسیت جهت تعیین اهمیت پارامترها توجه محققین بسیاری را دهه اخیر به خود مبدول داشته است و از آن در طیف وسیعی از کاربردها از جمله تشخیص دست خط، تشخیص چهره و تشخیص علائم راهنمایی و ... استفاده کرده اند.

یکی از مسائل مطرح در یادگیری ماشین دسته بندی<sup>۹۲</sup> است و بسیاری از مسائل را می توان به صورت یک مسئله دسته بندی مطرح و حل کرد. رویکرد SVM به این صورت است که در فاز آموزش، سعی می شود که مرز تصمیم گیری<sup>۹۳</sup> به گونه ای انتخاب گردد که حداقل فاصله آن با هریک از دسته های مورد نظر ماکزیمم گردد. این نحوه انتخاب مرز بر اساس نقاطی به نام بردارهای پشتیبان انجام می شود [60].

در SVM یک داده به صورت یک بردار  $P$  بعدی (یا یک لیست از  $p$  عدد) دیده می شود و هدف، یافتن روشی برای جدا کردن چنین نقاطی با یک ابر صفحه  $P-1$  بعدی است. این عمل جداسازی خطی نامیده می شود. ابر صفحه های بسیاری وجود دارند که می توانند داده ها را جدا کنند. آنچه SVM را از سایر جداکننده ها متمایز می کند چگونگی انتخاب ابر صفحه است. در SVM ماکزیمم کردن حاشیه بین دو کلاس مدنظر است. بنابراین ابر صفحه ای را انتخاب می کند که فاصله ی آن از نزدیک ترین داده ها در هر دو طرف جدا کننده خطی ماکزیمم باشد. اگر چنین ابر صفحه ای وجود داشته باشد، به عنوان ابر صفحه ماکزیمم شناخته می شود. برای ساخت ماکزیمم حاشیه، دو صفحه مرزی موازی با صفحه جدا کننده رسم کرده آن دو را آن قدر از هم دور کرده که به داده ها برخورد کنند. صفحه جدا کننده ای که بیشترین فاصله را از صفحات مرزی داشته باشد، بهترین جدا کننده خواهد بود. در واقع ابر صفحه بهینه در SVM جدا کننده ای بین بردارهای پشتیبان است [60]. شکل ۱-۱۸ نمونه ای از ابر صفحه های جدا کننده را نشان می دهد.



<sup>92</sup> classification

<sup>93</sup> Decision Boundary



شکل ۱-۱۸ ابرصفحه حداکثر کننده حاشیه.

## ۱-۲۷-۱ ماشین بردار پشتیبان در حالت چند کلاسه

ماشین بردار پشتیبان اساساً یک جداکننده دودویی است. برای مسائل چندکلاسی، مساله به چند مساله دوکلاسی تبدیل می‌شود. هریک از این مسائل با یک جداکننده دو کلاسی حل می‌شود. سپس خروجی جداکننده‌های دو کلاسی SVM با هم ترکیب شده و به این ترتیب مساله چندکلاسی حل می‌شود. تئوری طراحی ابرصفحه با ناحیه مرزی بهینه را به راحتی می‌توان طوری تعریف کرد که در حالت چندکلاسه نیز عمل دسته بندی را به خوبی انجام دهد. برای مساله SVM در حالت چندکلاسه می‌توان چندین استراتژی در پیش گرفت:

- یکی در مقابل بقیه
- دسته بندی کردن زوج-زوج
- تعریف توابع هدف چند کلاسه
- استفاده از کدهای تصحیح خطا

در حالتی که بیش از دو کلاس وجود داشته باشد نمی‌توان مستقیماً از ماشین بردار پشتیبان استفاده کرد. در حالت کلی برای استفاده از طبقه بندی‌های دودویی در حالت چندکلاسه باید ابتدا چند طبقه بندی کننده دودویی طراحی شود. طبقه بندی نهایی با استفاده از ادغام اطلاعات طبقه بندی کننده‌های دودویی انجام می‌گردد. برای استفاده از ماشین بردار پشتیبان در حالت چندکلاسه این تکنیک کلی با دو روش متفاوت اجرا می‌شود. برای مثال فرض کنید  $k$  کلاس وجود دارد. در روش اول که آن را روش یکی در مقابل بقیه می‌نامند،  $k$  طبقه بندی کننده دودویی که هر کدام برای جداکردن یک کلاس از بقیه کلاس‌ها می‌باشد، طراحی می‌شود. بنابراین در این حالت برای آموزش هر طبقه بندی کننده، از تمام نقاط آموزشی  $k$  کلاس استفاده می‌گردد. هر داده آزمایشی با تمام  $k$  طبقه بندی کننده حاصل طبقه بندی می‌شود. در نهایت داده مورد نظر با شماره طبقه بندی کننده ای که دارای بیشترین فراوانی است، برچسب زده خواهد شد. چون در این حالت از تمام نقاط آموزشی برای آموزش هر طبقه بندی کننده استفاده شده، زمان آموزش هر طبقه بندی کننده در این حالت بسیار زیاد است و در عمل به ندرت از آن استفاده می‌شود.

روش دوم که آن را دسته بندی کردن زوج-زوج می‌نامند،  $k(k-1)/2$  طبقه بندی کننده دودویی که در واقع برابر با تمامی جفت‌های مختلف  $k$  کلاس می‌باشد طراحی می‌شود. سپس هر داده آزمایشی با تمام این طبقه بندی کننده‌ها طبقه بندی شده و در هر طبقه بندی به کلاس برنده یک رای داده می‌شود. کلاسی که حداکثر آراء را آورده است به عنوان کلاس داده آزمایشی در نظر گرفته خواهد شد. در این روش چون هر طبقه بندی کننده با نقاط آموزشی کمتری آموزش داده می‌شود، بنابراین زمان آموزش آن بسیار کمتر از حالت قبل است. اما چون در این حالت برای طبقه بندی کردن هر داده آزمایشی باید  $k(k-1)/2$  طبقه بندی بر روی آن داده انجام شود، در نتیجه با افزایش تعداد کلاس‌ها طبقه بندی تمامی داده‌ها به زمان زیادی نیاز خواهد داشت. لذا یکی از مشکلات طبقه بندی داده‌های چندکلاسه با استفاده از ماشین بردار پشتیبان افزایش چشم‌گیر زمان طبقه بندی است. مشکل دیگری که با افزایش تعداد کلاس‌ها به وجود می‌آید، زیاد شدن خطای طبقه بندی نهایی است. در واقع هر طبقه‌بندی کننده دودویی دارای مقداری خطا

است، لذا با افزایش تعداد این طبقه بندی کننده ها خطای حاصل از تک تک آنها در تصمیم گیری نهایی دخالت داده می شود و خطای طبقه بندی نهایی افزایش می یابد [60].

## ۲-۲۷-۱ مطالعات انجام شده در زمینه فرونشست توسط روش ماشین بردار پشتیبان

حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۲ به پیش بینی نشست پی های سطحی به کمک ماشین بردار پشتیبان پرداختند. آنها از یک مجموعه داده شامل ۱۸۹ نمونه استفاده کردند. هر نمونه شامل مشخصات هندسی پی ها شامل طول، عرض، فشار موثر سربار، نتایج حاصل از آزمون نفوذ مخروط استاندارد و فشار ناشی از پی است. در این مطالعه علاوه بر ارزیابی نتایج با نشست های واقعی به تعیین اهمیت پارامترهای نسبی در تعیین نشست ها بر پایه آنالیز حساسیت و مقایسه با سایر روش های تجربی پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که مدل ماشین بردار پشتیبان از دقت و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به روش های تجربی برخوردار است [60]. Choubin et al. (2019) به معرفی مدل های یادگیری ماشین برای پیش بینی ترک در دشت یزد اردکان پرداخته است. بعد از پیش پردازش داده ها و اطمینان از عدم وجود هم بستگی و متغیر های تکراری، ۵ مدل یادگیری ماشین برای مدل سازی ترک استفاده شد. یکی از مدل های استفاده شده در این مطالعه روش ماشین بردار پشتیبان می باشد. نتایج نشان داد که روش ها از دقت و صحت قابل قبولی در پیش بینی ترک ها برخوردارند [71].

## ۲۸-۱ سنجش عملکرد

به طور کلی عملکرد یک طبقه بندی کننده برای جداسازی دو دسته مثبت و منفی، با استفاده از شاخص های حساسیت<sup>۹۴</sup>، ویژگی<sup>۹۵</sup> و دقت<sup>۹۶</sup> سنجیده می شود [60]:

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad ۴۷-۲$$

$$\text{Specifity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad ۴۸-۲$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad ۴۹-۲$$

که TP تعداد موارد مثبتی که به درستی طبقه بندی شده اند، TN تعداد موارد منفی که درست طبقه بندی شده اند، FN تعداد موارد نادرست طبقه بندی شده منفی و FP تعداد موارد نادرست طبقه بندی شده مثبت می باشند. در ارزیابی قابلیت اطمینان مدل، حساسیت، درصد ورودی های طبقه بندی شده صحیح و ویژگی، درصد حالت های نادرست طبقه بندی شده را نشان می دهد.

<sup>94</sup> Sensitivity

<sup>95</sup> Specifity

<sup>96</sup> Accuracy

## ۱-۲۹ مقایسه ماشین بردار پشتیبان و شبکه های عصبی

اساس شناسایی یک سیستم بر مبنای مشاهدات محدود و تحلیل هایی روی نمونه های انتخاب شده می باشد. چون تمام اتفاقات ممکن و نتایج آنها را نمی دانیم پس فضای ورودی ها به طور کامل شناخته شده نیست. پس نمونه برداری در فضای ورودی توزیعی ناهمگن دارد و این یکی از ضعف های بزرگ برای مدل های پیشنهادی در پیش بینی واقعیت می باشد.

مشکل شبکه عصبی در گذشته این بود که نمی توانستند یک مدل جامع برای سیستم بدست آورند. این مشکل ناشی از نوع الگوریتم بهینه سازی بود که برای انتخاب پارامترها استفاده می شد. هم چنین معیارهای آماری که برای مقایسه چند مدل و انتخاب بهترین آنها به کار می رفت در ایجاد مشکل بی تاثیر نبود. در حقیقت SVM گسترش یافته مفهوم شبکه عصبی است که صرفاً به کم بودن خطای مدل در پیش بینی نتایج توجه دارد، نه به اینکه سعی کند در هر مرحله خطای مربوط به همان مرحله را کمینه کند.

تفاوت عمده دیگر بین SVM و شبکه های عصبی آن است که در ماشین بردار پشتیبان دو حالت بیشتر برای پیش بینی وجود ندارد. به عنوان مثال در کاربرد SVM در ارزیابی پتانسیل روانگرایی حالت سیستم یا روانگراست یا غیرروانگرا (عدد ۱ موقعیت روانگرا و عدد ۰ موقعیت غیرروانگرا). در شبکه های عصبی دامنه پیش بینی ها گسترده تر می باشد و ممکن است حالات مختلف خروجی بسته به نوع ورودی متفاوت باشد. لذا تصمیم گیری در صورت استفاده از شبکه عصبی مشکل تر است.

از تفاوت های دیگر این دو روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در روش ماشین بردار پشتیبان رسیدن به یک مینیمم کلی تضمین شده است و امکان گرفتار شدن در مینیمم موضعی وجود ندارد.
- روش بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی نشان می دهد.

## ۱-۳۰ روش تابع تاثیر

این روش، یک روش جدید برای پیش بینی فرونشست به وجود آمده از برداشت آب زیرزمینی می باشد. این روش که به روش تابع تاثیر<sup>۹۷</sup> معروف است، برای اولین بار برای تعیین فرونشست ناشی از استخراج معدن مورد استفاده قرار گرفته است. با فرض اینکه فرونشست ناشی از این دو پدیده یکسان است این روش استفاده شده است. این روش تجربی توانایی محاسبه فرونشست افقی را نیز دارد.

تابع تاثیر به ارتباط مکانی بین موقعیت المانی که از آن آب استخراج شده و نقطه تحت تاثیر قرار گرفته در سطح زمین بستگی دارد. استخراج از هر المان یک فرورفتگی اولیه را در سطح ایجاد می کند. فرم کلی تابع تاثیر به صورت  $K_z = f(x)$  می باشد که  $x$  می تواند زاویه ( $\theta$ ) یا فاصله شعاعی از مرکز فرورفتگی فرونشست ( $r$ ) باشد. استخراج بی نهایت کوچک از المان  $dA$  باعث میزان فرونشست  $dS$  در سطح می شود:

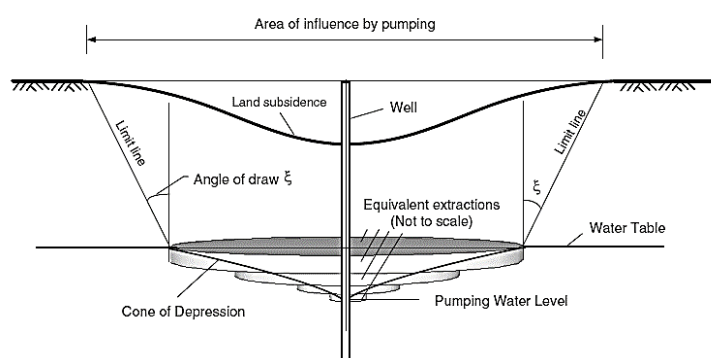
$$dS = S_0 k_z dA \quad 50-2$$

که  $S_0$  حداکثر فرونشست ممکن می باشد.

دایره تاثیر به تعدادی رینگ ها تقسیم می شود که فاکتور تاثیر هر رینگ به صورت رابطه ۵۱-۲ تعیین می شود:

$$S(i) = S/S_0 = \iint k_z dA \quad 51-2$$

که  $S(i)$  فاکتور تاثیر فرونشست بوده و میزان تاثیر استخراج از یک المان بر نقطه ای روی سطح زمین را نشان می دهد. در مورد استخراج آب زیرزمینی، افت سطح آب زیرزمینی به شکل یک قیف در اطراف چاه پمپاژ شکل می گیرد. توده خاکی نزدیک مرکز این قیف حداکثر تحکیم ناشی از حداکثر کاهش و بیشترین افزایش تنش موثر را متحمل می شود. تاثیر این منطقه تحکیم یافته قیفی شکل می تواند با تعدادی صفحات دایره ای با ضخامت یکسان در مدل تابع تاثیر، مدل سازی شود (شکل ۱۹-۱). هر صفحه دایره ای شعاع تاثیر و فشار موثر اولیه متفاوتی دارد. با استفاده از تئوری تحکیم ترزاقی در هر صفحه، میزان تحکیم محاسبه می شود. میزان فرونشست نهایی ایجاد شده برابر مجموع همه اثرات صفحات دایره ای می باشد.



شکل ۱۹-۱ مخروط افت ایجاد شده و صفحات دایره ای دربرگیرنده این مخروط.

اگر فرض کنیم که فضاهای خالی ایجاد شده نهایتاً با خاک های اطراف پر می شوند، حجم فرونشست ایجاد شده  $V_t$  می تواند توسط فرمول ۵۲-۲ تخمین زده شود:

$$V_t = F_b V_{es} \quad 52-2$$

که  $F_b$  فاکتور حجم (در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵) و  $V_{es}$  حجم المان استخراج شده خاک زیر زمین می باشد. در مورد استخراج آب، کل حجم کاهش یافته  $V_a$  برابر حجم مایع پمپاژ شده است. در مخروط کاهش، اگر ناحیه تحت تاثیر به

المان هایی با میزان استخراج برابر تقسیم شود،  $V_{ew}$  مجموع اثر همه این المان ها، فرونشست کلی در سطح زمین را نشان می دهد.

این روش، روشی ساده بوده و اثر فاکتورهای دیگر مانند جزئیات آبخوان، شرایط هیدرولوژیکی و زمین شناسی در مدل لحاظ نمی شود. با این وجود اثر این فاکتورها به صورت غیر مستقیم در طول مرحله بهینه سازی قابل اعمال است.

در نتیجه مراحل کلی این روش برای یک چاه پمپاژ به صورت زیر بیان می شود:

۱. ایجاد پروفیل کاهش آب (ساختاری کیفی شکل به دلیل کاهش آب اطراف چاه پمپاژ) با استفاده از داده های مشاهداتی موجود و در صورت عدم وجود داده های مشاهداتی استفاده از روش های تحلیلی و عددی.
۲. گسسته سازی منطقه کاهش به تعدادی صفحه با ضخامت یکسان (معمولا ۴ صفحه در نظر گرفته می شود).
۳. محاسبه نشست هر یک از صفحات با استفاده از معادله تحکیم یک بعدی ترزاقی
۴. تکرار مراحل ۱ تا ۳ برای همه چاه های پمپاژ
۵. بهینه سازی سیستم با استفاده از داده های موجود
۶. انجام تحلیل های فرونشست و بدست آوردن نتایج
۷. بازنگری نتایج و تکرار گام ۳ با پارامترهای تصحیح شده و در صورت لزوم تکرار گام ۴

تجمع تاثیرهای همه چاه های پمپاژ به راحتی با استفاده از یک برنامه کامپیوتری که برای تحلیل فرونشست ناشی از استخراج معدن ارائه شده است، انجام می شود [72]. Ren et al. (2014) از این روش برای محاسبه فرونشست بوجود آمده در اثر برداشت آب زیرزمینی در آبخوان آزاد استفاده کرده اند [73].

### ۱-۳۱ روش ALPRIFT برای ارزیابی آسیب پذیری فرونشست

روش ALPRIFT یکی از روشهای ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آبخوان می باشد. مدل ALPRIFT توسط ندیری و همکاران جهت محاسبه پتانسیل آسیب پذیری فرونشست ارائه شده است [74]. در این روش، از تلفیق هفت لایه اطلاعاتی رتبه دهی و وزن دهی شده، شاخص ALPRIFT محاسبه می شود. این هفت لایه عبارتند از: جنس آبخوان (A)، کاربری زمین (L)، میزان پمپاژ آب زیرزمینی (P)، تغذیه آبخوان (R)، ضخامت زون اشباع (I)، فاصله از گسل ها (F) و افت سطح آب زیرزمینی (T) که این لایه ها به اختصار ALPRIFT خوانده می شوند. اطلاعات مورد نیاز برای هر لایه در جدول ۱-۴ قابل مشاهده است. مبنای این روش به صورت وزن دهی و نرخ دهی می باشد تا مقادیر کلی وزن ها بر اساس حساسیت لایه ها و شرایط محلی به دست بیاید [74]. به هر یک از این پارامترها با توجه به پتانسیل فرونشست آن، نرخی از یک تا ۱۰ اختصاص داده می شود. یک و ۱۰ به معنای به ترتیب، کمترین و بیشترین خطر فرونشست هستند.

جدول ۱-۴ اطلاعات مورد نیاز مدل ALPRIFT

| نام لایه | اطلاعات مورد نیاز |
|----------|-------------------|
|----------|-------------------|

|                                                                                              |                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| استفاده از لاگ زمین شناسی پیزومترهای موجود در دشت                                            | لایه محیط آبخوان            |
| نقشه کاربری زمین                                                                             | لایه کاربری زمین            |
| اطلاعات برداشت سالانه چاه های پمپاژ، تیسن بندی مقادیر برای هر پیزومتر و درونیابی برای کل دشت | لایه پمپاژ آب<br>زیرزمینی   |
| استفاد از روش پیسکوپو با تلفیق سه لایه شیب، بارندگی و نفوذپذیری خاک                          | لایه تغذیه                  |
| اطلاعات چاه های پیزومتری و نقشه ژئوالکتریک سنگ کف                                            | لایه ضخامت آبخوان           |
| نقشه موقعیت گسل های موجود در منطقه                                                           | لایه فاصله از گسل           |
| اطلاعات یکساله پیزومترهای موجود در منطقه                                                     | لایه افت سطح آب<br>زیرزمینی |

روش بررسی شاخص آسیب پذیری فرونشست دشت مورد مطالعه به صورت امتیازدهی نقطه ای (PCSM) است، به طوری که با استفاده از روش ALPRIFT، نقشه های لایه های موثر بر فرونشست در فاصله زمانی مشخص در نرم افزار GIS کلاس بندی و با توجه به وزن های انتساب داده شده با هم تلفیق می شوند و نقشه آسیب پذیری فرونشست بدست می آید. شاخص آسیب پذیری فرونشست در هر نقطه از محدوده توسط رابطه ۲-۵۳ محاسبه می شود:

$$Subsidence\ vulnerability\ index(SVI) = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w \quad ۵۳-۲$$

در رابطه بالا اندیس  $r$  رتبه تعلق گرفته به هر دسته و  $w$  وزن هر عامل را نشان می دهد.

برای بهبود نتایج حاصل و بهینه سازی وزن های اعمال شده می توان از روش های ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. جهت بهینه سازی روش ALPRIFT با استفاده از مدل SVM، داده های ورودی (پارامترهای ALPRIFT) و خروجی (شاخص آسیب پذیری تصحیح شده SPI-رابطه ۲-۵۴) و مقدار فرونشست مربوطه به آن به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم و پس از آموزش مدل، با استفاده از مقادیر فرونشست، نتایج مدل در مرحله آزمایش ارزیابی می شود.

$$SPI = Vul_{max} \times \frac{subsidence}{subsidence_{max}} \quad ۵۴-۲$$

در رابطه ۲-۵۴  $Vul_{max}$  حداکثر شاخص ALPRIFT،  $subsidence_{max}$  حداکثر فرونشست موجود در منطقه و  $subsidence$  میزان فرونشست در هر نقطه را نشان می دهد. برای ارزیابی عملکرد مدل، پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات (RMSE) (رابطه ۲-۵۵) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) (رابطه ۲-۵۶) مورد بررسی قرار می گیرد تا دقت آنها نسبت به یکدیگر در مقایسه با داده های حاصل از مدل ALPRIFT مورد ارزیابی قرار گیرد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad ۵۵-۲$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad ۵۶-۲$$

منافی آذر و همکاران در دو مطالعه مجزا، با استفاده از روش ALPRIFT به محاسبه شاخص آسیب پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران پرداخته و برای بهینه کردن نتایج حاصله از روش های ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم زنتیک استفاده کرده است [75, 76].

## ۱-۳۲ نتیجه گیری

در طول دهه های گذشته، افزایش استفاده از آب های زیرزمینی در دشت های ایران باعث افت زیاد در سطح آب زیرزمینی شده است. که این کاهش باعث پدیدار شدن علائم فرونشست در این مناطق گردیده است. بر این اساس مطالعه و بررسی روش های پیش بینی فرونشست از اهمیت بالایی برای جلوگیری و کنترل این پدیده برخوردار هستند. روش هایی که تاکنون برای پیش بینی پدیده فرونشست استفاده شده اند عبارتند از:

- روش های تحلیلی که حل دقیق معادلات تحکیم را ارائه می دهد و استفاده از آن ها در نمونه های صحرایی بسیار مشکل و پیچیده است.
- روش های عددی مانند روش المان محدود، اجزای محدود و سایر روش های جدیدتر: این روش ها تحکیم و فرونشست را به صورت تقریبی با استفاده از معادلات دیفرانسیل حاکم بر این پدیده محاسبه می کنند.
- روش یادگیری ماشین که خود شامل روش های شبکه عصبی مصنوعی، روش ماشین بردار پشتیبان، الگوریتم های ژنتیک و ... می شود. این روش ماشین با استفاده از داده های ورودی و خروجی مدل مناسبی برای بیان رابطه بین این داده ها تهیه می کند. که نحوه ایجاد این مدل بر اساس روش های مختلف یادگیری ماشین و وجود و یا عدم وجود هریک از داده های ورودی یا خروجی متفاوت است. این روش در مقایسه با روش های عددی، روش جدیدتری می باشد.
- روش تابع تاثیر: این روش روشی ساده برای محاسبه فرونشست یک منطقه ساده در اثر برداشت آب زیرزمینی توسط چاه ها می پردازد. ابتدا برای محاسبه فرونشست در اثر معدنکاری استفاده می شد اما به دلیل یکسان بودن تقریبی روند فرونشست در اثر معدنکاری و برداشت بی رویه آب زیرزمینی، از آن می توان در پیش بینی فرونشست ناشی از برداشت نیز استفاده کرد. این روش در عین سادگی، محدودیت هایی در استفاده نیز دارد.
- روش محاسبه شاخص پتانسیل آسیب پذیری آبخوان با استفاده از هفت فاکتور موثر در فرونشست که به اختصار ALPRIFT نامیده می شود.

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی ۷۸

با استفاده از روش‌های ذکر شده می‌توان فرونشست در یک منطقه را در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با دقت قابل قبولی محاسبه و پیش‌بینی نمود.



بخش سوم: متدولوژی روش های بررسی شده برای پیش بینی فرونشست

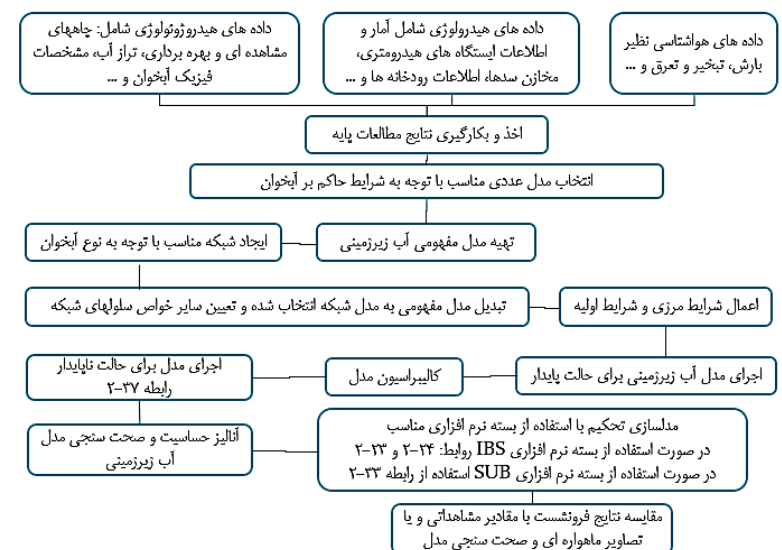
### ۱-۳۳ مقدمه

همانطور که در بخش های پیش اشاره شد روش های گوناگونی برای پیش بینی فرونشست تاکنون ارائه شده است. این روش ها می توانند با دقت قابل قبولی فرونشست در یک منطقه را در اثر استخراج بی رویه آب زیرزمینی محاسبه و پیش بینی کنند. در این بخش به ارائه یک گزارش مرحله به مرحله از نحوه استفاده از روش های مختلف بررسی شده در این پژوهش پرداخته می شود.

### ۱-۳۴ روش های عددی

### ۱-۳۵ روش تفاضل محدود

از این روش هم در نرم افزارهای مدل سازی مانند GMS یا MODFLOW استفاده شده است و هم می توان با استفاده از نرم افزارهای برنامه نویسی مانند MATLAB، معادلات گسسته شده تحکیم و جریان آب زیرزمینی را حل نمود. روند نمای<sup>۹۸</sup> مدل سازی عددی فرونشست با استفاده از نرم افزار به روش تفاضل محدود در شکل ۱-۲۰ خلاصه شده است. در صورت استفاده از نرم افزارهای برنامه نویسی، ابتدا معادله جریان در حالت ماندگار گسسته سازی و حل و مقادیر هد هیدرولیکی آب زیرزمینی به عنوان جواب اولیه برای حالت غیرماندگار (رابطه ۳۷-۲) استفاده می شود. پس از گسسته سازی رابطه ۳۷-۲ ایجاد یک رابطه ماتریسی و محاسبه مجهولات، مدل جریان آب زیرزمینی ایجاد می شود. پس از صحت سنجی مدل، از داده های بدست آمده برای جریان آب زیرزمینی در محاسبه فرونشست توسط تئوری های تحکیم ترازقی یا بایو استفاده می شود.



شکل ۱-۲۰ روند نمای محاسبه فرونشست با استفاده از نرم افزار توسط روش اجزای محدود.

## ۱-۳۶ روش اجزای محدود

در این روش نیز مشابه روش تفاضل محدود عمل می شود. در صورت استفاده از نرم افزارهای برنامه نویسی جهت محاسبه تحکیم، از روابط ۲-۳۸ و ۲-۴۱ که به ترتیب بیان کننده روابط گسسته سازی شده مربوط به تئوری یک بعدی ترازقی و تئوری سه بعدی Biot می باشند، استفاده می شود.

در روش های عددی ذکر شده، چه با استفاده از نرم افزارهای مدلسازی یا زبان های برنامه نویسی عدم وجود اطلاعات اولیه کامل و صحیح برای تهیه مدل مفهومی، تاثیر منفی بسیار زیادی در نتیجه نهایی خواهد داشت و اصلاح و شناسایی داده های غلط یا گمشده، کاری بسیار وقت گیر و پرهزینه می باشد. از طرف دیگر مدلسازی با استفاده از برنامه نویسی روش های عددی خود کاری بسیار مشکل و زمانبر می باشد.

## ۱-۳۷ روش یادگیری ماشین

در این روش با استفاده از پارامترهای موثر در ایجاد فرونشست منطقه به عنوان ورودی به مدل، مانند هد هیدرولیکی جریان، مقادیر تغذیه و تخلیه، ضریب آبدهی ویژه و... و هم چنین مقادیر موجود برای فرونشست یک منطقه با استفاده از داده های بدست آمده از تصاویر ماهواره ای یا مقادیر فرونشست مشاهداتی می توان با استفاده از روش های مختلف یادگیری ماشین مدلی با دقت قابل قبول برای پیش بینی فرونشست بدست آورد. با استفاده از این مدل می توان برای مقادیر متفاوت پارامترهای ورودی، مقدار فرونشست ایجاد شده در اثر آنها را پیش بینی کرد. بر خلاف روش های عددی، در صورت عدم وجود اطلاعات ورودی (پارامترهای آبخوان به صورت جامع و دقیق)، باز هم امکان ایجاد مدل وجود دارد. زیرا این روش ها قادر به بازسازی و اصلاح داده ها و حتی شناسایی داده های پرت و ناسازگار قبل از مدلسازی می باشند. یکی از دلایل استفاده گسترده این روش نسبت به روش های عددی شاید سادگی در کاربرد و توانایی بالای این روش در مدلسازی پیش بینی فرونشست می باشد.

## ۱-۳۸ روش تابع تاثیر

همانگونه که در بخش قبل این روش توضیح داده شد، مراحل انجام آن برای یک چاه پمپاژ به صورت زیر قابل بیان است:

۱. ایجاد پروفیل کاهش آب (ساختاری کیفی شکل به دلیل کاهش آب اطراف چاه پمپاژ) با استفاده از داده های مشاهداتی موجود و در صورت عدم وجود داده های مشاهداتی استفاده از روش های تحلیلی و عددی.
۲. گسسته سازی منطقه کاهش به تعدادی صفحه با ضخامت یکسان (معمولا ۴ صفحه در نظر گرفته می شود).
۳. محاسبه نشست هر یک از صفحات با استفاده از معادله تحکیم یک بعدی ترزاقی (رابطه)
۴. تکرار مراحل ۱ تا ۳ برای همه چاه های پمپاژ
۵. بهینه سازی سیستم با استفاده از داده های موجود
۶. انجام تحلیل های فرونشست و بدست آوردن نتایج
۷. بازنگری نتایج و تکرار گام ۳ با پارامترهای تصحیح شده و در صورت لزوم تکرار گام ۴

این روش در مقایسه با روش های دیگر فقط برای مسائل ساده قابل کاربرد است و در صورت وجود پیچیدگی یا نبود اطلاعات کافی در مورد آبخوان، قابل استفاده نخواهد بود.

## ۱-۳۹ نتیجه گیری

روش های متعددی برای پیش بینی فرونشست ارائه شده است. هر کدام از این روش ها به پارامترهای مخصوصی نیازمند هستند و تحلیل های خاص خود را انجام می دهند. نحوه استفاده از هر کدام از این روش ها به اختصار در این بخش ارائه شد. هم چنین به مزایا و معایب هر کدام نیز اشاره ای شد.

## ۲ تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۸۲

## ۲-۱ کلیات تحقیق

### ۲-۱-۱ مقدمه

پدیده‌ها و رویدادهای طبیعی بر اساس نوع واکنش و تأثیرگذاری می‌توانند برای جامعه بشری و محیط‌زیست مخرب یا مفید باشند. پدیده‌های مخرب (بلایای طبیعی مانند فرونشست زمین، زمین‌لغزش (رانس زمین)، زلزله، سیل و آتش‌فشان) که می‌توانند قابل پیش‌بینی و یا غیرقابل پیش‌بینی باشند، سالانه خسارت‌های جانی و مالی بسیاری را بر بشر و همچنین محیط‌زیست تحمیل می‌کنند. بررسی این پدیده‌ها، شناسایی الگوی رفتاری آن‌ها و پی بردن به چگونگی جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از آن‌ها امری مهم در تأمین آسایش و زندگی بهتر به منظور افزایش کیفیت زندگی بشری می‌باشد [۷۷]. یکی از پدیده‌هایی که از گذشته تا کنون خسارت‌های مالی و جانی بسیاری در ایران و سایر نقاط دنیا به بار آورده است، پدیده‌ی تغییر شکل و جابجایی سطح زمین از جمله پدیده‌ی فرونشست می‌باشد.

طبق تعریف ارائه‌شده توسط یونسکو پدیده‌ی فرونشست عبارت است از فروریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد. به‌طورمعمول این اصطلاح به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار افقی همراه باشد، گفته می‌شود [۷۸]. مهم‌ترین فعالیت‌های بشر که منجر به نشست سطح زمین می‌شوند استخراج آب‌های زیرزمینی و نفت و گاز، استخراج مواد معدنی و همچنین حرکت گسل‌ها و شهرسازی با سرعت بالا می‌باشند. فرونشست در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی به‌طورمعمول در دو محیط مختلف امکان‌پذیر می‌باشد: ۱- سنگ‌های انحلال‌پذیر که توسط نهشته‌های تحکیم نیافته مدفون‌شده‌اند، یا فرو چاله‌های کهن پرشده با نهشته‌های تحکیم نیافته که فشار هیدرواستاتیکی رو به بالای آب زیرزمینی در نگهداری آن‌ها مؤثر است. ۲- نهشته‌های جوان تحکیم نیافته و رسوبات آواری نیمه تحکیم یافته با تخلخل بالا که در زیر نهشته‌های آبرفتی، دریاچه‌ای و یا نهشته‌های دریایی کم‌عمق واقع‌شده‌اند [۷۹]. در ایجاد پدیده‌ی فرونشست در اثر برداشت نامناسب آب زیرزمینی، عوامل زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی بسیاری مؤثرند [۸۰].

وقوع پدیده‌ی فرونشست مشکلات بسیاری ازجمله تخریب جاده‌ها، مناطق مسکونی، شبکه‌های حمل‌ونقل و همچنین شبکه‌های انتقال نیرو و ... را به همراه خواهد داشت؛ که اندازه‌گیری و پهنه‌بندی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. عمومی‌ترین روش برای تعیین فرونشست استفاده از ترازبایی دقیق و ایجاد شبکه‌های ملی، محلی و خطوط خاص است. اندازه‌گیری‌های تناوبی ترازبایی اگرچه دقت موردنیاز را در تشخیص نشست‌های منطقه‌ای و محلی تأمین می‌کنند، اما به دلیل صرف وقت و هزینه‌ی بالا روش مناسبی برای پایش فرونشست و تولید اطلاعات سری زمانی نیستند. از سوی دیگر شبکه‌ی دائمی ژئودینامیک نیز که از سال ۲۰۰۴ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با ۱۲۰ ایستگاه دایر شده است، به دلیل عدم تراکم و پراکندگی نامناسب ایستگاه‌ها، جهت تحلیل زمانی پدیده‌ی فرونشست کفایت نمی‌کند.

از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی، با ورود ماهواره‌های راداری، فن تداخل‌سنجی راداری<sup>۱</sup> به‌عنوان ابزاری جدید جهت مطالعه‌ی ارتفاعی عوارض زمینی موردتوجه پژوهشگران قرار گرفت. روش‌های مختلف تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با روزهی

<sup>۱</sup> interferometric radar

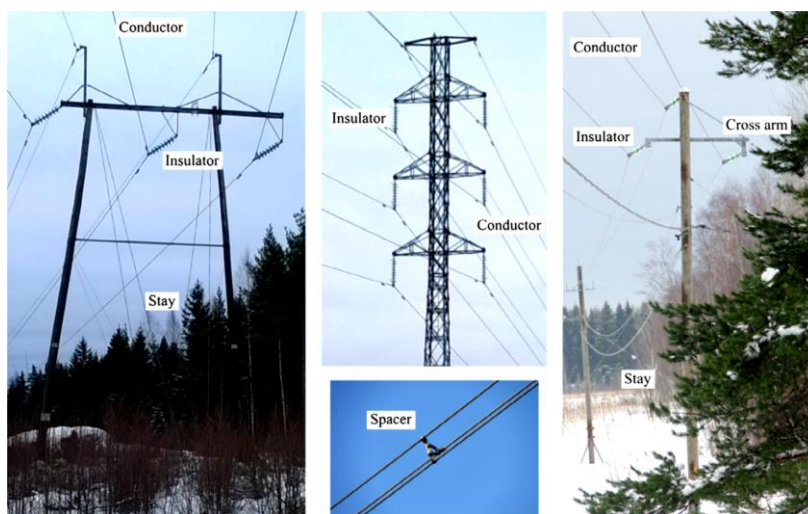
مجازی<sup>۱</sup> تبدیل به کارآمدترین ابزار جهت پایش پهنه های بزرگ زمین در یک دوره ی طولانی شده است [۸۱، ۸۲]. این روش اولین بار به منظور مطالعه ی حرکات سطح زمین در سال ۱۹۷۴ ابداع شد. اساس این روش، اندازه گیری تفاضلی فازهای تصاویر رادار اخذ شده از یک منطقه در یک بازه ی زمانی می باشد. به طور کلی خصوصیات چون برداشت پیوسته در سطح وسیع، دقت بالا، مقرون به صرفه بودن و امکان اخذ اطلاعات تحت هر شرایط آب و هوایی دلایل عمده استفاده از فن تداخل سنجی راداری در پایش جابجایی است. فراوانی بالای مشاهدات مکانی و زمانی روش تداخل سنجی راداری، در مقایسه با ترازبایی و سیستم تعیین موقعیت جهانی می تواند دید جامعی از طرز تغییر شکل را در اختیار نهد. همچنین یک تصویر راداری، امکان بررسی این پدیده را در سطح وسیع و در هر نوع منطقه ای، از جمله مناطق صعب العبور و کوهستانی، در اختیار می گذارد. علاوه بر فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، استفاده از این روش باعث صرفه جویی در زمان و هزینه می گردد [۸۳]

## ۲-۱-۲ طرح مسئله

الکتریسته نیازی حیاتی برای زندگی مدرن امروزی محسوب می شود و برای توزیع پیوسته آن همواره نیاز به پایش و تعمیرات مداوم خطوط انتقال نیرو هست. اهمیت این موضوع با افزایش وابستگی جامعه به الکتریسته، افزایش احتمال وقوع شرایط نامساعد جوی مانند توفان و همچنین مقررات سخت گیرانه در بسیاری از کشورها، در حال افزایش است [۸۴]. شبکه های الکتریکی اغلب شامل شبکه انتقال ملی، شبکه های منطقه ای و شبکه های توزیع هستند. پایش خطوط انتقال نیرو دو جنبه ی کلی دارد: مؤلفه های اصلی خطوط انتقال و عوارض اطراف آن ها (به خصوص پوشش گیاهی). وضعیت مؤلفه های اصلی خطوط انتقال نیرو نیاز به پایش مداوم برای شناسایی خرابی های ایجاد شده دارد (برای مثال خوردگی ها و صدمات مکانیکی). در کشورهایی با پوشش جنگلی قسمت اعظم این شبکه ها در مناطق جنگلی واقع شده اند. درختانی که در کنار خطوط انتقال نیرو رشد می کنند می توانند باعث ایجاد آسیب هایی به زیرساخت خطوط انتقال نیرو شوند و حتی می توانند باعث ایجاد قطع برق و آتش سوزی گردند. در نتیجه همواره به بازرسی پوشش گیاهی در راستای این خطوط انتقال نیرو جهت یافتن درختان و یا شاخه هایی که باید بریده شوند، نیاز هست. به علاوه توفان ها و دیگر بلایای طبیعی نیز می توانند باعث ایجاد آسیب های شدیدی به خطوط انتقال نیرو شوند. جنبه های عمومی پایش خطوط انتقال نیرو در بسیاری از مطالعات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، برای مثال Aggarwal, [85] et al. و [86] Katrasnik, et al. به مطالعه در زمینه ی مؤلفه های اصلی خطوط انتقال نیرو پرداختند. همچنین [87] Ahmad, et al. و [88] Ituen and Sohn و [89] Mills, et al. در زمینه ی پوشش های گیاهی در راستای خطوط انتقال نیرو مطالعه کرده اند. شکل ۱-۲ مؤلفه های اصلی خطوط انتقال نیرو و اصطلاحات مورد استفاده در مورد آن ها را نشان می دهد. هادی های بین دو تیر برق به شکل منحنی های سلسه وار هستند [۹۰].

<sup>1</sup> differential interferometric SAR (synthetic aperture radar)

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۸۴



شکل ۱-۲ نمونه ای از برج های انتقال (سمت چپ و میانه)، تیرهای چوبی (سمت راست) و دیگر مؤلفه های خطوط انتقال نیرو [۹۰]

روش های سنتی برای پایش خطوط انتقال نیرو شامل بررسی های میدانی و هوایی است. روش اصلی برای چندین دهه بدون تغییر مانده اند. این بررسی ها توسط گروه هایی که با پای پیاده و یا با بالگرد حرکت می کنند، انجام می گیرد و بسته به عواملی چون میزان هزینه، انواع مختلف مشکلات موجود (مؤلفه های آسیب دیده یا وجود پوشش گیاهی) و همچنین میزان قطعیت در تشخیص این مشکلات، اولویت بندی می شوند. روش کار زمینی بسیار سخت و زمان بر است که باعث می شود زمان ارزیابی ها طولانی تر شود و بنابراین نرخ تشخیص مشکل ها بالاتر است. روش بالگردی به دلیل سرعت زیاد مورد استفاده و توانایی محدود خدمه در مشاهده هم زمان انواع مشکل های احتمالی، میزان تشخیص محدودتری دارد. هر دو روش به مشاهدات بصری انسان بستگی دارند. علاوه بر بازرسی های بصری، امروزه می توان از ضبط ویدئو و دوربین های مختلف نیز استفاده کرد. این امر از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا عملیات جمع آوری داده ها می توانند در به حداقل رساندن هزینه ها بپردازد و همچنین داده های دیجیتالی امکان اندازه گیری دقیق، تجزیه و تحلیل های مکرر و ذخیره طولانی مدت برای مقایسه داده ها در طول زمان را فراهم می آورند. با این حال، تجزیه و تحلیل داده ها همچنان یک فرآیند دستی باقی مانده است و با وجود بهبود نرخ آشکارسازی مشکلات، کاهش قابل توجهی در هزینه حاصل نشده است. مناطق وسیعی باید در پایش های خطوط انتقال نیرو بررسی شوند، از این رو فن های سنجش از دور گزینه های جالبی را ارائه می دهند ۹۱

از آنجایی که قسمت اعظم ایران شامل مناطق خشک و بیابانی است پدیده ی غالب که باعث ایجاد آسیب به زیرساخت های خطوط انتقال نیرو می گردد، فرونشست زمین است. استفاده از روش هایی مثل سیستم تعیین موقعیت جهانی و ترازبایی و تیلتمتری و تداخل سنجی راداری فن های ژئودتیکی هستند که برای پایش و شناسایی پدیده ی تغییر شکل سطح به کار می روند. به خصوص داده های تداخل سنجی راداری از سنجنده های راداری که به تازگی توجه بسیاری را به دلیل صرفه اقتصادی، ویژگی های منحصر به فرد فنی، پایش محدوده های وسیع و حتی بازبینی گذشته، به خود جلب کرده اند. به علاوه، فن های پیشرفته تداخل سنجی (PSInSAR) که در دهه های اخیر توسعه داده شده اند، قادر به فراهم کردن دقت های میلی متری، قابل مقایسه با داده های ترازبایی دقیق و همچنین تراکم مکانی بالای اندازه گیری های تغییر شکل در طول بازه ی زمانی بلندمدت بدون نیاز به نصب تجهیزات یا دیگر دسترسی ها به منطقه مورد مطالعه، هستند [۹۲].

فناوری پیشرفته و جدید پردازش سیگنال سری زمانی تصاویر رادار با روزهی مجازی با در دسترس داشتن سنجنده های جدید راداری با زمان تصویربرداری مجدد کوتاه می توانند جهت به دست آوردن دقیق حرکت سطح زمین در منطقه ای وسیع با تراکم بالای نقاط به کار گرفته شوند. به علاوه زمان تصویربرداری مجدد کوتاه اجازه ی پایش تغییر شکل های سریع تری را نسبت به گذشته می دهد [۹۲].

از آنجایی که پدیده فرونشست می تواند باعث صدمات جبران ناپذیری به شبکه انتقال نیرو در سطح کشور شود نیاز است تا بتوان با استفاده از فن های سنجش ازدوری به پایش مداوم سازه های صنعت برق پرداخت.

### ۲-۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

استخراج بی رویه ی ذخایر طبیعی علاوه بر آنکه باعث کاهش این گنجینه های گران بها می شود، منجر به ایجاد پدیده ی فرونشست و خطرات زیان بار آن می گردد. این پدیده به بسیاری از سازه ها و زیر ساختارها در مناطق شهری و حومه آن مثل ساختمان ها، خیابان ها، بزرگراه ها، پل ها و خطوط انتقال نیرو آسیب های جبران ناپذیری وارد می نماید و ناهنجاری های بسیاری را در محیط زیست به دنبال دارد. بنابراین اندازه گیری شکل سطح زمین از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بر این اساس در سال های اخیر، شرکت های آب، نفت و گاز در اکثر مناطق جهان بر آن شدند تا به اطلاعات فرونشست یا نوسانات در راستای قائم منطقه جهت تضمین مدیریت صحیح تأسیسات و منابع طبیعی با دقت مکانی بالاتر و هزینه ی عملیاتی کمتر دست یابند [۸۰]. با در نظر گرفتن ضرورت بررسی و مطالعه پدیده فرونشست در دشت های ایران و همچنین بررسی علل به وجود آمدن آن در این پژوهش، به استفاده از روش های نوین تداخل سنجی راداری به پایش این پدیده و تأثیراتی که می تواند بر سازه های صنعت برق داشته باشد، پرداخته می شود.

### ۲-۱-۴ اهداف و سؤالات تحقیق

هدف اصلی از این مطالعه به دست آوردن تغییرات مختصات دقیق سازه های صنعت برق در اثر پدیده ی فرونشست با استفاده از فن تداخل سنجی راداری است.

سؤالاتی در راستای هدف این پژوهش به وجود می آید که باید به آن ها پاسخ داد:

- فن تداخل سنجی چگونه به برآورد میزان فرونشست در سازه های صنعت برق به کار می رود؟
- دقت این روش در برآورد میزان جابه جایی ها در جهات سه گانه چقدر است؟

### ۲-۱-۵ ساختار پژوهش

پژوهش حاضر شامل بخش های مختلفی است که در اینجا به بررسی ساختار مطالب ارائه شده در آن پرداخته می شود. فصل اول این گزارش به بیان اطلاعاتی در زمینه ی سنجش ازدور و تداخل سنجی و ضرورت انجام تحقیق پرداخت.

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۸۶

در بخش دوم به ارائه ی مقدماتی بر سنجش ازدور پیشرفته با استفاده از تصاویر راداری و نحوه ی اخذ داده با این نوع سنجنده پرداخته می شود.

در بخش سوم پیشینه ی تحقیقات انجام شده در بررسی پدیده ی فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری در ایران و جهان بررسی می شود.

در بخش چهارم روش های تداخل سنجی موجود به تفصیل توضیح داده می شوند.

در بخش پنجم ضمن معرفی داده های مورد استفاده، روش اجرایی مورد نظر ارائه می گردد.

در بخش ششم به ارائه نتایج به دست آمده و همچنین ارزیابی این نتایج پرداخته می شود.

در بخش هفتم نیز ضمن بیان نتیجه گیری نهایی پیشنهادهایی برای بهبود کار و یا مطالعات مورد نیاز آینده ارائه خواهد شد.



## ۲-۲ تصویربرداری رادار با روزنه مجازی<sup>۱</sup> و اصول تداخل سنجی راداری<sup>۲</sup>

### ۲-۲-۱ مقدمه

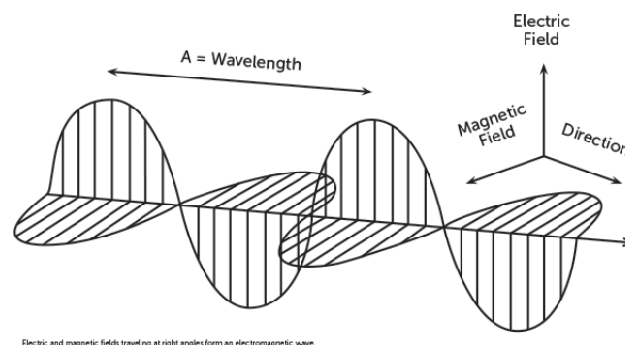
در این فصل به بررسی نحوه تشکیل تصویر راداری و همچنین اصول تداخل سنجی راداری جهت به دست آوردن ارتفاع و تغییرات ارتفاعی پرداخته می شود.

### ۲-۲-۲ ویژگی های سیگنال های رادار

تصویربرداری راداری، امواج ماکروویو با طول موج هایی در باند  $X$ ، باند  $C$  و باند  $L$  را ارسال و دریافت می کند. رادار این پالس ها را بدون هیچ منبع خارجی تولید می کند، بنابراین قادر است در طول روز و شب کار کند، همچنین از آنجایی که رادار از قسمت ماکروویو طیف الکترومغناطیس با امواج بلندتر از طول موج نور مرئی استفاده می کند، سیستم نسبت به مه، ابر، باران و برف حساسیت کمتری دارد. این دو مزیت نسبت به تصویربرداری اپتیک، به منظور بررسی پدیده های در حال تغییر سریع و یا به منظور نظارت در نواحی ابری حائز اهمیت است [۹۳].

### ۲-۲-۳ امواج الکترومغناطیس

موج الکترومغناطیس موجی متشکل از دو میدان الکتریکی و مغناطیسی است که جهت نوسان آن ها عمود بر جهت انتشار موج و عمود بر یکدیگر می باشد، شکل ۲-۲ بیانگر یک موج سینوسی قطبیده<sup>۳</sup> خطی می باشد.



شکل ۲-۲- موج الکترومغناطیس [۹۴]

<sup>1</sup> SAR (Synthetic Aperture Radar)

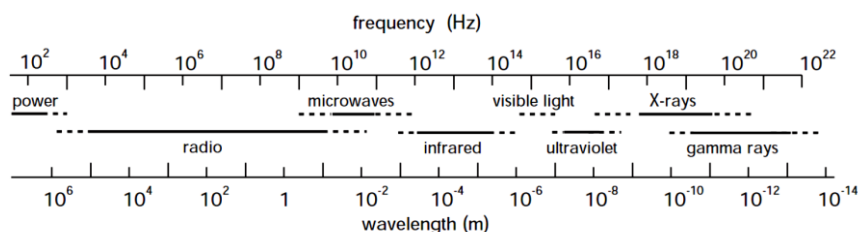
<sup>2</sup> Radar Interferometry

<sup>3</sup> polarized

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۸۸

### ۱-۳-۲ طیف الکترومغناطیس

طیف الکترومغناطیس<sup>۱</sup> متشکل از تمامی طول موج ها با فرکانس های موج الکترومغناطیس می باشد، کوتاه ترین این طول موج ها امواج گاما<sup>۲</sup> با بیشترین فرکانس، و بلندترین طول موج ها امواج ماکروویو<sup>۳</sup> می باشد (شکل ۲-۳). طیف الکترومغناطیسی به چند بخش تقسیم می شود که هر کدام از بخش ها خصوصیت های مشابهی دارند. سنجنده های اولیه قادر به دریافت و ثبت امواج در محدوده ی نوری<sup>۴</sup> و مادون قرمز<sup>۵</sup> بودند، اما با آمدن سنجنده های راداری امکان تصویربرداری و اخذ اطلاعات در محدوده ی ماکروویو نیز امکان پذیر شد [۹۴].



شکل ۲-۳- محدوده طیف الکترومغناطیس [۹۴]

### ۴-۲-۲ طول موج و فرکانس های ماکروویو

در سنجش از دور راداری از امواج با طول موج ۱ متر تا ۱ میلی متر استفاده می شود. همانند سایر محدوده های طیف الکترومغناطیس محدوده ی ماکروویو دارای خصوصیات مشخصی است. برای مثال امواج ماکروویو توانایی عبور از ابر، باران، دود، مه و غبار را دارند، اگرچه قطرات باران موجب تضعیف قدرت موج ارسالی خواهد شد، در فرکانس های کمتر از ۲GHz (طول موج ۱۵cm) این تأثیرات بسیار کمتر و قابل اغماض می باشد. اما با کاهش طول موج این تأثیرات بیشتر خواهد شد.

با توجه به طول موج بالاتر امواج ماکروویو نسبت به امواج نوری، برخورد موج ماکروویو به سطح یک جسم، یک برخورد درشت مقیاس<sup>۶</sup> خواهد بود. بنابراین موج برگشتی خصوصیتی از اجسام را از قبیل حساسیت به شکل هندسی، پستی و بلندی، رطوبت و قابلیت نفوذ در اعماق به ما خواهد داد که در محدوده ی نوری به دلیل طول موج کوتاه تر امکان پذیر نیست.

فرکانس های ماکروویو به چند محدوده تقسیم می شود که هر کدام با حروف انگلیسی نام گذاری شده اند. دامنه های استاندارد این امواج در جدول ۲-۱ ارائه شده است.

جدول ۲-۱- دامنه های استاندارد امواج ماکروویو

<sup>1</sup> electromagnetic spectrum

<sup>2</sup> gamma

<sup>3</sup> microwave

<sup>4</sup> optical

<sup>5</sup> infrared

<sup>6</sup> macroscopic

| فرکانس (گیگاهرتز) | طول موج (سانتی متر) | نام باند رادار |
|-------------------|---------------------|----------------|
| 26.5-40           | 0.75-1.1            | Ka             |
| 18-26.5           | 1.1-1.67            | K              |
| 12.5-18           | 1.67-2.4            | Ku             |
| 8-12.5            | 2.4-3.75            | X              |
| 4-8               | 3.75-7.5            | C              |
| 2-4               | 7.5-15              | S              |
| 1-2               | 15-30               | L              |
| 0.3-1             | 30-100              | UHF            |
| 0.22-0.39         | 77-136              | P              |

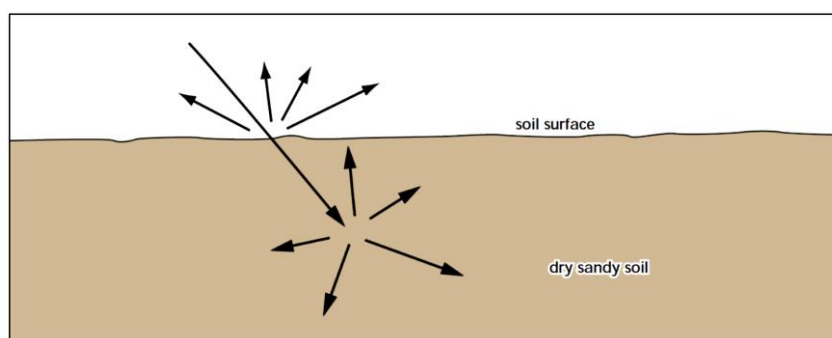
### ۲-۳ بررسی برخی عوامل تأثیرگذار در سیگنال راداری بازگشتی از جسم

مقادیر خاکستری تشکیل دهنده یک تصویر SAR، نتیجه‌ی امواج برگشتی از هدف‌ها و عوارض زمینی می‌باشد. عوارضی که نسبت بیشتری از موج ارسالی از آن‌ها به طرف سنجنده برگشته باشد در تصاویر روشن‌تر ظاهر می‌شوند و برعکس عوارضی که نسبت کمتری از موج ارسالی را به طرف سنجنده بازگردانده باشند تیره‌تر ظاهر خواهند شد. میزان طول موج بازگشتی به سنجنده تابعی از خصوصیات هدف (شکل هندسی، میزان پستی بلندی، ثابت دی‌الکتریک، زاویه‌ی برخورد محلی) و ویژگی‌های سنجنده از قبیل طول موج (فرکانس)، زاویه‌ی برخورد، قطبش و جهت دید می‌باشد. ترکیبی از این عوامل میزان موج برگشتی به سنجنده را تعیین می‌کند. بنابراین تغییر در میزان موج برگشتی به سنجنده می‌تواند ناشی از تغییر در هر یک از پارامترهای فوق باشد. آگاهی و آشنایی با تأثیر و نقش هر کدام از این پارامترها بر میزان موج برگشتی به تفسیر درست تصویر رادار کمک خواهد کرد [۹۵].

#### ۲-۳-۱ شکل هندسی

شکل هندسی و فیزیکی یک جسم نقش قابل توجهی در میزان موج برگشتی به سمت سنجنده رادار خواهد داشت. برای مثال شکل شاخ و برگ درختان در میزان موج برگشتی آن‌ها تأثیرگذار خواهد بود و یا این که شکل عوارض مصنوعی خود عامل مهمی در بازپخش موج رادار خواهد بود. علاوه بر انعکاس سطحی در برخی از سطوحی که موج رادار به داخل آن‌ها نفوذ می‌کند، امکان انعکاس یا به عبارتی پراکندگی حجمی بعد از نفوذ موج رادار به داخل سطح وجود دارد. بنابراین موج دریافتی توسط سنجنده می‌تواند ترکیبی از بازپخش سطحی و حجمی باشد. خصوصیات فیزیکی محیطی که موج بر آن وارد شده است (خصوصاً میزان رطوبت آن) همچنین ویژگی‌های سنجنده از قبیل طول موج، قطبش و زاویه‌ی برخورد، نقش تعیین کننده‌ای در میزان بازپخش حجمی خواهد داشت. شکل ۲-۴ انعکاس حجمی در تصویربرداری رادار را نشان می‌دهد [۹۴].

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۹۰



شکل ۲-۴- انعکاس حجمی در تصویربرداری راداری [۹۵]

## ۲-۳-۲ ثابت دی الکتریک<sup>۱</sup>

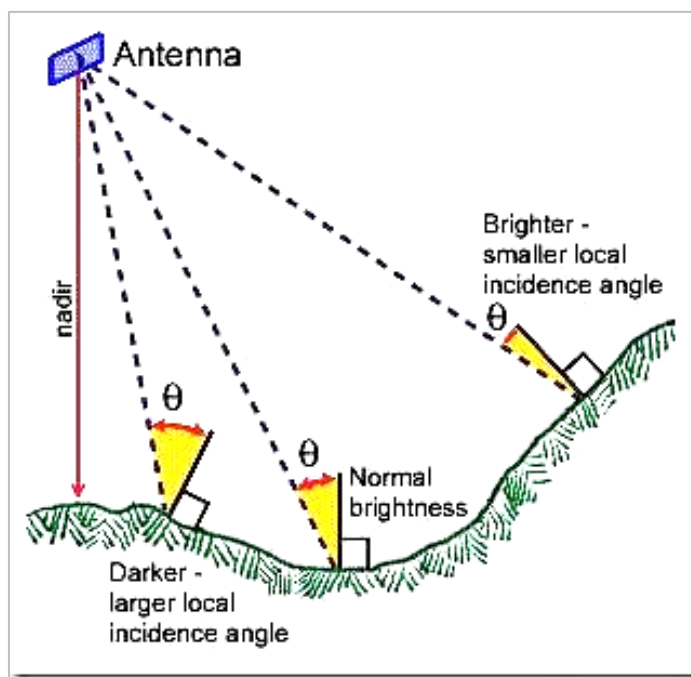
ثابت دی الکتریک بیانگر خصوصیات الکتریکی جسم می باشد و نشان دهنده ی این است که چه مقدار از سیگنال تابیده شده به جسم جذب، انعکاس و یا عبور می یابد. در سنجش از دور راداری سطوح با ثابت دی الکتریک بالا مقدار زیادی از طول موج تابیده شده را برمی گردانند. بنابراین، این گونه اجسام با سطوح در یک تصویر رادار روشن تر از سطوح با ثابت دی الکتریک پایین ظاهر می شوند. آب، نمک، فلزات و گیاهان زنده دارای ثابت دی الکتریک بالایی نسبت به اجسامی مانند صخره ها و سنگ ها، یخ دریاها، خاک ها، شن ها، ماسه های خشک و گیاهان مرده هستند. بنابراین افزایش هر کدام از مواد با ثابت دی الکتریکی بالا در یک محیط باعث افزایش میزان طول موج برگشتی از آن محیط به سمت سنجنده خواهد شد. برای مثال تصویری که بلافاصله بعد از یک بارندگی از یک جنگل گرفته شده است بسیار روشن تر از تصویری خواهد بود که قبل از بارندگی از آن محل تهیه شده است [۹۶].

## ۲-۳-۳ زاویه ی برخورد محلی<sup>۲</sup>

یکی دیگر از عواملی که مستقیماً بر طول موج برگشتی از یک جسم تأثیرگذار است، زاویه ی برخورد طول موج با سطح می باشد. زاویه ی برخورد محلی زاویه ی اصلی است که موج رادار به هنگام برخورد به یک نقطه از هدف با آن می سازد. این زاویه تابعی از شیب، جهت سطح هدف و جهت تابش سنجنده رادار می باشد. برای مثال سطحی که کاملاً رو به سنجنده رادار قرار دارد (در این صورت زاویه ی برخورد محلی کوچک خواهد بود) یک بازتابش قوی به سمت سنجنده خواهد داشت و در تصویر رادار بسیار روشن تر از عارضه ای ظاهر خواهد شد که زاویه ی برخورد محلی بزرگتری دارد. شکل ۲-۵ تأثیر زاویه ی برخورد محلی روی میزان روشنایی تصویر را نشان می دهد [۹۶].

<sup>1</sup> dielectric constant

<sup>2</sup> Local Incidence Angel



شکل ۲-۵- تأثیر زاویه برخورد محلی بر میزان روشنایی تصویر [۹۶]

## ۲-۴ رادار

اصطلاح رادار مخفف ردیابی و مسافت یابی رادیویی<sup>۱</sup> است. یک رادار سه کار اصلی انجام می دهد:

۱. ارسال پالس<sup>۲</sup> به سمت هدف

۲. دریافت بخش منعکس شده ی پالس پس از برخورد به هدف و اندازه گیری قدرت پالس

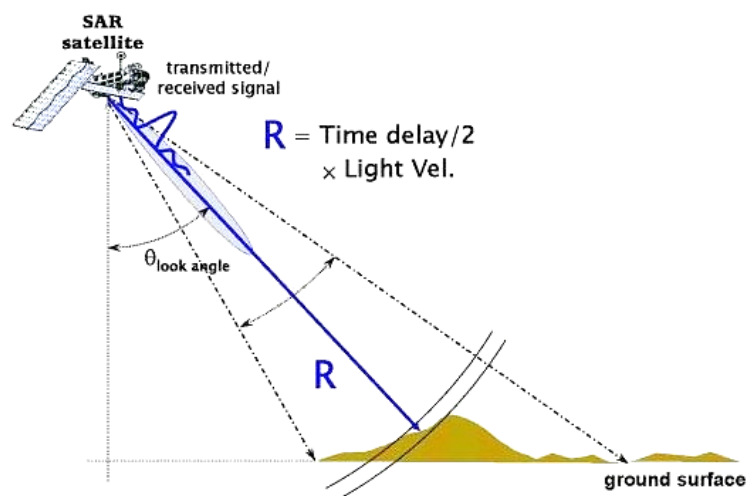
۳. اندازه گیری تأخیر زمانی سیگنال های برگشتی.

هدف اولیه ی رادار تعیین فاصله سنجنده تا بازتابنده است که این فاصله با حاصل ضرب زمان رفت و برگشت پالس در سرعت سیر آن تعیین می شود. شکل ۲-۶ هندسه تصویربرداری رادار را نمایش می دهد.

<sup>۱</sup> Radio Detection And Ranging (RADAR)

<sup>۲</sup> Pulse

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۹۲



شکل ۲-۶- ساختار کار SAR [۹۷]

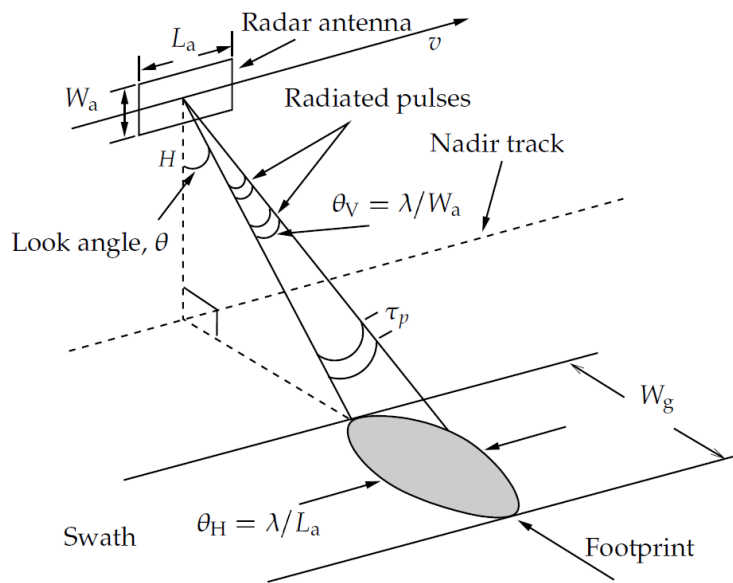
به منظور عکس برداری از عوارض زمین، رادار روی یک پایه ی متحرک (هواپیما یا ماهواره) قرار گرفته است و سیستم تصویربرداری راداری مانند SLAR و یا SAR استفاده می شود.

#### ۱-۴-۲ تصویربرداری در جهت رنج و آزیموت

اکثر سامانه های سنجش از دوری راداری جانب نگر هستند و جهت ارسال پالس بر مسیر پرواز عمود است. جهت پرواز (جهتی که ماهواره یا هواپیما حرکت می کند) جهت آزیموت یا Along\_track نامیده می شود. جهتی که رادار پالس را ارسال و دریافت می کند رنج مایل یا Across\_track و تصویر آن بر روی سطح زمین رنج زمینی نامیده می شود. ناحیه ی روشن شده روی زمین جای پا<sup>۱</sup> و نوار آن پهنای گذر<sup>۲</sup> نامیده می شود. المان های اصلی و هندسی رادار جانب نگر در شکل ۲-۷ آمده است.

<sup>۱</sup> Footprint

<sup>۲</sup> Swath



شکل ۲-۷- ساختار رادار جانب نگر، آنتن رادار پالس‌هایی با طول، عرض پرتو افقی  $\theta_H$  و پرتو عمودی  $\theta_V$  و با زاویه  $\theta$  و نسبت به قائم ارسال می‌کند [۹۸]

درحالی‌که پالس‌ها در جهت رنج ارسال و دریافت می‌شوند حسگر در جهت آزمون حرکت می‌کنند. در جهت رنج سیگنال‌های بازگشتی از اشیاء با رنج‌های متفاوت، بر اساس تفاوت زمان طی شده منظم می‌شوند. شیفت دوپلر درواقع همان شیفت فرکانس است که به دلیل حرکت نسبی بین فرستنده و گیرنده در اثر پدیده دوپلر ایجاد می‌شود. در جهت آزمون اشیاء با زوایای متفاوت نسبت به رادار بر اساس شیفت دوپلر متفاوت منظم می‌شوند. بنابراین تفاوت زمانی  $\Delta t = \frac{2\Delta r}{c}$  و شیفت دوپلر  $f_D$ ، دو مختصات را برای عکس‌ها فراهم می‌کند که عبارت‌اند از: رنج یا  $Across\_track$  و آزمون یا  $Along\_track$  بنابراین عکس رادار دوبعدی ساخته می‌شود، که هر المان از این آرایه‌های دوبعدی شامل دامنه و فاز است.

## ۲-۴-۲ تصویر مختلط SAR

یک تصویر SAR می‌تواند مانند یک موزاییک دیده شود. همانند یک آرایه‌ی دوبعدی تشکیل شده به وسیله‌ی سطرها و ستون‌ها که شامل المان‌های عکسی کوچک (پیکسل‌ها) هستند. هر پیکسل با یک ناحیه‌ی کوچک روی زمین مرتبط است که سلول رزولوشن<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. سلول رزولوشن در جهت آزمون و رنج بستگی به مشخصات سیستم SAR دارد.

سیگنال‌های الکترومغناطیس راداری، سیگنال‌های مختلطی هستند که از دو قسمت حقیقی (Re) و موهومی (Im) تشکیل شده است.

<sup>1</sup> resolution cell

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۹۴

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{Im}{Re} \right) \quad \text{رابطه ۱-۲}$$

$$a = \sqrt{Im^2 + Re^2} \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

این اطلاعات در ناحیه ی ماکروبو به وسیله ی پراکنده سازها (صخره ها، پوشش های گیاهی، ساختمان ها) در داخل سلول رزولوشن متناظر تصویر شده است. ردیف های عکس، متناظر با مکان های آزمون متفاوت هستند. در حالی که ستون های آن نمایش دهنده ی رنج مایل متفاوت هستند. عامل کلیدی در تصویربرداری رادار استفاده از پالس های راداری همدوس است که در آن فازها به خوبی دامنه دریافت می شوند.

تصویر SAR نهایی شامل اندازه گیری هایی از دامنه ی تابش پراکنده شده به سمت رادار از جانب جسم (پراکنده ساز) در سلول رزولوشن SAR است. دامنه، وابستگی بیشتری به زبری پراکنده سازها در سطح دارد تا ترکیب شیمیایی آن ها. عموماً صخره ها و مناطق شهری دامنه های قوی تری را نشان می دهند در حالی که سطوح صاف (مانند آب ها) دامنه های پایین تری را نشان می دهند زیرا پرتو به سمت رادار بازتاب می شود. تصویر SAR حاصل عمدتاً به صورت میانگینی از درجات خاکستری دیده می شود (شکل ۲-۷). نقاط روشن نمایش دهنده نقاطی با تابش پراکنده شده قوی هستند (مانند مناطق شهری) در حالی که پیکسل های تیره متناظر با تابش پراکنده شده ی ضعیف هستند (مانند آب ها).

علاوه بر دامنه، یک تصویر راداری دارای مقادیر فاز برای هر پیکسل است که این مقدار به فاصله ی زمین تا ماهواره و تأخیر فاز به دلیل اتمسفر و شیفت فاز در اثر برخورد سطح زمین برای هر پیکسل بستگی دارد. از آنجاکه عوارض زمینی رفتار متفاوتی نسبت به سیگنال راداری دارند، (ضرب هدايت مختلف، ویژگی های دی الکتریک مختلف و مسافت مختلف)، فاز نتیجه شده به صورت تصادفی دچار تغییر می شود. این تغییرات تصادفی می تواند به صورت نویز روی تصویر نمایان شود. به منظور استخراج اطلاعات هندسی از تصویر فاز، لازم است اثرات تصادفی با ترکیب تصاویر راداری به حداقل برسد [۹۷].

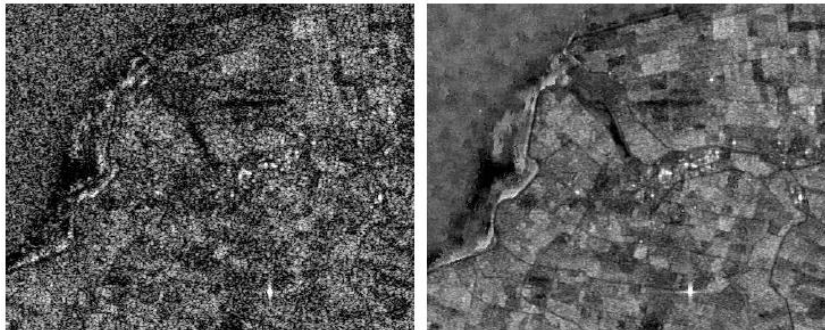
### ۳-۴-۲ اسپکل<sup>۱</sup>

حضور چندین پراکنده ساز در هر سلول رزولوشن SAR اثری به نام اسپکل را در تصویر راداری ایجاد می کند. این پدیده در سیستم تصویربرداری همدوس SAR رایج است ولی در سیستم تصویربرداری نوری این اثر وجود ندارد. نواحی یکپارچه از سطح زمین با وسعت زیاد در سلول های رزولوشنی مختلف با دامنه های متفاوت تصویر می شوند. اثر بصری آن یک صفحه به اصطلاح "فلکل نمکی" است که بر روی یک تصویر با دامنه ی یکپارچه قرار گرفته است. این اثر اسپکل نام دارد که اثر مستقیم انطباق سیگنال های منعکس شده از تعداد زیادی از پراکنده سازهای ابتدایی کوچک است که در داخل سلول رزولوشن تصویر می شود. این سیگنال ها که به علت بازتاب چندگانه بین پراکنده سازها فاز تصادفی دارند به سیگنال های بازتاب شده اضافه می شوند. از دید شهودی دامنه ی نهایی به عدم تعادل بین سیگنال های مثبت و منفی

<sup>۱</sup> Speckle



بستگی دارد. اسپکل تأثیر مهمی بر روی کیفیت و سودمندی تصاویر SAR دارد. عموماً قطعه‌بندی تصاویر از اسپکل ضرر می‌بیند. اگرچه با اخذ تصاویر بیشتر از نواحی یکسان و در زمان‌های متفاوت و یا با زوایای تابش متفاوت اثر اسپکل کاهش می‌یابد. میانگین‌گیری از چندین عکس منجر به حذف تغییر دامنه‌ی تصادفی و حفظ قسمت ثابت دامنه می‌شود [۹۹]. در شکل ۸-۲ سمت چپ تصویر فیلتر نشده و در سمت راست آن تصویر فیلتر شده با روش میانگین‌گیری را مشاهده می‌شود.



شکل ۸-۲- اثر اسپکل در تصاویر راداری (چپ: تصویر فیلتر نشده، راست: تصویر فیلتر شده) [۱۰۰]

#### ۴-۴-۲ توان تفکیک<sup>۱</sup> تصاویر راداری

توان تفکیک عبارت است از توانایی سنجنده راداری برای اینکه دو شیء نزدیک به یکدیگر را به صورت مجزا ببیند. یک تصویر SAR قدرت تفکیک ضعیفی در جهت رنج و آزیموت دارد و در کل داده‌های پردازش نشده شبیه نویز ظاهر می‌شوند (شکل ۸-۲).

قدرت تفکیک رنج مایل با استفاده از طول پالس  $\tau_p$  تعیین می‌شود. اگر کوتاه‌ترین اختلاف زمانی قابل تشخیص، طول پالس در نظر گرفته شود، قدرت تفکیک رنج مایل از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید (شکل ۲-۹):

$$\Delta R_{slant range} = \frac{C\tau_p}{2} \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

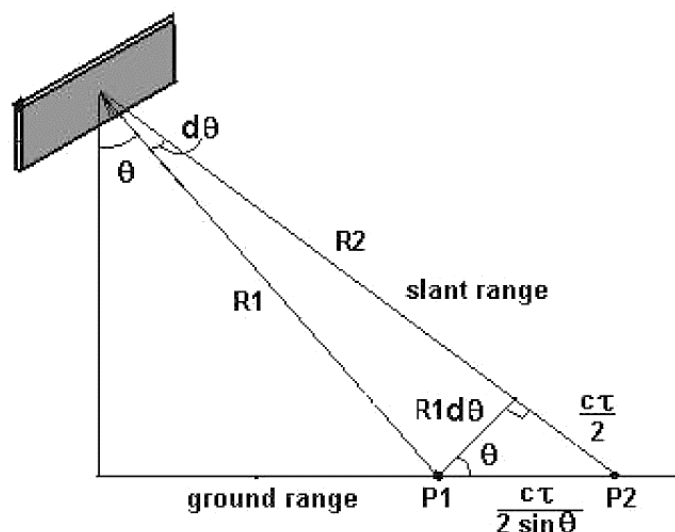
C سرعت نور و فاکتور ۲ ناشی از سفر رفت و برگشت پالس است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک طول پالس کوچک‌تر قدرت تفکیک بالاتری در جهت رنج می‌دهد.

توان تفکیک رنج زمینی با زاویه تابش  $\theta$ :

$$\Delta R_{ground range} = \frac{C\tau_p}{2 \sin \theta} \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

<sup>۱</sup> Resolution

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۹۶



شکل ۹-۲- نمایش توان تفکیک تصویر راداری در راستای رنج [۱۰۱]

همان طور که از روابط بالا مشاهده می شود، با کاهش طول پالس، توان تفکیک افزایش می یابد. از طرفی با کاهش طول پالس به منظور افزایش توان تفکیک، نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) سیگنال بازگشتی کاهش می یابد. بنابراین سیستم SAR از پالس های مدوله شده ای استفاده می کند که به اندازه ی کافی بلند هستند تا قدرت زیادی تولید کنند و بعد از فشرده سازی به اندازه ی کافی کوتاه هستند تا توان تفکیک بالایی را در جهت رنج حاصل کنند. این روش فشرده سازی پالس<sup>۱</sup> نام دارد.

در جهت آزمون، دو عارضه که در یک رنج یکسان R قرار گرفته اند مجزا تشخیص داده می شوند، اگر هر دو در یک اشعه ی رادار به صورت هم زمان نباشند، یعنی باید در یک فاصله ی حداقل مساوی با عرض جای پا باشند. از آنجایی که عرض جای پا به وسیله ی عرض آنتن  $\beta_H = \frac{\lambda}{L_a}$  تعیین می شود، قدرت تفکیک آزمون از رابطه ی ۲-۵ به دست می آید:

$$\Delta R_a = R\beta_H = \frac{R\lambda}{L_a} \quad \text{رابطه ۲-۵}$$

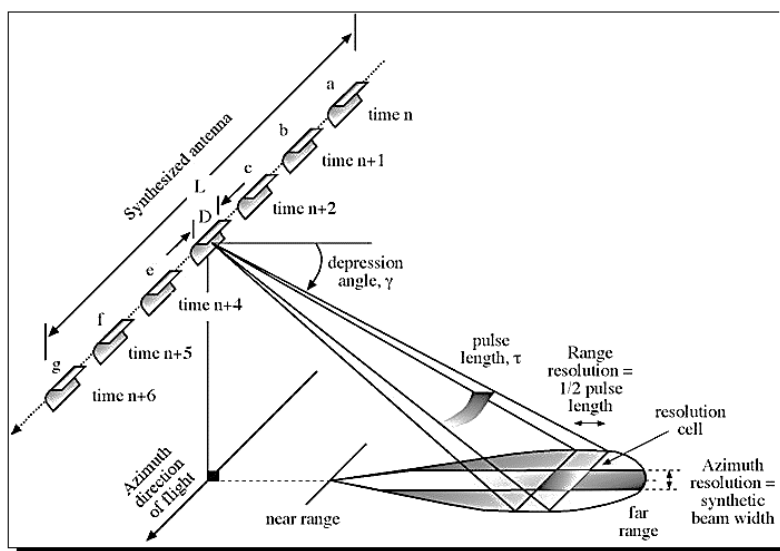
که  $\lambda$  طول موج و L طول آنتن است. توان تفکیک آزمون با افزایش طول آنتن و کاهش طول موج بهبود می یابد. از آنجایی که مونتاژ آنتن بزرگ سخت است، آنتن بلند به وسیله ی حرکت به سمت جلو ماهواره به صورت مصنوعی ساخته می شود [۱۰۱].

<sup>۱</sup> Pulse compression

## ۲-۴-۵ درجه ی مصنوعی<sup>۱</sup> و ویژگی های هندسی

همان طور که در رابطه ۲-۵ دیده می شود، طول آنتن رادار رابطه ی مستقیمی با توان تفکیک آزیموت دارد. هر چه طول آنتن بلندتر باشد، به همان نسبت توان تفکیک آزیموت نیز بالاتر خواهد بود. به عنوان مثال برای به دست آوردن توان تفکیک آزیموت ۴ متر، با فرض فاصله ۸۴۴ کیلومتر و طول موج ۵/۶۶ سانتی متر، آنتنی به اندازه ی ۱۲ کیلومتر مورد نیاز خواهد بود که در عمل میسر نیست. با تغییراتی در چگونگی حرکت سکوی رادار و ثبت و پردازش سیگنال های بازتابیده شده می توان بر این محدودیت غلبه کرد. به این ترتیب که با تغییر در نحوه ی رفتار رادار به صورت مجازی طول آنتن رادار را افزایش داد. شکل ۲-۱۰ چگونگی رسیدن به این خواسته را تشریح می کند. در این روش با استفاده از فن های پردازش سیگنال پیشرفته، آنتن طویل مجازی ایجاد می شود.

ابتدا شیء هدف، سیگنال های ماکروویو را به صورت پالس دریافت می کند و پژواک های هر پالس توسط رادار ثبت می شوند. سکوی رادار در مسیر مستقیم به طور پیوسته در حال حرکت است. در طول زمانی که شیء هدف در معرض پالس های رادار قرار دارد عمل سیگنال های بازتابیده شده از شیء توسط رادار انجام می پذیرد. زمان چندانی طول نمی کشد تا طول آنتن ترکیبی مشخص می گردد. این روش با افزایش پهنای زاویه ای و همچنین کاهش سرعت سکو، توان تفکیک آزیموت را در محدوده ی دور افزایش می دهد. در نتیجه توان تفکیک در راستای آزیموت ثابت باقی می ماند. به فناوری فوق که جهت افزایش دقت برد صورت می پذیرد SAR<sup>۲</sup> گفته می شود. این روش امروزه در اکثر رادارهای هوایی و فضایی استفاده می شود [۱۰۲].



<sup>۱</sup> synthetic aperture

<sup>۲</sup> synthetic aperture radar

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۹۸

شکل ۲-۱۰- ساختار رادار با دریچه مصنوعی SAR، هدف چندین بار توسط رادار در طول حرکت آن تصویربرداری می شود. راستای پرواز ماهواره از پشت به جلو است [۱۰۲].

در اینجا اثر معروف دوپلر، حرکت نسبی بین ارسال کننده و دریافت کننده شیفت فرکانسی را نتیجه می دهد. از آنجایی که هدف<sup>۱</sup> ثابت به وسیله حرکت رادار در چندین زمان نمایش داده می شود، سابقه فرکانس دوپلر از این هدف ضبط شده و برای تشخیص هدف در جهت آزیموت مورد استفاده قرار می گیرد. اگر هدف از رادار با زاویه ی ۹۰ درجه مشاهده شود شیفت دوپلر صفر و اگر هدف، جلو باشد  $f_D$  مثبت و اگر عقب باشد  $f_D$  منفی است، قدرت تفکیک آزیموت با روزهی مجازی از رابطه ۶-۲ به دست می آید:

$$\Delta R_a = L/2$$

رابطه ۶-۲

## ۶-۴-۶ اعوجاجات هندسی

تصویربرداری SAR از تأخیر زمانی بین ارسال و دریافت پالس به منظور تعیین موقعیت اهداف نسبت به یکدیگر استفاده می کند. این خاصیت SAR، هندسه ی پهلونگر و نیز تبدیل رنج مایل به رنج زمینی باعث جابجایی عوارض توپوگرافی از موقعیت خودشان می گردد. اعوجاجات هندسی به وجود آمده در تصویر SAR به ۳ دسته ی کلی سایه<sup>۲</sup>، کوتاه شدگی<sup>۳</sup> و هم پوشانی<sup>۴</sup> تقسیم می شود [۹۳].

### ۱-۶-۴-۲ سایه در تصاویر راداری

سایه هنگامی در تصویر SAR رخ می دهد که رادار دید پایین نگر دارد و زاویه ی تابش و بزرگ تر از زاویه شیب  $\alpha$  است. ( $\theta < \alpha$ ) در این حالت نواحی به وسیله نواحی با شیب بالاتر محو می شود و به صورت واضح تصویربرداری نمی شود (شکل ۲-۱۱).

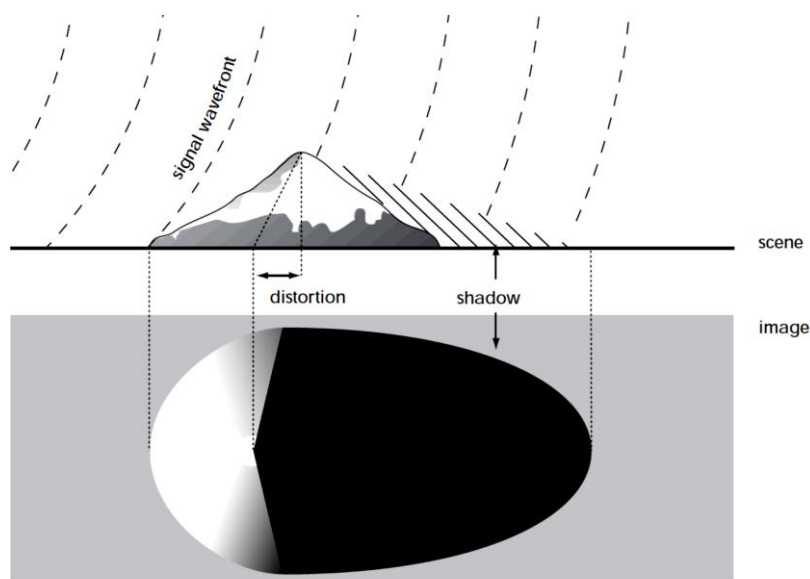
درواقع سایه هنگامی رخ می دهد که قسمت جلویی کوه و با شیب بر روی قسمت عقبی شیب و یا کوه سایه می اندازد. همان طور که در شکل دیده می شود. این پدیده در زوایای تابش کم نسبت به زوایای تابش بزرگ اثر بدتری دارد. درواقع این نوعی معامله است، ماهواره هایی با شیب کم تر مشکلات زیادی برای تصویر کردن تمام نواحی شیب دار از یک ناحیه دارند، اگر نواحی با سایه وجود داشته باشد. اما این ماهواره ها ممکن است برای تصویر کردن نقاط خاص با شیب بسیار زیاد مناسب تر باشند.

<sup>1</sup> target

<sup>2</sup> Shadow

<sup>3</sup> Foreshortening

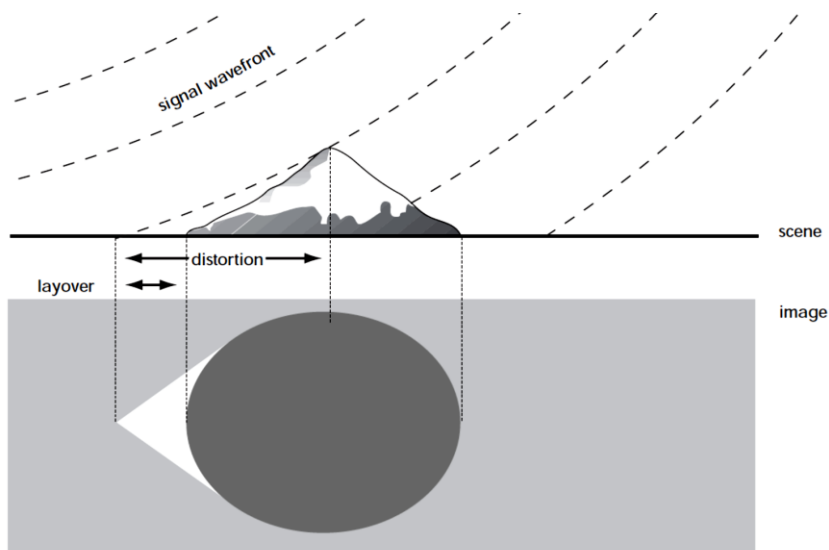
<sup>4</sup> Layover



شکل ۲-۱۱- مفهوم سایه در تصویر راداری [۲۷]

## ۲-۴-۶-۲ هم پوشانی در تصاویر راداری

برای زاویه برخوردی کوچک تر یا برای مناطقی با شیب تند موجی که از قله به سمت سنجنده برمی گردد زودتر از موجی برگشتی پای کوه به سنجنده می رسد. در این حالت زاویه تابش کمتر از زاویه شیب است ( $\alpha > \theta$ ). در این حالت نواحی با شیب بالا نسبت به نواحی مسطح به رادار نزدیک تر است و زودتر از آن ها تصویربرداری می شوند، این پدیده هم پوشانی نام دارد (شکل ۲-۱۲).

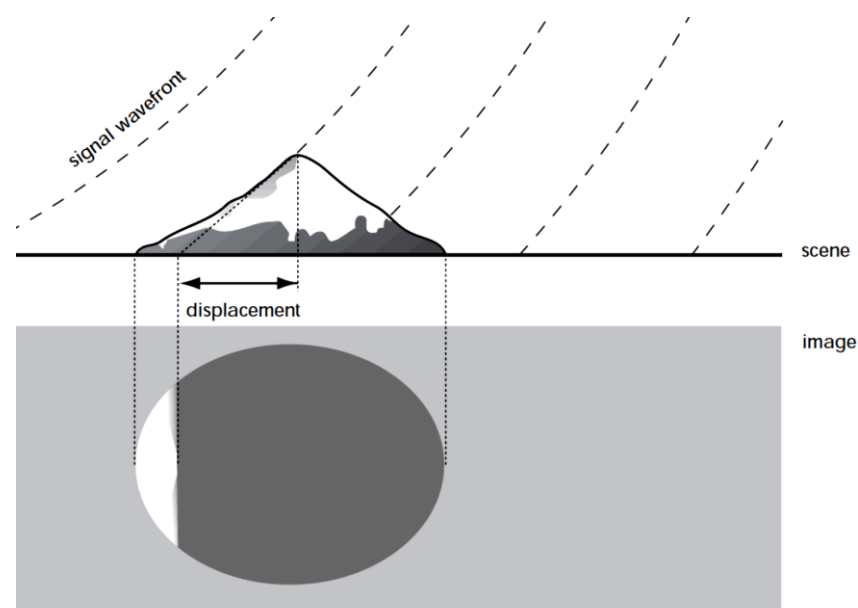


شکل ۲-۱۲- مفهوم هم پوشانی در تصاویر راداری [۱۰۳]

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۰۰

### ۳-۶-۴-۲ کوتاه شدگی در تصاویر راداری

هنگامی که رادار به یک کوه با شیب تند از بالا و با هندسه ی جانب نگر می نگرد، بسیاری از اشیا بر روی کوه که شیب متفاوت دارند، در فاصله ی یکسان از ماهواره تصویر می شوند. بنابراین سیگنال بازگشتی از این اشیا با فواصل یکسان در زمان یکسان به ماهواره می رسد. سنجنده ی رادار این گونه تفسیر می کند که این بخشی واحد در آن فاصله است، در حالی که سیگنال های بازگشتی از اشیاء مجزا هستند که در یک موقعیت تصویر شده اند، این حالت کوتاه شدگی نام دارد. همچنین در اثر این پدیده سطح شیب دار نظاره شده توسط سنجنده روشن تر ظاهر خواهد شد. پدیده ی هم پوشانی برای مناطقی با شیب تند که در آن ها زاویه ی برخورد پالس با قائم بر سطح کمتر از زاویه ی میل ماهواره است، رخ می دهد. در این حالت موجی که به سنجنده برمی گردد، زودتر از موج برگشتی پای کوه به سنجنده می رسد. در یک تصویر راداری نتیجه ی این اعوجاج، جابجایی موقعیت قله و پای عارضه ارتفاعی نسبت به سنجنده خواهد بود (شکل ۲-۱۳). در نواحی با سایه و هم پوشانی هندسه تصویربرداری قادر به دریافت اطلاعات در یک حرکت شیب دار نیست [۱۰۳].



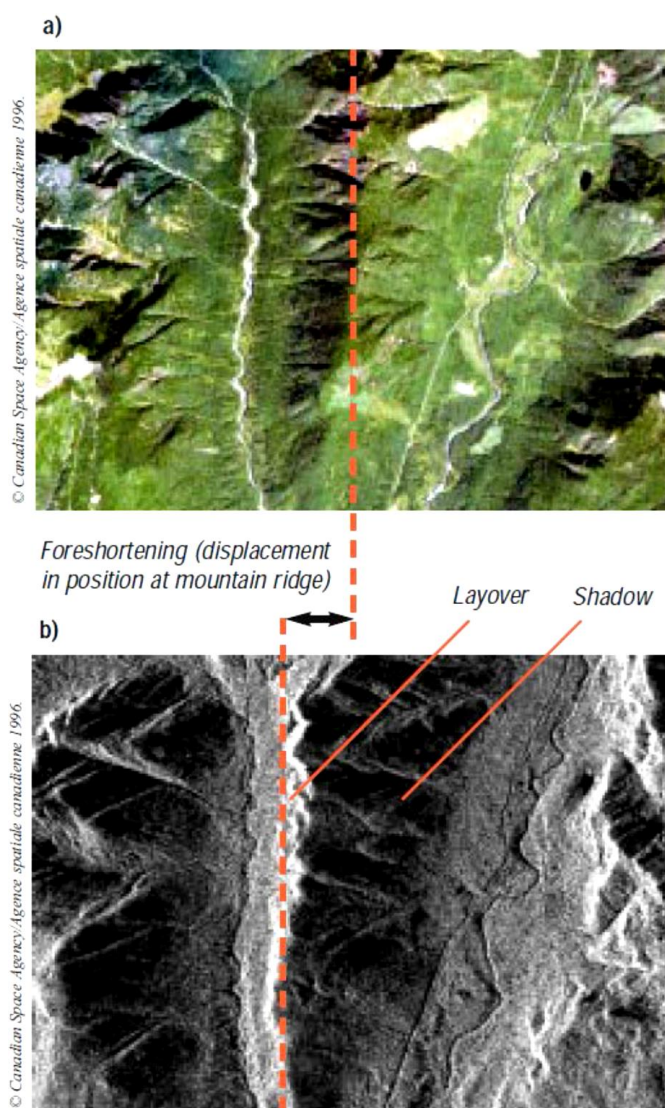
شکل ۲-۱۳- مفهوم کوتاه شدگی در تصاویر راداری [۱۰۳]

در تصاویر SAR به دلیل ارتفاع سطح و هندسه تصویربرداری خاص این سیستم، مقادیر قابل توجهی جابجایی ارتفاعی دیده می شود، از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- میزان سایه در مناطق شیب دار زیاد است.
- اثر کوتاه شدگی باعث فشردگی عوارض روی تصویر می شود.
- جابجایی و تیلت ناشی از ارتفاع برخلاف تصاویر نوری به سمت سنجنده و نادیر خواهد بود.
- تأثیر کوتاه شدگی برای حالتی که موج ارسالی عمود بر سطح شیب دار باشد، ماکزیمم است. در این صورت نقاط بالا و پایین سطح شیب دار بر هم منطبق خواهند شد.
- اثر هم پوشانی باعث جابجایی موقعیت قله و کوه در تصاویر راداری می شود.

- برخلاف سامانه های نوری جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع در نادیر بیشترین مقدار را خواهد داشت و با دور شدن از نادیر مقدار آن کمتر خواهد شد [۱۰۳].

شکل ۲-۱۴ تصویری را نمایش می دهد که در آن هر سه نوع اعوجاج نمایان شده است و آن را در کنار تصویر نوری از همان منطقه می توان مقایسه کرد. هر دو تصویر از منطقه ی Vancouver/British Colombia در بهار سال ۱۹۹۵ در مقیاس ۱:۱۵۰۰۰۰ اخذ شده که تصویر بالا توسط سنجنده LANDSAT TM بوده و همچنین تصویر پایین اخذ شده توسط سنجنده RADARSAT است [۲۸].



شکل ۲-۱۴- نمایش اعوجاجات هندسی روی تصویر SAR [۱۰۴]

## ۲-۵ تداخل سنجی راداری

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۰۲

در مقایسه با فن های ژئودتیک متداول و مرسوم، رادار قادر به اندازه گیری زاویه نیست. همانند یک چشم منفرد انسان که قادر به تشخیص فاصله تا شیء نیست، رادار نیز نمی تواند دوشی مستقر در یک فاصله اما با زوایای متفاوت را متمایز کند. برای حل این مشکل از دو سنجنده راداری استفاده می شود. این ایده و استفاده از اطلاعات فاز، راه را برای تداخل سنجی فراهم کرد. با استفاده از دو تصویر SAR که یا از دو آنتن متفاوت و یا از دو عبور متوالی یک آنتن به دست آمده اند، می توان فاصله و همچنین اندازه گیری های زاویه ای را به دست آورد.

تداخل سنجی راداری از تفاوت فاز بین دو تصویر SAR که برای پردازش تداخل سنجی مناسب باشد، استفاده می کند. دو نقطه ی P و Q رنج مایل یکسانی دارند اما در رنج زمینی به دلیل ارتفاع متفاوت جابجا می شود. در یک تصویر SAR این دو نقطه مجزا دیده نمی شوند زیرا زمان رسیدن سیگنال از این دو نقطه به آنتن یکسان است. اما اگر این دو نقطه از موقعیت S2 که موقعیت متفاوتی نسبت به S دارد، مشاهده شوند نقطه ی P از Q به علت تفاوت فاصله آن ها تا رادار جدا می شود. موقعیت مکانی دو آنتن رادار که به وسیله باز مکانی B جدا شده اند، به عنوان یک تداخل سنج عمل می کند. به وسیله ی ترکیب همدوسی دو تصویر SAR، تفاوت فاز تداخل سنجی می تواند برای هر پیکسل محاسبه شود. تفاوت فاز اندازه گیری شده متناظر با تفاوت رنج پیکسل های مشاهده شده ی انتهای خط مبنا است. این تفاوت رنج، اساس اندازه گیری تداخل سنجی SAR است. رابطه ۱-۲ رابطه ۷-۲ نحوه ی تولید تداخل نما را نشان می دهد:

$$I = C1 \cdot C2 = A_1 A_2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad \text{رابطه ۷-۲}$$

نقشه ی تازه تولید شده، تداخل نما<sup>۱</sup> نام دارد. همان طور که در معادله بالا مشاهده می شود، دامنه ی تداخل نمای مختلط ضرب دامنه های پیکسل های متناظر در دو تصویر SAR است، در حالی که فاز تداخل نما تفاضل فاز بین پیکسل های متناظر است.

$$\varphi \Delta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(I)}{\text{Re}(I)} \right) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{رابطه ۸-۲}$$

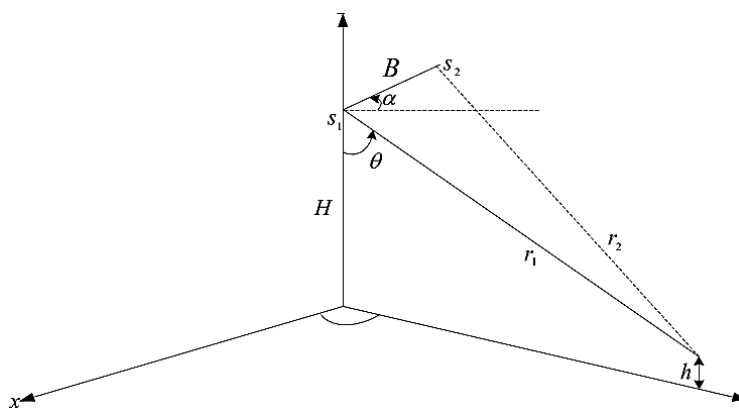
این تفاضل فازی در بازه ی  $[-\pi, \pi]$  قرار دارد که فاز پیچیده<sup>۲</sup> نامیده می شود. تداخل نما به وسیله فرینج هایی<sup>۳</sup> نمایش داده می شود که هر فرینج دارای سهمی از عوارض توپوگرافی، تغییر شکل، جو، مشخصات مداری و نویز است. شکل ۲-۱۵ هندسه تداخل سنجی راداری را نمایش می دهد.

<sup>۱</sup> Interferogram

<sup>۲</sup> Wrapped phase

<sup>۳</sup> fringe





شکل ۲-۱۵- هندسه تداخل سنجی راداری [۱۰۵]

به طور کلی دو روش برای تداخل سنجی وجود دارد که عبارت اند از:

۱. روش تداخل سنجی تک مسیر

۲. روش تداخل سنجی با تکرار مسیر

#### ۲-۵-۱ تداخل سنجی تک مسیر

در این روش با استفاده از آنتن هایی که روی یک سکو نصب شده اند، به صورت همزمان اطلاعات جمع آوری می شوند. دو حالت مختلف برای نصب آنتن وجود دارد، در حالت اول موقعیت آنتن نصب شده در راستای جهت پرواز است که اصطلاحاً این روش تداخل سنجی در راستای پرواز نامیده می شود. از این روش برای نظارت بر حرکت یخچال ها و بلوک های یخی و سرعت امواج اقیانوس ها استفاده می شود [۱۰۱].

در حالت دوم موقعیت دو آنتن نصب شده در راستای عمود بر جهت پرواز می باشد. به این روش تداخل سنجی عمود بر راستای پرواز گفته می شود (شکل ۲-۱۶). نمونه ای این حالت در سنجده های TOPSAR و SRTM وجود دارد.



شکل ۲-۱۶- هندسه تداخل سنجی تک مسیری: (تصویر چپ) روش تداخل سنجی در راستای پرواز، (تصویر راست) روش تداخل سنجی در راستای عمود بر پرواز.

#### ۲-۵-۲ تداخل سنجی با تکرار مسیر

برای اجرای این روش تنها یک آنتن مورد نیاز است. این آنتن یک منطقه را در دو عبور مختلف با هندسه تقریباً مشابه پوشش می دهد. این روش بر پایه اطلاع دقیق از مسیر پرواز استوار است و بنابراین برای سامانه های ماهواره ای

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۰۴

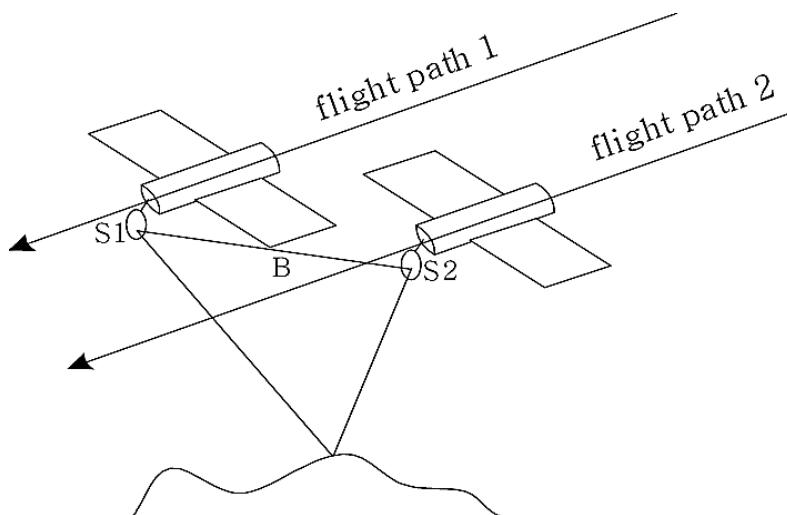
مناسبتر است. استفاده از این روش برای نظارت بر تغییر شکل زمین، زمین لغزش، فرونشست زمین و مطالعات آتش فشان بسیار حائز اهمیت است [۳۰]. در این روش نیز تکرار تصویربرداری می تواند در جهت مسیر پرواز و یا در جهت عمود بر آن باشد. سنجنده ERS از این روش بهره می برد. از آنجاکه ماهواره های ERS-1,2 چندین سال به طور همزمان تصویربرداری می کرده اند، استفاده ی مشترک باز آن ها را به اصطلاح حالت همزمانی<sup>۱</sup> گویند که فاصله ی زمانی مسیرهای این دو ماهواره ۲۶ ساعت است.

فاصله ی بین دو مسیر پرواز خط مبنا<sup>۲</sup> نامیده می شود (شکل ۲-۱۷). برای هر سیستم تصویربرداری SAR باز بحرانی<sup>۳</sup> وجود دارد که در صورت بیشتر بودن طول خط مبنا از این مقدار، تداخل سنجی غیرممکن می شود. مقدار این پارامتر از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$B_c = \frac{\lambda R}{2\delta R_g \cos \theta} \quad \text{رابطه ۹-۲}$$

در رابطه بالا  $\lambda$  طول موج رادار،  $\theta$  زاویه تابش ماهواره،  $R$  فاصله بین سنجنده و نقطه مورد نظر زمینی و  $R_g$  توان تفکیک زمینی در جهت رنج می باشد.

فاصله زمانی بین دو تصویربرداری از منطقه باز زمانی نامیده می شود. این مشخصه به منظور کشف تغییر شکل بین دو زمان عکسبرداری مورد استفاده قرار می گیرد. در دو حالت بالا خط مبنا بین دو موقعیت آنتن رادار می تواند در جهت مسیر پرواز (along\_track) و یا در جهت عمود بر مسیر پرواز (across\_track) باشد.



شکل ۲-۱۷- هندسه تصویربرداری تداخل سنجی با تکرار مسیر [۱۰۵]

<sup>1</sup> Tandem mode

<sup>2</sup> Baseline

<sup>3</sup> Critical baseline

تفاوت طول مسیر بین عکس‌ها به وسیله میانگین زاویه تابش به دست می‌آید و به صورت ابتدایی برای به دست آوردن توپوگرافی در تداخل سنجی عمود بر مسیر پرواز مورد استفاده قرار می‌گیرد. تفاوت در تداخل سنجی در امتداد مسیر پرواز به وسیله تفاوت در زمان کسب داده به دست می‌آید و معمولاً برای تعیین فرایندهای متحرک استفاده می‌شود.

### ۳-۵-۲ شرط تداخل سنجی راداری

سطح ناحیه‌ای از زمین که با یک پیکسل تصویر راداری نشان داده می‌شود، شامل صدها عارضه زمینی است. هر کدام از این عوارض با یک ضریب انعکاسی مختلط در تشکیل یک پیکسل نقش دارند.

با فرض اینکه  $L$  بیانگر طول پیکسل زمینی در راستای عمود بر محور پرواز ماهواره باشد ( $20$  متر برای ماهواره ERS-1) طول موج رادار ( $56$  میلی‌متر برای ERS-1) و  $\theta_1$  و  $\theta_2$  بیانگر زوایای میل به ترتیب برای تصویر اول و دوم باشد، تفاضل فاصله‌ی رفت و برگشت هدف‌های دو انتهای یک پیکسل  $2L\sin\theta$  است. از این رو شرط اصلی برای تداخل سنجی به صورت رابطه ۲-۱۰ بیان می‌شود.

$$2L(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) < \lambda \quad \text{رابطه ۲-۱۰}$$

شرط تداخل سنجی راداری این است که اختلاف فاز پیکسل‌های متناظر دو تصویر بیش از نیمی از طول موج نباشد. این شرط، جدایی (فاصله) بین مسیر مداری ماهواره‌ها را در حین اخذ دو تصویر محدود به  $1$  کیلومتر یا کمتر می‌کند. خوشبختانه مدارهای ماهواره‌ای به صورت طراحی می‌شوند که به طور یکسان بعد از طی دوره زمانی (سیکل مداری) تصویربرداری را تکرار می‌کنند و به کلی این شرط در آن‌ها برقرار است.

شیب محلی زمین در این شرایط تأثیر دارد. در شرایط نزدیک به حد تداخل سنجی (رابطه ۲-۱۰)، حتی یک شیب ملایم با توجه اشتباه، فرینج‌ها را محو خواهد کرد. طبق این رابطه، زاویه‌ی میل تند، توان تفکیک زیاد و طول موج کوتاه همگی شرایط را سخت‌تر می‌کنند. همچنین راستای مشاهده نیز باید برای دو تصویر مشابه باشد [۱۰۲].

### ۴-۵-۲ استخراج ارتفاع زمین با استفاده از تداخل سنجی

به منظور به دست آوردن ارتفاع از تداخل سنجی عمود بر مسیر پرواز که بیشتر به توپوگرافی حساس است، استفاده می‌شود. ماهواره در موقعیت  $S_1$  و  $S_2$  از منطقه عکس برداری می‌کند (شکل ۲-۱۸). رنج مایل از موقعیت  $S$  به نقطه‌ی زمینی  $P$  با ارتفاع  $R$ ، است و فاز سیگنال رادار:

$$\varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R \quad \text{رابطه ۲-۱۱}$$

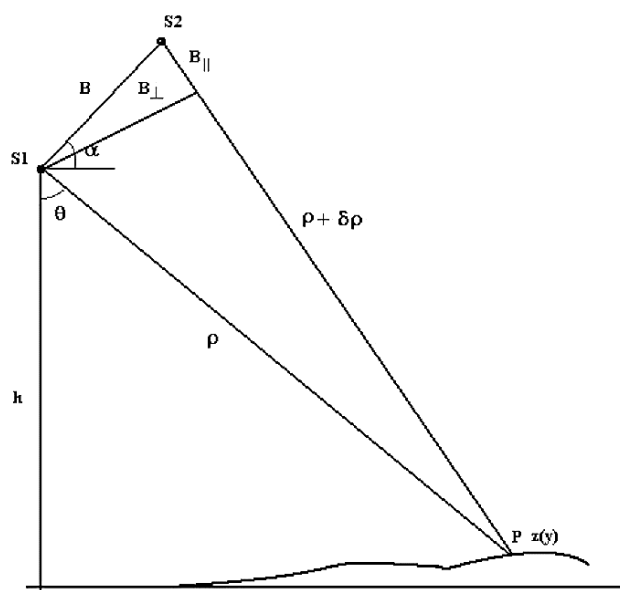
فاز سیگنال ضبط شده از موقعیت آنتن  $S_2$  از نقطه  $P$  با رنج مایل  $R+\Delta R$ :

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۰۶

$$\varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R + \Delta R) \quad \text{رابطه ۲-۱۲}$$

فاز تداخل سنجی نهایی که تفاضل  $\varphi_1 - \varphi_2$  است:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \quad \text{رابطه ۲-۱۳}$$



شکل ۲-۱۸- هندسه تداخل سنجی SAR به منظور استخراج توپوگرافی [۱۰۱]

با استفاده از قانون کسینوس ها در مثلث  $S_1$  و  $S_2$  و  $P$ :

$$(R + \Delta R)^2 = B^2 + R^2 - 2 \cos(90^\circ - \theta + \alpha)$$

و در نهایت:

$$Z(x, y) = h - R \cos \theta \quad \text{رابطه ۲-۱۴}$$

در اینجا  $h$  ارتفاع سنجنده از سطح زمین و  $\theta$  زاویه تابش است.

حساسیت فاز تداخلی برای اندازه گیری ارتفاع به وسیله فاکتور ابهام فاز<sup>۱</sup> سنجیده می شود.

$$h_a = \left| \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\perp}} \right| \quad \text{رابطه ۱۵-۲}$$

این فاکتور با خط مبنای عمودی نسبت معکوس دارد و خط مبنای عمودی کوچک تر، ابهام فاز بزرگ تری را نتیجه می دهد [۱۰۱].

## ۵-۵-۲ استخراج تغییر شکل زمین با استفاده از تداخل سنجی

اگر دو تصویر SAR از موقعیت های یکسان اما در زمان های متفاوت موجود باشد، هر تغییری که در موقعیت هدف در این فاصله زمانی رخ دهد می تواند تعیین شود. به این منظور خط مبنا باید تا حد امکان کوچک باشد. به این ترتیب هدف با هندسه یکسان در دو زمان متفاوت مشاهده می شود. اگر فاصله رادار - هدف - رادار در این فاصله زمانی یکسان باقی بماند، فاز پراکنده ساز ثابت باقی مانده است و این بدان معنی است که تفاوت بین آن ها صفر است. اگر زمین شیفت پیدا کرده باشد (بالا، پایین یا شیفت جانبی) در فاصله ی زمانی تصویربرداری، فاصله رادار - هدف - رادار تغییر کرده است. پس تصویر دوم شیفت پیدا کرده است. این شیفت حرکت زمین را نشان می دهد. مقدار حرکت متناسب با دوره فاز از رابطه ۱۶-۲ تعیین می شود.

$$\Delta r = \lambda/2 \quad \text{رابطه ۱۶-۲}$$

مقدار نصف طول موج که به علت تغییر شکل ایجاد شده در محدوده ی رنج تغییر می کند، یک فرینج را در تداخل نما تولید می کند.

خط مبنا به علت سیگنال های ناشی از فاز توپوگرافی در فاز اندازه گیری شده، هرگز نمی تواند صفر باشد. به علاوه سیگنال رادار در میان جو سفر کرده و سیستم نیز نویز دارد، پس فاز اندازه گیری شده این گونه نمایش داده می شود:

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_{topo} + \Delta \varphi_{defo} + \Delta \varphi_{atm} + \Delta \varphi_{orb} + \Delta \varphi_{noise} \quad \text{رابطه ۱۷-۲}$$

در این رابطه  $\Delta \varphi_{topo}$  فاز توپوگرافی،  $\Delta \varphi_{defo}$  فاز تغییر شکل زمین،  $\Delta \varphi_{atm}$  فاز جوی،  $\Delta \varphi_{orb}$  فاز مداری است. هدف از تداخل سنجی تفاضلی استخراج فاز تغییر شکل زمین از فاز کل اندازه گیری شده، به وسیله ی حذف یا کمینه کردن ترم های دیگر است. نویز سیستم اثر کوچکی را در فاز اندازه گیری شده دارد و از آنجایی که مدل کردن آن بسیار پیچیده است، معمولاً در محاسبات از آن صرف نظر می شود. از آنجایی که فاز ناشی از جو وابسته به مکان است ولی به زمان

<sup>1</sup> Phase ambiguity

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۰۸

وابسته نیست با استفاده از تصاویر بیشتر و مقایسه آنها می توان خطای اتمسفری را کاهش داد. از دیگر روش های کاهش خطای اتمسفری استفاده از GPS است. بنابراین سهم عمده در فاز اندازه گیری شده را توپوگرافی و تغییر شکل دارا هستند. و اگر توپوگرافی معلوم باشد، تغییر شکل زمین به دست می آید. روشی که در آن سهم توپوگرافی از فاز اندازه گیری شده کل کاهش می یابد، تداخل سنجی تفاضلی<sup>۱</sup> نام دارد [۱۰۱].

## ۲-۶ تئوری تداخل سنجی تفاضلی

فاز اندازه گیری شده در پروسه تداخل سنجی برابر با مؤلفه ی خط مبنای موازی است. اگر خط پایه تداخل نما به صورت رابطه ۲-۱۸ باشد.

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad \text{رابطه ۲-۱۸}$$

با اعمال تصحیح مربوط به فاز مرجع، فاز به صورت رابطه ۲-۱۹ درمی آید:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} (B_{\parallel} - B_{\parallel 0}) \quad \text{رابطه ۲-۱۹}$$

در مورد تغییر شکل رخ داده در زمان بین دو تصویربرداری فاز اندازه گیری شده  $\varphi'$  با باز موازی  $B'_{\parallel}$  اختلاف  $\Delta r$  در رنج خواهد داشت. بنابراین فاز تغییر شکل به صورت رابطه ۲-۲۰ خواهد بود:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} (B'_{\parallel} - \Delta r) \quad \text{رابطه ۲-۲۰}$$

رابطه بین فاز زوج تداخل سنجی توپوگرافی و زوج تداخل سنجی تغییر شکل به صورت رابطه ۲-۲۱ خواهد بود:

$$\varphi' = \varphi \frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad \text{رابطه ۲-۲۱}$$

نظر به این که مؤلفه های موازی عمودی خط پایه با زاویه ی دید و زاویه ی توجیه خط پایه بیان می شود و با نادیده انگاشتن اختلاف زاویه ی کوچک ناشی از توپوگرافی، فاز نتیجه شده را می توان به صورت رابطه ۲-۲۲ نوشت:

$$\varphi' = \varphi \frac{B_{\perp 0}'}{B_{\perp 0}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad \text{رابطه ۲-۲۲}$$

---

<sup>1</sup> Differential interferometry

پس فاز ناشی از تغییر شکل  $\Delta r$  به صورت رابطه ۲۳-۲ خواهد بود:

$$\varphi_{\Delta r} = \varphi' - \frac{B_{\perp 0}'}{B_{\perp 0}} \varphi \quad \text{رابطه ۲۳-۲}$$

این معادله اساس تداخل سنجی تفاضلی است که در آن دو تداخل نما، خط پایه مختلفی دارند و زاویه ی توجیه خط پایه متمایز است.

#### ۱-۱-۱- روش های اجرای تداخل سنجی راداری

در یک روش از مدل ارتفاعی<sup>۱</sup> خارجی و در روش دیگر از عکس راداری اضافی به منظور شبیه سازی توپوگرافی استفاده می شود.

روشی که از مدل ارتفاعی خارجی استفاده می کنند تنها به دو عکس راداری احتیاج دارد و فرض می کند که تغییر شکل در فاصله ی بین این دو تصویربرداری صورت گرفته باشد. این روش به دو عبوره<sup>۲</sup> معروف است.

روش دوم احتیاج به اطلاعات خارجی ندارد. اطلاعات توپوگرافی به وسیله ی تصویر سوم یا چهارم راداری شبیه سازی می شود. این روش ها به ترتیب سه عبوره<sup>۳</sup> و چهار عبوره<sup>۴</sup> نامیده می شود. در این دو حالت تداخل نماهای ساخته شده یکی فقط شامل توپوگرافی و دیگری هم اطلاعات توپوگرافی و هم اطلاعات تغییر شکل زمین را دارا است.

#### ۱-۱-۶- روش تداخل سنجی دو عبوره

در این روش DEM به عنوان تداخل نما ی مجازی که فاز توپوگرافی را شبیه سازی می کند، مورد استفاده قرار می گیرد. قبل از کاهش از تداخل نما ی واقعی که شامل اطلاعات توپوگرافی و تغییر شکل است، مدل ارتفاع باید به سیستم مختصات آزیموت و رنج مایل منتقل و با استفاده از خط مبنا مقیاس آن تصحیح شود. از مزایای این روش این است که تداخل نما ی شبیه سازی شده از مدل ارتفاعی احتیاج به فرآیند بازبایی فاز ندارد. تنها محدودیت روش در دسترس بودن DEM منطقه ی مورد نظر است. این روش سرعت بالایی دارد اما خطای DEM بر روی مدل تغییر شکل زمین اثر می گذارد. خطای DEM خطای فاز  $E_{DEM}/h_a$  را در تداخل نما ایجاد می کند که خطای DEM و  $h_a$  ابهام فاز است. از آنجایی که فاز اندازه گیری شده حساسیت کمتری به توپوگرافی دارد تا تغییر شکل، (در حدود ۳۰۰۰ بار حساسیت کمتری دارد.) دقت DEM خارجی می تواند تا حدود ۳۰ متر باشد.

<sup>۱</sup> Digital elevation model (DEM)

<sup>۲</sup> 2-passes

<sup>۳</sup> 3-passes

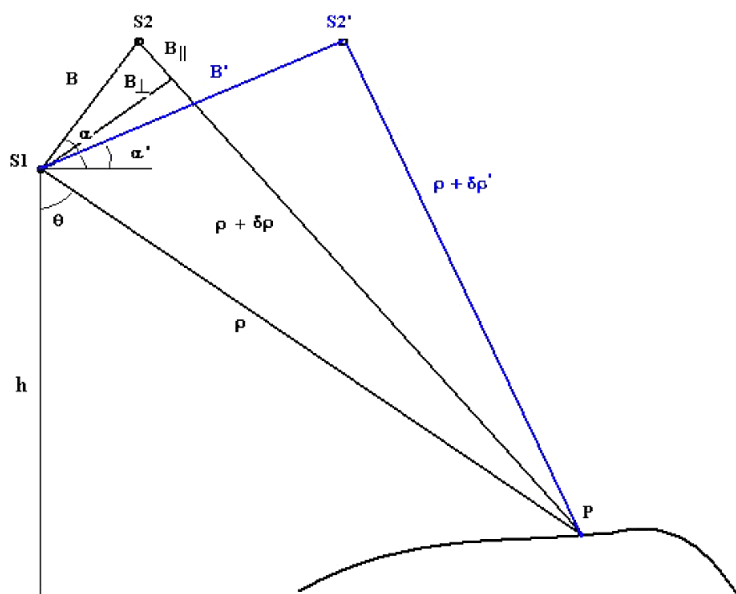
<sup>۴</sup> 4-passes

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۱۰

## ۲-۶-۱-۲ روش تداخل سنجی سه عبوره

در این روش سه تصویر SAR مورد نیاز است ولی به DEM نیاز نیست. این سه تصویر باید به گونه ای تصویربرداری شود که از ترکیب آنها، یک جفت تصویر فقط شامل اطلاعات توپوگرافی باشد و بنابراین جدایی زمانی کوتاه تری دارد. جفت دیگر شامل هر دو اطلاعات توپوگرافی و تغییر شکل است، بنابراین جدایی زمانی بزرگ تر است. همان طور که در شکل ۲-۱۹ نمایش داده شده، اگر سه تصویر از موقعیت های  $S_1, S_2, S_2'$  کسب شده باشند و فرض شود که بین  $S_1$  و  $S_2$  هیچ تغییر شکلی در زمین رخ نداده است، تداخل نمای تشکیل شده به وسیله ی این دو تصویر به عنوان مرجع توپوگرافی مورد استفاده قرار می گیرد. فرض می شود که جابجایی بین تصویر اول و سوم  $(S_1, S_2')$  رخ داده است. بنابراین برای به دست آوردن تداخل نما تفاضلی، فاز توپوگرافی جفت اول از فاز جفت دوم (که هم شامل توپوگرافی و هم شامل جابجایی است) کم می شود. اما این دو تداخل نما بازهای متفاوت  $B$  و  $B'$  دارند و همچنین زاویه ی این بازها نسبت به افق  $(\alpha, \alpha')$  به علت مدارهای متفاوت، با وجود این که این دو تداخل نما یک تصویر را به اشتراک گذاشته اند، متفاوت است.

به منظور تبدیل آنها به یک سیستم هندسی مشترک (سیستم تداخل نمای توپوگرافی) آنها باید به وسیله نسبت مقیاس های عمود مقیاس گذاری شوند (روابط رابطه ۲-۲۲ و رابطه ۲-۲۳). این روش تنها در صورتی ممکن است که تداخل نماها یک تصویر مشترک داشته باشند. آنچه از تحقیقات برمی آید این است که پیدا کردن چنین ترکیب سه گانه ای از تصاویر SAR بسیار مشکل است. در حالتی که چنین ترکیبی یافت نشد، روش چهار عبوره می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۰۱].



شکل ۲-۱۹- هندسه تداخل سنجی سه عبوره [۱۰۱]



### ۳-۱-۶-۲ روش تداخل سنجی چهار عبوره

این روش هنگامی مورد استفاده قرار می گیرد که مجموعه داده های در دسترس اجازه ی انتخاب تداخل نماهای توپوگرافی و تغییر شکل را با تصویر مشترک نمی دهد.

در روش چهار عبوره جفت های تغییر شکل و توپوگرافی مستقل هستند. این جفت تصاویر به چهار تصویر SAR که از چهار موقعیت متفاوت ماهواره کسب شده اند، تشکیل می شوند. این بدان معنی است که تصاویر SAR مربوط به تداخل نمای توپوگرافی می توانند در زمانی مستقل از تداخل نمای تغییر شکل کسب شوند. به منظور تفریق تداخل نماها با هندسه ی متفاوت آن ها باید ثبت هندسی<sup>۱</sup> و باز نمونه برداری<sup>۲</sup> شوند.

### ۲-۶-۲ کیفیت تداخل نما

اندازه گیری های کمی نهایی ارتفاع با تغییر شکل زمین بستگی به کیفیت تداخل نماهای تولید شده دارند. در حالی که این اندازه گیری ها تنها باید تابعی از تفاوت طول مسیر باشد اما در عمل یک جواب مختلط از سلول های رزولوشنی متفاوت ناشی از منابع مختلف است.

### ۱-۲-۶-۲ هم دوسی به عنوان معیار کیفیت تداخل نما

تصویر هم دوسی تصویری است که میزان همبستگی بین تصاویر را نشان می دهد، از این تصویر برای تخمین کیفیت تداخل نمای تولید شده استفاده می شود. این که چه میزان دو تصویر SAR نسبت به هم همبسته هستند به وسیله ی فاکتور همبستگی ( $\gamma$ ) تخمین زده می شود. این فاکتور شباهت دو تصویر SAR مختلط را ارائه می دهد و به عنوان ضریب هم دوسی مختلط تعریف می شود. ضریب هم دوسی به وسیله ی میانگین گیری از پیکسل ها تخمین زده می شود.

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum C_1 \cdot C_2^*}{\sqrt{\sum |C_1|^2 \sum |C_2|^2}} \quad \text{رابطه ۲-۲۴}$$

عمل جمع بر روی پیکسل ها، داخل پنجره ای که شیفت پیدا می کند، انجام می شود. مقدار هم دوسی تداخل سنجی از صفر تا یک تغییر می کند. مقدار صفر، نویز و ناهم دوسی کامل را نشان می دهد که بیانگر این است که هیچ اطلاعات مفیدی وجود ندارد. مقدار یک، هیچ نویزی را در تداخل نما نشان نمی دهد و معرف هم دوسی کامل است. در بیشتر حالات  $1 > \gamma > 0$  است [۱۰۷].

### ۲-۶-۲-۲ منابع کاهش هم دوسی

منابع مهم خطا که روی کیفیت تداخل نما تأثیر می گذارد در زیر توصیف می شود [۹۸]:

<sup>۱</sup> Co-register

<sup>۲</sup> Resample

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۱۲

#### • ناهمبستگی زمانی

این ناهمبستگی ناشی از تغییرات الکتریکی و یا هندسی در مشخصات سطح است که تابعی از زمان بین تصویربرداری دو عکس است. این تغییرات ممکن است به علت تغییر در پوشش گیاهی، فرسایش در سطح زمین یا فعالیت کشاورزی باشد. همچنین در سطوح شامل آب مانند سطوح پوشیده با برف یا سطوحی با مشخصات پراکندگی متفاوت، ناهمبستگی زمانی رخ می دهد. جنگل ها به طور کلی همبستگی بسیار پایینی دارند حتی برای باز زمانی کوتاه به اندازه ی یک روز، درحالی که مناطق شهری و مناطق خشک همبستگی بالایی حتی برای دوره ی زمانی بیشتر از یک سال دارند، از آنجایی که ناهمبستگی زمانی ناشی از تغییرات سطح عموماً در مقیاس طول موج رادار، وابسته به فرکانس رادار است، داده های InSAR با طول موج بالاتر برای مثال باند L ناهمبستگی زمانی کمتری را نشان می دهند.

#### • خطاهای مداری

از آنجایی که یک تداخل نما حاصل یک اندازه گیری تفاضلی بین دو تصویر SAR است، آگاهی از موقعیت دو مدار تصویر SAR نسبت به هم بسیار مهم است. تداخل نماهای تفاضلی با استفاده از تفاضل فاز توپوگرافی به دست می آیند که منطقه ی تغییر شکل یافته را نشان می دهند. در عمل هنوز هم ممکن است فاز ناشی از توپوگرافی، اتمسفر و منابع ناهمبستگی وجود داشته باشد. خطا در تخمین خط مبنای تداخل سنجی بر روی مقیاس گذاری توپوگرافی و حذف فاز زمین مسطح اثر می گذارد. خطای جابجایی  $\sigma\delta R_S$  تابعی از ارتفاع  $\partial Z$  و خطای  $\sigma B_{\perp}$  برای مشخصات سنجنده ی ERS، خطا به صورت رابطه ۲۵-۲ خواهد بود.

$$\sigma\delta R_S = 3 * 10^{-6} \partial Z \sigma B_{\perp} (m) \quad \text{رابطه ۲۵-۲}$$

تغییر ارتفاع سطح به میزان ۱۰۰ متر و خطای خط مبنای عمود به اندازه ۰/۱ متر، خطای جابجایی ۰/۰۳ میلی متر را نتیجه می دهد. برای یک سطح که به صورت نسبی مسطح است، این مقدار خطا، خطای معناداری نیست.

خطای تخمین خط مبنا بر روی مسطح کردن تداخل نماها در جهت رنج مایل R اثر می گذارد. خطای حاصل در این حالت از رابطه ۲۶-۲ به دست می آید:

$$\sigma\delta R_S = 28 * 10^{-7} \delta R \sigma B_{\perp} (m) \quad \text{رابطه ۲۶-۲}$$

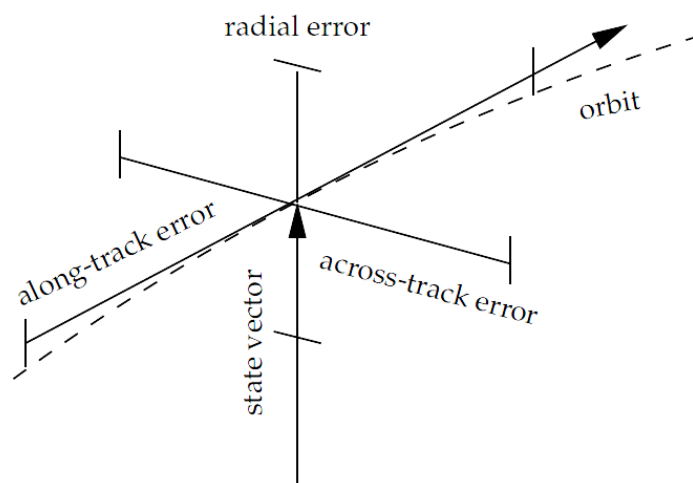
که برای رنج مایل ۱۰ کیلومتر و خطای خط مبنای عمود ۰/۱ متر، خطای جابجایی در حدود ۲/۸ میلی متر خواهد بود. این خطا، خطای معناداری خصوصاً برای تصویر کردن تغییر شکل در مناطق بزرگ است.

سرانجام خطای تخمین باز بر روی مسطح کردن تداخل نماها در جهت آزیموت  $X$  یک خطای  $\partial B_{\parallel} / \partial x$  در تخمین تغییرات  $B_{\parallel}$  در امتداد جهت پرواز، خطای  $\partial \varphi$  در تفاضل فاز در جهت آزیموت نتیجه می دهد. بنابراین خطای جابجایی  $\sigma \delta R_s$  از رابطه ۲۷-۲ به دست می آید:

$$\sigma \delta R_s = \sigma R \sigma \partial B_{\parallel} / \partial x (m) \quad \text{رابطه ۲۷-۲}$$

اگر تخمین خطا برای تغییر خط مبنای موازی در جهت آزیموت ۵ سانتی متر به ازای ۱۰۰ کیلومتر فاصله در آزیموت باشد، خطای جابجایی برای فاصله رنج ۱۰ کیلومتر، ۵ میلی متر خواهد بود. این خطا نیز یک خطای معنادار بخصوص در مناطق بزرگ است. در تداخل سنجی رادار خطا در تخمین خط مبنا می تواند الگوی فازی را ایجاد کند که به فرینج های مداری معروف هستند و معمولاً دارای شیب در جهت خاصی هستند. این فرینج ها که همچنان در تداخل نما باقی می ماندند، تفسیر فاز را دچار مشکل می کنند.

به منظور حذف فرینج های مداری به صورت کامل، دقت مداری در حدود ۱ میلی متر نیاز است که این بسیار کوچک تر از دقت بردارهای مداری حال حاضر با دقت ۱۰ متر است. خطا در بردار مداری می تواند در امتداد پرواز، عمود بر مسیر پرواز و جهت شعاعی وجود داشته باشد (شکل ۲-۲۰).



شکل ۲-۲۰- خطای مداری در امتداد مسیر پرواز، عمود بر مسیر پرواز، شعاعی [۹۸]

خطا در امتداد مسیر پرواز معمولاً در مرحله ثبت هندسی در فرآیند تداخل سنجی تصحیح می شود. بنابراین تنها خطای عمود بر مسیر پرواز و شعاعی باقی می ماند که به عنوان خطای سامان مند در تداخل نما منتشر می شود. اثر مداری در یک الگوی فاز لحظه ای در جهت رنج و با یک مؤلفه ی زمانی آهسته در جهت آزیموت حذف می شود. خطاها در جهت شعاعی، فرینج هایی موازی با مسیر پرواز تولید می کنند در حالی که فرینج های عمود خطایی در سرعت های شعاعی و عمود بر مسیر پرواز ایجاد می کند.

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۱۴

#### • خطای DEM

هر خطایی در مدل ارتفاعی زمین مستقیماً در اندازه گیری جابجایی زمین منتقل می شود. با مشتق گیری از ترم توپوگرافی در کل فاز اندازه گیری شده توسط رادار نسبت به ارتفاع سطح، می توان ارتباط بین تغییرات ارتفاع توپوگرافی  $Z$  و تغییر فاز متناظر با آن  $\partial(\delta\varphi)$  را به دست آورد.

$$S \frac{\partial(\delta\varphi)}{\partial Z} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta} \quad \text{رابطه ۲۸-۲}$$

با فرض یک خط مبنای عمودی ۱۰۰ متر و خطای ۱۰ متر در تخمین توپوگرافی خطای فاز ۰/۲۱ و یا ۲/۹ میلی متر در جابجایی را می دهد. از آنجایی که حساسیت خطای فاز به خطای DEM مرتبط با خط مبنای عمودی است، اثر خطای DEM می تواند با استفاده از جفت تصاویری با خط مبنای عمودی کوچک تر کاهش یابد.

#### • خطای اتمسفری

یکی از مزایای ذکر شده سنجش از دور رادار بر سنجش از دور نوری این است که رادار در میان ابرها نفوذ می کند. بنابراین SAR می تواند در همه شرایط آب و هوایی مورد استفاده قرار بگیرد. اگرچه انتقال هر موج الکترومغناطیس در میان هر محیط واسطه ای مانند اتمسفر وابسته به شاخص انکساری است. اتمسفر یک محیط واسطه پراکنده ساز با هواویزها و هیدرومترها و امواج الکترومغناطیس است که به صورت تصادفی در اتمسفر پخش شده اند. موج به وسیله این ذرات مایع و جامد جذب و پراکنده می شود. هواویزها ذرات معلق در اتمسفر مانند دود، مه، ابر و اجزا رقیق خاک هستند. هیدرومترها ذرات جامد و یا مایع آب مانند رطوبت، باران یخ زده، ابر، مه، تگرگ، گلوله های یخی و ... هستند.

تغییرات مکانی و زمانی شاخص انکساری بین دو تصویر SAR تشکیل دهنده ی تداخل نما، سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی را تغییر می دهد. تأخیر انتشار نسبی امواج بر روی تصاویر SAR اثر می گذارد، ولی بر روی دامنه اثر نمی گذارد. زیرا میزان تأخیر نسبی بسیار کوچک تر از تفکیک مکانی رنج رادار است. در مقابل تداخل سنجی راداری که تفاوت فاز را در کسری از طول موج اندازه می گیرد به اندازه ی کافی دقیق هست تا تحت تأثیر تأخیر اتمسفری قرار بگیرد. حضور اتمسفر مسئله جدی است از آنجایی که می تواند دقت تغییر شکل کشف شده را کاهش دهد و یا اثر آن را پنهان کند.

#### • سایر منابع ناهمبستگی

- ناهمبستگی حرارتی ناشی از نویز سیستم است و می تواند مرتبط با نسبت سیگنال به نویز (SNR) سیستم باشد که برای سنجنده ی ERS نزدیک به واحد است.

- ناهمبستگی مرکز دوپلر ناشی از تفاوت مراکز دوپلر دو تصویر SAR است. این ناهمبستگی هم‌ارز آزمونوت در عارضه ناهمبستگی مکانی است.
- ناهمبستگی volumetric ناشی از نفوذ موج رادار در میان پراکنده‌ساز است. این مشخصه به طول موج رادار و مشخصات دی‌الکتریک پراکنده‌ساز بستگی دارد.

### ۳-۶-۲ اساس روش طول باز کوتاه<sup>۱</sup>

فن تداخل‌سنجی راداری قادر به کشف و شناسایی پدیده‌هایی با فرکانس بالا مانند زلزله و آتش‌فشان است و برای جابه‌جایی‌های آهسته جوابگو نیست، چراکه عدم همبستگی زمانی وجود دارد. بنابراین نمی‌توان از تداخل‌نماهای حاصل از فواصل زمانی طولانی، اطلاعات را بازیابی کرد. راه‌حل پیشنهادی به‌جای استفاده از تداخل‌نماهای با فواصل زمانی طولانی، استفاده از تداخل‌نماهای با فواصل زمانی کوتاه می‌باشد که البته بایستی محدودیت کوتاه بودن خط مبنا را نیز در نظر گرفت. همچنین همان‌طور که در بخش قبل گفته شد با در نظر گرفتن جدایی مکانی کوتاه اثر توپوگرافی بر روی مشاهدات تداخل‌سنجی کاهش پیدا می‌کند. به‌این ترتیب می‌توان آن را به یک شبکه ترازیبی تشبیه کرد که با روش کمترین مربعات میزان جابه‌جایی را در هر یک از زمان‌های تصویربرداری شده محاسبه می‌کنند. در اغلب موارد، تداخل‌نماهای تولیدشده به روش توضیح داده شده در بالا نسبت به همدیگر هم‌پوشانی زمانی دارند. بنابراین این مسئله اهمیت پیدا می‌کند که از اطلاعات همه‌ی این فواصل به‌منظور به دست آوردن تاریخچه تغییر شکل زمینی استفاده شود.

در اینجا روش کمترین مربعات جهت بهبود قابلیت تداخل‌سنجی راداری برای مطالعه حرکات آهسته زمینی ارائه می‌شود. در این روش، مجموعه‌ی تصاویر تداخل نما با یکدیگر ادغام شده و درنهایت سری‌های زمانی جابه‌جایی به دست می‌آید. این روش با استفاده از افزونگی اطلاعات در تداخل‌نماهای از نظر زمانی پوشش‌دار به دست می‌آید. بنابراین تأثیرات خطاهای پردازشی و نویز عدم همبستگی کاهش پیدا می‌کند.

#### ۱-۳-۶-۲ تعریف زیرمجموعه‌های روش طول باز کوتاه

یک زیرمجموعه SBAS مجموعه‌ای از تصاویر SAR است که شروط زیر را داشته باشد:

۱. خط مبنای عمودی کوچک

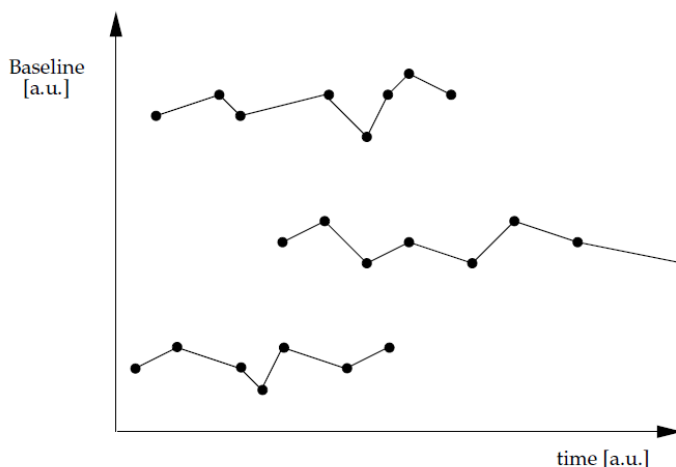
۲. اتصال از نظر زمانی

شکل ۲-۲۱ یک مثال با سه زیرمجموعه‌ی متفاوت است. در هر زیرمجموعه همه‌ی تصاویر به‌وسیله‌ی خط مبناهای عمودی که کوچک‌تر از حد آستانه هستند به یکدیگر متصل شده‌اند.

<sup>۱</sup> Small baseline subset (SBAS)

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۱۶

با استفاده از سه زیرمجموعه به وضوح نمونه برداری زمانی افزایش می یابد [۹۸].



شکل ۲-۲۱- سه زیرمجموعه با طول باز کوتاه [۵]

## ۲-۳-۶ روش کمترین مربعات

ورودی کمترین مربعات، نقشه های جابه جایی مطلق به دست آمده از جفت داده هایی با فواصل زمانی کوتاه و با در نظر گرفتن محدودیت کوتاه بودن خط مبنا می باشد. به عبارت دیگر تداخل نماهای حاصل از جفت داده ها نسبت به تأثیرات توپوگرافی و جابه جایی مدارات تصحیح شده اند و بعد از عملیات بازیابی فاز تبدیل به جابه جایی مطلق در راستای دید ماهواره شده اند که به صورت بردار  $y = [I_1, I_2, \dots, I_N]$  نمایش می شود. مؤلفه های بردار  $y$  بیانگر  $N$  نقشه جابه جایی مطلق حاصل از  $M$  تصویر SAR اخذ شده در روزهای  $[dt_1, dt_2, \dots, dt_M]$  می باشند.

بنابراین مشاهدات ما،  $N$  نقشه جابه جایی مطلق است و با استفاده از مدل زیر مجهولات که عبارت اند از جابه جایی در  $M$  تصویر اخذ شده در زمان های  $t_1, t_2, \dots, t_M$  برآورد می شوند:

$$\begin{cases} I_1 = d_{t_2} - d_{t_1} \\ I_2 = d_{t_3} - d_{t_2} \\ \vdots \\ I_N = d_{t_M} - d_{t_{M-1}} \end{cases} \quad \text{رابطه ۲-۲۹}$$

$$Ax = y$$

که ماتریس ضرایب  $A$  به صورت زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۲-۳۰}$$

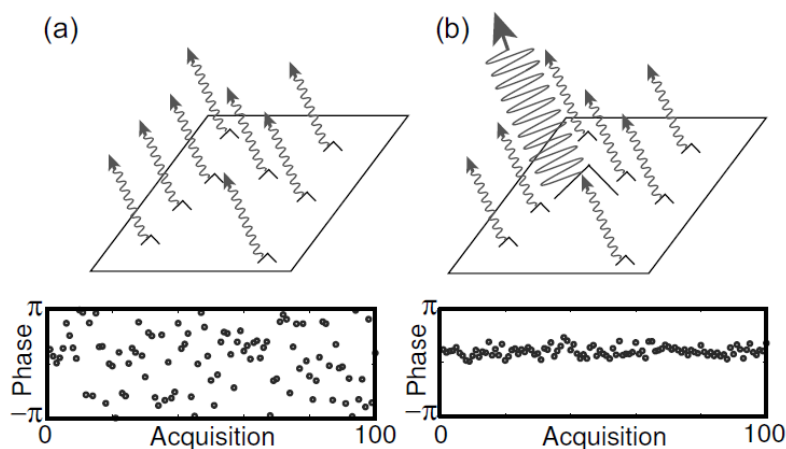
درنتیجه داریم:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P y \quad \text{رابطه ۲-۳۱}$$

به این ترتیب می توان مقدار جابه جایی را برآورد کرد [۱۰۶].

#### ۴-۶-۲ فن تداخل سنجی رادار مبتنی بر پراکنشگرهای دائم

چنانچه منطقه ی مورد مطالعه از درجه ی همبستگی بالا برخوردار باشد و نیز توزیع داده های راداری از جهت طول خط مبنای مکانی و زمانی مناسب باشد، می توان از فن تداخل سنجی راداری سنتی به منظور اندازه گیری جابجایی سطح زمین استفاده کرد. در صورت عدم برقراری شرایط مذکور، استفاده از فن های مبتنی بر پراکنشگر دائم مناسب خواهد بود چراکه از پیکسل های پراکنشگر دائم در برآورد جابجایی استفاده می کنند که از عدم همبستگی های مکانی و زمانی کمتر تأثیر می پذیرند. پیکسل های پراکنشگر دائم حتی در حدود بحرانی خطوط مبنای زمانی و مکانی نیز دارای همدوسی بالایی هستند. در یک تداخل نما تعداد محدودی پیکسل عدم همبستگی کمتری نسبت به بقیه نشان می دهند؛ این پیکسل ها همان پراکنشگرهای دائمی هستند. درواقع یک پیکسل پراکنشگر دائمی یک نقطه ی ایزوله شده با ویژگی های باز پراکنشی ثابت در طول زمان هستند. رفتار فاز در پیکسل های دارای پراکنشگرهای دائمی در مقایسه با پیکسل های حاوی اهداف توزیع یافته در طول زمان، در شکل ۲-۲۲ نمایش داده شده است. آن چنان که در این شکل روشن است پیکسل های حاوی پراکنشگرهای دائمی دارای رفتار فازی یکنواخت و پایدار در طول زمان هستند؛ به عبارت دیگر در این پیکسل ها، رفتار فاز منطبق بر یک مدل فرضی از جابه جایی در زمان است.



تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۱۸

شکل ۲-۲۲- رفتار فاز در پیکسل های تصویر SAR. (a) پیکسل حاوی پراکنشگر توزیع یافته، (b) پیکسل حاوی پراکنشگر دائم [۱۰۸].

بر مبنای این مفهوم، الگوریتم شناسایی پیکسل های پراکنشگر دائمی برای اولین بار توسط Ferreti و همکاران در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ معرفی شد [۱۰۹]. هدف اصلی این روش شناسایی پیکسل هایی از تصویر است که در بازه زمانی طولانی مدت تصویربرداری همبسته و همدوس باقی می ماند [۱۰۸-۱۱۲]. گاهی اوقات یک پراکنشگر بر سیگنال بازگشتی غالب می شود و سبب می شود تا همبستگی سیگنال به مقدار زیادی افزایش پیدا کند. اساس این روش، شناسایی این نقاط PS است. در این صورت، از تمام زوج تصاویر می توان جهت تشکیل تداخل نما استفاده کرد. از آنجایی که ابعاد نقاط پراکنشگر کوچک تر از ابعاد سلول تفکیک می باشد، میزان همبستگی این پیکسل ها، حتی برای تداخل نماهای با خط مبنای بزرگ تر از طول خط مبنای بحرانی، مناسب است. به این ترتیب از مجموعه داده های بیشتری می توان جهت تداخل سنجی استفاده کرد. در این مرحله یک تصویر پایه به نحوی انتخاب می شود که میزان همبستگی ایجاد شده از این تصویر با سایر تصاویر پیرو مقدار بیشینه باشد. سپس با تفاضل فاز تصویر پایه و تک تک تصاویر پیرو، تداخل نماها تولید می شوند.

جهت تعیین پیکسل های PS در ابتدا لازم است تا یک مجموعه ی اولیه از نقاط به عنوان نقاط کاندید انتخاب شوند. برای تعیین نقاط کاندید چندین معیار استفاده شده است. در مناطقی از تصویر که نسبت سیگنال به نویز بالا باشد، شاخص پراکندگی دامنه معیاری مناسب جهت بیان پایایی فاز می باشد [۱۰۹]. به عبارت دیگر، اگر یک پیکسل همواره روشنایی بالایی (بزرگ تر از یک حد آستانه مناسب را نشان دهد، آن نقطه می تواند به عنوان یک کاندیدی PS انتخاب شود. روش بعدی استفاده از نقشه ی همدوسی است [۱۱۰]. هرچه مقدار همدوسی مکانی پیکسل بر روی تصویر تداخل نما بیشتر باشد، احتمال آنکه آن نقطه PS باشد بیشتر است. در نتیجه با اعمال یک حد آستانه بالا می توان نقاط کاندید PS را استخراج کرد. روش سوم، استفاده از تحلیل دامنه و فاز به طور همزمان است [۱۰۹]. برای این پیکسل ها می توان سیگنال متناظر با تأخیر اتمسفری را تخمین زد و سپس با پالایش کردن سری زمانی فازهای به دست آمده، برای هر پیکسل PS، این تأثیر را حذف نمود و در نهایت میزان جابجایی را در این نقاط محاسبه کرد.

هنگامی از فن تداخل سنجی راداری سنتی می توان استفاده نمود که داده های راداری موجود در مقایسه با ویژگی های پراکنشی منطقه به گونه ای باشد که بتوان در تحلیل سری زمانی به تعداد کافی تداخل نماهای همبسته که فاز آن ها به راحتی در بعد مکان بازیابی می شوند، محاسبه کرد. انواع مختلف خطاها که مهم ترین آن ها خطای اتمسفری و توپوگرافی می باشد، باعث کاهش دقت نتایج حاصل از فن تداخل سنجی سنتی می گردد. از بسیاری از محدودیت های روش سنتی توسط تحلیل مبتنی بر پراکنشگرهای دائم اجتناب می شود. به علت رفتار فاز مستحکم پیکسل پراکنشگر دائم در زمان، عدم همبستگی زمانی در این پیکسل ها حداقل می شود. همچنین به علت اندازه کوچک نقطه ی PS نسبت به ابعاد پیکسل تصویری، عدم همبستگی مکانی هم حداقل است که به همدوسی خوب حتی برای جفت تداخل نماهای با یک خط مبنای مکانی بزرگ منجر می شود. از دیگر مزیت های فن پراکنشگرهای دائمی، قابلیت دستیابی آن به دقت های بهتر از متر در استخراج DEM و بهتر از میلی متر در اندازه گیری های جابجایی سطح زمین است. این موضوع از آنجا ناشی می شود که در این دسته از روش ها اثرات APS، برآورد شده و از روی تصاویر SAR حذف می گردد. به دلیل آنکه عدم همبستگی زمانی برای روش مبتنی بر پراکنشگر دائم محدودیت محسوب نمی شود، می تواند از تصاویر



SAR با فواصل زمانی طولانی استفاده کرده و یک پدیده ی تغییر شکل را در یک بازه ی زمانی طولانی بررسی کند [۷۷]. در فصل های بعدی، جزئیات روش مبتنی بر پراکنشگر دائم ارائه خواهد شد.

## ۲-۷ پیشینه تحقیق

### ۲-۷-۱ مقدمه

با توجه به استفاده از فن تداخل سنجی راداری به منظور پایش جابه جایی سطح زمین در این مطالعه، بررسی تاریخیچه ی این فن از گذشته تا به حال ضروری به نظر می رسد. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه ی استفاده از فن تداخل سنجی راداری در اندازه گیری جابه جایی زمین و مطالعه بر روی پدیده ی فرونشست صورت پذیرفته است. به این ترتیب در این فصل ابتدا با دسته بندی مطالعات خارجی و داخلی انجام شده به بررسی چندین مورد مطالعاتی پرداخته خواهد شد.

### ۲-۷-۲ مطالعات فرونشست انجام شده در جهان و انواع روش های تداخل سنجی راداری

قدیمی ترین فرونشست شناخته شده بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط یونسکو، در ایالات آلابامای متحده در سال ۱۹۰۰ میلادی به وقوع پیوسته است. این مؤسسه نخستین برنامه جهانی خود را برای شناخت چرخه های آب شناختی با عنوان «دهه جهانی آب شناسی» در سال ۱۹۶۵ آغاز نمود و در سال های بعد به دلیل گستردگی رخداد فرونشست در جهان مطالعه بر روی این پدیده به یکی از موضوعات اصلی آن تبدیل شد. تا به امروز بررسی های بسیاری در این زمینه در کشورهای پیشرفته به ویژه در ایالات متحده و ژاپن صورت گرفته که نتیجه ی آن کنترل شدید مصرف آب، تغییر الگوی مصرف و توقف فرونشست ها در بسیاری از موارد بوده است. استخراج سیالات هیدروکربنی برای تولید انرژی نیز سبب شکل گیری فرونشست در برخی از مناطق گردیده که بیش از صد سال است توسط شرکت های نفتی دنیا مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱۳].

با ورود ماهواره های راداری، فن تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری مفید در اندازه گیری جابجایی های سطح زمین مورد استفاده قرار گرفت. نخستین گزارش ها از کاربرد تداخل سنجی در سال های ۱۹۶۸ تا ۱۹۷۲ به منظور تهیه نقشه ماه و سیارات دیگر ارائه شده است. در سال ۱۹۷۱، نخستین آزمایش ها در زمینه ی استفاده از فن تداخل سنجی راداری هوایی به منظور تهیه نقشه توپوگرافی توسط سازمان نظامی آمریکا صورت گرفت و به کمک تصاویر اختلاف فاز، ارتفاع اندازه گیری شد [۷۹]. در این دهه، فن تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری مفید در اندازه گیری های جابجایی سطح زمین با دقتی قابل مقایسه با دقت اندازه گیری های تراز یابی دقیق و سامانه ی تعیین موقعیت جهانی در اختیار محققین قرار گرفت [۷۷]. مزیت فن تداخل سنجی راداری نسبت به سایر روش های مشاهدات ژئودتیکی، انجام اندازه گیری در سطح وسیع بدون نیاز به کار میدانی است، در حالی که مشاهدات GPS به صورت نقطه ای برداشت می شود.

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۲۰

کاربرد فن تداخل سنجی راداری با داده های ماهواره ای با استفاده از روش تکرار مدار<sup>۱</sup> که در آن ماهواره در دو زمان مختلف از یک منطقه تصویربرداری می کند، نخستین بار در سال ۱۹۸۷ توسط Li and Goldstein [۱۱۴] با استفاده از داده های ماهواره ای SEASAT و در سال ۱۹۸۸ توسط Gabriel and Goldstein [۱۱۵] به کمک داده های شاتل SIR-B به تصویر کشیده شد. همچنین کاربرد فن تداخل سنجی راداری با تکرار مدار با استفاده از داده های هوایی در سال ۱۹۹۳ نشان داده شد [۱۱۶، ۷۷].

مهم ترین مسئله در بدو ورود فن تداخل سنجی راداری برآورد توپوگرافی بود. به مرور کاربرد بسیار مهم تر این روش در پایش تغییر شکل های سطح زمین آشکار شد. جابجایی نسبی پراکنشگرها در امتداد خط دید رادار (LOS) نسبت به یک نقطه ی مرجع در تصویر به صورت کسری از طول موج با دقت های سانتیمتر تا میلی متر برای طول موج های C، L و X قابل اندازه گیری بود.

روش تداخل سنجی تفاضلی راداری را اولین بار Gabriel و همکاران در سال ۱۹۸۹ ارائه کردند [۱۱۷]. Massonnet and Adragna [۱۱۸] در سال ۱۹۹۳ برای نخستین بار از فن تداخل سنجی تفاضلی در اندازه گیری میدان جابجایی ناشی از زلزله ی Landers، استفاده نمودند. Zebker, et al. [۱۱۹] به منظور مطالعه ی همان پدیده از روش تداخل سنجی سه گذره<sup>۲</sup> استفاده نمودند. در این روش از دو تصویر راداری با بازه ی زمانی کوتاه برای بازیابی سیگنال توپوگرافی استفاده شد. سپس تداخل نمای دیگری به کمک دو تصویری که زلزله در فاصله ی زمانی اخذ آن دو رخ داده بود، تولید گردید. این تداخل نما حاوی اطلاعات توپوگرافی و جابجایی بود. مقدار جابجایی با کسر نمودن تداخل نمای اول از دوم حاصل شد.

به دنبال آن از این فن در برآورد فرونشست میدان ژئوترمال [۱۲۰، ۱۲۱]، فرونشست میدان نفتی [۱۱۸-۱۲۴]، مطالعات آتش فشان [۱۲۰]، فرونشست معدن [۱۲۵]، فرونشست منطقه ی شهری [۱۲۶، ۱۲۷] استفاده شد.

موارد اشاره شده در بالا نمونه هایی از کاربرد فن تداخل سنجی متداول (سنتی) می باشد. در حالی که فن تداخل سنجی راداری سنتی قابلیت خود را در اندازه گیری جابجایی ناشی از پدیده های مختلف نشان داد، نتایج اخذ شده در برخی موارد محدودیت های این فن را آشکار نمود. در اواخر دهه ی ۱۹۹۰ گروه های مختلفی به دنبال راه های رفع محدودیت های تداخل سنجی متداول، با پردازش چندین تصویر در یک زمان بودند [۱۲۸]. در چنین مواردی می توان از فن های مبتنی بر باز پراکنشگرهای دائمی استفاده نمود. فن پراکنشگرهای دائمی، دسته ای از فنون تداخل سنجی تفاضلی پیشرفته<sup>۳</sup> را نشان می دهد که از هدف های راداری روی سطح زمین برای تولید جابجایی سری زمانی در طول خط دید ماهواره از پراکنشگرهای دائمی تکی، استفاده می کند. این روش قادر به دستیابی به داده های مربوط به تغییر شکل زمین در یک منطقه ی پهناور با دقت میلی متری است [۱۲۹]. این روش ها به منظور پایش جابجایی تنها نقاطی که در طول زمان دارای ویژگی های باز پراکنشی نسبتاً ثابتی، در طول چندین ماه و حتی چندین سال می باشند، استفاده

<sup>1</sup> repeat-pass

<sup>2</sup> Three-pass

<sup>3</sup> Advance Differential Interferometry Sinthetic Apertur Radar (A-DInSAR)

می کند [۱۰۹، ۱۳۰-۱۳۴]. اصطلاح پراکنشگر دائم معمولاً به عوارض با بازتابندگی بسیار بالا در صحنه‌ی مشاهده شده، مانند ساختمان‌ها، راه‌آهن‌ها و صخره‌های بدون پوشش<sup>۱</sup> مربوط می‌باشد [۱۳۵]. این روش در مواقعی که داده‌ها دارای توزیع نامناسب از نظر طول خط مبنای مکانی باشند و نیز همبستگی تصاویر راداری با گذشت زمان به سرعت کاهش یابد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۸۰]. خروجی اصلی یک تحلیل تداخل‌سنجی پراکنشگرهای دائم شامل سری زمانی تغییر شکل و سرعت تغییر شکل برآورد شده بر اساس تحلیل پراکنشگرهای دائم و توزیع یافته می‌باشد، خروجی دیگر یک تحلیل تداخل‌سنجی پراکنشگرهای دائم، خطای توپوگرافی باقیمانده<sup>۲</sup> است که اختلاف بین ارتفاع واقعی مرکز فاز پراکنشی یک پراکنشگر دائم معین و ارتفاع مدل ارتفاعی رقومی در این نقطه می‌باشد. RTE یک پارامتر کلیدی به منظور دستیابی به یک کدگذاری جغرافیایی<sup>۳</sup> دقیق از پراکنشگرهای دائم می‌باشد [۱۳۶]. چند مورد از مهم‌ترین رویکردهای تداخل‌سنجی پراکنشگرهای دائم به‌طور خلاصه در ادامه مورد بحث قرار گرفته است:

روش تداخل‌سنجی پراکنشگرهای دائم ارائه شده توسط Ferretti, et al [۱۳۰] مطمئناً جز مهم‌ترین روش‌ها است، چراکه اولین راه‌حل کامل برای انتخاب پراکنشگرها را نشان داد که بر ناهمبستگی زمانی و هندسی غلبه کرد و برای برآورد تغییر شکل و RTE، آن‌ها را از سهم فاز جوی<sup>۴</sup> جدا کرد. این یک گام بزرگ روبه‌جلو نسبت به روش‌های موجود تداخل‌سنجی تفاضلی بود که کاربرد آن‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داد و مبنایی برای توسعه‌ی بیشتر فراهم کرد [۱۳۶]. Ferretti, et al [۱۳۰] با استفاده از ۳۴ تصویر ERS جهت پایش نشست زمین در طی ۵ سال در شهر Ancona ایتالیا این روش را ارائه دادند. از آنجایی که معیار شاخص پراکندگی دامنه‌ی تعریف شده توسط او برای انتخاب نقاط پراکنشگر دائم وابسته به تعداد تصاویر در دسترس است؛ در سال ۲۰۰۳ Mora, et al [۱۱۰]، روش پیکسل‌های همدوس<sup>۵</sup> را ارائه نمودند که از شاخص همدوسی مکانی که مستقل از تعداد تصاویر مورد نیاز است برای انتخاب نقاط پراکنشگر کاندید استفاده می‌کند. آن‌ها از این روش جهت پایش جابجایی منطقه‌ی Catalonia اسپانیا با استفاده از ۲۳ تصویر ERS اخذ شده در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۲-۱۹۹۹ بهره گرفتند. به دنبال آن الگوریتم‌های پردازشی مشابه توسط Crosetto, et al [۱۳۳]، Werner, et al [۱۳۴] و Kampes [۱۱۲] بهبود داده شد. محدودیت عمده‌ی این رویکرد این است که محدود به پراکنشگرهایی است که همدوسی به‌اندازه‌ی کافی بالایی دارند، حتی در خط مبنای بزرگ که معمولاً منجر به تراکم پایین پراکنشگرهای دائم در مناطق غیرشهری می‌شود [۱۳۶].

فن مجموعه خط مبنای کوتاه<sup>۶</sup> کار اساسی دیگری است که یک روش تداخل‌سنجی پراکنشگر دائم کامل را با استفاده از خط مبنای کوچک برای محدود کردن ناهمبستگی مکانی، داده‌ی چندمنظری<sup>۷</sup> برای کاهش فاز نویز و یک معیار انتخاب مبتنی بر همدوسی ارائه داد [۱۳۷]. به‌علاوه از روشی برای لینک چندین زیرمجموعه‌ی خط مبنای

<sup>1</sup> Exposed rocks

<sup>2</sup> Residual Topographic Error (RTE)

<sup>3</sup> Geocoding

<sup>4</sup> Atmospheric Phase Screen (APS)

<sup>5</sup> Coherent Pixels Technique (CPT)

<sup>6</sup> Small Baseline Subset (SBAS)

<sup>7</sup> Multilook

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۲۲

کوچک استفاده می کند. که این منجر به افزایشی در نمونه برداری<sup>۱</sup> زمانی و مکانی نسبت به رویکرد پراکنشگر دائم اصلی می شود. روش مجموعه خط مبنای کوتاه اصلی با تصویر چندمنظری کار می کند و برای تشخیص تغییر شکل محلی<sup>۲</sup> مناسب نیست. این جنبه در نسخه توسعه یافته ای این روش که با تصاویر بدون پردازش چندمنظری<sup>۳</sup> کار می کند، حل شد [۱۳۸].

در ادامه نمونه ای از کاربرد این روش و همچنین تحلیل های انجام شده پیرامون نوع و چگونگی فرونشست بیان شده است: Solari, et al. [۱۳۷] با استفاده از ۳۰ تصویر RADARSAT-2 (باند C) و ۲۹ تصویر COSMO-SkyMed (باند X) و الگوریتم مجموعه خط مبنای کوتاه، به توضیح تغییر شکل زمانی و مکانی فرونشست زمین در منطقه ی شهری Pisa (ایتالیا) پرداختند. مناطق و ساختمان های تحت تأثیر تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفته اند تا هم پتانسیل دو ماهواره در مقیاس های منطقه ای برای RADARSAT-2 و مقیاس ساختمانی برای COSMO-SkyMed<sup>۴</sup> مشخص شود و هم رابطه ی موجود بین جابجایی های ثبت شده، وضعیت زمین شناسی منطقه و توسعه ی شهری را نشان دهد. در این پژوهش دو مجموعه داده تفاوت قابل توجهی را در تراکم نقاط نشان می دهند؛ در حقیقت تراکم نقاط اندازه گیری شده در منطقه ی مورد نظر (۳۲ کیلومتر مربع) برای RADARSAT، ۹۱۰ نقطه در کیلومتر مربع و برای CSK، ۱۱۰۲۷ نقطه در کیلومتر مربع می باشد. تعداد بیشتر نقاط اندازه گیری شده (نقاط همدوس) در باند X نسبت به باند C، به لطف زمان تصویربرداری مجدد کوتاه تر و حد تفکیک مکانی بالاتر سنجنده های باند X به دست می آید. افزون بر این، طول موج کوتاه تر امکان افزایش حساسیت به جابجایی ها در جهت خط دید سنجنده، همراه با قابلیت بالاتر در تشخیص نرخ بسیار کم جابجایی را فراهم می آورد. تحلیل این دو مجموعه داده نشان داد که روند کلی فرونشست زمین در قسمت شمالی Pisa افزایش پیدا می کند، جایی که شهر در خارج از دیوارهای مرکز تاریخی گسترش پیدا کرده است. در این بخش از شهر، یک نشست کلی ۵-۳/۵ میلی متر در سال ثبت شده است. از طرف دیگر، بالاترین نرخ فرونشست فقط در مناطق محلی که مربوط به یک ساختمان تکی یا گروهی از ساختمان هاست ثبت شده است و با توجه به این که هیچ ناحیه ای از کاهش شدید آب زیرزمینی را در نقشه ها نداشتند، فرونشست در این منطقه به استخراج منابع آبی مربوط نبوده و نقش توسعه ی شهری به عنوان عامل محرک برای فرونشست سریع ثبت شده است. همچنین با بررسی ارتباط بین نرخ فرونشست ثبت شده و قدمت ساخت ساختمان ها در چندین ساختمان در چند منطقه ی منتخب، نقش این عامل محرک برای فرونشست را برجسته ساخت. شکل ۲-۲۳ ساختمانی است که در سال ۲۰۰۸ افتتاح شده و یک مثال خوب از ساختمان های اخیراً ساخته شده است که نرخ تغییر شکل بالایی را نشان می دهد. هر دو مجموعه داده نرخ فرونشست مشابهی را ثبت کرده اند؛ داده ی RADARSAT-2 مقدار متوسط ۱۳.۳- میلی متر در سال برای کل مجتمع، داده ی COSMO-SkyMed مقدار متوسط ۱۲.۳- میلی متر در سال. حداکثر نرخ فرونشست برای هر دو مجموعه داده در قسمت جنوبی مجتمع ثبت شده است. که این می تواند مربوط به مشکلات پایه یا تغییرات بسیار موضعی ویژگی های ژئوتکنیکی سطوح تراکم پذیر باشد. این مطالعه ی موردی همچنین تفاوت عملکرد داده های

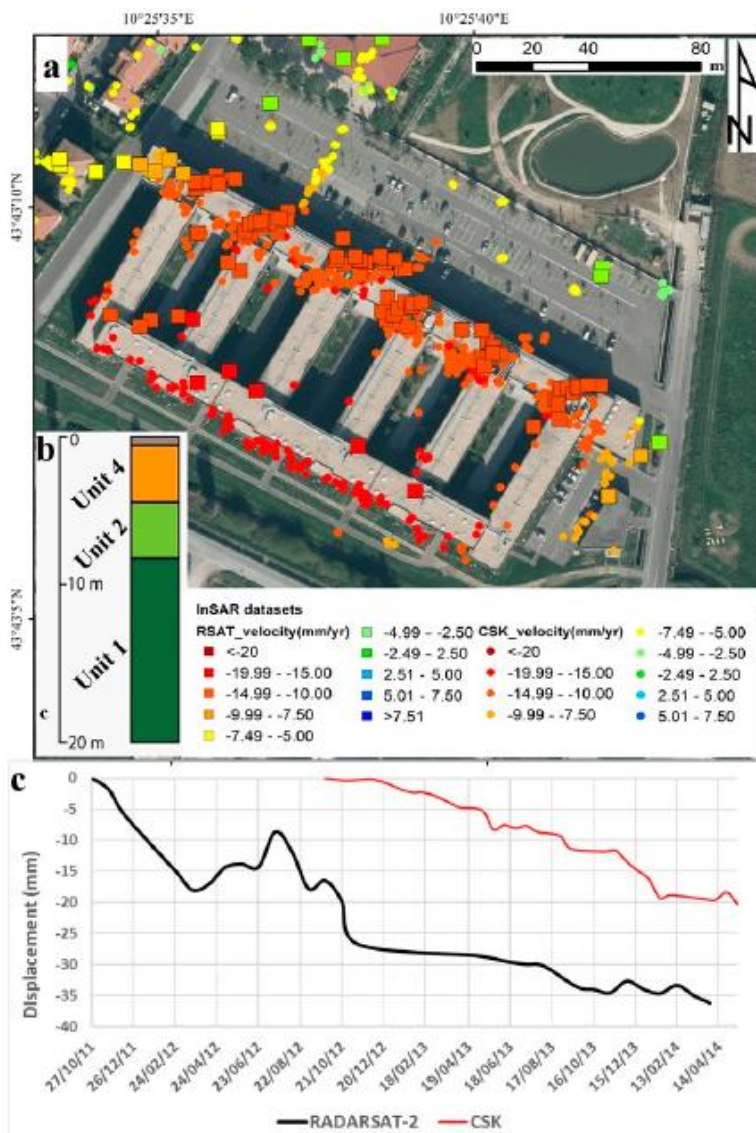
<sup>1</sup> Sampling

<sup>2</sup> Local

<sup>3</sup> Full Resolution

<sup>4</sup> CSK

باند C و X را در مناطق شهری نشان می دهد. درواقع، داده های باند X تراکم بیشتری از نقاط برای ساختارهای تکی دارند که شش برابر بیشتر از داده های باند C است و از ۷۵ تا ۵۰۰ نقطه عبور می کند [۱۳۹].



شکل ۲-۲۳ (a) جابجایی های تأثیرگذار در جهت خط دید سنجنده بر ساختمان؛ (b) ساختار زمین شناسی دارای چینه شناسی [۱۴۰]؛ (c) سری های زمانی متوسط RADARSAT-2 و COSMO-SkyMed برای ساختمان موردنظر [۱۳۹].

طبق تصویر، نشست های ثبت شده ارتباط مستقیمی با تکامل طبیعی فرایند تحکیم و ترکیب<sup>۱</sup>، همان طور که توسط Terzaghi, et al [۱۴۱] تعریف شده است، دارند. پایان این فرایند وابسته به زمان، به مقدار زیادی با ضخامت لایه ها، هدایت هیدرولیکی و شرایط زهکشی و همچنین زمان و بزرگی بار تحمیل شده تغییر می یابد. بر این اساس، نرخ بالای

<sup>1</sup> Consolidation

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۲۴

تغییر شکل ثبت شده در این ساختمان مربوط به عامل محرک انسانی (بار اخیر اعمال شده) و عامل زمینه ساز زمین شناختی، یعنی حضور بسیار تراکم پذیر کم عمق (واحد ۱ و ۲) می باشد. علاوه بر این، مشکلات طراحی پایه را نیز نمی توان نادیده گرفت [۱۳۹].

روش تداخل سنجی پراکنشگر دائم مهم دیگری توسط Hooper, et al [۱۳۲] ارائه شد. آن ها یک روش جدید انتخاب پراکنشگر دائم با استفاده از مشخصات فاز پیشنهاد دادند که برای یافتن اهدافی مناسب است که طبیعی کم دامنه با فاز ثابت که با الگوریتم های مبتنی بر دامنه قابل شناسایی نیستند. یک مزیت مهم این است که به اطلاعات اولیه از مدل تغییر شکل نیاز ندارد. این روش یکی از پرکاربردترین پکیج های نرم افزاری، به نام StaMPS شد. این روش قادر به پایش جابجایی در مناطق غیر شهری و شامل پوشش گیاهی و یا سطحی که رفتار جابجایی در آن در طول زمان مشخص نیست، می باشد [۱۰۸، ۱۴۲].

Ketelaar [۱۴۱] از الگوریتم DePSI ارائه شده توسط دانشگاه Delft در استخراج سیگنال فرونشست ناشی از تولید هیدروکربن از میدان گاز Groningen در هلند استفاده کرد. تراکم پراکنشگرهای دائمی ۰ تا ۱۰ عدد در کیلومتر و در مناطق شهری بیش از ۱۰۰ عدد در کیلومتر مربع بود. دقت اندازه گیری فرونشست در نقاط پراکنشگر دائمی کمتر از ۳ و ۳ تا ۷ میلی متر برآورد شد.

ارائه ی این روش ها گامی مؤثر در کاهش محدودیت های فن تداخل سنجی راداری متداول بوده است. اگرچه هر یک از این روش های پردازش باز پراکنشگر دائم دارای معایبی است که استفاده ی بهینه از آن ها را در شرایط مختلف با مشکل مواجه می سازد. در بیشتر روش های مبتنی بر باز پراکنشگرهای دائم از جمله DePSI می بایست مدلی فرضی برای رفتار جابجایی در نظر گرفته شود. عملیات باز یابی فاز و برآورد سیگنال اتمسفر و خطاهای باقیمانده توپوگرافی بر اساس این مدل فرضی صورت می پذیرد. بنابراین بایستی این مدل با دقت بسیار و آگاهی کامل از رفتار جابجایی در منطقه انتخاب شود. در بیشتر مواقع چنین اطلاعات دقیقی در دسترس نبوده و نمی توان مدل را به درستی انتخاب نمود. اگرچه در روش StaMPS نیازی به تعیین یک مدل فرضی برای جابجایی در مرحله شناسایی باز پراکنشگرهای دائمی نیست، لیکن توانایی این روش در ارائه نتایج صحیح در مواقعی که نرخ جابجایی در یک منطقه زیاد است، کاهش می یابد. در کلیه روش های باز پراکنشگرهای دائمی عملیات باز یابی فاز تحت تأثیر مستقیم توزیع زمانی داده ها می باشد. در صورت وجود بازه های زمانی بلند در داده های راداری، درجه اطمینان نتایج عملیات باز یابی فاز کاهش می یابد. شانس موفقیت عملیات باز یابی فاز را اصطلاحاً نرخ موفقیت می گویند [۱۴۳]. یکی دیگر از شرایطی که استفاده از این روش ها را محدود می کند، وجود نرخ بالای جابجایی در مناطق غیر شهری که عاری از پراکنش کننده های دائمی با میزان باز پراکنش بسیار قوی به سمت رادار هستند، می باشد. روش نوین دیگری که توسط Hooper [۱۴۲] ارائه شد، تلفیق دو فن باز پراکنش کننده های دائمی و خط مبنای کوتاه به منظور افزایش دقت نتایج بود. این روش تلفیقی، مزایای هر دو فن متداول و پراکنش کننده های دائمی را به همراه دارد و با افزایش میزان همبستگی تداخل نماها و تعداد باز پراکنشگرها دقت عملیات باز یابی فاز را افزایش می دهد [۸۰].

نمونه ای از کاربرد این روش در Zhou, et al [۱۴۴] انجام شده است. آن ها با استفاده از ۴۷ تصویر TerraSAR-X و فن SBAS-StaMPS به بررسی فرونشست دشت Beijing در چین از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نرخ فرونشست حداکثر ۱۴۶ میلی متر در سال به دست آمد که در مقایسه با داده های تراز یابی زمینی به بهترین دقت ۲

میلی متر رسید. آن‌ها همچنین ویژگی‌های مکانی فرونشست را در انواع کاربری زمین تحلیل کردند که نرخ فرونشست جدی‌تری از ۱۲۷- تا ۲۰ میلی‌متر در سال به احتمال زیاد به ترتیب در منطقه‌ی آبی و تالاب، مزرعه‌ی شالی‌کاری، خاک‌های مرتفع، زمین‌های گیاهی و مناطق مسکونی روستایی رخ می‌دهد. آن‌ها همچنین در مورد رابطه‌ی بین عوامل اجباری گوناگون (گسل‌ها، سطح آب زیرزمینی و ضخامت تراکم پذیر) بحث کردند و اظهار داشتند که ساختار زمین‌شناسی بر فرونشست زمین تأثیر می‌گذارد به طوری که فرونشست زمین به وضوح در سراسر گسل‌ها تغییر می‌کند. نرخ فرونشست با کاهش سطح آب‌های زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند. همچنین فرونشست زمین متأثر از ضخامت تراکم پذیر می‌باشد و فرونشست به احتمال زیاد در مناطقی رخ می‌دهد که ضخامت تراکم پذیر بالای ۱۰۰ متر باشد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که لایه‌ی stratum ضخامت تراکم پذیر بین ۱۰۰ تا ۲۶۰، پلیستوسن میانی است و آبخوان مربوطه لایه‌ی اصلی استخراج آب زیرزمینی در دشت Beijing است [۱۴۴].

به طور کلی هدف از تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی، شناسایی هدف‌های همدوس که به ندرت تحت تأثیر عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی قرار می‌گیرند، می‌باشد. این اهداف مربوط به عوارض نقطه‌ای و دست‌ساز بشر است که به طور گسترده در مناطق شهری در دسترس هستند و کمتر در نواحی غیرشهری به چشم می‌خورند. راه حل این مشکل، سرانجام یک گام بزرگ روبه جلو در روش‌های تداخل‌سنجی پراکنشگر دائم مربوط به الگوریتم SqueeSAR پیشنهاد شده توسط Ferretti, et al [۶۹] است که تنها از اهداف نقطه‌ای استفاده نمی‌کنند بلکه اهداف توزیع یافته<sup>۱</sup> را هم وارد تحلیل تداخل‌سنجی می‌کنند. آن‌ها الگوریتم تداخل‌سنجی پراکنشگر دائم را با پردازش مشترک پراکنشگرهای دائم و توزیع یافته با در نظر گرفتن رفتار آماری آن‌ها توسعه دادند. الگوریتم SqueeSAR بر پیکسل‌هایی متعلق به مناطق با همدوسی متوسط تمرکز دارند، جایی که پیکسل‌های همسایه مقادیر بازتابی یکسانی که متعلق به عارضه‌ی یکسانی هست، دارا می‌باشند. نتیجه‌ی SqueeSAR تراکم و کیفیت بهتر نتایج تداخل‌سنجی پراکنشگرهای دائم است که به خصوص در مناطق غیرشهری قابل توجه است. Goel and Adam [۷۰] و Lv, et al [۱۴۷] روش‌های دیگری با دنبال کردن رویکردی مشابه توسعه دادند.

در همین راستا، Bonì, et al [۱۲۹] روشی را برای تحلیل داده‌های چندسنجنده‌ای و چندزمانه برای تفسیر زمین‌شناسی مناطق تحت تأثیر فرونشست یا بالآمدگی و حرکات فصلی ارائه دادند. این روش در منطقه‌ی دشتی Oltrepo Pavese (Po Plain, Italy) با استفاده از داده‌های ERS-1/2 و Radarast اعمال شد و با استفاده از الگوریتم SqueeSAR پردازش شد، محدوده‌ی زمانی تحت پوشش، به ترتیب از ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ و از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ می‌باشد. منطقه‌ی مورد آزمایش تحت تأثیر مخاطرات زمینی مختلفی قرار دارد و با نرخ متوسط حرکت از ۱۰- تا ۴ میلی‌متر در سال مشخص شد. اجزای مختلف حرکت شناخته شدند: خطی، غیرخطی و رفتارهای تغییر شکل فصلی. همچنین با مقایسه بین مناطق حرکت زمین و داده‌های جانبی یعنی اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژی و کاربری زمین، فرایندهای ناشی از طبیعت و انسان مثل تورم یا انقباض خاک‌های رسی، فرونشست زمین به دلیل بار

<sup>1</sup> Distributed Scatterer (DS)

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۲۶

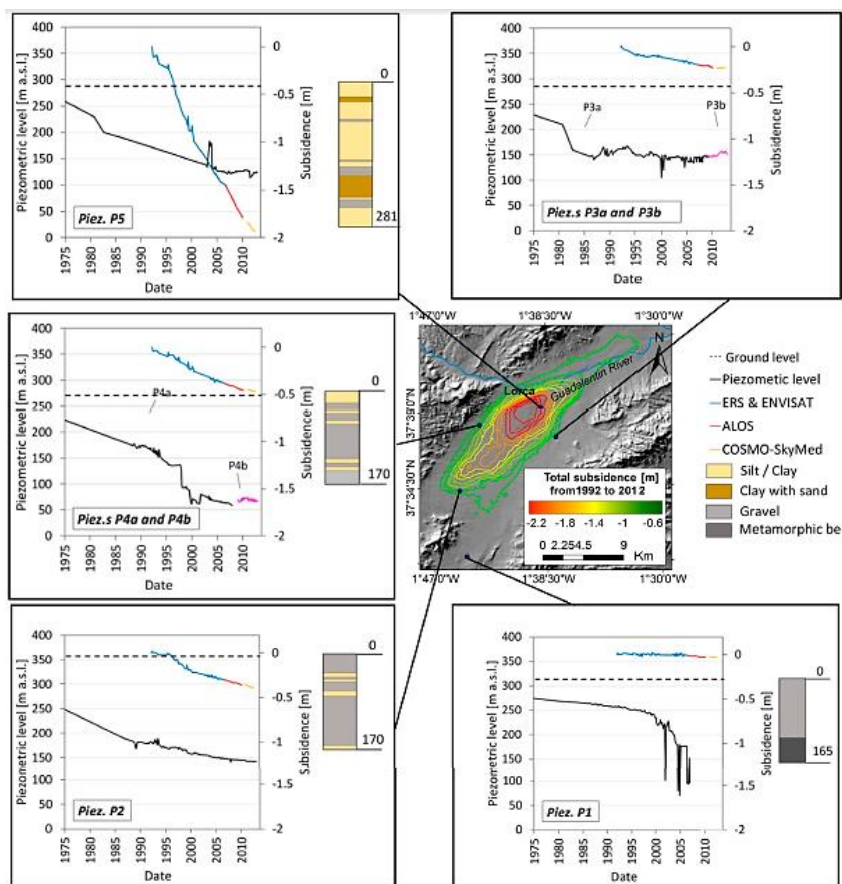
یک ساختمان جدید، بالآمدگی متوسط تکتونیک و حرکات فصلی زمین به دلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی شناسایی شدند [۱۲۹].

در نمونه‌ی دیگری، Boni, et al. [۱۴۸] به‌کارگیری سری زمانی تداخل‌سنجی تفاضلی پیشرفته را به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای پشتیبانی از مشکلات مختلف در مهندسی زمین‌شناسی مثل تشخیص، توصیف و مدل‌سازی مکانیسم فرونشست زمین نشان می‌دهند. قابلیت‌های این روش در سه سایت آزمایشی اروپا Oltrepo Pavese (Po Plain in Italy), Alto Guadalentin (Spain) و London Basin (United Kingdom) بررسی شده است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌منظور استخراج پتانسیل عالی در سری زمانی تداخل‌سنجی تفاضلی پیشرفته اعمال شد و مزیت این روش در تشخیص رفتارهای مختلف تغییر شکل زمین نشان داده شد. آن‌ها در مطالعه‌ی خود مقدار و بزرگی فرونشست را تشخیص داده، همچنین به توصیف مکانیسم‌های درگیر در فرونشست زمین پرداختند که مقایسه‌ی متقابلی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی، داده‌های لیتولوژیکی و سری زمانی جابجایی برای پنج سایت نمونه انجام شد که نتایج در شکل ۲-۲۴ قابل مشاهده است؛ جابجایی تجمعی با استفاده از سنجنده‌های ERS-ENVISAT، ALOS PALSAR و COSMO-SkyMed در دوره‌ی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲ به‌دست آمده است. به‌عنوان یک تحلیل نمونه، نزدیک به پیزومتر p1 که بیشترین افت آب زیرزمینی (۱۶۲ متر) از ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۷ اندازه‌گیری شد، فرونشست تجمعی به ۱۳ سانتیمتر در این دوره رسید. این شواهد با عدم وجود خاک‌های نرم در مرز جنوبی حوضه ارتباط دارد. در قسمت غربی حوضه که پیزومترهای P2، P4a و P4b قرارگرفته‌اند، ضخامت خاک نرم متعادل است (از ۱۸ تا ۲۱ متر). افت آب زیرزمینی بین ۳۱ و ۱۰۷ متر مطابق با فرونشست تجمعی در محدوده‌ی ۳۸-۴۸ سانتیمتر در این دوره است. همچنین، پیش‌بینی مورد انتظار حرکت زمین در پاسخ به تغییرات سطح آب زیرزمینی در حوضه‌ی لندن را، به لطف در دسترس بودن داده‌های سری زمانی دقیق شبکه‌ی borehole مشاهداتی توسط آژانس محیط‌زیست (حدود ۲۰۰ پیزومتر) ارائه کردند [۱۲۸].

Mateos, et al. [۱۴۹] هم از روش‌های تداخل‌سنجی پراکنشگر دائم دیگر با رویکردهایی مشابه استفاده کردند. آن‌ها در کار خود، اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی دقیق را با داده‌های پراکنشگر دائم برای درک بهتر فرایندهای فرونشست کشف‌شده در Vega de Granada (جنوب شرقی اسپانیا) در طول ۱۳ سال، ادغام کردند. همچنین حرکت زمین را با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌های ENVISAT (۲۰۰۳-۲۰۰۹)، CosmoSkyMed (۲۰۱۴-۲۰۱۱) و Sentinel-1A (۲۰۱۶-۲۰۱۵) بررسی کردند. نتایج تداخل‌سنجی پراکنشگرهای دائمی یک تغییر شکل الاستیک را در آبخوان و جابجایی سطح زمین (تا ۵۵ میلی‌متر) نشان می‌دهد. گسترده‌ترین فرونشست زمین در دوره‌ی ENVISAT (۲۰۰۳-۲۰۰۹) که هم‌زمان با یک دوره‌ی طولانی و خشک در منطقه بود، شناسایی شد. بیشترین نرخ جابجایی ثبت‌شده در طول این دوره (تا ۱۰ میلی‌متر در سال)، در قسمت مرکزی سفره‌ی آبخیز، جایی که بسیاری از روستاها قرارگرفته‌اند، شناسایی شد. برای این دوره یک همبستگی خوب بین کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش میانگین سرعت فرونشست وجود دارد. دوره‌ی Cosmo-SkyMed (۲۰۱۴-۲۰۱۱) با یک دوره‌ی بارانی همراه شد و فرونشست زمین تنها در برخی نقاط متمرکز شده است. نرخ متوسط فرونشست تا ۱۱.۵ میلی‌متر در سال برای این دوره به دست آمد و مربوط به منشأ انسانی و کارهای زمینی است. در طول دوره‌ی بررسی Sentinel-1A (۲۰۱۶-۲۰۱۵) بیشتر منطقه تغییر شکلی نشان نداد. در حقیقت آن‌ها یک تحلیل کامل از زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه و همچنین شرح سنگ‌شناسی سیستم آبخوان بر اساس تفسیر داده‌ی borehole انجام دادند. ادغام همه‌ی این داده‌های



زمینی با نتایج به دست آمده از بررسی تداخل سنجی پراکنشگر دائم بر آن است که یک دید قابل اطمینان از فرایندهای درگیر در فرونشست زمین به دست دهد و همچنین رفتار تغییر شکلی ناشی از استخراج آب زیرزمینی را تحلیل کند که می تواند به برنامه ی مدیریت آینده برای آبخوان کمک کند [۱۲۹].



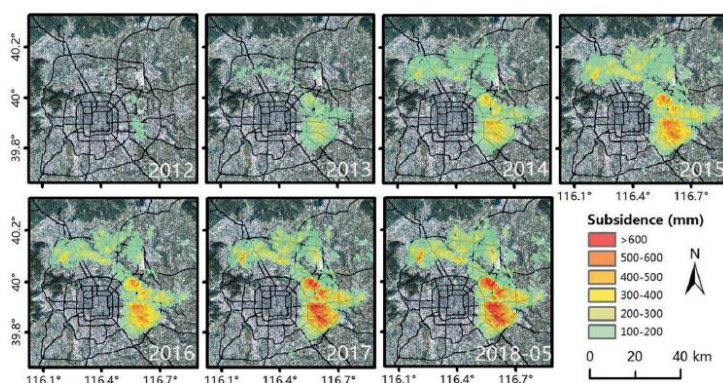
شکل ۲-۲۴- جابجایی تجمعی از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲ و مقایسه ی متقابل بین تغییرات سطح پیزومتری از ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۲ (خطوط مشکی و صورتی) در پیزومترهای مختلف با سری زمانی جابجایی های شناسایی شده توسط سنجنده های ماهواره ای (خطوط آبی، قرمز و زرد). برای برخی پیزومترها ستون لیتولوژیکی گزارش شده است. خط چین ها سطح زمین را نشان می دهد.

علاوه بر موارد گفته شده اخیراً روش های جدیدتری تحت عنوان TomoInSAR ارائه شده اند. اگرچه تداخل سنجی پراکنشگر دائم دستخوش پیشرفت های چشمگیری شده است، اما محدودیت باقیمانده این است که فرض می کند بیش از یک پراکنشگر در هر پیکسل وجود ندارد. این فرض ممکن است در محیط های ساخته شده ی پیچیده درست نباشد. هندسه ی تصویربرداری مایل سنجنده های راداری ممکن است باعث مشکلاتی همچون هم پوشانی در تصویر شود. در نتیجه، چندین پراکنشگر دائم از منابع مختلف می توانند در یک پیکسل هم پوشانی شوند، به ویژه برای تصاویر با حد تفکیک بالا (مثلاً TerraSAR-X). پراکنشگرهای هم پوشانی شده که باعث کاهش تراکم مکانی پراکنشگرهای دائم می شوند را نمی توان با روش های معمول تداخل سنجی پراکنشگر دائم مستقیماً تشخیص داد. افزون بر این، این فرض که یک پیکسل تنها شامل یک پراکنشگر دائم است، می تواند منجر به برآورد نادرست پارامترها برای یک پیکسل با

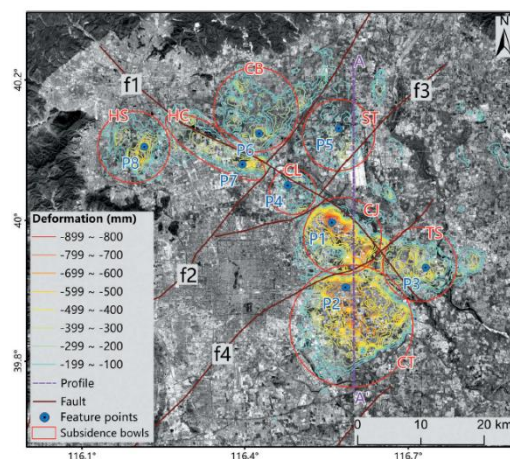
تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۲۸

چندین پراکنشگر دائم همپوشانی شده، شود. توموگرافی<sup>۱</sup> یک روش امیدوارکننده برای جداسازی پراکنشگرهای دائم همپوشانی شده است. Ma and Lin [۱۳۵] به منظور افزایش توانایی نظارت در محیط های ساخته شده ی شهری، یک روش تداخل سنجی پراکنشگر دائم بر مبنای توموگرافی به منظور شناسایی قوی پراکنشگرهای دائم تکی و دوتایی، بدون نیاز به حذف اولیه سهم فاز جوی در کل منطقه، ارائه دادند. این فن در محیط های ساخته شده با ارتفاع زیاد، با هوای ابری و بارانی پرکاربردتر است، جایی که با برداشتن سهم فاز جوی، ابهامات زیادی وجود دارد. باوجود باقی ماندن برخی ابهام ها در این روش، یک فن امیدوارکننده برای نظارت محیط های ساخته شده ی شهری است [۱۳۵].

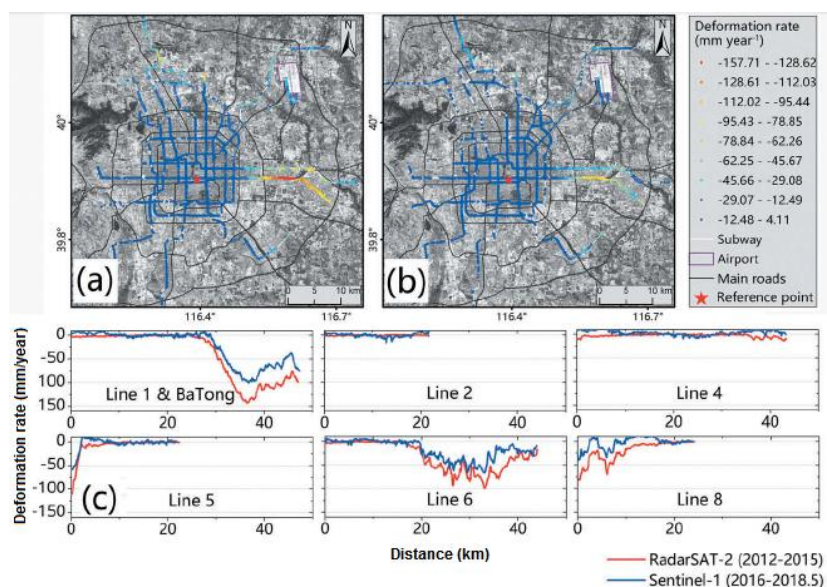
Zhou, et al [۱۴۰] نیز با این فن به بررسی الگوهای اخیر زمانی-مکانی فرونشست زمین در Beijing، با استفاده از ۳۹ تصویر RadarSAT-2 (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵) و ۳۳ تصویر Sentinel-1 (۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸) پرداختند. نرخ تغییر شکل عمودی زمین ۱۷۶.۲- تا ۱۲.۳+ میلی متر در سال از ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵، اما متعاقباً به ۱۱۹- تا ۸+ میلی متر در سال از ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ کاهش یافته است. داده های سری زمانی جابجایی نشان می دهد که کاهش نرخ فرونشست پس از سال ۲۰۱۶ می تواند به دلیل افزایش سطح آب زیرزمینی از پایان سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ باشد که این تغییرات به احتمال زیاد به دلیل افزایش بارندگی و پروژه ی انتقال آب اتفاق افتاده است. آن ها نرخ فرونشست را در سه مقیاس مختلف بررسی کردند: مقیاس منطقه ای کلان شهری، مقیاس کاسه ی فرونشست و مقیاس زیرساخت های تکی. شکل ۲-۲۵ موارد ذکر شده نمایش داده شده است:



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲-۲۵ الف) سری زمانی نقشه های فرونشست منطقه ای در منطقه ی شهری Beijing از ۲۰۱۲ تا مه ۲۰۱۸. ب) کاسه های فرونشست شرق و شمال Beijing و تغییر شکل تجمعی از ژانویه ۲۰۱۲ تا مه ۲۰۱۸. ج) نرخ تغییر شکل در طول خطوط مترو a. Beijing و b نرخ تغییر شکل میانگین به دست آمده، به ترتیب، RadarSAT-2 (۲۰۱۵-۲۰۱۲) و Sentinel-1 (۲۰۱۶-۲۰۱۸). خطوط قرمز و آبی، به ترتیب نتایج به دست آمده از داده های RadarSAT-2 و Sentinel-1

### ۳-۷-۲ مطالعات فرونشست انجام شده در ایران

برای فهم فرایندهای هیدرولوژیکی که بر منابع آبی تأثیرگذار هستند، اندازه گیری های ژئودتیک تغییر شکل های سطحی به وجود آمده در اثر آب های زیرزمینی نیاز است [۷۵-۷۷]. فن تداخل سنجی راداری به طور خاص مناسب برای پایش واکنش های الاستیک و غیر الاستیک سفره های آب زیرزمینی به دلیل تغییرات در سطح آب است که دیدگاه جدیدی از نقش ساختارهای زمین شناسی و پارامترهای سنگ شناسی در سفره های زیرزمینی می دهد [۷۶، ۷۸-۸۰]. برخلاف سایر فن های ژئودتیک که به اندازه گیری های نقطه در سطح زمین تکیه می کنند، تداخل سنجی رادار با روزهی مجازی به راحتی اندازه گیری های با وضوح بالا، جابجایی سطح را با دقت میلی متری در مناطق نسبتاً بزرگ فراهم می کند

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۳۰

[۲۶، ۴۷]. اگرچه اندازه گیری های تداخل سنجی تنها قادر به تعیین میزان جابه جایی در جهت خط دید سنجنده می باشد، اما با داشتن دو سری داده ی مناسب به حرکات قائم نیز حساسیت نشان می دهد که جهت اندازه گیری فرونشست یا برآمدگی زمین ناشی از برداشت با شارژ مجدد منابع آبی مناسب است. از آنجایی که تغییرات آب و هوایی باعث خشک سالی و کمبود آب های سطحی زمین شده است، برای برطرف کردن نیازهای اساسی برداشت از منابع آب زیرزمینی به شدت افزایش یافته است. در ایران نیز به دلیل حاکم بودن شرایط آب و هوایی خشک، پدیده ی فرونشست زمین در مناطق اختصاص یافته به فعالیت های کشاورزی بسیار بیشتر به چشم می خورد. در این قسمت به بررسی مناطقی از ایران که دست خوش پدیده فرونشست بوده و مورد تحلیل و بررسی با استفاده از فناوری تداخل سنجی راداری شده اند، پرداخته می شود.

### ۱-۳-۷-۲ تاریخچه ی مطالعات فرونشست در تهران

تهران به عنوان پایتخت ایران در بخش شمالی کشور واقع شده است که قسمت عمده ی جنوب غربی آن تحت تأثیر پدیده ی فرونشست قرار گرفته است. این پدیده، اولین بار بر اساس مشاهدات ژئودتیک از طریق تراز یابی دقیق در این منطقه پایش شد. عملیات تراز یابی دقیق توسط سازمان نقشه برداری کشور برای بازه ی زمانی ۱۹۹۵ و ۲۰۰۲ به انجام رسید و حداکثر نرخ جابجایی ۲۰ سانتی متر در سال حاصل شد [۱۵۷]. جهت مشخص نمودن رفتار زمانی این پدیده، در سال ۲۰۰۶، دو ایستگاه دائمی GPS توسط سازمان نقشه برداری کشور در منطقه ی تحت تأثیر فرونشست ساخته شد. ولیکن، امکان اندازه گیری جابجایی فقط در ایستگاه های GPS ممکن بود و جهت تحلیل زمانی پدیده کفایت نمی کرد [۷۹].

در این میان، فن تداخل سنجی راداری توانایی خود را در فراهم آوری اندازه گیری های دقیق جابجایی های زمین در مناطق وسیع و در قدرت تفکیک مکانی بالا ثابت نمود. از این رو، در راستای اندازه گیری های انجام شده توسط سازمان نقشه برداری کشور و اعلام رخداد پدیده ی فرونشست در منطقه ی وسیعی از جنوب غرب تهران، مطالعات بر روی آن توسط محققین سازمان زمین شناسی با همکاری جمعی از پژوهشگران دانشگاه آکسفورد انگلستان آغاز گردید. در گام نخست، به منظور صحت سنجی و تعیین محدوده ی پدیده ی فرونشست، روش تداخل سنجی راداری مورد استفاده قرار گرفت. سپس از تحلیل سری زمانی جهت تعیین نرخ فرونشست استفاده شد. بیشینه نرخ نشست در حدود ۱۶ سانتی متر در سال برآورد شد [۱۵۸]. در این مطالعه از ۸ تصویر ENVISAT به منظور محاسبه ی ۶ تداخل نما با فواصل زمانی ۲ ماه، ۳ ماه، ۴ ماه، ۶ ماه، ۱ سال و ۱ سال و نیم استفاده شد. از مشکلاتی که در پردازش تداخل سنجی راداری در این منطقه وجود داشت، کاهش سریع همبستگی بین تصاویر راداری با گذر زمان بود. لذا استفاده از فن تداخل سنجی راداری به صورت سنتی آن در این منطقه مناسب به نظر نمی رسید. در این حالت، استفاده از روش های مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی جهت پایش جابجایی در مناطقی که همبستگی تصاویر راداری با گذر زمان به سرعت کاهش می یابد، مناسب تر خواهد بود. همچنین از دیگر نواقص روند مطالعه ی فرونشست در دشت تهران این بود که در تحلیل سری زمانی جهت تعیین نرخ تغییرات، هرچه تعداد تداخل نماها بیشتر باشد نتایج از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار خواهد بود. در حالی که، در این مطالعه تعداد تداخل نماها بسیار محدود بود و این مسئله مانع از سرشکن شدن خطاهایی چون خطای اتمسفری، خطای مدار ماهواره و یا خطاهای ناشی از الگوریتم بازیابی فاز می شد.

در مطالعه ی فرونشست در این منطقه، در مراحل بعد از تعداد بیشتری تصویر (۱۲ تصویر ENVISAT) جهت پردازش تداخل‌نمایی با بازه‌های زمانی کوتاه به‌طوری‌که عدم همبستگی زمانی کمتر باشد، استفاده شد [۱۵۹]. در این تحقیق به کمک تحلیل سری زمانی و اعمال شرط نرم‌کنندگی، خطاهایی همچون اتمسفر، نویز و خطاهای باقیمانده‌ی مداری در سری زمانی جابجایی کاهش یافتند. همچنین در این مطالعه، خطای باقیمانده‌ی توپوگرافی که از عدم دقت مدل رقومی ارتفاعی ناشی می‌گردد، برآورد و از تداخل‌نماها کسر گردید. بدین ترتیب دقت نتایج حاصل از سری زمانی افزایش یافت. بیشینه نرخ جابجایی برآورد شده از تصویر، متوسط سرعت جابجایی، ۲۴ سانتی‌متر در سال را نشان می‌داد.

میرشاهی [۱۶۰] به بررسی رفتار فرونشست در منطقه‌ی مسکونی حد واصل میان فرودگاه مهرآباد و قلعه مرغی پرداخت. با توجه به نزدیکی این منطقه به منطقه‌ی جنوب غربی دشت تهران، انتظار می‌رفت تحت تأثیر پدیده‌ی فرونشست قرار گرفته باشد. در این مطالعه، از تصاویر مد Strip Map داده‌های TerraSAR-X با حد تفکیک مکانی در حدود ۳ متر در بازه‌ی زمانی ۱۱ ماه استفاده شد. از آنجایی‌که داده‌های مورد استفاده در دسته‌ی تصاویر با حد تفکیک مکانی بالا قرار می‌گیرند؛ به‌شدت به تغییرات حساس می‌باشند که امکان تشکیل تداخل‌نماهای همبسته به روش سنتی را دچار مشکل می‌کند؛ در نتیجه از روش SBAS به‌منظور پردازش تداخل‌سنجی و تحلیل سری زمانی داده‌ها استفاده شد. نتایج، نرخ فرونشست ماکزیمم ۱۶ سانتی‌متر در سال را نشان داده است.

موارد ارائه‌شده در بالا نمونه‌هایی از کاربرد فن تداخل‌سنجی راداری سنتی بود. درحالی‌که فن تداخل‌سنجی راداری سنتی قابلیت خود را در اندازه‌گیری جابجایی ناشی از پدیده‌های مختلف نشان داد، نتایج اخذشده در برخی موارد محدودیت‌های این فن را آشکار نمود. در شرایط نامطلوب همانند مقادیر کوچک جابجایی، مناطق مطالعاتی با هوای مرطوب، مناطق پوشیده از گیاه که ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین در اثر رشد گیاه به‌سرعت تغییر می‌کند و نیز کاهش همبستگی بین دو تصویر رادار در اثر اختلاف در زوایای دید رادار در آن‌ها، فن تداخل‌سنجی راداری قادر به اندازه‌گیری سیگنال جابجایی نیست.

در ادامه به‌مرور تحقیقات انجام‌شده از طریق فن‌های مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی مربوط به پایش فرونشست زمین در تهران، پرداخته می‌شود.

در مطالعه‌ی پدیده‌ی فرونشست دشت تهران، به دلیل نرخ جابجایی بسیار بالا و توزیع زمانی نامناسب تصاویر استفاده از الگوریتم StaMPS به‌صورت استاندارد آن منجر به نتایج نادرست گردید؛ لذا به‌منظور حل مشکل مربوط به نرخ بالای جابجایی، سه روش جدید توسط دهقانی پیشنهاد گردید که همگی سعی در بهبود تابع هزینه به‌منظور انجام عمل بازیابی فاز به‌طور صحیح دارند [۷۹].

استراتژی پیشنهادی اول روشی نوین از تلفیق فن تداخل‌سنجی راداری سنتی و فن تداخل‌سنجی راداری بر اساس پیکسل‌های پراکنشگر دائمی (الگوریتم StaMPS) به نام روش تلفیقی بود. در این روش که بهبودی به الگوریتم StaMPS بود، قبل از مرحله‌ی بازیابی فاز، سهم فازهایی که باعث نقض شرط نمونه‌برداری نایکوئیست می‌شود برآورد و از فازهای مشاهداتی کسر می‌گردد. فرض اساسی در روش تلفیقی این است که مؤلفه‌ی خطی جابجایی، سیگنال

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۳۲

اصلی جابجایی در منطقه باشد و نوسانات فصلی سطح زمین در منطقه در محدوده ی برقراری شرط نمونه برداری نایکوئیست باشد. بنابراین با فرض برقراری شرط نمونه برداری نایکوئیست، عملیات بازیابی فاز انجام شده و پس از آن فاز جابجایی خطی کسر شده به فاز بازیابی شده اضافه می شود.

در استراتژی پیشنهادی دوم دهقانی، با استفاده از مدل مؤلفه ی خطی جابجایی که به کمک فن تداخل سنجی راداری سنتی و ماتریس همبستگی ایجاد شده، تابع هزینه ی مورد استفاده در عملیات بازیابی فاز اصلاح گردید.

از محدودیت های دو استراتژی پیشین این است که نمی توان یک مدل جابجایی از فرونشست را در اختیار داشت. به عنوان مثال ممکن است توزیع داده های راداری در زمان و مکان به گونه ای باشد که محاسبه ی تداخل نماهای همبسته امکان پذیر نباشد. در استراتژی پیشنهادی سوم سعی شد که به کمک مشاهدات فاز نقاط پراکنشگر دائمی، مؤلفه ی خطی جابجایی برآورد شود که در آن نرخ جابجایی و ابهام فاز هم زمان با استفاده از روش پریودوگرام برآورد شدند.

تصاویر راداری مورد استفاده، ۲۲ تصویر گذر پایین در بازه ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ و ۱۹ تصویر گذر بالا در بازه ی زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ از سنجنده ی ENVISAT-ASAR بود. به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصل از روش تلفیقی در منطقه ی دشت تهران، از روش های متفاوتی از جمله داده های ترازایی دقیق و روش SBAS با استفاده از تصاویر راداری مستقل استفاده شد. علی رغم متفاوت بودن بازه ی زمانی داده های ترازایی دقیق و تصاویر راداری مورد استفاده در روش SBAS در مقایسه نرخ جابجایی روش تلفیقی و روش ترازایی در طول ایستگاه های ترازایی، به وضوح درستی استخراج الگوی فرونشست اثبات شد.

الگوریتم تلفیقی در مناطق با نرخ بالای فرونشست و با توزیع زمانی نامناسب تصاویر راداری در دسترس، نیاز به تشکیل تداخل نماهای همبسته به منظور ایجاد مدل جابجایی دارد. از این رو، صادقی الگوریتم بهبود یافته ی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی را جهت پایش فرونشست در مناطق غیر شهری با نرخ جابجایی بالا و بدون نیاز به تصاویر با خط مبنای مکانی و زمانی کوتاه و تداخل نماهای همبسته ارائه نمودند [۱۶۱]. با توجه به مطالعات گذشته، رفتار فرونشست در زمان برای دشت تهران دارای یک مؤلفه ی جابجایی با نرخ ثابت در بلندمدت است و اثرات فصلی به صورت سیگنال های سینوسی بر روی سری زمانی قرار گرفته اند که به دلیل برداشت مداوم از سفره، مقدار مؤلفه ی خطی فرونشست در مقایسه با اثرات فصلی فراوان است. صادقی راهکاری نیز به منظور افزایش کارایی الگوریتم StaMPS در برآورد نرخ فرونشست بدون نیاز به وجود تداخل نماهای همبسته ارائه دادند. تنها تفاوت این روش با استراتژی سوم پیشنهادی توسط دهقانی، حذف یال هایی است که دچار خطای بازیابی شده اند. وی از ۲۲ تصویر ENVISAT-ASAR مسیر ۱۴۹ در فاصله ی زمانی بین جولای ۲۰۰۳ و اکتبر ۲۰۰۸ استفاده کرد و نرخ جابجایی با استفاده از روش پیشنهادی، ۱۸/۶ سانتی متر در سال برآورد شد در حالی که نرخ برآوردی حاصل از الگوریتم StaMPS به صورت استاندارد آن ۳/۴ سانتی متر در سال بود. نرخ برآوردی روش پیشنهادی با نرخ حاصل از تصاویر مسیر مجاور بین سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ با استفاده از روش SBAS مقایسه شد.

میرشاهی، علاوه بر به کارگیری روش SBAS، از الگوریتم مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی StaMPS نیز جهت پایش فرونشست در همان منطقه استفاده نمودند. نتایج حاصل، نرخ بیشینه فرونشست ۱۲ سانتی متر در سال را نشان داده

است و این مؤید آن است که استفاده از داده های TSX با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالا، مشکل بازیابی فاز روش StaMPS را به میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است [۱۶۰].

در سال های بعد استفاده از داده های پلاریمتریک راداری مورد توجه قرار گرفت. استفاده از داده های دو و یا چهار پلاریزه منبع اطلاعاتی بیشتری را برای تحلیل سری زمانی فراهم می آورد. از این رو، از داده ی دو پلاریزه و ترکیب بهینه سازی شاخص پراکندگی دامنه ی پیکسل ها با معیار استحکام فاز جهت تحلیل تداخل سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی، استفاده شد [۱۶۲]. این روش برای ۱۷ تصویر دو پلاریزه ی TerraSAR-X در فاصله ی زمانی جولای ۲۰۱۳ و ژانویه ی ۲۰۱۴ بر روی منطقه ی جنوب غربی تهران (شامل نواحی مسکونی و کشاورزی بر اساس مفهوم الگوریتم StaMPS اعمال شده است. نتایج نشان داده است که در مقایسه با داده تک پلاریزه، به کارگیری پلاریزاسیون بهینه، به خصوص در مناطق با نرخ جابجایی بالا که استحکام فاز پایینی دارند؛ تعداد نقاط کاندیدای مرتبه اول را تا ۳ برابر و تعداد نقاط نهایی را تا ۵۰٪ افزایش می دهد.

در مطالعه ی بعدی توسط صادقی از بهینه سازی پلاریمتریک همدوسی زمانی در روش جدیدی تحت عنوان روش PolStaMPS ترکیب پلاریمتری راداری و روش تداخل سنجی StaMPS جهت افزایش تعداد نقاط پراکنشگر دائم در تمامی زمین ها، با و بدون عوارض دست ساز بشر استفاده شد. این روش برای بخش کوچکی از منطقه جنوب غرب دشت تهران با استفاده از ۲۲ تصویر TerraSAR-X در بازه ی زمانی جولای ۲۰۱۳ تا آوریل ۲۰۱۴ پیاده سازی شد. نتایج مقایسه هیستوگرام همدوسی زمانی، افزایش چشمگیر تعداد پیکسل های با مقادیر بالای همدوسی زمانی در کانال بهینه به دست آمده را در مقایسه با کانال های VV، HH و HH+VV نشان داد. با وجود افزایش جزئی تعداد پیکسل های پراکنشگر دائم با استفاده از کانال VV+HH در روش استاندارد StaMPS در مقایسه با کانال های HH و VV، تعداد این پیکسل ها در حالت PolStaMPS، ۵۰٪، ۵۶٪ و ۶۰٪ به ترتیب نسبت به استفاده از کانال های HH، HH+VV و VV افزایش یافت [۱۶۳].

در مطالعات جدید دهه های اخیر بررسی تغییرات سطحی به ویژه فرونشست اتفاق افتاده در محدوده سازه های مهم زمینی و زیرزمینی و شناسایی رفتار دینامیک سطحی این سازه ها همواره یکی از چالش های بزرگ و مهم بوده است که هزینه های زیادی را نیز متوجه سازمان های مختلف کرده است. یکی از فناوری های نسبتاً جدید برای بررسی این جابه جایی ها فناوری تداخل سنجی راداری است، لذا بابایی [۱۶۴] با تکیه بر تصاویر راداری COSMO-SkyMed با قدرت تفکیک بالا به بررسی فرونشست در محدوده برخی از سازه های زمینی و زیرزمینی مهم شهر تهران بین سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ پرداخت. وی برای آنالیز سری زمانی تداخل سنجی در این پژوهش از روش پراکنشگرهای دائمی در پکیج StaMPS تحت دو رویکرد PS و SBAS استفاده کرد و نتایج هر دو روش پردازش نشان داد که در قسمت جنوب غربی شهر تهران و در مناطق شهرداری ۹، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۱ فرونشست معناداری در فاصله زمانی این یک سال اتفاق افتاده است که متوسط نرخ آن در جهت خط دید ماهواره ۶۱ میلی متر در سال می باشد. همچنین در ادامه با تکیه بر نتایج به دست آمده از پردازش سری زمانی تداخل سنجی راداری و شناسایی مناطق خطر، به بررسی تغییر شکل های ایجاد شده در محل برخی از سازه های مهم از جمله؛ برج میلاد، استادیوم آزادی، برج آزادی، فرودگاه مهرآباد و همچنین تغییرات سطحی در مسیر متروی تهران پرداخت تا مناطقی که در معرض خطر هستند را شناسایی کرده و



تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۳۴

جهت انجام اقدام های پیشگیرانه مناسب در آینده به سازمان های ذی ربط معرفی شوند. نتایج نشان دادند که در محدوده برج و میدان آزادی شاهد فرونشستی به اندازه ۳۰ میلی متر در سال و برای محدوده فرودگاه مهرآباد این مقدار بسیار چشمگیر و به میزان ۶۰ میلی متر در سال در جهت خط دید ماهواره است، در مناطق ۵ و ۲۲ شهرداری نیز رفتار جابه جایی دو سازه مهم برج میلاد و استادیوم آزادی را در میدان تغییر شکل سری زمانی بررسی کردند که در محدوده برج میلاد فرونشستی به اندازه ۱۶ میلی متر در سال و در اطراف و خود استادیوم آزادی فرونشستی نبوده و این جابه جایی تقریباً صفر در این نواحی محاسبه شده است، در متروی تهران وضعیت سه مسیر اصلی؛ خط ۱ (کهریزک به سمت تجریش)، خط ۲ (صادقیه به سمت فرهنگسرا)، خط ۳ (آزادگان به سمت قائم) با نتایج استخراج شده از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی تطبیق داده شد. نتایج پردازش نشان می دهد که خوشبختانه در طول مدت این یک سال فرونشست معناداری در مسیر این خطوط اتفاق نیفتاده است [۱۶۴].

همان طور که بیان شد منطقه تهران تحت تأثیر تغییر شکل به وجود آمده ناشی از کاهش منابع آب زیرزمینی طی دهه های اخیر بوده است که قسمتی از آن به دلیل مهاجرت های زیاد به این محدوده و افزایش جمعیت سریع بوده و قسمت دیگر مربوط به برداشت کنترل نشده آب جهت مصارف صنعتی و کشاورزی در اطراف این محدوده است [۱۶۵]. از دهه ۱۳۷۰ بهره برداری گسترده از منابع آب زمینی باعث کاهش حدود ۱۳ متری سطح آب های زیرزمینی از منطقه ورامین تا جنوب شرق دشت تهران شده است. برآوردهای رسمی تا سال ۱۳۸۶ اعلام می داشتند که ۸۰۰۰ حلقه چاه حفر غیرقانونی در استان تهران وجود دارد [۱۶۶]، درحالی که برآوردهای غیررسمی این رقم را نزدیک به ۳۰،۰۰۰ برآورد کرده اند. داده های ماهواره ای نشان می دهد تغییر شکل سطح در تهران عمدتاً در دو منطقه رخ می دهد: یکی در غرب دشت تهران (تقریباً ۳۶ سانتی متر/سال با فرض نرخ ثابت) و دیگری در محدوده ورامین تا جنوب غرب دشت تهران (۲۳ سانتی متر/سال (در سال ۲۰۰۴)). نقشه های تداخل سنجی راداری محدوده نشست دیگری در شرق فرودگاه بین المللی تهران تا جنوب غرب شهر تهران را نمایش می دهند.

## ۲-۷-۳-۲ تاریخچه مطالعات تغییر شکل پوسته ی زمین در دیگر نقاط ایران

در این بخش به بررسی نمونه هایی از فرونشست زمین به دلیل بهره برداری بیش از حد از منابع آب در ایران پرداخته و نتیجه می شود که فرونشست رخ داده در محدوده سفره های آب زیرزمینی پدیده ی گسترده ای در ایران است. نشانه هایی از کوچک شدن سفره های آب زیرزمینی به دلیل برداشت بیش از حد از این منابع دیده می شود که باعث به وجود آمدن فرونشست ها در این مناطق می گردند.

Dehghani, et al [۱۶۷] فرونشست زمین در محدوده رفسنجان را با استفاده از داده های چاه های پیژومتری، پوشش گیاهی و نوع خاک در سطح منطقه مدل کردند. همچنین با استفاده از مدل تصمیم گیری چند ویژگی AHP، هر شاخص بنا بر شدت تأثیر آن بر فرونشست، وزن دهی شده و سپس لایه های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات مکانی GIS با استفاده از مجموعه داده های متفاوت مثل تصاویر ماهواره ای ایجاد کردند. در نهایت این لایه های اطلاعاتی به وجود آمده با وزن دهی به هر کدام از آن ها یکپارچه شدند. جهت ارزیابی نتایج مدل سازی انجام شده تداخل سنجی رادار با روزهی مجازی به عنوان ابزاری قدرتمند برای اندازه گیری تغییر شکل زمین در حد تفکیک های بالا مورد استفاده قرار دادند. در اینجا از روش تداخل سنجی تفاضلی جهت برآورد فرونشست رخ داده با استفاده از ۳ تصویر ماهواره ENVISAT-ASAR در سال ۲۰۰۵ استفاده شد. نقشه نهایی تولید شده توسط مدل سازی با نقشه جابجایی حاصل



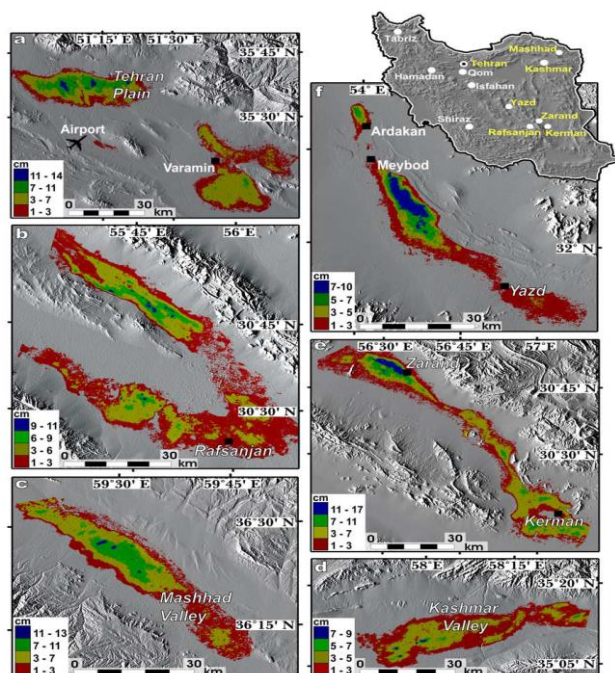
از تداخل سنجی راداری مقایسه شد. سازگاری بالا از مدل فرونشست و نقشه جابجایی استخراج شده از تداخل سنجی راداری نشان می دهد که وزن دهی به عوامل فرونشست و ادغام آن ها به طور دقیقی انجام شده است [۱۶۷]. استخراج شدید آب زیرزمینی برای آبیاری زمین های تولید پسته، سطح آب های زیرزمینی منطقه ای را بین سال های ۱۹۷۱ و ۲۰۰۱ بیش از ۱۵ متر کاهش داده است. این موضوع فرونشست گسترده ای در سطح دشت (چیزی در حدود ۵۰ سانتی متر/سال) به صورت کاسه ای (شکل ۲-۲۶-b) را نشان می دهد که بیشترین میزان فرونشست برای منطقه ای است که بیشترین استخراج آب در آن محدوده بوده است [۱۶۶].

استخراج منابع آب زیرزمینی در محدوده شمال شرق ایران در محدوده دره کاشمر و مشهد نیز به طور گسترده ای انجام می شود که باعث شده از دهه ۱۹۸۰ بیش از ۱۵ متر و یا در بعضی نقاط تا ۶۴ متر از سطح آب های زیرزمینی کاسته شود [۱۵۶، ۱۶۸]. دهقانی [۱۶۹] در مطالعه ای دیگری تحلیل سری زمانی بر مبنای SBAS برای مطالعه جابجایی ناشی از فرونشست دشت مشهد انجام داده است. ۱۸ تداخل نما به کمک ۱۲ تصویر ENVISAT-ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ مورد پردازش قرار گرفت. به منظور کاهش اثر عدم همبستگی زمانی ناشی از زمین های کشاورزی، تنها تداخل نماهای با طول خط مبنای زمانی کوتاه در تحلیل سری زمانی ایجاد شد. لیکن به منظور کاهش اثر کمبود رتبه ماتریس ضرایب در حل کمترین مربعات، در این منطقه برخلاف روش معمول SBAS تداخل نماهایی با طول خط مبنای مکانی بلند نیز مورد پردازش قرار گرفتند. همچنین در منطقه مورد مطالعه اثر عدم همبستگی مکانی قابل توجه نبوده است. از آنجا که اثر باقیمانده توپوگرافی در تداخل نماهای با طول خط مبنای مکانی بلند قابل توجه می باشد، لذا این تداخل نماها قبل از ورود به تحلیل سری زمانی نسبت به این اثر تصحیح شدند. همچنین با ورود شرط نرم کنندگی در حل کمترین مربعات تأثیرات جوی در سری زمانی جابجایی کاهش یافت. بیشترین مقدار نرخ فرونشست ۲۳ سانتی متر در سال برآورد شد. همچنین رابطه تنش- کرنش در سفره آب زیرزمینی با ترکیب اطلاعات سطح آب چاه های پیژومتری و نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت [۱۶۹]. فرونشست در دومین منطقه بزرگ شهری ایران، مشهد، به صورت بیضی کشیده از شمال غرب تا جنوب شرق در محوره دره ای با بیشترین مقدار نشست در حدود ۳۰ سانتی متر/سال (در سال ۲۰۰۴) رخ داده است (شکل ۲-۲۶-c). در کاشمر نیز فرونشستی در حدود ۲۷ سانتی متر بر سال در سال ۲۰۰۴ رخ داده است (شکل ۲-۲۶-d). دشت نوق- بهرمان در شمال غرب رفسنجان در ناحیه بیابانی ایران واقع شده و به سبب خشکی محیط و نبود منابع آب سطحی، حیات و فعالیت های اقتصادی آن به شدت به منابع آب زیرزمینی وابسته است. به این سبب، تمرکز بهره برداری های صنعتی- کشاورزی و آب شرب بر منابع آب دشت، بیلان منفی و افت تراز آب زیرزمین را به دنبال داشته است. افت تراز آبی در رسوبات آبرفتی دشت به زایش مسئله نشست زمین منجر شده است. شریف کیا [۱۷۰] به برآورد میزان و دامنه پدیده نشست به کمک روش سنجش از دور راداری در این محدوده پرداخته است. بدین منظور، روش تداخل سنجی تفاضلی داده های راداری بر روی داده های ماهواره ای در دو باند C و L در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ به کار گرفته است. یافته های تحقیق او مؤید حاکمیت میزان فرونشست با متوسط سالیانه حدود ۳۰ سانتی متر در پهنه ای به گستره ۲۸۱ کیلومتر مربع در بخش میانی دشت است. بررسی تغییرات میزان و دامنه نشست در بازه های زمانی فصلی و سالیانه به کمک سری زمانی این تصاویر روشن کرد که به سبب ثابت بودن میزان تأثیرگذاری عوامل ایجابی فعالیت کشاورزی پسته کاری در رویداد این پدیده، تغییرات فصلی و سالیانه میزان فرونشست بسیار اندک بوده؛ اما دامنه برخوردار از حداکثر میزان نشست از نواحی

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۳۶

میانی و شرقی در فصل های بهار و تابستان به نواحی جنوبی و غربی در فصل های زمستان و پاییز تغییر یافته است. منطبق سازی الگوی فضایی نشست با نواحی زراعی و مسکونی مؤید انطباق کامل نواحی در معرض نشست با عرصه های زراعی است. در حالی که فقط تعداد محدودی از سکونتگاه های بخش شرقی بر روی نواحی در حال نشست قرار دارند. همچنین مقایسه میزان فرونشست با ارقام تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه های پیژومتری نشان می دهد در این دشت هر  $\frac{3}{2}$  سانتی متر افت تراز آبی قادر است فرونشستی به میزان ۱ سانتی متر را ایجاد کند. همچنین دشت زرد-کرمان در شمال شرق رفسنجان نیز دچار فرونشست شدیدی شده است. از سال ۱۹۹۰ این منطقه نیز شاهد کاهش سطح آب های زیرزمینی تا بیش از ۲۰ متر بوده است. نقشه های تداخل سنجی نشان می دهند که در محدوده ای حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مربع واقع در دره فرونشست اتفاق افتاده است. بیشترین میزان فرونشستی که در محدوده زرد در منطقه ای به وسعت ۳۷ کیلومتر مربع در راستای شمال غرب به جنوب شرق بوده، در حدود ۲۲ تا ۲۵ سانتی متر/سال در سال ۲۰۰۴ برآورد شده است (شکل ۲-۲۶-e). مناطق اطراف کرمان و بخش مرکزی دره نیز دچار فرونشست شده اند اما نرخ آن بسیار کمتر بوده است [۱۶۶].

استان یزد در مرکز منطقه کویری ایران واقع شده است و خشک ترین مناطق ایران است که میزان بارش ها در این منطقه بسیار ناچیز و در حدود ۶۰ میلی متر در طول یک سال بارانی است [۱۷۱]. در نتیجه آبیاری زمین های کشاورزی و انجام فرآیندهای صنعتی کاملاً به منابع آب زیرزمینی وابسته هستند. اندازه گیری سطح آب زیرزمینی برای چندین حلقه چاه پیژومتریک نشان از کاهش مداوم حدود ۱۲ متر از دهه ۱۹۷۰ تاکنون دارد. دشت یزد-اردکان بین سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ سه منطقه تغییر شکل را مشخص می کند که در کنار هم یک منطقه قوس به طول ۹۰ کیلومتر از جنوب شرقی یزد تا شمال اردکان تشکیل می دهند. بیشترین میزان فرونشست بین یزد و میبد رخ داده که در حدود ۹/۴ سانتی متر در سال است (شکل ۲-۲۶-f) [۱۵۶].



شکل ۲-۲۶- نقشه ی فرونشست مرتبط با استخراج آب های زیرزمینی حاصل از روش تداخل سنجی رادار با روزهی مجازی در ۶ منطقه از ایران. (A) تهران ۲۰۰۴، (B) رفسنجان ۲۰۰۵، (C) مشهد ۲۰۰۴، (D) کاشمر ۲۰۰۴، (E) زرد-کرمان ۲۰۰۳-۲۰۰۴، (F) یزد-اردکان ۲۰۰۳-۲۰۰۴.

حقیقت مهر [۱۷۲] در سال ۱۳۹۰ جهت ارزیابی روش تداخل سنجی راداری، از مقایسه هم زمان مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و داده های راداری در دشت هشتگرد که به علت استخراج از منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر پدیده فرونشست قرار گرفته بود، استفاده کرد. به منظور تحلیل سری زمانی جابه جایی سطح زمین، الگوریتم SBAS را به کار گرفت. همچنین این تحلیل، با استفاده از ۶ تداخل نمای محاسبه شده از ۴ تصویر راداری ماهواره ENVISAT-ASAR در بازه زمانی ۴ ماه در سال ۲۰۰۸ انجام داد. یک عامل نرم کنندگی بهینه که نویز ناشی از اتمسفر، خطای بازایی فاز و اثرات مداری را کاهش می دهد و در عین حال تغییر شکل های غیر خطی را حفظ می کند، به حل کمترین مربعات اضافه کرد. نتایج تحلیل سری زمانی نشان می داد که منطقه به طور پیوسته در حال نشست است. نقشه سرعت میانگین تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره که از تحلیل سری زمانی به دست آمده، آهنگ قابل توجه فرونشست را ۴۷ میلی متر در ماه نشان داد. به منظور ارزیابی نتایج سری زمانی تداخل سنجی راداری، یک شبکه متراکم GPS متشکل از ۱۸ ایستگاه در منطقه طراحی شد. در مکان یابی ایستگاه ها از الگوی مکانی فرونشست حاصل از تداخل نمای محاسبه شده از داده های ۲۰۰۳ - ۲۰۰۴ و بررسی های میدانی استفاده شد. ایستگاه های GPS هم زمان با داده های راداری اقدام به جمع آوری و ثبت داده های خام کردند. سپس با استفاده از پردازش مشاهدات صورت گرفته، میزان جابه جایی افقی و قائم ایستگاه ها محاسبه شد. سری زمانی حاصل شده از دو روش تداخل سنجی راداری و GPS، با یکدیگر مقایسه شدند. مقایسه نتایج به دست آمده، سازگاری بسیار بالای تداخل سنجی راداری و روش ژئودتیک را ارائه داد که نشان دهنده عملکرد بالای روش تداخل سنجی راداری است [۱۷۲].

دشت مهیار جنوبی واقع در ۵۰ کیلومتری جنوب شرق اصفهان یکی دیگر از مناطقی می باشد که به دلیل فرونشست زمین در دهه های اخیر با معضلات زیادی از جمله برای زمین های کشاورزی، مناطق مسکونی، جاده ها و کانال های آبرسانی مواجه شده است. در سال های اخیر برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی این دشت رشد چشمگیری داشته و طبق آمار و اطلاعات موجود بیشترین برداشت از منابع آب زیرزمینی این دشت در بخش کشاورزی صورت می گیرد. به طوری که میزان برداشت آب از ۵۸/۸ میلیون مترمکعب توسط ۲۱۷ حلقه چاه در سال ۱۳۶۹ به ۸۵/۵ میلیون مترمکعب از ۴۴۶ حلقه چاه در سال ۱۳۸۸ رسیده است. پیامدهای این افت سطح آب زیرزمینی منجر به فرونشست زمین و ایجاد ترک و شکاف ها در قسمت هایی از دشت شده است. افت سطح ایستایی و به دنبال آن افزایش تنش مؤثر دلیل اصلی فرونشست دشت مهیار جنوبی است. صالحی [۹۷] جهت تعیین محدوده تحت تأثیر و نهایتاً برآورد میزان فرونشست از روش تداخل سنجی راداری به عنوان روشی قابل اطمینان برای اندازه گیری تغییرات سطح زمین با دقت بسیار بالا، پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده گردید. بیشینه نرخ فرونشست با استفاده از تصاویر راداری ماهواره ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۶، ۸/۲ سانتی متر در سال محاسبه گردید. از نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی مشخص شد که سطح زمین در محدوده خطر در نتیجه افت سطح ایستایی با سرعت ثابت در حال افت می باشد [۱۷۳].

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۳۸

از دیگر نمونه های بررسی فرونشست با استفاده از فن تداخل سنجی راداری می توان به مواردی در منطقه دشت قزوین به مطالعه Babaei, et al [۱۷۶] اشاره کرد. همچنین مطالعه انجام شده در دشت خرمدره توسط Ahmadi N. [۱۷۵] نیز نشان دهنده همخوانی داده های ترازبایی و سامانه تعیین موقعیت جهانی و اطلاعات به دست آمده از تداخل سنجی راداری می باشد. در هر دو این مناطق نیز دلیل فرونشست برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی بوده که از مقایسه اطلاعات سطح آب چاه های پیژومتری و همچنین افزایش تعداد آن ها با میزان فرونشست می توان به این نتیجه رسید.

#### ۴-۷-۲ بحث و بررسی

افزایش نیاز به منابع آب زیرزمینی به دلیل توسعه مناطق شهری و کشاورزی به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک چالش بزرگی است. در ایران نیز به دلیل استخراج بی رویه و محدود نشده آب برای مصارف فردی، کشاورزی و همچنین صنعتی شاهد تخلیه سریع منابع آبی هستیم؛ که این کاهش منابع آب زیرزمینی باعث تغییر شکل در پوسته ی زمین در مقیاس محلی و منطقه ای شده است. مقایسه داده های سطح آب با مشاهدات ماهواره های رادار نشان از کاهش سفره های آب زیرزمینی در کشور است. این کاهش سطح آب های زیرزمینی اغلب با تخریب سفره های زیرزمینی همراه بوده که به ظاهر مشکل عمومی در حوزه ی آب های زیرزمینی بخش مرکزی و شمال شرق ایران است. گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی مناطق خشک و نیمه خشک را در دهه های آینده تحت تأثیر قرار خواهد داد؛ به علاوه خطرات بیشتری همچون فرونشست زمین ناشی از استخراج آب های زیرزمینی را در پی خواهد داشت. نقشه های فرونشست به دست آمده از تداخل سنجی راداری می تواند تأثیر به سزایی در کاهش پیامدها و خطرات فرونشست داشته باشند و به مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی در سطح محلی و منطقه ای کمک کنند. فرونشستی که اغلب در زمینه ی کشاورزی رخ می دهد، نشان دهنده ی آن است که استخراج آب برای فعالیت های کشاورزی دلیل اصلی فرونشست در مناطق مرکزی و شمال شرق ایران است. مطالعات انجام شده نشان می دهند که حداقل ۲۵٪ از جمعیت ۸۰ میلیونی ایران در مناطق نزدیک به مخازن آبی سکونت دارند که به شدت در حال کاهش هستند [۱۶۶]. مکان هایی که تغییر شکل سطح زمین در آن ها پتانسیل افزایش تا یک متر و یا بیشتر را در طول مدت زمان کوتاهی (چند سال) دارند. فرونشست های سریع به دلیل استخراج منابع آبی معمولاً در مقیاس مکانی کوچک تری دیده می شوند. برای مثال استخراج بی رویه در کرمان باعث به وجود آمدن منطقه نشست کوچکی با نرخ نشست بالا شده است. لازم به ذکر است که بررسی های انجام شده در طول فصل تابستان همواره نرخ فرونشست بالاتری را نسبت به اندازه گیری های سالیانه نشان می دهند. در واقع داده های پیژومتری نوسان های فصلی را نشان می دهند که انتظار می رود بر نرخ فرونشست تأثیر داشته باشند [۸۲]. تداخل سنجی هایی که دوره های زمانی متوالی را پوشش می دهند یا مواردی که فصول بارانی را شامل می شوند نیز همچنان فرونشست را نشان می دهند، این موضوع دلالت بر آن دارد که تغییر شکل در درجه اول توسط تراکم دائمی و غیر استاتیک کنترل می شود [۱۶۶].

در مقایسه با نرخ تغییر شکل در اثر کاهش آب های زیرزمینی در دیگر دشت های شناخته شده مانند Las Vegas آمریکا [۱۵۲]، Mexico City مکزیک [۱۷۶] و New Orleans آمریکا [۱۷۷]، ایران در حال حاضر دارای سریع ترین دشت ها و دره های در حال فرو رفتن است. بنابراین استخراج کنترل نشده ی آب های زیرزمینی و فرونشست های مربوطه در آینده ممکن است موجب تهدید مناطق غیر کشاورزی نیز گردد که باعث صدمه های جبران ناپذیر به دلیل تغییر در ارتفاع سطح زمین در زیرساخت ها شود. این در حالی است که آسیب به زیرساخت ها را می توان تعمیر کرد اما تأثیر

تأمین منابع آب زیرزمینی تخلیه شده با پیامدهای عظیم اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی بسیار بیشتری همراه خواهد بود. انتظار می رود که تغییرات آب و هوایی آینده فشار بیشتری را برای منابع آب زیرزمینی در ایران ایجاد کند. مطالعات اخیر نشان می دهد که کل سرانه منابع آب در ایران در طی ۴ دهه گذشته بیش از ۶۵ درصد کاهش یافته است و پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۵ تا ۱۶ درصد دیگر نیز کاهش یابد [۱۶۵]. افزایش نیاز به آب های زیرزمینی و میزان بالای فرونشست ناشی از بهره برداری بیش از حد از این منبع ارزشمند احتمالاً به یک چالش جدی برای توسعه آینده در حوضه آب های زیرزمینی مناطق مرکزی و شمال شرقی ایران تبدیل خواهد شد.

تجربیات دیگر مناطق که از کاهش آب زیرزمینی و فرونشست سریع رنج می برند، نشان می دهد که اجرای مدیریت مؤثر منابع آب ممکن است به کاهش خطرات احتمالی ناشی از فرونشست سطح زمین کمک کند. به عنوان مثال، رساندن آب های سطحی به مناطق کشاورزی در دره San Joaquin در کالیفرنیا از طریق کانال آب رسانی کالیفرنیا در اواخر دهه ۱۹۶۰ به شدت نرخ های تغییر شکل در منطقه که قبلاً تا ۱۰ متر فرونشست را تجربه کرده بودند، کاهش داد [۱۷۸]. مناطقی که هم اکنون شهر سن خوزه (در دره Santa Clara) است نیز دارای فرونشست سریع تا ۴ متر بود تا اینکه اقدامات پیشگیرانه برای متوقف کردن برداشت آب انجام شد [۱۷۹]. هم اکنون اندازه گیری های تداخلی تنها چرخه های فصلی نزدیک به ۲ سانتی متر و دوره های کلی نزدیک به ۵ سانتی متر را در دره Santa Clara نشان می دهد به طوری که سطح آب تا نزدیک سطح آرتزی، با تکیه بر آب منتقل شده از کوه های Sierra Nevada به منطقه خلیج، بازگشت داشته است [۸۲]. بنابراین، نظارت دقیق بر روی منابع آب زیرزمینی ضروری است و باید در استفاده صحیح از آب های زیرزمینی احتیاط کرد تا پیامدهای اجتماعی و اقتصادی ناشی از بهره برداری بیش از حد که ممکن است در مرزهای ملی احساس شود، کاهش یابد. در نهایت، به اهمیت دستیابی به داده های دقیق هیدرولوژیکی همچون جانمایی چاه ها، میزان بهره برداری و نقشه های سنگ سنجی توالی زیر سطحی در مناطق تحت تأثیر فرونشست زمین اشاره می شود تا درک بهتری از ارتباط بین جابجایی های سطحی و پایین آمدن سطح آب زیرزمینی وجود داشته باشد. چنین اطلاعاتی، همراه با نظارت مستمر با استفاده از تداخل سنجی راداری، می تواند جزئیات بیشتری از هیدرولوژی مناطق فرونشست و پارامترهای ژئومکانیکی ساختار آبخوان زیرین را نشان دهد.

## ۲-۸ روش شناسایی فرونشست

### ۲-۸-۱ مقدمه

در اکثر دشت های ایران، دور از مناطق شهری و سازه های دست ساز بشر که شامل زمین های کشاورزی می شوند، به علت برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، نرخ جابجایی بالاست. بنابراین به علت نرخ بالای جابجایی و کاهش همبستگی ناشی از تغییر سریع سیمای ظاهری زمین و از طرف دیگر عدم دسترسی به داده های راداری با طول خط مبنای مکانی و زمانی کوتاه، تکنیک تداخل سنجی راداری به روش سنتی قادر به پایش فرونشست در این مناطق نخواهد بود و تکنیک مبتنی بر پراکنشگرهای دائم پیشنهاد می شود [۷۷]. این تکنیک قابلیت اندازه گیری جابجایی سطح زمین با دقت چند میلی متر را داراست. تکنیک های متنوعی بر پایه ی پراکنشگرهای دائم ارائه شده است که در این پژوهش از تکنیک مرسوم مبتنی بر پراکنشگرهای دائم ارائه شده توسط Ferretti و همکاران [۱۰۹] مورد استفاده قرار می گیرد.

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۴۰

## ۲-۸-۲ مراحل روش تداخل سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائم

به طور کلی حلقه‌ی پردازشی این الگوریتم به دو بخش کلی تقریب اولیه و تقریب نهایی و افزایش تراکم نقاط تقسیم می‌شود. پیش از این دو مرحله، مراحل تشکیل تداخل‌نماها و ایجاد تداخل‌نمای تفاضلی از مدل رقومی ارتفاعی موجود صورت می‌گیرد. هدف از بخش تقریب اولیه، تقریب فاز اتمسفر به منظور جداسازی فاز اتمسفر از دیگر تأثیرات و ثانیاً توصیف یک شبکه مرتبه‌ی اول از نقاط PS قابل اطمینان است که به عنوان یک مرجع برای مرحله‌ی افزایش تراکم ذخیره می‌شوند. اولین هدف از طریق فیلتر کردن فاز باقیمانده بعد از تقریب خطای ارتفاع و سرعت جابجایی بر پایه‌ی همبستگی مکانی و عدم همبستگی زمانی، سیگنال اتمسفر برآورد می‌شود. تقریب اولیه در یک شبکه از پیکسل‌هایی با اکثریت همبستگی با کاندیدهای PS مرتبه اول صورت می‌گیرد. در بخش دوم پس از جداسازی سیگنال اتمسفر از فاز PS های مرتبه اول، اثر اتمسفر درونیابی می‌شود و از فاز کاندیدهای PS مرتبه دوم کسر می‌شود. بنابراین پارامترهای مجهول برای هر PS از کاندیدهای مرتبه دوم تقریب زده می‌شود. پس از تقریب، انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی بر پایه‌ی حدآستانه همدوسی زمانی صورت می‌گیرد.

هدف اصلی، شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که در فواصل زمانی طولانی همدوس باقی می‌مانند. نقطه‌ی شروع با تداخل‌نماهای تفاضلی است که همگی دارای یک تصویر پایه می‌باشند. فاز هر پیکسل در تصویر SAR به دلایل تغییرات موقعیت نسبی پراکنشگر نسبت به ماهواره، تغییرات زمانی مربوط به هدف و تغییرات جوی (تصویر فاز ناشی از اتمسفر<sup>۱</sup>) تغییر می‌کند. فرض کنید  $k+1$  تصویر SAR از یک منطقه داریم، فاز مربوط به پیکسل  $\underline{x} = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}$  ( $\xi$  و  $\eta$  مختصات پیکسل در راستای آزمون و رنج می‌باشند) از تصویر  $k$ ام به صورت حاصل جمع فازهای مذکور خواهد بود:

$$\psi_k(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} r_k(\underline{x}) + \sigma_k(\underline{x}) + a_k(\underline{x}) \quad \text{رابطه ۳۲-۲}$$

در این رابطه  $r$  فاصله هدف تا ماهواره،  $\sigma$  فاز ناشی از بازتابندگی پراکنشگر و  $a$  شامل فاز اتمسفر می‌باشد. تصویر پایه طوری انتخاب می‌شود که تأثیر عدم همبستگی های مکانی و زمانی کمینه گردد [۱۱۲]. لازمه‌ی تشکیل تداخل‌نما در مرحله‌ی بعدی ثبت هندسی تصاویر است که تضمین می‌کند هر تارگت زمینی مربوط به یک پیکسل مشابه با مختصات آزمون و رنج یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو است. در این صورت اختلاف فاز تصویر پیرو  $k$ ام نسبت به تصویر پایه‌ی  $m$  به صورت زیر خواهد بود:

<sup>1</sup> Atmospheric Phase Screen (APS)

$$\begin{aligned}\phi_k(\underline{x}) &= \psi_k(\underline{x}) - \psi_m(\underline{x}) && \text{رابطه} \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [r_k(\underline{x}) - r_m(\underline{x})] && ۲-۳۳ \\ &+ [\sigma_k(\underline{x}) - \sigma_m(\underline{x})] + [a_k(\underline{x}) - a_m(\underline{x})]\end{aligned}$$

در تداخل سنجی با گذر تکراری،  $r_k$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$r_k = r_m + \Delta r_k + \Delta \mu_k \quad \text{رابطه ۲-۳۴}$$

در این رابطه  $\Delta r_k$  تغییر رنج به دلیل موقعیت متفاوت ماهواره و  $\Delta \mu_k$  حرکت هدف در راستای خط دید ماهواره (که به دلیل فاصله ی زمانی بین دو برداشت اتفاق افتاده است) می باشد.  $\phi_k(\underline{x})$  متشکل از چندین سیگنال است که وابسته به هندسه ی تصویربرداری (موقعیت سنجنده  $\phi_{sk}(\underline{x})$  و توپوگرافی  $\phi_{qk}(\underline{x})$ )، حرکت زمین  $\phi_{\mu k}(\underline{x})$ ، تغییرات پراکنش (به دلیل تغییرات زمانی و ناهمبستگی ناشی از خط مبنای مکانی)  $\phi_{\sigma k}(\underline{x})$  و ناهمگونی های اتمسفر  $\phi_{ak}(\underline{x})$  می باشد:

$$\phi_k(\underline{x}) = \phi_{rk}(\underline{x}) + \phi_{\mu k}(\underline{x}) + \phi_{\sigma k}(\underline{x}) + \phi_{ak}(\underline{x}) \quad \text{رابطه ۲-۳۵}$$

که داریم:

$$\phi_{rk}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_k(\underline{x}) = \phi_{sk}(\underline{x}) + \phi_{qk}(\underline{x}) \quad \text{رابطه ۲-۳۶}$$

$$\phi_{\mu k}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \mu_k(\underline{x})$$

$$\phi_{ak}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} (a_k(\underline{x}) - a_m(\underline{x}))$$

$$\phi_{\sigma k}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} (\sigma_k(\underline{x}) - \sigma_m(\underline{x}))$$

#### ۲-۸-۲-۱ استفاده از خط مبنای مکانی و زمانی بلند

به منظور بهبود دقت ارتفاعی، بهتر است از تعداد تصاویر بیشتر و با خط مبنای مکانی بلندتر مورد استفاده قرار گیرند. زمانی که خط مبنای مکانی بلندتر از حد بحرانی باشد تنها پراکنشگرهایی که کوچک تر از یک پیکسل می باشند، مقادیر فاز قابل اعتمادی را خواهند داشت. علاوه بر این به طور مثال برای تصاویر متوالی سنجنده ی Sentinel-۱، خط

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۴۲

مبنای مکانی کوچک است لذا برای انتخاب خط مبنای مکانی بلندتر می بایست فاصله ی زمانی بزرگ تری انتخاب گردد؛ که در این حالت (خط مبنای زمانی بزرگ تر) پایداری زمانی اهداف و در نتیجه کاهش تعداد آنها نتیجه می شود.

در بحث برآورد تغییرات، اگر منطقه ی موردنظر تحت تأثیر تغییرات دوره ای زمانی باشد که نرخ این تغییرات ثابت باشد، بهتر است خط مبنای زمانی بلند، برای برآورد دقیق نرخ تغییرات محلی در نظر گرفته شود. بعلاوه، تعداد تداخل نماهای بیشتری جهت کاهش اثر APS مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین خط مبناهای بلند می توانند در پردازش تداخل سنجی مورد استفاده قرار گیرند اما بر روی پراکنشگرهای پایدار با توزیع کمتر [۱۰۹].

## ۲-۸-۲-۲ حذف خطاهای مداری و اثر توپوگرافی

سهم فاز ناشی از توپوگرافی،  $\phi_{qk}(\underline{x})$  از طریق بردارهای وضعیت سنجنده و مدل ارتفاعی رقومی در دسترس، قابل برآورد است:

$$\hat{\phi}_{qk}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda R} \hat{B}_k(\underline{x}) \frac{\hat{q}(\underline{x})}{\sin \alpha} \quad \text{رابطه ۳۷-۲}$$

$\hat{B}_k(\underline{x})$  باز قائم برآورد شده و  $\hat{q}(\underline{x})$  ارتفاع نقاط پراکنشگر از DEM موجود هستند. با حذف این اثر از سهم فاز توپوگرافی اولیه، باقیمانده ی اثر توپوگرافی به دلیل کیفیت DEM موجود، باقی خواهد ماند:

$$\phi_{qk}(\underline{x}) - \hat{\phi}_{qk}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda R \sin \alpha} [q(\underline{x}) \cdot \Delta B_k(\underline{x}) + \hat{B}_k(\underline{x}) \cdot \Delta q_k(\underline{x})] \quad \text{رابطه ۳۸-۲}$$

که در آن  $\Delta q_k(\underline{x}) = \hat{q}(\underline{x}) - q(\underline{x})$  تصحیح ارتفاعی و مجهول مسئله تلقی می شود و ترم اول رابطه به دلیل مقدار کوچک آن قابل صرف نظر کردن است.

به طور مشابه، اثر فاز ناشی از خطاهای مداری نیز با کسر مقدار برآورد شده ی آن از مقدار فاز اولیه، مطابق رابطه ۳۹-۲ حذف می گردد. در صورتی که ابعاد منطقه مورد نظر کوچک (5km×5km) باشد و مدارهای دقیق استفاده شده باشند، سهم این فاز قابل تقریب با سهم فاز خطی خواهد بود [۱۰۹].

$$\phi_{sk}(\underline{x}) - \hat{\phi}_{sk}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda R} \Delta B_k(\underline{x}) + \frac{\eta}{\tan \alpha} \quad \text{رابطه ۳۹-۲}$$

## ۲-۸-۲-۳ انتخاب نقاط پراکنشگر دائم کاندید و تقریب اولیه از پارامترهای مجهول

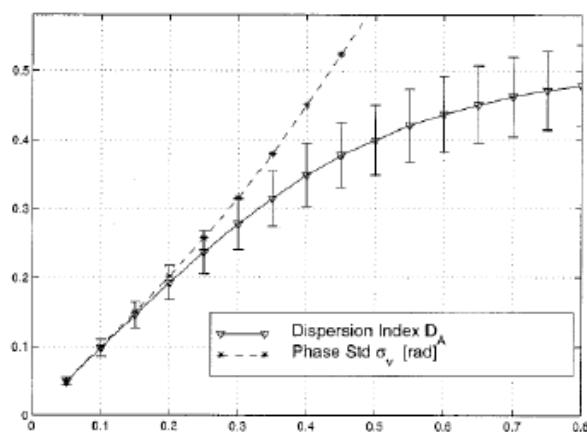
پیش از حل مسئله، لازم است نقاط کاندیدای PS انتخاب شوند. طبق تعریف، رفتار زمانی فاز در این نقاط می بایست دارای استحکام باشند [۱۰۹].



بدین منظور می بایست تصاویر همدوسی همراه با هر تداخل نما استخراج شود. ساده ترین روش، به کارگیری یک حد آستانه روی مقادیر همدوسی است؛ در این صورت اهداف با همدوسی بیشتر از مقدار حد آستانه می توانند به عنوان کاندیدای PS محسوب شوند. ولیکن مشکل این نوع انتخاب آن است که فاز تداخل سنجی تصحیح نشده (که شامل اثراتی نظیر اتمسفر، خطای توپوگرافی و تغییر شکل زمین است)، قابلیت انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی را ندارد؛ بنابراین، از روش های مبتنی بر دامنه ی بازپراکنش جهت انتخاب نقاط اولیه بهره گرفته می شود. با فرض اینکه تعداد تصاویر در دسترس زیاد است (بیش از ۳۰ تصویر)، می توان سری های زمانی مقادیر دامنه<sup>۱</sup> را در هر پیکسل تحلیل کرد و پراکنشگرهای دائم را جستجو نمود. سعی می شود به دنبال اهدافی بود که به ندرت تحت تأثیر عدم همبستگی مکانی و زمانی باشند؛ پیکسل هایی که نشان دهنده ی مقادیر دامنه ی پایدار هستند. انتخاب نقاط PS می تواند از طریق محاسبه شاخص پراکندگی دامنه،  $D_A$ ، برای هر پیکسل مطابق با رابطه ۲-۴۰ به انجام رسد. پیکسل هایی انتخاب می شوند که مقدار  $D_A$  مربوط به آن ها از یک حد آستانه ی تعریف شده (معمولا ۰/۲۵) کوچکتر باشد [۱۰۹].

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \simeq \sigma_V \quad \text{رابطه} \quad ۲-۴۰$$

که در آن،  $\sigma_A$  انحراف معیار مقادیر دامنه،  $m_A$  میانگین مقادیر دامنه و  $\sigma_V$  انحراف معیار مقادیر فاز هستند. مقدار حد آستانه با بررسی نمودار شکل ۲-۲۷ قابل توجیه است. مطابق نمودار، انحراف معیار فاز زیر حد آستانه ی ۰/۲۵ در قیاس با پراکندگی دامنه رفتار مشابهی دارد. لذا این شاخص معرف استحکام فاز با تعریف حد آستانه ی مذکور خواهد بود.



شکل ۲-۲۷- نمودار انحراف معیار فاز و پراکندگی دامنه [۱۰۹]

<sup>1</sup> amplitude

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۴۴

پیکسل های انتخاب شده، طی فرآیند مثلث بندی دلونی<sup>۱</sup>، به هم مرتبط می شوند. در این حالت بین هر دو پیکسل همسایه  $x_1$  و  $x_2$  یک ارتباطی برقرار خواهد شد که به علت مجاورت پیکسل ها (حداکثر ۱ کیلومتر فاصله) و هم بسته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین پیکسل های همسایه شامل فاز اتمسفری نخواهد بود [۱۰۳]، یعنی  $a(x_1, T_i) \sim a(x_2, T_i)$  و این یک مزیت عمده محسوب می شود. در این صورت، اختلاف فاز تداخل سنجی بین پیکسل های همسایه مطابق زیر بیان خواهد شد:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_k(x_1, x_2, T_i) & \text{ رابطه} \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} T_i \cdot [v(x_1) - v(x_2)] \quad ۲-۴۱ \\ &+ \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\hat{B}_k(T_i)}{R(T_i) \sin \alpha_i} [q(x_1) - q(x_2)] \\ &+ [n(x_1, T_i) - n(x_2, T_i)] \end{aligned}$$

در صورتیکه تراکم نقاط PS بالا باشد و اختلاف فاز بین دو نقطه مجاور از نصف طول موج کمتر باشد (شرط تائکوئیست) می توان از فاز بازیابی نشده در برآورد پارامترهای مجهول از طریق حل مسئله ی پریودوگرام در یک فضای جستجوی دو بعدی استفاده نمود [۱۳۰] و [۱۸۰].

مقادیر پارامترهای مجهول سرعت جابجایی و تصحیح ارتفاعی برای هر یال ارتباطی از طریق ماکزیمم سازی همدوسی زمانی، برآورد می شوند. با انتخاب یک نقطه مرجع، مقادیر برآورد شده برای هر یال با هم تجمیع می گردند تا برآوردی از مقادیر پارامترهای مجهول در هر نقطه از شبکه حاصل شود.

#### ۲-۸-۲-۴ برآورد تصویر فاز ناشی از اتمسفر

با کسر فاز برآورد شده از فاز تداخل سنجی نقاط، مقادیر باقیمانده ی فاز ناشی از اتمسفر و نویز (ناشی از عدم همبستگی ها و اثرات غیرخطی جابجایی) برای هر نقطه به دست می آید. به منظور حذف اثرات اتمسفری، با توجه به اینکه اتمسفر در مکان همبسته و نویز در مکان ناهمبسته است، اثرات نویز از روی سیگنال اتمسفر حذف می شود. پس از جداسازی سهم فاز اتمسفر در نقاط پراکنشگر دائمی کاندید، سهم اتمسفر در تصویر پایه تقریب زده می شود که مقدار آن برابر میانگین باقیمانده های فاز در فضای زمان است. این مقدار برای کل تصویر در هر تداخل نما با استفاده از روش درون یابی کریجینگ و واریوگرام به صورت مکانی مدل سازی و پیش بینی می گردد. با کسر تصویر فاز اتمسفر برای تصویر پایه از تصاویر فاز اتمسفر برای هر تداخل نما، تصویر فاز اتمسفر برای تصاویر پیرو حاصل می شوند.

<sup>1</sup> Delaunay Triangulation

## ۲-۸-۲-۵ افزایش تراکم نقاط و برآورد نهایی مجهولات

پس از جداسازی سهم فاز اتمسفر در نقاط پراکنشگر دائمی کاندید و حذف تصویر اثر اتمسفر از روی مجموعه تداخل نماها، با اعمال حدآستانه‌ی بالاتر همچون ۰/۴ روی شاخص پراکندگی دامنه، پارامترهای مجهول سرعت جابجایی و تصحیح ارتفاعی برای نقاط بیشتری دوباره برآورد خواهند شد. این بار حل مسئله پریودوگرام برای مجموعه‌ی نقاط اول و دوم انجام می‌شود. به عبارت دیگر مقادیر پارامترهای مجهول سرعت جابجایی و خطای DEM برای نقاط کاندید برآورد می‌شوند و در این مرحله، با کسر مقادیر حاصل شده برای اثر توپوگرافی و جابجایی زمین از فاز تداخل سنجی تصحیح شده از APS، نویز باقیمانده به دست می‌آید. این مقدار فاز نویز،  $\zeta$ ، فازی است که در محاسبه‌ی همدوسی زمانی مطابق رابطه ۲-۴۲ استفاده می‌شود و می‌توان با اعمال حدآستانه ۰/۸ روی همدوسی زمانی این مرحله، نقاط پراکنشگر دائم را انتخاب نمود.

$$\gamma_h \triangleq \frac{1}{k} \sum_{(int)} \exp(j\zeta) \quad \text{رابطه} \quad 2-42$$

k تعداد تداخل نما در پردازش تداخل سنجی است. اندازه‌ی همدوسی تجمعی نزدیک به یک، معرف نقاطی است که انحراف معیار فاز آن‌ها پایین است و این شرط فقط برای نقاط PS برقرار است. در نهایت با استفاده از این نقاط نقشه‌ی فرونشست منطقه استخراج می‌شود.

پس از برآورد نهایی مجهولات،  $\sigma_v$  به عنوان انحراف معیار نرخ تغییرات برآورد شده با استفاده از مقادیر پراکندگی فاز نویز باقیمانده و خط مبنای زمانی مطابق رابطه ۲-۴۳ قابل برآورد خواهد بود [۱۸۰]:

$$\sigma_v^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{\sigma_\phi^2}{k\sigma_{B_t}^2} \quad \text{رابطه} \quad 2-43$$

به طوری که  $\sigma_\phi^2$  و  $\sigma_{B_t}^2$  پراکندگی فاز نویز و باز زمانی و k تعداد تداخل نما هستند.

## ۲-۹ بحث و بررسی

مراحل انجام روش می‌بایست در نرم افزار، مرحله به مرحله تحلیل و اعمال شوند. بسته به روند کار، تحلیل‌ها و نتایج حاصل، ممکن است مراحل برای بهبود نتایج به مراحل فوق افزوده شود. همچنین بسته به سیستم عامل در دسترس از یکی از نرم افزارهای

تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات دورسنجی و استفاده از نقشه های ماهواره ای ۱۴۶

جدول ۲-۲ را می توان استفاده نمود.

جدول ۲-۲- نرم افزارهای مورد استفاده در تداخل سنجی راداری

| Software | Operating System           | Accessibility | Description                                                       |
|----------|----------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------|
| SARPROZ  | Windows<br>Linux<br>Mac    | commercial    | Needs Matlab software, Linux is suggested                         |
| SARscape | Windows                    | commercial    | Needs Envi software                                               |
| GAMMA    | Windows7,8<br>Linux<br>Mac | commercial    | -                                                                 |
| SNAP     | Windows<br>Mac<br>Linux    | free          | Not accurate in InSAR processing and not fast in high volume data |
| DORIS    | Linux                      | free          | -                                                                 |
| StaMPS   | Linux                      | free          | Most used                                                         |
| GMTSAR   | Linux                      | free          | -                                                                 |
| ISCE     | Linux                      | free          | Newest software in InSAR                                          |

داده های مورد استفاده در این پژوهش، تصاویر مربوط به سنجنده ی TerraSAR-X و در صورت در دسترس بودن، تصاویر سنجنده ی Sentinel-1 و COSMOSky-Med نیز مورد پردازش قرار خواهند گرفت.

### ۳ تعیین روش سنجش و پیش بینی میزان فرونشست زمین بر مبنای انجام مطالعات ژئوتکنیکی

### ۳-۱ تحلیل نظری فرونشست زمین ناشی از اثرات زیست محیطی

#### ۳-۱-۱ مقدمه

فرونشست زمین ناشی از استخراج مایعات زیرزمینی، مسئله‌ای است که برای علوم زمین شناسی و ژئومکانیک محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. این مسئله باعث ایجاد خسارت به زیرساخت‌ها شده و در بسیاری از مناطق جهان خسارات اقتصادی زیادی را به دنبال داشته و تهدیدی برای توسعه پایدار شهرها محسوب می‌شود [۱۸۷]. دلایل اصلی ایجاد فرونشست به دو دسته طبیعی و فعالیت‌های انسانی تقسیم می‌شود. علل طبیعی عمدتاً شامل مسائل زمین‌شناسی، همانند تشکیل غارها، حوضچه‌ها، و توپوگرافی زمین و دلایل ناشی از فعالیت‌های انسانی عمدتاً معدن یا خروج آب زیرزمینی و در نتیجه تحکیم خاک می‌باشد [۱۸۷].

چگونگی حفظ تعادل بین استفاده معقول از منابع آب زیرزمینی و کنترل فرونشست زمین، نکته اصلی در مهندسی ژئوتکنیک است. استخراج آب از خاک اشباع باعث کاهش فشار آب حفره‌ای و افزایش تنش موثر شده که باعث تغییر شکل اسکلت خاک می‌گردد. بنابراین، ارزیابی و پیش بینی نشست زمین ناشی از تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی کلید اصلی حل این مشکل است [۱۸۱]. در این بخش به معرفی تحکیم خاک‌های چند لایه اشباع ناشی از پمپاژ چاه آبکشی، محاسبه فرونشست زمین با استفاده از دو روش تئوری سیستم لایه‌بندی الاستیک و تئوری تحکیم Biot پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱-۲ تحکیم خاک های چند لایه اشباع ناشی از پمپاژ چاه آبکشی

برخی محققان به منظور محاسبه نشست ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی، مدل جریان سه بعدی را با نظریه تحکیم یک بعدی ترکیب کرده‌اند و رفتار تحکیم و تراوش خاک را غیر خطی در نظر گرفتند (Chen et al. 2003; Shen et al. 2006; Shen and Xu 2011). در حالی که این روش نمی‌تواند فرآیند همبسته (کوپل) بین تنش خاک و فشار حفره‌ای را ارائه کند، و همچنین توصیف وقایع و درز و شکاف‌های موجود در زمین، که ناشی از تنش و تغییر مکان افقی هستند، دشوار است. با این حال، تئوری کلی تحکیم Biot، که همبستگی بین اسکلت خاک و سیال را در یک محیط متخلخل در نظر می‌گیرد، می‌تواند به عنوان یک نظریه اساسی برای تجزیه و تحلیل پمپاژ در خاک اشباع در نظر گرفته شود. [Error! Bookmark not defined.]

##### ۳-۱-۲-۱ راه‌حل‌های تحلیلی برای خاک تک لایه

معادلات حاکم

در مورد مسئله تحکیم تقارن محوری Biot، معادلات تعادل نیرو (بدون نیروی جسم) بیان شده با تنش‌های کل عبارتند از:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0 \quad 3-1$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0 \quad 3-2$$

که در معادلات ۳-۱ و ۳-۲،  $\sigma_{\theta\theta}$ ،  $\sigma_{zz}$ ،  $\sigma_{rr}$  مولفه‌های عمودی (نرمال) و  $\sigma_{rz}$  مولفه تنش برشی می‌باشد. جزء جامد، تراکم ناپذیر فرض شده است. معادلات اساسی از معادله ۳-۱ بدست آمده‌اند.

$$\sigma_{ij} = 2G \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{\theta} \delta_{ij} \right) - P \delta_{ij} \quad 3-3$$

که زیروندهای  $j, i$  می‌توانند  $r, z$  و یا  $\theta$  باشند،  $\varepsilon_{ij}$  مولفه‌های کرنش هستند.  $G$  و  $\nu$  به ترتیب مدول برشی و ضریب پواسون و  $P$  اضافه فشار حفره‌ای می‌باشد.  $\varepsilon_v = \partial u_r / \partial r + u_r / r + \partial u_z / \partial z$  نشان دهنده کرنش حجمی و  $\delta_{ij}$  دلتا کرونکر می‌باشد. با جایگذاری معادله ۳-۱ در دو معادله ۱-۱ و معادله ۲-۱، روابط ۴-۱ و ۵-۱-۳ بدست می‌آید [۱۸].

Error! Bookmark not defined.

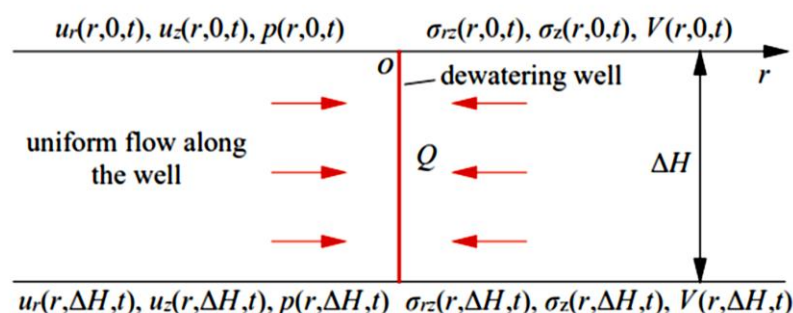
$$\left( \nabla^2 - \frac{1}{r^2} \right) u_r + (2\eta - 1) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial r} - \frac{1}{G} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad 3-4$$

$$\nabla^2 u_z + (2\eta - 1) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial z} - \frac{1}{G} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad 3-5$$

که  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  عملگر لاپلاسی و  $\eta = \frac{1-\nu}{1-2\nu}$  است. با فرض این که نفوذپذیری محیط متخلخل ناهمسان و جزء سیال، تراکم ناپذیر می‌باشد، معادله پایداری جرم حفرات سیال به صورت معادله ۶-۱ بدست می‌آید.

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{k_h}{\gamma_w} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad 3-6$$

که در آن  $k_h$  و  $k_z$  به ترتیب نفوذپذیری قائم و افقی هستند. همچنین  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب و  $t$  متغیر زمان است.



شکل ۳-۱ تحکیم یک لایه خاک ناشی از استخراج آب از یک چاه آبکشی

شکل ۳-۱ افت آب زیرزمینی از یک چاه آبکشی در یک خاک تک لایه را نشان می‌دهد. فرض بر این است که این چاه در کل عمق لایه خاک قرار دارد و شعاع آن بی نهایت کوچک است و آب در کل چاه به طور یکنواخت در جریان

است.  $H$  بیانگر مختصات عمودی سطح زیرین لایه خاک است، در حالی که  $\Delta H$  ضخامت آن را نشان می دهد. بنابراین، مرز پمپاژ روی خط مرکزی می تواند به صورت معادله ۷-۱ باشد [۱۸۱].

$$r \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow 0} = \frac{Q \gamma_w}{2\pi \Delta H k_r} \quad 3-7$$

که در معادله ۷-۱،  $Q$  سرعت جریان آب از میان چاه آبکشی است و می توان آن را به عنوان تابع مشتق پیوسته، نظیر توابع ثابت و متناوب تعریف کرد. شایان ذکر است که  $Q > 0$  نشان دهنده افت سطح آب و  $Q < 0$  نشان دهنده تزریق آب به چاه است، در حالی که برای یک لایه خاک بدون چاه آبکشی، می توان  $Q$  را برابر با مقدار صفر در نظر گرفت. فرض بر این است که جریان آب حفره ای با قانون دارسی مطابقت دارد، بنابراین سرعت نشت قائم برابر با معادله ۸-۱ می باشد [۱۸۱].

$$V_z = k_z \frac{\partial p}{\partial z} \quad 3-8$$

راه حل ها:

با اعمال دو عبارت  $(\partial/\partial r + 1/r)$  و  $\partial/\partial z$  در معادله ۴-۱ و معادله ۵-۱ معادله ۹-۱ و ۱۰-۱ نتیجه می شوند.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) u_r \\ + \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( (2\eta - 1) \varepsilon_v - \frac{P}{G} \right) = 0 \end{aligned} \quad 3-9$$

$$\nabla^2 \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( (2\eta - 1) \varepsilon_v - \frac{P}{G} \right) = 0 \quad 3-10$$

با ترکیب دو معادله ۹-۱ و ۱۰-۱، معادله ۱۱-۱ بدست می آید.

$$\nabla^2 \left( 2\eta \varepsilon_v - \frac{P}{G} \right) = 0 \quad 3-11$$

تبدیل های لاپلاس - هانکل در معادلات دیفرانسیل جزئی ۳-۳ و ۳-۶ - ۳-۱۱ به منظور بدست آوردن معادلات دیفرانسیل معمولی معرفی می شوند. مرتبه  $n$  تبدیل لاپلاس - هانکل و معکوس تابع مربوطه با در نظر گرفتن متغیرهای  $r$  و  $t$  توسط Sneddon (۱۹۷۲) تعریف شده است [۱۸۱]:

$$\hat{f}_n(\xi, z, s) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(r, z, t) r J_n(\xi r) e^{-st} dr dt \quad 3-12$$

$$f(r, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \int_0^\infty \hat{f}_n(\xi, z, s) \xi J_n(\xi r) e^{st} d\xi ds \quad 3-13$$

که  $\hat{f}_n(\xi, z, s)$  متغیر مربوط به تابع  $f(r, z, t)$  در دامنه تبدیل لاپلاس - هانکل است.  $s$  و  $\xi$  به ترتیب پارامترهای تبدیل لاپلاس و هانکل می‌باشند. همچنین  $J_n(\xi r)$ ، نشان دهنده تابع مرتبه  $n$ ام Bessel می‌باشد. با استفاده از تبدیل لاپلاس - هانکل (مرتبه صفر) معادله ۳-۶ و ۳-۱۱ و ترکیب با معادله ۷-۱ معادلات ۳-۱۴ و ۳-۱۵ بدست می‌آید [۱۸۱].

$$s\hat{\varepsilon}_{v0} = -\frac{k_h}{\gamma_w} \xi^2 \hat{p}_0 + \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{d^2 p_0}{dz^2} - \frac{\hat{Q}}{2\pi\Delta H} \quad 3-14$$

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \xi^2\right) \left(\frac{d^2 \hat{p}_0}{dz^2} - q^2 \hat{p}_0 - \frac{\hat{Q}\gamma_w}{2\pi\Delta H k_z}\right) = 0 \quad 3-15$$

که  $\hat{Q} = \frac{Q}{s}$  نشان دهنده تبدیل لاپلاس سرعت جریان آب  $Q$  است. همچنین  $q^2$  برابر با  $q^2 = \alpha \xi^2 + \frac{\gamma_w s}{M k_z}$  می‌باشد که در آن  $\alpha = \frac{k_h}{k_z}$  و  $M = 2\eta G$  است.

راه‌حل‌های مربوط به معادلات ۳-۱۴ و ۳-۱۵ عبارتند از:

$$\hat{p}_0 = A_1 e^{-\xi z} + A_2 e^{\xi z} + A_3 e^{-qz} + A_4 e^{qz} - Q_1(\xi, \Delta H, s) \quad 3-16$$

$$\hat{\varepsilon}_{v0} = A_1 \varphi e^{-\xi z} + A_2 \varphi e^{\xi z} + A_3 \frac{e^{-qz}}{M} + A_4 \frac{e^{qz}}{M} - \frac{\gamma_w}{M k_h \xi^2 + \gamma_w s} \frac{\hat{Q}}{2\pi\Delta H} \quad 3-17$$

که  $A_6 \sim A_1$  توابع دلخواه تعیین شده با شرایط مرزی و شرایط پیوستگی لایه های خاک مجاور هستند و همچنین معادله ۱۸-۱ و ۱۹-۱ برقرار است:

$$Q_1(\xi, \Delta H, s) = \frac{M}{M k_h \xi^2 + \gamma_w s} \frac{\hat{Q}\gamma_w}{2\pi\Delta H} \quad 3-18$$

$$\varphi = \frac{\xi^2 (1 - \alpha) k_z}{s \gamma_w} \quad 3-19$$

با در نظر گرفتن مرتبه اول، مرتبه صفر و مرتبه صفر تبدیل لاپلاس - هانکل معادلات ۳-۴ و ۳-۵ و تابع کرنش حجمی  $\varepsilon_v$ ، روابط ۲۰-۱، ۲۱-۱ و ۲۲-۱ نتیجه می‌شود.



$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \xi^2\right)\hat{u}_{r1} - \xi\left((2\eta - 1)\hat{\varepsilon}_{v0} - \frac{1}{G}\hat{p}_0\right) = 0 \quad ۳-۲۰$$

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \xi^2\right)\hat{u}_{z0} + \frac{d}{dz}\left((2\eta - 1)\hat{\varepsilon}_{v0} - \frac{1}{G}\hat{p}_0\right) = 0 \quad ۳-۲۱$$

$$\hat{\varepsilon}_{v0} = \xi\hat{u}_{r1} + \frac{d\hat{u}_{z0}}{dz} \quad ۳-۲۲$$

با جایگذاری معادلات ۳-۱۶ و ۳-۱۷ در داخل معادلات ۳-۲۰، ۳-۲۱ و ۳-۵۹، راه حل های  $\hat{u}_{z0}$  و  $\hat{u}_{11}$  در دامنه تبدیل شده می تواند به صورت معادله ۲۳-۱ و معادله ۲۴-۱ بیان شود.

$$\begin{aligned} \hat{u}_{r1} = & \frac{1 - (M - G)\varphi}{2G} z e^{-\xi z} A_1 - \frac{1 - (M - G)\varphi}{2G} z e^{\xi z} A_2 + \frac{\xi e^{-qz}}{M(-q^2 + \xi^2)} A_3 \\ & + \frac{\xi e^{qz}}{M(-q^2 + \xi^2)} A_4 + e^{-\xi z} A_5 + e^{\xi z} A_6 - Q_2(\xi, \Delta H, s) \end{aligned} \quad ۳-۲۳$$

$$\begin{aligned} \hat{u}_{z0} = & \frac{1 - G\varphi - M\varphi + z\xi(1 + G\varphi - M\varphi)}{2G\xi} e^{-\xi z} A_1 + \frac{G\varphi + M\varphi - 1 + z\xi(1 + G\varphi - M\varphi)}{2G\xi} e^{\xi z} A_2 \\ & - \frac{q e^{-qz}}{M(q^2 - \xi^2)} A_3 + \frac{q e^{qz}}{M(q^2 - \xi^2)} A_4 + e^{-\xi z} A_5 - e^{\xi z} A_6, \end{aligned} \quad ۳-۲۴$$

که در آن:

$$Q_2(\xi, \Delta H, s) = \frac{M}{Mk_h \xi^2 + \gamma_w s} \frac{\hat{Q}\gamma_w}{2\pi \Delta H \xi}$$

از معادله ۳-۳ می توان نتیجه گرفت که:

$$\sigma_{rz} = G\left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) \quad ۳-۲۵$$

$$\sigma_z = 2G\left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + (\eta - 1)\varepsilon_v\right) - p_0 \quad ۳-۲۶$$

همچنین به ترتیب با در نظر گرفتن مرتبه اول، مرتبه صفر و مرتبه صفر معادلات تبدیل لاپلاس - هانکل ۱-۲۵، ۱-۲۶ و ۱-۲۷، معادلات ۱-۲۷، ۱-۲۸ و ۱-۲۹ بدست می آید.

$$\hat{\sigma}_{rz1} = G\left(\frac{d\hat{u}_{r1}}{dz} - \xi\hat{u}_{z0}\right) \quad ۳-۲۷$$

$$\hat{\sigma}_{z0} = 2G \left( \frac{d\hat{u}_{z0}}{dz} + (\eta - 1)\hat{\varepsilon}_{v0} \right) - \hat{p}_0 \quad ۳-۲۸$$

$$\hat{V}_0 = -\xi k_z e^{-\xi z} + \xi k_z e^{\xi z} - q k_z e^{-qz} + q k_z A_4 e^{qz} \quad ۳-۲۹$$

با جایگذاری معادلات ۱-۱۶، ۱-۲۳ و ۱-۲۴ در داخل معادلات ۱-۲۷ و ۱-۲۸، معادلات ۱-۳۰ و ۱-۳۱ نتیجه می‌شود.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{rz1} = & (G\varphi - z\xi(1 + G\varphi - M\varphi))e^{-\xi z}A_1 - (G\varphi + z\xi(1 + G\varphi - M\varphi))e^{\xi z}A_2 \\ & + \frac{2q\xi Ge^{-qz}}{M(q^2 - \xi^2)}A_3 - \frac{2q\xi Ge^{qz}}{M(q^2 - \xi^2)}A_4 - 2e^{-\xi z}G\xi A_5 + 2e^{\xi z}G\xi A_6 \end{aligned} \quad ۳-۳۰$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{z0} = & (-1 + M\varphi - z\xi(1 + G\varphi - M\varphi))e^{-\xi z}A_1 - (1 - M\varphi - z\xi(1 + G\varphi - M\varphi))e^{\xi z}A_2 \\ & + \frac{2\xi^2 Ge^{-qz}}{M(q^2 - \xi^2)}A_3 + \frac{2\xi^2 Ge^{qz}}{M(q^2 - \xi^2)}A_4 - 2e^{-\xi z}G\xi A_5 - 2e^{\xi z}G\xi A_6 + Q_3(\xi, \Delta H, s), \end{aligned} \quad ۳-۳۱$$

که در آن:

$$Q_3(\xi, \Delta H, s) = \frac{2G}{Mk_h \xi^2 + \gamma_w s} \frac{\hat{Q}\gamma_w}{2\pi\Delta H}$$

به منظور ارائه روابط بین تنش‌ها، تغییرمکان‌ها، اضافه فشار حفره‌ای و سرعت نشت در دامنه تبدیل شده، معادلات ۱-۳۲، ۱-۳۳ و ۱-۳۴ تعریف می‌شود.

$$\hat{U}(\xi, z, s) = [\hat{u}_{r1}(\xi, z, s), \hat{\sigma}_{z0}(\xi, z, s), \hat{p}_0(\xi, z, s)]^T \quad ۳-۳۲$$

$$\hat{I}(\xi, z, s) = [\hat{\sigma}_{rz1}(\xi, z, s), \hat{u}_{z0}(\xi, z, s), \hat{V}_0(\xi, z, s)]^T \quad ۳-۳۳$$

$$T(\xi, \Delta H, s) = [Q_2(\xi, \Delta H, s), -Q_3(\xi, \Delta H, s), Q_1(\xi, \Delta H, s)]^T \quad ۳-۳۴$$

در صورتی که لایه خاک بدون چاه آبکشی باشد، عبارت  $T(\xi, \Delta H, s) = [0, 0, 0]^T$  برقرار است.

بدیهی است که  $\hat{U}(\xi, H, s) + T(\xi, \Delta H, s)$ ،  $\hat{I}(\xi, 0, s)$ ،  $\hat{U}(\xi, 0, s) + T(\xi, \Delta H, s)$  و  $\hat{I}(\xi, H, s)$  بردارهای تشکیل شده از  $A_1 \sim A_6$  می‌باشند، بنابراین رابطه می‌تواند به صورت معادلات ۳-۳۵ و ۳-۳۶ بیان شود.

$$\begin{bmatrix} -\hat{U}(\xi, 0, s) \\ \hat{U}(\xi, H, s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -T(\xi, \Delta H, s) \\ T(\xi, \Delta H, s) \end{bmatrix} = R \cdot [A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6]^T \quad ۳-۳۵$$

$$\begin{bmatrix} \hat{I}(\xi, 0, s) \\ \hat{I}(\xi, H, s) \end{bmatrix} = S \cdot [A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6]^T \quad ۳-۳۶$$

با ترکیب معادله ۳-۳۵ با معادله ۳-۳۶، معادله ۳-۳۷ بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} -\hat{U}(\xi, 0, s) \\ \hat{U}(\xi, H, s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -T(\xi, \Delta H, s) \\ T(\xi, \Delta H, s) \end{bmatrix} = \Phi \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Gamma}(\xi, 0, s) \\ \hat{\Gamma}(\xi, H, s) \end{bmatrix} \quad ۳-۳۷$$

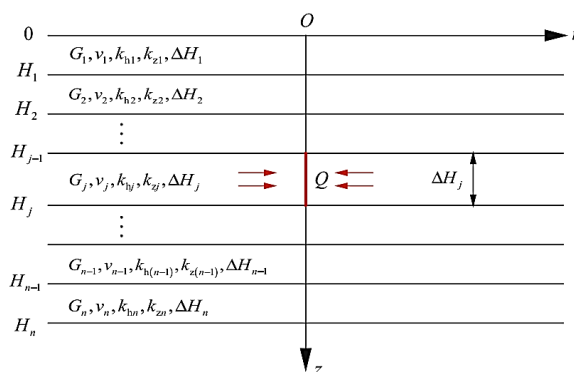
که  $\Phi = R.S^{-1}$  ماتریس سختی با مرتبه  $۶ \times ۶$  می باشد که رابطه بین تنش ها، تغییر مکان ها، اضافه فشار حفره ای و سرعت تراوش (نشست) در بالا و پایین سطح لایه خاک را در ناحیه انتقال توصیف می کند [۱۸۱].

## ۳-۱-۲-۲ روش های عددی خاک های لایه ای

یک سیستم خاکی طبقه بندی شده، همانطور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، از  $n$  لایه تشکیل شده است، بنابراین تعداد مجهولات  $۶n$  است. ضخامت لایه  $i$ ام برابر با  $\Delta H_i = H_i - H_{i-1}$  ( $H_0 = 0$ ) که در آن  $H_i$  مختصات عمودی سطح زیرین لایه  $i$ ام می باشد. شایان ذکر است که اگر چاه آبکشی در کل عمق یک لایه خاک وجود نداشته باشد، می توان این لایه را به چندین زیر لایه جدید در امتداد جهت افقی تقسیم کرد. یکی از آن ها لایه ای است که چاه در کل عمق آن توزیع می شود، و بقیه لایه ها حاوی چاه نیستند. فرض بر این است که سطح لایه بالایی قابل نفوذ و بدون تنش و سطح زیرین لایه آخر غیرقابل نفوذ و ثابت می باشد، بنابراین شرایط مرزی در دامنه انتقال به صورت  $۳-۳۸$  و  $۳-۳۹$  می باشد [۱۸۱].

$$\hat{\sigma}_{z0}(\xi, 0, s) = \hat{\sigma}_{rz1}(\xi, 0, s) = p_0(\xi, 0, s) = 0 \quad ۳-۳۸$$

$$\hat{u}_{r1}(\xi, H_n, s) = \hat{u}_{z0}(\xi, H_n, s) = \hat{V}_0(\xi, H_n, s) = 0 \quad ۳-۳۹$$



شکل ۲-۳ خاک چند لایه شامل چاه آبکشی

علاوه بر این، سطح مشترک دو لایه مجاور، شرایط پیوستگی را داشته و عبارت است از:

- لایه زام خاک شامل چاه آبکشی

$$\left( \xi, H_{j-1}^-, s \right) = \hat{\Gamma} \left( \xi, H_{j-1}^+, s \right), \hat{U} \left( \xi, H_{j-1}^-, s \right) = \hat{U} \left( \xi, H_{j-1}^+, s \right) + T(\xi, \Delta H_j, s) \quad ۳-۴۰$$

$$\hat{\Gamma} \left( \xi, H_j^+, s \right) = \hat{\Gamma} \left( \xi, H_j^-, s \right), \hat{U} \left( \xi, H_j^+, s \right) = \hat{U} \left( \xi, H_j^-, s \right) + T(\xi, \Delta H_j, s) \quad ۳-۴۱$$

• سایر لایه های خاک

$$\hat{\Gamma}(\xi, H_{j-1}^-, s) = \hat{\Gamma}(\xi, H_{j-1}^+, s), \hat{U}(\xi, H_{j-1}^-, s) = \hat{U}(\xi, H_{j-1}^+, s) \quad ۳-۴۲$$

$$\hat{\Gamma}(\xi, H_j^+, s) = \hat{\Gamma}(\xi, H_j^-, s), \hat{U}(\xi, H_j^+, s) = \hat{U}(\xi, H_j^-, s) \quad ۳-۴۳$$

که  $H_j^+$  و  $H_j^-$  به ترتیب عمق  $H_j$  لایه  $j$ ام و  $(j+1)$ ام را نشان می‌دهند. با اعمال معادله ۳-۳۷ به هر لایه و با فرض اصل جمع آثار در ماتریس سختی هر لایه، ماتریس سختی کلی خاک‌های چند لایه با در نظر گرفتن شرایط پیوستگی تشکیل می‌شود.

$$\begin{bmatrix} -\hat{U}(\xi, 0, s) \\ 0 \\ \vdots \\ T(\xi, \Delta H_j, s) \\ -T(\xi, \Delta H_j, s) \\ \vdots \\ 0 \\ \hat{U}(\xi, H_n, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^{(1)} & & & & \\ & \Phi^{(2)} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \Phi^{(n-1)} & \\ & & & & \Phi^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Gamma}(\xi, 0, s) \\ \hat{\Gamma}(\xi, H_1, s) \\ \vdots \\ \hat{\Gamma}(\xi, H_{j-1}, s) \\ \hat{\Gamma}(\xi, H_j, s) \\ \vdots \\ \hat{\Gamma}(\xi, H_{n-1}, s) \\ \hat{\Gamma}(\xi, H_n, s) \end{bmatrix} \quad ۳-۴۴$$

Symmetric  $-(3n+3) \times (3n+3)$

با ترکیب ۶ حالت شرایط مرزی و به عبارت دیگر معادلات ۳-۳۸ و ۳-۷۸، می‌توانیم  $3n+3$  مجهول  $[\hat{\Gamma}(\xi, 0, s) \dots \hat{\Gamma}(\xi, H_j, s) \dots \hat{\Gamma}(\xi, H_n, s)]$  را با حل معادله ۳-۴۴ بدست آوریم، همچنین  $3n-3$  مجهول باقی مانده  $[\hat{U}(\xi, H_1, s) \dots \hat{U}(\xi, H_j, s) \dots \hat{U}(\xi, H_{n-1}, s)]$  با جایگذاری  $3n+9$  مقادیر معلوم در معادله ۳-۳۷ بدست می‌آید. در حال حاضر، راه‌حل‌های تنش، تغییرمکان، اضافه فشار حفره‌ای و سرعت تراوش (نشت) در هر نقطه از سطح مشترک سیستم خاک لایه‌ای در دامنه انتقال در دسترس می‌باشد. برای به دست آوردن راه‌حل‌های واقعی، روش Talbot (1979) و تکنیک پیشنهادی توسط Ai و همکاران (۲۰۰۲) به ترتیب برای معکوس تبدیل‌های لاپلاس و تبدیل‌های هانکل به کار می‌روند [۱۸۱].

### ۳-۱-۲-۳ صحت سنجی روش فعلی

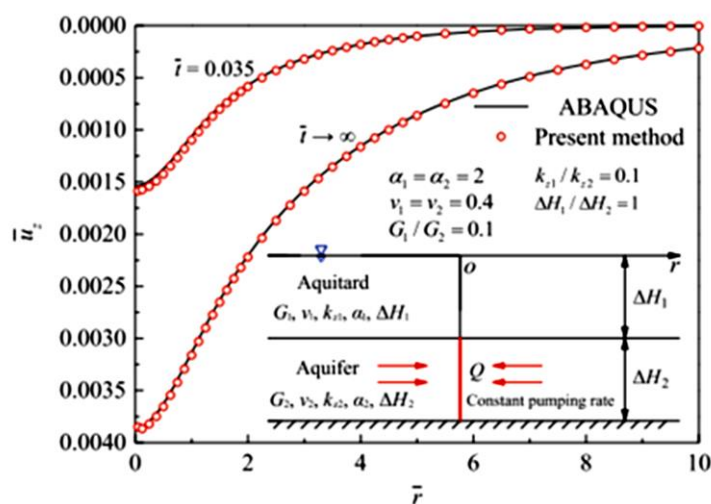
برای تأیید صحت راه‌حل‌های تحلیلی پیشنهادی، نتایج حاصل از محاسبه تحلیلی با نتایج بدست آمده از نرم افزار المان محدود ABAQUS از نظر تغییرمکان‌های سطح و اضافه فشار حفره‌ای در صفحه افقی  $z = \Delta H_1$  مقایسه می‌شود. مدل تقارن محوری خاک دو لایه، شامل یک چاه آبکشی در کل عمق سفره آبخوان در شکل ۳-۳ آمده، که پارامترهای خاک نیز نشان داده شده است. در مدل عددی فرض می‌شود که بعد افقی خاک‌های لایه‌ای به اندازه کافی بزرگ است تا مرز بی‌نهایت را شبیه سازی کند. علاوه بر این، شعاع چاه آبکشی  $0.1$  متر است که در مقایسه با سایر ابعاد هندسی می‌تواند نادیده گرفته شود و سرعت ثابت جریان آب داخل چاه به عنوان شرایط پمپاژ در نظر گرفته می‌شود [۱۸۱].

مدول الاستیسیته خاک‌ها را می‌توان طبق  $E = 2G(1 + \nu)$  بدست آورد و نسبت تخلخل  $0.6$  می‌باشد. فرضیات دیگر همانند مدل‌های نظری است. برای راحتی، ما مقادیر بی‌بعد تعیین می‌شود.

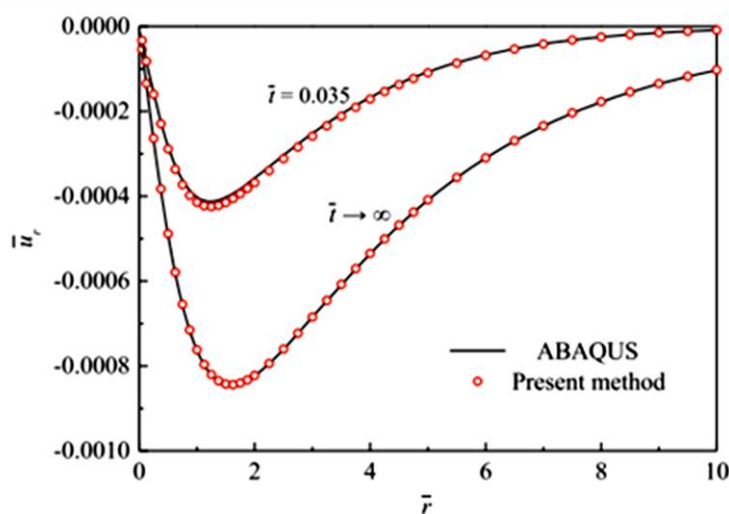
$$\bar{u}_z = \frac{u_z k_{z1} \eta_1 G_1}{\gamma_w Q}, \bar{u}_r = \frac{u_r k_{z1} \eta_1 G_1}{\gamma_w Q}, \bar{p}_0 = \frac{p_0 k_{z1} \Delta H_1}{\gamma_w Q}, \bar{t} = \frac{t \eta_1 G_1 k_{z1}}{\gamma_w \Delta H_1^2}$$

$$\bar{r} = \frac{r}{\Delta H_1}, \bar{z} = \frac{z}{\Delta H_1}$$

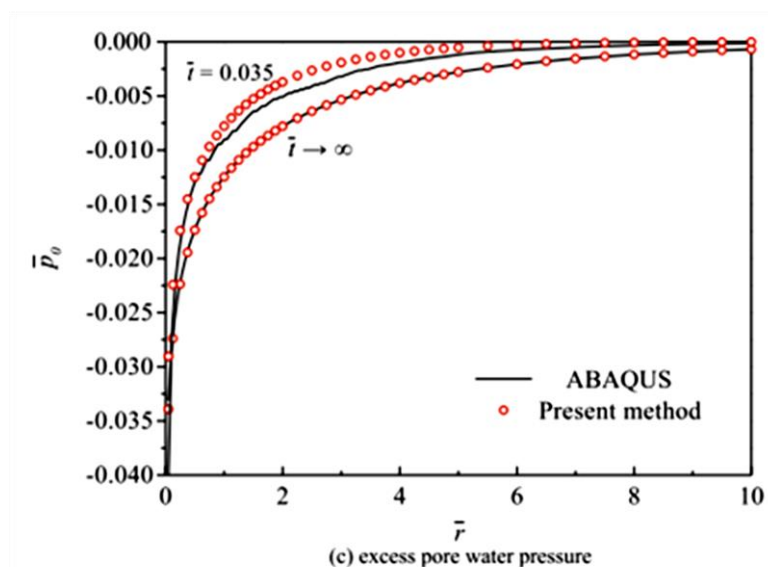
در شکل ۳-۳، b، c می توان نتیجه گرفت که روش حاضر با مدلسازی عددی، چه در مراحل اول تحکیم و چه در مراحل پایانی آن به خوبی مطابقت دارد. بزرگترین تغییر مکان قائم و اضافه فشار حفره ای در خط میانی اتفاق می افتد، در حالی که بزرگترین تغییر مکان افقی در محدوده  $r$  بین ۱ تا ۲ می باشد و موقعیت آن با گذشت زمان به خارج از این محدوده منتقل می شود [۱۸۱].



(a) vertical displacement



(b) horizontal displacement

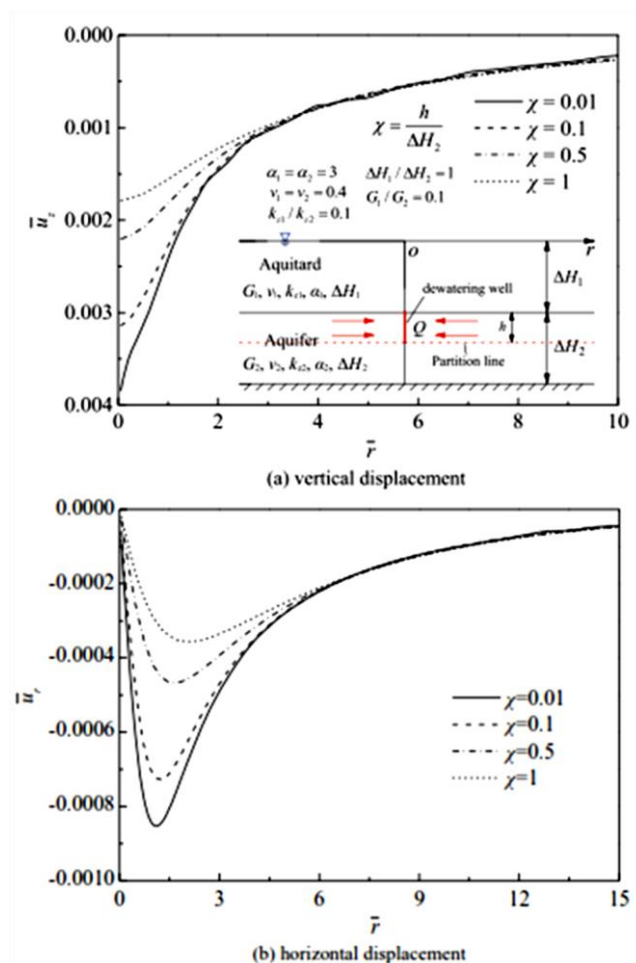


شکل ۳-۳ مقایسه بین نتایج مدلسازی عددی آباکوس و محاسبات تئوری

#### ۴-۲-۱-۳ نتایج مدلسازی عددی و مطالعات پارامتریک

##### طول چاه آبکشی

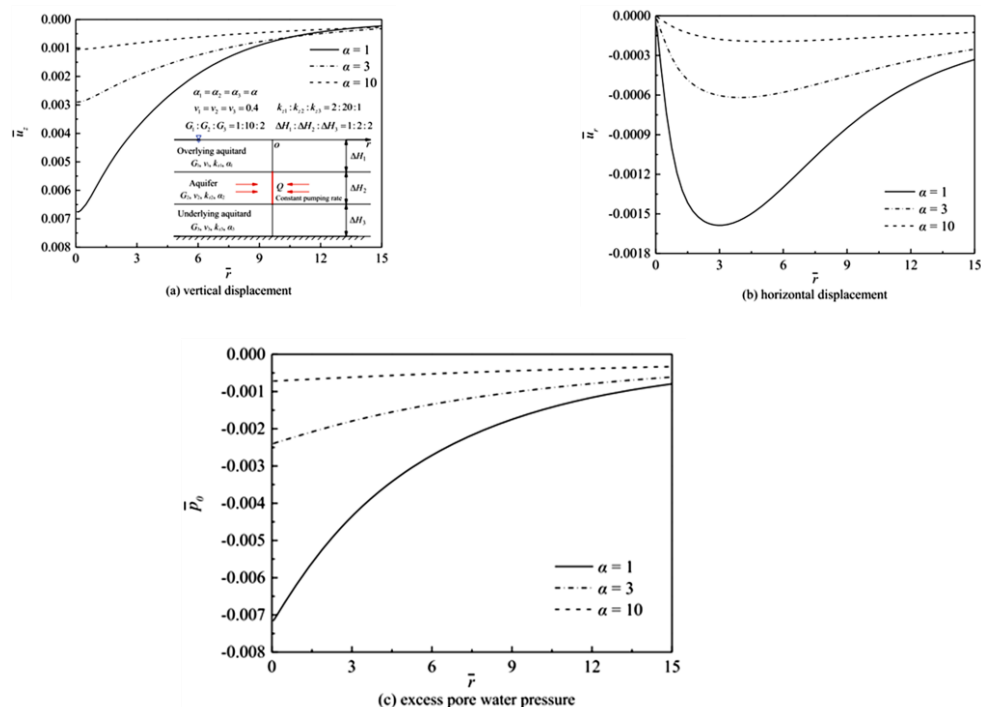
Selvadurai and Kim (2015) در مورد تأثیر شعاع چاه آبکشی (نادیده گرفتن طول چاه) بر روی نشست سطح و اتلاف فشار حفره‌ای تحقیق کردند. در این جا، تمرکز ما بر روی طول چاه  $h$  می‌باشد و آن به شکل بدون بعد  $x = h/\Delta H_1$  تعریف می‌شود که در آن  $\Delta H$  ضخامت سفره آبخوان است. در شکل ۳-۴، تغییر مکان‌های عمودی و افقی سطح نسبت به فاصله شعاعی بدون بعد ترسیم می‌شوند. از آنجا که طول چاه آبکشی برابر با ضخامت سفره آبخوان نیست، باید این لایه را به منظور بدست آوردن یک زیر لایه جدید با چاه قرار گرفته در کل ضخامت سفره آبخوان پارتیشن بندی کرد. زمانی که  $x$  برابر با ۰/۱ باشد، می‌توان چاه آبکشی را به عنوان یک چاه نقطه‌ای در نظر گرفت، و تغییر مکان عمودی و افقی در این سطح از  $x$  به طور قابل توجهی بیشتر از سایر سطح‌ها است، که تقریباً بیش از دو برابر حالتی است که  $x$  برابر با ۱ می‌باشد. افزایش  $x$  باعث تغییر مکان کوچکتر سطح می‌شود. این بدان معنی است که طول چاه آبکشی تأثیر اساسی در رفتارهای تغییر شکل خاک‌های چند لایه ناشی از افت آب‌های زیرزمینی دارد و نیازمند ملاحظات ما در این مسئله است، در حالی که در نظر گرفتن یک چاه نقطه‌ای منجر به نتایج محاسباتی نسبتاً بزرگی می‌شود [۱۸۱].



شکل ۳-۴ تاثیر طول چاه آبکشی بر تغییر مکان های سطحی

### نفوذپذیری ناهمسان

نفوذپذیری ناهمسان یکی از خصوصیات اصلی خاک ها می باشد و نسبت به سایر عوامل، مانند تراکم پذیری سیال یا اجزای تشکیل دهنده خاک (Xie و همکاران ۲۰۱۴) و ناهمسانی الاستیک (Tarn and Lu 1991)، تأثیر بسیاری بر روی آنالیزهای تحکیم دارد. سه مقدار از پارامتر نفوذپذیری ناهمسان  $\alpha = 1, 3, 10$  برای بررسی تأثیر آن ها بر تغییر مکان های سطح و اضافه فشار حفره ای روی صفحه افقی  $z = \Delta H_1$  انتخاب شده اند. سیستم خاک شامل سه لایه می باشد و روابط پارامترهای مربوطه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. مشاهده می شود که افزایش  $\alpha$ ، اضافه فشار حفره ای و تغییر مکان های سطحی کوچکتری را ایجاد می کند. از آن جایی که میزان نفوذ پذیری افقی بزرگتر است تراوش آب در این جهت بیشتر از نشت آب در جهت عمودی است [۱۸۱].



شکل ۳-۵ تاثیر نفوذپذیری ناهمسان بر تغییر مکان های سطح و اضافه فشار حفره ای سطح بالایی آبخوان

### مشخصات لایه ای

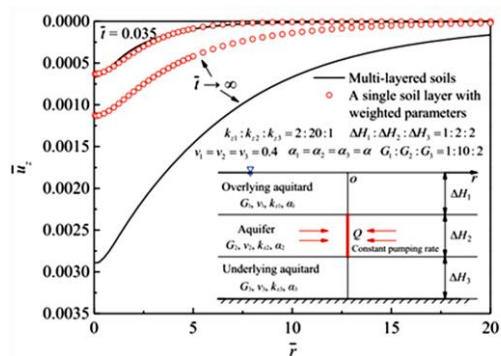
شکل ۳-۶ تحکیم خاک های چند لایه ناشی از پمپاژ را نشان می دهد و با یک خاک تک لایه با پارامترهای وزنی در زمان های مختلف مقایسه می شود. در مرحله اولیه تحکیم، تفاوت چندانی بین لایه همگن خاک و خاک لایه ای از نظر تغییر مکان های سطح و اضافه فشار حفره ای روی صفحه افقی  $z = \Delta H_1$  وجود ندارد. اما این تفاوت با گذشت زمان گسترش می یابد. به خصوص هنگامی که تحکیم به پایان برسد، تغییر مکان های عمودی و افقی محاسبه شده با روش حاضر، بیش از دو برابر مقادیر به دست آمده با روش های وزنی بود. بنابراین به منظور محاسبه نشست و اضافه فشار حفره ای نهایی نمی توان با در نظر گرفتن میانگین وزنی پارامترها، خاک لایه ای را به خاک همگن تبدیل کرد زیرا ممکن است کاملاً متفاوت از مقادیر واقعی باشد. جنبه دیگری که می تواند ویژگی لایه بندی خاک را نشان دهد این است که آب های زیرزمینی از سفره های آبخوان مختلف استخراج می شود. همانطور که در شکل ۳-۷ تاثیر لایه های مختلف چاه آبکشی بر تغییر مکان های سطحی

نشان داده شده است، یک سیستم خاک چهار لایه حاوی دو سفره آبخوان می باشد و تمام پارامترهای این دو لایه یکسان هستند، بنابراین می توان تاثیر عمق لایه پمپاژ را بر روی تغییر مکان های سطحی بررسی کرد [۱۸۱].

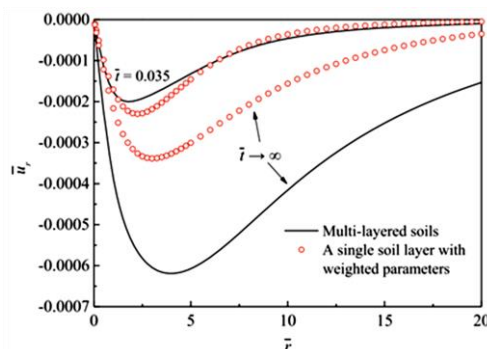
برای تغییر مکان عمودی سطح، پمپاژ از سفره کم عمق در مقایسه با سفره عمیق در محدوده  $r$  بین صفر تا  $2/5$  باعث نشست بزرگتری می گردد، به عبارت دیگر پمپاژ از سفره سطحی می تواند منجر به نشست نامتقارن در اطراف خط مرکزی و پمپاژ از سفره عمیق می تواند منجر به دامنه تأثیر بزرگتری از نشست شود. همچنین در تغییر مکان افقی



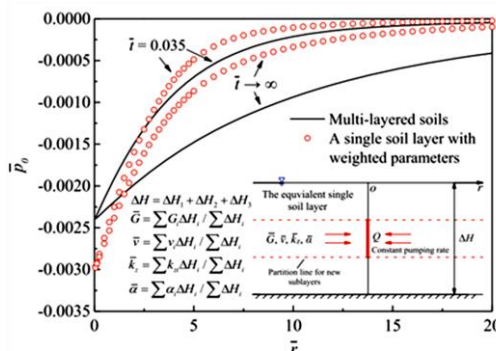
سطح، روند مشابهی دیده می شود. همراه با تغییر پمپاژ از سفره کم عمق به سفره عمیق، حداکثر تغییر مکان افقی سطح به طرز چشمگیری کاهش می یابد و موقعیت آن به سمت بیرون تغییر می کند [۱۸۱].



(a) vertical displacement

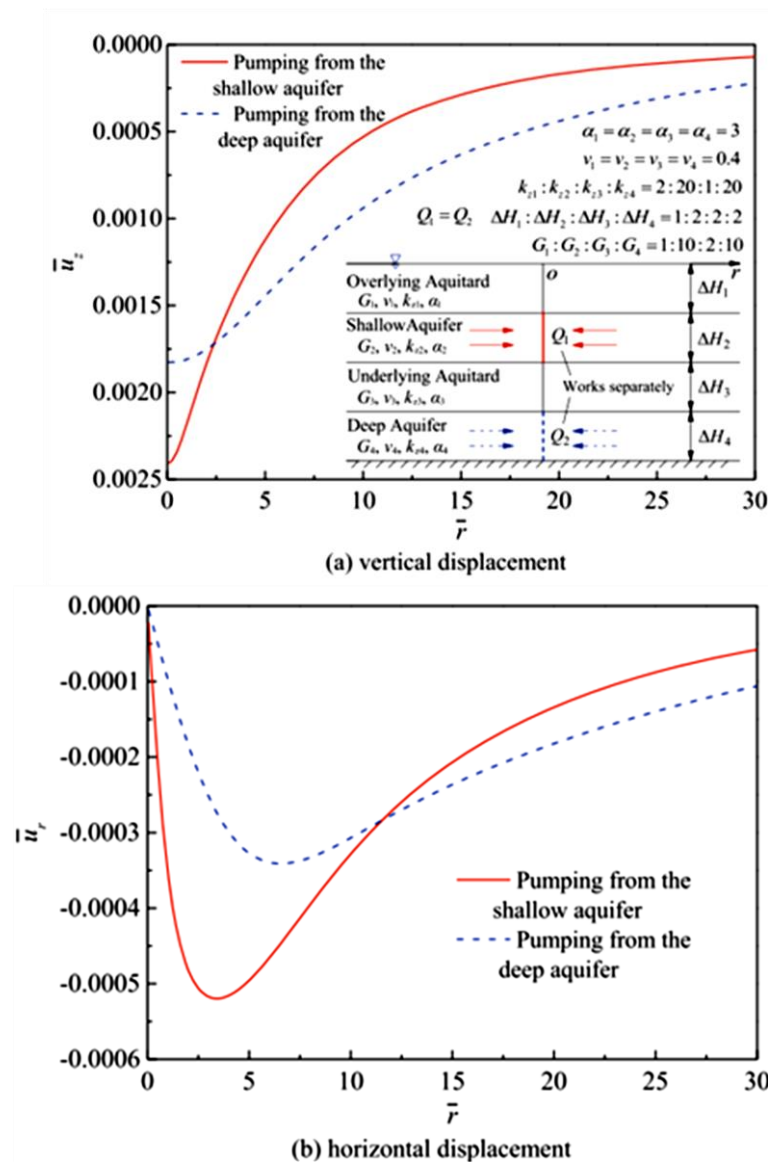


(b) horizontal displacement



(c) excess pore water pressure

شکل ۳-۶ مقایسه بین خاک های لایه ای و یک لایه خاک واحد با پارامترهای وزنی



شکل ۳-۷ تاثیر لایه های مختلف چاه آبکشی بر تغییر مکان های سطحی

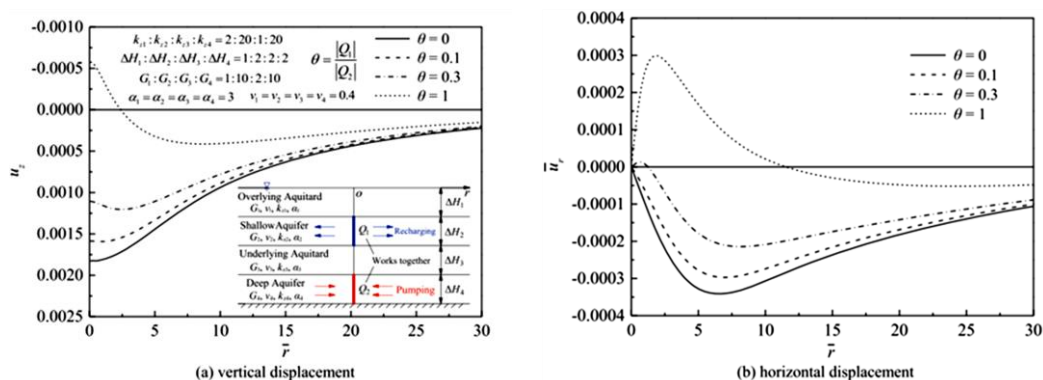
### ۳-۱-۲-۵ پمپاژ و تزریق آب به چاه

تحقیقات قبلی عمدتاً، تأثیر پمپاژ یا تزریق آب بر روی مسئله تحکیم را به صورت جداگانه بررسی کردند و اثر ترکیبی آن‌ها به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش به منظور بررسی این اثر، دو موقعیت پمپاژ و تزریق آب که به صورت همزمان عمل می‌کنند انتخاب شده‌اند. یک موقعیت این است که آب از سفره عمیق استخراج و همزمان به سفره کم عمق تزریق می‌گردد (شکل ۳-۸)، در موقعیت دیگر سرعت جریان آب در سطح چاه آبکشی یک تابع تناوبی است به این معنی که پمپاژ و تزریق آب به صورت متناوب و نوبتی عمل می‌کنند، همان طور که در (شکل ۳-۹) نشان داده شده است [۱۸۱].

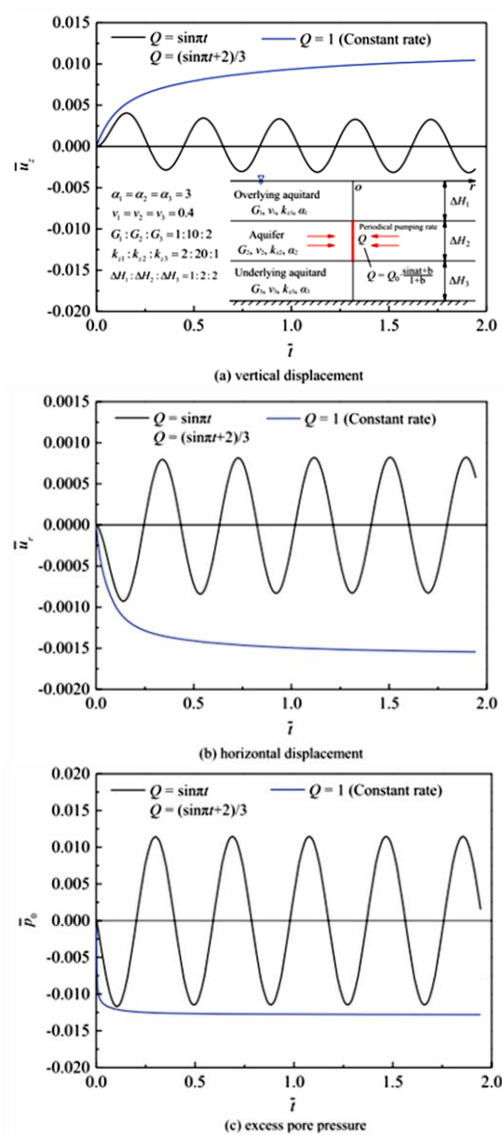
برای موقعیت اول، برای توصیف رابطه بین پمپاژ و تزریق آب، نسبت تزریق  $\theta$  به صورت  $|Q_1|/|Q_2|$  تعریف می‌شود، که  $|Q_1|$  و  $|Q_2|$  به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر تزریق و مقادیر پمپاژ می‌باشند. در صورتی که  $\theta$  برابر با صفر باشد به این

معنی است که تزریق آبی انجام نمی گیرد درحالیکه اگر  $\theta$  برابر با یک باشد می توان گفت که مقادیر پمپاژ و تزریق آب به تعادل رسیده اند. مقادیر ۱ و  $\frac{1}{3}$ ،  $\frac{1}{10}$ ،  $\frac{1}{100}$  و  $\theta = 0$  به منظور مطالعه تاثیرات آنها بر روی تغییر مکان های سطح انتخاب شده اند. در شکل ۳-۸ مشاهده می شود که با افزایش نسبت تزریق  $\theta$ ، تغییر مکان افقی و قائم به طور چشمگیری کاهش می یابد. هنگامی که پمپاژ و تزریق به تعادل برسند، حرکت مجدد سطح و جابجایی افقی سطح در محیط اطراف خط مرکزی اتفاق می افتد. بنابراین تزریق مصنوعی یک روش مؤثر برای کنترل فرونشست زمین است و نسبت تزریق  $\theta$ ، کلید اصلی حل این مشکل است. در شانگ های، روش پمپاژ در تابستان و تزریق در زمستان برای کنترل فرونشست انجام شده است (Gong, 2009)، بنابراین لازم است رفتار تغییر شکل خاک های چند لایه ناشی از پمپاژ و تزریق دوره ای از طریق آنالیز های تحلیلی محاسبه شود. تابع پمپاژ تناوبی آب  $Q$ ، به صورت  $Q = Q_0 (\sin at + b)/(1 + b)$ ، تعریف می شود، که  $Q_0$  نشان دهنده دامنه تغییرات دبی پمپاژ،  $a$  دوره پمپاژ و  $b$  پارامتر تغییرات دبی پمپاژ می باشد [۱۸۱].

سه نوع تابع پمپاژ،  $Q = 1$ ،  $Q = \sin \pi t$  و  $Q = (\sin \pi t + 2)/3$  که به ترتیب دبی ثابت پمپاژ، دبی تناوبی پمپاژ و دبی دوره ای پمپاژ که پارامتر تغییرات دبی پمپاژ نام دارد انتخاب شد. در شکل ۳-۹ مشاهده می شود که تغییرات تغییر مکان عمودی و افقی با زمان ناشی از تابع پمپاژ  $Q = \sin \pi t$ ، با تابع مثلثاتی مطابقت دارد اما دامنه و دوره آن ها با گذشت زمان تغییر نمی کند، درحالیکه تغییر مکان های ناشی از تابع ثابت پمپاژ  $Q = 1$  به تدریج با زمان جمع می شوند. تغییر مکان های سطحی ناشی از توابع پمپاژ  $Q = (\sin \pi t + 2)/3$ ، شامل همه مشخصات دو تابع قبلی، نوسانات دوره ای و تغییر شکل های تجمعی می باشند. علاوه بر این، تغییر مکان های ناشی از دبی دوره ای پمپاژ نسبت به تغییر مکان ناشی از دبی ثابت پمپاژ کوچکتر هستند، اگرچه دامنه های پمپاژ آنها یکسان است. با توجه به شکل ۳-۹ می توان گفت که حتی اگر اضافه فشار حفره ای ناشی از تابع  $Q = 1$  بعد از زمان  $\bar{t} = 1$  ثابت بماند، تغییر مکان ها هنوز هم توسعه می یابند. روند مشابهی در تابع  $Q = (\sin \pi t + 2)/3$  وجود دارد [۱۸۱].



شکل ۳-۸ تاثیر مقدار تزریق آب بر تغییر مکان های سطحی



شکل ۳-۹ تاثیر نرخ دوره ای پمپاژ بر تغییر مکان های سطح در نقطه  $\bar{r} = 0.5$  و اضافه فشار حفره ای در نقطه  $\bar{r} = 0.5$  از سطح افقی  $z = \Delta H_1$

### ۳-۱-۳ محاسبه فرونشست زمین با استفاده از تئوری سیستم لایه بندی الاستیک

معادله تغییرمکان برای خاک تک لایه تحت بار متقارن باید از معادله سازگار ۳-۴۵ پیروی کند (Burmister 1944, 1945a, b. Zhang et al. 1985, 1986). [۱۸۱]

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^2 \zeta = 0 \quad 3-45$$

مولفه های تغییرمکان و تنش به صورت معادله ۳-۴۶ تعریف می شوند.

$$\left. \begin{aligned} u_r &= -\frac{1}{2G} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r \partial z} \\ w &= \frac{1}{2G} \left[ 2(1-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \zeta \\ \sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \zeta \\ \tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \zeta \end{aligned} \right\} \quad 3-46$$

که  $u_r$  تغییرمکان افقی،  $w$  تغییرمکان قائم،  $\sigma_z$  تنش قائم،  $\tau_{rz}$  تنش برشی،  $G$  مدول برشی و  $\mu$  ضریب پواسون می باشد. با انجام تبدیل هانکل (Hankel) برای معادله ۳-۴۵، معادله دیفرانسیل معمولی مربوط به  $z$  به صورت معادله ۳-۴۷ بدست می آید [۱۸۱].

$$\left( \frac{d^2}{dz^2} + \xi^2 \right)^2 \bar{\zeta}(\xi, z) = 0 \quad 3-47$$

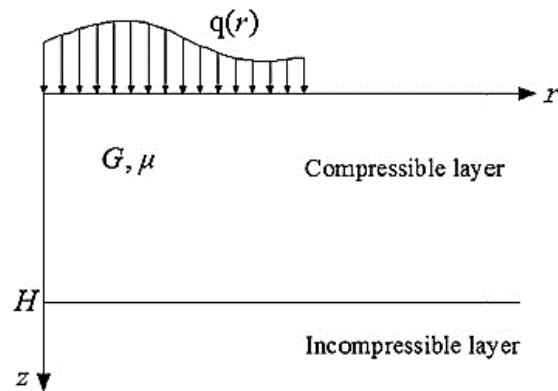
که در آن:

$$\bar{\zeta}(\xi, z) = \int_0^\infty \zeta(r, z) r J_0(\xi r) dr$$

راه حل کلی عبارت است از:

$$\bar{\zeta}(\xi, z) = (A + Bz)e^{-\xi z} + (C + Dz)e^{\xi z} \quad 3-48$$

که  $A, B, C$  و  $D$  مقادیر ثابتی هستند که با استفاده از شرایط مرزی تعیین می شوند.



شکل ۳-۱۰ خاک تک لایه تحت بار متقارن

با انجام تبدیل هانکل (Hankel) برای معادله ۳-۴۶، تابع توزیع تغییرمکان و تنش با معادله ۳-۴۸ بیان می شود. [Error! Bookmark not defined.]

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_r(\xi, z) &= \frac{1+\mu}{E} [\xi e^{-\xi z} A - (2 - 2\mu - \xi z) e^{-\xi z} B + \xi e^{\xi z} C + (2 - 2\mu + \xi z) e^{\xi z} D] \\ \bar{w}(\xi, z) &= \frac{1+\mu}{E} [\xi e^{-\xi z} A + (1 - 2\mu + \xi z) e^{-\xi z} B - \xi e^{\xi z} C + (1 - 2\mu - \xi z) e^{\xi z} D] \\ \bar{\sigma}_z(\xi, z) &= -\xi^2 (e^{-\xi z} A + z e^{-\xi z} B + e^{\xi z} C + z e^{\xi z} D) \\ \bar{\tau}_{rz}(\xi, z) &= \xi [-\xi e^{-\xi z} A + (1 - \xi z) e^{-\xi z} B + \xi z C + (1 + \xi z) e^{\xi z} D] \end{aligned} \right\} \quad \begin{matrix} ۳-۴ \\ ۹ \end{matrix}$$

که  $E$  مدول الاستیسیته و  $H$  ضخامت لایه های خاک است. با فرض  $z = 0$  در معادله ۳-۴۹، معادلات جبری خطی مربوط به  $A, B, C$  و  $D$  به دست می آید. با حل معادلات جبری خطی و جایگذاری  $A, B, C$  و  $D$  در معادله ۳-۴۹، تابع راه حل اولیه برای خاک تک لایه با خاصیت الاستیک به صورت رابطه ۳-۵۰ است [Error! Bookmark not defined.]

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_r(\xi, z) \\ \bar{w}(\xi, z) \\ \frac{\bar{\sigma}_z(\xi, z)H}{E} \\ \frac{\bar{\tau}_{rz}(\xi, z)H}{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & \frac{1}{4(1-\mu)}(F_5 - F_4) & \frac{z(1+\mu)}{4H(1-\mu)}(F_3 + F_4) & \frac{1+\mu}{2\xi H(1-\mu)}F_5 \\ \frac{1}{4(1-\mu)}(F_6 - F_3) & F_2 & \frac{1+\mu}{2\xi H(1-\mu)}F_6 & -\frac{z(1+\mu)}{4H(1-\mu)}(F_3 + F_4) \\ \frac{\xi^2 z H}{4(1-\mu^2)}(F_3 + F_4) & \frac{\xi H}{2(1-\mu^2)}F_4 & F_2 & -\frac{1}{4(1-\mu)}(F_5 - F_4) \\ \frac{\xi H}{2(1-\mu^2)}F_3 & \frac{\xi^2 z H}{4(1-\mu^2)}(F_3 + F_4) & -\frac{1}{4(1-\mu)}(F_6 - F_3) & F_1 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} ۳-۵۰ \\ \times \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_r(\xi, 0) \\ \bar{w}(\xi, 0) \\ \frac{\bar{\sigma}_z(\xi, 0)H}{E} \\ \frac{\bar{\tau}_{rz}(\xi, 0)H}{E} \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= ch\xi z + \frac{\xi z sh\xi z}{2(1-\mu)} \\ F_2 &= ch\xi z - \frac{\xi z sh\xi z}{2(1-\mu)} \\ F_3 &= sh\xi z + \xi z ch\xi z \\ F_4 &= sh\xi z - \xi z ch\xi z \\ F_5 &= (3-4\mu)sh\xi z + \xi z ch\xi z \\ F_6 &= (3-4\mu)sh\xi z - \xi z ch\xi z \end{aligned} \right\} \quad ۳-۵۱$$

با توجه به معادله ۳-۵۰، واضح است که در صورت مشخص بودن چهار تابع  $\overline{u_r}(\xi, 0)$ ،  $\overline{w}(\xi, 0)$ ،  $\overline{\sigma_z}(\xi, 0)$  و  $\overline{\tau_{rz}}(\xi, 0)$ ، تغییرمکان و تنش در هر نقطه از خاک قابل محاسبه می باشد.

با فرض  $\xi H = \alpha$  از معادله ۳-۵۰، رابطه بین تغییرمکان سطح بالایی و پایینی به صورت معادله ۱-۵۲ به دست می آید. **Error! Bookmark not defined.**

$$\left. \begin{aligned} \overline{u_r}(\xi, H) &= a_{11}\overline{u_r}(\xi, 0) + a_{12}\overline{w}(\xi, 0) + a_{13}\frac{\overline{\sigma_z}(\xi, 0)H}{E} + a_{14}\frac{\overline{\tau_{rz}}(\xi, 0)H}{E} \\ \overline{w}(\xi, H) &= a_{21}\overline{u_r}(\xi, 0) + a_{22}\overline{w}(\xi, 0) + a_{23}\frac{\overline{\sigma_z}(\xi, 0)H}{E} + a_{24}\frac{\overline{\tau_{rz}}(\xi, 0)H}{E} \end{aligned} \right\} \quad ۳-۵۲$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= ch\alpha + \frac{\alpha sh\alpha}{2(1-\mu)} \\ a_{12} &= \frac{1}{2(1-\mu)} [(1-2\mu)sh\alpha + \alpha ch\alpha] \\ a_{13} &= \frac{1+\mu}{2(1-\mu)} sh\alpha \\ a_{14} &= \frac{1+\mu}{2\alpha(1-\mu)} [(3-4\mu)sh\alpha + \alpha ch\alpha] \\ a_{21} &= \frac{1}{2(1-\mu)} [(1-2\mu)sh\alpha - \alpha ch\alpha] \\ a_{22} &= ch\alpha - \frac{\alpha sh\alpha}{2(1-\mu)} \\ a_{23} &= \frac{1+\mu}{2\alpha(1-\mu)} [(3-4\mu)sh\alpha - \alpha ch\alpha] \\ a_{24} &= -\frac{1+\mu}{2(1-\mu)} sh\alpha \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{که در آن:} \\ \\ \\ ۳-۵۳ \end{array}$$

#### ۳-۱-۴ محاسبه فرونشست زمین با استفاده از تئوری تحکیم Biot

نشست کلی خاک  $u_{Total}$ ، به عنوان مجموعی از سه نشست متفاوت در نظر گرفته می شود.

$$u_{Total} = u_{Building} + u_{Pumping} + u_{Natural} \quad ۳-۵۴$$

در رابطه ۳-۵۴ Building، نشست ناشی از بار وارده ساختمان می‌باشد. همچنین Pumping، نشست ناشی از پمپاژ و Natural، نشست ناشی از تحکیم طبیعی را نشان می‌دهد. فرونشست طبیعی، تغییر مکان ایجاد شده در اثر رسوب شدن زمین شناسی خاک رس می‌باشد. وزن ذرات خاک، مستقل از هرگونه عملیاتی مانند بارگذاری و / یا پمپاژ باعث تغییر مکان و جابه‌جایی ماتریسی خاک می‌شود. مدلسازی این پدیده کار دشواری است و نیازمند ملاحظات گسترده‌ای در مقیاس زمان است. در اغلب تئوری‌های رایج تحکیم خاک، در ماتریس خاک از تغییر حجم خاک صرف نظر می‌گردد. همچنین در طول ده سال این پدیده هیچ تاثیری بر روی تنش در ماتریس خاک ندارد. مدل Biot به صورت خلاصه شده در معادله ۳-۵۵ ارائه می‌شود [۱۸۲].

$$\begin{cases} (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + G \nabla^2 u = \chi \frac{\partial p}{\partial x} + g_x(x, y, z, t) \\ (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + G \nabla^2 v = \chi \frac{\partial p}{\partial y} + g_y(x, y, z, t) \\ (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + G \nabla^2 w = \chi \frac{\partial p}{\partial z} + g_z(x, y, z, t) \end{cases} \quad 3-55$$

$$(x, y, z) \in \Omega \quad ; \quad t > 0$$

که مولفه‌های بردار تغییر مکان  $\vec{d}$  عبارتند از  $u$ ،  $v$  و  $w$  و همچنین فشار حفره‌ای  $p$ ،  $\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)$  به عنوان بردار بارگذاری تعریف می‌شود.  $\Omega$  دامنه و محدوده آبخوان می‌باشد. راه حل  $\vec{d}$  متعلق به فضای محاسباتی Sobolev است. [Error! Bookmark not defined.]

$$\vec{d} \in \{ \vec{v} \in H^1(\Omega) \times H^1(\Omega) \times H^1(\Omega); \vec{v} = \vec{u} \text{ on } \partial\Omega \} \times [0, T] = [H_0^1(\Omega, T)]^3$$

شکل ساده‌تری از معادله جریان عبارت است از:

$$\vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla} p) = \frac{1}{S} \frac{\partial p}{\partial t} + Q: \quad ; (x, y, z) \in \Omega; \quad t > 0 \quad 3-56$$

$$K = \frac{k}{\gamma}; \quad \frac{1}{S} = [n\beta + c_{gr}(1 - n)]$$

اعمال شرایط مرزی

(۱) برای فشار آب P

$$p(x, t) = g_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega^1, t > 0) \quad 3-57$$

$$-\mathbf{K} \nabla p \cdot \vec{n}_{\partial\Omega} = g_2(x, t) \quad (x \in \partial\Omega^2, t > 0)$$



که  $\Omega$  دامنه است، مجموعه چند ضلعی از  $R^2$ ،  $\partial^1\Omega$  و  $\partial^2\Omega$ ، بخش هایی از مرز  $\partial\Omega$  حاصل از محدوده  $\Omega$  مطابق با شرایط مرزی Dirichlet and Neumann می باشند. راه حل  $p$  متعلق به فضای محاسباتی Sobolev می باشد [۱۸۲].

$$p \in \{f \in H^1(\Omega); f(x, t) = g_1(x, t) \quad (3-58)$$

$$(x \in \partial\Omega^1, t > 0); -K \nabla f \cdot \vec{n}_{\partial\Omega} = g_2(x, t)$$

$$(x \in \partial\Omega^2, t > 0); \} \times [0, T] = H(\text{div}, \Omega) \times [0, T]$$

(۲) برای تغییر مکان

$$u(x, t) = u_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0) \quad (3-59)$$

$$v(x, t) = v_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0)$$

$$w(x, t) = w_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0)$$

#### ۳-۱-۴-۱ ویژگی های کلی معادلات Biot

##### ۳-۱-۴-۱-۱ اصل ترکیب بارگذاری ها و پمپاژها

در این بخش به بررسی اصل ترکیب بارگذاری و پمپاژ پرداخته می شود. این اصل اجازه تجزیه و تحلیل جداگانه علل مختلف فرونشست را فراهم می سازد. برای سیستم معادلات Biot، سه اصل مختلف ترکیب (جمع آثار) به صورت قضایای زیر به دست آمده است [۱۸۲]:

- قضیه برهم نهی ۱

دو راه حل متفاوت از معادلات Biot، راه حل اول  $(\vec{d}_1, p_1)$  وابسته به یک بردار بارگذاری  $\vec{0} \neq \vec{g}_1$  و ترم پمپاژ  $Q_1 = 0$  و راه حل دوم  $(\vec{d}_2, p_2)$  وابسته به یک بردار بارگذاری  $\vec{0} = \vec{g}_2$  و  $Q_2 \neq 0$  را در نظر بگیرید. بنابراین راه حل  $(\vec{d}, p)$  وابسته به بردار بارگذاری  $\vec{g}_1$  و تابع نرخ پمپاژ  $Q_2 \neq 0$  به صورت دستگاه  $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$  می  $p = p_1 + p_2$

باشد. [Error! Bookmark not defined.]

اثبات:  $(\vec{d}_1, p_1)$ ، راه حل معادلات Biot  $3-54, 3-56, 3-57, 3-58$  و  $3-59$  با  $\vec{0} \neq \vec{g}_1$  و ترم پمپاژ  $Q_1 = 0$  می باشد و شرایط مرزی نیز تعیین شده است.  $(\vec{d}_2, p_2)$ ، راه حل معادلات Biot  $3-54, 3-56, 3-57, 3-58$  و  $3-59$  با  $\vec{0} = \vec{g}_2$  و  $Q_2 \neq 0$  با شرایط مرزی معین می باشد. با استفاده از خاصیت خطی عملگرهای دیفرانسیلی، به طور واضح مشخص است که دستگاه  $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$  راه حل معادلات Biot وابسته به بردار بارگذاری  $\vec{g}_1$  و تابع نرخ پمپاژ  $Q_2 \neq 0$  می باشد. شرایط مرزی با مجموع شرط مرزی مربوط به هر راه حل جداگانه مطابقت دارد. قضیه با منحصر به فر بودن راه حل معادلات Biot اثبات می شود [۱۸۲].

• قضیه برهم‌نهی ۲

دو راه‌حل متفاوت از معادلات Biot، راه‌حل اول  $(\vec{d}_1, p_1)$  وابسته به یک بردار بارگذاری  $\vec{g}_1 \neq \vec{0}$  و ترم پمپاژ  $Q_1 = 0$  و راه‌حل دوم  $(\vec{d}_2, p_2)$  وابسته به یک بردار بارگذاری  $\vec{g}_2 \neq \vec{0}$  و  $Q_2 = 0$  را در نظر بگیرید. بنابراین راه حل  $(\vec{d}, p)$  وابسته به بردار بارگذاری  $\alpha_1 \vec{g}_1 + \alpha_2 \vec{g}_2$  و تابع نرخ پمپاژ  $Q = 0$  به صورت  $\vec{d} = \alpha_1 \vec{d}_1 + \alpha_2 \vec{d}_2$  و  $p = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2$  می‌باشد [۱۸۲].

اثبات:  $(\vec{d}_1, p_1)$ ، راه حل معادلات Biot  $\vec{g}_1 \neq \vec{0}$  و  $Q_1 = 0$  می‌باشد و شرایط مرزی نیز تعیین شده است.  $(\vec{d}_2, p_2)$ ، راه حل معادلات Biot  $\vec{g}_2 \neq \vec{0}$  و  $Q_2 = 0$  می‌باشد. با استفاده از خاصیت خطی عملگرهای دیفرانسیلی، به طور واضح مشخص است که دستگاه  $\vec{d} = \alpha_1 \vec{d}_1 + \alpha_2 \vec{d}_2$  راه حل معادله  $\vec{g} = \alpha_1 \vec{g}_1 + \alpha_2 \vec{g}_2$  و  $Q = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 = 0$  می‌باشد. در این مورد، تغییر شکل  $(x, y, z, t)$  برابر با  $\varepsilon(x, y, z, t) = \alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2$  می‌باشد.  $\varepsilon_1 = \vec{\nabla} \cdot \vec{d}_1$  و  $\varepsilon_2 = \vec{\nabla} \cdot \vec{d}_2$  خواهد بود. شرایط مرزی با مجموع شرط مرزی مربوط به هر راه حل جداگانه مطابقت دارد. به دلیل اینکه عبارت  $Q = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 = 0$  برقرار می‌باشد می‌توان گفت که  $(\vec{d}, p)$  وابسته به بردار بارگذاری  $\alpha_1 \vec{g}_1 + \alpha_2 \vec{g}_2$  و تابع نرخ پمپاژ  $Q = 0$  است [۱۸۲].

• قضیه برهم‌نهی ۳

دو راه‌حل متفاوت از معادلات Biot، راه‌حل اول  $(\vec{d}_1, p_1)$  وابسته به یک بردار بارگذاری  $\vec{g}_1 = \vec{0}$  و ترم پمپاژ  $Q_1 \neq 0$  و راه‌حل دوم  $(\vec{d}_2, p_2)$  وابسته به یک بردار بارگذاری  $\vec{g}_2 = \vec{0}$  و  $Q_2 = 0$  را در نظر بگیرید. بنابراین راه حل  $(\vec{d}, p)$  وابسته به بردار بارگذاری  $\vec{g} = \vec{0}$  و تابع نرخ پمپاژ  $Q = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2$  به صورت  $\vec{d} = \alpha_1 \vec{d}_1 + \alpha_2 \vec{d}_2$  و  $p = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2$  می‌باشد که در آن  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  مقادیر ثابت هستند [۱۸۲].

اثبات:  $(\vec{d}_1, p_1)$ ، راه حل معادلات Biot  $\vec{g}_1 = \vec{0}$  و  $Q_1 \neq 0$  می‌باشد و شرایط مرزی نیز تعیین شده است.  $(\vec{d}_2, p_2)$ ، راه حل معادلات Biot  $\vec{g}_2 = \vec{0}$  و  $Q_2 = 0$  می‌باشد. با استفاده از خاصیت خطی عملگرهای دیفرانسیلی، به طور واضح مشخص است که دستگاه  $\vec{d} = \alpha_1 \vec{d}_1 + \alpha_2 \vec{d}_2$  راه‌حل معادله  $\vec{g} = \alpha_1 \vec{g}_1 + \alpha_2 \vec{g}_2 = \vec{0}$  می‌باشد. شرایط مرزی با مجموع شرط مرزی مربوط به هر راه حل جداگانه مطابقت دارد. به دلیل اینکه عبارت  $Q = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2$  برقرار می‌باشد می‌توان گفت که  $(\vec{d}, p)$  وابسته به بردار بارگذاری  $\vec{g} = \vec{0}$  و تابع نرخ پمپاژ  $Q = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2$  است.

سه تئوری برهم نهی (جمع آثار) برای بدست آوردن راه حل های دستگاه معادلات Biot و همچنین برای محاسبه سهم هریک از آثار در تغییر مکان و جابجایی کلی، از آنها استفاده خواهد شد. [Error! Bookmark not defined].

## ۳-۱-۴-۱-۲ جداسازی دستگاه معادلات Biot

دستگاه معادلات ۳-۵۴، ۳-۵۶، ۳-۵۷، ۳-۵۸ و ۳-۵۹ دستگاه هم بسته معادلات می باشد بدلیل اینکه نمی توان معادلات ۳-۵۴، ۳-۵۶ و ۳-۵۷ برای فشار آب و معادلات ۳-۵۶، ۳-۵۷ و ۳-۵۹ برای تغییر مکان را به صورت جداگانه حل نمود [۱۸۲].

در این بخش روشی برای جداسازی دستگاه معادلات Biot ارائه شده است. ایده اصلی این رویکرد جدید این است که در معادله جریان، تنها ترم وابسته به تغییر مکان  $\vec{\nabla} \cdot \vec{d} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ ،  $\varepsilon$ ، ترم  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$  می باشد. این ترم مربوط به انبساط حجمی ماتریس خاک است. سپس تجزیه محدوده تغییر مکان به یک بخش دورانی و یک بخش غیر دورانی اجازه می دهد تا اتساع ماتریس جامد و دوران ماتریس جامد جدا گردد [۱۸۲].

### • تئوری ۱

با در نظر گرفتن مولفه های  $(u, v, w)$  بردار تغییر مکان  $\vec{d}$ ، می توان فرض کرد که [۱۸۲]:

$$g_z(x, y, z, t) = g_z(z, t); \quad g_x(x, y, z, t) = g_y(x, y, z, t) = 0; \quad \vec{\nabla} \times \vec{d} = \vec{0};$$

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \frac{x}{\lambda + 2G} P(x, y, z, t) + \int_0^z g_z(l, t) dl + r(t)$$

اثبات: با استفاده از تئوری تابع پتانسیل، هنگامی که رابطه  $\vec{\nabla} \times \vec{d} = \vec{0}$  برقرار باشد، یک تابع پتانسیل  $\phi(x, y, z, t)$  عبارت است از:

$$\vec{d} = (u, v, w) = \vec{\nabla}(\phi(x, y, z, t)) = \left( \frac{\partial \phi}{\partial x}; \frac{\partial \phi}{\partial y}; \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)$$

بنابراین:

$$\varepsilon = \vec{\nabla} \cdot \vec{d} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla^2 \phi$$

با در نظر گرفتن معادله ۳-۶۰:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + G \nabla^2 u = \chi \frac{\partial p}{\partial x} \\ (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + G \nabla^2 v = \chi \frac{\partial p}{\partial y} \\ (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + G \nabla^2 w = \chi \frac{\partial p}{\partial z} + g_z(x, y, z, t) \end{array} \right. \quad ۳-۶۰$$

می‌توان معادله ۳-۶۰ را با مختصات  $\phi(x, y, z, t)$  به جای مختصات  $p(x, y, z, t)$  بازنویسی کرد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} [(\lambda + 2G) \nabla^2 \phi] = \chi \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} [(\lambda + 2G) \nabla^2 \phi] = \chi \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} [(\lambda + 2G) \nabla^2 \phi] = \chi \frac{\partial p}{\partial z} + g_z(z, t) \end{array} \right. \quad ۳-۶۱$$

که ساده شده این دستگاه به صورت ۳-۶۲ می‌باشد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} [(\lambda + 2G) \nabla^2 \phi - \chi p] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} [(\lambda + 2G) \nabla^2 \phi - \chi p] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} [(\lambda + 2G) \nabla^2 \phi - \chi p] = g_z(z, t) \end{array} \right. \quad ۳-۶۲$$

دستگاه ۳-۶۲ راه‌حلی را ارائه می‌دهد که عبارت است از:

$$\nabla^2 \phi = \varepsilon(x, y, z, t) = \frac{\chi}{\lambda + 2G} p(x, y, z, t) + \int_0^z g_z(l, t) dl + r(t)$$

نتیجه تئوری ۱ توصیف محدوده تغییر مکان الاستیک  $\vec{d}$  می‌باشد. هنگامی که  $\vec{d}$  یک محدوده غیر دورانی است، تغییر مکان  $\vec{d}$  برابر است با:  $\vec{d} = \vec{\nabla} \cdot \phi$  که  $\phi$  راه‌حل معادله دیفرانسیل جزئی است [۱۸۲].

$$\nabla^2 \phi = \varepsilon(x, y, z, t) = \frac{\chi}{\lambda + 2G} p(x, y, z, t) + \int_0^z g_z(l, t) dl + r(t)$$

$$(x, y, z) \in \Omega; \quad t > 0 \quad ۳-۶۳$$

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (x \in \partial \Omega, t > 0); \\ v(x, t) &= \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (x \in \partial \Omega, t > 0); \\ w(x, t) &= \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (x \in \partial \Omega, t > 0); \end{aligned}$$

با توجه معادله ۳-۶۳، می توان گفت که اگر کرنش حجمی و فشار آب بر روی قسمتی از مرز مستهلک شده باشد و نیرویی در این مرز اعمال نشود، در آن صورت عبارت  $r(t) = 0$  برقرار خواهد شد. هنگامی که  $g_z(l, t)$  و  $r(t)$  هر دو صفر هستند، معادله ۳-۶۴ برقرار است [۱۸۲].

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \frac{\chi}{\lambda + 2G} p(x, y, z, t) \quad ۳-۶۴$$

و معادله ۳-۶۰ به صورت معادله ۳-۶۵ ارائه می شود.

$$\left\{ \begin{aligned} G \nabla^2 u &= \frac{\chi G}{\lambda + 2G} \frac{\partial p}{\partial x} \\ G \nabla^2 v &= \frac{\chi G}{\lambda + 2G} \frac{\partial p}{\partial y} \\ G \nabla^2 w &= \frac{\chi G}{\lambda + 2G} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right. \quad ۳-۶۵$$

عبارت های اخیر شبیه به مدل ترزاقی می باشند. تئوری ۱، مدل ترزاقی را تعمیم داده و جداسازی معادلات تغییر مکان و جریان را فراهم ساخته است [۱۸۲].

### ۳-۱-۴-۱-۳ تغییر مکان الاستیک غیر دورانی

با استفاده از تعمیم تئوری Helmholtz، هر تغییر مکانی ممکن است به صورت جمع دو تغییر مکان در دامنه تعریف شده  $\Omega$  نوشته شود (Zhao 2006) [۱۸۲]:

$$\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2 \quad ۳-۶۶$$

که  $\vec{d}_1$  بردار غیر دورانی و  $\vec{d}_2$  بردار دورانی است.  $\vec{d}_1 = \vec{\nabla} \phi$  ;  $\vec{d}_2 = \vec{\nabla} \times \vec{A}$

$$\varepsilon = \vec{\nabla} \cdot \vec{d} = \vec{\nabla} \cdot \vec{d}_1 = \Delta^2 \varphi; \vec{\nabla} \cdot \vec{d}_2 = \vec{0}$$

توجه داشته باشید که

معادلات موجود در تعادل مکانیکی کرنش سه بعدی در مختصات کارتزین (دکارتی) برای یک المان الاستیک خطی و همگن توسط Biot به صورت معادله ۳-۶۷ شرح داده می‌شود [۱۸۲].

$$G \nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \chi \frac{\partial p}{\partial x} + g_x; \quad 3-67$$

$$G \nabla^2 v + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \chi \frac{\partial p}{\partial y} + g_y;$$

$$G \nabla^2 w + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \chi \frac{\partial p}{\partial z} + g_z;$$

$$\nabla \cdot (k \nabla p) - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{1}{S} \frac{\partial p}{\partial t} = Q;$$

$$p \in \{f \in H^1(\Omega); f(x, t) = g_1(x, t)$$

$$(x \in \partial\Omega^1, t > 0); -K \nabla f \cdot \vec{n}_{\partial\Omega} = g_2(x, t)$$

$$(x \in \partial\Omega^2, t > 0); \} \times [0, T] = H(\text{div}, \Omega) \times [0, T]$$

که در آن  $G$  مدول برشی،  $\nu$  ضریب پواسون،  $\alpha$  نسبت حجم آب استخراج شده به تغییر حجم خاک است. همچنین فرض بر آن است که خاک متراکم می‌باشد و متغیرهای مستقل  $u$ ،  $v$  و  $w$  تغییر مکان‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  در صفحه کارتزین،  $p$  فشار سیال حفره‌ای و  $\varepsilon$  کرنش حجمی می‌باشد.

$$\varepsilon = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad 3-68$$

$\vec{\nabla}$  عملگر Nabla و  $\vec{u} = (u, v, w)$  بردار تغییر مکان است.  $k$  ضریب هدایت هیدرولیکی و  $1/S$  مقدار آبی است که می‌تواند تحت فشار به داخل خاک نیرو وارد کند، در حالی که حجم خاک ثابت نگه داشته می‌شود. معادله ۳-۶۷ را می‌توان با توجه به بردار مجهول تغییر مکان  $\vec{u} = (u, v, w)$ ، فشار  $p$  و بردار معلوم  $\vec{u} = (g_x, g_y, g_z)$  به صورت خلاصه‌تر نوشت [۱۸۲].

$$G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d} + \frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{d}) = \chi \vec{\nabla} p + \vec{g} \quad 3-69$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \cdot \vec{d}) + \frac{1}{S} \frac{\partial p}{\partial t} + Q - \vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla} p) = 0 \quad 3-70$$

$$p \in \{f \in H^1(\Omega); f(x, t) = g_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega^1, t > 0); -\mathbf{K}\nabla f \cdot \vec{n}_{\partial\Omega} = g_2(x, t) \\ (x \in \partial\Omega^2, t > 0); \} \times [0, T] = H(\text{div}, \Omega) \times [0, T]$$

• تئوری ۲

در نظر گرفتن راه حل  $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$  که در آن  $\vec{d}_1$  برابر است با  $\vec{d}_1 = \vec{\nabla} \phi$

$$\vec{d}_1 = \vec{\nabla} \phi; \quad ۳-۷۱$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\chi(1-2\nu)}{2G(1-\nu)} p(x, y, z, t) + \varepsilon_0(t) \quad (x, y, z) \in \Omega; t > 0$$

$$d_{1x}(x, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{1y}(x, t) = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{1z}(x, t) = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

و  $\vec{d}_2$  برابر است با:

$$G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d}_2 = \vec{g} \quad ۳-۷۲$$

$$d_{2x}(x, t) = u_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{2y} = v_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{2z} = w_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

سپس  $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$  راه حل منحصر به فرد معادله ۳-۶۷ می باشد [۱۸۲].

اثبات: از معادله ۳-۶۹ می توان مشاهده کرد که:

$$\nabla^2 \phi = \vec{\nabla} \cdot \vec{d}_1 = \frac{\chi(1-2\nu)}{2G(1-\nu)} p(x, y, z, t) + \varepsilon_0(t) \quad ۳-۷۳$$

با توجه به معادله ۳-۷۳، می توان گفت که اگر کرنش حجمی و فشار آب بر روی قسمتی از مرز مستهلک شده باشد و نیرویی در این مرز اعمال نشود، در آن صورت عبارت  $\varepsilon_0(t) = 0$  برقرار خواهد شد. این فرض در موارد زیر استفاده خواهد شد. با جایگذاری معادله ۳-۷۳ در سمت چپ معادله ۳-۶۷، معادله ۳-۷۴ نتیجه می شود [۱۸۲].

$$G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d}_1 + \frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{d}_1) \quad ۳-۷۴$$

$$= G \vec{\nabla} \left[ \frac{\chi(1-2\nu)}{2G(1-\nu)} p \right] + \frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla} \left[ \frac{\chi(1-2\nu)}{2G(1-\nu)} p \right] = \chi \vec{\nabla} p$$

با تفریق معادله ۳-۶۷ از ۳-۷۳ و با استفاده از  $\vec{d} = \vec{d}_1 - \vec{d}_2$  معادله ۳-۷۵ بدست می‌آید [۱۸۲].

$$G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d} + \frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{d}) - \left[ G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d}_1 + \frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{d}_1) \right] = \chi \vec{\nabla} p + \vec{g} - \chi \vec{\nabla} p \quad ۳-۷۵$$

$$\frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{d}_2) + G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d}_2 = \vec{g}$$

$$d_{2x}(x, t) = u_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{2y} = v_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{2z} = w_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

اکنون بردار  $\vec{d}_2$  دورانی است:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{d}_2 = 0 \quad ۳-۷۶$$

بنابراین بر اساس معادله ۳-۷۰، معادله ۳-۷۷ نتیجه می‌شود.

$$G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d}_2 = \vec{g} \quad ۳-۷۷$$

$$d_{2x}(x, t) = u_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{2y} = v_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$d_{2z} = w_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

جمع دو معادله ۳-۷۵ و ۳-۷۷ منجر به معادله ۳-۷۸ می‌گردد [۱۸۲].

$$\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2; \quad ۳-۷۸$$

$$G \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{d} + \frac{G}{1-2\nu} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{d}) = \chi \vec{\nabla} p$$

همچنین شرایط مرزی  $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$  عبارتند از:

$$u(x, t) = u_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0); \quad ۳-۷۹$$

$$v(x, t) = v_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$

$$w(x, t) = w_1(x, t) \quad (x \in \partial\Omega, t > 0);$$



## ۳-۱-۵ نتیجه گیری

فرونشست زمین به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی در سال های اخیر با افزایش بهره برداری بیش از حد آب های زیرزمینی به عنوان یک مسئله اساسی مطرح شده است. در این بخش راه حل هایی برای تحکیم خاک های چند لایه با نفوذپذیری ناهمسان ناشی از افت سطح آب زیرزمینی و تزریق آب به چاه ارائه گردید. براساس تبدیل لاپلاس - هانکل، به بیان دقیق تنش ها، تغییر مکان ها، اضافه فشار حفره ای و سرعت نشست عمودی در دامنه تبدیل شده پرداخته شد. سپس ماتریس سختی یک خاک تک لایه برای توصیف روابط بین این مولفه ها ارائه گردید. در نهایت، راه حل های واقعی را می توان با معکوس کردن تبدیل لاپلاس - هانکل به دست آورد. برخی مثال های عددی برای بررسی تاثیر تغییرات پارامترها بر رفتار تحکیم خاک های چند لایه ارائه و با نتایج تحقیقاتی موجود مقایسه شدند. نتایج حاصل از این بررسی ها شامل موارد زیر می باشد:

- ۱) طول چاه آبکشی باید در آنالیز تحکیم خاک های لایه ای ناشی از پمپاژ آب از چاه در نظر گرفته شود. افزایش طول چاه منجر به تغییر مکان سطحی کوچک تر می شود.
  - ۲) مقادیر بزرگ تری از پارامترهای نفوذپذیری ناهمسان می تواند منجر به تغییر مکان های سطحی کوچک تر و اضافه فشار حفره ای شود.
  - ۳) خاک لایه ای را نمی توان به راحتی با در نظر گرفتن میانگین وزنی پارامترها، به خاک همگن تبدیل کرد، زیرا این روش منجر به انحراف زیادی در توصیف رفتار تحکیم خاک های لایه ای می شود.
  - ۴) پمپاژ از سفره سطحی می تواند منجر به نشست نامتقارن در اطراف خط مرکزی و پمپاژ از سفره عمیق می تواند منجر به دامنه تأثیر بزرگتری از نشست شود.
  - ۵) افزایش در نسبت تزریق می تواند تغییر مکان سطحی افقی و نشست قائم را کاهش دهد.
  - ۶) تغییر مکان های ناشی از پمپاژ و تزریق دوره ای کم تر از تغییر مکان های ناشی از پمپاژ به تنهایی است.
- علاوه بر این به منظور پیش بینی و ارزیابی فرونشست زمین ناشی از تحکیم خاک، روابطی بر اساس تئوری سیستم لایه بندی الاستیک و تئوری تحکیم Biot ارائه گردید.

## ۳-۲ روش های پیش بینی فرونشست زمین

### ۳-۲-۱ مقدمه

مشکلات فرونشست زمین ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی، زمینه پژوهش را در دو دهه اخیر فراهم ساخت. از این رو تحلیل و پیش بینی تحکیم خاک ناشی از افت آب زیرزمینی برای جلوگیری از فرونشست و ایجاد محدودیت هایی در استفاده از منابع آب زیرزمینی ضروری می باشد [۱۸۸].

## ۳-۲-۲ پیش بینی فرونشست زمین با استفاده از یک مدل هم‌بسته خزش - نشت - تحکیم

پیشنهادی توسط Miao et al. (2011)

توسعه فرونشست زمین در اثر ساخت و سازهای زیرزمینی و برداشت آب‌های زیرزمینی نه تنها یک فرآیند تحکیم و خزش بلکه فرآیندی از نشت می‌باشد. بنابراین، مدل محاسباتی باید تحکیم، خزش و نشت را هم‌بسته کند که در آن، شرایط پیوسته‌گردایان آب زیرزمینی و جریان آب زیرزمینی نیز باید در نظر گرفته شود. با این فرض که آب منفذی و ذرات خاک تراکم ناپذیر باشند، معادله یک بعدی بدست می‌آید [۱۸۹].

➤ معادله تعادل تنش

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0 \quad 3-80$$

که  $\sigma_z$  تنش قائم کل،  $f_z$  نیروی المان خاک،  $z$  عمق می‌باشد.

➤ شرایط پیوسته نشت

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{n}{Q} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad 3-81$$

که  $\varepsilon_v$  تغییرشکل حجمی خاک، در حالت یک بعدی  $\varepsilon_v = \varepsilon_z$ ،  $n$  تخلخل،  $Q$  مدول حجمی آب منفذی،  $u$  فشار آب منفذی،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب،  $k_z$  ضریب نفوذپذیری در جهت قائم و  $t$  زمان است.

➤ تنش موثر اصلی

$$\sigma_z = \sigma'_z - u \quad 3-82$$

که  $\sigma'_z$  تنش موثر در جهت قائم،  $u$  فشار آب منفذی می‌باشد.

➤ رابطه بین تنش موثر و کرنش

$$d\sigma'_z = C \cdot d\varepsilon_z \quad 3-83$$

که  $C$  مدول برشی خاک است.

در حالت کلی، رابطه بین تنش موثر و کرنش وابسته به زمان نیست و رابطه بنیادی آن به صورت معادله ۵-۲

است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$d\varepsilon_z = m_v \cdot d\sigma'_z \quad 3-84$$

که در آن:

$$m_v = \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial \sigma_z} = \frac{C_c}{2.3 (1 + e_0) \cdot \sigma_z} \text{ or } \frac{C_r}{2.3 (1 + e_0) \cdot \sigma_z}$$

با ترکیب معادله ۲-۴ و معادله ۲-۵ و با فرض تنش کل به عنوان مقدار ثابت، معادله یک بعدی ترزاقی می تواند مطابق معادله ۳-۸۵ بدست آید.

$$\frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad ۳-۸۵$$

که  $u_e$  فشار اضافی آب منفذی،  $u_e = u - u_0$ ، که در آن  $u_0$  فشار آب حفره ای اولیه است. در این مدل وابسته به زمان که شامل تغییر شکل خاک در مرحله تحکیم اولیه و تغییر شکل خزش خاک است، افزایش تغییر شکل کل در یک زمان مشخص شده  $t$  است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\Delta \varepsilon^{(n)} = D^* \cdot \Delta \sigma'^{(n)} + \Delta \tilde{\varepsilon}^{(n)} \quad ۳-۸۶$$

$$D^* = \frac{1}{k_i^e} + \frac{1}{k_c^p} - \alpha \frac{\eta}{k_c^{p^2} \Delta t^{(n)}} \quad ۳-۸۷$$

$$\Delta \tilde{\varepsilon}^{(n)} = \frac{\alpha}{k_c^p} (\sigma'^{(n)} - \sigma_c'^{(n)}) \quad ۳-۸۸$$

$$\alpha = 1 - \exp \left\{ - \frac{k_c^p \Delta t^{(n)}}{\eta} \right\} \quad ۳-۸۹$$

### ۳-۲-۳ راه حل تحلیلی ارائه شده برای فرونشست زمین در لایه رسی

Tsai در سال ۲۰۰۹ یک مدل ریاضی یک بعدی را برای تحکیم خطی خاک براساس معادله تعادل نیروها در شرایط افزایشی و همبسته با معادله جریان اشباع ارائه دادند. روش تفاضل محدود همراه با الگوریتم Thomas برای محاسبه معادلات همبسته اضافه فشار آب حفره ای و تغییر مکان در ساختار خاک رس به کار گرفته شد [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

مدل ریاضی

معادله جریان برای تشریح تحکیم یک بعدی خاک می تواند به صورت زیر بیان شود (Tsai, 2009) [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{\partial p^e}{\partial z} \right] = \rho_w g \frac{\partial^2 u_z}{\partial t \partial z} \quad ۳-۹۰$$

که در آن  $z$  مختصات،  $k$  هدایت هدرولیکی،  $p^e$  اضافه فشار آب حفره ای،  $\rho_w$  چگالی آب،  $t$  زمان،  $u_z$  تغییر مکان قائم خاک می باشد. معادله تعادل نیروها برای خاک با رفتار ویسکوالاستیک خطی به صورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ (2G + \lambda) \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2G' + \lambda') \frac{\partial^2 u_z}{\partial t \partial z} \right] = \frac{\partial P^e}{\partial z} \quad ۳-۹۱$$

که در آن  $G$  و  $\lambda$  ثابت‌های Lamé و  $G'$  و  $\lambda'$  مدول ویسکوز می‌باشند. اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییر مکان اولیه خاک برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$p^e(z, 0) = 0 \quad ۳-۹۲$$

$$u_z(z, 0) = 0 \quad ۳-۹۳$$

اضافه فشار آب حفره‌ای موجود در مرزهای تحتانی و فوقانی لایه رس با تغییرات هد آب در دو لایه ماسه موجود در بالا و پایین آن متناسب است به صورت معادله ۲-۱۵ و معادله ۲-۱۶ بیان می‌شود.

$$p^e(0, t) = -\rho_w g h_2(t) \quad ۳-۹۴$$

$$p^e(B, t) = -\rho_w g h_1(t) \quad ۳-۹۵$$

که  $B$  ضخامت لایه رس می‌باشد. تغییر مکان در مرز تحتانی لایه رس برابر صفر است.

$$u_z(0, t) = 0 \quad ۳-۹۶$$

آبخوان ماسه‌ای موجود در قسمت بالایی محصور فرض شده است که در شکل ۳-۱۱ نشان داده می‌شود.

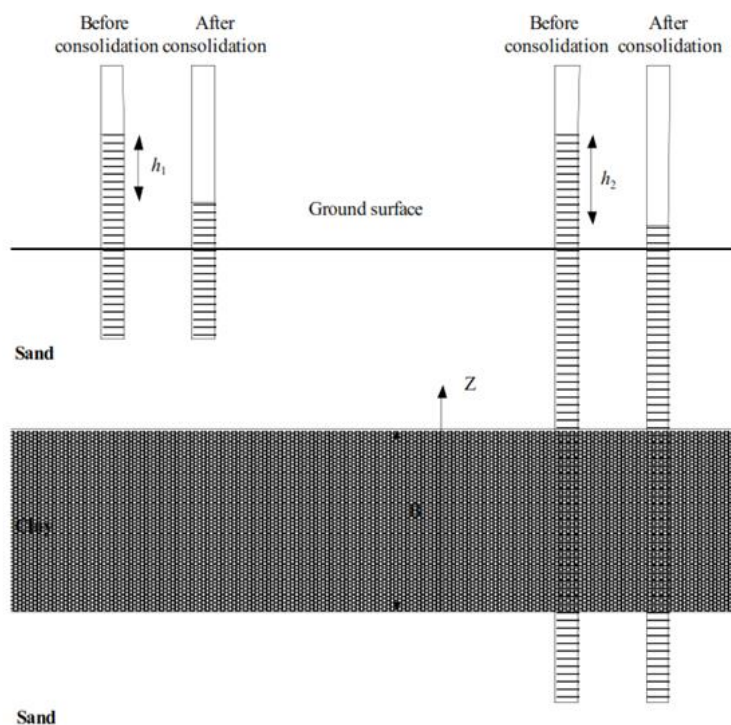
تنش موثر در بالای خاک رس به دلیل افت سطح آب ناشی از پمپاژ افزایش می‌یابد ( $z = B$ ). بنابراین شرایط مرزی فوقانی برای لایه رس می‌تواند به صورت معادله ۳-۹۷ بیان شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$(2G + \lambda) \frac{\partial u_z(B, t)}{\partial z} + (2G' + \lambda') \frac{\partial^2 u_z(B, t)}{\partial t \partial z} = -\rho_w g h_1(t) \quad ۳-۹۷$$

Tsai (2009) تغییر مکان مرجع خاک و زمان مرجع برای هدایت هیدرولیکی  $K_f$  و ثوابت Lamé  $G_f$  و  $\lambda_f$  را به صورت  $\rho_w g B^2 / (2G_f + \lambda_f) K_f$  و  $\rho_w g B^2 / (2G_f + \lambda_f)$  تعیین کرد. برای ارائه مختصر، پارامترها و متغیرهای بی بعد معرفی می‌شوند [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$u_z^* = \lambda_f u_z / \rho_w g B^2, t^* = K_f \lambda_f t / \rho_w g B^2, P^{e*} = P^e / \rho_w g B \quad ۳-۹۸$$

$$\lambda^* = \lambda / \lambda_f, t^* = \lambda_f K_f / \rho_w g B^2, K^* = K / K_f, z^* = z / B$$



شکل ۳-۱۱ شماتیکی از تحکیم خاک به دلیل تغییر در سطح آب زیرزمینی

معادله ۲-۱۱ و معادله ۲-۱۲ می توانند به صورت بی بعد، مطابق معادله ۲-۲۰ و معادله ۲-۲۱ تعریف شوند [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\frac{\partial}{\partial z^*} \left[ K^* \frac{\partial p^{e*}}{\partial z^*} \right] = \frac{\partial^2 u_z^*}{\partial t^* \partial z^*} \quad ۳-۹۹$$

$$\frac{\partial}{\partial z^*} \left[ (2G^* + \lambda^*) \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} \right] + \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ N \frac{\partial^2 u_z^*}{\partial t^* \partial z^*} \right] = \frac{\partial p^{e*}}{\partial z^*} \quad ۳-۱۰۰$$

که  $N$  عدد ویسکوزیته است.

شرایط مرزی برای اضافه فشار آب حفره ای در  $z^* = 0$  و  $z^* = 1$  به صورت معادله ۲-۲۲ و معادله ۲-۲۳ هستند.

$$p^{e*}(0, t^*) = -\frac{h_2(t^*)}{B} \quad ۳-۱۰۱$$

$$p^{e*}(1, t^*) = -\frac{h_1(t^*)}{B} \quad ۳-۱۰۲$$

علاوه بر این شرایط مرزی معادلات ۳-۱۰۳ و ۳-۱۰۴ برای تغییر مکان خاک ممکن است به صورت معادله ۲-۲۴ و ۳-۲۵ بی بعد شود.

$$u_z^*(0, t^*) = 0 \quad 3-103$$

$$(2G^* + \lambda^*) \frac{\partial u_z^*(1, t^*)}{\partial z^*} + N \frac{\partial^2 u_z^*(1, t^*)}{\partial t^* \partial z^*} = -\frac{h_1(t^*)}{B} \quad 3-104$$

همچنین شرایط اولیه برای اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییر مکان خاک به صورت معادله ۲-۲۶ و معادله ۲-۲۷ بیان می‌شود.

$$P^{e*}(z^*, 0) = 0 \quad 3-105$$

$$u_z^*(z^*, 0) = 0 \quad 3-106$$

با اعمال تبدیل لاپلاس به معادلات ۳-۹۰ تا ۳-۱۰۶، راه‌حلی برای تغییر مکان خاک و اضافه فشار حفره‌ای در محدوده لاپلاس می‌تواند به صورت معادله ۲-۲۸ و معادله ۲-۲۹ بدست آید [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\tilde{p}^{e*} = -\frac{e^{\sqrt{\omega}z^*} - e^{-\sqrt{\omega}z^*}}{e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}} \frac{\tilde{h}_1(s)}{B} - \frac{e^{\sqrt{\omega}(1-z^*)} - e^{-\sqrt{\omega}(1-z^*)}}{e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}} \frac{\tilde{h}_2(s)}{B} \quad 3-107$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_z^* = \frac{K^*\sqrt{\omega}}{s} & \left[ \frac{2}{e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}} - \frac{e^{\sqrt{\omega}z^*} + e^{-\sqrt{\omega}z^*}}{e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}} \right] \frac{\tilde{h}_1(s)}{B} \\ & + \frac{K^*\sqrt{\omega}}{s} \left[ -\frac{e^{\sqrt{\omega}} + e^{-\sqrt{\omega}}}{e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}} + \frac{e^{\sqrt{\omega}(1-z^*)} + e^{-\sqrt{\omega}(1-z^*)}}{e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}} \right] \frac{\tilde{h}_2(s)}{B} \end{aligned} \quad 3-108$$

که  $s$  متغیر لاپلاس می‌باشد و  $\omega$  برابر است با:

$$\omega = \frac{s}{K^*[(2G^* + \lambda^*) + Ns]} \quad 3-109$$

## ۳-۲-۴ مدل سازی عددی ارائه شده توسط (Zu-jiang and Feng (2011) بر اساس تئوری ویسکوالاستیک - پلاستیک تحکیم Biot

تئوری تحکیم Biot که به طور گسترده در مطالعات مکانیک خاک استفاده می‌شود، یک تئوری هم‌بسته برای سطح مشترک خاک و سیال می‌باشد. با این حال در تئوری تحکیم Biot خاک به عنوان یک جسم الاستیک با وجود حفرات در نظر گرفته شد. جریان آب حفره‌ای آرام با خاک همراه با شرایط پیوسته هم‌بسته شد. اگرچه در مقایسه با روش‌های غیر هم‌بسته قبلی پیشرفت‌هایی حاصل شد، اما بهبود چندانی در شرایط محاسباتی حاصل نشد. در دهه ۱۹۹۰، با پیشرفت سریع تکنولوژی‌های رایانه‌ای، معادله پیچیده اجزا محدود برای تئوری تحکیم Biot قابل حل بود. از آن زمان، مطالعه تئوری هم‌بسته جامد-سیال با فرضیات مختلفی از رابطه تنش و کرنش در محیط متخلخل (به عنوان مثال

برخی فرض می کنند که محیط متخلخل الاستوپلاستیک است، و برخی دیگر فرض می کنند که ویسکو الاستیک است) یا فرضیات متفاوتی در مورد سیال حفره ای، که می تواند سیال چند فاز یا سیال تک فاز در نظر گرفته شود (که گاهی اوقات به عنوان محیط متخلخل غیر اشباع یا محیط متخلخل اشباع خوانده می شود) بر پایه نظریه تحکیم سه بعدی Biot متمرکز شده است [۱۹۰].

برای خاک سه بعدی، معادله اجزا محدود تحکیم Biot در هر نقطه ای از خاک می تواند به صورت معادله ۳-۱۱۰ بیان شود.

$$-[B]^T[D][B]\{w\} + [B]^T[M]u = \{f\} \quad 3-110$$

که  $\{w\} = \{w_x, w_y, w_z\}^T$  تغییر مکان در جهت های اصلی محیط ناهمسان،  $[D]$  ماتریس رابطه تنش- کرنش است که بر اساس مدل می تواند یک ماتریس الاستیک و یا یک ماتریس ویسکو الاستیک باشد،  $\{f\} = \{f_x, f_y, f_z\}^T$  نیروی حجمی در جهت های  $x, y, z$  در نقطه محاسباتی و  $u$  اضافه فشار آب حفره ای می باشد. همچنین  $[M] = \{1, 1, 1, 0, 0, 0\}^T$  برابر است با:

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad 3-111$$

و  $[N] = \{N_1, N_2, \dots, N_8\}$ ، تابع شکل می باشد.

علاوه بر این، طبق قانون داریسی و قانون بقایای انرژی، معادله پیوستگی اجزای محدود خاک به صورت معادله ۳-۱۱۲ ارائه می شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$[C]^T \frac{\partial}{\partial t} \{w\} - \frac{1}{r_w} [C]^T [K] [C] u = \{Q\} \quad 3-112$$

که در آن:

$$[C] = \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right]^T \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix}$$

$Q$  آرایه جریان معادل گره است،  $k_{xx}$ ،  $k_{yy}$  و  $k_{zz}$  هدایت هیدرولیکی در جهت‌های اصلی محیط ناهمسان و  $r_w$  شدت آب است. معادله ۲-۳۱ و معادله ۲-۳۳ معادله تحکیم سه بعدی Biot هستند. و مدل ریاضی هم‌بسته جریان آب زیرزمینی و فرونشست زمین می‌تواند با شرایط اولیه و مرزی برقرار شود، تا با روش اجزا محدود حل شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

➤ معادله اجزا محدود ویسکوالاستیک - پلاستیک تحکیم Biot

از روش باقی‌مانده وزنی گالرکین برای تفسیر معادلات استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن خصوصیات غیرخطی خاک‌ها، از  $\Delta t$  نموی برای جایگزینی تغییرمکان استفاده می‌شود، و معادله ۲-۳۱ و معادله ۲-۳۳ به صورت نموی به صورت معادله ۳-۱۱۳ بیان می‌شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\begin{bmatrix} \bar{k} & k' \\ k'^T & \Delta tk + B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - R \\ \Delta t \Delta Q \end{bmatrix} \quad ۳-۱۱۳$$

که  $\Delta \delta$  نمو تغییرمکان در گره،  $\Delta u$  نمو اضافه فشار حفره‌ای در گره،  $\bar{K}$  ماتریس سختی خاک،  $K$  ماتریس نشت،  $K'$  ماتریس هم‌بسته نشت - کرنش،  $\Delta Q$  ماتریس نموی جریان،  $B$  ماتریس بنیادی سطح آزاد،  $R$  بار مشترک معادل و  $R_t$  تعادل بار با استفاده از تغییرمکان در زمان است.

از آنجا که جریان نشت به توزیع نموی فشار آب حفره‌ای وابسته نیست، می‌تواند با استفاده از مقادیر کل بیان شود. مقادیر کلی فشار حفره‌ای در زمان  $t_n$  و  $t_{n+1}$  به عنوان  $u_{i(n)}$  و  $u_{i(n+1)}$  نشان داده می‌شود، علاوه بر این  $\Delta u_i = u_{i(n+1)} - u_{i(n)}$ ، بنابراین معادله ۲-۳۵ ارائه شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\begin{bmatrix} \bar{k} & k' \\ k'^T & \Delta tk + B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ u_{i(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - R_t \\ \Delta t \Delta Q - (\Delta tk + B)u_{i(n)} \end{bmatrix} \quad ۳-۱۱۴$$

که معادله اجزا محدود سه بعدی تحکیم Biot است.

### ۳-۲-۵ نتیجه گیری

فرونشست زمین بدلیل بهره برداری از آب‌های زیرزمینی با توجه به کاهش سطح آب و نشست نامتقارن اغلب باعث ایجاد شکاف زمین می‌شود. در این بخش به منظور پیش بینی فرونشست، توسعه و بهره برداری از منابع آب زیرزمینی، یک مدل هم‌بسته تحکیم - خزش - نشت ارائه گردید که این مدل هم‌بسته برای پیش‌بینی فرونشست زمین در سیستم آبخوان مناسب است.



یک مدل ریاضی نیز بیان شد که راه حل تحلیلی را در دامنه لاپلاس برای پیش بینی اضافه فشار آب حفره ای و تغییر مکان خاک براساس مدل تحکیم یک بعدی Tsai با در نظر گرفتن اثر ویسکوزیته برای خاک متخلخل ناشی از تغییر هد سفره های آب زیرزمینی مجاور توسعه داده است.

همچنین در توسعه و بهره برداری از منابع آب زیرزمینی یک معادله ساختاری ویسکوالاستیک - پلاستیک ارائه شد، تا رابطه تغییرات بین تنش - کرنش و زمان خاک رسی را توصیف کند، و برای رسیدن به نتایج قابل اطمینان به یک مدل عددی اعمال می شود. در این مدل با در نظر گرفتن ویژگی های غیر خطی خاک، پارامترهای مربوط به حالت تنش موثر در مدل شبیه سازی معرفی می شوند، که باعث می شود توصیف تنش - کرنش و فرونشست با شرایط واقعی سازگارتر باشد، و دقت محاسبات بیشتر گردد. مدل ریاضی سه بعدی هم بسته فرونشست زمین و بهره برداری از آب های زیر زمینی، براساس نظریه تحکیم ویسکوالاستیک - پلاستیک Biot می تواند برای محاسبه تغییرات سطح آب و تغییر مکان در سه جهت به ویژه فرونشست خاک رسی استفاده شود.

### ۳-۳ مکانیک شکل گیری شکاف های زمین ناشی از پمپاژ آب زیر زمینی

#### ۳-۳-۱ مقدمه

شکاف های زمین معمولاً با طول زیاد و به صورت خطی، قوس دار یا سیگموئیدال هستند، تقریباً طول شکاف های عمودی در زمین ممکن است به چندین کیلومتر برسد و حتی این ترک ها همان طور که در شکل ۳-۱۲ مشاهده می شود، می توانند تا عمق آبخوان گسترش پیدا کنند. شکاف ها معمولاً به صورت ترک های مویی با روزه های ۱ میلی متری و یا کمتر که تقریباً با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نیستند، شروع می شوند و حتی ممکن است در طوفان های شدید و به وسیله باد و باران از بین بروند و یا باعث به وجود آمدن مخاطراتی بر روی زمین شوند. مخاطرات زمین ناشی از وجود این درز و شکاف ها عبارتند از:

- آسیب ها و صدمات جانی به انسان ها و سایر موجودات زنده
- خسارت و آسیب به فونداسیون ها و سازه ها
- خسارات مالی بر سیستم حمل و نقل
- باعث خسارت و آسیب به سازه های زیرزمینی و مدفون همچون لوله ها، سیستم فاضلاب، چاه ها و کانال ها
- به مخاطره انداختن محیط زیست و تغییر در چشم اندازها
- انتقال مواد آلاینده در جریان های سطحی به آب های زیرزمینی و همچنین تغییر مسیر زهکشی شیرابه های زباله

نظریه ها و مدل های بسیاری برای پیدایش و گسترش درز و شکاف و ترک های ناشی از پمپاژ و برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی ارائه شده است. مکانیسم های رایج فعلی برای ایجاد شکاف های مرتبط با فرونشست زمین ناشی از

پمپاژ آب های زیرزمینی بر اساس مشاهدات و استدلال های مفهومی استوار است. این استدلال ها ممکن است با فیزیک شکل گیری شکاف های زمین ناشی از کاهش سطح آب زیرزمینی سازگار بوده و یا سازگاری نداشته باشد [۱۹۱].



شکل ۳-۱۲ شکاف زمین از میان مزرعه ای در نزدیکی شهر فینیکس آریزونا

مشکلات اساسی در ساخت مدلی برای پیدایش و گسترش شکاف های زمین عبارت اند از:

- ۱- عدم شناخت و درک کافی از این فرآیند
- ۲- پیچیدگی های زمین شناسی در بسیاری از مناطق دارای سفره آبخوان
- ۳- عدم وجود روش مدیریت مناسب در رابطه با شناسایی موقعیت، تراکم و عمق چاه ها و مقدار پمپاژ آب از هریک آنها
- ۴- عدم وجود یک پایگاه داده و اطلاعات جامع

هدف اصلی این گزارش، ایجاد درک درستی از فرآیند مکانیکی است که منجر به تشکیل شکاف های زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در یک سفره آبخوان می شود. هدف ثانویه بررسی پارامترهای کلیدی برای جلوگیری و کنترل شکاف های زمین در ابتدای پیدایش و شکل گیری آنهاست و قصد ندارد مکانیک گسترش شکاف های زمین و یا یک مدل عددی را برای آن توسعه دهد. عوامل زیادی از جمله تنش های تکتونیکی و حرکات گسل سبب به وجود آمدن شکاف های زمین می شود اما در این میان بعضاً می توانند این شکاف ها ناشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی و برداشت سیال از زمین باشند. شکاف های زمین ناشی از برداشت آب های زیرزمینی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

هولزر و همکاران (۱۹۷۹) استدلال کرد، از آنجایی که حرکات شکاف های زمین تقریباً عمود بر سطوح ترک مشاهده شده است می توان گفت که این شکاف های زمین در اثر کشش ایجاد شده است و این مساله دلیل پیدایش اغلب

شکاف‌های موجود در زمین است. با این حال، این حرکات پس از شکل‌گیری شکاف‌های زمین مشاهده شده و ممکن است مربوط به مراحل اولیه پیدایش آن‌ها نباشد [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

مکانیسم‌های رایج برای اغلب شکاف‌های زمین در یک سفره آبخوان عبارت‌اند از: ۱- مدل تیر خمشی. ۲- تنش‌های کششی. ۳- کرنش‌های کششی. لی و شن (۱۹۶۹) جابه‌جایی‌های افقی ناشی از فرونشست را بررسی کرده و این جابه‌جایی‌ها را با استفاده از تئوری ساده شده تیر و با نادیده گرفتن تنش‌های برشی مدل کردند. آن‌ها یک سفره آبخوان با لایه‌های خاک تراکم‌پذیر در زیر یک لایه خاکی سفت و سخت در نظر گرفتند. فرض بر این است که ضخامت لایه دوم،  $2h$  است. مطابق این مدل، یک پروفیل فرونشست کاسه شکل منجر به خم شدن لایه خاکی سخت فوقانی خواهد شد. برای چنین عملکردی مانند تیر، لایه بالایی باید از لایه زیرین جدا شود و در صورت بروز هرگونه ترک کششی (شکاف زمین) عمق آن با محور خنثی محدود می‌شود.

ژاچن و هولزر (۱۹۸۲) تئوری ساده شده تیر را برای توضیح در مورد مشاهدات خود از شکاف‌های زمین در بالای مرز یک سنگ بستر توسعه دادند. در این حالت، حداکثر کشش در سطح زمین رخ می‌دهد، بنابراین شکاف زمین در بالای این مرز شکل می‌گیرد. با این حال، حداکثر عمق شکاف‌ها با عمق محور خنثی محدود می‌شود، که این عمق مشخص نیست. شکل‌گیری شکاف زمین، مطابق مدل تیر خمشی، در سطح آغاز شده و به سمت پایین گسترش پیدا می‌کند. با این حال، مشاهده شده که تعداد زیادی از شکاف‌ها در عمق زیاد از سطح زمین ایجاد شده و به سمت بالا گسترش پیدا کرده است. ژاچن و هولزر (۱۹۸۲) بیان کردند که بیشتر شکاف‌های زمین، زمانی تشکیل می‌شوند که کرنش‌های کششی افقی در محدوده  $0.2\% - 0.02\%$  باشند [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

بل (۱۹۸۱) با در نظر گرفتن تغییر مکان‌های افقی و با استفاده از تئوری ساده شده تیر بیان کرد که شکاف‌های زمین از تنش‌های کششی موجود در آبرفت سفره آبخوان تشکیل می‌شوند. تنش‌های کششی باعث تشکیل حفره باریکی شده که با بروز پدیده پایپینگ و نفوذ جریان‌های سطحی این حفرات بزرگ می‌شوند. این پدیده باعث به وجود آمدن شکاف‌های زمین و پیش روی این شکاف‌ها به سمت بالا و انتقال به سطح زمین می‌شود. البته هنوز این موضوع به طور کامل مشخص نیست که چرا افت سطح آب زیرزمینی باعث بروز تنش‌های کششی می‌شود. پیو و لارسن (۱۹۸۲) دریافتند که شکاف‌های زمین در سایت آریزونا در امتدادهای عمودی ناچیز و قابل صرف نظر کردن است و آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکاف‌های زمین باید در اثر کرنش‌های کششی افقی به وجود آمده باشند. اسلاف (۱۹۹۳) پیشنهاد داد که ممکن است پیدایش و شکل‌گیری شکاف‌های زمین در امتداد خطوطی به وجود بیاید که به علت متفاوت بودن نوع خاک، میزان و نرخ فرونشست نیز در آن‌ها متفاوت است. شنگ و همکاران (۲۰۰۳) پارامتر  $R_s$  را به عنوان نسبت تنش کششی بر مقاومت معرفی کردند که در معادله ۱۱۵-۳ نشان داده شده است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$R_s = \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \quad 3-115$$

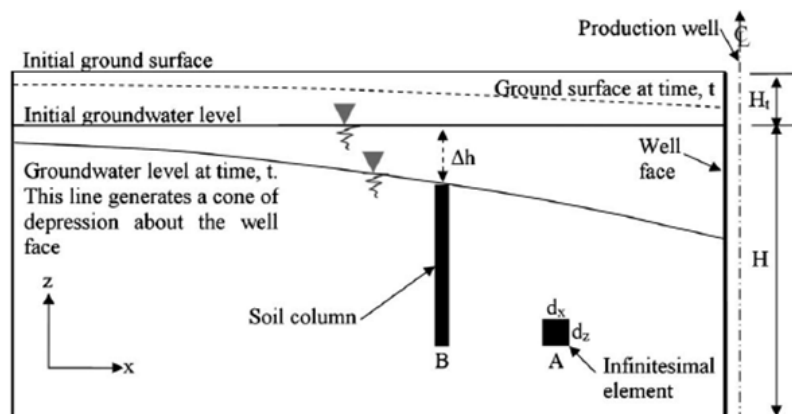
که در آن  $\sigma_3$  حداقل تنش اصلی،  $\sigma_t$  مقاومت کششی و مقادیر تنش‌های کششی  $\sigma_3$  برای پیش‌بینی شکل شکاف‌های زمین منفی است. شنگ و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند، شکاف‌های زمین زمانی شکل می‌گیرند که مقادیر  $R_s$  کمتر

از ۱- باشند. هنوز مشخص نیست که این تنش‌های کششی چگونه بوجود می‌آیند و آیا این تنش‌ها، تنش‌های کل هستند و یا تنش‌های مؤثر. طبق تئوری مکانیک خاک، حداقل تنش کل اصلی یا حداقل تنش مؤثر اصلی نمی‌تواند کمتر از صفر باشد [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

### ۲-۳-۳ مکانیک تشکیل شکاف‌های زمین

برای توصیف کامل وضعیت تنش ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در یک آبرفت آبخوان و ایجاد شرایطی که می‌تواند منجر به تشکیل شکاف‌های زمین شود، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- ۱- یک آبرفت آبخوان ایزوتروپیک و همگن با ضخامت،  $H$ ، با یک لایه آبرفتی دیگر در بالای آن و با ضخامت،  $H_t$ .
- ۲- سطح اولیه آب زیرزمینی در بالای آبخوان واقع شده و به صورت افقی است.
- ۳- آب به صورت ناگهانی از آبرفت آبخوان آزاد شده.
- ۴- وجود یک چاه تولید تا عمق دلخواهی از آبخوان و با نفوذ کامل به لایه آبرفتی بالا از طریق دیواره آن.



شکل ۳-۱۳ سطح مخروطی و المان نامحدود، A و ستون خاکی نامتناهی، B، به کار رفته در مدل‌های کانتینیوم

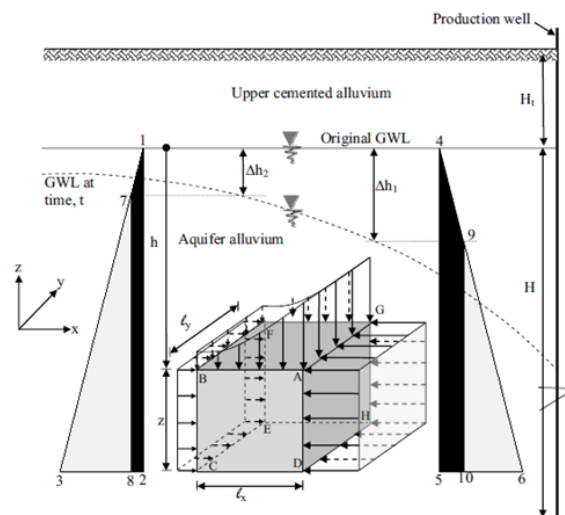
همان‌طور که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است، هنگامی که آب زیرزمینی از چاه و بدون شارژ مجدد استخراج می‌شود، سطح اولیه آب زیرزمینی که به شکل افقی قرار داشت، یک سطح مخروطی را تشکیل داده و به صورت شعاعی از دیواره چاه گسترش پیدا می‌کند. هندسه سطح آب زیرزمینی گذرا برای یک آبخوان غیر همگن، ناهمسانگرد (غیر ایزوتروپ) و با شرایط پمپاژ از چند حلقه چاه در آن دیگر مخروطی نخواهد بود اما به نوعی شکل هارمونیکی خواهد داشت. در مدل‌سازی کلاسیک کانتینیوم تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی، یک المان با حجم نامحدود و یک ستون نامتناهی از آبرفت آبخوان در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۳-۱۳، در این حالت هر المان آبرفتی آبخوان از دیواره خارجی چاه در معرض تغییرات هیدرواستاتیک تنش‌های مؤثر قرار خواهد گرفت که بستگی به تغییرات هد بالا سری آن دارد. به عنوان مثال تغییر در تنش مؤثر ناشی از افت هد آب به اندازه  $\Delta h$  در ستون آبرفتی شکل ۳-۱۳ با معادله ۳-۱۱۶ بیان شده است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\begin{aligned}\Delta\sigma'_{zz} &= \Delta\sigma'_{xx} = \Delta\sigma'_{yy} = \Delta h[\gamma - (\gamma_{sat} - \gamma_w)] \\ &= \Delta h(\gamma - \gamma') = \beta\Delta h\gamma_w\end{aligned}\quad 3-116$$

که در آن  $\Delta\sigma'_{zz}, \Delta\sigma'_{yy}, \Delta\sigma'_{xx}$  تنش های موثر نرمال در راستای  $x, y$  و  $z$  هستند که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.  $\gamma$  وزن مخصوص حجمی،  $\gamma_{sat}$  وزن مخصوص اشباع،  $\gamma'$  وزن مخصوص موثر،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب و  $\beta$  پارامتر وابسته به درجه اشباع و نسبت تخلخل آبرفت آبخوان می باشد که به صورت معادله ۳-۱۱۷ تعریف می شود [۱۸].

$$\beta = \left( \frac{\gamma - \gamma'}{\gamma_w} \right) = \left( \frac{G_s + S_e}{1 + e} \right) - \left( \frac{G_s - 1}{1 + e_0} \right) \quad ۳-۱۱۷$$

که در آن  $G_s$  وزن مخصوص ذرات جامد آبرفتی،  $S$  درجه اشباع،  $e_0$  نسبت تخلخل اولیه،  $e$  نسبت تخلخل فعلی. برای تغییرات یکنواخت هد آب درون آبرفت آبخوان، یک المان با حجم نامتناهی یا یک ستون بی نهایت از آبرفت مفید است. اما برای پروفیل آب زیرزمینی به شکل مخروطی یا برخی تغییرات هندسی دیگر، چنین المان یا ستون آبرفتی عدم تقارن تنش های موجود را در این روش نشان نمی دهد [۱۸].



شکل ۳-۱۴ تنش های روی المان حجمی محدود آبرفت آبخوان

به جای یک المان حجمی نامحدود، یک المان حجمی محدود،  $ABCDEFGH$ ، در عمق،  $h$ ، زیر سطح اولیه آب زیرزمینی فرض می شود. اگرچه استفاده از مختصات قطبی مناسب تر است، اما در اینجا از مختصات مستطیلی استفاده می شود، زیرا در عمل موقعیت چاه ها به گونه ای است که پروفیل های افت مخروطی آن ها غالباً با یکدیگر همپوشانی داشته و بر هم اثر متقابل دارند که منجر به شکل گیری پروفیل های سطح آب زیرزمینی به صورت نامتقارن می شود. ابعاد المان  $l_x \times l_y \times l_z$  بوده و  $l_x$  و  $l_y$  مقادیر طول مشخصه برای تغییرات هد در راستای  $x$  و  $y$  و  $z$  ضخامت آن را نشان می دهد. مقدار طول باید بزرگتر از قطر متوسط ذرات آبرفت باشد، اما باید به اندازه کافی نیز کوچک بوده تا بتوان تغییرات هد را به وسیله آن دست آورد. مقدار طول مشخصه نقش بسیار مهمی در شروع شکل گیری شکاف های زمین دارد که در قسمت های بعدی مورد بحث واقع شده است. توزیع عمودی اولیه تنش های هیدرواستاتیک با خطوط ۳-۱ و ۴-۶ در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است و توزیع عمودی ثانویه تنش های هیدرواستاتیک در زمان،  $t$ ، ناشی از

پمپاژ با خطوط ۳-۷ و ۶-۹ نشان داده می‌شوند. تغییرات ناگهانی تنش موثر فشاری نرمال ( $\Delta\sigma'_{zz2}$ ) در صفحه *BCEF* به طور یکنواخت برای ضخامت  $Z$  توزیع شده است که معادله ۳-۱۱۸ مقدار آن را نشان می‌دهد [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\Delta\sigma'_{zz2} = \beta\Delta h_2\gamma_w \quad 3-118$$

به طور مشابه تغییرات ناگهانی تنش موثر فشاری نرمال ( $\Delta\sigma'_{zz1}$ ) در صفحه *ADHG* به طور یکنواخت توزیع شده است که معادله ۳-۱۱۹ مقدار آن را نشان می‌دهد [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\Delta\sigma'_{zz1} = \beta\Delta h_1\gamma_w \quad 3-119$$

در صفحه، *ABFG*، تنش موثر نرمال به صورت یکنواخت توزیع نمی‌شود. در یال های *BF* و *AG* تغییرات تنش‌های موثر نرمال به ترتیب برابر  $\beta\Delta h_1\gamma_w$  و  $\beta\Delta h_2\gamma_w$  است. تغییرات تنش‌های موثر فشاری نرمال روی صفحه‌های *ABCD* و *GFEH* برابر با مقدار آن در صفحه *ABGF* است. بنابراین، با استفاده از تقارن، ما می‌توانیم تنش‌ها را فقط در صفحات قائم و موازی با *ZX* در نظر بگیریم.

برای نشان دادن اثر این تغییرات ناگهانی تنش موثر (شکل ۳-۱۵) آنها به دو قسمت تجزیه شده‌اند. بارگذاری قسمت اول افزایش تنش موثر  $(\Delta\sigma'_{zz})_I = (\Delta\sigma'_{xx})_I = (\Delta\sigma'_{yy})_I = \beta\Delta h_2\gamma_w$  (شکل ۳-۱۵)، بر روی صفحات *AB*، *BC* و *CD*. بارگذاری قسمت دوم (شکل ۳-۱۵)، تغییر تنش موثر عمودی از صفر در  $x=x_2$  تا مقدار ماکزیمم  $(\Delta\sigma'_{zz})_{II} = (\Delta\sigma'_{zz1} - \Delta\sigma'_{zz2}) = \beta\gamma_w(\Delta h_1 - \Delta h_2)$  در  $x=x_1$  و یک تغییر تنش موثر جانبی فشاری  $(\Delta\sigma'_{xx})_{II} = (\Delta\sigma'_{zz})_{II}$  در  $x=x_1$  بر روی صفحه *AD*. اینها تغییرات تنش مؤثری را ایجاد می‌کنند که باید به وسیله آن تعادل برقرار شود. تعادل بارگذاری قسمت اول نیاز به تغییر تنش موثر  $(\Delta\sigma'_{zz})_I = \beta\Delta h_2\gamma_w$  در صفحه *CD* دارد. همان طور که در (شکل ۳-۱۵) نشان داده شده، بارگذاری قسمت اول منجر به یک تراکم ایزوتروپیک شده است. آبرفت آبخوان تحت این بارگذاری دچار شکست نشده و شکاف و ترکی در آن ایجاد نمی‌شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

برای تعادل بارگذاری قسمت دوم، مفهوم تانسور تنش مؤثر متوسط،  $\sigma'_{ij}$  برای المان حجم محدود استفاده شده است (وود و همکاران ۱۹۷۹). تانسور تنش موثر متوسط به شکل معادله ۳-۱۲۰ تعریف شده است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\bar{\sigma}'_{ij} = \left(\frac{1}{V}\right) \int_V \sigma'_{ij} dV \quad 3-120$$

که  $\sigma'_{ij}$  تانسور تنش موثر در حجم،  $V$ ، است. معادله ۳-۱۲۰ می‌تواند به معادله ۳-۱۲۱ تبدیل شود.

$$\bar{\sigma}'_{ij} = \left(\frac{1}{V}\right) \int_V x_{i,k} \sigma'_{ij} dV \quad 3-121$$

که در آن  $x_{i,k}$  نشانگر مشتق جزئی و  $x$  فاصله از مبدا دلخواه انتخاب شده را نشان می‌دهد.

برای تعادل

$$\sigma'_{kj,j} = 0 \quad 3-122$$

بنابراین معادله ۳-۱۲۲ به معادله ۳-۱۲۳ تبدیل می شود.

$$\bar{\sigma}'_{ij} = \left(\frac{1}{V}\right) \int_V (x_i \sigma'_{kl})_{,k} dV \quad 3-123$$

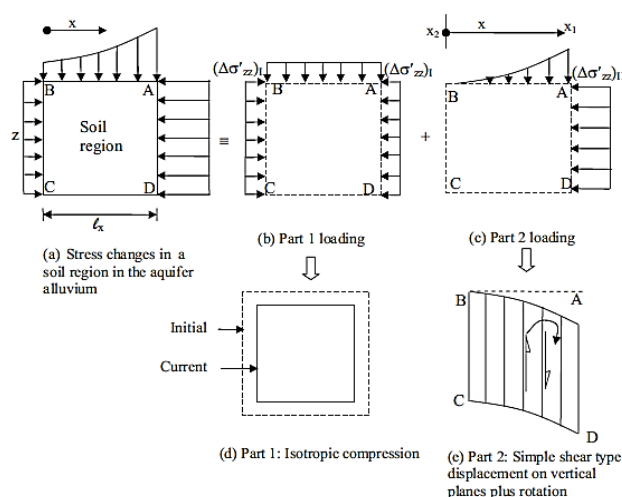
با استفاده از قضیه واگرایی گاوس برای معادله ۳-۱۲۳، معادله ۳-۱۲۴ به دست می آید.

$$\bar{\sigma}'_{ij} = \left(\frac{1}{V}\right) \int_S x_i \sigma'_{kl} n_k dS = \int_S T_j x_i dS \quad 3-124$$

که در آن  $S$  سطح المان حجم محدود و  $T$  کشش می باشد. معادله ۳-۱۲۴ می تواند برای مجموعه ای مجزا از نیروهای مرزی به صورت معادله ۳-۱۲۵ نوشته شود.

$$\bar{\sigma}'_{ij} = \left(\frac{1}{V}\right) \sum_{m=1}^m (T_j^m x_i^m) \quad 3-125$$

که در آن  $m$  و  $n$  شاخص ها و شمارنده جمع هستند.



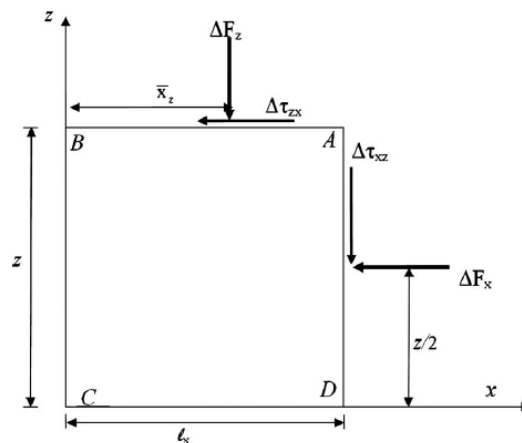
شکل ۳-۱۵ (a) تغییرات تنش ایجاد شده در یک المان حجمی از آبرفت آبخوان ناشی از افت سطح آب زیرزمینی (b) بارگذاری قسمت I (c) بارگذاری قسمت II (d) تراکم ایزوتروپیک (e) برش ساده در صفحات قائم بعلاوه چرخش

کاربرد معادله ۳-۱۲۵ برای توزیع تنش های مؤثر دلخواه ناشی از کاهش سطح آب زیرزمینی در پیوست I ارائه شده است. تغییرات تنش برشی و نیروهای نرمال بر صفحه  $ABCD$  در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. نیروهای نرمال به جای تنش های نرمال نشان می دهند که نیروی های نرمال در صفحه افقی در مرکز نیستند. بنابراین کوپل هایی در

اینجا به وجود آمده‌اند که باید با کوپل‌های نیروهای برشی به تعادل برسند. واضح است که تغییرات تنش‌های برشی در صفحات افقی  $(\Delta\tau_{zx})$  عموماً با این مقادیر در صفحات قائم  $(\Delta\tau_{xz})$  برابر نیستند. بنابراین برای شبیه سازی حالت تنش ناشی از افت متغیر سطح آب زیرزمینی، رویکرد محیط پیوسته Cosserat بهتر و مناسبتر از رویکرد محیط پیوسته Cauchy's برای  $(\Delta\tau_{xz}) = (\Delta\tau_{zx})$  است. تغییرات تنش‌های مؤثر ناشی از افت متغیر سطح آب زیرزمینی را می‌توان به صورت معادله ۳-۱۲۶ نوشت [۱۸].

$$\Delta\sigma'_{ij} = (\delta_{ij}\Delta\sigma'_{ij})_I + (\Delta\sigma'_{ij})_{II} \quad 3-126$$

که در آن  $\delta_{ij}$  دلتای کرونگر و اندیس‌های I و II به ترتیب بارگذاری‌های قسمت اول و دوم را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۱۶ تغییر در تنش‌های برشی و نیروهای نرمال در صفحه ZX المان حجم محدود

تغییرات تنش مؤثر بارگذاری قسمت دوم باعث تغییرشکل‌هایی مشابه برش ساده می‌شود (شکل ۳-۱۵). برش ساده یک تغییر شکل کرنش صفحه‌ای است که در آن یک المان مکعبی در صفحات موازی خود تغییر شکل می‌یابد. دو حالت تغییر شکل برشی ساده امکان پذیر است. حالت اول، شکلی است که در آن برش عمده در صفحات افقی رخ می‌دهد (شکل ۳-۱۷) و دیگری که در آن برش عمده در صفحات قائم رخ می‌دهد (شکل ۳-۱۷). با این حال، برای برش در صفحات قائم، همان طور که در قسمت‌های بعدی نشان داده می‌شود باید چرخش رخ بدهد (دجوسلین د جونگ ۱۹۷۲). کرنش برشی ساده  $\gamma$ ، که گاهی اوقات تحت عنوان کرنش مهندسی نیز شناخته می‌شود مطابق معادله ۳-۱۲۷ است [۱۸].

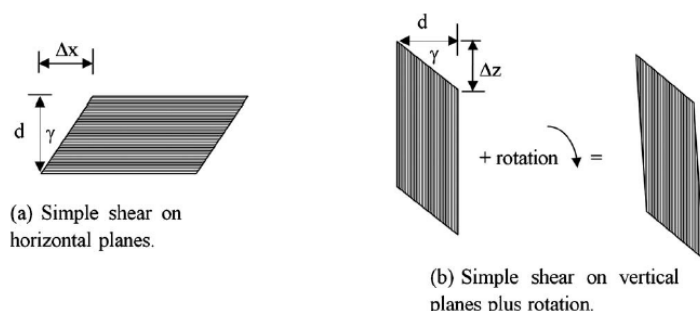
$$\tan \gamma = \frac{x}{d} \quad 3-127$$

که در آن  $x = \Delta x$  تغییر مکان افقی برای برش در صفحات افقی و یا  $x = \Delta z$  تغییر مکان قائم برای برش در صفحات قائم و  $d = z$  برای برش در صفحات افقی و  $d = l_x$  برای برش در صفحات قائم است. برای تغییر مکان‌های کوچک معادله ۳-۱۲۷ را می‌توان به صورت معادله ۳-۱۲۸ نوشت [۱۸].

$$\gamma = \frac{x}{d} \quad 3-128$$



تغییرات تنش موثر بارگذاری قسمت دوم باعث به وجود آمدن برش ساده بر روی صفحات کوچک قائم شده و با فشار لبه فوقانی یک طرف می تواند نسبت به طرف دیگر جابه جا شود. در نظر گرفتن المان حجمی نامحدود یا ستون آبرفتی نامتناهی، تنش های برشی نامتقارن و اعوجاج برش ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی را نمی تواند توجیه کند [Error! Bookmark not defined.]



شکل ۳-۱۷ برش ساده بر روی (a) صفحات افقی (b) صفحات قائم

### ۳-۳-۳ مفاهیم نظری حالت های تنش برای شروع شکل گیری شکاف های زمین

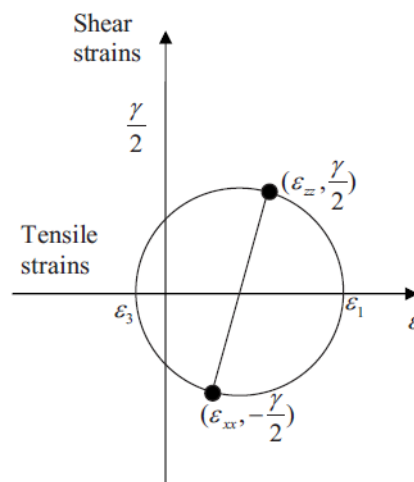
همانطور که در قسمت های قبل گفته شد، بارگذاری قسمت اول منجر به شروع شکل گیری شکاف زمین نمی شود. شکل گیری شکاف زمین به بارگذاری قسمت دوم بستگی دارد. برای بررسی مفاهیم بارگذاری قسمت دوم، پروفیل کاهش و افت مخروطی آب برای یک چاه تولید واحد در یک آبخوان همگن و در زمان  $t$  با یک معادله سهمی  $h_w = \alpha x^2 + h_0$  نشان داده شده است، که  $\alpha$  یک ثابت (واحد  $L^{-1}$ ، طول  $L$ )،  $x$  فاصله جانبی دلخواه از سطح چاه و  $h_0$  تغییر سطح آب زیرزمینی در  $x=0$  است. تغییرات تنش موثر بارگذاری قسمت اول برابر است با  $\Delta\sigma'_{zz} = \Delta\sigma'_{xx} = \Delta\sigma'_{yy} = \beta h_0 \gamma_w$  تغییرات تنش موثر بارگذاری قسمت دوم با استفاده از معادله ۳-۱۲۵ در پیوست II ارائه شده است [۱۸]. [Error! Bookmark not defined.]

#### ۳-۳-۳-۱ حالت های تنش و کرنش

تغییر در تنش های مؤثر ناشی از بارگذاری قسمت های I و II برای پروفیل سطح آب زیرزمینی سهموی انتخابی دلخواه (پیوست II) نشان می دهد که تنش های کششی (کششی جانبی) و به تبع آن هیچ گونه کرنش کششی (کششی جانبی)، ناشی از کاهش سطح آب زیرزمینی در آبرفت آبخوان معرفی نشده است. در نتیجه، وضعیت تنش مندرج در اینجا از مکانیسم های غالب برای شروع شکل گیری شکاف های زمین که بر پایه تنش های کششی یا کرنش های کششی است، پیروی نمی کند. با این حال، در تعریف، کرنش های کششی اجزای کرنش برشی ساده هستند. به عنوان مثال، دایره مور را برای کرنش برشی ساده در دو بعد در نظر بگیرید همانطور که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. کرنش برشی ساده برابر با معادله ۳-۱۲۹ می باشد [۱۸]. [Error! Bookmark not defined.]

$$\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$$

که در آن  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  کرنش های اصلی بزرگتر و کوچکتر هستند. کرنش اصلی کوچکتر منفی است که نشان دهنده کرنش های کششی می باشد اما این برای توصیف شکست یا تشکیل شکاف های زمین کافی نیست زیرا تنها برش بوده و نه کرنش های قائم یا کرنش های جانبی ای که باعث شکل گیری شکاف های زمین می شوند. کرنش های کششی جانبی می توانند یک فاکتور موثر در شکل گیری ترک های زمین باشند، اگر که این ترک ها ناشی از نیروهای جانبی کششی باشند ولی کاهش سطح آب زیر زمینی سبب به وجود آمدن چنین نیروهایی نمی شود [۱۸] **Error! Bookmark not defined.**



شکل ۳-۱۸ کرنش های دایره مور برای برش ساده

## ۳-۳-۳-۲ شکل گیری شکاف زمین و اثرات مقدار طول مشخصه

با توجه به پیوست II، معادلات **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** برش ساده در امتداد صفحات قائم با شرط  $\Delta\tau_{xz} > \Delta\tau_{zx}$  در آبرفت آبخوان غالب خواهد بود که از پیوست II به صورت معادله ۱۶ است [۱۸] **Error! Bookmark not defined.**

$$\frac{\alpha\beta\gamma_w l_x^3}{4z} > \frac{\alpha\beta\gamma_w l_x z}{2} \quad ۳-۱۳۰$$

با در نظر گرفتن طول مشخصه داریم:

$$(l_x)_{cr} = l_x > \sqrt{2}z \quad ۳-۱۳۱$$

که در آن  $(l_x)_{cr}$  طول مشخصه بحرانی است که در آن برش ساده در صفحات عمودی غالب است. اگر طول مشخصه بزرگتر از  $\sqrt{2}$  برابر ضخامت آبرفت آبخوان باشد شکاف های زمین توسعه پیدا نمی کنند. همچنین طول مشخصه بحرانی حداقل فاصله افقی از محل بزرگترین نقطه وقوع فرونشست در یک کاسه فرونشست را تا جایی که احتمالاً اولین شکاف بالقوه زمین شکل می گیرد را نشان می دهد. به عنوان مثال، اگر  $z = H = 100$  متر باشد، احتمالاً شکاف های زمین در

فواصل افقی بیشتر از ۱۴۱ متر از محل بزرگترین نقطه وقوع فرونشست درون یک کاسه فرونشست ظاهر می شوند. زمانی که  $\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{zx}$  باشد، رویکرد محیط پیوسته کوشی در اینجا درست بوده و شکاف های زمین در فاصله ای که با استفاده از معادله ۳-۱۳۲ به دست می آید، رخ می دهد [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$(l_x)_{\tau_{xz}=\tau_{zx}} = l_x > \sqrt{2}z \quad 3-132$$

زمانی که  $\Delta\tau_{xz} < \Delta\tau_{zx}$ ،  $l_x < \sqrt{2}z$  باشد، برش ساده روی صفحات افقی رخ می دهد. بنابراین، شکاف های زمین به صورت صفحات عمودی ناپیوسته، از لحاظ تئوری در فواصل کمتر از  $\sqrt{2}$  برابر ضخامت آبرفت آبخوان ازدیواره چاه رخ نمی دهد. برای توضیح بیشتر در مورد مفاهیم تنش های برشی نامتقارن، تنش های دایره مور برای سه مورد  $l_x = \sqrt{2}z$ ،  $l_x < \sqrt{2}z$  و  $l_x > \sqrt{2}z$ ،  $\alpha = 0.0067 m^{-1}$ ،  $\gamma_w = 9.8 kN/m^3$  و  $\beta = 0.9$  در  $h_0 = 1 m$  نظر گرفته شده است. با افزایش  $l_x$ ، دایره مور به دلیل افزایش تنش های برشی و تنش های مؤثر نرمال بزرگتر شده (شکل ۳-۱۹) و مرکز آن از زیر محور تنش مؤثر نرمال به بالای محور منتقل می شود. وقتی مرکز دایره مور در زیر محور تنش مؤثر نرمال قرار دارد،  $\Delta\tau_{xz} < \Delta\tau_{zx}$ ، و هنگامی که بالای محور تنش مؤثر نرمال قرار دارد،  $\Delta\tau_{xz} > \Delta\tau_{zx}$  می باشد. اگر لغزش در صفحات عمودی، دلیلی برای شروع شکل گیری شکاف زمین باشد، بنابراین تنش برشی  $(\Delta\tau_{xz})_{EF}$ ، برای شروع شکل گیری شکاف زمین مطابق قانون کلمب برابر با معادله ۳-۱۳۳ است [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$(\Delta\tau_{xz})_{EF} = [(\sigma'_{xx})_o + \Delta\sigma'_{xx}] \tan \phi' \quad 3-133$$

که در آن  $(\sigma'_{xx})_o$  تنش مؤثر جانبی اولیه (قبل از برداشت آب های زیرزمینی)،  $(\Delta\sigma'_{xx})$  افزایش تنش مؤثر جانبی،  $\phi'$  زاویه اصطکاک آبرفت آبخوان. تنش مؤثر جانبی اولیه می تواند به صورت  $(\sigma'_{xx})_o = K_0(\sigma'_{zz})_o$  نوشته شود، که در آن  $K_0$  ضریب فشار جانبی زمین در حالت سکون و  $(\sigma'_{zz})_o$  تنش مؤثر قائم اولیه است. بنابراین معادله ۳-۱۳۳ به معادله ۳-۱۳۴ تبدیل می شود [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$(\Delta\tau_{xz})_{EF} = [k_o(\sigma'_{xx})_o + \Delta\sigma'_{xx}] \tan \phi' \quad 3-134$$

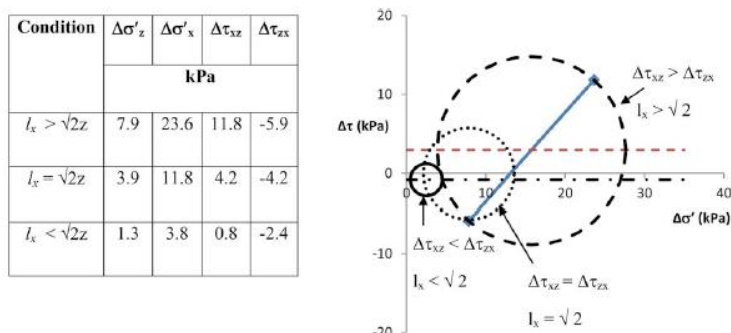
می توان معادلات **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** را برای  $(\Delta\sigma'_{xx})$  و معادله **Error! Reference source not found.** را برای  $(\Delta\tau_{xz})$  به کاربرد تا طول های مشخصه برای انواع پروفیل های سطح آب زیرزمینی پارابولیک (سه موی) که در آن شکاف های زمین شکل می گیرد، به دست آید. با انجام این کار معادله ۳-۱۳۵ به دست می آید [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**

$$\frac{\alpha\beta\gamma_w(l_x^3)_{EF}}{4z} = [k_o(\sigma'_{zz})_o + \beta h_o\gamma_w + \alpha\beta\gamma_w(l_x^2)_{EF}] \tan \phi' \quad 3-135$$

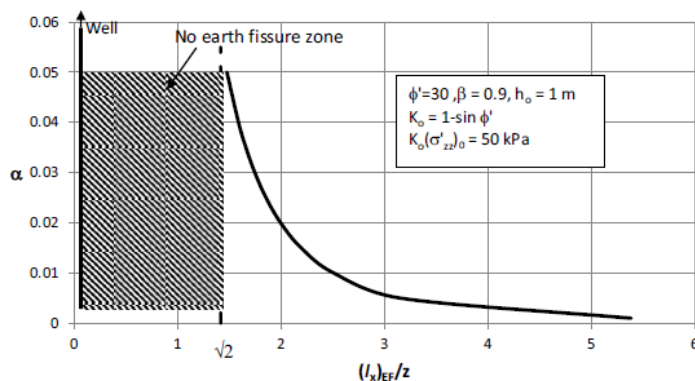
که می تواند به صورت معادله ۳-۱۳۶ ساده شود.

$$(l_x^2)_{EF}[(l_x)_{EF} - \tan \phi'] = \frac{4z}{\alpha} \left[ \frac{k_o(\sigma'_{zz})_o}{\beta\gamma_w} + h_o \right] \tan \phi' \quad 3-136$$

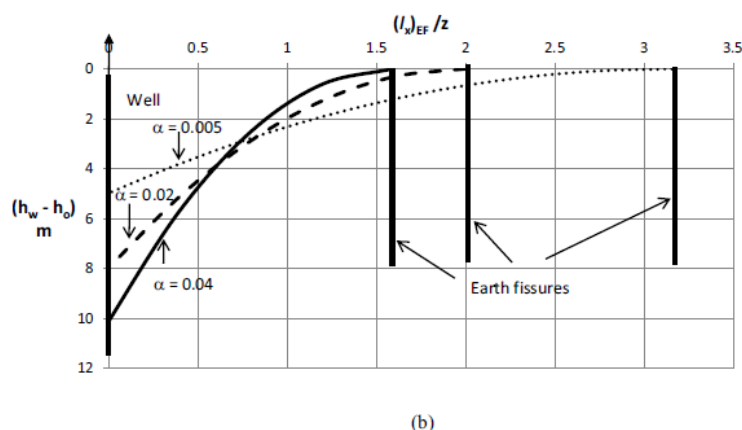
با کاهش  $\alpha$ ، به صورت تئوری فاصله از دیواره چاهی که به نظر می آید شکاف زمین در آن تشکیل شود، افزایش می یابد. هنگامی که  $\alpha=0$  باشد، افت سطح آب زیرزمینی یکنواخت است و در اینجا کانتینیوم کوشی کاربرد داشته و هیچ شکافی در زمین ایجاد نمی شود. حل معادله ۱۳۶-۳ برای مقادیر  $\gamma=9.8 \text{ kN/m}^3$ ،  $\phi'=30^\circ$ ،  $h_0=1 \text{ m}$ ،  $\beta=0.9$ ،  $\sigma'_{zz0}=100 \text{ kPa}$  و  $\alpha=0.005$ ، پروفیل های  $h_w-h_0$ ، در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. مشتق سطح آب زیرزمینی  $h_w-h_0$ ، پروفیل های  $0.02$ ،  $0.04$  در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. با افزایش شیب سطح آب های زیرزمینی در نزدیکی دیواره چاه، فاصله تئوری ای که در آن شکاف زمین تشکیل خواهد شد کاهش می یابد اما این مقدار نمی تواند کمتر از  $\sqrt{2}z$  باشد. شیب سطح آب زیرزمینی کم عمق در مقایسه با شیب های بالاتر، باعث ایجاد شکاف زمین در فاصله های بیشتر از دیواره چاه می شوند. بنابراین مقدار کل افت سطح آب زیرزمینی نیست که برای شکل گیری شکاف زمین مهم است بلکه شیب کاهش سطح آب زیرزمینی اهمیت بیشتری دارد. شیب های بالاتر نشان دهنده آبرفت آبخوان با نفوذپذیری کمتر و نرخ پمپاژ بالاتر است. نرخ پمپاژ متغیر از یک چاه تولید واحد می تواند منجر به شکاف های متعدد و موازی در زمین شود زیرا شیب سطح آب زیرزمینی برای هر نرخ پمپاژ متفاوت خواهد بود [۱۸].



شکل ۳-۱۹ تنش های دایره مور برای مشخصه های طول مختلف



(a)

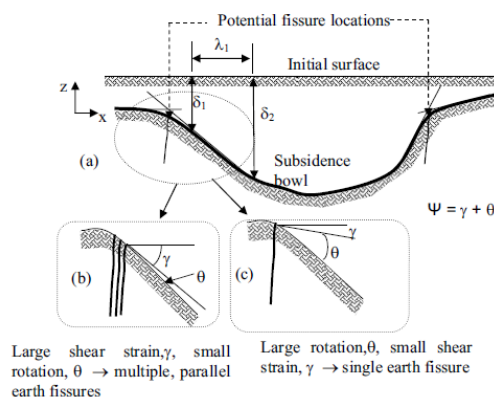


شکل ۳-۲۰ فاصله های تئوری از دیواره چاه با ترک های زمین شکل گرفته براساس پروفیل های آب زیرزمینی

### ۳-۳-۳-۳ تأثیر شرایط مرزی در شکل گیری شکاف های زمین

برش ساده در صفحات عمودی به شدت تحت تأثیر مقاومت برشی آبرفت و شرایط مرزی است. در یک ناپیوستگی موجود مثلاً در نزدیکی سطح تماس آبرفت آبخوان و سنگ بستر یا یک گسل پیش بینی شده، مقاومت برشی سطح تماس معمولاً کم تر از مقاومت برشی آبرفت دست نخورده است. همچنین ممکن است ضخامت آبرفت آبخوان در سطح تماس کوچکتر باشد و در نتیجه مقاومت برشی برای به تعادل رسیدن کوپل های ایجاد شده ناکافی می شود. اکنون چرخش های میکروپلار محدود شده و با چرخش ماکروپلار همزمان می شوند. صفحات شکست عمودی در ناپیوستگی ها و یا نزدیکی آن ها می چرخند و شکاف های زمین را آشکار می کنند. بنابراین، ناپیوستگی های زمین شناسی پیش روی شکاف های زمین را تسهیل می کند. این ناپیوستگی ها استثنائی را برای حداقل طول مشخصه بحرانی ایجاد می کنند. محل شکاف زمین پس از آن به محل قرارگیری این ناپیوستگی های زمین شناسی بستگی دارد به ویژه هنگامی که محل قرار گیری این ناپیوستگی ها در جایی باشد که در آن فاصله افقی از نقطه حداکثر فرونشست کمتر از طول مشخصه بحرانی است. مشاهدات میدانی در آریزونا توسط ساندووال و بارتلت در سال ۱۹۹۱ و در جای دیگر توسط بل و همکاران در سال ۲۰۰۲ نشان دهنده توسعه شکاف های زمین در نزدیکی سنگ بسترهای واقع در عمق کم یا در نزدیکی حاشیه حوضه های آبرفتی یا در مرزهای گسل است. هنگامی که یکی از این شرایط وجود داشته باشد، احتمالاً فقط یک شکاف زمین ایجاد می شود چرا که انرژی اضافی در اثر تغییر شکل برشی ساده و چرخش از بین می رود. با حرکت این شکاف زمین از شکل گیری شکاف های دیگر جلوگیری می شود (شکل ۳-۲۱). وقتی چنین شرایط مرزی وجود نداشته باشد، چندین شکاف موازی می توانند همزمان و یا به تدریج در زمین ایجاد شوند (شکل ۳-۱۲ و شکل

Error! Bookmark not defined.[۱۸](۲۱-۳)



شکل ۳-۳-۳-۴ مکان های احتمالی شکاف زمین و تأثیر مقادیر برش و چرخش در شکل گیری شکاف های واحد و یا چندین شکاف به طور همزمان

#### ۳-۳-۳-۴ شکاف های زمین با یک آبرفت سیمانته شده در بالا

اگر یک آبرفت سیمانته فوقانی را درون یک کاسه فرونشست در نظر بگیریم. آبرفت سیمانته فوقانی تلاش می کند تا پروفیل های تغییر شکل تولید شده ناشی از تغییرات تنش های مؤثر از افت سطح آب زیرزمینی را تثبیت کند. اثر واضح این است که کرنش ها، به ویژه کرنش های برشی و خمشی، در آبرفت سیمانته فوقانی به وجود می آیند. مقادیر واقعی  $\gamma$  و  $\theta$  برای ایجاد شکاف زمین در آبرفت سیمانته فوقانی بستگی به مقاومت برشی سیمان، صلبیت خمشی و میزان تغییر شکل ها و چرخش های رخ داده دارند. آزمایش برش در خاک نشان می دهد که خاک های بسیار سیمانته شده برای رسیدن به خرابی و شکست در مقایسه با خاک هایی که کمتر سیمانته شده اند یا خاک های بدون سیمان بطور قابل توجهی به کرنش های کمتری نیاز دارند (ساریوسیری و ماهوتان ۲۰۰۹). خاک های سیمانی نیز به شکلی شکننده از بین می روند (دچار شکست می شوند). بنابراین، آبرفت سیمانته شده بالایی نسبت به آبرفت بدون سیمان یا آبرفت سیمانی با نسبت کم بیشتر مستعد به وجود آمدن شکاف زمین است. تراکم نامتقارن آبرفت آبخوان مستقل از کرنش برشی ساده می تواند منجر به تشکیل شکاف زمین در آبرفت سیمانته شده فوقانی شود. یکی از این شرایط در اینجا به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۲۲). تحت هر دو شرایط بارگذاری قسمت I و II، آبرفت آبخوان به صورت عمودی و جانبی فشرده می شود. از پیوست II، تنش مؤثر عمودی و تغییرات تنش مؤثر جانبی برای پروفیل سهموی (پارابولیک) سطح آب زیرزمینی به صورت معادله ۳-۱۳۷ و معادله ۳-۱۳۸ می باشد [۱۸].

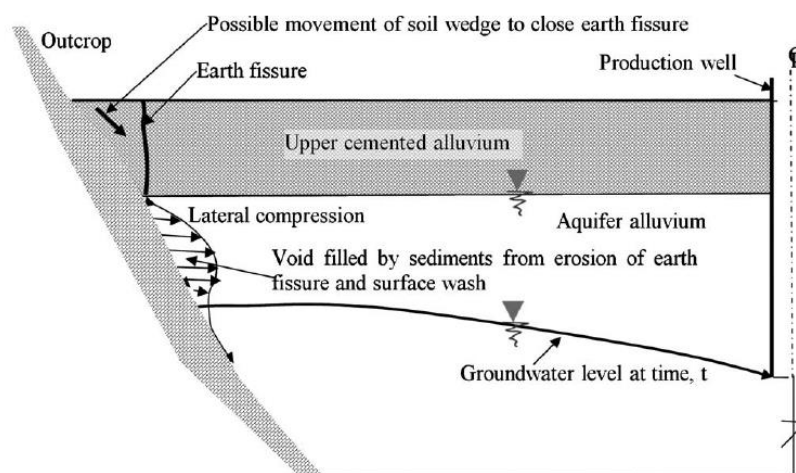
Bookmark not defined.

$$\Delta\sigma'_{zz} = \beta h_o \gamma_w + \frac{\alpha \beta \gamma_w l_x^2}{3} \quad 3-137$$

$$\Delta\sigma'_{xx} = \beta h_o \gamma_w + \alpha \beta \gamma_w l_x^2 \quad 3-138$$

بنابراین، تغییر در تنش مؤثر جانبی بیشتر از تغییر تنش مؤثر قائم طبق  $2\alpha\beta\gamma_w l_x^2/3$  می باشد. میزان فشار جانبی به برش در سطح تماس آبرفت آبخوان و آبرفت سیمانته فوقانی و مدول فشار جانبی بستگی دارد. مشخصات پروفیل فشار جانبی محتمل در آبرفت آبخوان در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. فشار جانبی می تواند باعث گسیختگی در

سطح تماس آبرفت آبخوان و بروز آن در سنگ بستر شود. همانطور که در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است هنگامی که این اتفاق می افتد، شکاف زمین می تواند به سمت بالا گسترش پیدا کند. تنش ها و کرنش ها در ضخامت گسیخته شده آبرفت آبخوان کششی نبوده و فشاری است. جریان های آب سطحی که توسط شکاف زمین متوقف می شوند، می توانند آن شکاف را شسته و مواد شسته شده را به حفره ای که با فشار جانبی آبخوان تشکیل شده است منتقل کنند و این می تواند در سازندهای مستعد فروچاله (sinkhole) و در امتداد شکاف زمین ایجاد شود همان طور که این مساله توسط بل و همکاران در سال ۲۰۰۲ مشاهده شده است. آنها این سازندها را به تنش های کششی نسبت دادند که باعث ایجاد حفره نازک در آبرفت آبخوان شده و سپس با نفوذ آب های سطحی و پدیده پایپینگ این شکاف ها بزرگتر شده اند. در صورت به وجود آمدن یک فاصله در طول عمق شکاف زمین در آبرفت سیمانته فوقانی، گوه آبرفتی مجاور آن می تواند به سمت پایین سنگ بستر حرکت کند که بطور موثر باعث بسته شدن شکاف می شود (شکل ۳-۲۲). بولینگ در سال ۱۹۸۴ باز و بسته شدن شکاف های زمین ناشی از برداشت آب های زیرزمینی در نزدیکی کوه های Picacho در آریزونا را گزارش کرد. بنابراین، یک شکاف زمین می تواند با فرسایش گسترده تر شود و یا می تواند با رسوبات منتقل شده از جریان های سطحی به درون شکاف و یا با حرکت گوه آبرفت بالاتر از آن بسته شود [۱۸].



شکل ۳-۲۲ شکاف احتمالی زمین ناشی از فشار جانبی آبرفت آبخوان

#### ۳-۳-۴ اجرا و پیاده سازی

برای استفاده از مکانیک های توسعه یافته در اینجا برای پیش بینی دقیق فرونشست و شکاف های زمین ناشی از کاهش سطح آب زیرزمینی، حداقل نیاز به یک مدل خاک الاستو پلاستیک، غیرایزوتروپ و داده های با کیفیت بالا است. حداقل اطلاعات مورد نیاز عبارتند از: ۱- تغییرات سطح آب های زیرزمینی در زمان های مختلف در موقعیت دقیق چاه و در فواصل میان آن ها. ۲- فاصله و ارتفاع سنگ بستر. ۳- چینه شناسی آبرفتی (وضعیت و ساختمان لایه های زمین). ۴- پارامترهای مکانی و زمانی مقاومت و تغییرشکل برای آبرفت. در حال حاضر هیچ مدل خاکی وجود ندارد

که بتواند تمام ظرافت‌های زمین شناسی و شرایط آب زیرزمینی را بیان کند تا پیش بینی‌های دقیق از فرونشست و شکل‌گیری شکاف‌های زمین انجام شود. علاوه بر این، جمع‌آوری داده‌های مورد نظر برای مدل سازی دقیق در مقیاس واقعی از نظر عملی غیرممکن و بسیار هزینه بر است. همچنین پیش بینی‌های مدل باید توسط داده‌های میدانی کالیبره و اعتبار سنجی شده تا موثر واقع شود. تأیید و صحت سنجی پیش بینی‌های حاصل از فرمول‌ها و روش‌های توسعه یافته در اینجا مستلزم ابزار دقیق میدانی بزرگ و پایش در یک سایت دست نخورده است. (هیچ شکستگی و شکاف قبلی یا پمپاژ آب زیرزمینی وجود نداشته باشد). داده‌ها و اطلاعاتی از چنین سایتی وجود ندارد. برای کاربردهای عملی، فرمول‌ها و روش‌های ارائه شده در این جا می‌تواند برای ایجاد متدولوژی برای تخمین پتانسیل شکل‌گیری شکاف‌های زمین با استفاده از داده‌های ارتفاع زمین تفسیر شود. علاوه بر این، چنین تفسیری می‌تواند به عنوان بخشی از بهترین روش‌ها و ابزارهای مدیریت آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. تعدادی از ابزارها مانند نقشه برداری توپوگرافی زمین، سیستم موقعیت یابی جغرافیایی (GPS) و عکس‌های هوایی برای ردیابی فرونشست استفاده شده است. از سال ۱۹۹۲ تداخل سنجی رادار روزنه مصنوعی یا InSAR به ابزاری برای نظارت بر فرونشست زمین به صورت منطقه‌ای تبدیل شده است. InSAR یک روش سنجش از دور است که با استفاده از تداخل سنجی فاز امواج ارسال و دریافت به سطوح، امکان ایجاد مدل سه بعدی سطح را فراهم می‌آورد. در این روش از دو جفت تصاویر ماهواره‌ای راداری از دو مدار پی در پی برای ایجاد اینترفروگرام‌ها (واسطه‌ها) استفاده می‌کند. رادار در حال جستجو در ماهواره امواج الکترومغناطیسی را به زمین منتقل می‌کند و امواج برگشتی را ثبت می‌کند. اندازه هر پیکسل یا عکس‌های رادار بسته به ماهواره آن متفاوت است اما از حدود ۲۰ متر در ۲۰ متر تا ۱ متر در ۱ متر متغیر است و اطلاعات مربوط به شدت و مرحله امواج برگشتی را در اختیار دارد. اینترفروگرام‌ها (واسطه‌ها) با مقایسه اختلاف فاز دو تصویر متوالی گرفته شده در یک نقطه روی سطح زمین در طول دو مدار ایجاد می‌شوند. اصلاحات مختلفی (مثلاً برای شرایط جوی) روی تصاویر اعمال می‌شود. دقت اندازه گیری تغییر مکان‌های قائم در حدود  $\pm 5$  میلی‌متر است. فرونشست از InSAR یک مقدار مطلق نیست و یک مقدار نسبی بین دو دوره مداری است [۱۸].

سوالی که پیش می‌آید این است که چگونه می‌توان مکانیک تشکیل شکاف‌های زمین که در این قسمت ارائه شده را برای اندازه‌گیری‌های توپوگرافی زمین اعمال کرد؟ همه این اندازه‌گیری‌ها برای پیش بینی پتانسیل شکل‌گیری شکاف‌های زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی انجام شده است. در ابتدا یک سطح افقی که پروفیل عمودی تغییر شکل‌های ناشی از افت سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد (مطابق شکل ۳-۲۱) فرض می‌شود. این پروفیل یک برش مقطع از یک کاسه فرونشست است که معمولاً این فرونشست ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی می‌باشد. با توجه به مکانیک ارائه شده در این قسمت برای شکل‌گیری شکاف‌های زمین، مقدار شیب کاسه فرونشست، ترکیبی از کرنش برشی ساده برای صفحات عمودی شکست و چرخش است. بدین ترتیب:

$$\tan \Psi = \tan(\gamma + \theta) = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\lambda_1} \quad 3-139$$

که در آن  $\Psi$  شیب متوسط کاسه فرونشست و  $\delta 1$  و  $\delta 2$  نشست‌های قائم در طول افقی سطح زمین،  $\lambda_1$ ، درون کاسه فرونشست است. برای تغییرات زاویه ای کوچک، معادله ۳-۱۳۹ می‌تواند به صورت معادله ۳-۱۴۰ بیان شود.



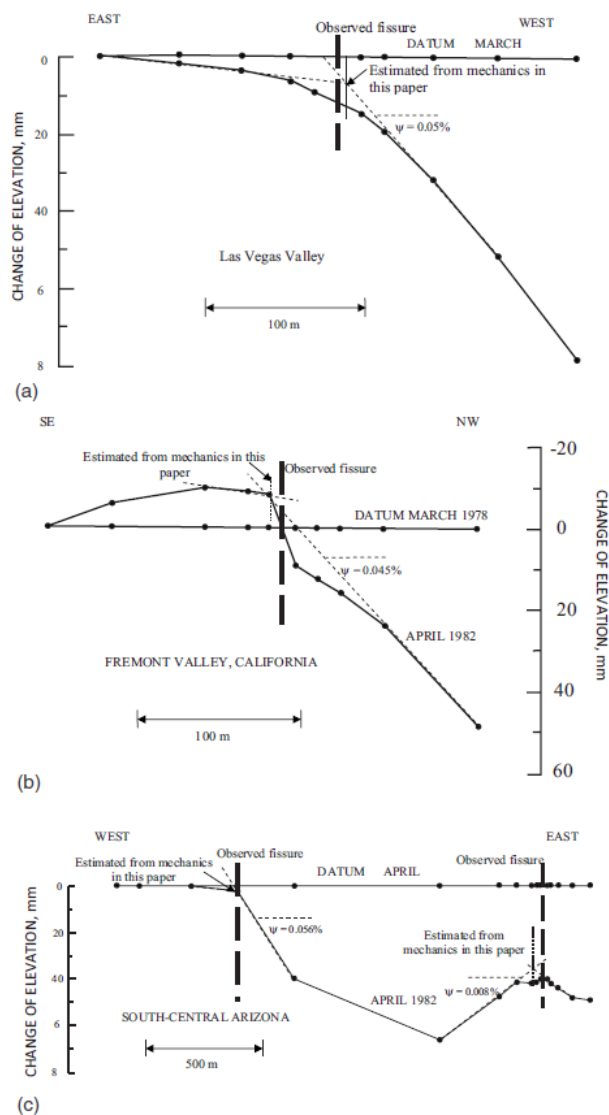
$$\Psi = (\gamma + \theta) = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\lambda_1}$$

برای یک کاسه فرونشست بدون هیچگونه ناپیوستگی، مقدار  $\lambda_1$  باید تقریباً برابر یا بیشتر از طول مشخصه بحرانی باشد. بنابراین شیب  $\Psi$  باید برای طول قابل توجهی از کاسه فرونشست در نظر گرفته شود و این مقدار برای شیب های موضعی تعبیر نشود. احتمالاً اولین شکاف زمین درست در نزدیکی حاشیه کاسه فرونشست از برش در صفحات عمودی و چرخش ظاهر می شود. یک مکان تقریبی برای اولین شکاف، نقطه ماکزیمم منحنی در نزدیکی لبه بالایی است. این مکان را می توان بالاترین نقطه تندترین شیب (و نه شیب تند موضعی) در کاسه فرونشست و در محل تقاطع مماس های منحنی، همان طور که در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است، تخمین زد. اگر مقدار برش غالب باشد، شکاف های موازی در زمین به صورت مقارن ظاهر می شوند. این شکاف ها مویی و باریک و تقریباً در صفحات عمودی ناپیوستگی ها هستند. اگر مقدار چرخش غالب باشد، فقط یک شکاف زمین ممکن است در نزدیکی لبه شکل بگیرد. زیرا انرژی حاصل از چرخش و برش اضافی توسط شکاف و از طریق چرخش بزرگتر (macrorotation) از بین می رود. علاوه بر فرسایش ناشی از نفوذ آب های سطحی درون این شکاف ها، از چرخش و برش اضافی نیز این شکاف ها بیشتر باز می شوند. جدا کردن سهم برش از سهم چرخش با اندازه گیری ساده شیب کاسه فرونشست دشوار است. به طور معمول یک کاسه فرونشست گسترده و پهن نسبت به یک کاسه فرونشست باریک و محدود نشان دهنده یک جزء چرخش بزرگتر است، زیرا بازوی لنگر نیروی عمودی بزرگتر خواهد بود. برای نشان دادن کاربرد عملی مکانیک های ارائه شده در اینجا، داده های مربوط به ارتفاع زمین گزارش شده توسط هولزر ۱۹۸۴ برای سه موقعیت مکانی شکاف زمین - یکی در دره لاس وگاس دره نوادا، دره فریمنت کالیفرنیا و جنوب مرکزی آریزونا - ارزیابی می شوند. این کار به عنوان تأیید و صحت سنجی فرمول و روش توسعه داده شده در اینجا در نظر گرفته نشده است بلکه می تواند به عنوان مثالی در مورد چگونگی استفاده از این فرمول ها به همراه اندازه گیری های توپوگرافی زمین، برای تخمین پتانسیل شکل گیری شکاف - های زمین مورد استفاده قرار گیرد. تفسیر کنونی از شروع شکل گیری شکاف زمین در حرکات کششی افقی در مرکز کاسه فرونشست و یا در نزدیکی لبه ها و حاشیه آن است (هولزر ۱۹۸۴).

هولزر و پمپیان (۱۹۸۱) تغییر مکان های افقی بین نقاط علامت گذاری شده با فاصله ۲۰ تا ۳۰ متری در سراسر شکاف های زمین را اندازه گیری کردند و کرنش های کششی را (کشش در جهت افقی) با تقسیم تغییر مکان های افقی بر فاصله ی بین دو نقطه علامت گذاری شده محاسبه کردند. آنها میانگین کرنش های کششی سالانه را بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ درصد متغیر اعلام کردند. البته این برآوردها از کرنش های کششی قابل بحث است زیرا به فاصله نقاط علامت گذاری شده در طول شکاف های زمین بستگی دارد. به عنوان مثال، اگر شکاف زمین ۲۰ میلی متر به صورت افقی حرکت کند، کرنش های کششی ۰/۱٪ برای فاصله گذاری های ۲۰ متری و ۰/۰۵٪ برای فاصله گذاری های ۴۰ متری محاسبه خواهد شد. هولزر (۱۹۸۴) گزارش کرد که میانگین کرنش های کششی سالانه اندازه گیری شده از شکاف های زمین با میانگین کرنش های کششی محاسبه شده با استفاده از مدل تیر خمشی همخوانی دارد. کرنش های کششی متوسط سالانه اندازه گیری شده برای شکاف های زمین است که در حال حاضر وجود دارند و به جای تغییر مکان های شروع شکل گیری شکاف بازتابی از تغییر مکان های پس از شکل گیری شکاف هستند. فرمول های موجود در این بخش نشان می دهد که شیب کاسه فرونشست بیشتر از تغییر مکان های افقی کششی آبرفت در تفسیر شکل گیری شکاف های زمین اهمیت

دارد. پروفیل تغییرات برای سه سایت نام برده شده در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است. شیب محاسبه شده کاسه‌های فرونشست در دره لاس وگاس (۰/۰۵٪)، دره فریمنت (۰/۰۴۵٪) و جنوب آریزونا مرکزی بین (۰/۰۱۷٪ - ۰/۰۰۸٪) می‌باشد. موقعیتی برای پتانسیل شکل‌گیری شکاف زمین می‌تواند به عنوان تقاطع شیب بالا و پایین لبه‌های کناری تخمین زده شود. برای هر سایت، موقعیت برآورد شده شکاف با مکان‌های اندازه‌گیری شده در محل مقایسه می‌شوند و تطابق بسیار خوبی میان آن‌ها برقرار است. با این حال، داده‌های مربوط به ارتفاع زمین پس از شکل‌گیری شکاف‌های زمین بدست آمده است، بنابراین مکان‌های تخمین زده شده در این سایت‌ها، مکان‌هایی است که در حال حاضر شکاف‌ها در آن وجود دارند ولی بهتر است برای پیش بینی، این داده‌ها قبل از شکل‌گیری شکاف‌ها بدست آمده باشند. بر اساس مکانیک ارائه شده در این بخش به نظر می‌رسد که این شکاف‌های زمین در درجه اول بر اثر چرخش شکل می‌گیرند. در این حالت، فرونشست بیشتر شیب کاسه فرونشست را افزایش می‌دهد. شکاف زمین موجود به عنوان یک مفصل است که انرژی کوپل‌های به وجود آمده را از بین می‌برد. شیب افزایش یافته باعث می‌شود محل پیش بینی شده شکاف زمین تقریباً در همان جایی قرار داشته باشد که پس از شکل‌گیری مشاهده می‌شود. اگر شیب‌های محاسبه شده کمتر از شیب شکاف‌های زمین در شروع شکل‌گیری آن‌ها در این مکان‌ها باشد، مکان‌های تخمین زده شده برای شکاف زمین به سمت لبه و حاشیه کاسه فرونشست و دور از موقعیت شکاف‌های موجود قرار می‌گیرد و به نظر می‌رسد که این مورد برای شکاف زمین در دره فرامنت اتفاق افتاده است (شکل ۳-۲۳). با این حال، بالازدگی در جنوب شرقی شکاف زمین رخ داده است و مکانیک‌های توسعه یافته در این قسمت اثر بالازدگی را در نظر نمی‌گیرند.

شیب‌های کاسه‌های فرونشست که از شکل ۳-۲۳ محاسبه شده است، کرنش‌هایی برای شروع شکاف‌های زمین نیستند بلکه کرنش‌های ناشی از حرکت این شکاف‌ها هستند. با این حال این کرنش‌ها در مقادیر کرنش برشی شکست در آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی ماسه‌های سیمانته شده گچی مشاهده شده است. مقدار واقعی  $\psi$  برای شروع شکل‌گیری شکاف‌های زمین بستگی به مقاومت سیمانتاسیون، سختی برشی و صلبیت خمشی آبرفت سیمانی فوقانی دارد. به نظر می‌رسد شیب محاسبه شده برای دره لاس وگاس و جنوب شرقی آریزونا برای شروع شکل‌گیری شکاف‌های زمین در این مناطق مقادیر بالایی هستند (بالاتر از مقادیر واقعی) [۱۸]. **Error! Bookmark not defined.**



شکل ۳-۲۳ مقایسه محل تخمین زده شده برای شکاف زمین از مکانیک ارائه شده در این بخش با شواهد نظری در سه سایت (a) لاس و گاس (b) فریمونت (c) جنوب آریزونا مرکزی

## ۴ بررسی میزان آسیب پذیری فونداسیون سازه های انتقال و فوق توزیع از مقدار فرونشست زمین

#### ۴-۱-۱ مقدمه

خطر فرونشست زمین در ایران، شریانهای حیاتی کشور، از جمله خطوط انتقال و فوق توزیع نیرو را به شدت تهدید میکند. در گزارشهای پیشین مربوط به مراحل ۱ و ۲ این پروژه، سوابق این خرابی ها بررسی شد و همچنین یک رویکرد تحلیلی با در نظر گرفتن پارامترهای ژئولوژیک، ژئوتکنیک، هیدروژئولوژی و نیز اطلاعات دورسنجی جهت پیش بینی و سنجش نرخ فرونشست زمین ارائه شد.

در این گزارش، با انجام یک سری مطالعات با رویکرد سازه ای، ابتدا سازه های بحرانی خطوط انتقال در برابر خطر فرونشست شناسایی شده اند که در این بین تاثیرپذیری دکل های مشبک و تونل های انتقال نیرو از خطر فرونشست زمین، از سایر موارد بیشتر تشخیص داده شده است. سپس با انجام مطالعات پارامتریک بر روی عواملی چون فاصله دکل ها، سختی زمین، زاویه دکل ها، قطر تونل و غیره، میزان خطر پذیری دکل های مشبک و تونل های انتقال نیرو با عنایت به میزان نشست پی و اضافه نیروی ایجاد شده در اعضای سازه ای ناشی از فرونشست زمین بررسی شده و با توجه به توصیه های آیین نامه ای، متون فنی و قضاوت مهندسی، حدود عملکرد ایمن این سازه ها مشخص شده اند. همچنین برای بررسی اثر فرونشست بر پست های انتقال نیرو، توصیه هایی ارائه شده است.

#### ۴-۲ انتخاب سازه های بحرانی خطوط انتقال و فوق توزیع در برابر فرونشست زمین بر مبنای شواهد و قرائن خرابی های گذشته و تعیین معیارهای عملکردی آنها بر اساس استانداردها و مستندات مربوطه موجود

##### ۴-۲-۱ مقدمه

پیشینه وقوع سوانح طبیعی بیش از قدمت تاریخ بشر است. بسیاری از جوامع در مقابل سوانح طبیعی آسیب پذیر هستند، اما میزان تأثیر پذیری آن ها از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. در کشور ایران پس از زلزله، سیلاب و خشکسالی، پدیده فرونشست را می توان یکی از مهم ترین، خطرناک ترین و شایع ترین مخاطرات به شمار آورد و بسیاری از شهرها تحت تأثیر فرونشست قرار دارند. با توجه به محدوده خطر فرونشست که در فضای مسکونی، تأسیساتی و زیرساختی شهر است، خطرپذیری ناشی از پدیده فرونشست و تحلیل آن به منظور اقدامات پیشگیرانه و آمادگی، ضرورت می یابد؛ به ویژه که وقوع این پدیده در مناطقی با تراکم سازه ای و جمعیتی که با توسعه فیزیکی نامناسب و در مواردی ناموزون همراه است، درجات بالایی از خطرپذیری را رقم می زند.

با افزایش روزافزون جمعیت و به تبع آن افزایش استفاده از منابع انرژی، تامین منابع لازم و انتقال آنها به مناطق دور و نزدیک، تامین راندمان بهتر و کاهش افت انرژی اهمیت بسیاری پیدا کرده است. هر شبکه انتقال نیروی گسترده را می توان شامل بخش های تولید، انتقال، تبدیل، توزیع و مصرف دانست. از مهم ترین روش های انتقال انرژی دکل ها و

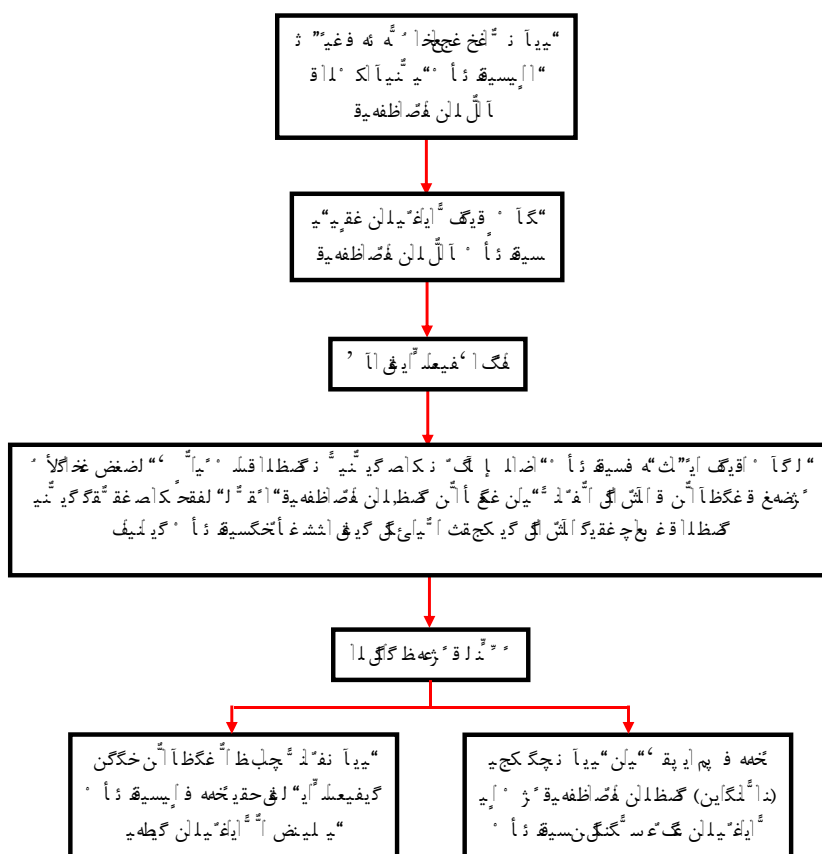
تونل های انتقال نیرو را می توان نام برد. وظیفه ی این خطوط انتقال انرژی الکتریکی از نقاط تولید به نقاط مصرف می باشد و در واقع این خطوط شریان حیاتی صنعت برق است.

یکی از مهم ترین دلایل اولیه ایجاد خسارت در سازه های انتقال نیرو، بلایای طبیعی و به خصوص فرونشست خاک می باشد که شناخت و درک میزان خطرپذیری این سازه ها تحت فرونشست می تواند زیرساخت مناسبی از منابع و اطلاعات را برای مدیران و مجریان در راستای پیشگیری از فاجعه فراهم آورد [۱۹۲].

در این فصل به بررسی روش پژوهش، فرونشست و تاثیر آن بر سازه های انتقال نیرو و انتخاب بحرانی ترین سازه تحت اثر این پدیده، تبیین چهارچوب تحقیق، انتخاب نرم افزار مناسب به منظور مدل سازی دقیق پدیده فرونشست و معرفی پارامتر سازه ها و مصالح مورد بررسی، پرداخته می شود.

## ۴-۲-۲ روش شناسی پژوهش

روند انجام این پژوهش به صورت شکل ۴-۱ خلاصه شده است:



شکل ۴-۱ مراحل انجام پژوهش

## ۴-۲-۳ فرضیات لحاظ شده و حدود کاربرد این پژوهش

در ابتدا لازم است تاکید شود که در این گزارش صرفا تلاش شده تا روشی جهت انجام آنالیزهای سازه ای، به

منظور بررسی اثر فرونشست بر سازه های صنعت برق ارائه شود. روش استفاده شده در این پژوهش در خصوص نحوه مدلسازی فرونشست خاک، نحوه بکارگیری پارامترهای ژئوتکنیکی و سازه ای و روش برخورد با معیارهای کنترل کننده (نشست پی و ایجاد اضافه تنش در اعضای سازه ای)، برای تمام پژوهشهای عملی و کاربردی و تحقیقاتی قابل پیروی است. اما از آنجا که ارائه این روش ها، در این گزارش، با ارائه یک مدلسازی بر روی دکلهای خط انتقال و تونل های انتقال و با اتخاذ فرضیاتی ساده کننده صورت گرفته، باید توجه کرد که به منظور بررسی اثر فرونشست بر هر خط انتقال نیرو، باید حتما مشخصات واقعی سازه های آن خط دقیقا مدلسازی شود تا اثر فرونشست بر سازه های آن خط به دست آید. همچنین یادآور میشود که معیارهای حدود عملکردی سازه های انتقال که در فصل آخر این گزارش به آنها اشاره شده، میتواند جهت اخذ تصمیمات اولیه مدیریتی مد نظر قرار گیرد، اما برای نیل به اعداد دقیقتر، باید حتما مدلسازی برای هر خط انتقال نیرو (که رفتار سازه های آن در اثر فرونشست مد نظر است)، با پارامترهای واقعی سازه ای و ژئوتکنیکی مختص آن خط انجام شود.

در این گزارش فرضیات زیر جهت انجام مدلسازی ها لحاظ شده است:

- ۱- کابلهای هادی بین دکلهای انتقال نیرو از نوع کرلو لحاظ شده است.
- ۲- سازه دکلهای مدل شده در همه حالات مدلسازی، با شکل و المان بندی یکسان و ثابت لحاظ شده اند.
- ۳- در مدلسازی خط، اتصال کابلها به دکلهای بدون مدلسازی مقرر شده صورت گرفته است.
- ۴- اصل تجميع آثار قوا بر سازه های مدلسازی شده معتبر فرض شده و رفتار سازه های مدل شده، خطی فرض شده است.

۱- فرض شده که سازه های مدل شده در برابر تمام ترکیب بارهای محتمل در طول عمر خود، ایمن بوده و در این گزارش، صرفا اثر فرونشست زمین بر وضعیت این سازه ها، با در نظر گرفتن ظرفیت باقیمانده سازه ای آنها پس از اعمال بحرانی ترین ترکیب بارگذاری وارده بر این سازه ها، بررسی شده است.

توجه: فرضیات مذکور، به جهت "ساده سازی" روند مدلسازی ها صورت گرفته است. این فرضیات عمدتا مبتنی بر برخی حالات خاص و البته مبتنی بر موارد عملی در طراحی "اولیه" دکل ها صورت گرفته است. هدف این گزارش صرفا نشان دادن روش انجام تحلیل ها و پیاده سازی مفاهیم اصلی در مدلسازی اثر فرونشست زمین بر سازه های خطوط انتقال است و در مدلسازی یک خط واقعی در یک حالت خاص، باید آنچه واقعا وجود دارد مدل شود. اتخاذ این فرضیات عمدتا منجر به دستیابی به نتایج محافظه کارانه میشود.

#### ۴-۲-۴ فرونشست زمین

یکی از مهم ترین پدیده هایی که در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی اتفاق می افتد، فرونشست زمین می باشد. بنا به تعریف یونسکو، فرونشست عبارت است از فروریزش و یا نشست سطح زمین که به علت های متفاوتی در مقیاس بزرگ روی می دهد. به طور معمول این اصطلاح به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می تواند با بردار اندک افقی

همراه باشد، گفته می شود. این تعریف، پدیده هایی همچون زمین لغزش ها را به دلیل اینکه حرکت آنها دارای بردار افقی قابل توجهی است و همچنین نشست در خاک های دستی را که دارای مکانیسم متفاوتی می باشد را شامل نمی شود.

پدیده فرونشست که از آن به عنوان مرگ پنهان خاک یاد می شود، پدیده ای خزنده و کند بوده که در درازمدت منجر به از بین رفتن سکونتگاه های بشری و زیرساخت های آنها می شود. این پدیده با ایجاد تغییر در وضعیت مورفولوژیکی مناطق، می تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در خصوصیات هیدرولوژیکی آنها شود.

عوامل متعددی باعث ایجاد این پدیده می شوند از جمله عملیات انسانی نظیر برداشت آب زیرزمینی و نفت و گاز، برداشت و استخراج مواد معدنی، زمین های کشاورزی، ابنیه های بزرگ و صنعتی، آب شدگی یخ ها و تراکم نهشته ها، حرکت آرام زمین و خروج گدازه، ریزش سازه های زیرزمینی مانند تونل ها و ایجاد حفره ها در اثر انحلال لایه های آهکی یا گچ و نمک [۱۹۲].

#### ۴-۲-۵ سازه های انتقال نیرو

خطوط انتقال نیرو تأسیساتی حیاتی بوده که وظیفه ای انتقال انرژی الکتریکی به نقاط دور و نزدیک را بر عهده دارند. نیروی برق توسط دو نوع سازه انتقال می یابد: خطوط انتقال هوایی و خطوط انتقال زیرزمینی.

خطوط انتقال هوایی نوعی از خطوط انتقال است که در آن از دکل برق و تیر برق برای نگه داشتن کابل های هادی بالاتر از سطح زمین استفاده می شود. از آنجایی که در این گونه خطوط از هوا به عنوان عایق کابل ها استفاده می شود این روش انتقال یکی از کم هزینه ترین و رایج ترین روش های انتقال برق است. این خطوط شامل دکل های انتقال نیرو و کابل های هادی متصل به آن ها و پست های انتقال نیرو می شوند.

خطوط انتقال زیرزمینی جایگزین کابل های هادی متصل به دکل های انتقال نیرو می باشد که برق یا مخابرات را توسط کابل های زیرزمینی تأمین می کند. این خطوط که شامل تونل های انتقال نیرو است برای احداث نیازمند فناوری پیشرفته تری می باشد. احتمال قرارگیری خطوط انتقال نیروی زیرزمینی در معرض رعد و برق، بادهای شدید، برف سنگین یا طوفان های یخی نسبت به خطوط انتقال نیروی هوایی، کمتر است و به دلیل زیرزمین بودن منظره را تحت تاثیر قرار نمی دهد. خطوط انتقال زیرزمینی هزینه ای اولیه برای انتقال نیروی بیشتری دارد اما در طول عمر کابل های انتقال هزینه عملیاتی کاهش می دهد.

پست الکتریکی ایستگاهی فرعی است که در مسیر تولید، انتقال یا توزیع انرژی الکتریکی، ولتاژ را به وسیله ترانسفورماتور به مقادیر بالاتر یا پایین تر تغییر می دهد و حداقل دو خط انتقال را به هم متصل می کند. انواع پست را از نظر کارکرد و ولتاژ به ۴ دسته تقسیم می شوند:

۱. پست انتقال (فوق توزیع): وظیفه پست انتقال (یا فوق توزیع) اتصال ۲ یا چند خط انتقال است. ساده ترین حالت زمانی است که ۲ خط دارای ولتاژ یکسان هستند.

۲. پست توزیع: وظیفه یک پست توزیع، تحویل گرفتن توان از سیستم انتقال و تحویل آن به سیستم توزیع است.

از نظر اقتصادی و ایمنی، وصل مصرف کننده ها به طور مستقیم به شبکه انتقال به صرفه نیست؛ بنابراین پست توزیع، ولتاژ را تا میزانی مناسب برای مصرف کننده ها کاهش می دهد.

۳. پست جمع کننده: در روش های تولید پراکنده مانند استفاده از انرژی بادی، ممکن است به پست جمع کننده نیاز باشد. این پست ها تا حدودی شبیه پست های توزیع هستند با این تفاوت که رانش توان معکوس است؛ یعنی از سمت توربین های بادی به سمت شبکه انتقال.

۴. ایستگاه های سویچ: یک ایستگاه سویچ، به پستی اطلاق می شود که ترانسفورماتور ندارد و تنها در یک سطح ولتاژ عمل می کند. ایستگاه های سویچ گاهی به صورت ایستگاه های جمع کننده و

توزیع کننده ظاهر می شوند. گاهی به منظور سویچ جریان پشتیبان خطوط موازی در هنگام بروز خطا مورد استفاده قرار می گیرند.

احداث پست های انتقال نیازمند فضای مناسب و در نظر گرفتن اثرات محیط زیستی آن شامل زهکشی، آلودگی صوتی و ترافیک می باشد.

تونل های انتقال نیرو توانایی انتقال نیرو با ولتاژ بالا را داشته و میدان الکترومغناطیسی کمتری نسبت به خطوط هوایی انتقال نیرو ایجاد می کند. این تونل ها همچنین احتمال آتش سوزی پایین تری داشته اما هزینه احداث، مراقبت و بهره برداری زیادی دارد و مدت زمان پیدا کردن خرابی، دسترسی و تعمیر آن بسیار بیشتر از خطوط هوایی انتقال نیرو می باشد. تونل های انتقال نسبت به حرکات زمین در معرض خطر بیشتری هستند.

دکل ها یکی از مهم ترین اجزای خطوط انتقال می باشد که نقشی اساسی در برق رسانی ایفا می کنند. هر دکل موجود در یک خط انتقال وظیفه دارد تا وزن سنگین هادی ها را تحمل کند و آن ها را در ارتفاع مناسب از زمین نگه دارد و بتواند در برابر بلایای طبیعی مقاومت داشته باشد تا خراب نشود.

دکل های انتقال نیرو به دو دسته ی دکل های مشبک<sup>۱</sup> و دکل های تلسکوپی (تک پایه) تقسیم می شوند. دکل های تلسکوپی فضای کمتری اشغال کرده و در وسط بلوارها قابل نصب می باشند. در مقابل دکل های مشبک قوی تر و ارزان هستند و فضای بیشتری را اشغال می کنند و ارتفاع بیشتری دارند. دکل ها از لحاظ کاربرد به دو دسته ی دکل های آویزی<sup>۲</sup> و زاویه ای<sup>۳</sup> تقسیم می شود. هرگاه مسیر خط انتقال نیرو مستقیم باشد و یا انحرافات ناچیزی داشته باشد، دکل های آویزی مورد استفاده قرار می گیرد. به این نوع دکل ها به دلیل قرار گرفتن در مسیر مستقیم، دکل های عبوری<sup>۴</sup> نیز گفته می شود. گاهی نیز به دلیل شرایط توپوگرافی محل نصب دکل لازم است تا مسیر خط به چپ یا راست منحرف گردد. به عنوان مثال اگر در مسیر کوهستانی دکل گذاری انجام شود، مسیر دارای پیچ و خم می باشد که در آنجا

---

<sup>1</sup> Lattice Towers

<sup>2</sup> Suspension Towers

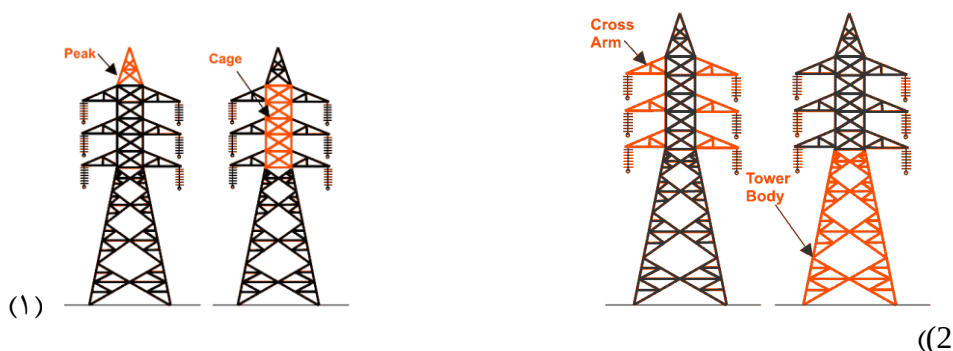
<sup>3</sup> Tension Towers

<sup>4</sup> Tangent Towers



می بایست مسیرها را به صورت خطوط شکسته به هم متصل شود که در نقطه ای انحراف از دکل های زاویه ای استفاده می شود. این دکل ها از لحاظ بارگذاری و آهن آلات مصرفی نسبت به دکل های میان مسیری آویزی سنگین تر می باشد. لازم به ذکر است دکل های انتهایی<sup>۱</sup> که در انتهای خط انتقال یا مناطق خاص استفاده می گردد، به دلیل تحمل نیروهای یک طرفه، از نوع دکل های کششی با بیشترین زاویه می باشند. اجزای مختلف یک دکل انتقال نیرو عبارتند از: قله دکل، بازوی نگه دارنده دکل، تیر نگه دارنده دکل، قفسه سینه دکل، بدنه دکل، پایه ی دکل، مونتاژ صفحه و پیچ پایه دکل و پی.

دکل مورد بررسی در این تحقیق از نوع دکل های مشبک بوده که در مناطق خارج شهری و دشت ها که بیشتر در معرض خطر فرونشست هستند، مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۲-۴ اعضای مختلف یک دکل انتقال نیرو: (۱) قفسه سینه و قله؛ (۲) بدنه و بازوی نگه دارنده [۱۹۳]

#### ۱-۵-۲-۴ سوابق خرابی های ناشی فرونشست بر سازه های صنعت برق در ایران و جهان

شدت فرونشست در برخی دشت های ایران از جمله تهران دست کم ۹۰ برابر بیشتر از بسیاری از بحرانی ترین شرایط در کشورهای توسعه یافته ی جهان است. فرونشست در ایران به دلیل برداشت بی رویه آب های زیرزمینی بوده است. حال افت آب در سفره های زیرزمینی دارای خطر نشست زمین به علت خالی شدن لایه ها و خلل هاست که این نشست ها علاوه بر تخریب برگشت ناپذیر منابع زیرزمینی، امکان بروز حوادث و فجایع در صورت واقع شدن در زیرساخت های حیاتی انرژی مثل پالایشگاه ها، نیروگاه ها، خطوط انتقال انرژی مثل برق و گاز، تأسیسات حمل و نقل مانند خطوط راه آهن، فرودگاه ها، پل ها و جاده ها و صنایع و کارخانه ها را به دنبال خواهد داشت.

از مهم ترین پیامدهای مخاطره آور فرونشست زمین، مسئله احتمال آسیب دیدگی خطوط انتقال و توزیع نیرو است. شکل گیری فرونشست ها سبب وارد آمدن خسارت به سازه های سطحی همچون شبکه توزیع برق و دکل های انتقال نیرو شده است. همچنین ترک ها و شکاف های ایجاد شده در سطح زمین در اثر این پدیده، خسارات زیادی را به کابل های زیرزمینی و مدفون برق وارد آورده است. در ادامه مجموعه ای از خسارات پدیده فرونشست به ویژه بر سازه های صنعت برق در نقاط مختلف به اختصار در جدول ۱-۱ بیان شده است [۱۹۲].

<sup>1</sup> Terminal Tower

بررسی میزان آسیب پذیری فونداسیون سازه های انتقال و فوق توزیع از مقدار فرونشست ۲۰۸

جدول ۴-۱ نرخ فرونشست، آسیب ها و دلایل آن در مناطق مختلف جهان و ایران [۱۹۲]

| شماره ردیف | محل (کشور، استان، شهر)                      | بازه زمانی                | نرخ فرونشست ثبت شده در بازه زمانی                                                                                   | خلاصه خرابی های دیده شده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | دلیل خرابی                               |
|------------|---------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| ۱          | امریکا، دلتای ساکرامنتو-سن ژواکین کالیفرنیا | صد سال اخیر               | ۱۰۰ میلیمتر در سال (در سال ۱۹۹۰ به ۱۰ تا ۳۰ میلیمتر کاهش پیدا کرده است).                                            | آسیب هایی در صنعت برق در بخش انتقال و توزیع.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | آبشستگی خاک های آلی                      |
| ۲          | اندونزی، جاکارتا                            | ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۸              | ۱ تا ۱۵ سانتیمتر در سال است و می تواند تا ۲۰ الی ۲۵ سانتیمتر در سال در محل خاص و در دوره معین برسد.                 | ایجاد ترک و خسارت در ساختمان ها و آسیب به زیرساخت های صنعت برق و سامانه های توزیع همانند دکل های برق در مناطق شهری.                                                                                                                                                                                                                          | -                                        |
| ۳          | مکزیک، شهرهای تولوکا، سالیوا و مورلیا       | -                         | تولوکا: تا ۱۰ سانتیمتر در سال سالیوا و مورلیا: ۴ تا ۶ سانتیمتر در سال                                               | خسارات قابل توجه به زیرساخت های شهری مانند شبکه های آبرسانی و برق رسانی و شبکه های دفع فاضلاب آب های سطحی. خسارات عظیم اقتصادی به ساختمان های عمومی و خانه ها، تأثیر بر زیرساخت های شهری از جمله شبکه های آبرسانی و برق رسانی و دکل های برق، به وجود آمدن مشکلاتی در سیستم های آبیاری زمین های کشاورزی (چاه های تولید) و سیستم های زهکشی آب. | برداشت بی رویه از سفره های آبخوان        |
| ۴          | مکزیک، دره آگواسکالینتس                     | ۲۰۱۰                      | ۱۱/۸ سانتیمتر در سال                                                                                                | خانه ها، تأثیر بر زیرساخت های شهری از جمله شبکه های آبرسانی و برق رسانی و دکل های برق، به وجود آمدن مشکلاتی در سیستم های آبیاری زمین های کشاورزی (چاه های تولید) و سیستم های زهکشی آب.                                                                                                                                                       | برداشت بی رویه آب های زیرزمینی           |
| ۵          | چین، شآنشی، یانگکوان                        | دسامبر ۲۰۱۷ تا فوریه ۲۰۱۸ | حداکثر ۲۰ سانتیمتر در سال                                                                                           | تأثیر جدی بر دکل های خطوط انتقال برق.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | استخراج زغال سنگ                         |
| ۶          | بنگلادش                                     | -                         | -                                                                                                                   | آسیب به دیوارهای خانه های مسکونی، جاده ها و زیرساخت ها.                                                                                                                                                                                                                                                                                      | استخراج زغال سنگ                         |
| ۷          | یونان، حومه شهر آمینتای                     | -                         | -                                                                                                                   | گسیختگی های سطحی و ترک در دشت های اطراف و آسیب هایی به زیر ساخت های شبکه های آبرسانی و برق رسانی، شبکه راه و ساختمان های مسکونی.                                                                                                                                                                                                             | بهره برداری بیش از حد از سفره های آبخوان |
| ۸          | آفریقای جنوبی                               | -                         | -                                                                                                                   | ایجاد فرو چاله و خسارت به زیرساخت های صنعت آب و برق.                                                                                                                                                                                                                                                                                         | آبکشی                                    |
| ۹          | ایتالیا، تالاب ونیز                         | ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰              | نرخ ثابت $1 \pm$ میلیمتر در سال (منطقه ساحلی شمالی ۳-۶ میلیمتر در سال، منطقه ی ساحلی جنوبی ۴- تا ۱ میلیمتر در سال). | فرونشست زمین های کشاورزی و خطرات ناشی از سیل، آسیب به زیرساخت های هیدرولیکی (زهکشی آب) و شبکه های توزیع برق، تخریب پل.                                                                                                                                                                                                                       | تجزیه شدن خاک های آلی                    |
| ۱۰         | خراسان رضوی، مشهد                           | اکتبر ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۷ | حداکثر ۲۲ سانتیمتر در سال.                                                                                          | ایجاد شکاف در سطح زمین و تهدید برای خطوط ریلی (خط راه آهن تهران-مشهد) و همچنین خطوط انتقال برق.                                                                                                                                                                                                                                              | برداشت بی رویه آب های زیرزمینی           |

## ۲۰۹ دانش فنی شناسایی و پیش بینی فرونشست زمین و آثار آن بر سازه های انتقال و فوق توزیع نیرو

|    |                                                  |                                     |                                                |                                                                                                                                                                                                                         |                                                            |
|----|--------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| ۱۱ | خراسان رضوی،<br>دشت کاشمر                        | ۲۰۱۷<br>تا پایان<br>۲۰۱۸            | حداکثر ۲۴ سانتیمتر در سال.                     | ایجاد شکاف در غرب دشت کاشمر.                                                                                                                                                                                            | افت سطح آب<br>زیرزمینی                                     |
| ۱۲ | اصفهان،<br>اصفهان محدوده-<br>های شمالی و<br>شرقی | نوامبر<br>۲۰۱۶<br>تا فوریه<br>۲۰۱۹  | ۱۲/۵ سانتیمتر در سال.                          | شکاف های سطح زمین که گاه موجب فروریزش های<br>شهری شده ترک خوردگی ساختمان های شهری.                                                                                                                                      | چاه های<br>غیرمجاز فراوان<br>استقرار صنایع<br>آب بر        |
| ۱۳ | اصفهان، دشت<br>مهبیار                            | نوامبر<br>۲۰۱۶<br>تا فوریه<br>۲۰۱۹  | ۹ سانتیمتر در سال.                             | ایجاد شکاف و تأثیر بر زیرساخت ها و خط ریلی، ترک ها و<br>شکاف های عمیق در کنار دکل های برق، خطوط انتقال<br>آب و گاز.                                                                                                     | برداشت زیاد و<br>بی رویه آب<br>زیرزمینی طی<br>دو دهه گذشته |
| ۱۴ | قم، دشت های<br>جعفریه و جنت آباد                 | آبان<br>۱۳۹۳ تا<br>آبان<br>۱۳۹۵     | ۸ تا ۲۱ سانتیمتر.                              | تأثیر بر ابنیه تاریخی، تأسیسات شهری و خطوط ریلی،<br>تهدید راه آهن تهران- قم، خطوط انتقال نیرو و برق<br>سراسری و فرودگاه بین المللی قم.                                                                                  | کاهش سطح<br>آب های<br>زیرزمینی                             |
| ۱۵ | فارس، مرودشت                                     | سپتامبر<br>۲۰۱۵<br>تا اکتبر<br>۲۰۱۸ | حداکثر ۴۲ سانتیمتر در سال.                     | شکاف های سطح زمین و تهدید خطوط انتقال و توزیع در<br>منطقه ی فرونشست.                                                                                                                                                    | تخلیه سفره های<br>زیرزمینی                                 |
| ۱۶ | قزوین                                            | ژانویه<br>۲۰۱۷<br>تا فوریه<br>۲۰۱۹  | ۷ سانتیمتر در سال.                             | تهدید فرودگاه سمپاشی قزوین، مسیر راه آهن، خطوط<br>انتقال نیرو.                                                                                                                                                          | -                                                          |
| ۱۷ | همدان، دشت<br>کیودرآهنگ                          | -                                   | -                                              | ایجاد فرو چاله در نزدیکی دشت کیودرآهنگ همدان و<br>تهدید جدی نیروگاه تولید برق شهید مفتح.                                                                                                                                | -                                                          |
| ۱۸ | کرمان، دشت<br>رفسنجان                            | فوریه<br>۲۰۱۷<br>تا دسامبر<br>۲۰۱۸  | ۱۹ سانتیمتر در سال.                            | ایجاد ترک در ساختمان ها و تأسیسات شهری و روستایی،<br>شکاف در اراضی کشاورزی.                                                                                                                                             | استخراج بی رویه<br>آب های<br>زیرزمینی و<br>تخلیه سفره ها   |
| ۱۹ | تهران، دشت<br>ورامین                             | ۲۰۰۳ تا<br>۲۰۱۷                     | ۲۲ سانتیمتر در سال.                            | کج شدن دکل های برق، بیرون زدن میله ی چاه ها، شکاف<br>در سطح زمین و تهدید خطوط راه آهن، روستاها و مراکز<br>جمعیتی، خطوط نیرو، لوله های نفت و گازی که از حوالی<br>این منطقه گذر می کنند و همچنین مشکل در کشاورزی<br>مردم. | کاهش منابع<br>آب های<br>زیرزمینی                           |
| ۲۰ | تهران، شهریار                                    | -                                   | از ۴۲ میلیمتر در سال تا<br>۳۱۰ میلیمتر در سال. | تهدید خطوط راه آهن و سه خط بزرگ فشارقوی.                                                                                                                                                                                | تخلیه آب<br>زیرزمینی                                       |
| ۲۱ | البرز، اشتهاارد                                  | ژانویه<br>۲۰۱۷ تا<br>فوریه ۲۰۱۹     | ۱۷ سانتیمتر در سال.                            | شکاف های بزرگ در سطح زمین و تهدید سه خط موازی<br>انتقال نیرو و خط توزیع ۲۰<br>کیلوولتی را در بخشی از دشت اشتهاارد.                                                                                                      | تخلیه آب<br>زیرزمینی                                       |
| ۲۲ | تهران، دشت<br>تهران                              | ژانویه<br>۲۰۱۷ تا<br>فوریه ۲۰۱۹     | حداکثر ۲۰ سانتیمتر.                            | ناهمواری آسفالت خیابان ها، جابجایی جداول خیابان ها،<br>ترک در دیوارها، کج شدن ساختمان ها، شکاف های بزرگ<br>و تهدید برای واژگونی خطوط انتقال نیرو و خطوط راه-<br>آهن، ایجاد فرو چاله در مناطق مختلف تهران.               | برداشت غیرمجاز<br>از چاه های آب                            |

#### ۱-۱-۵-۲-۴ سوابق خرابی های ناشی از فرونشست بر دکل های انتقال نیرو در ایران و جهان

دکل های انتقال نیروی برق، به این دلیل که عمدتاً در دشتهای واقع شده اند و طول قابل توجهی دارند، در معرض خطر جدی فرونشست زمین و شکاف های حاصل از آن قرار دارند. مطالعات انجام شده در خصوص اثر فرونشست بر دکل های انتقال نیرو بیانگر وقوع آسیب های جدی و خرابی این خطوط بر اثر پدیده ی فرونشست می باشد. بنابراین بررسی اثر این پدیده بر دکل های نیرو از اهمیت زیادی برخوردار است. در شکل ۳-۴ تا شکل ۵-۴ نمونه هایی از تأثیرات و تهدیدات این پدیده نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ اثر فرونشست بر دکل برق (حوزه رودخانه آرنو، ایتالیا) [۱۹۲]



شکل ۴-۴ تهدید دکل های انتقال نیرو توسط فرونشست ایجاد شده در حریم خط انتقال دشت ورامین [۱۹۲]



شکل ۴-۵ خرابی های دکل های انتقال نیرو ناشی از فرونشست در خط انتقال دشت اشتهارد [۱۹۲]

#### ۲-۵-۱-۲ سوابق خرابی های ناشی از فرونشست بر تونل های انتقال نیرو در ایران و جهان

با بررسی مطالعات صورت گرفته در خصوص اثر فرونشست بر سازه های صنعت برق مشاهده می گردد که با اینکه تونل های انتقال نیرو در در مسافت وسیعی از مناطق مستعد فرونشست (مانند دشت ها) قرار دارند، به دلیل عدم انجام پایش مناسب و مدفون بودن این سازه ها، اطلاعات دقیقی از آسیب های ناشی از این پدیده که تاکنون رخ داده، بر تونل های انتقال نیرو وجود ندارد. با این حال، بر اساس یک پیش بینی محتمل، بسیاری از این سازه ها تحت اثر فرونشست دچار آسیب و خرابی شده اند یا خواهند شد.

#### ۴-۲-۶ انتخاب بحرانی ترین سازه های انتقال نیرو در برابر فرونشست زمین

از بررسی سوابق خرابی های رخ داده یا محتمل ناشی از فرونشست در سازه های صنعت برق میتوان نتیجه گرفت که بیشترین میزان خرابی ناشی از فرونشست (چه از نظر ایمنی سازه ای و چه از نظر عملکرد انتقال نیرو در خط)، در دکل ها و تونل های انتقال نیرو رخ می دهد. پست های انتقال نیرو نیز ممکن است در اثر فرونشست دچار آسیب شوند، با این حال، با توجه به موارد عنوان شده در بخش ۱-۳، پست های انتقال نیرو عمدتاً در محل اتصال خطوط انتقال و بصورت موضعی احداث می شوند که مطالعات اولیه برای جانمایی مناسب و ایمن آنها معمولاً با دقت قابل قبولی انجام می گیرد. اما دکل ها و تونل های انتقال در سرتاسر کشور و به خصوص در دشت ها که احتمال ایجاد فرونشست بیشتر است، احداث می شوند و بدلیل ماهیت خطی آنها (که در طول قابل توجهی احداث میشوند)، به ناگزیر، نمیتوان آنها را بطور کامل از خطر رخداد حوادث زمینی ایمن نگاه داشت. همچنین، در بین انواع دکل های انتقال نیرو، دکل های انتقال مشبک بیشترین تاثیرپذیری از پدیده مخرب فرونشست را دارند؛ چرا که ایجاد فرونشست در یکی از پایه های یک دکل نیز می تواند گستره ی وسیعی از خط را تحت تاثیر خود قرار داده و حتی منجر به خرابی کامل، ریزش آبهاری خط و

عدم کارایی کامل خط شود. این در حالی است که دکل های تلسکوپی به دلیل تک پایه بودن و اهمیت کمتر، آسیب پذیری کمتری نسبت به فرونشست خواهند داشت. بنابراین در این پژوهش به بررسی اثر این پدیده بر دکل های مشبک و تونل های انتقال نیرو پرداخته شده است.

## ۴-۲-۷ مکانیزم اثر فرونشست بر دکل های انتقال نیرو

در سال های اخیر، مکانیسم خرابی دکل ها و تونل های انتقال تحت بارهای یخبندان و باد به طور سیستماتیک بر اساس مدل اجزای محدود در شبیه سازی مکانیکی دکل مورد مطالعه قرار گرفته است، در

حالی که تعداد کمی از آنها ویژگی ها و شرایط دکل ها تحت فرونشست را مطالعه کرده اند. فرونشست بر اثر دلایلی که ذکر شد به صورت افت سطح زمین باعث ایجاد نیرو در پی دکل ها شده و سپس با انتقال این نیرو به سازه ی دکل و تونل ممکن است موجب تغییر شکل و خرابی اعضای ضعیف تر و حتی فروریختن کل سازه گردد.

بطور کلی به منظور بدست آوردن مقدار تاثیر نشست بر پارامترهای مختلف از جمله تنش، برش و خمش هر یک از اجزای دکل از سه روش پایش<sup>۱</sup> مدل فیزیکی و معادلات اجزای محدود استفاده می شود. در روش پایش با استفاده از دستگاه های نظارت آنلاین و رادارها و نصب آنها بر اجزای مختلف دکل، مقدار هر یک از پارامترهای مدنظر قرائت می شود و سپس به منظور کنترل، مقادیر خوانده شده با ضوابط آیین نامه ای و طراحی مقایسه می گردد. این روش بسته به دقت دستگاه ها و مدت پایش هزینه بر خواهد بود. در روش مدل فیزیکی ابتدا یک مدل از دکل در مقیاس های کوچکتر و محدودتر تحت شرایط مشابه واقعیت ساخته می شوند. سپس با اعمال شرایط فرونشست مقیاس شده، نحوه ی عملکرد مدل مورد پایش قرار می گیرد. این روش نیز به دلیل استفاده از تجهیزات مشابه و دستگاه های مخصوص نیازمند صرف هزینه ی زیادی می باشد. در روش اجزای محدود با استفاده از معادلات دیفرانسیلی، به یک مقدار عددی تقریبی پس از حل معادلات فرونشست می رسند. به منظور تحلیل فرونشست دکل از روش اجزای محدود می توان از نرم افزارهای موجود مانند SAP 2000، Plaxis و ... استفاده نمود.

## ۴-۲-۸ تعیین حد خطرپذیری دکلها براساس توصیه های آیین نامه ای

به منظور بررسی نحوه ی تغییر و اثرگذاری فرونشست بر پارامترهای مختلف از جمله تنش و تغییر مکان هر یک از اجزای سازه ی دکل و تونل و درک این پدیده و تاثیر آن بر پایداری دکل های انتقال نیرو، یافتن چارچوب های مربوطه و کنترل هریک از پارامترهای درگیر با ضوابط آیین نامه ای از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد.

دو پارامتر کنترل کننده برای حدود خطرپذیری دکل های انتقال نیرو بر اثر پدیده ی فرونشست وجود دارد:

۱- فرونشست موجود در زیر پایه (های) دکل انتقال و فرونشست منطقه ای که تونل انتقال در آن قرار گرفته است.

۲- تنش ایجاد شده در اجزای فولادی دکل های انتقال بر اثر فرونشست بستر پی دکل و تنش، برش و لنگر اضافی

---

<sup>1</sup> Monitoring



<sup>۱</sup>-برخی از فونداسیون های صلب (مانند شمع ها) ممکن است نیازمند محدودیت های کمتری باشند.

<sup>۲</sup>-یک حرکت معین از لحاظ استاتیکی حرکتی است که تلاش داخلی در سازه ایجاد نمی کند. به عنوان مثال جابجایی یک پی از یک تکیه گاه سه پایه یک حرکت معین است، در حالی که تغییر مکان یک پی از تکیه گاه چهار پایه یک حرکت نامعین است.

<sup>۳</sup>-اندرکنش بین تکیه گاه و پی در نظر گرفته شود.

<sup>۴</sup>-۷ فاصله ی افقی بین پی ها می باشد.

<sup>۵</sup>-منظور از تکیه گاه های خود ایستا، پی دکل هایی می باشد که ۳ الی ۴ پایه داشته و پایه ها با اعضای خرابایی به هم متصل می شوند.

بنا بر اطلاعات ارائه شده در جدول ۴-۲، حداکثر نشست مجاز پی (اعم از متقارن و نامتقارن) که در زیر یک تکیه گاه (خارج از صفحه ای که از سه تکیه گاه دیگر) تشکیل داده اند، ۵ سانتی متر می باشد. بر این اساس مقدار نشست مجاز ایجاد شده در پایه ی دکل های انتقال نیرو به منظور عدم ایجاد گسیختگی اعضا در آنها ۵ سانتی متر می باشد [۱۹۴]. پارامتر کنترل کننده دیگر در فرونشست دکل ها در زمان بهره برداری، مقدار تنش مجاز حداکثر اعضای دکل های انتقال نیرو می باشد که این مقدار به کمک معیارهای کلی توصیه شده توسط غنوم در سال ۱۹۸۳، میرهوف در سال ۱۹۸۲، میحث هفتم مقررات ملی در سال ۱۳۹۲ و استاندارد IEC60826 در سال ۲۰۰۳، به دست آورده شده است [۱۹۵، ۱۹۶، ۱۹۷، ۱۹۸]. با در نظر گرفتن معیارهای کلی ذکر شده، مقدار حداکثر ظرفیت باقی مانده ایمن هر عضو فولادی موجود در خط انتقال برای تحمل تنش ناشی از فرونشست با در نظر گرفتن "ضریب استفاده خط – (Use Factor)" به دست می آید. ضریب استفاده خط، پارامتریست که در واقع با یک توزیع آماری (توزیع آماری بتا)، نسبت میانگین طول هر دهانه بین دو دکل مجاور در یک خط را به طول دهانه حداکثری که دکلها بر مبنای آن طراحی شده اند، نشان می دهد. اگر در یک خط، تمام دکلها دقیقاً براساس طول دهانه های واقعی خود طراحی شوند، مقدار ضریب استفاده خط برابر با مقدار حداکثر آن یعنی ۱ و در صورتیکه خط برای یک دهانه بحرانی طراحی شده باشد، مقدار حداقل ضریب استفاده خط عمدتاً بین ۰/۴ تا ۰/۵ است [۱۹۸]. در واقع، در مقدار حداقل (یعنی مثلاً ۰/۵)، فرض می شود که المان های سازه ای دکل، پس از اعمال بحرانی ترین ترکیب بار سازه ای پیش بینی شده در زمان طراحی (که البته فرونشست زمین در آن دیده نشده است)، همچنان به اندازه همان ترکیب بار بحرانی طراحی، ظرفیت تحمل بارگذاری جدید تا آستانه شکست (تسلیم یا کمانش) را دارد؛ یعنی به عبارتی، ظرفیت نهایی المان های سازه ای دکل، ۲ برابر تنش ناشی از اعمال ترکیب بار بحرانی به اعضای دکل است. در حالت ضریب استفاده خط حداکثر (یعنی ۱)، فرض می شود که ظرفیت نهایی المان های سازه ای دکل، دقیقاً برابر تنش ناشی از اعمال ترکیب بار بحرانی به اعضای دکل است و یعنی دکل منطقی دیگر تحمل اعمال نیروی جدید پیش بینی نشده در طراحی را ندارد. برای مشاهده جزئیات بیشتر در خصوص مقادیر ضریب استفاده خط برای حالات مختلف توپوگرافی زمین و انواع بارهای وارده (جانبی یا ثقلی) میتوان به جداول ارائه شده در پیوست چهارم استاندارد (IEC60826 (2003) مراجعه کرد.

منطقاً، برای اینکه وضعیت دکل های انتقال در برابر فرونشست بصورت پارامتریک بررسی شود، نه می توان ضریب استفاده خط ۰/۵ را فرض کرد (که خلاف جهت اطمینان است) و نه میتوان ضریب استفاده خط ۱ را مفروض دانست (که در این صورت باید بگوییم عملاً هر خط انتقال نیرو که در معرض فرونشست قرار گرفته نایمن است و قابل بهره برداری نیست). البته لازم به ذکر است که در بررسی یک خط مشخص، مقدار ضریب استفاده خط، برای آن خط معلوم است و نیاز به اتخاذ عددی فرضی برای آن وجود ندارد.

در این تحقیق، برای به دست آوردن کران بالای تنش قابل تحمل در اعضای سازه ای دکل در اثر اعمال



فرونشست بر پی آنها، از رابطه کلی ۴ - ۱ استفاده شده که در آن ضریب استفاده خط برابر با ۰/۵ فرض شده است و همچنین، از یک ضریب اطمینان به مقدار ۱/۴ به دلیل عدم اطمینان در پارامترهای ژئوتکنیکی (بر اساس معیارهای کلی ذکر شده در مبحث ۷ مقررات ملی و کتب معتبر مهندسی پی مانند باولز ۱۹۹۰) استفاده شده است.

$$F_{ac} = \frac{\text{ظرفیت باربری نهایی}}{\text{ضریب اطمینان}} = (1-U.F) \times F_a / S.F = (1-0.5) \times F_a / 1.4 = 35\% \times F_a \quad ۱-۴$$

در این رابطه  $F_{ac}$  ظرفیت باقی مانده مجاز محوری عضو برای تحمل فرونشست و  $U.F$  ضریب استفاده خط حداقل (برابر با ۰/۵) است.

همچنین،  $F_a$  برای اعضای کششی برابر با تنش تسلیم فولاد ( $F_y$ ) و برای اعضای فشاری، مقدار کاهش یافته ای از تنش تسلیم فولاد با در نظر گرفتن معیار کمانش برای اعضای فولادی دو سر مفصل است. ضمناً  $S.F$  ضریب اطمینان ژئوتکنیکی می باشد. همانطور که ملاحظه میشود، رابطه ۴-۱، مقدار ۳۵٪ اضافه تنش مجاز را به ازای اعمال فرونشست بر اعضای سازه ای دکل که قبلاً بحرانی ترین ترکیب بار را تجربه کرده اند ارائه میکند. این عدد حد بالای اضافه تنشیست که در اعضای دکل میتواند رخ دهد و بروز اضافه تنشی بیشتر از آن در اعضای دکل را عملاً باید به معنای کاهش قابلیت اطمینان آن عضو به شمار آورد. این عدد بر روی نمودارهای آتی که در این گزارش ارائه میشوند به عنوان کران بالای اضافه تنش نشان داده شده است. اما برای مقاصد عملی، لازم است تا مقداری کمتر از این کران بالا را به عنوان اضافه تنش قابل تحمل در اعضای سازه ای مد نظر قرار داد. بدین منظور پیشنهاد می شود که برای مقاصد عملی، مقداری فیما بین حدود بالا و پایین را برای ضریب استفاده خط (مثلاً حدود ۰/۸۵) را در رابطه ۴-۱ لحاظ کرد. در این صورت مقدار اضافه تنش ناشی قابل تحمل از فرونشست در اعضای سازه ای به حدود ۰/۱۱ محدود می شود که این مساله معادل لحاظ نمودن یک ضریب اطمینان به مقدار ۳ در کاهش کران بالای حد اضافه تنش است. لازم به ذکر است که در انتهای این گزارش نیز، ضریب اطمینان ۳ برای تعیین حدود عملکردی سازه های انتقال نیرو (در معیارهای نشست و تنش) پیشنهاد شده، که این مساله نیز در تناظر و تعامل با اتخاذ ضریب استفاده خط معادل ۰/۸۵ میباشد.

## ۹-۲-۴ انتخاب نرم افزار مناسب برای حل مساله

به منظور مطالعه ای پارامتریک و مدل سازی عددی به روش اجزای محدود و بررسی موضوع پژوهش در قالب مدل سازی یک خط انتقال نیرو و اعمال فرونشست از نرم افزار SAP 2000 و Plaxis و برای مدل سازی شرایط خاک در فرونشست و بررسی رابطه ای آن با ارتفاع افت تراز آب زیرزمینی و سختی خاک و مدل سازی تونل انتقال نیرو از نرم افزار Plaxis استفاده شده است.

### ۹-۲-۴-۱ نرم افزار SAP2000

SAP2000 یک نرم افزار متداول در تحلیل و طراحی سازه هاست که برای تجزیه و تحلیل و طراحی هر نوع سیستم سازه ای ایده آل است. در این نرم افزار، سازه های ساده و پیشرفته، با هندسه دو بعدی و سه بعدی، با ترکیب المانهای سازه ای ساده تا پیچیده، می تواند در قالب یک محیط مدل سازی مبتنی بر امکانات محاسباتی و بصری که انجام پروسه ای تحلیل و طراحی را ساده و موثر می سازد، شبیه سازی، تجزیه و تحلیل، طراحی و بهینه سازی شود. الگوهای

مدل سازی یکپارچه، تخصیص بارگذاری بر اساس کد، تنظیمات تحلیل پیشرفته، روش های بهینه سازی طراحی و گزارش های خروجی قابل تنظیم، همه در یک بستر قدرتمند هماهنگ شده اند تا SAP2000 را به ویژه برای افراد حرفه ای مفید واقع کند [۲۰۰].

## ۲-۹-۲ نرم افزار Plaxis

پلکسیس یک بسته نرم افزاری بر پایه روش اجزای محدود است که برای تحلیل مسائل ژئوتکنیکی در محیط های خاکی و سنگی بکار می رود. معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک ها بسته به هدف مورد نظر لازم است. با این نرم افزار می توان خاکبرداری و خاک ریزی مرحله ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المانهای مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل سازی نمود. تحلیل سازه هایی همچون تونل ها، خاکریزها، معادن، گودهای پایدار شده با روش های مختلف مانند روش های میخ کوبی (نیلینگ)، مهارگذاری (انکراژ)، مهار متقابل (استرات)، سازه نگهبان خرابایی، ساخت بالا به پایین (تاپ دان)، سپر کوبی، دیوار برلنی و دیوار دیافراگمی، شالوده های (فونداسیون های) بهسازی شده توسط روش های مختلف نظیر روش های اختلاط عمیق خاک (DSM)، تزریق پر فشار (جت گروتینگ)، شمع، ستون شنی ارتعاشی، تراکم دینامیکی، ریزشمع (میکروپایل)، خاک مسلح (ژئوسنتتیک) با استفاده از این نرم افزار امکان پذیر است [۲۰۱].

## ۲-۱۰-۴ مشخصات مصالح استفاده شده در دکل ها، تونل ها و مشخصات خاک

بطور کلی، مصالح مرتبط با مدلسازی پدیده ی فرونشست خاک در زیر پی سازه های خطوط انتقال عبارتند از فولاد اعضای دکل های انتقال، کابل های متصل به دکل ها، مصالح پوشش دهنده تونلهای انتقال و خاک موجود در زیر شالوده دکل های موجود در خط، که در این بخش به معرفی مشخصات فیزیکی و مکانیکی هریک پرداخته می شود.

## ۲-۱۰-۱۴ اعضای فولادی دکل های انتقال

در این تحقیق، فولاد مورد استفاده در مدل سازی اعضای دکل های انتقال از نوع ST37 فرض شده که مشخصات آن در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴ مشخصات فولاد مورد استفاده در مدل سازی اعضای دکل های انتقال [۲۰۲]

| پارامتر                     | مقدار                | واحد              |
|-----------------------------|----------------------|-------------------|
| وزن واحد حجم (W)            | ۷۶/۹۷                | kN/m <sup>3</sup> |
| مدول الاستیسیته (E)         | ۲×۱۰ <sup>۸</sup>    | kN/m <sup>2</sup> |
| ضریب پواسون (ν)             | ۰/۳                  | -                 |
| تنش تسلیم (F <sub>y</sub> ) | ۲/۳۵×۱۰ <sup>۵</sup> | kN/m <sup>2</sup> |
| تنش نهایی (F <sub>u</sub> ) | ۳/۶۳×۱۰ <sup>۵</sup> | kN/m <sup>2</sup> |

## ۲-۱۰-۲ کابل های هادی

هادی هوایی مورد استفاده در مدل سازی از نوع کابل کرلو<sup>۱</sup> می باشد. هادی کرلو از سیم های هوایی آلومینیومی تقویت شده با فولاد تشکیل شده که بیشتر در خطوط فشار قوی انتقال برق در ایران به کار می رود. هر کابل شامل ۷ رشته فولاد در هسته و ۵۴ رشته آلومینیوم در اطراف هسته ی فولادی می باشد که قطر هر کدام از رشته ها ۳/۵۱ میلی متر است. مشخصات این کابل در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴ مشخصات هادی هوایی کرلو مورد استفاده در مدل سازی خط انتقال [۲۰۳]

| پارامتر                | مقدار                  | واحد              |
|------------------------|------------------------|-------------------|
| وزن واحد حجم (W)       | ۳۲/۲۶                  | kN/m <sup>3</sup> |
| مدول الاستیسیته (E)    | $6/58 \times 10^7$     | kN/m <sup>2</sup> |
| ضریب پوآسون (v)        | ۰/۳                    | -                 |
| ضریب انبساط حرارتی (A) | $1/3 \times 10^{-5}$   | -                 |
| مقاومت اسمی            | ۱۵۸/۳                  | kN                |
| قطر نهایی کابل         | $3/162 \times 10^{-2}$ | m                 |
| وزن واحد طول           | $1/94 \times 10^{-2}$  | kN/m              |

### ۳-۱۰-۲-۴ تونل های انتقال

مشخصات مصالح پوشش دهنده تونل انتقال نیرو به صورت

جدول ۴-۵ می باشد.

جدول ۴-۵ مشخصات پوشش تونل مورد استفاده در مدل سازی خط انتقال [۲۰۱]

| پارامتر                                     | مقدار              | واحد                 |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|
| وزن واحد سطح (W)                            | ۸/۴۰               | kN/m/m               |
| مدول الاستیسیته در ممان<br>اینرسی مقطع (EI) | $1/43 \times 10^5$ | kN m <sup>2</sup> /m |
| مدول الاستیسیته در سطح                      | $1/4 \times 10^7$  | kN/m                 |

<sup>1</sup> Curlew Cable

|                 |      |   |
|-----------------|------|---|
| مقطع (EA)       |      |   |
| ضریب پواسون (v) | ۰/۱۵ | - |
| قطر تونل        | ۰/۳۵ | m |

#### ۴-۲-۱۰-۴ مشخصات خاک زیر پی دکل ها و اطراف تونل های انتقال نیرو

فرونشست زمین عمدتاً به دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی رخ می دهد که این موضوع موجب ایجاد ناحیه غیراشباع شده و در نهایت منجر به کاهش در سختی و مدول الاستیسیته خاک می گردد. خاک مورد استفاده در مدل سازی در این پژوهش به عنوان یک خاک با سختی عمودی اولیه نسبتاً قابل توجه به مقدار 4000 kN/m (قبل از بروز فرونشست در آن) فرض شده که این مقدار بر اساس توصیه های کتاب آنالیز و طراحی پی بولز (۱۹۹۰) و تحقیقات ارائه شده توسط پریانکا و همکاران در سال ۲۰۰۸ انتخاب شده است [۱۹۹، ۲۰۴].

جدول ۴-۶ مقدار سختی عمودی خاک زیر سازه هایی با پی انعطاف پذیر [۲۰۴]

| نوع خاک | سختی عمودی خاک<br>(kN/m) |
|---------|--------------------------|
| سخت     | ۸۰۰۰                     |
| متوسط   | ۴۰۰۰                     |
| نرم     | ۱۵۰۰                     |

دلیل انتخاب خاک با مقدار سختی 4000 kN/m آن است که با اعمال کاهش مدول سختی بستر پی ناشی از فرونشست، بازه ی بیشتری از کاهش مدول سختی بستر پی در آن دیده شود. سپس بر اثر اعمال فرونشست مقدار سختی اولیه خاک کاهش پیدا کرده که این کاهش به صورت ضریب کاهش مدول سختی بستر پی بر سختی اولیه در مدل سازی ها اعمال شده است. پارامتر سختی اولیه خاک نقشی اساسی در نحوه ی اعمال فرونشست بر سازه های انتقال دارد که در بخش ۲-۶ به آن پرداخته شده است.

#### ۴-۲-۱۱ نحوه ی مدل سازی فرونشست در دکل های انتقال نیرو

دو روش برای اعمال فرونشست بر پی دکل های انتقال نیرو وجود دارد:

۱- اعمال نشست اجباری بر پی دکل های انتقال نیرو

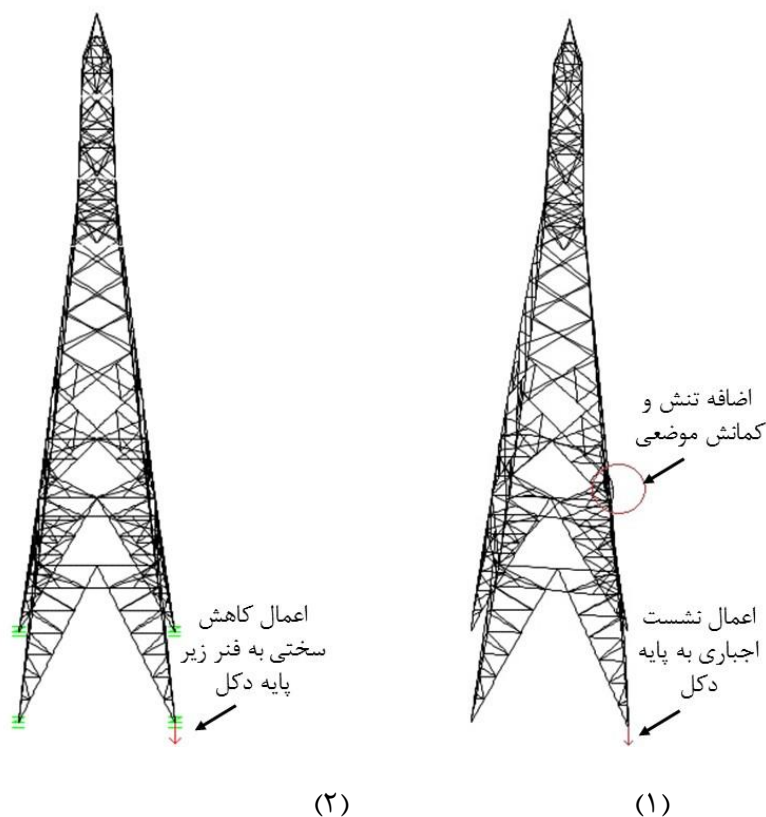
۲- مدل سازی فنر در پایه های دکل ها و اعمال فرونشست توسط اعمال ضریب کاهشی بر سختی بستر پی دکل های انتقال نیرو (سختی فنر معادل با خاک بستر پی می باشد).

با توجه به مدل سازی های اولیه انجام شده، اعمال فرونشست به صورت اعمال نشست اجباری بر پی منجر به عملکرد پی با خاک در کشش و ایجاد اضافه نیروی زیادی در اعضا خواهد شد؛ اما به دلیل آنکه بر اثر پدیده ی فرونشست، خالی شدن زیر پایه ی دکل ها رخ میدهد و ضمناً خاک زیر پی دکل تحمل اعمال کشش ندارد، اعمال

نشست اجباری بر پی دکل به منظور مدلسازی فرونشست خاک زیر پی، با واقعیت تطابق ندارد.

در روش دوم، اعمال فرونشست بر پایه های دکل ها به صورت اعمال کاهش بر سختی خاک بستر پی صورت می گیرد. در نتیجه، این کاهش سختی بستر پی، در شل شدن فنرهای مدل سازی شده در زیر پایه (های) دکل نمود پیدا می کند. بنابراین، روش دوم برای انجام مدل سازی صحیح بوده و این روش برای انجام مدل سازی استفاده شده است؛ ضمناً، در حالت حدی، اعمال کاهش سختی تا به مقدار صفر به معنای خالی شدن زیر پایه ی دکل بر اثر فرونشست است. البته خاطرنشان می سازد که به منظور اجتناب از بروز خطاهای نرم افزاری در مدلسازی ها، حداکثر مقدار اعمال شده کاهش سختی به فنرهای زیر پی دکل های مدل شده، ۹۵٪ بوده است که به معنای کاهش مقدار سختی فنر زیر پی دکلها به ۵٪ مقدار سختی آنها قبل از اعمال فرونشست است.

با انجام مدل سازی های اولیه با هر دو رویکرد ذکر شده، مشاهده گردید که اعمال نشست اجباری قائم به یک پایه، یا منجر به عدم تعادل سازه ای و یا ایجاد نیروهای اضافه بیش از حد در اعضای دکل، خصوصاً در اعضای متصل به پایه ای که نشست اجباری به آن وارد شده، می شود. اما مدلسازی فرونشست پی دکل با استفاده از روش کاهش سختی فنر الاستیک زیر پی، لزوماً منجر به عدم تعادل سازه ای دکل نخواهد شد و ضمناً افزایش نیروهای ایجاد شده در اعضای دکل نیز به شکل منطقی و با درگیر کردن بیشتر اعضای سازه ای دکل رخ خواهد داد. این موضوع از آنجا ناشی می شود که در هنگام رخداد فرونشست در زیر یک پایه، بازتوزیع نیروها در سایر پایه های دکل رخ میدهد و با عنایت به اصول تعادل استاتیکی، تعادل سازه میتواند حفظ می شود. ضمناً این بازتوزیع نیروها در تکیه گاهها (پایه های دکل)، به اعضای سازه ای دکل نیز منتقل و منجر به افزایش نیروها به شکلی نسبتاً گسترده در بیشتر اعضای دکل میشود. مقایسه ی تغییر شکل ایجاد شده در اعضای دکل با استفاده از مدل سازی به دو روش اعمال فرونشست اجباری و کاهش سختی فنر، در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. در این شکل، مقدار فرونشست اجباری وارده بر یک پایه (مدلسازی اولیه) و همچنین مقدار فرونشست نهایی به دست آمده ناشی از اعمال کاهش سختی (مدل سازی مورد استفاده در این پژوهش) در یک پایه ۱/۵ سانتی متر بوده است. با توجه به شکل ۴-۶ مشاهده میشود که بکارگیری روش اول، منجر به ایجاد اضافه تنش موضعی و کماتش در اعضای سازه ای دکل و همچنین انحراف راستای دکل از امتداد قائم شده است. در حالیکه مدلسازی به روش کاهش سختی فنر، توزیع یکنواخت تری از نیروها در اعضای دکل را نتیجه داده است.



شکل ۴-۶ مقایسه‌ی تغییر شکل ناشی از اعمال فرونشست به دو روش: (۱) اعمال نشست اجباری ۱/۵ سانتی متری بر یک پایه در مدل‌سازی اولیه دکل؛ (۲) مدل‌سازی فنر در پایه‌های دکل و اعمال فرونشست ۱/۵ سانتی‌متری با اعمال ضریب کاهش بر سختی بستر پی دکل انتقال نیرو (مدلسازی نهایی)

بر اساس مدل‌سازی آزمون و خطا، سختی فنر زیر پی دکلها در جهت عمودی برابر با 4000 kN/m و مقادیر سختی درون صفحه‌ای و دورانی (در سه جهت مختصاتی) به ترتیب برابر با ۵۰٪ و ۲۵٪ از سختی عمودی برای هر فنر فرض شده است. در واقع، بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های اولیه، در صورت در نظر گرفتن مقادیر بیشتر برای سختی درون صفحه‌ای و دورانی پی، پی دکل دچار گیرداری بیش از حد شده و تغییر شکلهای ناشی از فرونشست (در اثر کاهش سختی بستر پی) در پی دکل مشاهده نمیشود. همچنین در صورت انتخاب مقادیر سختی درون صفحه‌ای و دورانی کمتر از مقادیر ذکر شده، ناپایداری استاتیکی در دکل رخ میدهد.

فرونشست هر پایه به صورت کاهش سختی اولیه‌ی خاک بر آن پایه اعمال می‌شود. بطور مثال در یک مدل فرونشست معادل کاهش سختی ۸۰ درصدی بررسی شده که بدین معنا می‌باشد که سختی عمودی هر پایه‌ی تحت اثر فرونشست به اندازه‌ی ۸۰٪ کاهش یافته و به مقدار 800 kN/m رسیده است و مقادیر سختی در صفحه و دورانی

در سه جهت به ترتیب  $400 \text{ kN/m}$  و  $20 \text{ kN/m}$  خواهد بود. فرونشست ایجاد شده در زیر یک پایه نیز به صورت کاهش مدول سختی بستر پی آن پایه نیز اعمال و بررسی شده است.

#### ۴-۲-۱۲ جمع بندی

فرونشست زمین عمدتاً به دلیل کاهش تراز آب زیرزمینی رخ می دهد که این امر ایمنی سازه های انتقال نیرو را به خطر می اندازد. روش های مختلفی برای به دست آوردن مقدار فرونشست و اثر آن بر دکل ها و تونل های انتقال (بحرانی - ترین سازه های صنعت برق در برابر فرونشست) وجود دارد. توسعه ی روش های نوین در پایش فرونشست دکل و مدل - سازی عددی توسط نرم افزارهای مربوطه امکان مقایسه و صحت سنجی روش مدنظر را فراهم می سازد. در مطالعات انجام شده، اثر فرونشست بر دکل های انتقال نیرو در دو رویکرد ژئوتکنیکی و سازه ای شامل تعیین حد خطرپذیری دکل های انتقال نیرو تحت فرونشست، تحلیل انواع حالات رخداد فرونشست و اثر آن بر مقدار نشست پی و تنش اعضای دکل های انتقال و همچنین ارتباط بین مقدار فرونشست با افت تراز آب زیرزمینی و سختی خاک موجود در زیر پی دکل های انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش به بررسی موارد مذکور، پرداخته شده است.

#### ۴-۳ اثر مقادیر و مودهای فرونشست محتمل زمین بر سازه های منتخب

##### ۴-۳-۱ مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از مدل سازی عددی فرونشست خط انتقال تحت شرایط متفاوتی اعم از اثر کاهش سختی یکنواخت و غیر یکنواخت، تغییر سختی اولیه، تغییر در فواصل دهانه ی بین دکل ها، تغییر در قطر و عمق مدفون تونل و ... ارائه می گردد. در ابتدا نحوه ی تعریف هریک از مدل ها و حالات اعمال فرونشست ارائه و سپس به تبیین و تحلیل نتایج حاصل از مدل سازی پرداخته می شود.

##### ۴-۳-۲ فرضیات حل مسئله

فرضیات زیر به منظور یافتن ارتباط بین مقدار فرونشست با افت تراز آب زیرزمینی و کاهش مدول سختی بستر خاک در نظر گرفته شده است:

- ۱- نشست تحکیمی به عنوان عامل ایجاد فرونشست فرض شده است. مقدار نشست تحکیمی مدنظر ( $S_{con}$ ) از معادله ی تحکیم یک بعدی ترزاقی به دست آمده است.
- ۲- خاک بعد از رسوب گذاری و پیدایش در میلیون ها سال قبل، پیش تحکیم یافته می باشد؛ اما رفتار آن با توجه به عمق لایه در نظر گرفته شده برای کاهش سطح آب و فرونشست ناشی از آن، از لحظه شروع تحکیم فرونشستی متناسب با رفتار یک خاک عادی تحکیم یافته فرض شده است.

۳- مشخصات خاک مورد بررسی، بر اساس اطلاعات اولیه از نوعی خاک ریزدانه در نظر گرفته شده و پارامترهای فیزیکی-مکانیکی مورد نیاز برای محاسبه فرونشست خاک، به شرح زیر لحاظ شده است:

$$C' = 10 \text{ kPa}, \phi' = 25^\circ, \gamma = 18 \text{ kN/m}^3, \gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$$

که در آن،  $C'$  چسبندگی موثر،  $\phi'$  ضریب اصطکاک موثر،  $E_{\text{Sat}}$  مدول الاستیسیته اشباع،  $\gamma$  وزن مخصوص طبیعی و  $\gamma_{\text{sat}}$  وزن مخصوص اشباع می باشد. همچنین، مدول سختی اولیه اشباع خاک ریزدانه نوعی برابر با  $4000 \text{ kN/m}^2$  لحاظ شده است.

۴- خاک موجود در بالای تراز آب زیرزمینی غیراشباع در نظر گرفته شده است. سختی و مدول الاستیسیته این خاک غیراشباع، بصورت تابعی از نمودار SWCC خاک محاسبه شده است.

۵- فرونشست وارده بر زیر پایه های هر دکل به صورت کاهش مدول سختی بستر پی در نظر گرفته شده است. همچنین، معیار سنجش اثر فرونشست بر سازه دکل، علاوه بر میزان نشست پی دکل، مقدار تنش اضافه ایجاد شده در اعضای سازه ای دکل نیز بوده است. بدین منظور، از دو پارامتر ضریب کاهش سختی<sup>۱</sup> و نسبت تنش اضافی<sup>۲</sup>، به شرح زیر، استفاده شده است:

$$S.R.F = \frac{K_1 \text{ (تحت فرونشست)}}{K_0 \text{ (بدون فرونشست)}} \quad (۲-۴)$$

$$O.S.R = \frac{\sigma_1 \text{ (تحت فرونشست)}}{F_y \text{ (تنش تسلیم)}} \quad (۳-۴)$$

در معادله ۲-۴، ضریب کاهش سختی (S.R.F)، نسبت سختی خاک تحت فرونشست ( $K_1$ ) به سختی خاک اولیه بدون فرونشست ( $K_0$ ) می باشد که بر حسب درصد بیان می شود. در مدل سازی های انجام شده، سختی اولیه خاک، بدون اعمال فرونشست،  $4000 \text{ kN/m}^2$  در نظر گرفته شده است. همچنین، در معادله ۳-۴، منظور از نسبت تنش اضافی (O.S.R)، نسبت تنش ایجاد شده در هر یک از اعضا ناشی از فرونشست ( $\sigma_1$ )، به تنش ( $F_a$ ) ارائه شده در رابطه ۱-۱ می باشد. تنش تسلیم فولاد به منظور محاسبه ی نسبت تنش اضافی  $240000 \text{ kN/m}^2$  فرض شده است. حداکثر مقدار مجاز نسبت تنش اضافی اعضا در خط انتقال طبق قضاوت مهندسی و محاسبات ارائه شده آتی، ۳۵٪ و حداکثر مقدار مجاز فرونشست ارائه شده توسط آیین نامه BS-IEC 60826، ۵ سانتیمتر فرض شده است [۱۹۴].

۶- همانطور که پیشتر اشاره شد، فرونشست خاک، از بروز تحکیم در لایه خاک زیر سطح آب زیرزمینی ناشی می شود. اما مدلسازی رفتار تحکیمی خاک در نرم افزار SAP2000 امکان پذیر نیست. بنابراین، بروز فرونشست در زیر پی دکل، به صورت اعمال ضریب کاهشی بر مقدار سختی اولیه (S.R.F) به پایه دکل مدلسازی می شود.

<sup>1</sup> Stiffness Reduction Factor (S.R.F)

<sup>2</sup> Over Stress Ratio (O.S.R)

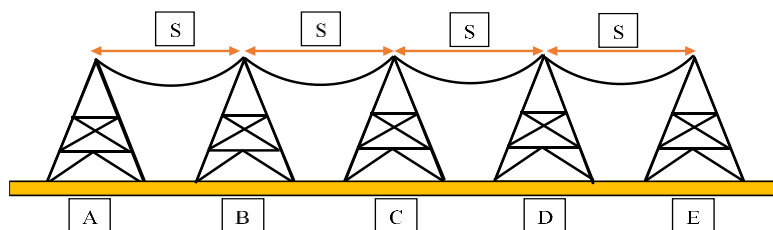


نحوه ایجاد ارتباط میان مقدار فرونشست تحکیمی و ضریب کاهش سختی در نظر گرفته شده برای مدلسازی های سازه ای، در ادامه تشریح میشود.

### ۳-۳-۴ نحوه ی مدل سازی دکل های خط انتقال نیرو و فرونشست خاک

در این تحقیق، بررسی اثر فرونشست بر دکل های انتقال نیرو از طریق مدل سازی عددی به روش اجزای محدود انجام شده است. در این بخش با مدل سازی یک خط انتقال در نرم افزار SAP 2000 به بررسی این موضوع پرداخته می شود.

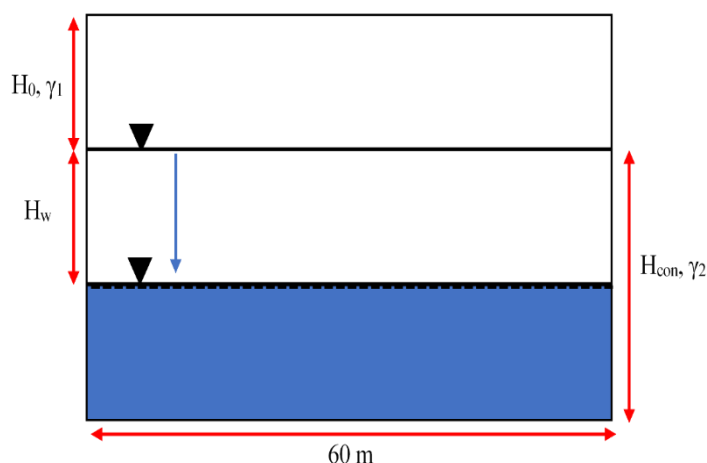
در این تحقیق، ۵ دکل انتقال نیرو به صورت نشان داده شده در شکل ۴-۷، در امتداد یک خط انتقال نیرو در نظر گرفته شده است. تعداد کل اعضای سازه ای مدل شده در این خط، ۴۰۶۰۰ و تعداد پایه های دکل مدل شده، ۲۰ عدد (برای هر دکل ۴ عدد) می باشد.



شکل ۴-۷ طرح کلی خط انتقال نیروی مدل شده در نرم افزار

در شکل ۴-۷، دکل A در مبدا مختصات قرار دارد و فواصل مابین دکل ها یکسان و در مدلسازی های انجام شده برابر با ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متر لحاظ شده است. لازم به توضیح است که در مدلسازی دکل ها و هادی بین آنها، مقدار شکم دادگی کابل ها (Sag) بر اساس مقادیر پیشنهاد شده از نشریه شماره ۴۲۷-۲ سازمان برنامه و بودجه، (مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - هادی های خطوط انتقال نیرو) برای کابل کرلو و دهانه های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متر به ترتیب برابر با ۰/۹۵ متر، ۸/۵۷ متر و ۱۵/۲۴ متر لحاظ شده است. همچنین، بار مرده کابل ها بر اساس جداول ارائه شده در پیوست گزارش، به کابل ها اعمال شده و در نهایت پس از تعیین میزان شکم دادگی نهایی، فرونشست پی، بر دکل ها اعمال شده است.

به منظور محاسبه فرونشست تحکیمی خاک و بررسی رابطه ی آن با کاهش سختی معادل خاک و افت تراز آب زیر زمینی، مقطع قائمی از خاک به صورت شکل ۲-۲ در نظر گرفته شده است. همانطور که اشاره شد، فرونشست بر اثر افت تراز آب زیرزمینی رخ می دهد. با توجه به شکل ۴-۸،  $H_0$  ارتفاع بین تراز اولیه آب زیرزمینی و سطح زمین و  $H_{con}$  ضخامت کل لایه تحکیم پذیر قبل از افت آب می باشد. بعد از افت سطح آب، عمق لایه ی تحکیم پذیر در هر لحظه از تفاضل  $H_{con}-H_0$  به دست می آید.



شکل ۴-۸ مقطع قائم خاک در معرض فرونشست

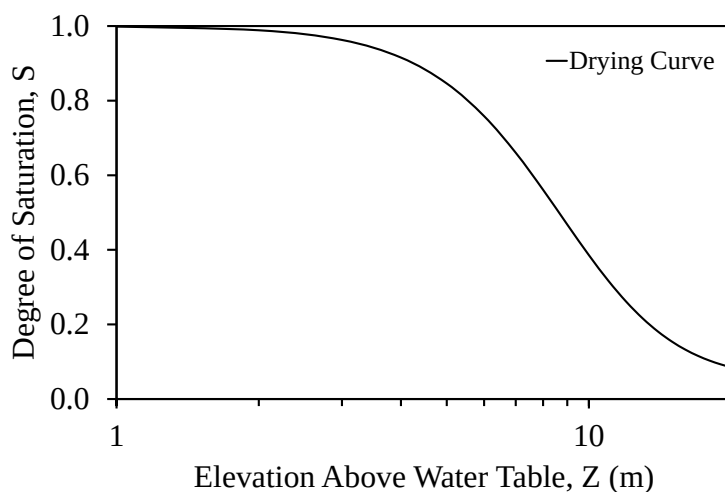
خاک موجود در تراز فوقانی سطح آب زیرزمینی، غیراشباع است که متناسب با مقدار مکش ماتریسی در خاک (که خود با فاصله از تراز آب زیرزمینی ارتباط دارد)، مدول الاستیسیته آن تغییر میکند. بنابراین، به منظور مطالعه شرایط فرونشست خاک، تغییرات مدول الاستیسیته خاک غیر اشباع باید محاسبه شود. مدول الاستیسیته غیراشباع ( $E_{unsat}$ ) با توجه به ویژگی های ارائه شده برای خاک، از رابطه ۲-۳ محاسبه می شود [۲۰۶].

$$E_{unsat} = E_{sat} \left( 1 + \alpha \times \left( \frac{u_a - u_w}{Pa} \right) \times (S)^\beta \right) \quad (4-4)$$

در معادله ۴-۴،  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای فیتینگ،  $(u_a - u_w)$  مکش ماتریسی خاک،  $S$  درجه اشباع خاک و  $Pa$  فشار اتمسفر می باشد. مقادیر توصیه شده توسط واناپالی و اوه برای  $\alpha$  و  $\beta$  در محاسبه مدول الاستیسیته خاک ریزدانه های غیراشباع به ترتیب ۰/۲ و ۱/۵ می باشد.

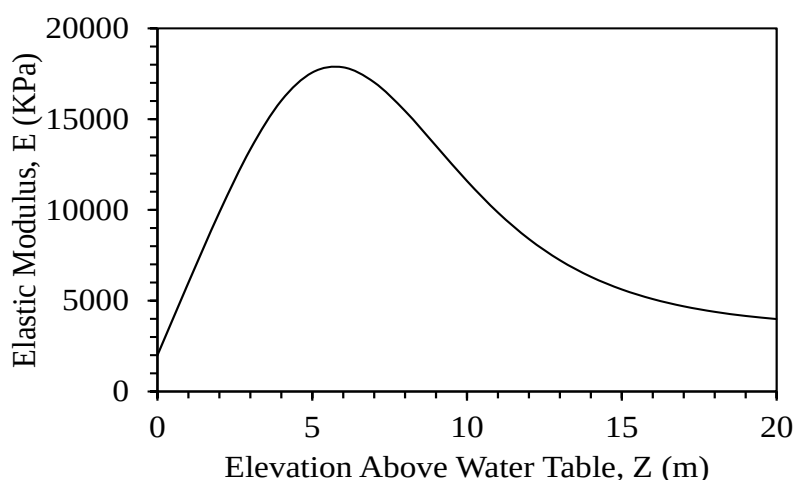
بنابراین به منظور محاسبه مدول الاستیسیته غیر اشباع نیازمند به دانستن ارتباط بین درجه اشباع خاک و مدول الاستیسیته بوده که این موضوع با استفاده از منحنی نگه داشت آب-خاک (SWCC) در مسیر خشک شدگی حاصل میشود. نمودار نگه داشت آب دارای دو شاخه خشک شدگی و تر شدگی بوده که به دلیل آنکه فرونشست بر اثر کاهش سطح آب زیرزمینی و خشک شدن خاک رخ می دهد، از شاخه ی خشک شدگی نمونه خاک ریزدانه غیراشباع نوعی که در شکل ۴-۹ ارائه گردیده، استفاده شده است.

این نمودار با توجه به رابطه ی دانه بندی خاک ریزدانه با نمودار نگه داشت آب-خاک [۱۶] و اطلاعات موجود از توزیع دانه بندی خاک های ریزدانه و تطابق آن با خاک های غیراشباع مشابه با آن دانه بندی برای این نمونه خاک ریزدانه غیر اشباع نوعی در شکل ۴-۹ ترسیم شده است. حداکثر ارتفاع مویینگی (هم ارز حداقل درجه اشباع خاک که مقدار این ارتفاع نشان دهنده ارتفاع ناحیه ی غیراشباع بالای تراز آب زیرزمینی است) در ارتفاع ۲۰ متری از سطح آب زیرزمینی است.



شکل ۹-۴ منحنی نگهداشت آب - خاک (SWCC) مورد استفاده [۱۶]

با توجه به مقادیر به دست آمده از شکل ۹-۴، نمودار مدول الاستیسیته نمونه خاک ریزدانه غیراشباع با جایگذاری مقادیر مکش و درجه اشباع در هر تراز ناحیه ی غیراشباع (از شکل ۹-۴، ضخامت لایه ی غیراشباع ۲۰ متر به دست آمده است). با استفاده از معادله ۳-۲، شکل ۴-۱۰ ترسیم شده است. از نتایج به دست آمده از این نمودار برای مدل سازی فرونشست و بررسی رابطه ی آن با نشست خاک استفاده می شود.



شکل ۴-۱۰ تغییرات مدول الاستیسیته غیراشباع خاک در اعماق بالای سطح آب زیرزمینی بر حسب عمق خاک

#### ۴-۳-۴ رابطه ی فرونشست با کاهش سختی خاک غیراشباع و افت تراز آب زیرزمینی

خطرات ناشی از فرونشست زمین می تواند هزینه قابل توجهی به تأسیساتی همچون دکل های انتقال نیرو تحمیل کند، زیرا بسیاری از این زیرساخت ها در کشور، عمدتاً در مناطقی با احتمال فرونشست واقع شده اند. از سوی دیگر، بخش قابل توجهی از خاک های سطحی (بالتر از تراز آب زیرزمینی) در مناطق استقرار خطوط انتقال نیرو، غیراشباع است. این موضوع بر مقاومت و ویژگی های خاک تأثیر عمیقی می گذارد. بنابراین، مطالعه اثرات فرونشست زمین در خاک های غیراشباع برای جلوگیری از هزینه ها و خسارات حائز اهمیت است. بنابراین در این بخش، رابطه ی فرونشست

زمین با افت تراز آب زیرزمینی به عنوان منشا این پدیده و تاثیر آن بر سختی خاک های غیراشباع مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، فرضیاتی لحاظ شده و روشی تحلیلی جهت بررسی آسیب پذیری پی دکل های مشبک اتخاذ شده که جزئیات آن ذیلا تشریح میگردد:

۱- سازه دکلها در امتداد یک خط انتقال نیرو، در نرم افزار SAP2000 با جزئیات سازه ای مدل شده است تا اثر فرونشست زمین بر تغییر شکلهای پی و همچنین اضافه تنش ایجاد شده در اعضای سازه ای دکل مشخص شود.

۲- از آنجا که در نرم افزار سازه ای مورد استفاده، سختی پی بصورت فنرهای فشاری (خنثی در کشش) در نظر گرفته میشود، باید سختی خاک را به نحو مناسبی با اعمال سختی به فنر زیر پی مشابه سازی کرد.

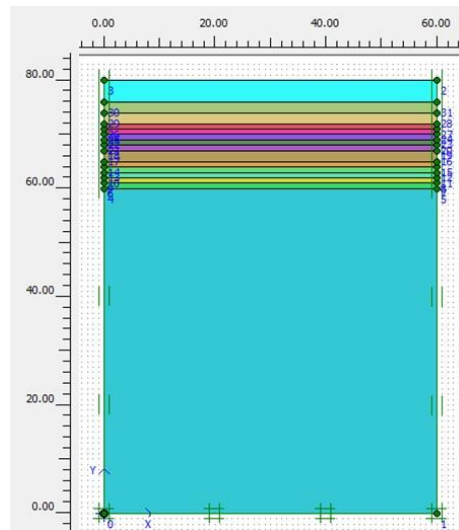
۳- برای اعمال پدیده فرونشست زمین به پی دکلها، سختی اولیه خاک زیر پی باید به تدریج کاهش یابد. یک رویکرد نادرست در این زمینه این است که نشست زمین به عنوان تغییر مکان رو به پایین به پی اعمال شود. این مساله منجر به ایجاد پاسخهای نادرست میشود زیرا در صورت استفاده از این رویکرد، خاک زیر پی به صورت فنر کششی رفتار میکند که مطابق با واقعیت نیست. در عوض، در صورت اعمال کاهش سختی به زیر پی، سازه دکل علاوه بر اینکه دچار تغییر مکان رو به پایین میشود، باز توزیع نیروها نیز در اعضای سازه ای آن ایجاد میشود که کاملاً منطبق با واقعیات تجربیست. لازم به ذکر است که در یک حالت خاص، اگر سختی خاک زیر پی به سمت صفر میل کند، از دست رفتن کامل حمایت خاک از زیر پی دکل رخ میدهد که در عمل میتواند به ایجاد حفره یا ترک در زیر پی دکل تشابه سازی شود. البته در مدلهای نرم افزاری، نمیتوان حالت ایده آل سختی فنر صفر را در مدلهای لحاظ کرد. بنابراین در این تحقیق، حداکثر میزان کاهش سختی اولیه خاک زیر پی دکلها برابر با ۹۵٪ در نظر گرفته شده است (یعنی در بدترین حالت، سختی خاک زیر پی دکل به ۵٪ مقدار اولیه خود برسد).

۴- منشا فرونشست زمین در این تحقیق، تحکیم لایه ریزدانه زیر سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. در این راستا، همچنین فرض شده که خاک در تراز فوقانی سطح آب زیرزمینی، غیراشباع باشد. معادلات تحکیم یک بعدی ترزاقی برای پیش بینی میزان تحکیم لایه تحکیم پذیر در نظر گرفته شده و همچنین فرض شده که رسوبات ریزدانه تحکیم پذیر (که به واسطه پدیده رسوبگذاری عملاً پیش تحکیم یافته هستند)، در اثر اعمال یک افت جدید در تراز آب زیرزمینی، برگشت به خط حالت عادی تحکیم یافته را تجربه میکنند.

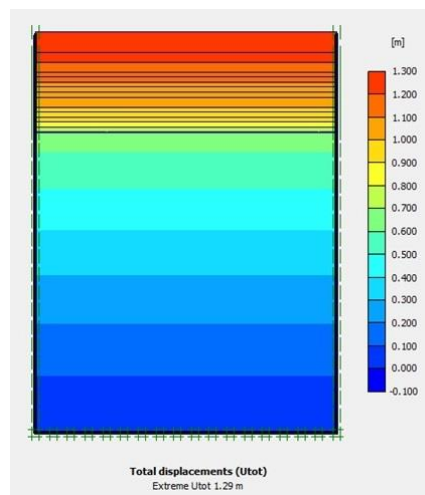
۵- نکته اساسی این است که فرونشست خاک در اثر تحکیم، چگونه به کاهش سختی فنر زیر پی دکلها ارتباط پیدا کند. در این راستا موارد زیر لحاظ شده است:

الف) ابتدا با انجام محاسبات تحلیلی و استفاده از معادلات تحکیم یک بعدی ترزاقی، در اثر افت تراز آب، مقدار فرونشست تحکیمی زمین ( $S_{con}$ ) بدست میآید. در این راستا، لایه تحکیم پذیر به ۸ ریز-لایه با ضخامت مساوی در ناحیه  $H_{con}$  تقسیم شده و مقدار فرونشست تحکیمی زمین ( $S_{con}$ ) با اعمال معادلات نشست تحکیمی ترزاقی [۱۷] به این ۸ ریز-لایه، محاسبه می شود. در این معادله  $i$  شماره لایه است که از ۱ تا ۸ تغییر می کند. بالاترین لایه در  $H_{con}$  لایه شماره ۱ بوده و با پیشروی در عمق شماره لایه افزایش می یابد تا به عدد ۸ برسد.  $C_c$  و  $e_0$  نیز به ترتیب شاخص فشردگی و نسبت تخلخل هر لایه می باشد. مقدار  $C_c$  و  $e_0$  به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵۵ فرض شده است. همچنین  $H_i$  ضخامت هر لایه،  $\sigma'_{0,i}$  تنش موثر اولیه هر لایه،  $\sigma'_{0,i} + \Delta\sigma'_i$  تنش موثر ثانویه هر لایه بعد از نشست

تحکیمی است. ارتفاع بین تراز اولیه آب زیرزمینی و سطح زمین، و  $H_{con}$  ضخامت کل لایه تحکیم پذیر قبل از افت آب می باشد. بعد از افت سطح آب، عمق لایه ی تحکیم پذیر در هر لحظه از تفاضل  $H_{con}-H_0$  به دست می آید که در محاسبات لحاظ شده است.



شکل ۴-۱۱ مقطع قائم نمونه خاک ریزدانه مدل سازی شده در نرم افزار Plaxis با فرض:  $H_0 = 20\text{ m}$ ,  $H_{con} = 60\text{ m}$  و  $S.R.F = 60\%$  (بدون در نظر گرفتن خط انتقال نیرو)



شکل ۴-۱۲ مقادیر فرونشست (SModeling) در مقطع قائم نمونه خاک ریزدانه مدل سازی شده در نرم افزار Plaxis با فرض:  $H_0 = 20\text{ m}$ ,  $H_{con} = 60\text{ m}$  و  $S.R.F = 60\%$  (بدون در نظر گرفتن خط انتقال نیرو)

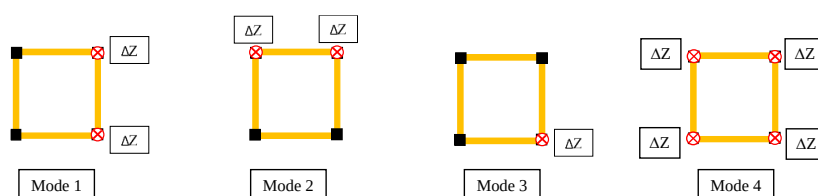
جدول ۴-۷ مقادیر  $S.R.F$  هم ارز ارتفاع افت تراز آب زیرزمینی به دست آمده از انجام آنالیز برگشتی به کمک مقادیر فرونشست ناشی از مدلسازی اجزای محدود و معادله نشست تحکیمی خاک

| (Consolidation Equation Results (eq 2-7 |       |           |                    | Modeling Results            |              |
|-----------------------------------------|-------|-----------|--------------------|-----------------------------|--------------|
| $H_0$                                   | $H_w$ | $H_{con}$ | $(S_c \text{ (m)}$ | $(S_{Modeling} \text{ (m)}$ | $(\%) S.R.F$ |
| 20                                      | 18.58 | 60        | 0.95               | 0.95                        | 10           |
| 20                                      | 19.75 | 60        | 0.99               | 0.99                        | 20           |
| 20                                      | 26.70 | 60        | 1.17               | 1.17                        | 50           |

|    |       |     |      |      |    |
|----|-------|-----|------|------|----|
| 20 | 32.96 | 60  | 1.29 | 1.29 | 60 |
| 20 | 15.86 | 100 | 1.27 | 1.27 | 10 |
| 20 | 16.35 | 100 | 1.30 | 1.30 | 20 |
| 20 | 19.44 | 100 | 1.48 | 1.48 | 50 |
| 20 | 22.06 | 100 | 1.62 | 1.62 | 60 |
| 20 | 26.18 | 100 | 1.82 | 1.82 | 70 |
| 20 | 36.35 | 100 | 2.22 | 2.22 | 80 |

### ۵-۳-۴ الگوی اعمال فرونشست به صورت کاهش سختی اولیه ی خاک زیر پی دکل های انتقال نیرو

در هر دکل در پلان پی چهار الگوی مشخص شده در شکل ۴-۱۳ برای اعمال فرونشست وجود دارد. محل های مشخص شده نشان دهنده ی نقاطی هستند که فرونشست به صورت کاهش سختی خاک زیر پی در تکیه گاه مربوطه بر آنها اعمال شده است.  $\Delta Z$  در شکل زیر نشان دهنده مقدار فرونشست اعمال شده بر هر پایه ی دکل می باشد. بنابراین  $\Delta Z$  یک مقدار بردار مثبت و در جهت ثقل است.



شکل ۴-۱۳ حالات اعمال فرونشست بر پی هر دکل

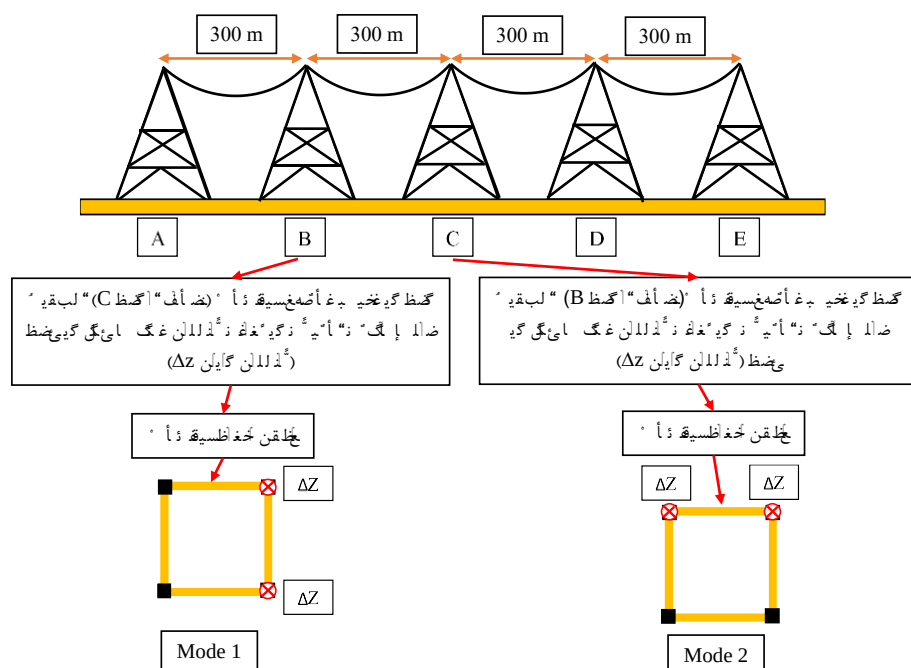
تحلیل های اولیه نشانگر آن است که اعمال فرونشست بر بیش از دو دکل در خط نشان داده شده در شکل ۲-۱ منجر به کاهش اثر فرونشست بر تنش اعضا شده و بیشترین اثر فرونشست بر این خط انتقال در مدل هایی با حداکثر دو دکل تحت اثر فرونشست دیده شده است. بنابراین الگوی اعمال فرونشست در هر مدل به صورت زیر است :

تنها در دکل B، تنها در دکل C، بطور همزمان در دکل های B و C، بطور همزمان در دکل های B و D و حالت ۴ از شکل ۴-۱۳ به صورت اعمال آن بر حداکثر دو دکل از پنج موجود در خط به گونه ای که سایر پی دکل ها مستقیماً در معرض فرونشست قرار نگیرد.

دلیل آن که حالت ۴ از شکل ۴-۱۳ به منظور مدل سازی با سایر حالت ها ترکیب نمی شود، احتمال رخداد ناچیز چنین ترکیبی در واقعیت است.

به عنوان مثال الگوی فرونشست B1C1 مربوط به اثر فرونشست بر خط انتقال با اعمال کاهش سختی یکنواخت در دهانه های ۳۰۰ متری به صورت زیر تعریف میشود:

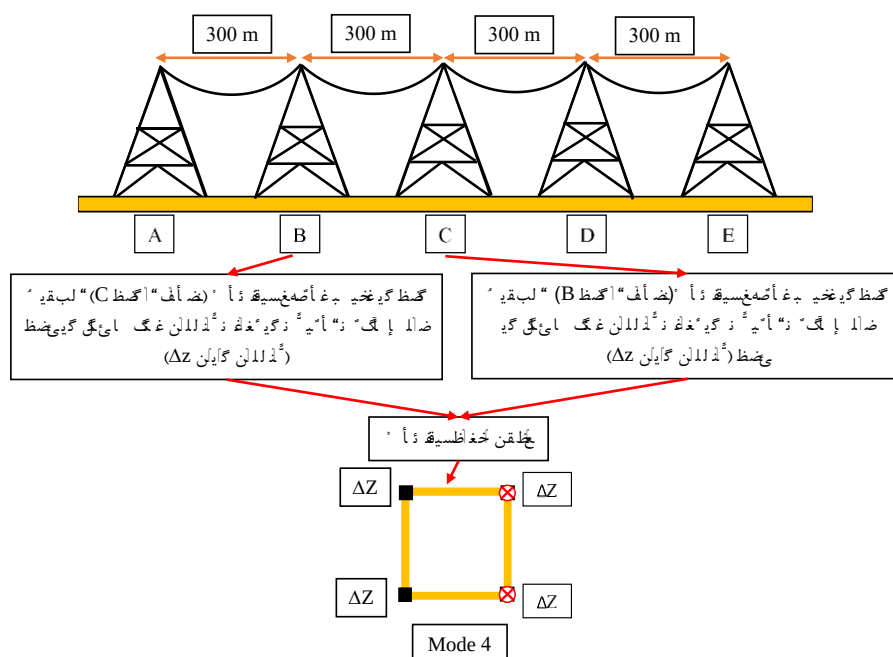
در خط انتقالی با ۵ دکل به فواصل ۳۰۰ متر از یکدیگر قرار دارند. در این خط تنها دکل های B و C همزمان تحت اثر فرونشست به صورت اعمال کاهش سختی بر پایه های آنها به ترتیب به صورت الگوی حالت ۱ و ۲ ذکر شده در شکل ۴-۱۳ قرار گرفته است و سایر پی های دکل های موجود در این خط (دکل های A، D و E) به طور مستقیم در معرض فرونشست قرار ندارند. این حالت در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴ نحوه اعمال الگوی فرونشست B1C2 مربوط به اثر کاهش سختی یکنواخت در دهانه های ۳۰۰ متری

همچنین الگوی فرونشست با اعمال کاهش سختی یکسان B4C4 که به اختصار BC نامیده می شود، در دهانه های ۳۰۰ متری به صورت زیر تعریف می شود:

در خط انتقالی با ۵ دکل خط انتقال به فواصل ۳۰۰ متری قرار گرفته اند. در خط انتقال نیرو تنها دکل های B و C هر کدام همزمان تحت اثر فرونشست به صورت اعمال کاهش سختی یکسان بر تمامی پایه های آنها به صورت شکل ۴-۱۵ می باشند و سایر پی های دکل های موجود در این خط (دکل های A، D و E) مستقیماً در معرض فرونشست قرار ندارند.



شکل ۴-۱۵ نحوه اعمال الگوی فرونشست BC مربوط به اثر کاهش سختی یکسان در پایه های دکل در دهانه های ۳۰۰ متری

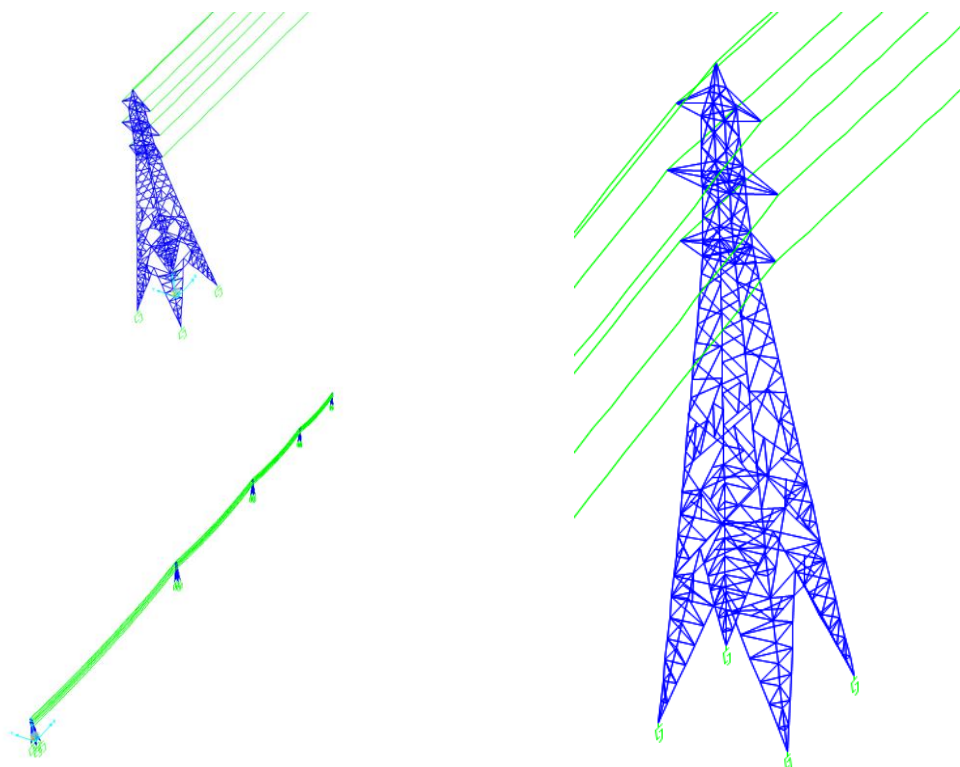
با ترکیب تعداد حالات اعمال فرونشست با الگوهای فرونشست متفاوت، مدل سازی انجام شده است که این حالات عبارتند از:

- ۱- اثر کاهش سختی "یکنواخت": منظور از این الگو اعمال تمامی ترکیب سه حالت اول از شکل ۴-۱۳ بر حداکثر ۲ دکل موجود در خط با دهانه ۳۰۰ متری و ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$  و اعمال فرونشست تنها در دکل B، تنها در دکل C، بطور همزمان در دکل های B و C و بطور همزمان در دکل های B و D، می باشد.
- ۲- اثر تغییر در سختی اولیه ی خاک: شامل بررسی حالات بحرانی به دست آمده از نتایج مورد ۱ و فرض سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$ ،  $2000 \text{ kN/m}$  و  $8000 \text{ kN/m}$  در دهانه های ۳۰۰ متری می باشد.
- ۳- اثر کاهش سختی یکسان: منظور از این الگو بروز حالت ۴ از شکل ۴-۱۳ به صورت اعمال آن بر حداکثر دو دکل از پنج دکل موجود در خط با دهانه های ۳۰۰ متری و ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$  می باشد.
- ۴- اثر تغییر در فواصل دهانه ها: شامل بررسی الگوهای بحرانی به دست آمده از موارد ۱ و ۳، در شرایط داشتن دهانه های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری و ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$  می باشد.
- ۵- اثر وجود دکل زاویه ای در خط: شامل بررسی الگوهای بحرانی به دست آمده از موارد ۱ و ۳، در دهانه های ۳۰۰ متری و با زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$  می باشد.
- ۶- اثر فرونشست غیریکنواخت در محل هر دکل: شامل بررسی الگوهای بحرانی به دست آمده از موارد ۱ و ۳ در دهانه های ۳۰۰ متری ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$  و با اعمال کاهش سختی متفاوت در پایه ها می باشد.
- ۷- اثر اعمال فرونشست بر نیروی موجود در کابل های هادی



### ۴-۳-۶ یافته های حاصل از مدل سازی دکل های انتقال نیرو

برای مدل سازی اثر فرونشست بر دکل های خطوط انتقال نیرو، از جزئیات طراحی خطوط متداول انتقال نیرو در کشور ایران استفاده شده است. در شکل ۴-۱۶ نمایی از دکل های مدل شده در نرم افزار SAP نشان داده شده است. در تمامی مدل ها، ارتفاع هر دکل ۳۱/۵۲ متر و فاصله ی بین دو پایه ی دکل ۶/۱ متر می باشد.

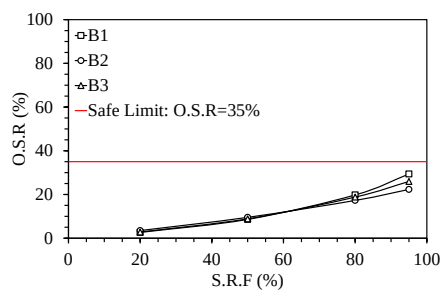


شکل ۴-۱۶ نمایی از خطوط مدل شده در نرم افزار SAP

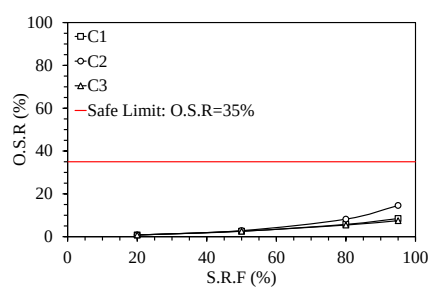
در این مدل ها به منظور بررسی اثر فرونشست، مقدار ضریب کاهش سختی ۲۰، ۵۰، ۸۰ و ۹۵ درصدی برای پایه های تحت اثر فرونشست در نظر گرفته شده است. در این بخش به بررسی نتایج حاصل شده پرداخته می شود.

#### ۴-۳-۶-۱ اثر فرونشست با اعمال کاهش سختی یکنواخت در دهانه ی ۳۰۰ متری

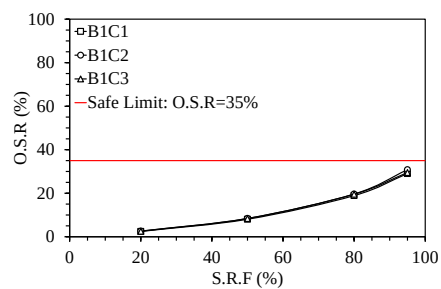
برای بررسی اثر این شرایط بر خط انتقال نیرو، دهانه های ۳۰۰ متری با در نظر گرفتن تمامی حالات ذکر شده در شکل ۴-۱۷ و بخش ۵-۲ فرض شده است. از بررسی ۹۶ مدل حاصل شده از ترکیب این حالت ها نمودارهای زیر بدست آمده است:



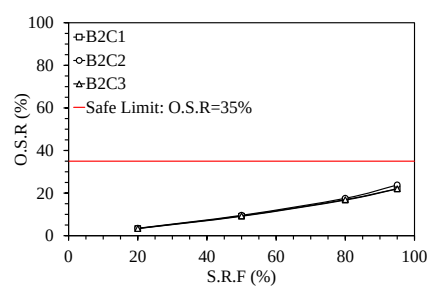
(۱)



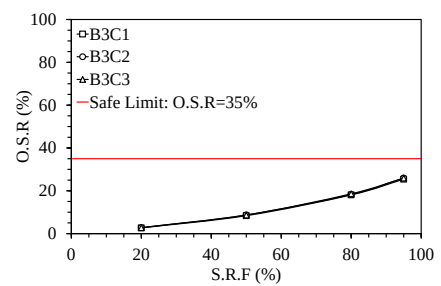
(۲)



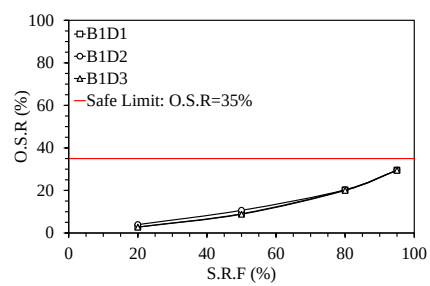
(۳)



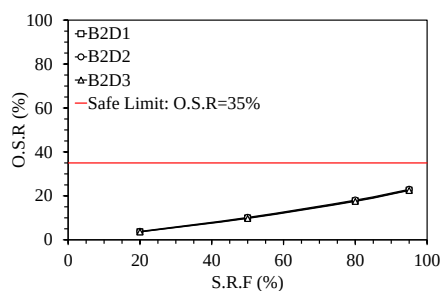
(۴)



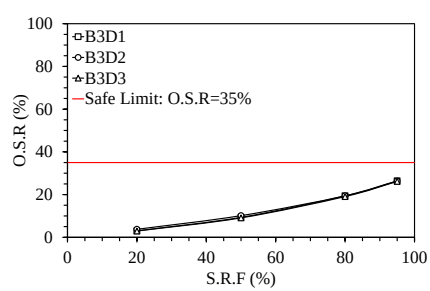
(۵)



(۶)

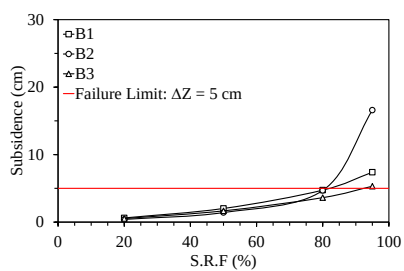


(۷)

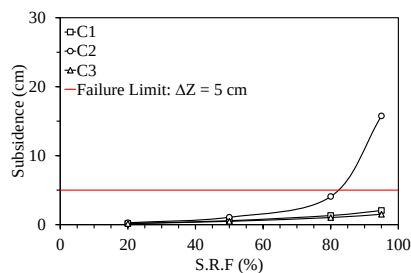


(۸)

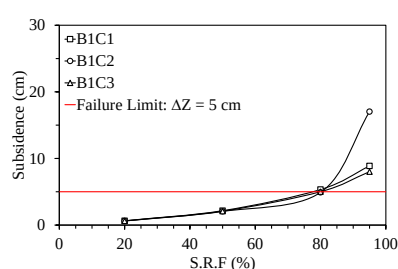
شکل ۴-۱۷ نمودارهای مربوط به نسبت تنش اضافی حداکثر، ناشی از فرونشست در مدل های مختلف با دهانه های ۳۰۰ متری



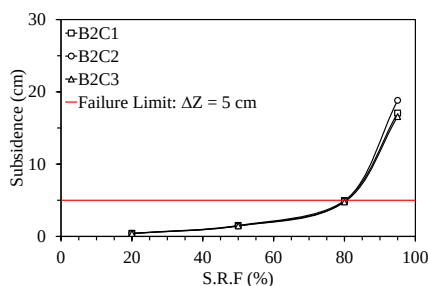
(۱)



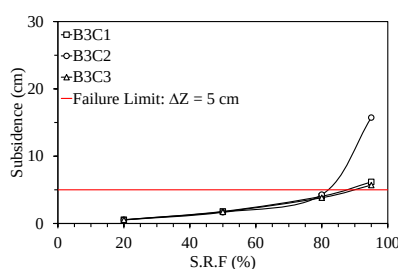
(۲)



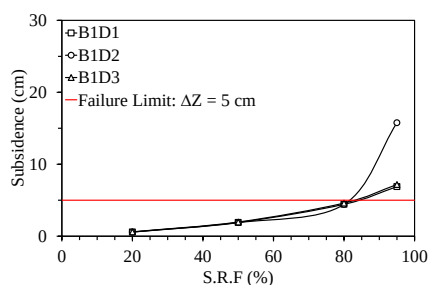
(۳)



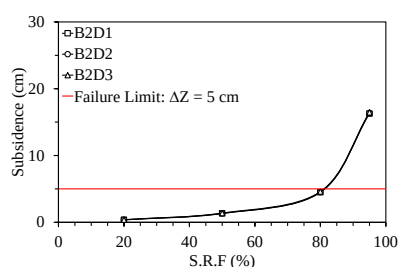
(۴)



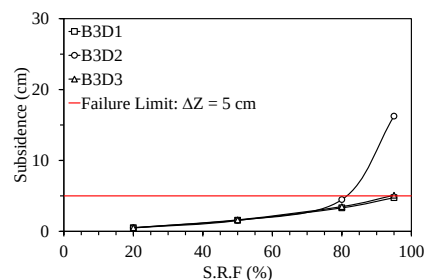
(۵)



(۶)



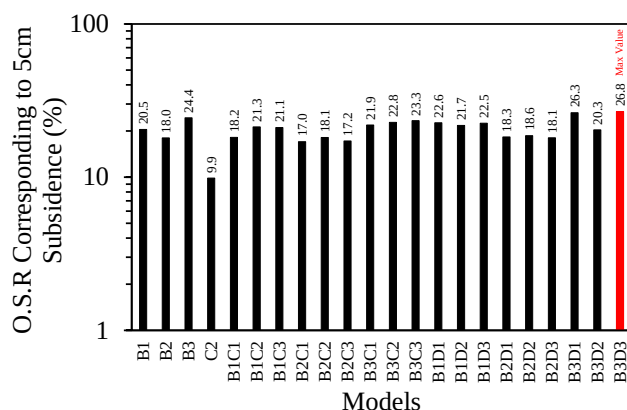
(۷)



(۸)

شکل ۴-۱۸ نمودارهای مربوط به فرونشست حداکثر در مدل های مختلف با دهانه های ۳۰۰ متری

با توجه به شکل ۴-۱۷، تمامی مدل ها نسبت تنش اضافی کمتری از مقدار مجاز ۳۵٪ را نشان میدهند، اما از شکل ۴-۱۸ مشخص می شود که در اکثریت الگوهای فرونشست (به جز الگوهای C1 و C3) مقدار نشست پی از ۵ سانتی متر (مقدار مجاز فرونشست با توجه به ضوابط آیین نامه ای) عبور کرده است. بنابراین مقدار نشست پی نقشی تعیین کننده در بررسی پایداری سازه داشته، چراکه در اکثر الگوها با کاهش سختی پایه ها، نشست پی از این مقدار عبور کرده و مدل دچار خرابی شده است اما در تمامی حالات مقدار نسبت تنش اضافی حداکثر در محدوده ایمن قرار داشته و این پارامتر نقش تعیین کننده ای در بررسی پایداری کلی نداشته است. در شکل ۴-۱۹ نسبت تنش اضافی هم ارز با مقادیر فرونشست ۵ سانتی متر (مقدار مجاز) برای تمامی الگوهای فرونشست به جز الگوهای C1 و C3 که مقادیر فرونشست آنها از ۵ سانتی متر تجاوز نکرده را نشان داده شده است.

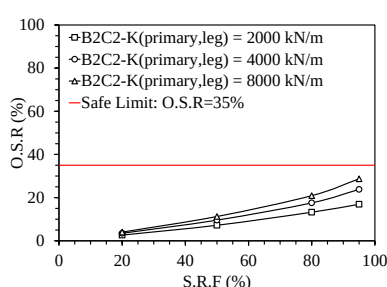


شکل ۴-۱۹ مقادیر نسبت تنش اضافی حداکثر هم‌ارز با مقادیر فرونشست ۵ سانتی‌متر در الگوها

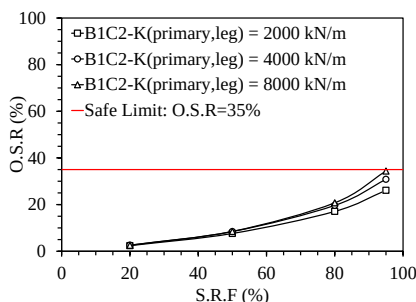
همچنین از اطلاعات ارائه شده در دو شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸، بیشترین مقادیر نسبت تنش اضافی حداکثر و نشست پی به ترتیب ۳۰٪/۸۲ و ۱۸/۸۲ سانتی‌متر به دست آمده که این مقادیر در الگوهای فرونشست B1C2 و B2C2 مشاهده شده است. از شکل ۴-۱۹ نیز بیشترین مقدار نسبت تنش اضافی معادل با فرونشست مجاز ۵ سانتی‌متر، ۲۶٪/۸ بوده که این مقدار در الگوی فرونشست B3D3 مشاهده شده است. به عبارت دیگر برای آنکه در الگوی B3D3، مقدار فرونشست از حد مجاز (۵ سانتی‌متر) عبور نکند، حداکثر نسبت تنش اضافی دکل‌های موجود در خط نباید از مقدار ۲۶٪/۸ تجاوز کند.

## ۲-۶-۳-۴ تاثیر پذیری نشست پی دکلها از سختی اولیه خاک

همانطور که در بخش ۱-۱۰ اشاره شد، به عنوان الگوی مدلسازی اصلی، مقدار سختی اولیه خاک 4000 kN/m لحاظ شده است. در این بخش به مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌هایی با مقدار سختی اولیه 4000 kN/m، 2000 kN/m و 8000 kN/m پرداخته می‌شود. بدین منظور در دو مدل B1C2 و B2C2 که با توجه به بخش ۲-۶-۱ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر نسبت تنش اضافی حداکثر و فرونشست بوده، این مقایسه انجام شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در نمودار ۲-۶ ارائه شده است:

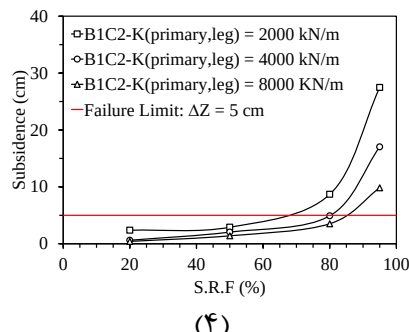
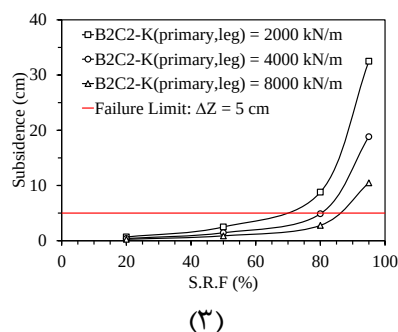


(۱)



(۲)

۲۰ نمودارهای  
حاصل از مدل  
سختی اولیه ی  
۲۰۰۰ kN/m و  
نسبت ۱ و ۲  
ناشی از  
۳ و ۴ فرونشست  
های مختلف

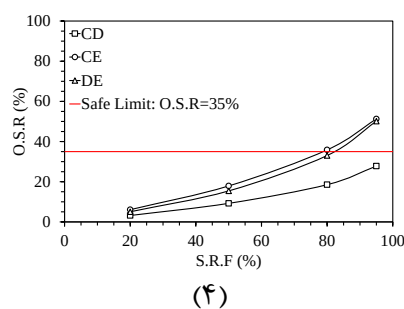
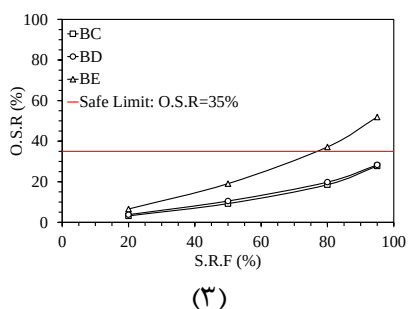
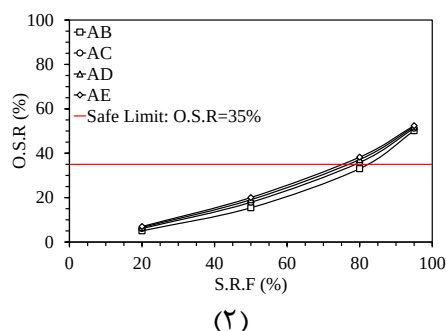
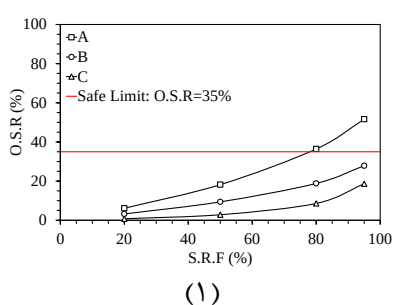


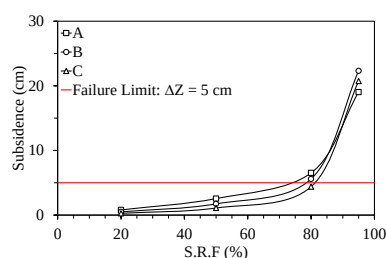
شکل ۴-  
مقایسه ی نتایج  
هایی با مقدار  
۴۰۰۰ kN/m  
۸۰۰۰ kN/m:  
تنش حداکثر  
فرونشست  
حداکثر در مدل

با توجه به شکل ۴-۲۰، در مدل B1C2 برای مقدار سختی اولیه ی ۸۰۰۰ kN/m، بیشترین مقدار O.S.R (39/34%) و در مدل B2C2 با مقدار سختی اولیه ی ۲۰۰۰ kN/m، بیشترین مقدار نشست پی (۳۲/۵۰ سانتی متر) به دست آمده است و در S.R.F یکسان با افزایش سختی اولیه ی خاک، مقدار O.S.R افزایش و نشست پی کاهش می یابد. همچنین همانند نتایج به دست آمده در بخش ۲-۶-۱، تمامی مقادیر نسبت تنش حداکثر از مقدار مجاز ۳۵٪ کمتر بوده اما در تمامی حالات بررسی شده مقدار نشست پی از مقدار مجاز ۵ سانتی متر تجاوز کرده که به معنای تعیین کننده بودن مقدار نشست در پایداری کل سازه است.

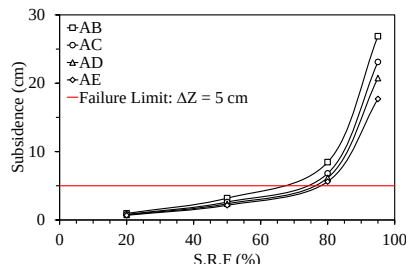
### ۳-۶-۳-۴ اثر فرونشست با اعمال کاهش سختی یکسان در پایه های دکل در دهانه های ۳۰۰ متری

برای بررسی اثر فرونشست یکسان پایه های دکل ها، مدل هایی با دهانه های ۳۰۰ متری ساخته شده است. به منظور اعمال نشست، کاهش سختی برای کل پایه های دکل های در معرض فرونشست (الگوی چهارم در شکل ۴-۲۱ که حداکثر دو دکل از پنج دکل موجود در خط دچار فرونشست شده اند) در نظر گرفته شده است. سختی اولیه ی موجود نیز ۴۰۰۰ kN/m در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این مدلسازی به شکل زیر نمایش داده می شود.

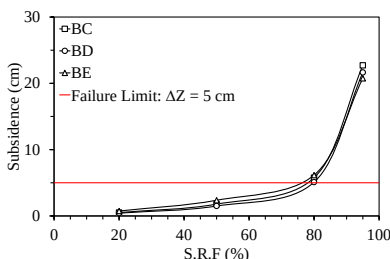




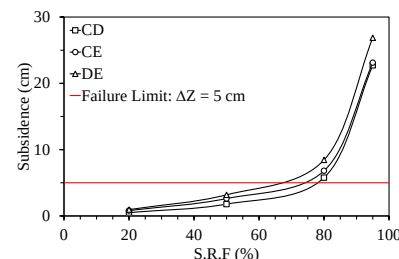
(۵)



(۶)



(۷)



(۸)

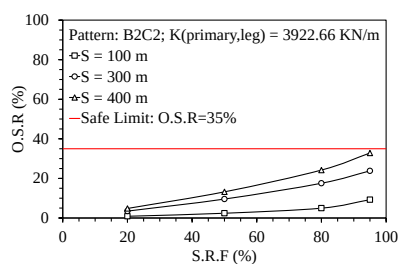
شکل ۴-۲۱ مقایسه مقادیر در مدل های دهانه ی ۳۰۰ متری : ۱ و ۲ و ۳ و ۴) حداکثر نسبت تنش متناظر با فرونشست یکسان پایه ۵ و ۶ و ۷ و ۸) فرونشست حداکثر یکسان پایه

از اطلاعات ارائه شده در شکل ۴-۲۱، مقادیر بیشترین نسبت تنش ( $30/82$ ) و فرونشست ( $18/82$  سانتی متر) حاصل از کاهش سختی یکنواخت به ترتیب مربوط به الگوهای B1C2 و B2C2 بوده است. به همین ترتیب مقادیر بیشترین نسبت تنش ( $52/43$ ) و فرونشست ( $26/87$  سانتی متر) حاصل از کاهش سختی یکسان تمامی پایه های دکل به ترتیب از الگوهای AE و DE بدست آمده است. با توجه به این داده ها، برای بررسی سایر موارد یعنی اثر فاصله ی دهانه ها (با فواصل ۱۰۰ و ۴۰۰ متری)، وجود دکل زاویه ای (با زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه)، فرونشست غیریکنواخت در محل هر دکل و اثر فرونشست بر کابل ها از حالت های دارای بیشترین مقادیر نسبت تنش و فرونشست در دو حالت کاهش سختی غیریکنواخت و یکنواخت یعنی الگوهای فرونشست B1C2، B2C2، AE و DE استفاده شده است.

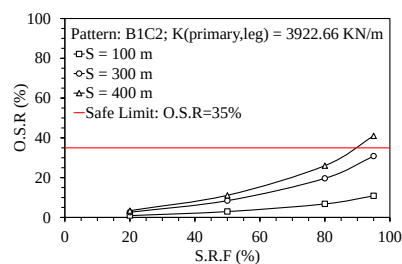
#### ۴-۳-۶-۴ اثر فاصله دهانه دکلها در خط انتقال نیرو

در این بخش با فرض سختی اولیه ی خاک  $4000 \text{ kN/m}$  اثر فواصل دهانه های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری بر فرونشست برای حالات دارای بیشترین مقادیر نسبت تنش اضافی و فرونشست ذکر شده در انتهای بخش ۲-۶-۳ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۴-۲۲ قابل مشاهده است.

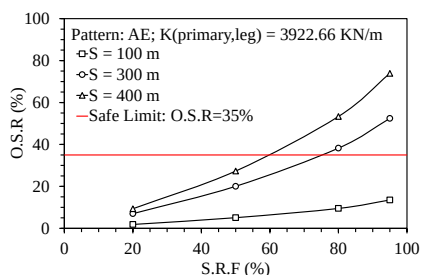
در این مدل سازی ها، بیشترین مقدار نسبت تنش اضافی  $73/91$  و فرونشست  $34/89$  سانتی متر بوده که به ترتیب در الگوهای AE و DE هر دو در دهانه ی ۴۰۰ مشاهده شده است. همچنین مشاهده می شود که در S.R.F یکسان با افزایش فواصل دهانه ها مقدار فرونشست و حداکثر درصد O.S.R افزایش می یابد.



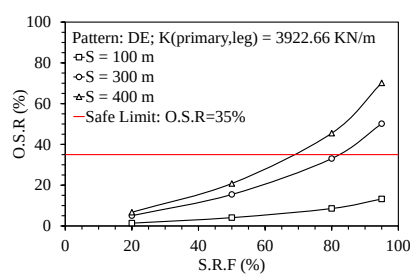
(۱)



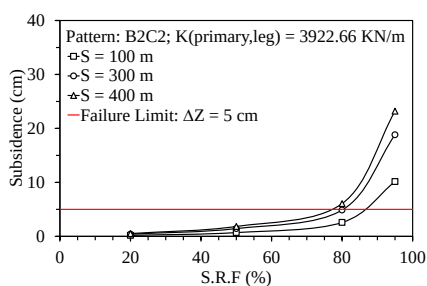
(۲)



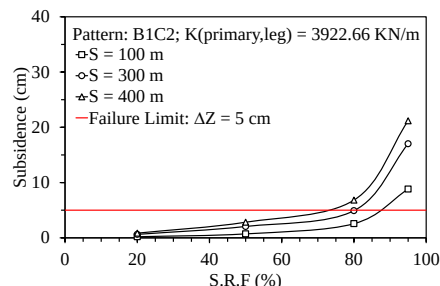
(۳)



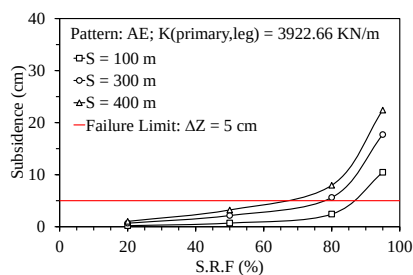
(۴)



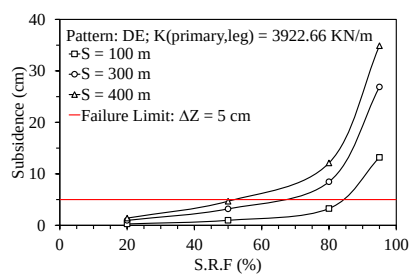
(۵)



(۶)



(۷)

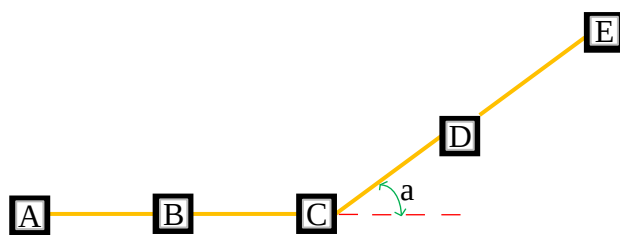


(۸)

شکل ۴-۲۲ مقایسه مقادیر در مدل های دهانه ای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۳ و ۴ (حداکثر نسبت تنش متناظر با فرونشست پایه ۵ و ۷ و ۸) فرونشست حداکثر پایه

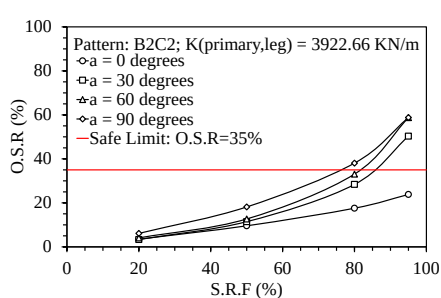
#### ۵-۶-۳-۴ اثر فرونشست بر خط با وجود دکل زاویه ای

به منظور بررسی اثر وجود دکل زاویه ای، مدل هایی با دهانه های ۳۰۰ متری و سختی اولیه ی خاک 4000 kN/m ساخته شده است. دکل زاویه ای بصورت شکل ۴-۲۳ با زاویه انحراف (a) در نظر گرفته شده است:

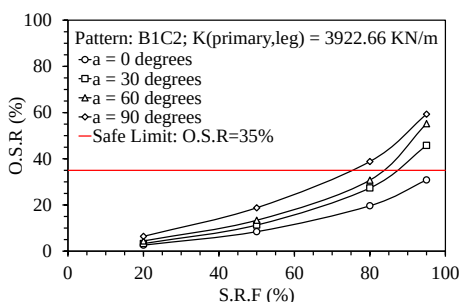


شکل ۴-۲۳ پلان خط دارای دکل زاویه ای

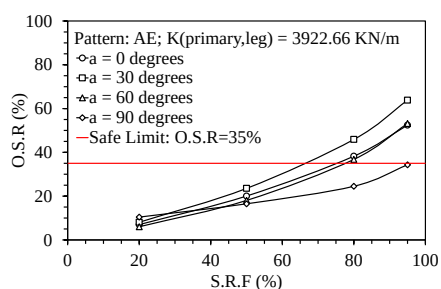
با در نظر گرفتن مقادیر  $a = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  نتایج حاصل از این مدلسازی به صورت شکل ۴-۲۴ نمایش داده شده که نشان می دهد بیشترین مقدار O.S.R برابر با  $63\%/83$  در الگوی AE و بیشترین نشست پی برابر با  $34/89$  سانتی متر در الگوی DE رخ می دهد که هر دو در مدلی با وجود زاویه انحراف  $a = 30^\circ$  مشاهده شده است.



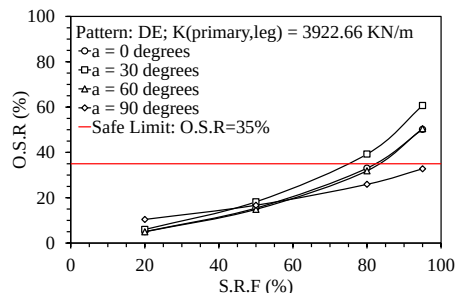
(۱)



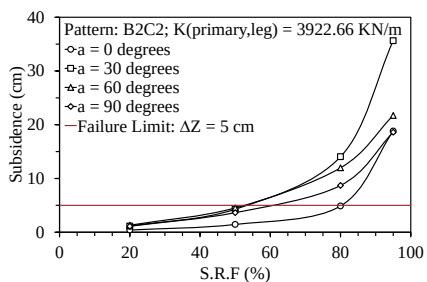
(۲)



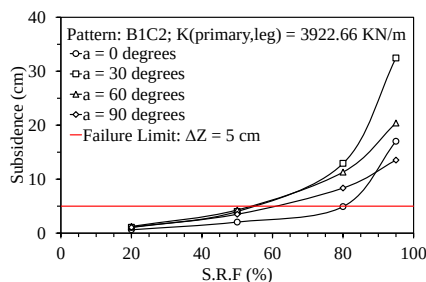
(۳)



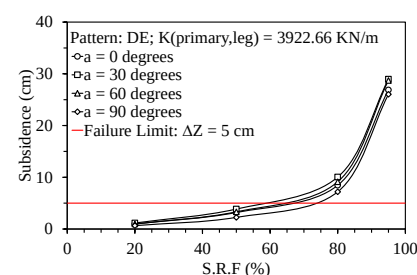
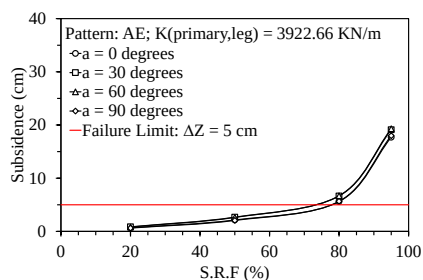
(۴)



(۵)



(۶)





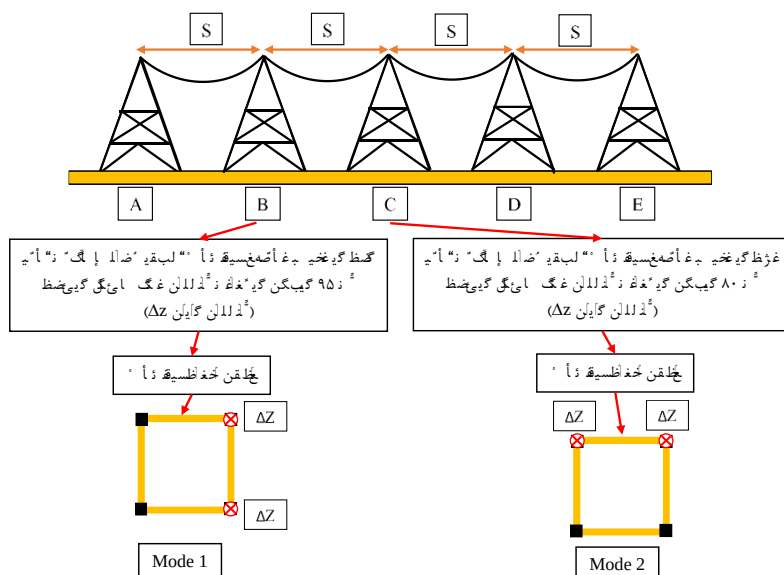
(۷)

(۸)

شکل ۴-۲۴ مقایسه مقادیر در مدل های دهانه ی ۳۰۰ متری با وجود دکل زاویه ای : ۲،۳، ۴) حداکثر نسبت تنش ۷، ۶، ۸) فرونشست حداکثر

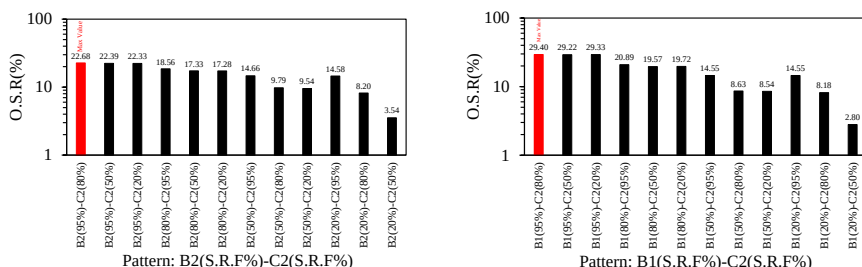
#### ۴-۳-۶-۶ اثر فرونشست به صورت کاهش سختی غیریکنواخت پایه در محل هر دکل

در این بخش منظور از کاهش سختی غیریکنواخت آن است که دو دکل از پنج دکل موجود در خط تحت اثر مستقیم مقادیر متفاوتی از فرونشست نسبت به یکدیگر، کاهش سختی پایه ی متفاوتی نسبت به یکدیگر تجربه کرده اند، اما در هر کدام از دکل های در معرض مستقیم فرونشست، تمامی پایه های دکل مدنظر دارای کاهش سختی یکسانی می باشد. به طور مثال الگوی B1(95%)-C2(80%) به صورت شکل ۴-۲۵ مدل سازی شده است.



شکل ۴-۲۵ نحوه ی مدل سازی الگوی B1(95%)-C2(80%) فرونشست به صورت کاهش سختی بستر پی غیریکنواخت

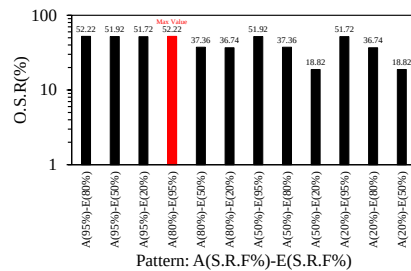
به منظور بررسی اثر فرونشست غیریکنواخت در محل هر دکل، مدل هایی با دهانه های ۳۰۰ متری در بحرانی ترین حالت های بررسی شده پیشین، یعنی B1C2، B2C2، AE و DE، ساخته شده است. نتایج حاصل به صورت شکل ۴-۲۶ می باشد.



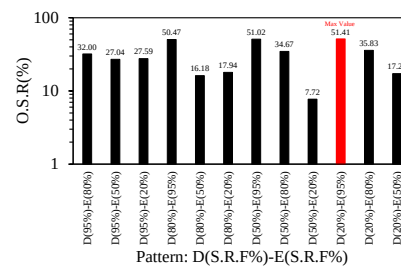
(۱)

(۲)

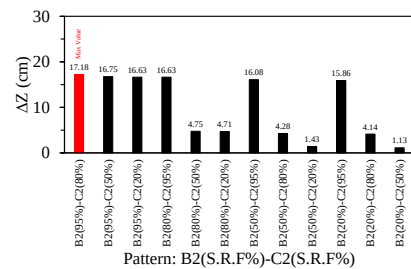
## بررسی میزان آسیب پذیری فونداسیون سازه های انتقال و فوق توزیع از مقدار فرونشست ۲۴۰



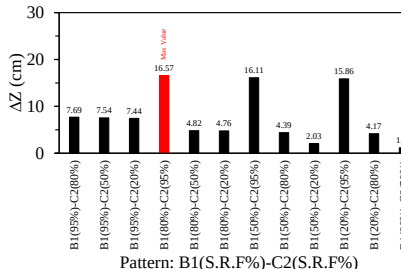
(۳)



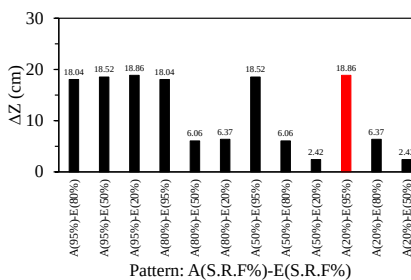
(۴)



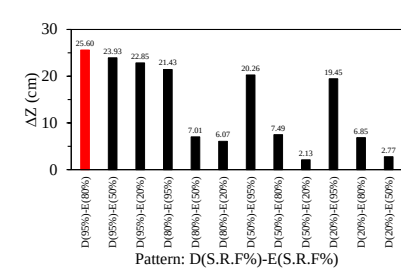
(۵)



(۶)



(۷)



(۸)

شکل ۴-۲۶ یسه مقادیر در مدل های دهانه ی ۳۰۰ متری با وجود اثر فرونشست غیریکنواخت در محل هر دکل: ۱۰،۲،۳ و ۴ حداکثر نسبت تنش ۵،۶،۷ و ۸) فرونشست حداکثر

با توجه به شکل ۴-۲۶ بیشترین مقادیر O.S.R برابر با ۵۲/۲۲٪ در الگوی فرونشست A(95%)-E(80%) و بیشترین نشست پی برابر با ۲۵/۶۰ سانتی متر در الگوی فرونشست D(95%)E(80%) مشاهده شده که نشانگر اثر فرونشست و تنش اعضای بیشتر در الگوهای دارای کاهش سختی یکسان پایه نسبت به عدم تقارن سختی ها در یک دکل می باشد.

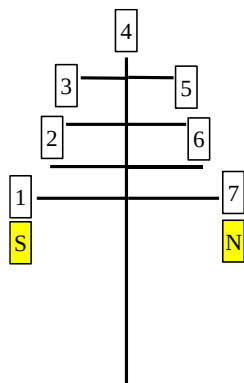
### ۷-۶-۳-۴ نیروی ایجاد شده در کابل های هادی انتقال نیرو ناشی از فرونشست پی دکل ها

اثر فرونشست بر کابل های هادی موجود در دکل های قرار گرفته در امتداد خط انتقال، در اعمال کاهش سختی در پایه ها تا ۹۵٪، بررسی و به کمک رابطه ی زیر تعریف شده است:

$$R_c = \frac{P_S \text{ (بار ایجاد شده در کابل ناشی از فرونشست با اعمال کاهش سختی در پایه)}}{P_D \text{ (بار مرده)}} \quad (۲-۸)$$

برای بدست آوردن مقدار نسبت بار اضافی ناشی از فرونشست در کابل ( $R_c$ )، باید مقادیر بار مرده در کابل ها مشخص شود که این مقادیر، بسته به موقعیت کابل ها در هر دکل، متفاوت است. مکان نمایی هر کابل روی هر دکل به صورت

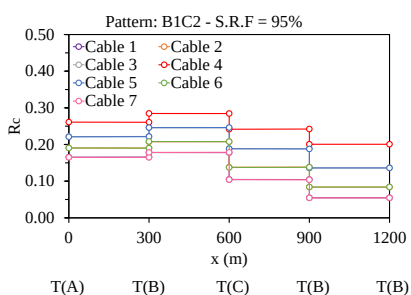
شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است. مقادیر بار مرده برای هر الگوی فرونشست به صورت جداولی جداگانه در پیوست این گزارش ارائه شده است.



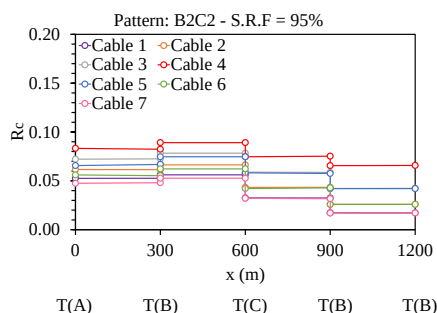
شکل ۴-۲۷ موقعیت کابل های متصل به هر دکل در مقطع شمالی-جنوبی

#### ۱-۷-۶-۴ اثر فرونشست بر کابل ها با اعمال کاهش سختی یکنواخت و یکسان در دهانه ی ۳۰۰ متری

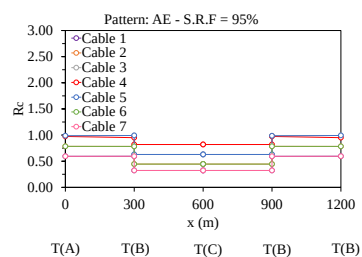
تأثیر فرونشست بر کابل ها در حالت های دارای کاهش سختی یکنواخت و یکسان دهانه ی ۳۰۰ متری و در مدل های با بیشترین مقدار فرونشست و نسبت تنش حداکثر در محل کاهش سختی ۹۵ درصدی در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. در این نمودار منظور از  $T(A)$  تا  $T(E)$ ، موقعیت دکل های A تا E می باشد.



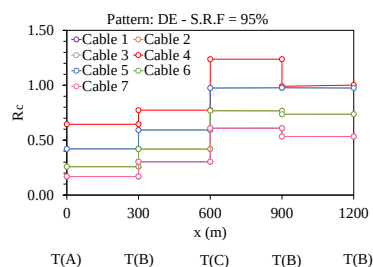
(۱)



(۲)



(۳)



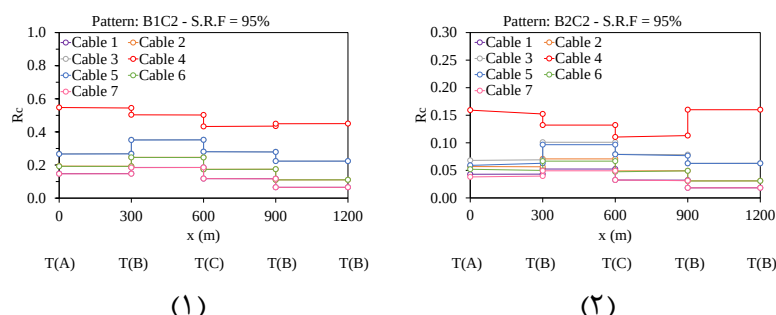
(۴)

شکل ۴-۲۸ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای کاهش سختی یکنواخت و یکسان در دهانه ی ۳۰۰ متری

با بررسی شکل ۴-۲۸ مشاهده میشود که بیشترین مقدار  $R_c$  مربوط به کابل ۴ از دکل C در الگوی دارای کاهش سختی یکسان DE، برابر با ۱/۲۴ و در مدل دارای کاهش سختی یکنواخت مربوط به کابل ۴ از دکل B الگوی B1C2، برابر با مقدار ۰/۲۸ دست آمده است.

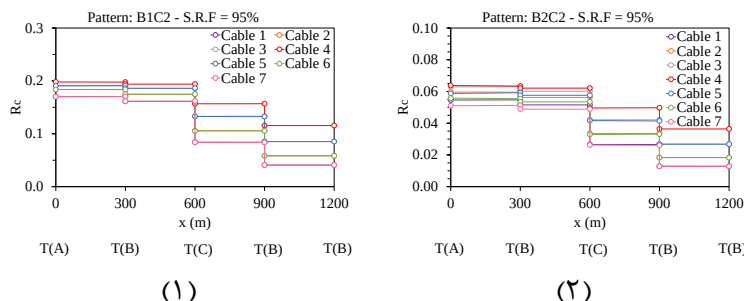
## ۲-۷-۳-۴ اثر فرونشست بر کابل ها با تغییر در سختی اولیه خاک

برای بررسی اثر سختی اولیه خاک بر کابل های هادی، بحرانی ترین حالت ها در دهانه ی ۳۰۰ متری با احتساب سختی اولیه ی ۲۰۰۰ kN/m و ۸۰۰۰ kN/m تحلیل شده است:



شکل ۴-۲۹ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای کاهش سختی یکنواخت در دهانه ی ۳۰۰ متری با سختی اولیه ی kN/m ۲۰۰۰

از شکل ۴-۲۹ بیشترین مقدار  $R_c$  در مدل های دارای سختی اولیه ی ۲۰۰۰ kN/m مربوط به کابل ۴ از دکل A در الگوی B1C2، برابر با ۰/۵۵ به دست آمده است.

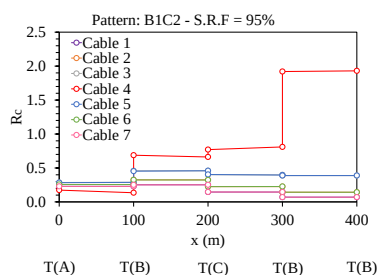


شکل ۴-۳۰ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای کاهش سختی یکنواخت در دهانه ی ۳۰۰ متری با سختی اولیه ی kN/m ۸۰۰۰

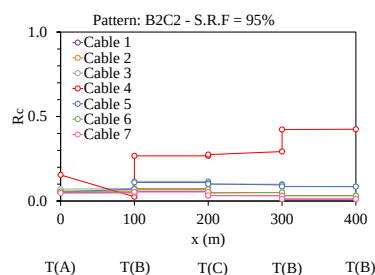
با توجه به شکل ۴-۳۰ بیشترین مقدار  $R_c$  در مدل های دارای سختی اولیه ی ۸۰۰۰ kN/m مربوط به کابل ۴ از دکل A در الگوی B1C2، برابر با ۰/۲۰ بوده است.

## ۳-۷-۳-۴ اثر فرونشست بر کابل ها در فواصل دهانه مختلف

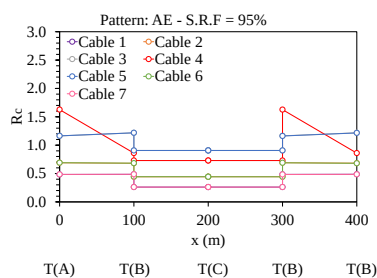
در دهانه های ۱۰۰ و ۴۰۰ متری نیز اثر فرونشست بر کابل های هادی با بررسی مدل های با بیشترین مقدار فرونشست و نسبت تنش حداکثر در اثر اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی، انجام شده که نتایج آن در نمودارهای ۲-۱۴ و ۲-۱۵ نشان داده شده است:



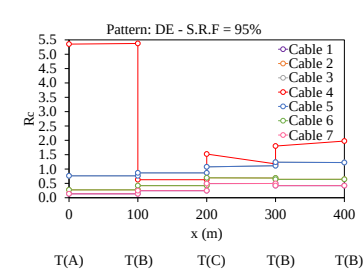
(۱)



(۲)



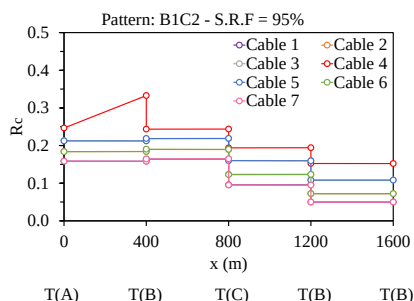
(۳)



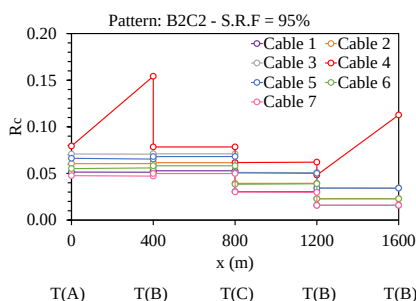
(۴)

شکل ۳۱-۴ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل‌ها در مدل‌های دهانه‌ی ۱۰۰ متری

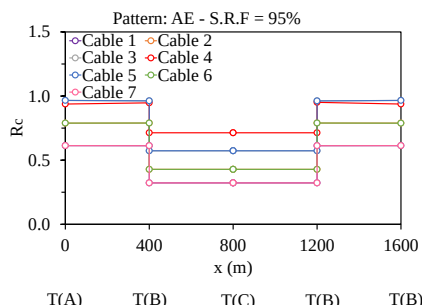
از شکل ۳۱-۴ بیشترین مقدار  $R_c$  مربوط به کابل ۴ از دکل B در مدل دارای کاهش سختی یکسان DE، برابر با ۵/۳۸ و در مدل دارای کاهش سختی یکنواخت مربوط به کابل ۴ از دکل E در حالت B1C2، برابر با مقدار ۱/۹۳ به دست آمده است. در شکل ۳۲-۴ نیز به نتایج حاصل از مدل‌های دارای دهانه‌های ۴۰۰ متری ارائه شده است.



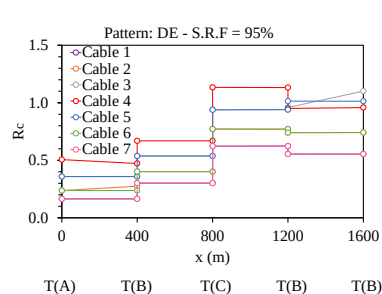
(۱)



(۲)



(۳)



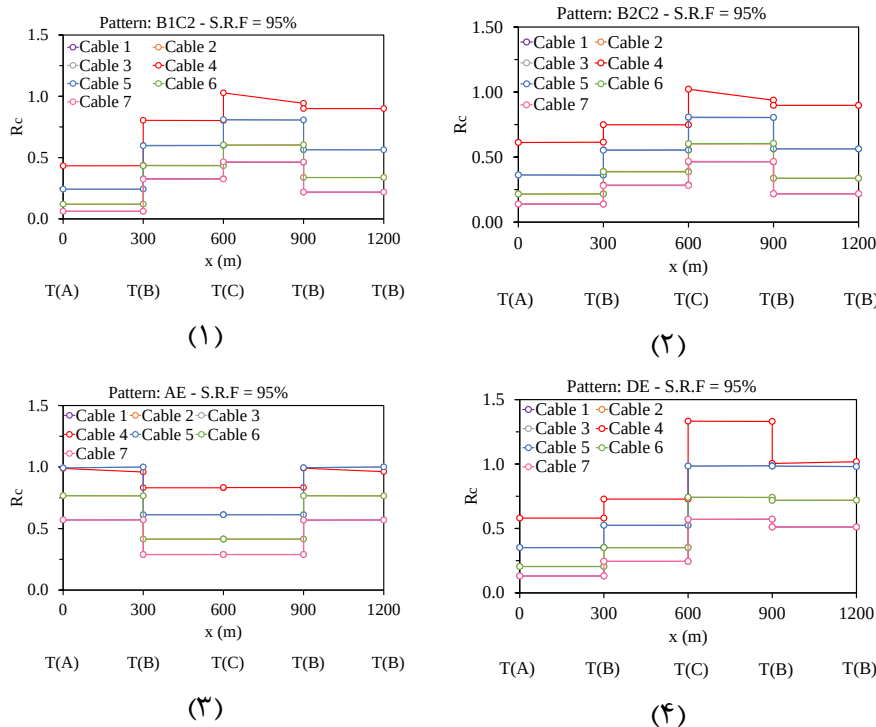
(۴)

شکل ۳۲-۴ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل‌ها در مدل‌های دهانه‌ی ۴۰۰ متری

با توجه به شکل ۴-۳۲ بیشترین مقدار  $R_c$  مربوط به کابل ۴ از دکل C در الگوی دارای کاهش سختی یکسان DE، برابر با ۱/۱۳ و در الگوی دارای کاهش سختی یکنواخت مربوط به کابل ۴ از دکل B با الگوی B1C2 و برابر با مقدار ۰/۳۳ به دست آمده است.

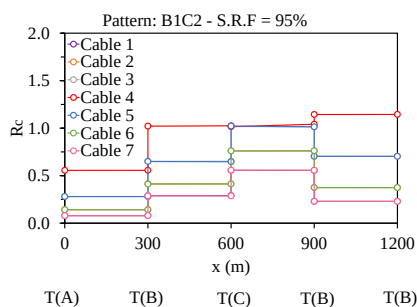
#### ۴-۷-۶-۳-۴ اثر فرونشست بر کابل ها در خطوط دارای دکل زاویه ای

نتایج حاصل از بررسی اثر فرونشست بر کابل های هادی موجود در دکل زاویه ای، برای بحرانی ترین الگوها در دهانه ای ۳۰۰ متری و با احتساب زاویه ای دکل برابر با  $30^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$ ، به ترتیب در نمودارهای ۲-۱۶، ۲-۱۷ و ۲-۱۸ نشان شده است. از بررسی نتایج حاصل از تحلیل مدل های دارای دکل زاویه ای با زاویه ای انحراف  $a = 30^\circ$  (شکل ۴-۳۳)، بیشترین مقدار  $R_c$  برابر با مقدار ۱/۳۳ در کابل ۴ از دکل C در الگوی دارای کاهش سختی یکسان DE، و برابر با مقدار ۱/۰۳ در کابل ۴ از دکل C در الگوی کاهش سختی یکنواخت B1C2، مشاهده شده است.

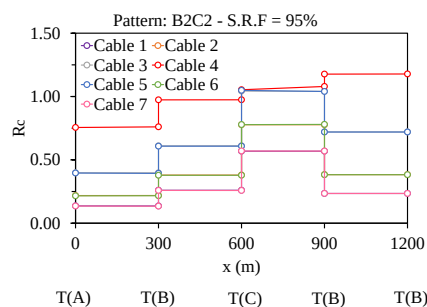


شکل ۴-۳۳ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای دکل زاویه ای با زاویه ای انحراف  $a = 30^\circ$

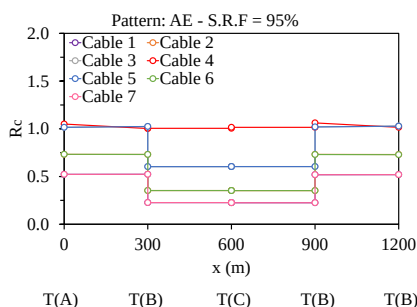
به همین منوال، از تحلیل نتایج حاصل از مدل های دارای دکل زاویه ای با زاویه ای انحراف  $a = 60^\circ$  (شکل ۴-۳۴)، بیشترین مقدار  $R_c$  برابر با مقدار ۱/۰۹ در کابل ۴ از دکل E در الگوی دارای کاهش سختی یکسان DE، و برابر با ۱/۱۸ در کابل ۴ از دکل E در الگوی کاهش سختی یکنواخت B2C2، به دست آمده است.



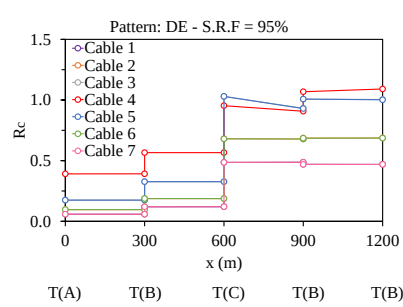
(۱)



(۲)



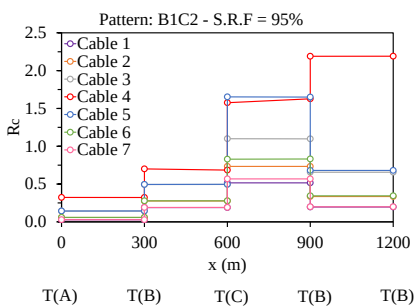
(۳)



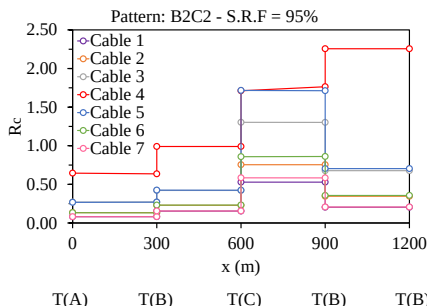
(۴)

شکل ۴-۳۴ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای دکل زاویه ای با زاویه ی انحراف  $a = 60^\circ$

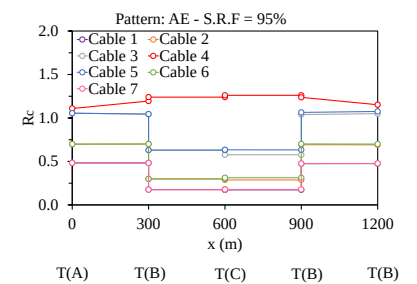
برای مدل های دارای دکل زاویه ای با زاویه ی انحراف  $a = 90^\circ$  با توجه به شکل ۴-۳۵، بیشترین مقدار  $R_c$  با مقدار  $1/29$  در کابل ۴ از دکل E در الگوی دارای کاهش سختی یکسان DE و  $2/26$  در کابل ۴ از دکل های D و E در الگوی کاهش سختی یکنواخت B2C2 به دست آمده است.



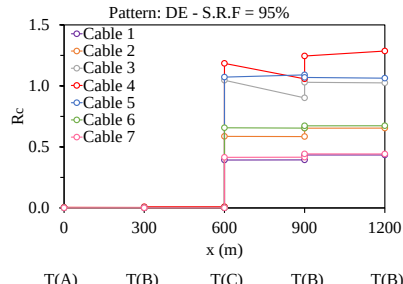
(۱)



(۲)



(۳)

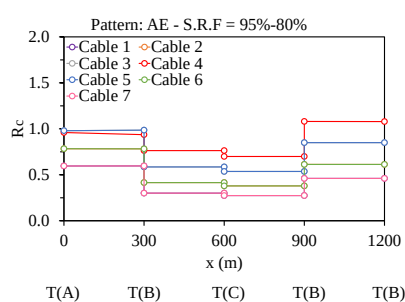


(۴)

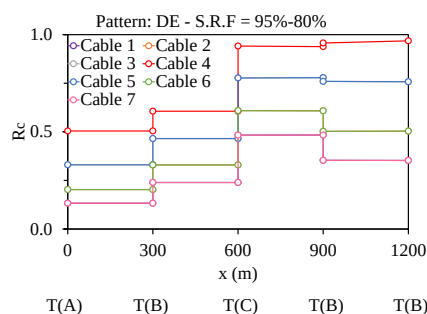
شکل ۴-۳۵ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای دکل زاویه ای با زاویه ی انحراف  $a = 90^\circ$

#### ۵-۷-۶-۴ اثر فرونشست بر کابل ها با اعمال کاهش سختی غیریکنواخت در محل هر دکل

بررسی اثر فرونشست بر کابلها با اعمال کاهش سختی غیریکنواخت در محل هر دکل، در دهانه ی ۳۰۰ متری و اعمال کاهش سختی ۹۵ و ۸۰ درصدی انجام شده که نتایج آن در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است. از داده های ارائه شده در شکل ۴-۳۶، بیشترین مقدار  $R_c$  با مقدار ۱/۰۸ در کابل ۴ از دکل D در الگوی  $E(80\%) - A(95\%)$  به دست میاید.



(۱)



(۲)

شکل ۴-۳۶ مقایسه مقادیر  $R_c$  کابل ها در مدل های دارای کاهش سختی غیریکنواخت در محل هر دکل و در دهانه ی ۳۰۰ متری

#### ۷-۳-۴ یافته های حاصل از مدل سازی تونل انتقال نیرو

برای بررسی اثر فرونشست خاک بر تونل های انتقال نیرو در شرایط مختلف، مشخصات نوعی تونل های انتقال در ایران مد نظر قرار گرفته، که بسته به نوع شرایط اعمال فرونشست، در اعماق مدفون و یا قطرهای مختلف، مدلسازی شده اند. مشخصات خاک در نظر گرفته شده در این بخش نیز همانند آنچه در بخش ۲-۴ ذکر شد، لحاظ شده است. ضمناً، مقدار ضریب کاهش سختی ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۵ درصدی برای خاک ریزدانه نوعی اطراف تونل تحت اثر فرونشست در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی اثر عمق مدفون ( $D_T$ )، تونل های انتقال با عمق مدفون ۱۰ و ۱۵ متری مدل شده اند. همچنین اثر شعاع تونل ( $R_T$ ) با بررسی دو شعاع ۲ و ۵ متری مورد مطالعه قرار گرفته، و بنابراین، سه نوع حالت به شرح زیر، در مدلسازی ها منظور شده است:

- ۱- حالت اول: شعاع تونل انتقال ۲ متر و عمق مدفون آن از سطح زمین ۱۰ متر است.
- ۲- حالت دوم: شعاع تونل انتقال ۲ متر و عمق مدفون آن از سطح زمین ۱۵ متر است.
- ۳- حالت سوم: شعاع تونل انتقال ۵ متر و عمق مدفون آن از سطح زمین ۱۰ متر است.

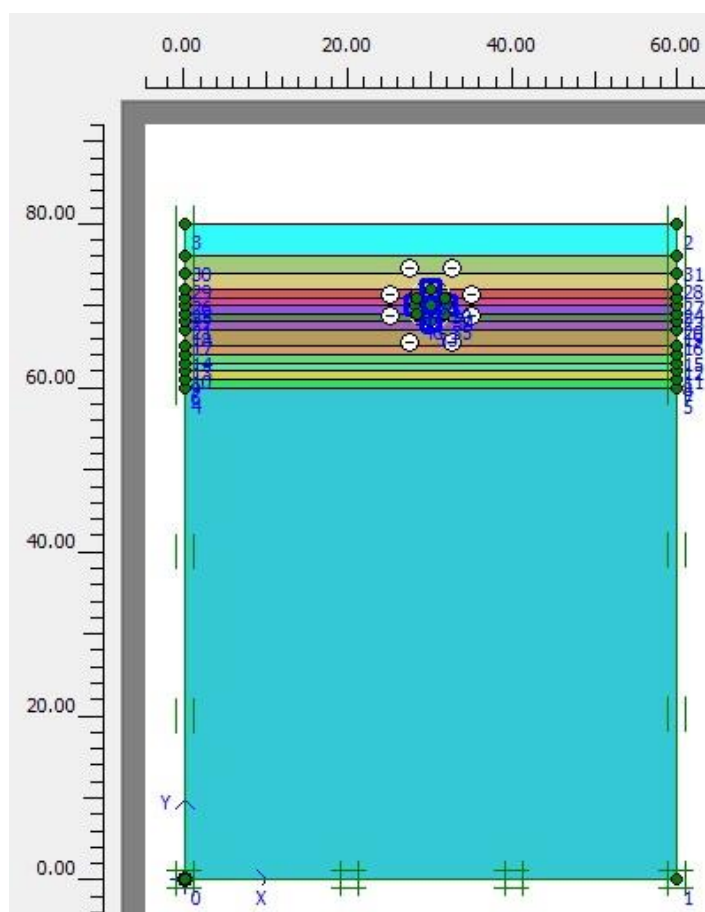
مشابه با موارد ذکر شده برای دکل های انتقال نیرو و آنچه در جدول ۴-۷ در بخش ۲-۴ ارائه شد، مقادیر فرونشست به دست آمده از مدلسازی فرونشست خاک اطراف تونل های انتقال نیرو با اعمال کاهش سختی معادل با افت تراز آب زیرزمینی برای این سه حالت به صورت جدول ۴-۸ ارائه شده است. همچنین به عنوان مثال، شکل کلی مدل تحلیل



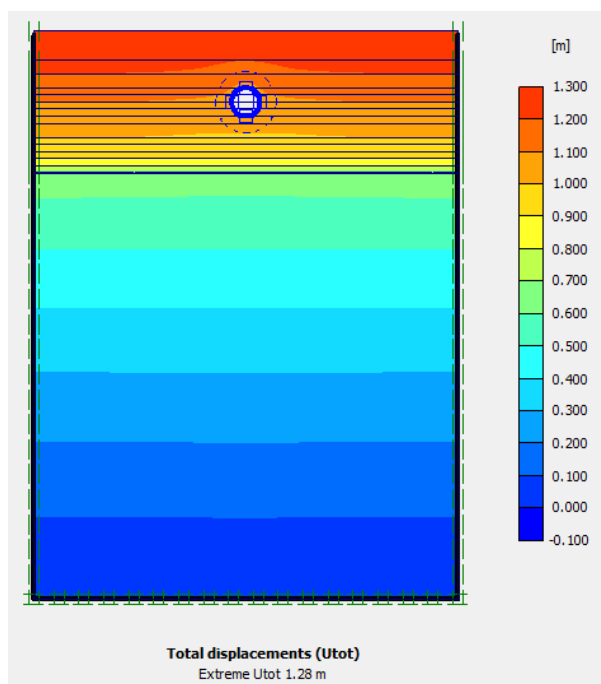
شده و کانتور مقادیر فرونشست به دست آمده از مدل حالت اول با اعمال کاهش سختی ۶۰ درصدی و با فرض  $H_0 = 20 \text{ m}$  و  $H_{con} = 60 \text{ m}$  به ترتیب در شکل ۲-۱۲ و ۲-۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۴-۸ مقادیر فرونشست اطراف تونل های انتقال با قطر و عمق مدفون متفاوت، برای شرایط مختلف افت تراز آب زیرزمینی و مشخصات لایه تحکیم پذیر به همراه مقادیر معادل کاهش سختی خاک

| مقدار کاهش سختی معادل (%) SRF | افت تراز آب زیرزمینی (متر) | مقدار فرونشست (متر)                     |                                         |                                         | شرایط اولیه لایه تحکیم پذیر                       |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                               |                            | $R_T = 5\text{m}$<br>$D_T = 10\text{m}$ | $R_T = 2\text{m}$<br>$D_T = 15\text{m}$ | $R_T = 2\text{m}$<br>$D_T = 10\text{m}$ |                                                   |
| 10.00                         | 18.58                      | 0.92                                    | 0.94                                    | 0.94                                    | $H_{con} = 60 \text{ m}$<br>$H_0 = 20 \text{ m}$  |
| 20.00                         | 19.75                      | 0.95                                    | 0.97                                    | 0.97                                    |                                                   |
| 50.00                         | 26.70                      | 1.14                                    | 1.15                                    | 1.16                                    |                                                   |
| 60.00                         | 32.96                      | 1.27                                    | 1.28                                    | 1.28                                    |                                                   |
| 10.00                         | 15.86                      | 1.21                                    | 1.25                                    | 1.25                                    | $H_{con} = 100 \text{ m}$<br>$H_0 = 20 \text{ m}$ |
| 20.00                         | 16.35                      | 1.25                                    | 1.28                                    | 1.28                                    |                                                   |
| 50.00                         | 19.44                      | 1.43                                    | 1.47                                    | 1.47                                    |                                                   |
| 60.00                         | 22.06                      | 1.56                                    | 1.59                                    | 1.59                                    |                                                   |
| 70.00                         | 26.18                      | 1.77                                    | 1.79                                    | 1.80                                    |                                                   |
| 80.00                         | 36.35                      | 2.18                                    | 2.21                                    | 2.21                                    |                                                   |



شکل ۴-۳۷ مقاطع قائم و عرضی نمونه خاک ریزدانه مدل سازی شده در نرم افزار Plaxis با فرض:  $H_0 = 20 \text{ m}$ ،  $H_{con} = 60 \text{ m}$  و  $S.R.F = 60\%$  و تونلی با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر.



شکل ۴-۳۸ کانتور مقادیر فرونشست (SModeling) در مقاطع قائم و عرضی نمونه خاک ریزدانه مدل سازی شده در نرم افزار Plaxis با فرض:  $H_{con} = 60 \text{ m}$ ,  $H_0 = 20 \text{ m}$  و  $S.R.F = 60\%$  و تونلی با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر.

#### ۴-۴ تحلیل اثر مقادیر و مودهای فرونشست محتمل زمین بر سازه های منتخب در بند ۳-۱

##### ۴-۴-۱ مقدمه

تحلیل داده های به دست آمده از مدل سازی ها و محاسبات انجام شده از اهمیت خاصی برخوردار است. در این بخش به مقایسه ای حالت های مختلف اعمال فرونشست بر دکل ها و تونل های انتقال و رابطه ای آن با سختی خاک و افت تراز آب زیرزمینی پرداخته می شود.

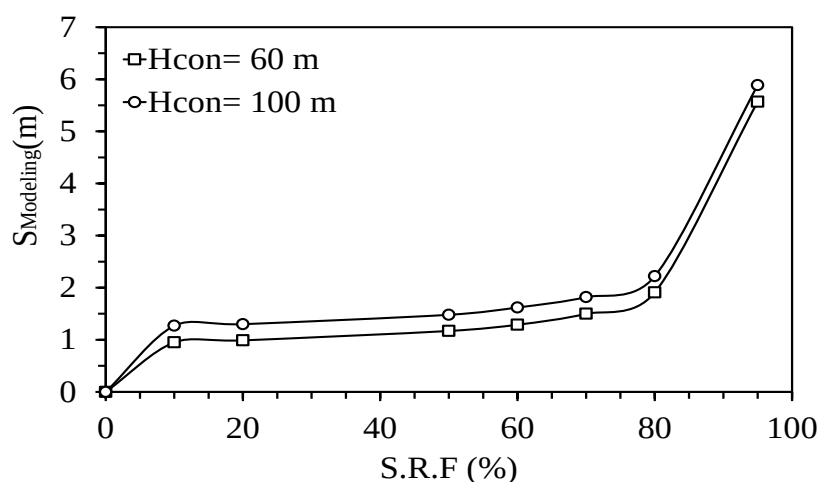
##### ۴-۴-۲ تحلیل نتایج مدل سازی فرونشست خاک و ارتباط آن با سختی خاک

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴-۷ بخش ۲-۴، از هم خوانی مقدار فرونشست به دست آمده از معادلات تحکیم و فرونشست به دست آمده از مدلسازی، ارتباط بین فرونشست با کاهش سختی خاک و افت تراز آب زیرزمینی به دست می آید.

رابطه بین  $S.R.F$  و فرونشست زمین در دو حالت  $H_{con} = 60 \text{ m}$  و  $H_{con} = 100 \text{ m}$  در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. هرچه کاهش مدول الاستیک خاک بیشتر باشد، فرونشست متناسب با آن بیشتر است. در یک مقدار مشخص از  $S.R.F$ ، مدل های با ارتفاع تحکیمی ۱۰۰ متر متحمل فرونشست بیشتری نسبت به مدل ها با ارتفاع تحکیمی ۶۰ متر می شوند.

با شروع کاهش سختی در بازه ی ۰٪ الی ۱۰٪، شیب تند تغییرات فرونشست نسبت به ضریب کاهش سختی مشاهده می گردد. با افزایش  $S.R.F$  (در بازه ی ۱۰٪ الی ۸۰٪)، تغییرات نشست نسبت به ضریب کاهش سختی با شیب کمتر

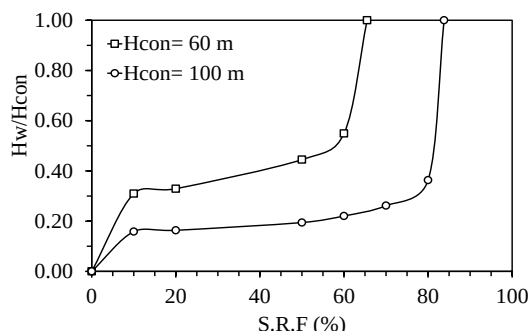
اما همچنان با روندی صعودی ادامه می یابد. سپس کاهش سختی اولیه از حد مشخصی (ضریب کاهش سختی در بازه‌ی ۸۰٪ الی ۹۵٪) منجر به گسیختگی خاک می گردد و این موضوع باعث ایجاد تغییر شکل زیادی می شود. این مساله به دلیل استفاده از مدل رفتاری هایپربولیک الاستیک-پلاستیک کامل در خاک است و روند نشان داده شده با آن کاملاً انطباق دارد. بر این اساس، با اعمال کاهش سختی تا ۱۰٪، در ابتدا یک تغییر شکل اولیه در خاک رخ میدهد که در ادامه (و با افزایش ضریب کاهش سختی تا ۸۰٪)، به دلیل ماهیت سخت شونده‌ی در مصالح، نرخ افزایش تغییر شکلها، کاهش میابد. با افزایش میزان کاهش سختی (از ۸۰٪ تا ۹۵٪) گسیختگی در خاک ایجاد میشود و تغییر شکلها به صورت کرنش های بزرگ مقیاس در خاک رخ میدهد.



شکل ۴-۳۹ رابطه ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در دو حالت مدلسازی با  $H_{con} = 100\text{ m}$  و  $H_{con} = 60\text{ m}$

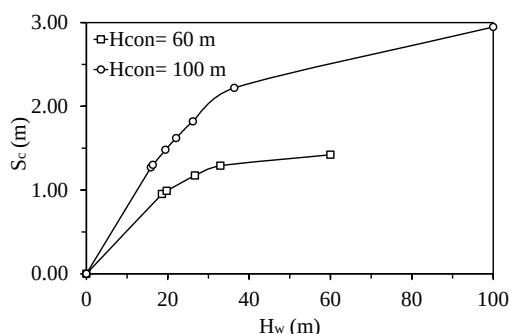
با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول ۱-۱ بخش ۲-۴، رابطه بین  $H_W/H_{con}$  و S.R.F را میتوان مطابق شکل ۴-۱۰ بدست آورد. این نمودار نشان می دهد که با افزایش نسبت  $H_W/H_{con}$ ، مقدار S.R.F نیز افزایش می یابد و در مقدار مشابهی از S.R.F، مقدار  $H_W/H_{con}$  برای ضخامت اولیه لایه تحکیمی کمتر (یعنی ۶۰ متر)، نسبت به ضخامت لایه تحکیمی اولیه به مقدار ۱۰۰ متر، بیشتر است.

اطلاعات نشان داده شده در شکل ۴-۱۰ نشان میدهد که با افزایش S.R.F از ۱۰٪ تا ۶۰٪ در ضخامت اولیه لایه تحکیمی به مقدار ۶۰ متر و از ۱۰٪ تا ۸۰٪ در ضخامت اولیه لایه تحکیمی به مقدار ۱۰۰ متر، نسبت  $H_W/H_{con}$  همچنان صعودی است اما از نرخ آن کاسته میشود؛ تا جایی که مقدار کاهش سختی خاک را به آستانه گسیختگی برساند، که پس از آن، مجدداً یک روند صعودی با نرخ بیشتری در افزایش مقدار  $H_W/H_{con}$  با افزایش ضریب کاهش سختی مشاهده میشود.



شکل ۴-۴۰ رابطه‌ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و نسبت  $H_w/H_{con}$  در دو حالت مدلسازی با  $H_{con} = 60$  m و  $H_{con} = 100$  m

ارتباط بین مقدار افت تراز آب ( $H_w$ ) با مقدار فرونشست به دست آمده از معادلات تحکیم به صورت شکل ۴-۴۱ می‌باشد. با توجه به این نمودار، برای رسیدن به مقدار فرونشست تحکیمی یکسان، خاکی که دارای ضخامت لایه‌ی تحکیمی بیشتر باشد باید دچار افت تراز آب زیرزمینی کمتری شود. ضمناً با افزایش افت تراز، مقدار فرونشست همچنان افزایش می‌دهد اما با نرخ کاهشی مواجه است. در واقع، با توجه به رابطه‌ی تحکیم ترزاقی، نسبت  $\frac{\sigma'_{0,i} + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_{0,i}}$  با افزایش افت تراز آب زیرزمینی دچار تغییرات کمتری می‌شود.



شکل ۴-۴۱ رابطه‌ی بین افت تراز آب زیرزمینی ( $H_w$ ) و فرونشست تحکیمی محاسبه شده در دو حالت  $H_{con} = 60$  m و  $H_{con} = 100$  m

### ۴-۴-۳ تحلیل نتایج مدل‌سازی دکل‌های انتقال نیرو

#### ۴-۴-۳-۱ مقایسه‌ی اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر مقدار O.S.R و $\Delta Z$ در انواع اعمال کاهش سختی مختلف

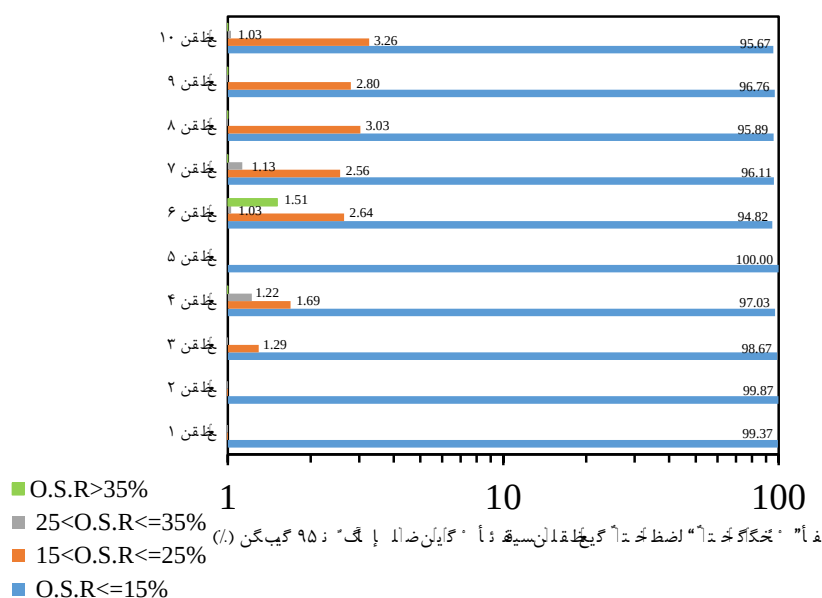
با توجه به آنکه بیشترین مقدار فرونشست در بیشترین مقدار کاهش سختی رخ می‌دهد و کاهش سختی ۹۵ درصد را میتوان معادل یک نشست بسیار زیاد یا خالی شدن زیر پایه ها یا بروز ترک عمیق در نزدیکی دکل فرض کرد، در این بخش به بررسی اثر انواع اعمال فرونشست در بیشترین کاهش سختی مدل‌سازی شده ( $S.R.F = 95\%$ ) پرداخته می‌شود. برای تسهیل در مقایسه، انواع الگوهای اعمال فرونشست به صورت جدول ۴-۹ نام‌گذاری شده است:

جدول ۴-۹ انواع الگوهای اعمال فرونشست و شرایط آنها

| شماره الگو | نام اختصاری الگو | طول دهانه (m) |     |     | سختی اولیه خاک بستر پی (kN/m) |      |      | زاویه انحراف خط (a , Degree) |    |    |    |
|------------|------------------|---------------|-----|-----|-------------------------------|------|------|------------------------------|----|----|----|
|            |                  | ۴۰۰           | ۳۰۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰۰                          | ۴۰۰۰ | ۸۰۰۰ | ۰                            | ۳۰ | ۶۰ | ۹۰ |

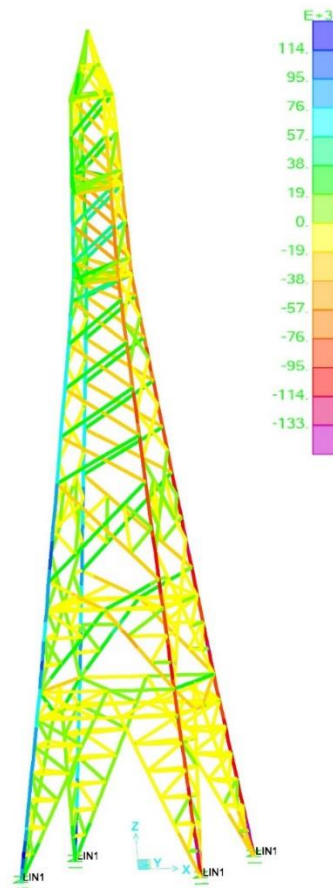
|    |                                                        |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ۱  | کاهش سختی یکنواخت                                      | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۲  | سختی اولیه خاک<br>kN/m 2000                            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۳  | سختی اولیه خاک<br>kN/m 8000                            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۴  | کاهش سختی یکسان                                        | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۵  | دهانه ۱۰۰ متری                                         | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۶  | دهانه ۴۰۰ متری                                         | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۷  | وجود دکل زاویه ای در خط با زاویه انحراف $a = 30^\circ$ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۸  | وجود دکل زاویه ای در خط با زاویه انحراف $a = 60^\circ$ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۹  | وجود دکل زاویه ای در خط با زاویه انحراف $a = 90^\circ$ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ۱۰ | کاهش سختی غیریکنواخت                                   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

با توجه به شکل ۴-۴۲ کمترین اثر فرونشست بر مقدار O.S.R در الگوی شماره ۵ (خط با فاصله دهانه‌های ۱۰۰ متری) رخ داده که به طور متوسط مدل‌ها دارای ۱۰۰٪ تعداد اعضای با O.S.R کوچکتر از ۱۵٪ می‌باشد و بیشترین اثر فرونشست بر مقدار O.S.R در الگوی شماره ۶ (خط با فاصله دهانه‌های ۴۰۰ متری) رخ داده که به طور متوسط مدل‌ها دارای ۱/۵۱٪ تعداد اعضای با O.S.R بیش از ۳۵٪ مشاهده شده‌است.



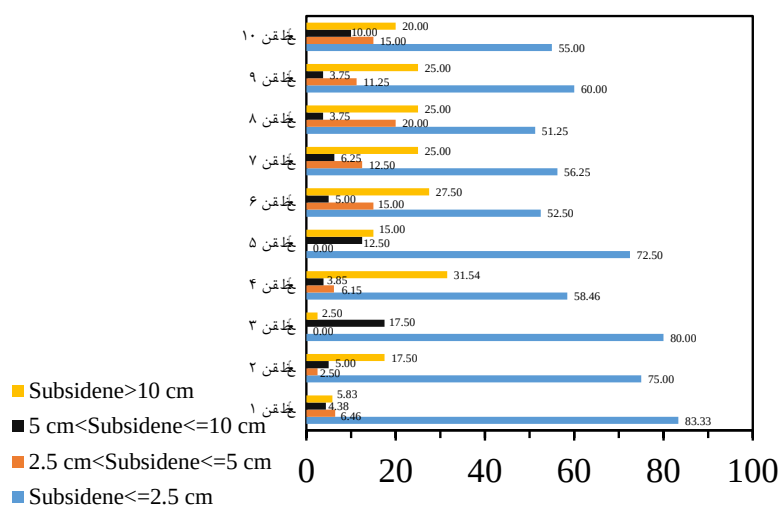
شکل ۴-۴۲ بررسی اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر مقدار O.S.R در حالت های مختلف

از بررسی تمامی الگوهای انجام شده در تمامی حالات مشاهده میشود که بیشترین تنش ایجاد شده در اعضا ناشی از فرونشست، مربوط به اعضای مهم پایه‌ها و متصل کننده‌ی پایه به بدنه در ترازهای پایینی می‌باشد. به عنوان مثال در الگوی B2C2، از حالت اعمال ضریب کاهش مدول سختی بستر یکنواخت ۹۵ درصدی، حداکثر تنش ناشی از فرونشست در عضو اصلی پایه در پایینترین تراز در دکل A ایجاد شده است و به طور کلی تنش بیشتری در اعضای ترازهای پایینی پایه‌های دکل A که نزدیک‌تر به دکل B هستند، مشاهده شده است. این موضوع در شکل ۴-۴۳ به تصویر کشیده شده است. باید توجه داشت که در تحلیل سازه دکل، معیارهای کنترل کشش و فشار متناسب با مفاهیم طراحی سازه های فولادی و با در نظر گرفتن حد کشش تا آستانه تسلیم فولاد و حد فشار با در نظر گرفتن کماتش احتمالی اعضای فشاری، در نرم افزار SAP2000 لحاظ شده است.



شکل ۴-۴۳ کانتور تنش اعضای دکل A بر حسب  $\text{kN/m}^2$  ناشی از فرونشست

نمودار ۳-۵، وضعیت نشست در پایه های مدل شده خط را نشان میدهد. به عنوان مثال، برای الگوی شماره ۶، در بازه ی فرونشست کمتر از  $2/5$  سانتیمتر، نتایج نشان میدهد که بطور میانگین،  $5/52\%$  پایه ها نسبت به کل پایه های موجود مدل شده در خط (هر خط دارای  $20$  پایه است) دچار فرونشست کمتر از  $2/5$  سانتیمتر شده است. همچنین شکل ۴-۴۴ نشان دهنده آن است که کمترین اثر کاهش سختی  $95$  درصدی بر مقدار فرونشست، در الگوهای دارای کاهش سختی یکنواخت (الگوی شماره ۱) رخ داده، به طوری که میانگین  $33/83\%$  پایه ها در این الگو دچار فرونشست در بازه ی حداقل (کمتر از  $2/5$  سانتی متر) بوده است. بیشترین اثر کاهش سختی  $95$  درصدی بر مقدار فرونشست در الگوهای دارای کاهش سختی یکسان تمامی پایه های دکل (الگوی شماره ۴) رخ داده که  $4/3153\%$  میانگین پایه ها در کل این الگوها دارای فرونشست در بازه ی حداکثر (بیش از  $10$  سانتی متر) می باشد.



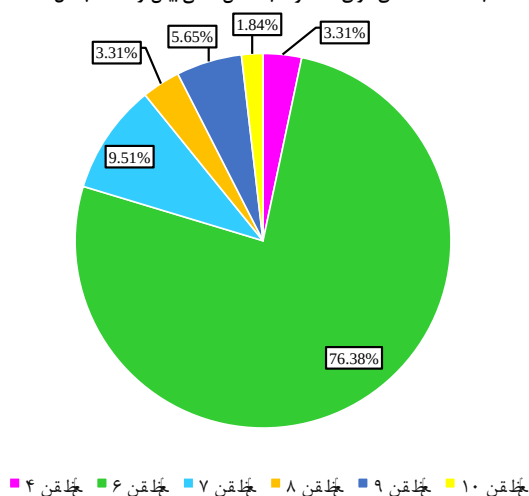
عطف به فاصله "بزرگترین" و "کوچکترین" فاصله از مرکز "بزرگترین" و "کوچکترین" فاصله از مرکز (۲۰٪ از مجموع کل) (۱٪)

شکل ۴-۴ بررسی اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر فرونشست در حالت های مختلف

#### ۴-۴-۳-۲ اثر کاهش سختی ۹۵ درصدی بر رخداد مقادیر حداکثر O.S.R، $\Delta Z$ و $R_c$

در این بخش تعداد مدل ها با الگوهای مختلف فرونشستی که دچار حداکثر مقادیر O.S.R،  $\Delta Z$  و  $R_c$  شده اند، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۴-۴۵، الگوهای دارای دهانه ی ۴۰۰ متری دارای بیشترین تعداد کل مدل هایی است که دچار O.S.R بیش از ۳۵٪ شده اند که این مقدار برابر ۷۶/۳۸٪ کل تعداد مدل هاییست که اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی منجر به O.S.R بیشتر از ۳۵٪ شده است. لازم به ذکر است که در الگوهای دارای فاصله دهانه ۱۰۰ متری، با اعمال کاهش سختی یکنواخت، و با سختی اولیه ی خاک موجود در پی دکل برابر با ۲۰۰۰ kN/m و ۸۰۰۰ kN/m، در کاهش سختی ۹۵ درصدی هیچ یک از اعضا دچار O.S.R حداکثر (بیش از ۳۵٪) نشدند. خاطرنشان میسازد که در نمودار دایره ای زیر به دلیل آنکه درصد تعداد اعضای دارای تنش بیش از ۳۵٪ به کل اعضاء صفر است، نشان داده نشده است.

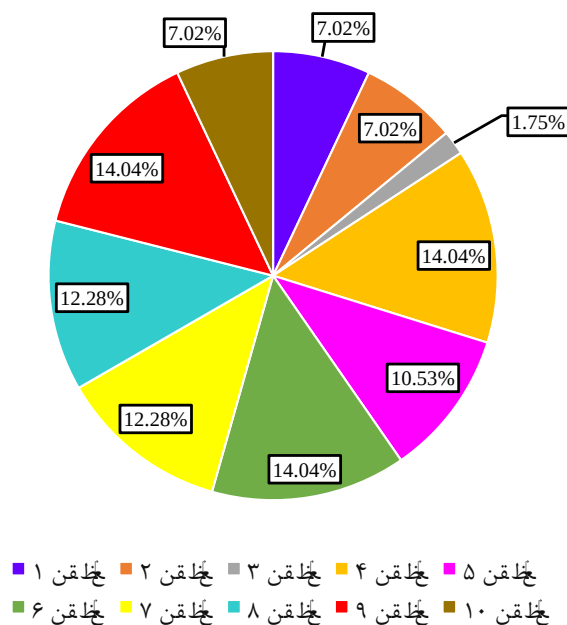
نسبت تعداد اعضاهای دارای حداکثر نسبت تنش اضافی بیش از ۳۵٪ به کل اعضاء



شکل ۴-۴۵ مقایسه‌ی تعداد الگوهای مدلسازی شده دارای O.S.R بیش از ۳۵٪ در حالات مختلف مدل‌سازی شده با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی

همچنین در میان کل مدل‌هایی که ۹۵٪ کاهش سختی برا آنها اعمال شده، ۵/۳۶٪ اعضا دچار O.S.R بیشتر از ۳۵٪ شده‌اند. همچنین، در شکل ۴-۴۶ مشاهده می‌شود که بیشترین تعداد مدل‌هایی که دچار فرونشست بیش از ۱۰ سانتی‌متر شده‌اند، برای حالات کاهش سختی یکسان و فاصله دهانه‌های ۴۰۰ متری بوده که در این حالت‌ها، ۱۴٪ مدل‌ها متحمل حداکثر نشست پی به مقداری بیش از ۱۰ سانتی‌متر شده‌اند.

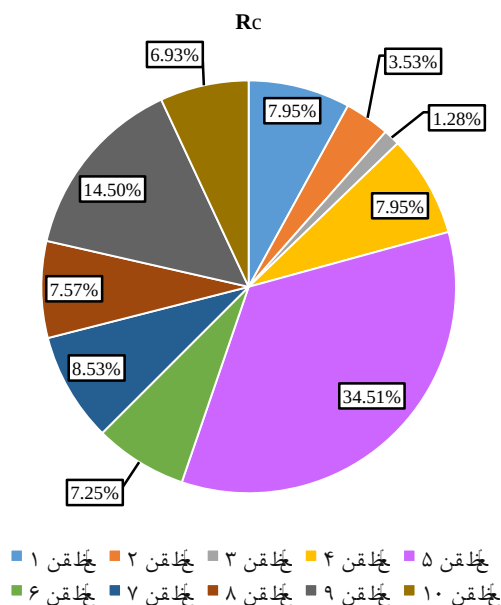
نسبت تعداد اعضای دارای حداکثر فرونشست بیش از ۱۰ سانتی‌متر به کل اعضا



شکل ۴-۴۶ مقایسه‌ی تعداد حالات مدلسازی شده دارای فرونشست بیش از ۱۰ سانتی‌متر در حالات مختلف مدل‌سازی شده با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی

به منظور بررسی نیروی تحمیلی به کابل‌ها، مقایسه نتایج در حالات مختلف در قالب شکل ۴-۴۷ انجام شده که نشان می‌دهد بیشترین تعداد مدل‌هایی که بر اثر فرونشست، دچار  $R_C$  حداکثر شده‌اند، در دهانه‌های ۱۰۰ متری قرار دارند. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که در دهانه‌ی کوچکتر با مقادیر فلش منظور شده، طول سیم هادی نیز کمتر بوده و در نتیجه، اعمال تغییر مکان ناشی از فرونشست به پی دکل "در راستای قائم"، مقدار نیروی کششی بیشتری در آن، نسبت به هادی با دهانه بزرگتر ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر با مقادیر مفروض برای دهانه‌ها و فلش‌های سیم هادی در این مطالعه، اضافه کشش ایجاد شده در سیم هادی در اثر یک تغییر مکان افقی ثابت (در حدود تغییر مکانهای ناشی از فرونشست زمین)، در دهانه کوچکتر، بیشتر خواهد بود. شایان ذکر است که این شرایط با فرض اتصال مستقیم سیم هادی به دکل ایجاد می‌شود. در صورتی که اثر جابجایی مقررهای آویزی نیز در تحلیل لحاظ شود، وضعیت تغییرات نیروی کششی هادی در اثر جابجایی افقی نوک کراس‌آرم دکل، کاملاً متفاوت خواهد بود.

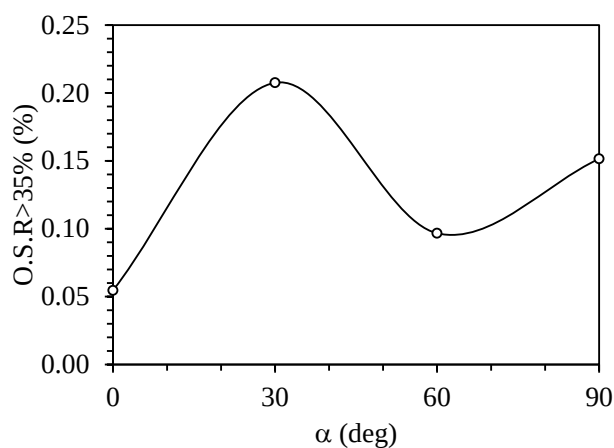




شکل ۴-۴۷ مقایسه‌ی تعداد حالات دارای حداکثر مقدار O.S.R بیشتر از ۳۵٪ در اعضای دکل‌ها و RC در کابل‌ها

### ۳-۳-۴-۴ مقایسه‌ی اثر زاویه (a) در اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی

در شکل ۴-۴۸، برای مدل‌های دارای کاهش سختی ۹۵ درصدی و سختی اولیه 4000 kN/m، درصد اعضای دکل‌های مدل شده با  $O.S.R > 35\%$  بر حسب زاویه خط نشان داده شده است. با بررسی مدل‌های دارای دکل زاویه‌ای با زوایای مختلف که دچار O.S.R بیش از ۳۵٪ شده‌اند، مشاهده می‌شود که بیشترین تعداد مدل‌هایی که دچار  $O.S.R > 35\%$  شده‌اند دارای زاویه انحراف خط برابر با  $a = 30^\circ$  بوده‌اند.

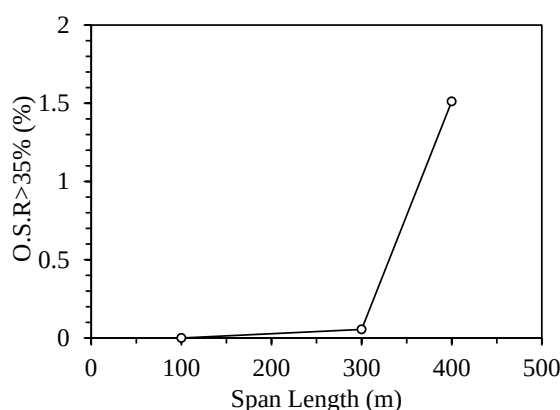


شکل ۴-۴۸ اثر زاویه انحراف خط بر تعداد حالات مدل‌سازی شده با حداکثر مقدار  $O.S.R > 35\%$

### ۴-۴-۳-۴ مقایسه‌ی اثر طول دهانه در اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی

در شکل ۴-۴۹، برای مدل‌های دارای کاهش سختی ۹۵ درصدی و سختی اولیه 4000 kN/m، درصد اعضای دکل‌های مدل شده با  $O.S.R > 35\%$  بر حسب فاصله دهانه دکل‌ها در خط نشان داده شده است. با بررسی مدل‌ها با

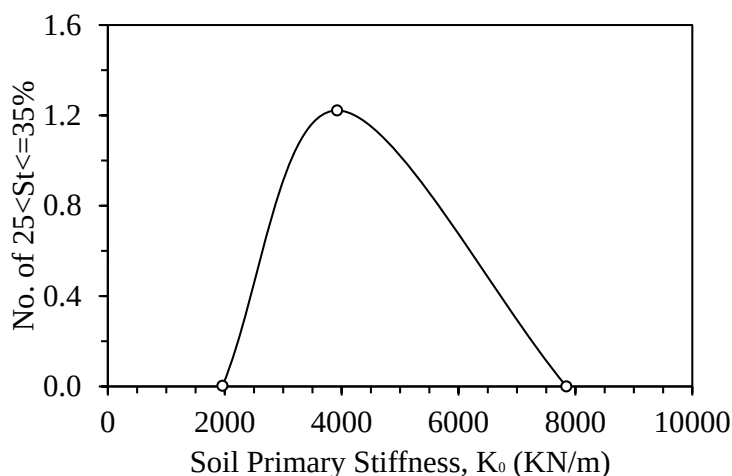
طول دهانه های متفاوت مشاهده می شود که بیشترین تعداد مدل هایی که دچار  $O.S.R > 35\%$  شده اند مربوط به دهانه ی ۴۰۰ متری بوده است که عمده این اضافه تنش ها در دکل های انتهایی خط رخ داده اند. دلیل این مساله میتواند به اثر بیشتر نیروی نامتعادل کشش کابل هادی در دکل های انتهایی مرتبط شود که در دهانه های با طول بیشتر، قابل توجه تر است. البته باید توجه داشت که تغییر فاصله دهانه بر روی پارامترهای مختلفی تاثیر میگذارد که هر یک ممکن است باعث کاهش یا افزایش تنش در دکل های خط شود. در اثر رخداد فرونشست زیر پایه یک دکل از خط، دکل های مجاور دکل نشست کرده تحت تاثیر قرار میگیرند و در اثر انتقال اضافه نیروهای ناشی از فرونشست از طریق کابل های هادی، بازتوزیع تنش در دکل های مجاور نیز رخ میدهد. این بازتوزیع نیرو ممکن است باعث کاهش اضافه تنش در دکل دچار فرونشست و یا افزایش اضافه تنش در دکل های مجاور شود. از سویی دیگر، تغییر فاصله دهانه، بر روی نیروی ناشی از فرونشست در کابل های هادی موثر است. پس اینکه تغییر طول دهانه در نهایت منجر به افزایش یا کاهش اضافه تنش در یک دکل در اثر فرونشست شود، باید با در نظر گرفتن توام عوامل فوق الذکر و مدلسازی دقیق خط بررسی گردد.



شکل ۴-۴۹ اثر طول دهانه بر تعداد حالات مدل سازی شده با حداکثر مقدار  $O.S.R > 35\%$

#### ۵-۳-۴ مقایسه ی اثر سختی اولیه خاک در اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی

به منظور بررسی اثر سختی اولیه خاک بر میزان اضافه تنش ایجاد شده در دکل های مدل شده، بازه تغییرات مقدار  $O.S.R$  بین ۲۵٪ تا ۳۵٪ به عنوان یک شاخص تعیین کننده منظور شده است. دلیل این مساله آن است که در مقادیر کمتر از ۲۵٪ (با قضاوت مهندسی)، میتوان وضعیت دکل را تا حدودی ایمن فرض کرد و از مقادیر بالای ۲۵٪ باید برای پایش وضعیت دکل و پی آن و اقدامات پیشگیرانه اقدام نمود. از مقایسه ی مدل ها با طول سختی خاک اولیه ی متفاوت مشاهده میشود که بیشترین تعداد مدل هایی که دچار  $O.S.R > 35\%$  شده اند مربوط مدل هایی با سختی اولیه ی ۴۰۰۰  $kN/m$  می باشد. در واقع، برای مقادیر سختی اولیه ۲۰۰۰  $kN/m$  با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی، به اندازه ای حمایت پی زیر دکل از بین میرود که عمده اعضا یا به تنش اضافه ای بالاتر از ۳۵٪ میرسند و یا دکل ممکن است دچار نشست های زیاد شده و در خطر ناپایداری کلی قرار گیرد، و از سویی دیگر، برای مقادیر سختی اولیه ۲۰۰۰  $kN/m$  با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی، خصوصا در مودهای خرابی که سه یا حتی دو پایه کاهش سختی ندارند، بازتوزیع نیروها میتواند بین اعضای دکل به گونه ای انجام شود که برخی اعضا به تعداد محدود به اضافه تنش بالا رسیده و سایر اعضا دچار افزایش تنش نشوند. حالت بینابینی که برای مقادیر سختی اولیه ۴۰۰۰  $kN/m$  با اعمال کاهش سختی ۹۵ درصدی، رخ میدهد، میتواند بیشترین میزان نسبت تعداد اعضای بین اضافه تنش ۲۵٪ تا ۳۵٪ را نتیجه دهد.

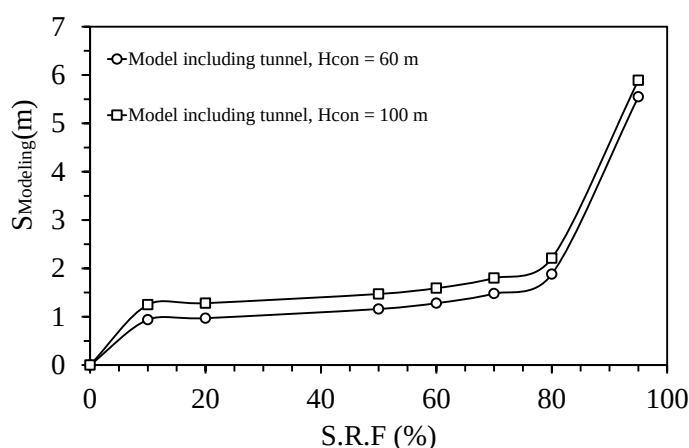


شکل ۴-۵۰ اثر طول دهانه بر تعداد حالات مدلسازی شده با حداکثر مقدار ۲۵٪/O.S.R<35%

#### ۴-۴-۴ تحلیل نتایج مدل سازی تونل های انتقال نیرو

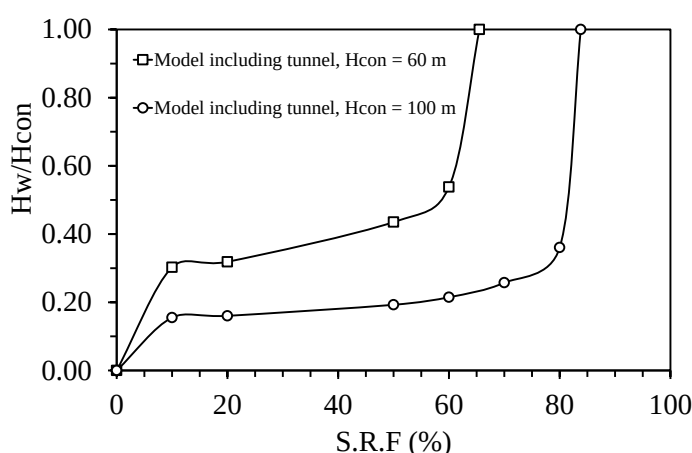
شکل ۴-۵۱ ارتباط بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در شرایط وجود تونل با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر نشان می دهد. نتایج مدل سازی نشان می دهد که وجود تونل انتقال نیرو با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر به طور متوسط ۰/۰۱۵ متر مقدار فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک نسبت به شرایط یکسان بدون وجود تونل در خاک را کاهش می دهد. این کاهش فرونشست به این دلیل اتفاق می افتد که تونل سختی بیشتری نسبت به خاکی که با آن تعویض شده است ایجاد می کند.

با توجه به این نمودار مشاهده می شود که با کاهش سختی خاک در بازه ی ۰ تا ۱۰٪، ۱۰٪ تا ۸۰٪ و ۸۰٪ تا ۹۵٪، مقدار فرونشست به ترتیب یک افزایش اولیه نشان می دهد، نرخ افزایش آن کاهش میابد و سپس مجدداً بر نرخ افزایش آن افزوده می شود. رخداد این موضوع همانند آنچه در بخش ۳-۲ توضیح داده شد، به دلیل ماهیت رفتار هایپربولیک الاستیک – کاملاً پلاستیک خاک است.



شکل ۴-۵۱ رابطه ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در دو حالت مدلسازی با Hcon = 60 m و Hcon = 100 m در شرایط وجود تونل با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر

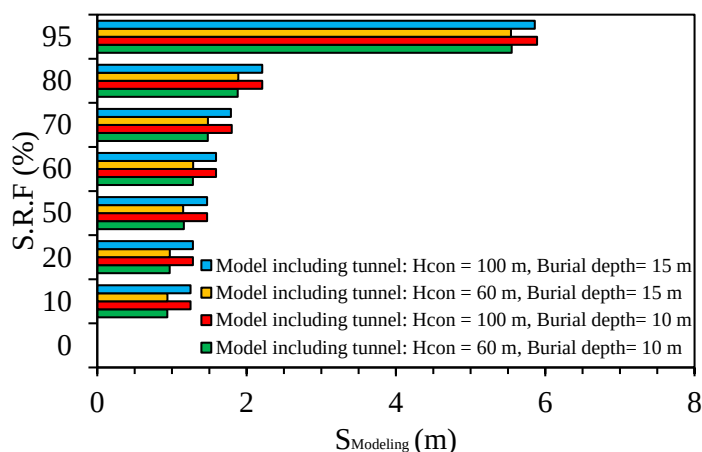
رابطه بین  $H_w/H_{con}$  و S.R.F در تونلها را میتوان مطابق نمودار ۳-۱۳ بدست آورد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $H_w/H_{con}$  مقدار S.R.F نیز افزایش می‌یابد و در مقدار مشابهی از S.R.F، مقدار  $H_w/H_{con}$  برای ضخامت اولیه لایه تحکیمی کمتر (یعنی ۶۰ متر)، نسبت به ضخامت لایه تحکیمی اولیه به مقدار ۱۰۰ متر، بیشتر است. اطلاعات نشان داده شده در شکل ۴-۵۲ نشان میدهد که با افزایش S.R.F از ۱۰٪ تا ۶۰٪ در ضخامت اولیه لایه تحکیمی به مقدار ۶۰ متر و از ۱۰٪ تا ۸۰٪ در ضخامت اولیه لایه تحکیمی به مقدار ۱۰۰ متر، نسبت  $H_w/H_{con}$  همچنان صعودی است اما از نرخ آن کاسته میشود؛ تا جایی که مقدار کاهش سختی خاک را به آستانه گسیختگی برساند، که پس از آن، مجدداً یک روند صعودی با نرخ بیشتری در افزایش مقدار  $H_w/H_{con}$  با افزایش ضریب کاهش سختی مشاهده میشود.



شکل ۴-۵۲ رابطه‌ی بین ضریب کاهش سختی (S.R.F) و فرونشست در دو حالت مدلسازی با  $H_{con} = 100$  m و  $H_{con} = 60$  m در شرایط وجود تونل با شعاع ۲ متر و عمق مدفون ۱۰ متر

#### ۴-۴-۱ اثر عمق مدفون تونل انتقال نیرو و ضخامت لایه تحکیم پذیر بر مقدار فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک

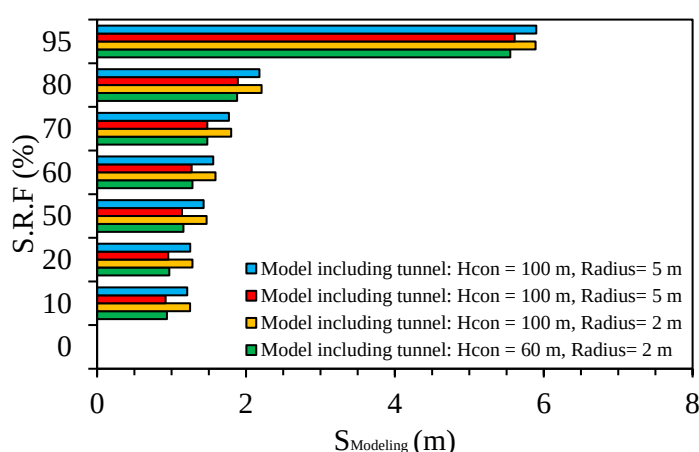
شکل ۴-۵۳، برای مقادیر ثابت قطر تونل به اندازه ۲ متر، میزان تغییرات فرونشست اطراف تونل بر حسب ضریب کاهش سختی خاک را نشان میدهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۴-۵۳، مشاهده میشود که در مقادیر ثابت ضریب کاهش سختی، عمق مدفون تونل تاثیر آنچنانی بر مقدار فرونشست اطراف تونل ندارد. در عوض، با کاهش ضخامت لایه تحکیم پذیر، مقدار فرونشست اطراف تونل کم میشود. همچنین مشاهده میشود که برای مقادیر کاهش سختی ۶۰٪ خاک، مقادیر فرونشست اطراف تونل در حالات متناظر عمق مدفون و ضخامت لایه تحکیم پذیر اختلاف چندانی ندارد. با این حال، به ازای مقادیر کاهش سختی از ۶۰٪ به بالا (و خصوصاً از ۸۰٪ به بالا)، اختلاف معناداری در مقادیر فرونشست خاک اطراف تونل مشاهده میشود.



شکل ۴-۵۳ اثر تغییر عمق مدفون تونل بر فرونشست ناشی از اعمال ضریب کاهش سختی (S.R.F) (قطرتونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۲ متر می باشد)

#### ۴-۴-۲-۴ اثر شعاع تونل انتقال نیرو بر مقدار فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک

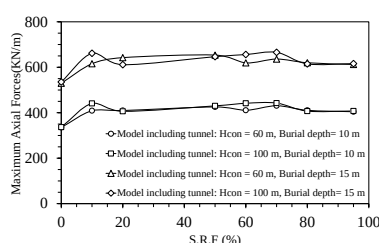
شکل ۴-۵۴، برای مقادیر ثابت عمق مدفون تونل به اندازه ۱۰ متر، میزان تغییرات فرونشست اطراف تونل بر حسب ضریب کاهش سختی خاک را نشان میدهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۴-۵۴، مشاهده میشود که در مقادیر ثابت ضریب کاهش سختی، با افزایش شعاع تونل، مقدار فرونشست خاک اطراف تونل به میزان کمی افزایش میابد که در مقادیر کاهش سختی خاک کمتر، این مساله نمایان تر است. در عوض، با کاهش ضخامت لایه تحکیم پذیر، مقدار فرونشست اطراف تونل کم میشود. همچنین مشاهده میشود که برای مقادیر کاهش سختی ۶۰٪ خاک، مقادیر فرونشست اطراف تونل در حالات متناظر شعاع و ضخامت لایه تحکیم پذیر اختلاف چندانی ندارد. با این حال، به ازای مقادیر کاهش سختی از ۶۰٪ به بالا (و خصوصاً از ۸۰٪ به بالا)، اختلاف معناداری در مقادیر فرونشست خاک اطراف تونل مشاهده میشود.



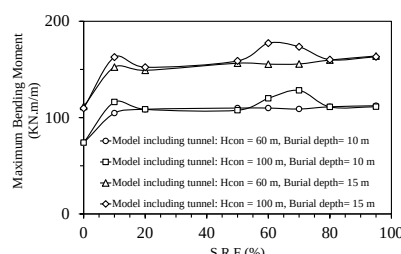
شکل ۴-۵۴ اثر تغییر شعاع تونل بر فرونشست ناشی از اعمال ضریب کاهش سختی (S.R.F) (عمق مدفون تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۱۰ متر می باشد)

### ۳-۴-۴-۴ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک بر برش، نیروی محوری و لنگر ایجاد شده در مقطع تونل انتقال نیرو

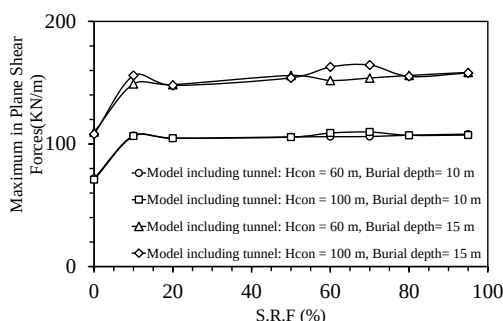
شکل ۴-۵۵ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات عمق مدفون بر حداکثر مقادیر لنگر خمشی، نیروی محوری و برش در صفحه مقطع تونل انتقال را برای شعاع ثابت ۲ متری تونل نشان می دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در این نمودار، در کاهش سختی و شعاع تونل ثابت، افزایش عمق مدفون تونل انتقال نیرو منجر به افزایش لنگر خمشی، نیروی محوری و برش در صفحه می شود. روند تغییرات در پارامترهای بررسی شده بر حسب ضریب کاهش سختی خاک، با ماهیت رفتار هایپربولیک الاستیک - کاملاً پلاستیک خاک انطباق دارد. با این حال، به دلیل قرار گیری تونل در اعماق خاک، در اثر اعمال کاهش سختی های زیاد، همچنان تمام المانهای خاک اطراف تونل به حالت گسیختگی نرسیده و افزایش ناگهانی در مقدار تغییر شکلهای (مانند آنچه برای دکلها رخ داد) برای تونلهای مدل سازی شده رخ نداده است.



(۲)



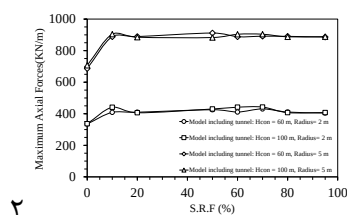
(۱)



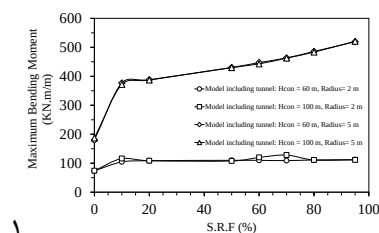
(۳)

شکل ۴-۵۵ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات عمق مدفون بر حداکثر مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (شعاع تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۲ متر می باشد)

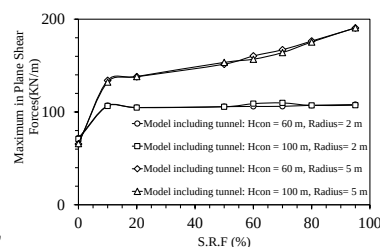
همچنین شکل ۴-۵۶ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات شعاع تونل انتقال نیرو بر حداکثر مقادیر لنگر خمشی، نیروی محوری و برش در صفحه مقطع تونل انتقال را در عمق مدفون ثابت ۱۰ متری نشان می دهد. با توجه به این نمودار در کاهش سختی و عمق مدفون ثابت، افزایش شعاع تونل انتقال نیرو منجر به افزایش لنگر خمشی، نیروی محوری و برش در صفحه می شود.



۲



۱

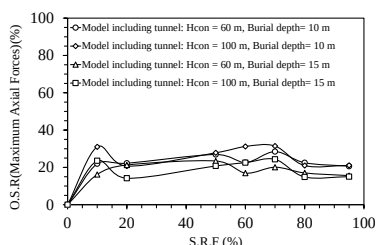


۳

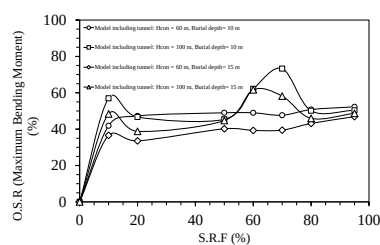
شکل ۴-۵۶ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات شعاع تونل بر حداکثر مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (عمق مدفون تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۱۰ متر می باشد)

#### ۴-۴-۴-۴ اثر کاهش سختی خاک بر مقدار O.S.R برش، نیروی محوری و لنگر ایجاد شده در مقطع تونل انتقال نیرو

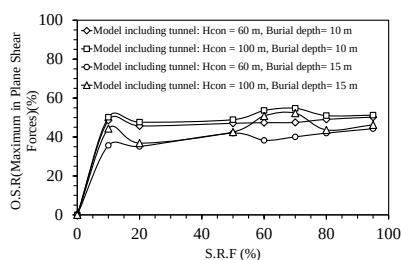
در این بخش از تقسیم برش، نیروی محوری و خمش ایجاد شده بر اثر کاهش سختی خاک به دلیل فرونشست در جداره تونل بر مقدار اولیه آنها بدون در نظر گرفتن اثر فرونشست، برای دو حالت شعاع ثابت تونل به میزان ۲ متر و نیز عمق مدفون ثابت تونل به میزان ۱۰ متر، مقدار O.S.R به دست آمده است (شکل ۴-۵۷ و شکل ۴-۵۸). با توجه شکل ۴-۵۷، مشاهده میشود که برای شعاع تونل به مقدار ۲ متر، "بطور کلی"، با کاهش سختی خاک، مقدار نسبت های تنش اضافی محوری، برش اضافی در صفحه و لنگر اضافی ناشی از فرونشست افزایش پیدا می کند، اما ارتباط مشخصی بین افزایش عمق مدفون تونل با مقادیر O.S.R ذکر شده مشاهده نمیشود. در واقع، پارامترهای مختلفی بر این مساله حاکم است (از جمله قطر تونل، ضخامت لایه پوششی تونل، عمق مدفون تونل، سختی خاک، نحوه بازپخش تنش ها و نیروها بین تونل و خاک، تعداد المانها و پارامترهای مش بندی در مدل عددی ساخته شده) که به تنهایی نمیتوان اثر هرکدام بر این مساله را به وضوح جداسازی کرد. با این حال، بطور کلی میتوان اذعان داشت که بروز فرونشست در خاک اطراف تونل باعث ایجاد یک اضافه نیرو به میزان میانگین حدود ۵۰٪ در مقدار بیشینه لنگر و برش و حدود ۳۰٪ در نیروی محوری پوشش محافظ تونل شده است.



(۲)



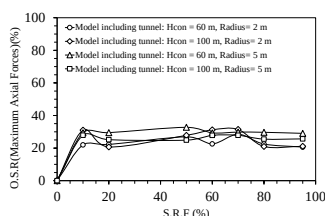
(۱)



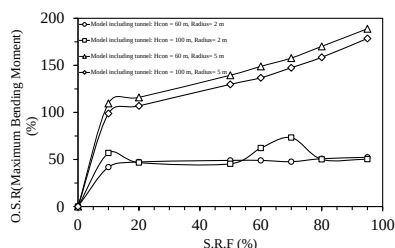
(۳)

شکل ۴-۵ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات عمق مدفون بر O.S.R مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (شعاع تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۲ متر می باشد)

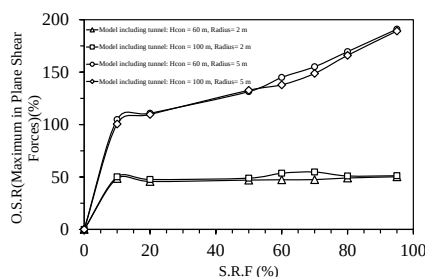
همچنین، بر اساس داده های ارائه شده در شکل ۴-۵۸، مشاهده میشود که در یک کاهش سختی خاک ناشی از فرونشست مشخص، افزایش شعاع تونل انتقال نیرو منجر به افزایش خمش و برش در صفحه مقطع تونل می شود اما رابطه ای بین افزایش شعاع تونل و نیروی محوری آن یافت نشده است.



(۲)



(۱)



(۳)

شکل ۴-۵۸ اثر فرونشست ناشی از کاهش سختی خاک در تغییرات شعاع تونل بر O.S.R مقادیر: (۱) لنگر خمشی؛ (۲) نیروی محوری؛ (۳) برش در صفحه مقطع تونل (عمق مدفون تونل در تمامی حالات مقدار ثابت ۱۰ متر می باشد)

#### ۴-۴-۵ اثر فرونشست بر پست های انتقال نیرو

اصولا باید به یک نکته مهم توجه داشت و آن این مساله است که پدیده مخرب فرونشست زمین، از آنجا که در سطح وسیعی از زمین رخ میدهد، عمدتا بر پروژه های خطی با طول زیاد تاثیر منفی میگذارد. با این حال، در اکثر مواقع، پدیده های دیگر چون فروچاله، با فرونشست به اشتباه یکسان فرض میشود و در گزارشهای خرابی موجود، مشاهده میشود که برای برخی از شریانهای حیاتی که در اثر ایجاد یک فروچاله در نزدیکی شان دچار مشکل شده اند، دلیل خرابی، فرونشست زمین ذکر میشود. از این موارد میتوان به ایجاد برخی خرابی ها در پستهای انتقال نیرو (به عنوان سازه هایی که موقعیت موضعی و نه خطی دارند) اشاره کرد. با این حال، نباید از این نکته غافل شد که در مواردی،



بروز فروچاله خود از تاثیرات بروز فرونشست در یک منطقه میتواند باشد. بنابراین، در خصوص نحوه بررسی اثر فرونشست در نزدیکی پستهای انتقال نیرو (که میتواند فروچاله ایجاد کند یا در مواردی، خط شکست فرونشست دقیقا از زیر سازه پست یا تجهیزات آن عبور کند)، میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- برخی از تجهیزات حساس موجود در پستهای انتقال نیرو به نشست پی حساس هستند. در خصوص این تجهیزات، بحث اضافه تنش ناشی از فرونشست مطرح نیست و مساله عمده معیار کنترل نشست پی آنهاست. در این خصوص لازم است تا هر تجهیز با توجه به وزن و ابعاد هندسی سازه و پی آن و با در نظر گرفتن بارهای دینامیکی در حین بهره برداری، با در نظر گرفتن روش پیشنهادی در این گزارش برای مدلسازی نشست پی مدلسازی شود. در این خصوص اکیدا پیشنهاد میشود که مقدار نشست یکنواخت پی در اثر فرونشست به مقدار مجاز تعیین شده در مشخصات هر تجهیز محدود شود و نشست غیر یکنواخت پی اصلا رخ ندهد. استفاده از سامانه های هشدار سریع در این خصوص پیشنهاد میشود و در صورت بروز نشست ناشی از فرونشست در پی تجهیزات، استفاده از المانهای سخت کننده خاک زیر پی مانند استفاده از شمع های مارپیچ، ریز شمع، شمع پیچی و یا استفاده از این روشها به همراه تزریق در زیر پی تجهیزات به منظور جبران کاهش سختی ایجاد شده در خاک زیر پی تجهیزات در اثر فرونشست میتواند موثر باشد. البته اکثر تجهیزات پستها، جهت برقراری ارتباط الکتریکی، توسط باسبار به یکدیگر متصلند. اگر این باسبارها صلب باشند، نشست نامساوی تجهیزات متصل میتواند در باسبارها یا بوشینگها اضافه تنش ایجاد نماید و منجر به آسیب دیدگر آنها شود. در این راستا، استفاده از باسبارهای انعطاف پذیر توصیه میشود.

۲- علاوه بر تجهیزات موجود در پستها، سازه ساختمان پستها نیز میتواند تحت اثر ایجاد فروچاله ناشی از فرونشست، دچار نشست پی شود. در این صورت، هر دو معیار اضافه تنش حداکثر ۰/۳۵ و نیز (البته با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۳ بر آن) و نیز نشست پی را باید برای سازه پستها لحاظ کرد. باید توجه داشت که با عنایت به موارد مندرج در آئین نامه های مربوط به طراحی سازه های ساختمانی، مقدار نشست پی برای پی های منفرد، نواری و گسترده به ترتیب ۲/۵۴ سانتیمتر، ۲/۵۴ سانتیمتر و ۵ الی ۱۰ سانتیمتر لحاظ میشود. بنابراین بسته به نوع پی موجود در سازه ساختمان پستهای انتقال نیرو، باید هر مورد خاص با توجه به هندسه ساختمان، بارگذاری مربوطه و نوع و شرایط پی مدلسازی شود. ضمنا مقادیر ذکر شده برای نشست مجاز پی این سازه ها، برای کل بارهای وارد بر این سازه ها ذکر شده و برای مقدار اضافه نشست ناشی از فرونشست، پیشنهاد میشود که ابتدا مقدار نشست واقعی ساختمان در لحظه بهره برداری و نیز مقدار نشست ناشی از ترکیب بار بحرانی محاسبه و از مقدار نشست مجاز آئین نامه ای کسر شود، و یا در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، ضریب اطمینان ۳ برای محاسبه مقدار اضافه نشست مجاز ناشی از فرونشست برای پی این سازه ها بر مقادیر پیشنهادی فوق اعمال گردد. سایر فرضیات و روشهای ارائه شده در این تحقیق برای مدلسازی پی دکلها را میتوان (به لحاظ روش شناسی) برای مدلسازی پی ساختمان و تجهیزات پستهای انتقال نیرو تعمیم و مورد استفاده قرار داد.

**۴-۵ تعیین حدود عملکردی سازه و تجهیزات منتخب بند ۳ - ۱ در برابر فرونشست زمین اطراف آن**

#### ۴-۵-۱ مقدمه

منظور از حدود عملکردی هر سازه، حد تغییرات پارامترهایی است که در شرایط برقراری آنها، سازه توانایی بهره-برداری و عملکرد کامل از خود نشان می‌دهد. تعیین حدود عملکردی دکل‌ها و تونل‌های انتقال نیرو تحت شرایط فرونشست زمین از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.

#### ۴-۵-۲ محاسبه‌ی حدود عملکردی دکل‌ها و تونل‌های انتقال نیرو

در ابتدا یادآور میشود که محاسبه‌ی حدود عملکردی سازه‌های انتقال نیرو بسیار پیچیده است و در هر مورد خاص، با توجه به شرایط سازه، فرونشست اعمالی و مدت زمان شروع فرونشست، این مساله باید محاسبه گردد.

با توجه به اینکه فرونشست خاک منجر به کاهش سختی خاک اطراف تونل‌ها و زیر پی دکل‌های انتقال می‌شود، می‌توان بر اساس کاهش سختی خاک ایجاد شده بر اثر فرونشست، بازه‌ای از S.R.F که در آن دکل‌ها و تونل‌های انتقال در شرایط ایمن و یا نایمن قرار گرفته‌اند را محاسبه نمود. بنابراین در یک مورد با شرایط معین برای رسیدن به یک مقدار ضریب کاهش سختی مشخص، می‌بایست آنالیز وابسته به زمان تحکیم انجام شده و مدت زمان رسیدن به آن کاهش سختی مشخص محاسبه گردد.

با توجه به موارد ذکر شده بازه‌ی تغییرات ضریب کاهش سختی خاک (S.R.F) که منجر به تعیین حدود ایمنی، ایمنی تحت شرایط بازرسی سازه و نایمنی دکل‌ها و تونل‌های انتقال شده به ترتیب در بخش‌های ۴-۲-۱ و ۴-۲-۲ به دست می‌آید.

#### ۴-۵-۲-۱ حدود عملکردی دکل‌های انتقال نیرو

بر اساس نتایج به دست آمده از فصل دو، بازه‌ی تغییرات ضریب کاهش سختی خاک ناشی از اعمال فرونشست بر دکل‌های انتقال نیرو، به منظور محاسبه‌ی حدود عملکردی خط انتقال، حالات و شرایط مختلف به شرح زیر مد نظر قرار گرفته است:

حالت شماره ۱: بروز فرونشست بصورت کاهش سختی "یکنواخت" خاک زیر پی حداکثر ۲ دکل موجود در خط با دهانه ۳۰۰ متری برای الگوهای فرونشست تک پایه، دو پایه و سه پایه از چهار پایه دکلها و اعمال ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$

حالت شماره ۲: بروز فرونشست برای حالات بحرانی به دست آمده از حالت شماره ۱ در دهانه های ۳۰۰ متری و با سختی اولیه خاک زیر پی به مقدار  $4000 \text{ kN/m}$ ،  $2000 \text{ kN/m}$  و  $8000 \text{ kN/m}$

حالت شماره ۳: بروز فرونشست در زیر هر ۴ پایه بر حداکثر دو دکل از پنج دکل موجود در خط با دهانه‌های ۳۰۰ متری و ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$

حالت شماره ۴: بروز فرونشست در دکل‌های بحرانی مشخص شده در حالات شماره ۱ و ۳، در شرایط داشتن دهانه‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری و ضریب سختی اولیه  $4000 \text{ kN/m}$

حالت شماره ۵: بروز فرونشست در دکل های بحرانی مشخص شده در حالات شماره ۱ و ۳، در دهانه های ۳۰۰ متری و با زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و ضریب سختی اولیه 4000 kN/m

حالت شماره ۶: بروز فرونشست در دکل های بحرانی مشخص شده در حالات شماره ۱ و ۳، در دهانه های ۳۰۰ متری و با ضریب سختی اولیه 4000 kN/m، در شرایط رخداد کاهش سختی زیر پایه های دکل بصورت غیریکنواخت

حالت شماره ۷: بروز فرونشست و تاثیر آن بر نیروی موجود در کابل های هادی

حال، متناسب با دو معیار کلی کنترل نشست پی به کمتر از ۵ سانتیمتر، و کنترل اضافه تنش ایجاد شده ناشی از فرونشست در اعضای سازه ای به کمتر از ۳۵٪، میتوان مقادیر بحرانی ضریب کاهش سختی و به تبع آن مقادیر بحرانی نسبت افت سطح آب زیرزمینی به ضخامت لایه تحکیمی را بر اساس اطلاعات ارائه شده در فصول ۲ و ۳، به شکل جدول ۴-۱۰ مشخص نمود.

ابتدای امر تاکید میشود که به منظور در نظر گرفتن شرایط ایمن با توجه به عدم اطمینانهای محتمل در پارامترهای سازه ای، یک ضریب اطمینان برابر با ۳، برای مقادیر بیشینه نشست پی و نیز اضافه تنش سازه ای لحاظ شده و بنابراین مقدار نشست بیشینه قابل تحمل معادل ۱/۷ سانتیمتر و مقدار اضافه تنش مجاز برابر با ۱۲٪ برای تعیین حدود عملکردی سازه ها در نظر گرفته شده است. ضمناً با انجام آنالیز وابسته به زمان تحکیم و نیز در نظر گرفتن موقعیت خاص هر دکل در داخل خط و مشخصات سازه ای، میتوان زمان رسیدن کاهش سختی خاک به محدوده های پیشنهاد شده را نیز پیش بینی نمود.

جدول ۴-۱۰ تعیین حدود بحرانی کاهش سختی در حالات مختلف رخداد فرونشست زیر پایه دکل های انتقال نیرو

| حالت رخداد فرونشست | ضریب کاهش سختی بحرانی کنترل کننده نشست ۱/۷ سانتیمتری                       | ضریب کاهش سختی بحرانی کنترل کننده اضافه تنش ۱۲٪ی                                 | نسبت معادل $H_w/H_{con}$ برای ضریب کاهش سختی کنترل کننده هر دو معیار نشست و اضافه تنش |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱                  | ۲۷٪                                                                        | رخ نمیدهد                                                                        | ۰/۱۲                                                                                  |
| ۲                  | ۲۳٪                                                                        | رخ نمیدهد                                                                        | ۰/۹                                                                                   |
| ۳                  | ۲۲٪                                                                        | ۲۷٪                                                                              | ۰/۰۸                                                                                  |
| ۴                  | طول دهانه ۱۰۰ متر: ۲۸٪<br>طول دهانه ۳۰۰ متر: ۲۶٪<br>طول دهانه ۴۰۰ متر: ۲۰٪ | طول دهانه ۱۰۰ متر: رخ نمیدهد<br>طول دهانه ۳۰۰ متر: ۲۳٪<br>طول دهانه ۴۰۰ متر: ۱۸٪ | طول دهانه ۱۰۰ متر: ۱۷٪<br>طول دهانه ۳۰۰ متر: ۰/۰۸<br>طول دهانه ۴۰۰ متر: ۰/۰۶۵         |
| ۵                  | زاویه خط ۳۰ درجه: ۱۷٪<br>زاویه خط ۶۰ درجه: ۲۰٪<br>زاویه خط ۹۰ درجه: ۲۵٪    | زاویه خط ۳۰ درجه: ۲۲٪<br>زاویه خط ۶۰ درجه: ۲۷٪<br>زاویه خط ۹۰ درجه: رخ نمیدهد    | زاویه خط ۳۰ درجه: ۰/۰۶<br>زاویه خط ۶۰ درجه: ۰/۰۷<br>زاویه خط ۹۰ درجه: ۰/۱۰            |
| ۶                  | ۰۶۵٪ زیر یک پایه دکل و ۲۷٪ زیر پایه دیگر همان دکل                          | ۷٪ زیر یک پایه دکل و ۲۷٪ زیر پایه دیگر همان دکل                                  | ۰/۰۵ برای ایجاد کاهش سختی به مقدار ۰/۰۷ و بروز ترک احتمالی زیر یک پایه دکل دیگر       |
| ۷                  | موضوعیت ندارد                                                              | ۲۷٪<br>(بحران در کابل های تراز بالای دکل خصوصاً کابل راس)                        | ۰/۱۲                                                                                  |

اطلاعات ارائه شده در جدول ۴-۱۰ نشان میدهد که بحرانی ترین حالت که ممکن است در اثر فرونشست زمین برای دکل های انتقال نیرو رخ دهد، حالت شماره ۶ یعنی بروز نشست به صورت غیریکنواخت در زیر پی یک دکل میباشد. در این حالت اگر یکی از ۴ پایه زیر یک دکل کاهش سختی به میزان فقط ۵/۶٪ را تجربه کند و پایه دیگر کاهش

سختی ۲۷٪ را داشته باشد (که مثلاً میتواند معادل وقوع ترک خوردگی زمین یا فروچاله فرونشستی در نزدیکی آن پایه باشد)، در آن صورت هم افزایش اضافه تنش در اعضا به بیش از ۱۲٪ و هم نشست پایه به بیش از ۱/۷ سانتیمتر رخ خواهد داد. با توجه به این مساله، بطور کلی دو حالت کنترلی به شرح زیر برای تعیین حدود عملکردی ایمن دکل های انتقال نیرو پیشنهاد میشود:

۱- اگر دکل در معرض نشست غیریکنواخت یا خط ترک خوردگی یا فروچاله نباشد، و به عبارتی خط انتقال نیرو در قسمتی از دشت واقع شده باشد که دچار فرونشست یکنواخت و بدون ایجاد ترک خوردگی در سطح زمین شده باشد، پیشنهاد میشود که مقدار کاهش سختی به حداکثر ۱۷٪ محدود گردد. این مقدار کاهش سختی را میتوان معادل افت تراز آب زیرزمینی به حدود ۷٪ از ضخامت لایه تحکیم پذیر موجود در منطقه در نظر گرفت. همچنین پیشنهاد میشود که در دکل های زاویه ای با زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه، مقدار بحرانی ضریب کاهش سختی به بیش از ۱۰٪ و ۱۳٪ افزایش نیابد.

۲- اگر دکل در معرض نشست غیریکنواخت یا خط ترک خوردگی یا فروچاله قرار داشته باشد، مقدار S.R.F. زیر پایه های دکل به هیچ عنوان نباید به بیش از ۶/۵٪ برسد. این مقدار کاهش سختی تقریباً معادل با افت تراز آب زیرزمینی به مقدار ۵٪ از ضخامت لایه تحکیم پذیر در منطقه است. همچنین در دکل های زاویه ای، پیشنهاد میشود که مقدار حداکثر کاهش سختی به ۳٪ محدود گردد.

تبصره ۱: در صورت احتمال وقوع کاهش سختی زیر پی دکلها به مقدار بیش از ۱۷٪، کنترل و بازرسی کشش کابل های هادی اکیدا پیشنهاد میشود.

## ۲-۲-۵-۴ حدود عملکردی تونل های انتقال نیرو

بازهی تغییرات ضریب کاهش سختی خاک ناشی از اعمال فرونشست بر تونل های نیرو به منظور محاسبه ی حدود عملکردی خط انتقال به کمک آنالیز وابسته به زمان تحکیم انجام شده و بر طبق محاسبات و مدلسازی های انجام شده، قضاوت مهندسی و اعمال ضریب اطمینان ۳، به صورت زیر به دست آمده است:

۱- بازهی ایمن بودن تونل های انتقال:  $S.R.F \leq 3.3\%$

۲- بازهی ایمن بودن تونل های انتقال به شرط  
بازرسی مداوم خط:  $3.3\% < S.R.F < 17\%$

۳- بازهی ناایمن بودن تونل های انتقال:  $S.R.F \geq 17\%$

بنابراین اگر یک تونل انتقال از زمان شروع فرونشست تا به حال دچار مقدار S.R.F کمتر از ۳/۳٪ (به معنای آنکه سختی خاک ناشی از فرونشست تا ۳/۳٪ نسبت به مقدار اولیه خود کم شود)، شده باشد، این تونل به طور کلی نسبت به اثر فرونشست ایمن است. با انجام آنالیز وابسته به زمان تحکیم و نیز در نظر گرفتن مشخصات سازه ای و هندسی تونل و عمق مدفون آن، میتوان زمان رسیدن کاهش سختی خاک به محدوده های پیشنهاد شده را پیش بینی نمود.

## ۴-۶ پنجم: نتیجه گیری

در این گزارش، اثر فرونشست زمین بر سازه های منتخب انتقال نیرو از دیدگاه سازه ای مورد بررسی قرار گرفت. در این خصوص، با مروری بر سوابق خرابی های گذشته و نیز احتمال وقوع خرابی ها در برخی سازه ها، دکل های مشبک انتقال نیرو و تونل های نیرو به عنوان سازه های منتخب مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی اثر اعمال فرونشست بر دکل ها و تونل های انتقال نیرو با در نظر گرفتن موارد زیر انجام شد:

- به کمک معادلات تحکیم و مدل سازی اجزای محدود در نرم افزار Plaxis، ارتباط بین مقدار فرونشست با ارتفاع افت تراز آب زیرزمینی و کاهش سختی خاک زیر پی دکل ها، با عنایت به رفتار غیراشباع خاک سطحی مورد بررسی قرار گرفت. در این خصوص ضریب کاهش سختی زیر پی دکل ها به مقدار نشست تحکیمی وابسته شد.
- دکل های انتقال نیرو با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل مودهای محتمل خرابی پی، فاصله دهانه دکلها، سختی اولیه خاک زیر پی دکل و زاویه خط، میزان افت تراز آب و ضخامت لایه تحکیمی، به صورت یک خط با ۵ دکل در نرم افزار SAP2000 مدلسازی شدند.
- فرونشست به صورت کاهش سختی خاک زیر پی از ۰ تا ۹۵٪ مقدار اولیه سختی، بر فنرهای فشاری معادل در زیر پی دکلها اعمال شد.
- اثر فرونشست بر کشش کابل های دکل بررسی شد.
- دو پارامتر افزایش نیرو در اعضای سازه ای تا ۳۵٪ و مقدار نشست پی دکل تا حداکثر ۵ سانتیمتر، به عنوان پارامترهای کنترلی "کران بالا" مورد بررسی قرار گرفتند.
- تونل های انتقال نیرو در دو اندازه ها و عمق های مدفون مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و پارامتر افزایش نیروی محوری، لنگر خمشی و برش درون صفحه ای به عنوان پارامترهای کنترلی در آنها بررسی شدند.

نتایج بررسی ها نشان داد که:

۱. مود خرابی نشست غیریکنواخت پی دکلها، بیشترین اثر بحرانی را در دکلها دارد.
۲. با افزایش فاصله دهانه، اثر فرونشست بر اضافه نیرو در المانهای سازه ای دکل افزایش میابد.
۳. زاویه بحرانی امتداد دکلها در یک خط انتقال نیرو، ۳۰ درجه است.
۴. فرونشست معادل با افزایش ضریب کاهش سختی، ابتدا افزایش یافته و سپس تا حدود کاهش سختی معادل ۸۰ درصد همچنان افزایشی اما با نرخ کاهشی روبروست و سپس به واسطه ایجاد گسیختگی در خاک مجدداً نرخ افزایشی میابد.
۵. ضخامت لایه تحکیمی و نرخ افت آب زیرزمینی متناسب با آن، بر ضریب کاهش سختی خاک اثر افزاینده دارد.
۶. اعضای سازه ای دکل که درصد افزایش نیرو در آنها از مقدار مجاز ۳۵٪ تجاوز کرده، عمدتاً شامل پایه ها، اعضای قطری و کمربندی دکل در ترازهای ارتفاعی پایین دکل هستند و بنابراین، گسیختگی این اعضا میتواند منجر به خرابی کل دکل و عدم کارایی خط شود.

۷. بحرانی ترین شرایط از نظر افزایش نیروی کشش کابل در کابل راس دکلها و در دهانه های ۱۰۰ متری رخ میدهد.

۸. بیشترین مقدار نشست ، در شرایطی رخ میدهد که هر ۴ پایه دکل به مقدار یکسان نشست کنند.

۹. تونل های انتقال نیرو بسته به شعاع، عمق مدفون و ضخامت پوشش محافظ تونل متاثر از فرونشست هستند و بروز فرونشست در خاک اطراف تونل باعث ایجاد یک اضافه نیرو به میزان میانگین حدود ۵۰٪ در مقدار بیشینه لنگر و برش و حدود ۳۰٪ در نیروی محوری پوشش محافظ تونل میشود.

۱۰. در این گزارش، حدود عملکردی (از حیث ایمنی) دکلها و تونل های انتقال نیرو با توجه به مطالعات انجام شده پیشنهاد شده است. این مقادیر حالت کلی داشته و برای هر حالت خاص از سازه مقدار دقیق و زمان رسیدن به این حدود از آنالیزهای مربوط به آن سازه به دست می آید. بطور کلی، حد ایمن فرونشست یکنواخت بدون ایجاد ترک خوردگی و فروچاله در سطح زمین معادل کاهش سختی خاک به میزان حدود ۱۷٪ است که در شرایط احتمال وقوع نشست غیریکنواخت در پایه های دکل یا بروز خط شکست فرونشست در نزدیکی پایه دکل، این کاهش سختی نباید از ۷٪ تجاوز کند. همچنین در تونلهای انتقال نیرو، حد ایمن کاهش سختی خام در اثر فرونشست در حدود ۳/۳٪ پیشنهاد میگردد.



## ۵ مراجع

- [۱] J. Poland, "Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal," Unesco, Paris, 1984.
- [۲] S. Leake, "Land subsidence from ground-water pumping," U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, 2004.
- [۳] A. Waltham, Ground and subsidence, New York: Chapman and Hall, 1989 .
- [۴] T. Holzer and D. Galloway, "Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States," Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, vol. 16, pp. 87-99, 2005 .
- [۵] مدیریت زمین شناسی و زیست محیطی، "فرونشست و پیامدهای نامطلوب آن در ایران و جهان"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ۱۳۸۳.
- [۶] T. Holzer and E. Pampeyan, "Earth fissures and localized differential subsidence," Water Resource Research, vol. 17, no. 1, pp. 223-227, 1981 .
- [۷] White W.B., Rate processes: chemical kinetic and karst landform development, London: Allen and Unwin, 1984 .
- [۸] ر. صالحی، م. غفوری، غ. لشکری پور و م. دهقانی، "بررسی علل فرونشست زمین در دشت مهبیار جنوبی"، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی، مشهد، ۱۳۹۱.
- [۹] F. Nelson, O. Anisimov and N. Shiklomanov, "Subsidence risk from thawing permafrost," Natural International Weekly Journal of Science, vol. 410, pp. 889-890, 2001 .
- [۱۰] ا. نظام عظیمی، س. م. موسوی و م. رحیم زادگان، "پیش بینی احتمال فرونشست دشت قزوین با توجه به بیلان منفی آب زیرزمینی و راهکارهای جلوگیری یا کنترل آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-منابع آب دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۲.
- [۱۱] Y. Xu, S. Shen, Z. Cai and G. Zhou, "The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China," Natural Hazards, vol. 45, pp. 123-135, 2008 .
- [۱۲] B. Murk, B. Skinner and S. Porter, Environmental Geology, New York: John Willey and Sons, 1996 .
- [۱۳] م. شریفی کیا، "بررسی پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست در اراضی و دشت های مسکونی ایران"، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، شماره (۳) ۴، صفحه ۴۳-۵۸، ۱۳۹۰.
- [۱۴] C. Fitts, Groundwater Science, California: Academic Press, 2002 .
- [۱۵] ا. نیکخوا، س. م. موسوی و ا. بارانی، "بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج آب های زیرزمینی در دشت هشتگرد با در نظر داشتن ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران -مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۲.

- [۱۶] T. Lambe and R. Whitman, Soil Mechanics, New York: JOHN WILEY, 1969 .
- [۱۷] B. Das, Advanced Soil Mechanics, London and New York: Taylor & Francis, 2008 .
- [۱۸] E. Fox, "The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface," in International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1984 .
- [۱۹] J. Bowles, "Elastic foundation settlement on sand deposits," Journal of Geotechnical Engineering, vol. 113, no. 8, pp. 846-860, 1987 .
- [۲۰] A. Casagrande, "Determination of the preconsolidation load and its practical significance," in 1th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 1936 .
- [۲۱] K. Terzaghi, Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlager, Deuticke: Vienna, 1925 .
- [۲۲] F. Riley, Mechanism of aquifer system the lagacy of Joseph F. Poland in Land subsidence, 1998 .
- [۲۳] H. Bouwer, Groundwater Hydrology, McGraw-Hill, 1978 .
- [۲۴] د. رحمانیان، "گزارش نشست زمین در کرمان"، مجله آب، شماره ۵ و ۶، ۱۳۶۳.
- [۲۵] J. Poland and G. Davis, "Land subsidence due to withdrawal of fluids in Varnes D.J., and Kiersch G., eds," Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, vol. 2, pp. 187-269, 1969 .
- [۲۶] ر. آل خمیس، س. کریمی نسب و ف. آریانا، "بررسی تاثیر نشست حاصل از تخلیه آب زیرزمینی بر تخریب لوله جدار"، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۶۰، صفحه ۷۷-۸۸، ۱۳۸۵.
- [۲۷] ر. عطار نژاد و ا. رباطی، اجزاء محدود در آب های زیرزمینی، شماره ۸۸، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ۱۳۸۶.
- [۲۸] ا. شمسایی، هیدرولیک جریان آب در محیط های متخلخل، کاربرد مدل های ریاضی- کامپیوتری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۷۷.
- [۲۹] ن. کرسیک، ح. چیت سازان و م. کشکولی، مدلسازی آب های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۱۳۸۱.
- [۳۰] A. Jayeoba, S. Mathias, S. Nielsen, V. Vilarrasa and T. Bjomara, "Closed-form equation for subsidence due to fluid production from a cylindrical confined aquifer," Journal of Hydrology, pp. 1-17, 2019 .
- [۳۱] J. Geertsma, "Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs," petroleum technology, vol. 25, pp. 734-744, 1973 .
- [۳۲] C. Theis, "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage," EOS Transactions American Geophysical Union, vol. 16, pp. 519-524, 1935 .
- [۳۳] L. Dake, Fundamentals of Reservoir Engineering, Elsevier Science, 1983 .
- [۳۴] A. Mijic, S. Mathias and T. LaForce, "Multiple Well Systems with Non-Darcy Flow," Groundwater, vol. 51, pp. 588-596, 2013 .
- [۳۵] E. Fjaer, R. Holt, P. Horsrud, R. A.M. Raeen and R. Risnes, Petroleum Related Rock Mechanics, Elsevier Science, 2008 .



[۳۶]H. Cooper and C. Jacob, "A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history," EOS, Transactions American Geophysical Union, vol. 27, pp. 526-534, 1946 .

[۳۷]C. Wen-Hsing, 3D-Groundwater Modeling with PMWIN, New York: Berlin Heidelberg, 2005 .

[۳۸]H. Wang and M. Anderson, Introduction to groundwater modeling, finite difference and finite element methods, New York: Academic Press, 1982 .

[۳۹] ا. نیکخو، س. م. موسوی و ا. بارانی، "بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج آب های زیرزمینی در دشت هشتگرد با در نظر داشتن تغییر ضریب هدایت هیدرولیکی"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۲.

[۴۰]C. Kumar, Groundwater model, Roorkee: National institute of hydrology, 2010 .

[۴۱]M. Mc Donald and A. Harbaugh, "Modflow a modular three dimensional finite difference groundwater flow model," US Geology Survey, 1998.

[۴۲]J. Hoffmann, S. Leake, D. Galloway and A. M. Wilson, "MODFLOW-2000 Ground-Water Model--User guide to Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package," U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Tucson, Arizona, 2003.

[۴۳]T. Burbey, "Storage coefficient revisited---Is purely vertical strain a good approximation?," Groundwater, vol. 39, no. 3, pp. 458-464, 2001 .

[۴۴]J. Poland, B. Lofgren, R. Ireland and R. Pugh, "Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1972," U.S. Geological Survey Professional Paper, Vols. 437-H, p. 78, 1975 .

[۴۵]R. Meade, "removal of water and rearrangement of particles during the compaction of clayey sediments--review," U.S. Geological Survey Professional paper, Vols. 497-B, p. 23, 1964 .

[۴۶]F. Riley, "Analysis of borehole extensometer data from central California," International Association of Scientific Hydrology Publication, vol. 89, pp. 423-431, 1969 .

[۴۷]S. Leake and D. Prudic, Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, 1991 .

[۴۸]M. Mahmoudpour, M. Khamechiyan, M. R. Nikudel and M. R. Ghassemi, "Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused," Engineering Geology, vol. 201, pp. 6-28, 2016 .

[۴۹] ر. رزمگیر، س. م. موسوی و ا. شمشکی، "مدلسازی فرونشست زمین و راهکارهای کمینه کردن از دیدگاه مدیریت منابع آب زیرزمینی(مطالعه موردی: دشت ورامین جنوبی)"، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۰.

[۵۰]M. H. A. Donald, "A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. US," Geological Survey Technique of Water Resources Investigation,, US, 1988.

[۵۱]K. Larson, H. Basgaoglu and M. Marino, "Numerical simulation of land subsidence in the Los Banos-kettleman City Area, California," University of California Water Resources Center, Technical Completion Report, California, 1999..

[۵۲]J. Hoffmann, D. Galloway and H. Zebker, "Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California,," Water Resource Research, vol. 39, no. 2, p. 1031, 2003a .

- [۵۳] J. Delluer, The handbook of groundwater engineering, Purdue University, 1998 .
- [۵۴] C. Desai, Introductory Finite Element Method, Florida: CRC Press, 2001 .
- [۵۵] D. Potts, Finite Element Analysis in Geotechnic Engineering: Theory, London: Thomas Telford, 1999 .
- [۵۶] J. Booker and J. Small, "An investigation of the stability of numerical solutions of Biot's equation of consolidation," International Journal of Solids and Structures, vol. 11, pp. 907-917, 1975 .
- [۵۷] S. Sloan and A. Abbo, "Biot consolidation analysis with automatic time stepping and error control; Part 1: theory and implementation," International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, vol. 23, pp. 467-492, 1992 .
- [۵۸] M. Sayyaf, M. Mahdavi, O. Barani, S. Feiznia and B. Motamedvaziri, "Simulation of land subsidence using finite element method; Rafsanjan plain case study," Natural Hazards, vol. 72, pp. 309-322, 2014 .
- [۵۹] Z. Lou and F. Zeng, "Finite element numerical simulation of land subsidence and groundwater exploitation based on visco-elastic-plastic biot's consolidation theory," Journal of Hydrodynamics, vol. 23, no. 5, pp. 615-624, 2011 .
- [۶۰] س. ا. حسینی، م. غفوری و ج. بلوری بزاز، "پیش بینی نشست پی های سطحی به کمک ماشین بردار پشتیبان"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-خاک و پی دانشگاه فردوسی، مشهد، ۱۳۹۲.
- [۶۱] D. Rumelhart and J. McClelland, Parallel distributed processing: Exploration in the microstructure of cognition, MIT Press, 1986 .
- [۶۲] T. Mitchell, Machine Learning, McGraw-Hill Science, 1997 .
- [۶۳] M. Mohtasham, A. Dehghani, A. Akbarpour, M. Meftah Halaghi and B. Etebari, "Groundwater level determination by using artificial neural network (case study: Birjand Aquifer)," Iranian Journal of Irrigation and Drainage, vol. 4, no. 1, pp. 1-10, 2010 .
- [۶۴] س. انگورانی، ح. معماریان، م. شریعت پناهی و م. ج. بلورچی، "مدلسازی پویای فرونشست دشت تهران"، نشریه علوم زمین، شماره ۲۵(۹۷)، صفحه ۲۱۱-۲۲۰، ۱۳۹۴.
- [۶۵] M. Shahin, M. Jaksa and H. Maier, "Neurofuzzy networks applied to settlement of shallow foundations on granular soils," in 9th int.conf. on applications of statistics and probability in civil eng., ICASP9, San Francisco. Rotterdam: Millpress, 2003 .
- [۶۶] J. Holland, Adaption in Natural and Artificial Systems, University of Michigan, 2011 .
- [۶۷] M. Melanie, An Introduction to Genetic Algorithm, England: MIT Press Cambridge, 1999 .
- [۶۸] س. موسویان و ا. اسدزاده، "پیش بینی تقاضای بنزین در ایران بر مبنای شاخص های اقتصادی: یک تحلیل مقایسه ای بین الگوریتم زنتیک و PSO"، چهارمین کنفرانس بین المللی برنامه ریزی و مدیریت، ۱۳۹۶.
- [۶۹] ع. ستاری جاوید و ا. دانشگر، "مدلی برای بررسی و تحلیل یادگیری ماشین"، پایان نامه علوم کامپیوتر گرایش نظریه ی محاسبه دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۹۵.
- [۷۰] V. Vapnik, The nature of statistical learning theory, New York: Springer, 1995 .
- [۷۱] B. Choubin, A. Heydari, A. Heydari, F. Sajedi Hosseini, S. Shamshirband, K. Dashtekian and P. Ghamishi, "Earth fissure hazard prediction using machine learning models," Environmental Research, vol. 179, no. 108770, 2019 .

[۷۲]G. Ren, D. J. Reddish and B. N. Whittaker, "Mining subsidence and displacement prediction using influence function methods," *Journal of Mining Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 89-104, 1987 .

[۷۳]G. Ren, J. Buckeridge and J. Li, "Estimating Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Unconfined Aquifers using an Influence Function Method," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 141, no. 7, p. 04014084, 2014 .

[۷۴]A. Nadiri, Z. Taheri, R. Khatibi, G. Barzegari and K. Dideban, "Intriducing a new framework for mapping susidence vulnerability indices(SVIs): ALPRIFT," *Science of the total Environment*, Vols. 628-629, pp. 1043-1057, 2018 .

[۷۵] ع. منافی آذ، م. خامه چیان، ع. ندیری و م. شریفی کیا، "بهینه سازی روش ALPRIFT با استفاده از ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای ارزیابی آسیب پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران"، *مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران*، شماره (۱۱۲)، صفحه ۱-۱۴، ۱۳۹۷.

[۷۶] ع. منافی آذر، م. خامه چیان و ع. ندیری، "مقایسه آسیب پذیری فرونشست آبخوان دشت جنوب غربی تهران با مدل وزن دهی ساده(مدل ALPRIFT) و الگوریتم ژنتیک"، *نشریه علوم دانشگاه خوارزمی*، شماره (۴۲)، صفحه ۱۹۹-۲۱۲، ۱۳۹۷.

[۷۷]م. ف. نیا، "آنالیز سری زمانی تداخلسنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی با استفاده از دادههای ENVISAT-ASAR و Sentinel-1 جهت پایش پدیدهی فرونشست در منطقه شهری تهران"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، ۱۳۹۶.

[۷۸]J. F. Poland, *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*, 1984.

[۷۹]م. دهقانی، "تعیین نرخ و مدل سازی فرونشست زمین تحت تأثیر استخراج آب های زیر زمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری " رساله ی دکتری گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دانشکده ی ژئودزی و ژئوماتیک ۱۳۸۸.

[۸۰]ا.پ. حقیقتمهر، "مطالعه فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب های زیرزمینی و چاه های نفتی به کمک تداخل سنجی راداری " گروه مهندسی نقشه برداری ۱۳۸۹.

[۸۱]A. Ferretti, G. Savio, R. Barzaghi, A. Borghi, S. Musazzi, F. Novali, et al., "Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation," 2007.

[۸۲]D. A. Schmidt and R. Bürgmann, "Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set," *Geophysical Research*, 2003.

[۸۳]ی. مقصودی، مبانی سنجش از دور راداری. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. ۱۳۹۴.

[۸۴]J. Pulkkinen, "Laserkeilauksen soveltaminen sähköverkon kunnossapidossa (Laser scanning in electricity network maintenance) Master's thesis," Aalto University School of Engineering (in Finnish, English abstract), 2015.

[۸۵]R. Aggarwal, A. Johns, J. Jayasinghe, and W. Su, "An overview of the condition monitoring of overhead lines," *Electric Power systems research*, vol. 53, pp. 15-22, 2000.

[۸۶]J. Katrasnik, F. Pernus, and B. Likar, "A survey of mobile robots for distribution power line inspection," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 25, pp. 485-493, 2009.

[۸۷]J. Ahmad, A. S. Malik, L. Xia, and N. Ashikin, "Vegetation encroachment monitoring for transmission lines right-of-ways: A survey," *Electric Power Systems Research*, vol. 95, pp. 339-352, 2013.

[۸۸]I. Ituen and G. Sohn, "The way forward: Advances in maintaining right-of-way of transmission lines," *Geomatica*, vol. 64, pp. 451-462, 2010.

- [۸۹] S. J. Mills, M. P. G. Castro, Z. Li, J. Cai, R. Hayward, L. Mejias, et al., "Evaluation of aerial remote sensing techniques for vegetation management in power-line corridors," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 3379-3390, 2010.
- [۹۰] R. A. McLaughlin, "Extracting transmission lines from airborne LIDAR data," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, pp. 222-226, 2006.
- [۹۱] L. Matikainen, M. Lehtomäki, E. Ahokas, J. Hyypä, M. Karjalainen, A. Jaakkola, et al., "Remote sensing methods for power line corridor surveys," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 119, pp. 10-31, 2016/09/01/ 2016.
- [۹۲] A. Rucci, A. Ferretti, A. Monti Guarnieri, and F. Rocca, "Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements," *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 156-163, 5/15/ 2012.
- [۹۳] م. د. جم، "تعیین محدوده فرونشست زمین و بررسی تغییرات زمانی آن با استفاده از روش تداخل سنجی راداری در دشت مهبیار " کارشناسی ارشد فنی مهندسی، عمران-سنجش از دور، دانشگاه اصفهان، اصفهان، بهمن ۱۳۸۹.
- [۹۴] B. W. Murck, Porter, Stephen C and Skinner, Brian J., *Environmental geology*. New York: John Wiley & Sons,, 1996.
- [۹۵] T. L. Holzer and E. H. Pampeyan, "Earth fissures and localized differential subsidence," *Water Resources Research*, vol. 17, pp. 223-227, 1981.
- [۹۶] .(۲۰۰۸)NRCAN .
- [۹۷] T. J. Wright, "Crustal deformation in Turkey from synthetic aperture radar interferometry," University of Oxford, 2000.
- [۹۸] T. R. Lauknes, "Long-term surface deformation mapping using small-baseline differential SAR interferograms," Unpublished Master Thesis, Department of Physics and Technology, University of Tromso, Norway, 2004.
- [۹۹] A. Ferretti, A. V. MONTI-GUARNIERI, C. Prati, F. Rocca, and D. Massonnet, *INSAR Principles A: ESA publications*, 2007.
- [۱۰۰] U. Wegmüller, M. Santoro, and C. Werner, "Multi-temporal SAR data filtering for land applications," in *ESA Living Planet Symposium*, Edinburgh, UK, 2013, pp. 9-13.
- [۱۰۱] A. Sharv, "differential SAR interferometry for crustal deformation study," international institute for geo information science and earth observation, ENSCHEDE the Netherlands, 2003.
- [۱۰۲] D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface," *Reviews of geophysics*, vol. 36, pp. 441-500, 1998.
- [۱۰۳] R. Hanssen, "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands," 2001.
- [۱۰۴] B. Salehi, "Title," unpublished.
- [۱۰۵] W. Zou, Y. Li, Z. Li, and X. Ding, "Improvement of the accuracy of InSAR image co-registration based on tie points—a review," *Sensors*, vol. 9, pp. 1259-1281, 2009.
- [۱۰۶] S. Usai, "A least squares database approach for SAR interferometric data," 2003.

[۱۰۷]H. A. Zebker, C. L. Werner, P. A. Rosen, and S. Hensley, "Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, pp. 823-836, 1994.

[۱۰۸]A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker, "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 112, 2007.

[۱۰۹]A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," 2001.

[۱۱۰]O. Mora, J. J. Mallorqui, and A. Broquetas, "Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images," 2003.

[۱۱۱]C. Werner, U. Wegmuller, T. Strozzi, and A. Wiesmann, "Interferometric point target analysis for deformation mapping," in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International, 2003, pp. 4362-4364.

[۱۱۲]B. M. Kampes, "Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry," TU Delft, Delft University of Technology, 2005.

[۱۱۳]ان. ف. مقدم, "پایش میزان فرونشست زمین در میدان نفتی آغاجاری بر پایه تداخل سنجی تفاضلی راداری", دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی تهران, ۱۳۸۸.

[۱۱۴]F. K. Li and R. M. Goldstein, "Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars," 1990.

[۱۱۵]A. K. Gabriel and R. M. Goldstein, International Journal of Remote Sensing, vol. 9, p. 857, 1988.

[۱۱۶]A. L. Gray and P. L. Farris-Manning, I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, p. 180, 1993.

[۱۱۷]A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, Journal of Geophysical Research, vol. 94, p. 9183, 1989.

[۱۱۸]D. Massonnet and F. Adragna, "A full-scale validation of Radar Interferometry with ERS-1: the Landers earthquake," Earth Observation Quarterly, vol. 41, pp. 1-5, 1993.

[۱۱۹]H. A. Zebker, P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel, and C. L. Werner, "On the derivation of coseismic displacement-fields using differential radar interferometry the Landers earthquake," Geophysical Research, 1994.

[۱۲۰]D. Massonnet and H. Vadon, "EES-1 internal clock drift measured by interferometry," IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 33, pp. 401-408, 1995.

[۱۲۱]Y. Maghsoudi, F. van der Meer, C. Hecker, D. Perissin, and A. Saepuloh, "Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia," International journal of applied earth observation and geoinformation, vol. 64, pp. 386-396, 2018.

[۱۲۲]E. J. Fielding, R. G. Blom, and R. M. Goldstein, "Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry," Geophysical Research Letters, vol. 25, pp. 3215-3218, 1998.

- [١٢٣]R. Bürgmann, P. A. Rosen, and E. J. Fielding, "Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 28, pp. 169-209, 2000.
- [١٢٤]M. van der Kooij and D. Mayer, "The application of satellite radar interferometry to subsidence monitoring in the Belridge and Lost Hills fields, California," in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002, pp. 201-202.
- [١٢٥]Z. Wang, X. Cai, J. Yan, J. Wang, Y. Liu, and L. Zhang, "Using the integrated geophysical methods detecting active faults: A case study in Beijing, China," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 156, pp. 82-91, 2018.
- [١٢٦]D. Raucoules, S. Le Mouélic, C. Carnec, C. Maisons, and C. King, "Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry," *International journal of remote sensing*, vol. 24, pp. 891-897, 2003.
- [١٢٧]T. Strozzi, U. Wegmuller, L. Tosi, G. Bitelli, and V. Spreckels, "Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 67, pp. 1261-1270, 2001.
- [١٢٨]A. Hooper, D. Bekaert, K. Spaans, and M. Arıkan, "Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation," *Tectonophysics*, vol. 514–517, pp. 1-13, 1/5/ 2012.
- [١٢٩]R. Boni, G. Pilla, and C. Meisina, "Methodology for detection and interpretation of ground motion areas with the A-DInSAR time series analysis," *Remote Sensing*, vol. 8, p. 686, 2016.
- [١٣٠]A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 38, pp. 2202-2212, 2000.
- [١٣١]N. Adam, B. Kampes, M. Eineder, J. Worawattanamateekul, and M. Kircher, "The Development of a Scientific Permanent Scatterer System," 2003.
- [١٣٢]A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method formeasuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," 2004.
- [١٣٣]M. Crosetto, A. Arnaud, J. Duro, E. Biescas, and M. Agudo, "Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data," 2003.
- [١٣٤]C. Werner, U. Wegmuller, T. Strozz1, and A. Wiesmaenn, "Interferometric point target analysis for deformation mapping," 2003.
- [١٣٥]P. Ma and H. Lin, "Robust detection of single and double persistent scatterers in urban built environments," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 2124-2139, 2015.
- [١٣٦]M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthery, and B. Crippa, "Persistent Scatterer Interferometry: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 78-89, 5// 2016.
- [١٣٧]P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," 2002.
- [١٣٨]R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorqui, P. Berardino, and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms," 2004.

- [۱۳۹] L. Solari, A. Ciampalini, F. Raspini, S. Bianchini, I. Zinno, M. Bonano, et al., "Combined use of C-and X-Band SAR data for subsidence monitoring in an urban area," *Geosciences*, vol. 7, p. 21, 2017.
- [۱۴۰] G. Sarti, V. Rossi, and A. Amorosi, "Influence of Holocene stratigraphic architecture on ground surface settlements: A case study from the City of Pisa (Tuscany, Italy)," *Sedimentary Geology*, vol. 281, pp. 75-87, 2012.
- [۱۴۱] K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri, *Soil mechanics in engineering practice*: John Wiley & Sons, 1996.
- [۱۴۲] A. Hooper, "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches," *Geophysical Research Letters*, vol. 35, pp. n/a-n/a, 2008.
- [۱۴۳] V. G. Ketelaar, *Satellite radar interferometry: Subsidence monitoring techniques* vol. 14: Springer Science & Business Media, 2009.
- [۱۴۴] C. Zhou, H. Gong, B. Chen, J. Li, M. Gao, F. Zhu, et al., "InSAR time-series analysis of land subsidence under different land use types in the Eastern Beijing Plain, China," *Remote Sensing*, vol. 9, p. 380, 2017.
- [۱۴۵] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR," 2011.
- [۱۴۶] K. Goel and N. Adam, "A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 5454-5468, 2013.
- [۱۴۷] X. Lv, B. Yazıcı, M. Zeghal, V. Bennett, and T. Abdoun, "Joint-scatterer processing for time-series InSAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 7205-7221, 2014.
- [۱۴۸] R. Boni, C. Meisina, F. Cigna, G. Herrera, D. Notti, S. Bricker, et al., "Exploitation of satellite A-DInSAR time series for detection, characterization and modelling of land subsidence," *Geosciences*, vol. 7, p. 25, 2017.
- [۱۴۹] R. M. Mateos, P. Ezquerro, J. A. Luque-Espinar, M. Béjar-Pizarro, D. Notti, J. M. Azañón, et al., "Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions," *Journal of hydrology*, vol. 553, pp. 71-87, 2017.
- [۱۵۰] C. Zhou, H. Lan, H. Gong, Y. Zhang, T. A. Warner, J. J. Clague, et al., "Reduced rate of land subsidence since 2016 in Beijing, China: evidence from Tomo-PSInSAR using RadarSAT-2 and Sentinel-1 datasets," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 41, pp. 1259-1285, 2020.
- [۱۵۱] D. L. Galloway, K. W. Hudnut, S. Ingebritsen, S. P. Phillips, G. Peltzer, F. Rogez, et al., "Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California," *Water Resources Research*, vol. 34, pp. 2573-2585, 1998.
- [۱۵۲] J. W. Bell, F. Amelung, A. R. Ramelli, and G. Blewitt, "Land subsidence in Las Vegas, Nevada, 1935–2000: New geodetic data show evolution, revised spatial patterns, and reduced rates," *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. 8, pp. 155-174, 2002.

[۱۵۳] J. Hoffmann, D. L. Galloway, and H. A. Zebker, "Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California," *Water Resources Research*, vol. 39, 2003.

[۱۵۴] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Lacznia, "Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation," *Geology*, vol. 27, pp. 483-486, 1999.

[۱۵۵] J. Hoffmann, H. A. Zebker, D. L. Galloway, and F. Amelung, "Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry," *Water Resources Research*, vol. 37, pp. 1551-1566, 2001.

[۱۵۶] M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetz, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, vol. 168, pp. 518-526, 2007.

[۱۵۷] م. ع. ط. ع. م. س. عربی، "بررسی نشست منطقه جنوب غرب تهران،" ۱۳۸۴.

[۱۵۸] ا. س. م. ب. ا. شمشکی. (۱۳۸۴) فرونشست زمین در دشت تهران و عوامل مؤثر در شکلگیری آن. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین اسفند.

[۱۵۹] M. Dehghani, M. J. V. Zoj, I. Entezam, S. S. Saatchi, and A. Shemshaki, "Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 4, p. 041864, 2010.

[۱۶۰] ا. ف. میرشاهی، "اندازه گیری جابجایی سطح زمین به کمک تصاویر سنجنده TerraSAR-X با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری،" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)، دانشگاه صنعتی واجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۲.

[۱۶۱] ا. ز. صادقی، "بهبود الگوریتم تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده های دائمی به منظور اندازه گیری میزان جابجایی سطح زمین،" پایان نامه کارشناسی ارشد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۰.

[۱۶۲] M. Esmaeili and M. Motagh, "Improved Persistent Scatterer analysis using Amplitude Dispersion Index optimization of dual polarimetry data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 117, pp. 108-114, 2016.

[۱۶۳] ا. ز. صادقی، "تلفیق اطلاعات پلاریمتری با تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور افزایش کارایی در مطالعه جابجایی سطح زمین،" پایان نامه دکتری گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۶.

[۱۶۴] ا. ف. ق. ص. خ. س. س. بابایی، "پردازش سری زمانی تداخلسنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فرونشست در محدوده سازه های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران،" نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، vol. 7، شهریور ۱۳۹۵، ۱۳۹۵.

[۱۶۵] M. Sarraf, M. Owaygen, G. Ruta, and L. Croitoru, "Islamic Republic of Iran: Cost assessment of environmental degradation," *Sector Note*, 2005.

[۱۶۶] M. Motagh, T. R. Walter, M. A. Sharifi, E. Fielding, A. Schenk, J. Anderssohn, et al., "Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation," *Geophysical Research Letters*, vol. 35, 2008.

[۱۶۷] M. Dehghani, M. Rastegarfar, R. A. Ashrafi, N. Ghazipour, and H. R. Khorramrooz, "Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain," *Am J Environ Eng*, vol. 4, pp. 32-40, 2014.



- [۱۶۸] J. Anderssohn, H.-U. Wetzel, T. R. Walter, M. Motagh, Y. Djamour, and H. Kaufmann, "Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling," *Geophysical Journal International*, vol. 174, pp. 287-294, 2008.
- [۱۶۹] م. دهقانی, "ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آبهای زیرزمینی" نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی, vol. 2, pp. 61-73, تابستان ۱۳۹۳, ۱۳۹۴.
- [۱۷۰] م. شریفیکیا, "تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در دشت نوق-بهرمان," برنامه ریزی و آمایش فضا, vol. 16, پاییز ۱۳۹۱, ۱۳۹۱.
- [۱۷۱] H. Motiee, E. Mcbean, A. Semsar, B. Gharabaghi, and V. Ghomashchi, "Assessment of the contributions of traditional qanats in sustainable water resources management," *International Journal of Water Resources Development*, vol. 22, pp. 575-588, 2006.
- [۱۷۲] د. م. گ. ر. ا. م. ص. ج. ر. ت. م. و. ز. پ. حقیقتمهر, "تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سامانه موقعیت یابی جهانی" علوم زمین, vol. 22, pp. 105-114, پاییز ۹۱, ۱۳۹۰.
- [۱۷۳] د. غ. ل. پ. م. غ. ر. صالحی, "بررسی فرونشست دشت مهبیار جنوبی با استفاده از روش تداخلسنجی راداری" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب, vol. 3, بهار ۱۳۹۲, ۱۳۹۱.
- [۱۷۴] S. S. Babaee, Z. Mouavi, and M. Roostaei, "Time Series Analysis of SAR Images Using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) Approaches to Determining Subsidence Rate of Qazvin Plain," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 5, pp. 95-111, 2016.
- [۱۷۵] M. Z. Ahmadi N., Masoumi Z, "Khoramdarreh Subsidence Estimation Using SAR Interferometry and Investigation its Risks," *Iranian Remote Sensing & GIS*, vol. 10, pp. 33-52, 2018.
- [۱۷۶] J. F. Poland and G. H. Davis, "Land subsidence due to withdrawal of fluids," 1969.
- [۱۷۷] T. Dixon, F. Amelung, A. Ferretti, F. Novali, F. Rocca, R. Dokka, et al., "New Orleans subsidence: space geodesy and Hurricane Katrina flooding," *Nature*, vol. 441, pp. 587-588, 2006.
- [۱۷۸] R. Ireland, J. F. Poland, and F. S. Riley, *Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1980: Prepared in Cooperation with the California Department of Water Resources: US Government Printing Office*, 1984.
- [۱۷۹] J. F. Poland and R. Ireland, *Land Subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1980: Mechanics of Aquifer Systems: US Geological Survey*, 1985.
- [۱۸۰] D. Perissin and T. Wang, "Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, pp. 271-280, 2011.
- [۱۸۱] Cui, Zhen-Dong. *Land Subsidence Induced by the Engineering-Environmental Effect*. Springer Singapore, 2018.
- [۱۸۲] Zeitoun, David G., and Eliyahu Wakshal. *Land subsidence analysis in urban areas: the Bangkok metropolitan area case study*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [۱۸۳] LU, JOHN C-C., MH CHUANG, HD YEH, and CS TSAI. "An analytical solution for land subsidence in the clayey layer due to pumping".

- ۱۸۴ Miao, Linchang, Yajun Zhang, Fei Wang, and Xiaojun Yuan. "Prediction of land subsidence using a proposed consolidation-seepage-creep coupling model." In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, pp. 1631-1640. 2011.
- ۱۸۵ Luo, Zu-jiang, and Feng Zeng. "Finite element numerical simulation of land subsidence and groundwater exploitation based on visco-elasticplastic biot's consolidation theory." *Journal of Hydrodynamics* 23, no. 5 (2011): 615-624.
- ۱۸۶ Budhu, Muniram. "Earth fissure formation from the mechanics of groundwater pumping." *International Journal of Geomechanics* 11, no. 1 (2011): 1-11.
- [۱۸۷]Zeitoun, David G., and Eliyahu Wakshal. *Land subsidence analysis in urban areas: the Bangkok metropolitan area case study*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [۱۸۸]LU, JOHN C-C., MH CHUANG, HD YEH, and CS TSAI. "An analytical solution for land subsidence in the clayey layer due to pumping".
- [۱۸۹]Miao, Linchang, Yajun Zhang, Fei Wang, and Xiaojun Yuan. "Prediction of land subsidence using a proposed consolidation-seepage-creep coupling model." In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, pp. 1631-1640. 2011.
- [۱۹۰]Luo, Zu-jiang, and Feng Zeng. "Finite element numerical simulation of land subsidence and groundwater exploitation based on visco-elasticplastic biot's consolidation theory." *Journal of Hydrodynamics* 23, no. 5 (2011): 615-624.
- [۱۹۱]Budhu, Muniram. "Earth fissure formation from the mechanics of groundwater pumping." *International Journal of Geomechanics* 11, no. 1 (2011): 1-11.
۱۹۲. اکبری گرکانی، امیر. ۱۳۹۸. "گزارشی از مطالعه متون فنی و ارزیابی سابقه کارهای مشابه پیشین بر روی پدیده فرونشست زمین و اثرات آن بر سازه‌های صنعت برق در سطح ملی و بین‌المللی"، تهران، پژوهشگاه نیرو
- ۱۹۳Mplmg. 2019. 5 Main Components of Transmission Tower, Electrical Power Energy, Available from: <http://www.electricalpowerenergy.com/2019/09/main-components-of-transmission-tower/> [Accessed 6 September 2019]
- ۱۹۴BSI Group Headquarters. 2017. *Overhead transmission lines: Design criteria BS IEC 60826*, ISBN: 978 0 580 75509 5
- ۱۹۵Ghannoum E. 1983. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Probablistic Design of Transmission Lines Part II: Design Criteria Corresponding to a Target Reliability*. Vol. PAS-102, No. 9
- ۱۹۶Meyerhof, G.1982. *Technical University of Nova Scotia, Limit States Design in Geotechnical Engineering*. Vol. 1, pp 67-71
۱۹۷. دفتر امور مقررات ملی ساختمان (وزارت راه و شهرسازی). ۱۳۹۲. مقررات ملی ساختمان ایران: بحث هفتم: پی و پی‌سازی، نشر توسعه ایران.
- ۱۹۸IEC-International Electrotechnical Commission, 2003. IEC 60826.
- ۱۹۹Bowles, J.E., 1990. *Foundation analysis and design*.
- ۲۰۰Computers and Structures, Inc. 2004. *The Sap2000 Introductory Tutorial Manual*, Berkely. California: U.S.A
- ۲۰۱Bentley Systems. 2007. *Plaxis Vesion 8 Tutorial Manual*. Pennsylvania: U.S.A

۲۰۲ ASTM A1018 / A1018M-18. 2018. ASTM International, Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Heavy-Thickness Coils, Hot-Rolled, Carbon, Commercial, Drawing, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, and Ultra-High Strength. West Conshohocken, PA.

۲۰۳ ASTM A232 / A232M-18. 2018. ASTM International, Standard Specification for Chromium-Vanadium Alloy Steel Valve Spring Quality Wire. West Conshohocken, PA.

۲۰۴ Priyanka, R.J., Anand, N. and Justin, D.S., 2012. Studies on soil structure interaction of multi storeyed buildings with rigid and flexible foundation. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2(12), pp.111-118.

۲۰۵. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. دفتر نظام فنی اجرایی. ۱۳۸۹. "مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال هادی های خطوط انتقال نیرو، نشریه شماره ۲-۴۲۷". تهران، انتشارات معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

۲۰۶ Oh W.T, Vanapalli S.K. 2011. Theoretical and Numerical Advances in Unsaturated Soil Mechanics, The relationship between the elastic and shear modulus of unsaturated soils. Vol. 2

۲۰۷ Pande, G.N., Pietruszczak, S. and Wang, M., 2020. Role of gradation curve in description of mechanical behavior of unsaturated soils. International Journal of Geomechanics, 20(2), p.04019159.

۲۰۸ Das B.M, Emeritus D, Sobhan Kh. 2010. Principles of Geotechnical Engineering. Global Engineering: Christopher M. Shortt, United States, pp. 353-427