

بسمه تعالی



دانشکده علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی

## تعیین آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از آنالیز اندازه ذرات

نگارنده: فاطمه عمادی

استاد راهنما

دکتر غلامحسین کرمی

بهمن ماه ۱۳۹۵

## تقدیم به:

بلندای روح تو ای پدر...

دل پر از مهر تو مادر...

تو فداکار برادرم و تو مهربان خواهرم...

و تقدیم به تو آرام زندگی ام...

## سپاسگزاری

حمد خدایی را که ستایش سزای اوست، رحمت و برکت همه از اوست، خدایی که هر چه گویم باز هم کم از اوست.

اکنون که به لطف پروردگار انجام تحقیق حاضر اتمام یافته است، از زحمات استاد گرانقدر آقای دکتر غلامحسین کرمی که راهنمایی این رساله را بر عهده داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. هم‌چنین از اساتید بزرگوار آقایان دکتر جعفری و دکتر باقری که داوری این پایان نامه را پذیرفتند، سپاسگزارم.

از همکاری و مساعدت اساتید، کارمندان و کارکنان دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود صمیمانه تشکر می‌نمایم.

و در پایان از خانواده عزیزم، به خصوص مادر دلسوز و مهربانم، که تکیه‌گاه همیشگی‌ام هستند به خاطر حمایت و دلگرمی‌هایشان تشکر و قدردانی می‌نمایم و از خداوند منان سلامت، سربلندی و شادکامیشان را خواستارم.

فاطمه عمادی

# تعهد نامه

اینجانب **فاطمه عمادی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی-آبشناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از آنالیز اندازه ذرات تحت راهنمایی دکتر غلامحسین کرمی متعهد می‌شوم:

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

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده:

آبدهی ویژه (Specific yield) یکی از پارامترهای مهم هیدرودینامیکی آبخوان‌های آزاد است که ظرفیت ذخیره‌سازی و آزاد سازی آب در این آبخوان‌ها را بیان می‌کند. روش‌های متعددی برای تعیین آبدهی ویژه آبخوان‌ها ارائه شده است که معتبرترین آن‌ها روش آزمایش پمپاژ است. در بسیاری از آبخوان‌ها داده‌های آزمایش پمپاژ کافی وجود ندارد و یا در صورت وجود به طور دقیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار نمی‌گیرند. بنابراین، بسیاری از محققین تلاش کرده‌اند تا مقادیر آبدهی ویژه را در آبخوان‌ها از روش‌های جایگزین برآورد نمایند. یکی از روش‌های کاربردی برای تعیین آبدهی ویژه آبخوان‌ها استفاده از آنالیز ذرات رسوبات بدست آمده از حفاری چاه‌ها می‌باشد. از آنجایی که آبدهی ویژه آبخوان‌ها عمدتاً به وسیله رسوبات دانه درشت کنترل می‌شود، در این تحقیق مقادیر این پارامتر برای رسوبات دانه درشت و مخلوط آن‌ها با استفاده از ستون زهکشی برآورد شده‌اند. در این تحقیق، رسوبات دانه درشت با استفاده از الک‌های ۴ الی ۱۰۰، تفکیک شده و سپس با استفاده از ستون زهکشی برای هر کدام از رسوبات و همچنین مخلوط آن‌ها مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مقدار آبدهی ویژه در رسوبات دانه درشت از ۰/۳۵ در ریگ‌ها تا ۰/۰۷ در ماسه ریز و ۰/۰۲ در خاک لوم متغیر بوده است. علاوه بر این، مقدار آبدهی ویژه در مخلوط رسوبات مختلف به طور قابل توجهی نسبت به میانگین وزنی آن‌ها کاهش پیدا کرده است. علت این مسئله از این قرار است که در مخلوط ذرات ریز و درشت، فضاهای خالی ذرات درشت به وسیله ذرات ریز اشغال می‌شود و در نتیجه مقدار آبدهی ویژه و حتی تخلخل به طور قابل توجهی نسبت به میانگین وزنی رسوبات مخلوط شده کاهش پیدا می‌کنند.

**کلمات کلیدی:** آبدهی ویژه، تخلخل، پمپاژ، ستون زهکشی، رسوب

## فهرست مطالب

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول: مقدمه.....                                                                          | ۱  |
| ۱-۱- بیان مسئله.....                                                                         | ۱  |
| ۲-۱- هدف از انجام تحقیق.....                                                                 | ۲  |
| ۳-۱- معرفی آبدهی ویژه.....                                                                   | ۳  |
| ۴-۱- عوامل موثر بر مقدار آبدهی ویژه.....                                                     | ۶  |
| ۵-۱- روش‌های اندازه‌گیری آبدهی ویژه.....                                                     | ۷  |
| فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین در باره استفاده از روش‌های مختلف برای برآورد آبدهی ویژه..... | ۹  |
| ۱-۲- روش‌های صحرایی.....                                                                     | ۹  |
| ۱-۱-۲- روش‌های آزمون پمپاژ.....                                                              | ۹  |
| ۲-۱-۲- نمونه برداری در منطقه غیراشباع بعد از پایین رفتن سطح آب.....                          | ۱۳ |
| ۳-۱-۲- روش اشباع صحرایی و زهکشی.....                                                         | ۱۴ |
| ۴-۱-۲- روش تغذیه.....                                                                        | ۱۴ |
| ۵-۱-۲- روش‌های ژئوفیزیکی.....                                                                | ۱۵ |
| ۲-۲- روش‌های آزمایشگاهی.....                                                                 | ۱۷ |
| ۱-۲-۲- مدل‌سازی (شبیه‌سازی).....                                                             | ۱۸ |
| ۲-۲-۲- آنالیز اندازه ذرات.....                                                               | ۲۰ |
| ۳-۲-۲- معادل رطوبت سانتیفریور.....                                                           | ۲۳ |
| ۴-۲-۲- اشباع نمونه و ستون زهکشی.....                                                         | ۲۵ |
| فصل سوم: روش انجام کار.....                                                                  | ۲۷ |

|        |                                                                          |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| ۳-۱-   | نمونه برداری از رسوبات آبرفتی.....                                       | ۲۷ |
| ۳-۲-   | روش‌های جداسازی ذرات رسوبی.....                                          | ۲۸ |
| ۳-۲-۱- | جداسازی و اندازه‌گیری قطر ذرات رسوبی با استفاده از آزمایش الک.....       | ۲۹ |
| ۳-۴-   | تعیین جورشدگی و کشیدگی رسوبات مورد آزمایش.....                           | ۳۳ |
| ۳-۵-   | طراحی و ساخت دستگاه برای انجام آزمایش به روش ستون زهکشی.....             | ۳۴ |
| ۳-۶-   | انجام آزمایش‌های زهکشی بر رسوبات آبرفتی.....                             | ۳۶ |
|        | فصل چهارم: تعیین آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از آنالیز اندازه ذرات..... | ۳۹ |
| ۴-۱-   | اندازه‌گیری آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از ستون زهکشی.....              | ۳۹ |
| ۴-۱-۱- | بررسی تاثیر زمان اشباع شدگی.....                                         | ۴۰ |
| ۴-۱-۲- | بررسی تاثیر زمان زهکشی.....                                              | ۴۲ |
| ۴-۱-۳- | بررسی اثر قطر دستگاه زهکشی رسوبات آبرفتی.....                            | ۴۴ |
| ۴-۱-۴- | بررسی تأثیر شکل ذرات.....                                                | ۴۷ |
| ۴-۲-   | مقادیر آبدهی ویژه و تخلخل در رده‌های مختلف رسوبات.....                   | ۵۳ |
| ۴-۳-   | اندازه‌گیری مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های رسوبی مختلف.....      | ۵۶ |
| ۴-۳-۱- | مخلوط ریگ و ماسه خیلی درشت.....                                          | ۵۶ |
| ۴-۳-۲- | مخلوط ماسه خیلی درشت و ماسه درشت.....                                    | ۵۹ |
| ۴-۳-۳- | مخلوط ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط.....                                   | ۶۳ |
| ۴-۳-۴- | مخلوط ماسه درشت و ماسه متوسط.....                                        | ۶۶ |
| ۴-۳-۵- | مخلوط ماسه درشت و ریز.....                                               | ۶۹ |
| ۴-۳-۶- | مخلوط ماسه متوسط و ماسه ریز.....                                         | ۷۲ |
|        | فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....                                    | ۷۷ |
| ۵-۱-   | نتیجه‌گیری.....                                                          | ۷۷ |

۷۹..... ۲-۵- پیشنهادها.

۸۰..... مراجع.



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- نمودار طبقه‌بندی بافت در ارتباط بین اندازه دانه و آبدهی ویژه ..... ۲۲
- شکل ۱-۳- محل نمونه برداری رسوبات آبرفتی ..... ۲۸
- شکل ۲-۳- دستگاه لرزاننده‌ی برقی مکانیکی ..... ۳۰
- شکل ۳-۳- رسوبات تفکیک شده با آزمایش الک ..... ۳۳
- شکل ۴-۳- گرفتگی منافذ الک طی جداسازی ..... ۳۴
- شکل ۵-۳- اندازه‌گیری وزن رسوبات باقی‌مانده بر هر الک ..... ۳۴
- شکل ۶-۳- نمای شماتیک دستگاه زهکشی طراحی شده ..... ۳۶
- شکل ۷-۳- دستگاه زهکشی ساخته شده ..... ۳۷
- شکل ۱-۴- مدت زمان صرف شده برای اشباع نمودن نمونه‌ها ..... ۴۲
- شکل ۲-۴- حجم آب زهکشی شده از رسوبات در زمان‌های مختلف پس از شروع زهکشی ..... ۴۴
- شکل ۳-۴- اثر قطر دستگاه زهکشی بر روند تغییرات تخلخل برآوردی از زهکشی رسوبات با اندازه مختلف ..... ۴۶
- شکل ۴-۴- اثر قطر دستگاه زهکشی بر روند تغییرات آبدهی ویژه برآوردی از زهکشی رسوبات مختلف ..... ۴۶
- شکل ۵-۴- منحنی تجمعی محل نمونه برداری اول ..... ۴۹
- شکل ۶-۴- منحنی تجمعی محل نمونه برداری دوم ..... ۴۹
- شکل ۷-۴- روند تغییرات تخلخل در رسوبات با کشیدگی متفاوت ..... ۵۲
- شکل ۸-۴- روند تغییرات آبدهی ویژه در رسوبات با کشیدگی متفاوت ..... ۵۲
- شکل ۹-۴- روند تغییرات تخلخل در رسوبات زهکشی شده با اندازه ذرات متفاوت ..... ۵۵
- شکل ۱۰-۴- روند تغییرات آبدهی ویژه در رسوبات زهکشی شده با اندازه ذرات متفاوت ..... ۵۵
- شکل ۱۱-۴- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف ریگ و ماسه خیلی درشت ..... ۵۸
- شکل ۱۲-۴- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ریگ و ماسه خیلی درشت ..... ۵۸
- شکل ۱۳-۴- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه درشت ..... ۶۱
- شکل ۱۴-۴- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و درشت ..... ۶۱
- شکل ۱۵-۴- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط ..... ۶۴
- شکل ۱۶-۴- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط ..... ۶۴

- شکل ۴-۱۷- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه متوسط.....۶۷
- شکل ۴-۱۸- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه متوسط.....۶۸
- شکل ۴-۱۹- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه ریز.....۷۰
- شکل ۴-۲۰- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه ریز.....۷۱
- شکل ۴-۲۱- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز.....۷۴
- شکل ۴-۲۲- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز.....۷۴

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱: مشخصات الک‌های مورد استفاده در آزمایش‌های زهکشی انجام شده ..... ۳۱
- جدول ۴-۱- حجم آب مصرف شده جهت اشباع نمودن رسوبات در زمان‌های مختلف پس از اشباع ..... ۴۱
- جدول ۴-۲- مقادیر آب زهکشی شده از رسوبات در زمانهای متفاوت پس از شروع زهکشی ..... ۴۳
- جدول ۴-۳- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده از زهکشی ..... ۴۵
- جدول ۴-۴- تعیین رده‌بندی اندازه ذرات رسوبی و درصد تجمعی آن‌ها ..... ۴۸
- جدول ۴-۵- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده در رسوبات با کشیدگی متفاوت ..... ۵۰
- جدول ۴-۶- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده در حجم‌های متفاوت زهکشی شده ..... ۵۳
- جدول ۴-۷- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ریگ و ماسه خیلی درشت ..... ۵۷
- جدول ۴-۸- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ریگ و ماسه خیلی درشت ..... ۵۹
- جدول ۴-۹- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و ماسه درشت ..... ۶۰
- جدول ۴-۱۰- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و درشت ..... ۶۲
- جدول ۴-۱۱- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط ..... ۶۳
- جدول ۴-۱۲- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و متوسط ..... ۶۵
- جدول ۴-۱۳- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه متوسط ..... ۶۶
- جدول ۴-۱۴- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه متوسط ..... ۶۸
- جدول ۴-۱۵- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه ریز ..... ۶۹
- جدول ۴-۱۶- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه ریز ..... ۷۲
- جدول ۴-۱۷- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه متوسط و ماسه ریز ..... ۷۳
- جدول ۴-۱۸- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه متوسط و ماسه ریز ..... ۷۵



## فصل اول: مقدمه

### ۱-۱- بیان مسئله

رشد سریع جمعیت و افزایش نیازهای بشری از یک سو و محدودیت منابع آب‌های سطحی از سوی دیگر، افزایش استخراج از منابع آب زیرزمینی و کاهش حجم ذخیره این منابع را در پی داشته است. به طوری که در دهه‌های اخیر با پیشرفت فناوری، بهره‌برداری از ذخایر منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌های پمپاژ رو به فزونی داشته است و سبب عدم تعادل بین تغذیه و برداشت، و منفی شدن بیلان این منابع آبی گردیده است. کاهش حجم این ذخایر زیرسطحی پیامدهای زیان باری مانند افت سطح ایستابی، افزایش هزینه به منظور افزایش عمق چاه‌های حفاری (به دلیل کاهش آبدهی چاه‌ها)، کاهش غیر قابل برگشت حجم آبخوان و متراکم شدن پیکره آبخوان را به دنبال داشته است. متراکم شدن آبخوان خود سبب کاهش قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و فرونشست زمین می‌شود. بدین سبب و همچنین به منظور جلوگیری از افت کمی و کیفی، مدیریت صحیح بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل مد نظر قرار گیرد. جهت حفظ این منابع آبی با ارزش لازم است که حجم آب قابل برداشت از ذخیره آبخوان با دقت برآورد شود.

جهت تعیین حجم آب قابل برداشت از ذخیره آبخوان و توصیف کمی آبخوان، به منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، کسب دانش در رابطه با پارامترهای هیدرولیکی امری حیاتی است. ذکر این نکته ضروری است که در اکثریت دشت‌ها اولین آبخوان قابل دسترس از نوع آبخوان آزاد می‌باشد. همچنین به دلیل ناچیز بودن ضریب ذخیره آبخوان‌های محبوس، تقریباً تمام

آبخوان‌های محبوسی که از آن‌ها برداشت در سطح وسیعی انجام شود، رفتار آبخوان آزاد پیدا می‌کنند. یکی از پارامترهای مورد نیاز جهت ارزیابی دقیق آبخوان‌های آزاد، توصیف ویژگی‌ها، امکان توسعه و بهره‌برداری و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، مدل‌سازی و به ویژه محاسبه‌های مربوط به بیلان آب در آنها؛ دانستن مقدار آبدهی ویژه آنها می‌باشد.

روش‌های گوناگونی برای تعیین آبدهی ویژه و سایر پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان‌ها ارائه شده است که دقیق‌ترین آنها روش آزمایش پمپاژ است. در اکثریت دشت‌ها داده‌های آزمایش پمپاژ کافی وجود ندارد و همان تعداد محدودی هم که وجود دارند به طور دقیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار نمی‌گیرند. به همین دلیل در اکثریت دشت‌ها مقدار آبدهی ویژه در کل دشت به طور یکسان و به صورت تقریبی در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، مقادیر آبدهی ویژه نه تنها در نقاط مختلف دشت تغییر می‌کند (تغییرات مکانی) بلکه با تغییر سطح آب در زمان‌های مختلف نیز تغییر می‌کند (تغییرات زمانی). بنابراین، یکی از مشکلات مهمی که متولیان آب‌های زیرزمینی در اغلب دشت‌ها با آن مواجه هستند، فقدان مقادیر آبدهی ویژه نسبتاً دقیق در دوره‌های مختلف و در نقاط مختلف دشت‌ها می‌باشد. از آنجایی که در نقاط مختلف دشت‌ها گمانه‌ها و چاههای متعددی حفر شده و لاگ حفاری آنها تهیه گردیده است، یکی از روش‌های کاربردی برای تعیین آبدهی ویژه آبخوان‌ها، استفاده از اطلاعات لاگ‌های حفاری می‌باشد.

## ۲-۱- هدف از انجام تحقیق

همان طور که بیان شد، یکی از مشکلات مهمی که متخصصین و مسئولین آب‌های زیرزمینی در اغلب دشت‌ها با آن مواجه هستند، عدم اطلاع از مقادیر آبدهی ویژه نسبتاً دقیق در نقاط مختلف دشت‌ها می‌باشد. بنابراین، هدف اساسی از انجام این تحقیق از این قرار است که با اندازه‌گیری مقادیر آبدهی ویژه برای رسوبات مختلف و مخلوط آنها با استفاده از ستون زهکشی، بتوان مقادیر متوسطی را برای آبدهی ویژه رسوبات مختلف ارائه نمود.

### ۳-۱- معرفی آبدهی ویژه

قبل از این که آبدهی ویژه برای آبخوان‌های آزاد تعریف شود، ابتدا مفهوم ضریب ذخیره به طور مختصر ارائه می‌شود.

#### ۱-۳-۱- ضریب ذخیره در آبخوان‌های محبوس

در آبخوان‌های تحت فشار و نشتی، تراکم‌پذیری و قابلیت ارتجاع (کشسانی) عوامل اصلی تغییرات آب ذخیره شده در آبخوان هستند. به طوری که با کاهش فشار منفذی به وسیله عملی مانند پمپاژ، نه تنها آبخوان متراکم و حجم خلل و فرج کم می‌شود، بلکه حجم آب درون آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. مفهوم ذخیره ویژه در آبخوان تحت فشار که معمولاً مقدار آن ثابت در نظر گرفته می‌شود، ضریبی است که منعکس کننده‌ی دو فرآیند تراکم‌پذیری آبخوان و انبساط آب درون خلل و فرج در اثر کاهش بار هیدرولیکی است. ذخیره ویژه در آبخوان‌های تحت فشار از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$S_s = \rho g \phi (\alpha_p + \beta) \quad \text{معادله (۱-۱)}$$

که در آن  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $g$ : ثابت ثقلی،  $\alpha_p$ : تراکم‌پذیری آبخوان،  $\phi$ : تخلخل و  $\beta$ : تراکم‌پذیری آب می‌باشد.

به عبارتی در آبخوان‌های تحت فشار و نشتی بر حسب تعریف، ذخیره‌ی ویژه تغییرات حجم آب در واحد حجم آبخوان به ازای یک واحد تغییر در بار فشار است. بنابراین:

$$S_s = \frac{\text{حجم آب}}{\left( \text{یک واحد تغییر در بار فشار} \right) \left( \text{ضخامت واحد} \right) \left( \text{سطح قاعده‌ی واحد} \right)} \quad \text{معادله (۲-۱)}$$

که در معادله فوق  $S_s$ : ذخیره ویژه‌ی آبخوان و دارای بعد  $\left[ \frac{1}{L} \right]$  است.

مفهوم ضریب ذخیره آبخوان طبق تعریف تاد (Todd 1980) حجم آبی است که از واحد سطح لایه نفوذپذیر به ازای تغییر حجم واحد در سطح ایستابی یا پیزومتر به ازای یک واحد تغییر در بار فشار، آزاد یا اضافه می‌گردد.

$$S = \frac{\text{حجم آب}}{\left( \text{یک واحد تغییر در بار فشار} \right) \left( \text{سطح قاعده‌ی واحد} \right)} \quad \text{معادله (۳-۱)}$$

که در آن  $S$ : ضریب ذخیره و عددی بدون بعد می‌باشد.

معادله (۴-۱)، ارتباط بین ضریب ذخیره و ذخیره ویژه را نشان می‌دهد:

$$S = S_s b \quad \text{معادله (۴-۱)}$$

که  $b$ : ضخامت آبخوان را نشان می‌دهد.

### ۱-۳-۲- ضریب ذخیره در آبخوان‌های آزاد

در آبخوان‌های آزاد مکانیسم رها شدن آب ذخیره با آن‌چه که در مورد آبخوان‌های محبوس بیان شد، متفاوت است. هنگامی که از یک آبخوان آزاد آب برداشت می‌شود، در ابتدا که هنوز تغییر قابل ملاحظه‌ای در تراز سطح آب مشاهده نمی‌شود، آب به علت انبساط در خلل و فرج و تراکم آبخوان از خلل و فرج آزاد می‌شود. با ادامه‌ی برداشت، سطح ایستابی به طور قابل ملاحظه‌ی پایینی می‌افتد و آب عمدتاً در اثر نیروی ثقل از داخل خلل و فرج تخلیه می‌گردد. در نتیجه با توجه به عوامل بیان شده، در آبخوان‌های آزاد ضریب ذخیره طبق معادله زیر برآورد می‌شود:

$$S = S_s b + S_y \quad \text{معادله (۵-۱)}$$

که در آن  $S_y$ : آبدهی ویژه و  $b$ : متوسط ضخامت آبخوان می‌باشد. حدود تغییرات  $S_y$  (آبدهی ویژه) از ۰/۱ تا ۰/۳ است، در حالی که حدود تغییرات  $S_s b$  (حاصل ضرب متوسط ضخامت آبخوان و ذخیره



ویژه) بین  $10^{-3}$  تا  $10^{-5}$  می‌باشد. بدین ترتیب ضریب ذخیره (S) در آبخوان‌های آزاد تقریباً با آبدهی ویژه برابر است:

$$S = S_y \quad \text{معادله (۶-۱)}$$

به طور کلی در بیان مفهوم پارامتر هیدرولیکی آبدهی ویژه در آبخوان‌های آزاد عنوان می‌شود که سنگ‌ها و خاک‌ها دارای شکاف یا فضاهای خالی با عنوان تخلخل هستند. آب در مناطق اشباع یا لایه‌های آبدار، در این منافذ قرار می‌گیرد. بخشی از آب موجود در فضاهای متخلخل که تحت نیروی وزن زهکشی می‌شود با عنوان آبدهی ویژه مطرح می‌گردد. همچنین بخشی از آب توسط کشش‌های مولکولی و نیروهای کششی سطحی در برابر نیروی وزن در داخل فضاهای خالی حفظ می‌شوند که این مقدار معادل نگهداشت ویژه می‌باشد. جمع جبری این دو پارامتر بیان شده برابر با تخلخل می‌باشد که آبدهی ویژه از تفاضل بین تخلخل و آبدهی ویژه برآورد می‌شود.

$$\phi = S_y + S_r \quad \text{معادله (۷-۱)}$$

$\phi$  تخلخل،  $S_y$  آبدهی ویژه و  $S_r$  نگهداشت ویژه می‌باشد.

به عبارتی دیگر مقدار آبدهی ویژه نسبت حجم آب قابل زهکشی در اثر نیروی وزن به کل حجم لایه آبدار می‌باشد که زهکشی در آن محدوده صورت می‌گیرد و معمولاً مقادیر آن به صورت درصد بیان می‌شود (Todd and Mays 2005, Meinzer 1923).

$$S_y = \frac{V_w}{V_T} \cdot 100 \quad \text{معادله (۸-۱)}$$

$S_y$ : آبدهی ویژه،  $V_w$ : حجم آب زهکشی شده در اثر نیروی وزن و  $V_T$ : حجم کل منطقه زهکشی شده است.

از آنجا که آبدهی ویژه بیان‌کننده‌ی مقدار تخلخلی است که آب یک چاه در حال پمپاژ را فراهم می‌کند،

با عنوان تخلخل مؤثر نیز بیان می‌شود و از حاصل ضرب ضریب آبدهی ویژه در حجم سفره، میزان آب قابل استحصال تعیین می‌شود.

همان طور که بیان گردید آبدهی ویژه ( $S_y$ ) در هیدرولوژی آب زیرزمینی به عنوان وسیله‌ی جهت تعیین ظرفیت ذخیره‌ی آبخوان‌های آزاد معرفی می‌شود. با وجود استفاده عملی از مفهوم آبدهی ویژه، استفاده از این پارامتر تا حدی مبهم است. چرا که آبدهی ویژه ظاهری ( $S_{ya}$ ) به طوری کلی به عنوان نسبت حجم آب اضافه یا زهکشی شده به طوری مستقیم، از آبخوان اشباع در نتیجه‌ی تغییر در حجم آبخوان در زیر سطح ایستابی معرفی می‌شود و به عواملی غیر از خواص آبخوان که بر تغییرات ذخیره و نوسانات سطح ایستابی اثرگذار است، ارتباط دارد. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به لایه لایه بودن آبخوان، زهکشی آهسته مواد واقع در بالای سطح ایستابی و هوای محفوظ شده اشاره نمود. در حالی که آبدهی ویژه تنها به خواص مواد آبخوان و همچنین رفتار آبخوان از نظر ذخیره سازی ارتباط دارد. بنابراین چون آبدهی ویژه ظاهری به مقدار زیادی به عواملی جز خواص فیزیکی مواد آبخوان بستگی دارد، مقادیر این پارامتر ممکن است هیچ گونه ارتباطی با آبدهی ویژه نداشته و یا رابطه‌ی آن‌ها بسیار کم باشد. با وجود این مطلب، حد بالای آبدهی ویژه ظاهری برابر با آبدهی ویژه است.

#### ۴-۱- عوامل مؤثر بر مقدار آبدهی ویژه

در رابطه با عوامل اثرگذار بر مقادیر آبدهی ویژه، تاد (Todd 1980) بیان داشت که آبدهی ویژه به شکل ذرات، اندازه ذرات، نحوه‌ی توزیع دانه‌ها، میزان فشردگی لایه‌ها و زمان زهکشی وابسته است همچنین مینزر (Meinzer 1932) عنوان نمود که تفاوت بین آب ثقلی و آب نگهداشت شده قطعی نیست. زیرا مقدار آبی که از مواد سنگ یا خاک تخلیه خواهد شد بستگی به طول زمان مجاز به تخلیه، درجه حرارت، مواد معدنی و ترکیب آب که بر کشش سطحی، ویسکوزیته و وزن مخصوص تأثیرگذار است و روابط فیزیکی مختلف سنگ یا خاک دارد.

## ۱-۵- روش‌های اندازه‌گیری آبدهی ویژه

از آنجا که بیشتر آبخوان‌ها آزاد می‌باشند؛ به دلایل بیان شده در فوق در اهمیت برآورد آبدهی ویژه، از روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری این پارامتر هیدرولیکی استفاده می‌شود که به دو دسته کلی روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی قابل تفکیک می‌باشند. از جمله روش‌های صحرایی می‌توان به آزمون‌های پمپاژ در مرحله رفت و برگشت، نمونه‌برداری بعد از پایین رفتن سطح آب، روش اشباع صحرایی و زهکشی، روش تغذیه، روش‌های ژئوفیزیکی، اندازه‌گیری بر اساس نوسانات سطح آب و... اشاره نمود. همچنین از مهم‌ترین روش‌های آزمایشگاهی می‌توان به روش‌های مدل‌سازی (شبیه‌سازی)، آنالیز اندازه ذرات، معادل رطوبت سانتیفریوژ، اشباع نمونه و ستون زهکشی در آزمایشگاه و... اشاره کرد. در ادامه هر یک از این روش‌های تخمین برآورد آبدهی ویژه به صورت کلی بیان می‌گردد. در تحقیق حاضر از روش آزمایشگاهی ستون زهکشی اشباع شده از رسوبات آبرفتی با اندازه ذرات مختلف جهت برآورد مقادیر آبدهی ویژه و تعیین ارتباط آن با اندازه ذرات رسوبی استفاده شد.



## فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین در باره استفاده از

### روش‌های مختلف برای برآورد آبدهی ویژه

روش‌های برآورد آبدهی ویژه به صورت کلی به دو گروه اصلی روش‌های صحرایی و روش‌های آزمایشگاهی قابل تفکیک می‌باشند. در ادامه مهم‌ترین روش‌های برآورد آبدهی ویژه مطرح و با توجه به نوع روش، محدودیت و مزیت هر کدام به طور مختصر بیان می‌گردد.

#### ۲-۱- روش‌های صحرایی

##### ۲-۱-۱- روش‌های آزمون پمپاژ

جهت تعیین خصوصیات هیدرولیکی آبخوان با استفاده از روش پمپاژ با توجه به نوع آبخوان (آزاد یا غیرآزاد) معادلات مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به معادلات تایس (Theis)، کوپر و ژاکوب (Cooper and Jacob)، نیومن (Newman)، بولتن (Bulletin) و... اشاره نمود. پارامترهای لازم جهت حل هر یک از این معادلات از طریق آزمایش‌های پمپاژ بدست می‌آید. آزمایش پمپاژ مشتمل بر یک کار صحرایی است که یک چاه اکتشافی با دبی ثابت به مدت طولانی (از ۷۲ ساعت تا یک هفته متغیر است) پمپاژ می‌شود و سپس با اندازه‌گیری میزان افت در بازه‌های زمانی از شروع پمپاژ در چاه‌های مشاهده‌ای که در اطراف چاه پمپاژ حفر شده‌اند، به کمک روش‌ها و معادله‌های مختلف، داده‌های بدست آمده از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و به عنوان روشی جهت برآورد خصوصیات

هیدرولوژیکی آبخوان استفاده می‌شوند. آزمایش‌های پمپاژ به دو صورت پله‌ای یا با دبی ثابت انجام می‌شوند و در دو مرحله رفت و برگشت جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان به کار می‌روند (Kruseman and Ridder 2000). از این بین مرحله رفت و برگشت آزمون پمپاژ با دبی ثابت، به عنوان رایج‌ترین نوع آزمون پمپاژ جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان استفاده می‌شوند.

تیم (Thiem 1906) اولین آشناسی است که فرمولی جهت تعیین مشخصات آبخوان با استفاده از آزمون پمپاژ ارائه نمود و از سال ۱۹۳۵ با ارائه معادله معروف توسط تیس (Thies 1935) در تجزیه و تحلیل آبخوان در شرایط غیر تعادلی پیشرفت حاصل گردید و بسیاری از اصلاحات در فرمول‌ها و همچنین روش‌های تفسیر داده‌های آزمون پمپاژ توسعه یافتند.

آزمایش پمپاژ خصوصیات هیدرودینامیکی بخش نسبتاً بزرگی از سفره آبدار را منعکس می‌سازد (Todd 1980, Walton 1987). همچنین در سفره‌های آبدار ناهمگن (سفره‌های سنگی درز و شکافدار)، که تعیین میانگین خواص هیدرودینامیکی سفره آبدار بر اساس داده‌های بدست آمده از مغزه‌های حفاری تعداد محدودی چاهک آزمایشی، مشکل یا غیرممکن است، آزمایش پمپاژ می‌تواند تخمین‌های نسبتاً خوبی از خواص هیدرودینامیکی را مشخص نماید (کرمی ۱۳۸۵).

با این حال روش آزمون پمپاژ با وجود مزایا محدودیت‌هایی را شامل می‌شود که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

ارزیابی نتایج آزمون‌های پمپاژ مبتنی بر فرضیات ساده می‌باشند که با توجه به شرایط صحرایی از جمله نوع آبخوان، ماهیت جریان سیال، نرخ پمپاژ و ذخیره چاه سبب عدم تخمین دقیق و نزدیک به واقعیت پارامترهای هیدرولیکی می‌شوند. به طوری که از جمله روش‌های معمول جهت تخمین آبدهی ویژه در آبخوان‌های آزاد، تجزیه و تحلیل داده‌های آزمون پمپاژ با استفاده از روش منحنی‌های ارائه شده توسط بولتن و نیومن می‌باشد که روش ارائه شده توسط بولتن به دلیل نادیده گرفتن اثر زهکشی تأخیری و روش توسعه یافته توسط نیومن با در نظر نگرفتن جریان عمودی سفره، علل اصلی و اثرگذار بر مقادیر کمتر آبدهی ویژه در زمان‌های اولیه پمپاژ نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

در این رابطه نوانکور و همکاران (Nwankwor *et al*, 1984) اظهار داشتند اگر چه استفاده از منحنی‌های بولتن و نیومن در تفسیر داده‌ها، نتایج تقریباً قابل قبولی در تخمین قابلیت انتقال سفره دارند اما در محاسبه آبدهی ویژه، داده‌های ابتدایی آزمون حدود یک سوم تخمین این پارامتر توسط دو روش بیلان و روش‌های آزمایشگاهی می‌باشند و به داده‌های طولانی مدت آن نیاز است. همچنین کرمی (۱۳۸۳) بیان داشت طبق بررسی‌های انجام شده اگرچه نتایج بدست آمده برای مقادیر قابلیت انتقال از روش آزمایش پمپاژ با دقت بالایی برآورد می‌شوند، تخمین مقادیر ضریب ذخیره و آبدهی ویژه از دقت چندان برخوردار نیستند.

نتایج حاصل از آزمایش پمپاژ که با استفاده از روش‌های گرافیکی (نرم افزار Aquifer Test) به عنوان روشی استاندارد برای برآورد پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان تلقی می‌شوند و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند، اغلب تقریبی می‌باشد و تطابق کامل امکان‌پذیر نیست.

در بسیاری از آبخوان‌های آبرفتی، داده‌های آزمایش پمپاژ به اندازه کافی وجود ندارد و یا تعداد آزمایش‌ها در مقایسه با وسعت دشت اندک می‌باشد (Younger 1993, Jalldin and Razack 1994). با بررسی مطالعات انجام شده در خصوص تعیین خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان با استفاده از روش‌های مختلف، ملاحظه می‌گردد که در آبخوان‌های آزاد به جای آبدهی ویژه ( $S_y$ )، ضریب ذخیره برآورد می‌شود.

اکبرپور و همکاران (۱۳۸۹) و همچنین روح الهی و همکاران (۱۳۹۰) نشان دادند "به دلیل اینکه روش تائیس مختص آبخوان تحت فشار است، به منظور برآورد پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان آزاد، به خصوص آبخوان دانه متوسط و ریزدانه و یا حالتی که ذرات ریز لابه‌لای ذرات درشت را پر نماید، نمی‌توان آبدهی مخصوص را محاسبه نمود."

با این وجود مطالعات متعددی جهت محاسبه آبدهی ویژه و سایر پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های زیرزمینی از طریق آزمون پمپاژ صورت گرفته است که در ادامه به طور مختصر به چند مورد اشاره می‌شود:

کلارک (Clark 1917) در مطالعات خود جهت تعیین آبدهی ویژه در منطقه مورگان هیل کالیفرنیا (California) پس از اندازه‌گیری حجم رسوبات تخلیه شده به وسیله پمپاژ، با اندازه‌گیری کاهش سطح آب و حجم آب زهکشی شده، مقدار آبدهی ویژه را برآورد نمود.

ونزل (Wenzel 1942) ضمن بررسی یک آبخوان آزاد شن و ماسه‌ای با استفاده از روش پمپاژ مشاهده نمود که مقادیر آبدهی ویژه از ۰/۰۹ برآورد شده بعد از شش ساعت کار پمپاژ، افزایش می‌یابد و بعد از ۲۴ و ۳۶ و ۴۸ ساعت به ترتیب به ۰/۱۶، ۰/۱۸ و ۰/۲ می‌رسد. وی بیان نمود مقادیر آبدهی ویژه در طول زمان پمپاژ افزایش می‌یابد و مقادیر برآورد شده آن با استفاده از روش بیلان و زمان‌های طولانی مدت پمپاژ از مقادیر ابتدای پمپاژ بیشتر است.

ونزل و همکاران (Wenzel et al, 1946) مقادیر آبدهی ویژه را با استفاده از روش پمپاژ در زمان‌های چهار، هشت و پانزده ساعت بعد از شروع پمپاژ، در آبخوان آزاد خیلی ریز-متوسط ماسه‌ای و گراولی، به ترتیب برابر ۰/۰۱، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۱۸ برآورد نمودند.

پریکت (Prickett 1965) با استفاده از روش منحنی بولتن مقادیر آبدهی ویژه بین ۰/۰۳ تا ۰/۱۳ برای برخی آبخوان‌های آزاد شن-ماسه‌ای برآورد نمود.

جانسون (Johnson 1967) و استالمن (Stallman 1971) طی مطالعه وابستگی مدت زمان زهکشی با قطر اندازه ذرات مواد آبخوان و تأثیر آن بر مقادیر آبدهی ویژه متوجه شدند که زمان مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر مقدار این پارامتر با کاهش اندازه ذرات به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

نیومن (Neuman 1975) با استفاده از روش منحنی، مقادیر آبدهی ویژه برای آبخوان‌های ریز تا متوسط دانه را بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ بدست آورد.

راشتون و هوارد (Rushton and Howard 1982) با استفاده از روش منحنی‌های بولتن و نیومن پارامتر آبدهی ویژه در آبخوان‌های آزاد ریز، دانه متوسط و ماسه سنگی را بین ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۱ محاسبه نمودند. آن‌ها اظهار داشتند مقادیر پایین برآورد شده مربوط به مراحل اولیه پمپاژ هستند که از داده‌های طولانی مدت خیلی پایین‌تر می‌باشند.



نواک‌ور (Nwankwor et al, 1984) طی بررسی‌های خود با استفاده از سه روش داده‌های آزمون پمپاژ، روش محاسبه بیلان و ستون زهکشی آزمایشگاهی خاک اشباع، جهت تخمین آبدهی ویژه در یک آبخوان آزاد ماسه‌ای در منطقه‌ای واقع در بردن (Borden) کشور کانادا، تفاوت زیادی در مقادیر برآوردی مشاهده نمودند و عنوان کردند مقادیر پایین‌تر حاصل از داده‌های ابتدایی آزمون پمپاژ حاکی از تأثیر زهکشی تأخیری بر روند پاسخ‌دهی سیستم آبخوان است. این محققین پیشنهاد دادند استفاده از دو روش محاسبه بیلان و روش‌های آزمایشگاهی جهت تخمین پارامتر مزبور مناسب و معقول‌تر می‌باشند و استفاده از روش آزمون پمپاژ به کمک الگویی مناسب خواهد بود که هر دو اثر جریان عمودی و زهکشی تأخیری آبخوان را شامل باشد.

بنا بر مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمون پمپاژ که به تعدادی از آن‌ها اشاره شد، با توجه به محدودیت‌های بیان شده، استفاده از این روش در برآورد پارامترهای هیدرولیکی نیاز به داده‌های طولانی مدت این آزمون می‌باشد که هزینه‌بر و اتلاف حجم زیادی از آب آبخوان را در پی دارد. و با توجه به فرضیات اعمالی در تفسیر نتایج، تخمین پارامترهای هیدرولیکی به خصوص آبدهی ویژه از دقت کافی برخوردار نیستند.

## ۲-۱-۲- نمونه برداری در منطقه غیر اشباع بعد از پایین رفتن سطح آب

در این روش با اندازه‌گیری مقدار رطوبت قبل از کاهش سطح آب در منطقه مورد مطالعه و تعیین رطوبت و تخلخل نمونه‌های بالاتر از حاشیه مویینگی پس از کاهش قابل ملاحظه سطح آب، نگهداشت و آبدهی ویژه برآورد می‌گردند.

الیس و لی (Ellis and Lee 1919) با جمع‌آوری نمونه‌های بالای حاشیه مویینگی بعد از کاهش زیاد سطح آب (تابستان و پاییز) در دره‌ای واقع در کالیفرنیا جهت تخمین پارامترهای مزبور استفاده کردند. وینزر (Weinzer 1923) بیان داشت به منظور تعیین مقادیر هیدرولیکی از طریق نمونه‌برداری پس از پایین رفتن سطح آب، عمق بخشی که از آن نمونه گرفته شده است باید مشخص گردد و هیچ گونه

آب دریافتی از بارش یا آبیاری و همچنین تبخیر یا جذب توسط گیاهان تأثیری در مقدار اندازه‌گیری نداشته باشد.

جانسون و کانکل (Johnson and Kunkel 1963) در بررسی نتایج این روش، طی مطالعه خود در منطقه‌ای در اطراف یک چاه بزرگ صحرایی در فرسنو (Fersno) در کالیفرنیا به اندازه‌گیری مقدار رطوبت قبل از کاهش سطح آب و اندازه‌گیری مجدداً آن پس از کاهش قابل ملاحظه سطح آب پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که مقدار رطوبت تعیین شده توسط این روش صحرایی می‌تواند تطابق خوبی با داده‌های به دست آمده توسط روش‌های سانتریفیوژ و ستون زهکشی در آزمایشگاه داشته باشد.

#### ۲-۱-۳- روش اشباع صحرایی و زهکشی

این روش در اصل شبیه روش آزمایشگاهی است و شامل خیس یا اشباع کردن یک قطعه زمین و سپس زهکشی آن می‌باشد. یک قطعه زمین که در آن سطح آب و حاشیه مویینگی در عمق کافی در زیر سطح زمین جهت انجام زهکشی تحت نیروی وزن قرار دارد و از تبخیر جلوگیری می‌شود، انتخاب و اشباع می‌گردد. با تعیین حجم آب مورد نیاز جهت اشباع تخلخل و بعد از یک دوره کافی از زهکشی با نمونه‌برداری از رسوبات و تعیین مقدار رطوبت آب نگهداری شده نگهداشت ویژه مربوطه تعیین می‌شود و آبدهی ویژه از اختلاف بین این دو حاصل می‌گردد.

ایسرلیسن (Israelson 1918) آزمایش‌هایی جهت تعیین مقدار نگهداشت آب در خاک‌های مختلف در دره ساکرامنتو (Sacramento) کالیفرنیا انجام داد و مقادیر تخلخل و نگهداشت آب خاک‌های مختلف را در عمق‌های متوالی مستقیماً بعد از آبیاری (اشباع) و دوباره چهار روز بعد از آبیاری برآورد نمود.

#### ۲-۱-۴- روش تغذیه

روش تغذیه برخلاف روش پمپاژ، شامل نفوذ یا نشت آب از رودخانه‌ها و کانال‌ها و یا مقدار آب تغذیه

شده از طریق یک چاه تغذیه‌ای است که منجر به افزایش سطح آب می‌شود. با اندازه‌گیری حجم رسوبات اشباع شده به وسیله اندازه‌گیری مقدار تغذیه و مقدار افزایش سطح آب، آبدهی ویژه را می‌توان برآورد نمود (Minzer 1932).

مولدر (Moulder 1957) از روش تغذیه جهت تجزیه و تحلیل ویژگی‌های آبخوان آماریلو (Amarillo) در تکزاس استفاده کرد. وی مشاهده نمود که سطح آب در مدت چهار ماه بعد از تغذیه هم‌چنان افزایش می‌یابد. به طوری که اظهار داشت داده‌های اولیه در آزمایش تغذیه‌ای آهسته رسوبات، غیر قابل استفاده جهت تجزیه و تحلیل مشخصات آبخوان است و انطباق این روش با شرایط نظری، با در نظر گرفتن زمان‌های طولانی در فاصله‌های زیاد از چاه تغذیه امکان پذیر است.

سنیجوسکی (Sniegocki 1963) مطالعه‌ای گسترده در رابطه با تغذیه مصنوعی آبخوان از طریق چاه تغذیه‌ای انجام داد و بیان داشت نتایج داده‌های تغذیه برای برآورد مقادیر مشخصات هیدرولیکی رضایت بخش می‌باشد. چنان‌چه وضعیت صحرایی جهت انجام آزمایش فراهم باشد، مدت زمان انجام آزمایش که اهمیت بسزایی دارد را بیش از ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. وی ضریب ذخیره آبخوان مورد مطالعه خود را با استفاده از این روش پس از نه روز و از طریق آزمون پمپاژ بعد از ۱۰۰ روز، برابر با ۰/۳ برآورد نمود.

وادوریس (Vadouris 2006) مقدار آبدهی ویژه برابر با ۰/۱۱ در آبخوان‌های ساحلی شرق کورینتیا (Corinthia) در یونان با استفاده از روش بیلان آبی و افزایش سطح آب حاصله در فصل تر برای سال آبی ۱۹۹۷-۱۹۹۸ برآورد نمود.

## ۲-۱-۵- روش‌های ژئوفیزیکی

روش‌های ژئوالکتریک سطحی، تکنیک‌هایی کم هزینه هستند که به وسیله‌ی آن می‌توان پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان را تخمین زد. به طوری که با استفاده از تشابه بین خصوصیت‌های جریان الکتریکی و جریان هیدرولیکی (قانون اهم و دارسی)، از این روش‌ها به دلیل سادگی، سرعت و ارزانی

در تخمین برخی پارامترهای هیدروژئولوژیکی (به طور مثال آبدهی ویژه) می‌توان استفاده نمود (Louis 2004). برخی از پارامترها مانند عمق سطح ایستابی، جهت جریان آب زیرزمینی، ضخامت لایه‌های آبدار در یک حوزه و محدوده سفره آب زیرزمینی را می‌توان به صورت مستقیم از داده‌های مقاومت بدست آورد و برخی از پارامترهای هیدرولیکی مانند آبدهی ویژه با استفاده از تفسیر داده‌های مقاومت تخمین زده می‌شود.

روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ میلادی توسعه و از دهه ۱۹۷۰ با دسترسی به رایانه‌ها در تجزیه و تحلیل و پردازش داده‌ها کاربرد بیشتری یافتند (حجت و رنجبر، ۱۳۹۰). اولین استفاده از این روش به منظور برآورد آبدهی ویژه، در آبخوان‌های یخچالی جنوب انگلستان توسط فرولیچ و کلی (Frchich and Kelly 1988) صورت گرفت (سعادتی و همکاران، ۱۳۹۳).

پایه روش‌های متنوع اکتشافات ژئوفیزیکی، ظرفیت زمین برای تولید و پاسخ میدان‌های الکتریکی است. میزان جلوگیری اجسام در برابر عبور جریان با عنوان مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به آن جسم توصیف می‌شود. به عبارتی روش‌های ژئوالکتریک بر این اساس هستند که ماتریکس سنگ به طور کلی عایق است و جریان الکتریکی از میان آن‌ها به دلیل حضور آب یا رطوبت موجود در حفرات عبور می‌کند (Niwas et al 2011). بدین ترتیب با داشتن مقاومت الکتریکی آب موجود در فضاها خالی ( $\rho_w$ ) و مقاومت الکتریکی کل در زون‌های اشباع ( $\rho_{sat}$ ) و غیراشباع ( $\rho_{unsat}$ ) آبخوان، با استفاده از معادله زیر که توسط فرولیچ و کلی (Frollich and Kelly 1988) ارائه شده، می‌توان آبدهی ویژه سفره را برآورد نمود:

$$S_y = \left( \frac{\rho_w}{\rho_{sat}} \right)^{\frac{1}{m}} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{sat}}{\rho_{unsat}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad \text{معادله (۱-۲)}$$

که  $\rho_{sat}$ : مقاومت ناحیه اشباع آبخوان (اهم-متر)،  $\rho_w$ : مقاومت آب موجود در خلل و فرج (اهم-متر)،  $\rho_{unsat}$ : مقاومت ناحیه غیراشباع آبخوان (اهم-متر)،  $m$  و  $n$  نیز ضرایب مربوط به درجه سیمانی شدن دانه‌های تشکیل دهنده سفره می‌باشند.

آرکی (Archi 1942) اولین بار رابطه‌ی تجربی بین مقاومت ویژه و تخلخل را ارائه داد. در ادامه مازاک (Mazac et al, 2007) همبستگی بین آبخوان و پارامترهای ژئوالکتریکی در زون‌های اشباع و غیراشباع را بدست آورد.

سوپیوس (Soupios et al, 2007) روش‌های ژئوفیزیکی را برای تخمین ضرایب هیدرودینامیک در جزیره کرت (Crete) واقع در یونان استفاده نمودند.

سینها و همکاران (Sinha et al, 2009) روش مقاومت الکتریکی را برای بدست آوردن پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در هند شمالی به کار بردند.

هم‌چنین در ایران نیز، طهماسبی نژاد (۱۳۸۱) با استفاده از همبستگی بین پارامترهای ژئوالکتریکی و هیدروژئولوژیکی مقدار آبدهی ویژه آبخوان شور، باقری و همکاران (۱۳۸۷) آبدهی ویژه حوزه آبریز امان‌آباد در جنوب حوزه آبریز میقان، طاهری تیزرو و همکاران (2012) در ماهی‌دشت کرمانشاه، عزیزی و محمدزاده (۱۳۹۲) آبدهی ویژه آبخوان دشت امامزاده جعفر گچساران را محاسبه نمودند.

با این حال بسیاری از این نوع مطالعات محدود به منطقه مورد مطالعه بوده و نیاز به بررسی و عمومی شدن بیشتری دارد تا بتوان به صورت گسترده در ارتباط با شرایط زمین‌شناسی در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین در این نوع روش‌ها برای دستیابی به میزان آبدهی ویژه نزدیک به واقعیت، نیاز به پژوهش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مقادیر  $m$  و  $n$  می‌باشد که برآورد آن‌ها برای هر منطقه زمان و هزینه‌بر است و مقادیر آن‌ها با توجه به درجه سیمان‌شدگی و دانه‌بندی در هر منطقه متفاوت بوده و عموماً به صورت تجربی تخمین زده می‌شود.

## ۲-۲- روش‌های آزمایشگاهی

هزینه پایین‌تر روش‌های آزمایشگاهی نسبت به روش‌های صحرایی در برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و هم‌چنین بدست آوردن سریع نتایج آن‌ها در تخمین این ضرایب، سبب توسعه این دست از روش‌ها شده است. در ادامه روش‌های آزمایشگاهی به اختصار معرفی می‌گردند.

## ۲-۲-۱- مدل سازی (شبیه سازی)

مدل مصنوعی وسیله‌ای جهت ارائه یک بیان تفهیمی یا ترسیمی از سیستم‌های فیزیکی با استفاده از معادلات ریاضی می‌باشد و در صورتی که به نحو مطلوبی تنظیم و ساخته شده باشد، می‌تواند وسیله‌ای قابل قبول جهت پیش‌بینی اقدامات لازم بر مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و همچنین تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود. با رواج کامپیوترهای دیجیتال با قدرت پردازش بالا در دهه ۱۹۶۰، مدل‌های عددی به منظور مطالعه آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفتند. دوپویی (Dupuit)، تیم (Theim)، بوسینگ (Boussinesq) و فرشه‌ایمر (Forshhaymer) از قانون داریسی جهت مدل‌سازی ریاضی جریان آب زیرزمینی استفاده نمودند (Zhang and Bennett 2002).

در دهه ۱۹۸۰، مادفلو (Modflow) به عنوان یک مدل شبیه‌سازی جریان یک، دو و سه بعدی مدولار توسط مک دونالد و هارباگ (Mc Donald and Harbaugh) بیان و توسط مرکز مطالعات زمین‌شناسی ایالت متحده آمریکا (United State Geology Survey (USGS)) به زبان فرتون تهیه شد و بخش هیدروژئولوژی دانشگاه واترلو (Waterloo) کانادا، این کد کامپیوتری را در محیط ویندوز ارائه نمود. از آن پس بسته‌ها و نرم‌افزارهای دیگری برای مطالعات آب زیرزمینی به آن اضافه شده است. Modflow بر پایه دو معادله اساسی داریسی و اصل بقای جرم استوار بوده و از ترکیب این دو معادله به حل عددی مدل دست می‌یابد. معادلات دیفرانسیل حاکم را به صورت تفاضل محدود مرکز-بلوک بر اساس شرایط اولیه، شرایط مرزی، تنش‌های وارد بر سیستم و پارامترهای تعریف شده در غالب بسته‌های نرم‌افزاری مختلف تحلیل و برای آبخوان‌های تحت فشار، نشتی و آزاد استفاده می‌شود.

میزان سودمندی یا قابل استفاده بودن یک مدل به تشابه معادلات ریاضی با واقعیت‌های موجود در طبیعت بستگی دارد. در استفاده از مدل‌ها باید در نظر داشت که مدل بر اساس فرضیات گوناگونی در ارتباط با سیستم واقعی است. پارامترهای هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک مورد استفاده در مدل، تقریبی از پارامترهای واقعی هستند که نمی‌توان آن‌ها را با دقت صد در صد تعیین کرد. بنابراین نیاز است هر نوع مدل آب زیرزمینی تفسیر شود و به طور مناسبی مورد استفاده قرار گیرد و محدودیت آن

نیز در نظر گرفته شود. محققان بسیاری از مدل سازی جهت تخمین این پارامترها استفاده نموده اند. در زیر به تعدادی از این مطالعات اشاره می شود:

جیائو و لرنر (Jiao and Learner 1996) با به کارگیری مدل Modflow ضریب ذخیره و ضریب قابلیت انتقال آبخوان ناتینگهام شایر (Nottinghamshire) انگلستان را برآورد نمودند.

مرهات و بیهری (Medhat and Biheri 2009) به مدل سازی جریان آب زیرزمینی دلتای راسودر (Rassudr) واقع در سودر (Suder) با استفاده از Modflow جهت تعیین پارامترهای هیدرولیکی، تخمین میزان تغذیه و تعیین وضعیت هیدروشیمی آبخوان پرداختند.

سدکی و اوزار (Sedki and ouazar 2011) یک مدل شبیه سازی به کمک نرم افزار Modflow برای شرایط ناماندگار جریان آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی آرهایس-نکور در مراکش طراحی و ضرایب هیدرودینامیک آبخوان را بهینه نمودند.

لی پیچ و همکاران (Le Page et al, 2012) یک آبخوان نیمه خشک در مراکش را به کمک نرم افزار Modflow شبیه سازی و مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را پس از واسنجی دستی مدل به روش سعی و خطا تخمین زدند.

در ادامه تعدادی از مطالعات انجام شده با استفاده از شبیه سازها در ایران نیز بیان می شود:

توسلی و چت سازان (۱۳۷۷) با استفاده از مدل عناصر محدود، آبخوان دشت مهیار را شبیه سازی و مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدی و ویژه را به روش سعی و خطا بهینه نمودند. سپس با مدل طراحی شده روش های بهره برداری از آب زیرزمینی و آب انتقالی از زاینده رود به دشت مهیار را بررسی نمودند. سروری (۱۳۸۲) از مدل Visual Modflow برای شبیه سازی آب زیرزمینی دشت دوسلق استفاده نمود. پس از واسنجی مدل به روش دستی سعی و خطا و به دست آوردن مقادیر شبیه سازی شده نزدیک به مقادیر مشاهده ای، با استفاده از نرم افزار PMWIN (Processing Modflow For Windowe) پارامترهای هیدرولوژیکی دشت را بهینه سازی نمود.

کاظمی آذر (۱۳۸۵) آب زیرزمینی دشت رفسنجان را با استفاده از نرم افزار Modflow شبیه سازی و

اثرات زیست محیطی ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی را بررسی نمود و ضرایب هیدرودینامیک آبخوان را تصحیح و میزان افت سطح ایستابی و فرونشست زمین را محاسبه کرد.

ملکی و همکاران (۱۳۹۰) به بهینه‌سازی ضرایب هیدرودینامیک دشت شاهرود به مساحت ۴۵۰ کیلومترمربع با استفاده از مدل Modflow در محیط GMS (Groundwater Modeling System) پرداختند.

عابدی‌کوپایی و گلیچیان (۱۳۹۴) با استفاده از مدل Modflow به بررسی و مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی زیر حوضه آبخیز کوهپایه-سگری (در شرق حوضه آبریز زاینده‌رود) و برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان زیر سطحی این زیرحوضه پرداختند و مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را پس از واسنجی دستی مدل، به روش سعی و خطا محاسبه نمودند.

## ۲-۲-۲- آنالیز اندازه ذرات

روش‌های برآورد آبدهی و نگهداشت ویژه توسط آنالیزهای آزمایشگاهی با استفاده از نمونه‌های غیر مختل شده از مواد آبخوان، پرهزینه و زمان‌بر است. زیرا بازیابی نمونه‌های مغزه دست نخورده به سختی امکان پذیر است و روش‌های آزمایشگاهی برای آنالیز این نوع نمونه‌ها پیچیده می‌باشد. تخمین پارامترهای مزبور با استفاده از روش آنالیز اندازه ذرات دارای دو مزیت کاهش هزینه و زمان می‌باشد. هم‌چنین چون نمونه‌های مورد آزمایش در این روش می‌توانند دست خورده باشند، عدم آشفته‌گی مورد نیاز نمونه‌ها در مغزه‌های مورد استفاده در سایر روش‌ها را برطرف می‌سازد. در این روش با تعیین نگهداشت ویژه و مشخص کردن ارتباط آن با اندازه مؤثر ذرات (قطر متوسط ذرات)، ارتباط این دو را می‌توان به صورت نمودار با رسم منحنی نشان داد (Meinzer 1932). بدین ترتیب که با تعیین اندازه مؤثر و با مراجعه به منحنی، می‌توان نگهداشت ویژه را به صورت تقریبی بدست آورد. با تعیین تخلخل به روش چگالی‌سنج (پیکنومتر)، آبدهی ویژه با کم کردن نگهداشت ویژه از تخلخل محاسبه می‌شود. این روش بهترین حالت برای نشان دادن سریع اما تقریبی آبدهی ویژه می‌باشد. محققان بسیاری



روابط بین آبدهی ویژه، نگهداشت ویژه و ویژگی‌های اندازه ذرات مواد آبخوان را ارائه دادند که ازجمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

بریگز و شانتز (Briggs and shantz 1912) با تفسیر آنالیز اندازه ذرات ظرفیت نگهداشت آب را تعیین کردند و رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$\text{Water-holding capacity} = .35\text{snd} + .35\text{silt} + 1.65\text{cly} + 21 \quad \text{معادله (۲-۲)}$$

میدلتون (Middleton 1920) چند معادله مشابه روابط بریگز و شانتز ارائه داد.

به عنوان بخشی از مطالعات مربوط به آبدهی ویژه و خواص مربوط به رسوبات کالیفرنیا، پرل و جانسون (Prill and Johnson 1967) نیز ارتباط بین آبدهی ویژه و بافت را برای نمونه‌هایی از سانجواگوین (Sanjoaguin) و آنتلوپ (Antelope) کالیفرنیا مورد بررسی قرار دادند. رابطه بین بافت رسوب و آبدهی ویژه به صورت منحنی‌هایی در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

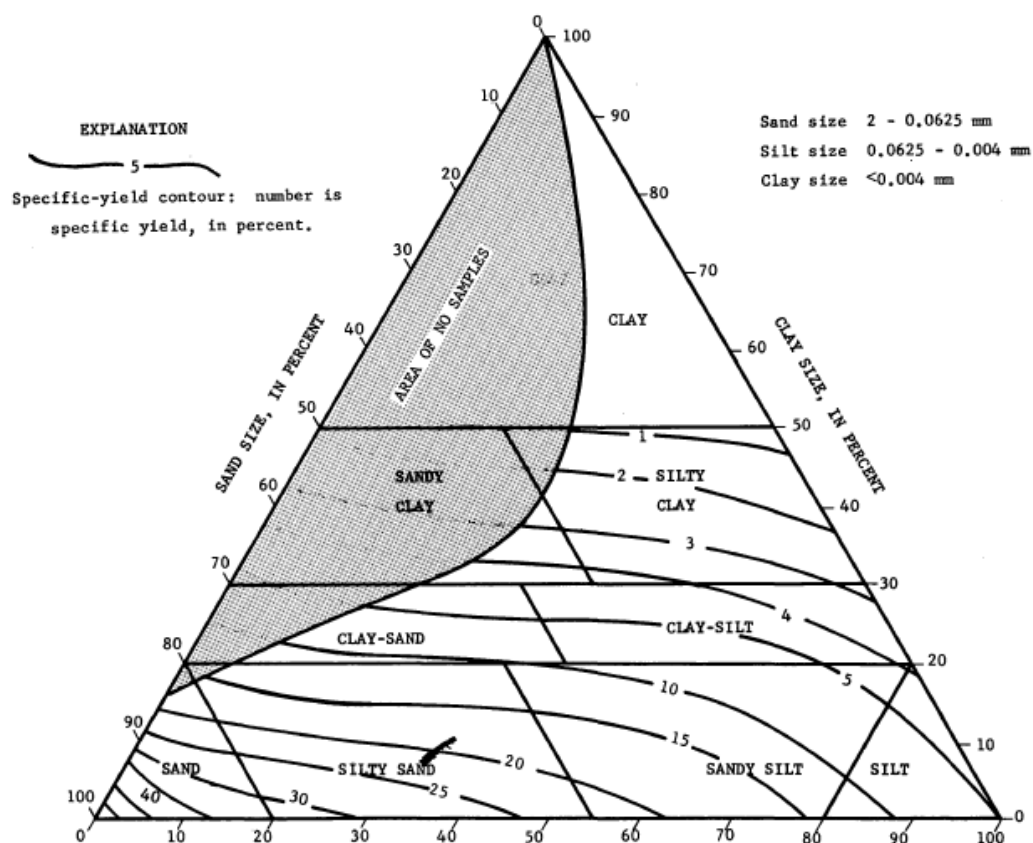
فیلیپ و کوهن (Philip and Cohen 1969) در مطالعه ارتباط بین آبدهی ویژه و اندازه ذرات رسوبات کوآترنری رودخانه هومبالت (Humboldt) در نوادا (Nevada)، با استفاده از روش آزمایشگاهی رطوبت معادل سانتیفریوژ، رسوبات تحکیم نیافته این رودخانه را بررسی و نتایج تحقیقات خود را به صورت زیر عنوان کردند:

مقادیر آبدهی ویژه در رسوبات دانه‌ریز مورد مطالعه به طور قابل توجهی بیشتر از گزارش‌های قبلی منتشر شده توسط دیگران است. مقادیر بالای آبدهی ویژه تا حدی وابسته به تخلخل اولیه بالا و ثانویه رسوبات دانه‌ریز و شاید تا حدی ناشی از فشردگی نمونه‌ها در دستگاه سانتیفریوژ باشد.

روابط بین تخلخل، نگهداشت ویژه، ضریب دانه‌بندی (ضریب جورشدگی) و میانگین قطر اندازه ذرات در منطقه مورد مطالعه پیچیده است و نمی‌توان به راحتی آبدهی ویژه را با توجه به روابط پارامترهای مزبور تخمین زد. برای بیشتر نمونه‌ها مقادیر تخلخل تقریباً مستقل از مقادیر ضریب دانه‌بندی (جورشدگی) است. مقادیر تخلخل تمایل به افزایش با کاهش مقادیر میانگین اندازه قطر ذرات دارند و

مقادیر نگهداشت ویژه با کاهش مقادیر میانگین اندازه ذرات، افزایش می‌یابند.

مقادیر آبدهی ویژه رابطه‌ای با مقادیر ضریب دانه‌بندی (جورشدگی) از نمونه‌ها که مقادیر میانگین اندازه قطر ذرات در محدوده‌ی بین سیلت و گراول هستند، ندارد. اما در خارج از این محدوده، افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۲- نمودار طبقه‌بندی بافت در ارتباط بین اندازه دانه و آبدهی ویژه (Johnson 1967)

با وجود مطالعات بسیار جهت توسعه چنین روشی در تخمین پارامترهای هیدرولیکی، اختلاف زیاد بین آبدهی ویژه و اندازه ذرات گزارش شده، سبب عدم برآوردی دقیق از آبدهی ویژه و توسعه آن گردیده است. از آنجا که بیشتر این داده‌ها و گزارش‌ها مربوط به دهه‌های گذشته است، بسیاری از این اختلاف‌ها را می‌توان به نوع روش‌های آزمایشگاهی یا قدیمی بودن آن‌ها جهت اندازه‌گیری آبدهی ویژه و تخلخل، نوع روش‌های زهکشی ستون و یا اشباع ناقص نمونه‌ها بیان کرد. با پیشرفت و توسعه

فناوری و ارائه روش‌های استاندارد می‌توان اختلاف‌ها را کاهش داد و از ارتباط و همبستگی نگهداشت ویژه با اندازه ذرات جهت تخمین آبدهی ویژه استفاده نمود.

### ۲-۲-۳- معادل رطوبت سانتریفیوژ

معادل رطوبت سانتریفیوژ طبق تعریف، مقدار آب نگهداری شده ( $S_r$ ) توسط خاکی که اشباع شده و سپس در معرض نیرویی برابر با ۱۰۰۰ بار به مدت یک ساعت قرار می‌گیرد، بیان می‌شود. به طور معمول این مقدار به صورت درصد وزنی مطرح می‌شود و با ضرب در وزن مخصوص خاک خشک و تقسیم آن بر وزن واحد آب به صورت رطوبت معادل در درصد حجم بدست می‌آید. مفهوم رطوبت معادل در ابتدا توسط بریگز و همکاران (Briggs and McLanc 1907) با کاربرد نیروی گریز از مرکز ۳۰۰۰ بار در ۱۰۰ نمونه خاک بیان شد و این مقدار نیروی گریز از مرکز را جهت انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ مطرح کردند و در سال ۱۹۱۰ آن‌ها نیروی ۱۰۰۰ بار را پیشنهاد دادند و دو سال بعد، آزمون معادل رطوبت را با نیروی گرانشی ۱۰۰۰ بار به کار بردند. نیروی گریز از مرکز ۱۰۰۰ بار به عنوان استاندارد توسط بسیاری از دانشمندان پذیرفته شده است.

بسیاری از مطالعات از سال ۱۹۱۲ درباره ارتباط بسیاری از فاکتورها و عوامل با رطوبت معادل بدست آمده است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

استرنز (Stearns 1927) بیان نمود اگر یک ماده، ۱۰۰ اینچ بلندی داشته باشد عامل موینگی در برابر نیروی وزن، قادر است به لحاظ نظری ۰/۱ اینچ آب را در برابر یک نیروی گریز از مرکز ۱۰۰۰ بار نگه دارد. وی اظهار داشت روش معادل رطوبت بر پایه نظریه استفاده از نیروی گریز از مرکز، باید به اندازه کافی برای کاهش اثر حاشیه موینگی حتی در نمونه‌های کوچک، بزرگ باشد و در عین حال به اندازه‌ای بزرگ نباشد که بخش بزرگی از آب حفظ شده توسط حاشیه موینگی را خارج نماید.

پایپر (Piper 1933) ارتباط بین معادل رطوبت سانتریفیوژ و مقدار نگهداشت ویژه تعیین شده با زهکشی‌های صحرایی از ستون‌های بلند از مواد مختلف را تعیین نمود. از آن زمان، معادل رطوبت

برحسب درصد با ضرب نگهداشت ویژه با به کارگیری عامل اصلاح شده پایپر بیان می شود. همچنین پریل (Prill 1961) این رابطه را با جزئیات بیشتر بررسی و مقدار نگهداشت آب بعد از سانتریفیوژ را با مقادیر بدست آمده از زهکشی ستون های طولانی مقایسه نمود.

اسمیت (Smith 1961) بیان نمود مقادیر آبدهی ویژه تعیین شده با استفاده از اطلاعات دستگاه سانتریفیوژ، به خصوص برای مواد ریز دانه، و همچنین ممکن است برای مواد درشت دانه ها، بیشتر برآورد گردد. زیرا آب تخلیه شده توسط دستگاه سانتریفیوژ بیشتر از آب خارج شده تحت نیروی گرانش می باشد.

جانسون و همکاران (Johnson et al, 1963) مطالعات مفصلی در روش رطوبت معادل سانتریفیوژ با بررسی و آنالیز رسوبات رودخانه هالموت کلرادو با در نظر گرفتن تأثیرات عوامل دما و زمان بر عمل سانتریفیوژ، مقادیر آبدهی ویژه رسوبات با اندازه ذرات مختلف را برآورد نمودند و نتایج تحقیقات خود را به شرح زیر عنوان کردند:

نتایج بدست آمده از دمای کنترل شده سانتریفیوژ با نتایج بدست آمده از دمای کنترل نشده، خیلی متفاوت است. افزایش دما با کاهش در کشش سطحی آب منفذی و افزایش تبخیر از نمونه تأثیرگذار است و دمای ۲۰ درجه ی سانتی گراد در آزمایشگاه هیدرولوژیک را پیشنهاد دادند. رطوبت نسبی در اتاق سانتریفیوژ در طول آزمایش سانتریفیوژ باید صد در صد باشد تا بر نتایج آزمایش تأثیرگذار نباشد.

دانش و درک از اثر زمان زهکشی بر مقادیر آبدهی ویژه مهم است. درصد زیادی از آب در بخش اول از چرخه زهکشی همراه است. با بررسی طول دوره ی سانتریفیوژ، نتایج بدست آمده نشان داد یک ساعت عمل سانتریفیوژ زمان کافی برای نزدیک شدن به معادل رطوبت در بسیاری از مواد درشت و متوسط بافت را فراهم می کند. با این حال برای برخی از مواد ریز بافت مورد مطالعه در این آزمایش، زمان بیش از یک ساعت لازم است.

با مطالعه مقدار معادل رطوبت سانتریفیوژ برای نه نمونه دست خورده و دست نخورده، مقدار رطوبت

مواد دست نخورده برای پنج نمونه ۱/۱ درصد و برای چهار نمونه دیگر در محدوده‌ی ۳/۶ تا ۴/۶ درصد پایین‌تر از مقادیر رطوبت نمونه‌های دست خورده بوده است.

## ۲-۲-۴- اشباع نمونه و ستون زهکشی

روش آزمایشگاهی اشباع نمونه و ستون زهکشی شامل تهیه ستونی از مواد مورد آزمایش و اشباع آن، سپس زهکشی تحت نیروی وزن و تعیین هر دو حجم مواد زهکشی شده و حجم آب واگذار شده می‌باشد. در این روش مقدار آبدهی ویژه را می‌توان به طور مستقیم و یا با استفاده از محاسبه تخلخل و رطوبت باقی مانده (نگهداشت ویژه) برآورد نمود.

هیزن (Hazen) در اوایل سال ۱۸۹۲، نگهداشت ویژه و آبدهی ویژه ماسه‌های جور شده را بر اساس اندازه ذرات مطالعه کرد. با اشباع متناوب و زهکشی از ماسه‌های با اندازه ذرات مختلف، مشاهده نمود مقدار نگهداشت آب با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. هم‌چنین درصد آب نگهداشت شده (حفظ شده) در مواد دانه ریز در بخش پایینی نسبت به بخش بالایی بیشتر است.

کینگ (King 1899) با استفاده از ستون زهکشی از نمونه‌های اشباع برای ماسه‌های جور شده در پنج اندازه مختلف برای یک دوره طولانی مقادیر پایین‌تری از نگهداشت ویژه به خصوص برای نمونه‌های دانه درشت نسبت به آزمایش‌های هیزن برآورد نمود.

مینزر (Meinzer 1932) بیان کرد نتایج بدست آمده توسط هیزن و کینگ در تخمین آبدهی ویژه کافی نیست و آزمایش‌های بیشتری از این نوع مورد نیاز است. وی بیان نمود ستون‌های زهکشی تهیه شده باید به اندازه کافی جهت جلوگیری از درصد حاشیه‌ی مویینگی اضافی در ستون‌ها، بلند باشند و اثر تبخیر نیز بر اندازه‌گیری در نظر گرفته شود. به طوری که آزمایش‌ها در درجه حرارت یکنواخت انجام شوند یا اصلاحات لازم بر تغییرات دما اعمال شود. و از آنجا که لازم است زهکشی برای یک مدت طولانی انجام شود تا نرخ آبدهی کم شود، آبدهی ویژه باید برای دوره مشخصی از زهکشی تعیین شود.

جانسون و همکاران (Johnson *et al*, 1963) یک مطالعه دقیق با استفاده از روش ستون زهکشی و اشباع نمونه‌ها انجام دادند و بسیاری از عوامل مؤثر مانند مقدار فشار وارد شده به نمونه‌ها، قطر و ارتفاع ستون زهکشی، روش بسته‌بندی و اثر زمان زهکشی بر مقادیر آبدهی ویژه را در نظر گرفتند و نتایج تحقیقات خود را به صورت زیر ارائه نمودند:

با ارزیابی اثر قطر ستون در توزیع رطوبت مشاهده شد بعد از زهکشی ستون‌های با قطر یک، چهار و هشت اینچی پر شده با رسوبات جور شده ۱۲ میلی‌متری، تفاوت کمی در الگوی کلی توزیع رطوبت بعد از زهکشی وجود دارد.

با محاسبه و مقایسه مقدار تخلخل ستون پر شده از رسوبات یکنواخت و هم اندازه، در شرایط بار اضافه شده به ستون زهکشی و بدون بار، مقادیر تخلخل در هر دو شرایط نزدیک و تقریباً برابر است.

با بررسی اثر زمان روی ستون زهکشی بیان داشتند حتی برای مواد در اندازه ماسه مورد استفاده در مطالعه، زمان طولانی برای رسیدن به تعادل زهکشی مورد نیاز است.

مقادیر برآورد شده آبدهی ویژه با استفاده از هر چهار نوع روش استفاده شده در اشباع نمودن نمونه‌ها، تقریباً برابر و نزدیک به هم هستند.

پریریل و همکاران (Prill *et al*, 1965) با مطالعه بر روی اثر زمان زهکشی بر مقادیر آبدهی ویژه با استفاده از ستون‌های بلند از مواد آبخوان در بررسی‌های آزمایشگاهی بیان نمودند حتی برای موادی در اندازه ماسه یک دوره از دو ماه تا بیش از یک سال برای رسیدن به تعادل زهکشی و ارائه حداکثر آبدهی نیاز خواهد بود.

## فصل سوم: روش انجام کار

در این مطالعه جهت برآورد و تعیین آبدهی ویژه رسوبات آبرفتی و ارتباط آن‌ها با اندازه ذرات، از روش آزمایشگاهی تهیه ستون زهکشی و اشباع استفاده گردید. در ادامه هر یک از مراحل ستون زهکشی تهیه شده از رسوبات آبرفتی و نیز آزمایش‌های زهکشی انجام شده بر آن‌ها جهت تعیین پارامترهای مزبور معرفی می‌شوند.

### ۳-۱- نمونه برداری از رسوبات آبرفتی

به منظور اندازه‌گیری و تعیین آبدهی ویژه رسوبات آبرفتی و ارتباط آن با اندازه ذرات، بالغ بر ۲۵۰ کیلوگرم از رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای، جهت تأمین حجم نمونه رسوبی مورد نیاز آزمایش‌های مد نظر، طی دو مرحله از دو منطقه مختلف به منظور بررسی اثر رسوبات با گستره کشیدگی و اندازه متفاوت، نمونه برداری انجام شد. سعی شد نمونه‌های برداشت شده از مکانی انتخاب شود که تنوع اندازه رسوبات مورد نیاز و همچنین ضخامت مناسب جهت جلوگیری از شکسته شدن نمونه‌ها طی فرآیند جداسازی با استفاده از دستگاه لرزاننده (Shaker) و در عین حال کشیدگی متفاوت جهت بررسی تأثیر آن بر مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه را تأمین کند. نمونه‌های برداشت شده جهت جداسازی و تفکیک بر اساس اندازه ذرات به آزمایشگاه منتقل گردید. محل نمونه رسوبات برداشت شده در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- محل نمونه برداری رسوبات آبرفتی

### ۳-۲- روش‌های جداسازی ذرات رسوبی

بر اساس اینکه قطر نمونه‌ها عمدتاً در چه اندازه‌ای است، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری قطر ذرات وجود دارد. قطر ذرات در حد ماسه و درشت‌تر به روش آزمایش الک و قطر ذرات در محدوده‌ی

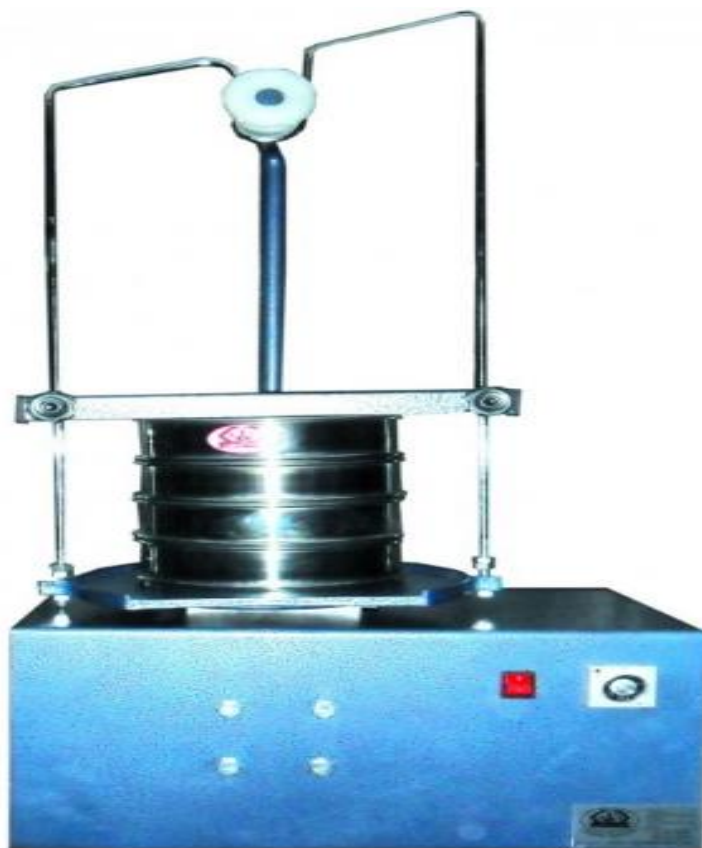


سیلت و رس عموماً به روش شناوری در آب و استفاده از سرعت ته‌نشینی آن‌ها تعیین می‌گردد. در مطالعه حاضر با توجه به اندازه نمونه‌های برداشت شده جهت بررسی، از روش آزمایش الک به منظور تفکیک و جداسازی استفاده گردید.

### ۳-۲-۱- جداسازی و اندازه‌گیری قطر ذرات رسوبی با استفاده از آزمایش الک

آزمایش الک بسته به نوع و اندازه نمونه مورد بررسی با سه روش: الک کردن توسط تنها یک الک، روش دستی و یا استفاده از دستگاه لرزاننده به صورت خشک یا تر انجام می‌شود. الک کردن با استفاده از تنها یک الک صرفاً جهت تخمین اولیه نوع الک‌های مورد استفاده در آزمایش و تعیین اولیه محدوده اندازه رسوبات کاربرد داشته و نمی‌توان از این روش جهت جداسازی دقیق ذرات رسوبی استفاده نمود. الک کردن دستی با استفاده از مجموعه الک‌ها تنها در جاهایی که امکان استفاده از برق وجود ندارد، کاربرد داشته و در سایر موارد از دستگاه‌های لرزاننده استفاده می‌شود.

دستگاه تکان‌دهنده یا لرزاننده الک دستگاهی است جهت لرزش مداوم الک‌ها که در هنگام دانه‌بندی و جداسازی مصالح مختلف کاربرد داشته و بسته به نحوه‌ی تکان دادن الک‌ها خود به چند دسته پرتابی، افقی و ضربه‌ای تقسیم می‌شوند. دستگاه لرزاننده‌ی الک برقی بر دو نوع: ۱- لرزاننده‌ی الک برقی مکانیکی ۲- لرزاننده‌ی الک برقی مغناطیسی می‌باشد. در این تحقیق از دستگاه لرزاننده‌ی مکانیکی استفاده شد. حرکت این دستگاه توسط یک موتور الکتریکی انجام می‌شود. دوام و قدرت این دستگاه نسبت به دستگاه‌های مغناطیسی بسیار بالاتر می‌باشد. هم‌چنین تحمل وزنی آن‌ها در حدود ۵۰ کیلوگرم است. این نوع دستگاه معمولاً جهت استفاده در آزمایشگاه‌های مکانیک خاک که مصالح سنگینی استفاده می‌کنند، پیشنهاد می‌شود. دستگاه دارای یک زمان‌سنج می‌باشد تا در صورت نیاز در زمان معین شده، دستگاه به صورت خودکار خاموش شود (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲- دستگاه لرزاننده‌ی برقی مکانیکی

در آزمایش الک در هر روش (دستی یا با استفاده از دستگاه لرزاننده)، به یک سری الک‌های استاندارد با اندازه منافذ مشخص و با شماره معین می‌باشد. الک یا سرند آزمایشگاهی وسیله‌ای است جهت دانه‌بندی و یا اندازه‌گیری مواد می‌باشد که نیز خود یکی از بهینه و به صرفه‌ترین روش‌های اندازه‌گیری مواد می‌باشند. جنس توری الک‌های آزمایشگاهی از استیل ضد زنگ ساخته شده است. به تعداد سوراخ‌ها در ۶/۴۵ سانتی‌متر مربع (یک اینچ مربع) توری الک، عدد یا شماره الک گفته می‌شود. مجموعه‌ای از الک‌های با اندازه‌های مختلف در دسترس است. مرز میان ماسه و لای به دلخواه انتخاب می‌شود. مطابق سامانه اتحادیه دسته‌بندی خاک، برای جدا کردن ماسه و شن از یکدیگر از الک شماره چهار (چهار منفذ در اینچ) استفاده می‌شود که اندازه منافذ این الک ۴/۷۵ میلی‌متر است.

جدول ۱-۳- مشخصات الک‌های مورد استفاده در آزمایش‌های زهکشی انجام شده

| محدوده         | شماره الک | اینچ   | میکرون | میلی‌متر | فی       |
|----------------|-----------|--------|--------|----------|----------|
| گراول          | ۴         | ۰/۱۸۷۰ | ۴۷/۶۰  | ۴/۷۶۰    | ۳- تا ۲- |
|                | ۵         | ۰/۱۵۷۰ | ۴۰۰۰   | ۴/۰۰۰    | ۲-       |
|                | ۸         | ۰/۰۹۳۷ | ۲۳۸۰   | ۲/۳۸۰    | ۲- تا ۱- |
|                | ۱۰        | ۰/۰۷۸۷ | ۲۰۰۰   | ۲/۰۰۰    | ۱-       |
| ماسه خیلی درشت | ۱۶        | ۰/۰۴۶۹ | ۱۱۹۰   | ۱/۱۹۰    | ۱- تا ۰  |
|                | ۱۸        | ۰/۰۳۹۴ | ۱۰۰۰   | ۱/۰۰۰    | ۰        |
| ماسه درشت      | ۳۰        | ۰/۰۲۳۲ | ۵۹۵    | ۰/۵۹۵    | ۱ تا ۰   |
|                | ۳۵        | ۰/۰۱۹۷ | ۵۰۰    | ۰/۵۰۰    | ۱        |
| ماسه متوسط     | ۵۰        | ۰/۰۱۱۷ | ۲۹۷    | ۰/۲۹۷    | ۲ تا ۱   |
|                | ۶۰        | ۰/۰۰۹۸ | ۲۵۰    | ۰/۲۵۰    | ۲        |
| ماسه ریز       | ۱۰۰       | ۰/۰۰۵۹ | ۱۴۹    | ۰/۱۴۹    | ۳ تا ۲   |
|                | ۱۲۰       | ۰/۰۰۴۹ | ۱۲۵    | ۰/۱۲۵    | ۳        |

برای جدا کردن ماسه از لای و رس نیز از الک شماره ۲۰۰ با اندازه منافذ ۰/۰۷۵ میلی‌متر استفاده می‌شود. مطابق استاندارد انگلیسی ۰/۰۶۳ میلی‌متر (۶۳ میکرون) مرز میان ماسه و لای و دو میلی‌متر مرز میان ماسه و شن است. اگرچه الک تا اندازه منافذ ۳۷ میکرون نیز ساخته شده است، اما در الک‌هایی با منافذ زیر ۶۳ میکرون معمولاً رسوبات ریزدانه سریعاً منافذ را پوشش داده و سبب خطا در الک کردن می‌شود.

الک‌های آزمایشگاهی استفاده شده در تحقیق حاضر با توجه به اندازه ذرات رسوبات مورد نیاز جهت انجام آزمایش، الک‌هایی با مشخصات بیان شده در جدول (۳-۱) می‌باشد که تمام الک‌های مربوط به رده‌های مختلف محدوده ماسه و چند الک از محدوده گروال را شامل می‌شود.

جهت انجام آزمایش الک به صورت دستی یا با استفاده از دستگاه تکان‌دهنده، مجموعه الک‌ها بر روی هم قرار داده می‌شوند به نحوی که الک‌های با منافذ بزرگ‌تر در بالا و الک‌های ریزتر در پایین‌تر روی دستگاه لرزاننده قرار می‌گیرند. در زیر ریزترین الک یک سینی قرار داده می‌شود تا رسوبات دانه‌ریزتر عبوری از آخرین الک جمع‌آوری شوند. هم‌چنین برای جلوگیری از پاشیدن مواد به بیرون از درب الک استفاده می‌شود که در روی بالاترین الک قرار می‌گیرد. پس از قرار گرفتن الک‌ها به ترتیب اندازه، زمان‌سنج دستگاه روی زمان تعیین شده تنظیم و نمونه مورد نظر و مجموعه الک‌ها برای مدت مشخصی تکان داده می‌شوند تا دانه‌های خاک از آن عبور کنند. واضح است که دانه‌های با اندازه کوچک‌تر از منافذ الک عبور می‌کنند و دانه‌های بزرگ‌تر بر روی سیم‌های توری باقی می‌مانند. بدین ترتیب نمونه بر اساس اندازه تفکیک می‌گردد.

جداسازی و تفکیک اولیه نمونه‌های رسوبی برداشت شده ابتدا به صورت دستی انجام شد و سپس از دستگاه لرزاننده مکانیکی با توجه به اندازه نمونه و هم‌چنین کشیدگی و گردشدگی آن‌ها، از کارکرد حداقل زمان یک ساعته دستگاه برای هر صد گرم رسوب دانه‌ریز تا دویست گرم در رسوبات دانه درشت استفاده شد. با مشاهده عدم جداسازی و دقت کافی دستگاه، ناشی از قدرت کم در تکان دادن دستگاه و هم‌چنین بسته شدن روزنه‌های الک‌های مورد استفاده در عبور نمونه‌ها به خصوص در

نمونه‌های با کشیدگی بیشتر و دانه ریزتر، مجدداً از روش الک دستی به منظور صحت و اطمینان بیشتر در جداسازی، طی چند مرحله تکرار به مدت شش ماه نمونه‌های برداشت شده تفکیک و جداسازی شدند (شکل ۳-۳). همچنین جهت بازدهی بیشتر دستگاه تکان‌دهنده در هر مرحله یک ساعته استفاده از دستگاه، طی چند مرحله روزنه‌های الک‌های موجود در دستگاه با استفاده از برس باز شد و مجدداً در دستگاه لرزاننده قرار گرفتند.



شکل ۳-۳- رسوبات تفکیک شده با آزمایش الک

### ۳-۴- تعیین جورشدگی و کشیدگی رسوبات مورد آزمایش

به منظور تعیین جورشدگی و کشیدگی رسوبات برداشت شده، پس از جداسازی رسوبات از یکدیگر بر اساس اندازه، مقدار رسوب باقی‌مانده بر هر الک با استفاده از ترازوی دیجیتالی وزن و درصد وزنی هر یک محاسبه گردید (شکل ۳-۵). با تعیین مقیاس فی رسوبات و درصد فراوانی آن‌ها، نمودار مربوطه رسم و طبق معادله‌ی مربوطه کشیدگی رسوبات هر یک از دو محل نمونه برداری شده تعیین شد.



شکل ۳-۴- گرفتگی منافذ الک طی جداسازی



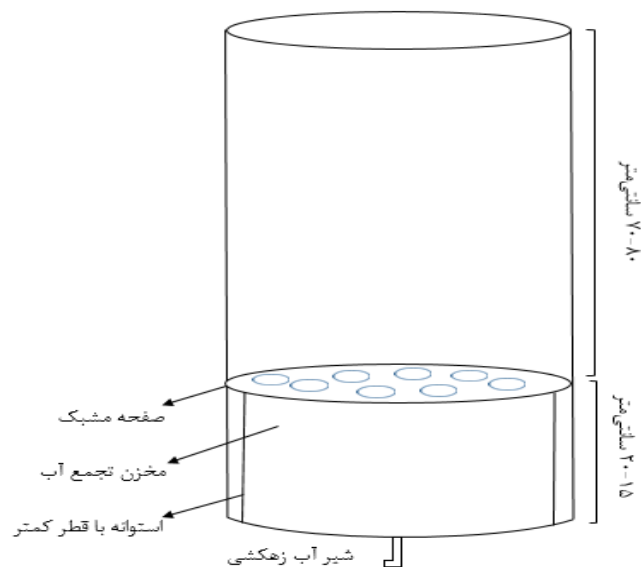
شکل ۳-۵- اندازه‌گیری وزن رسوبات باقی‌مانده روی هر الک

### ۳-۵- طراحی و ساخت دستگاه برای انجام آزمایش به روش ستون زهکشی

جهت انجام آزمایش و بررسی‌های مورد نظر بر رسوبات آبرفتی در اندازه ذرات مختلف، دو دستگاه با استفاده از دو لوله پلی‌اتیلن با قطر تقریبی دو و چهار اینچ و با ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، یک قطعه لوله

کوچک‌تر با ارتفاع تقریبی ۱۰ سانتی‌متر و قطر کمتر از هر یک از دو لوله دو و چهار اینچی جهت قرار گرفتن در آن‌ها، یک صفحه فلزی مشبک با منافذ پنج میلی‌متر و استفاده از شیر آب جهت خروج و زهکشی آب، طراحی و ساخته شد. بدین ترتیب که قسمت انتهایی لوله‌های پلی‌اتیلن دو و چهار اینچی هفتاد سانتی‌متری با استفاده از درپوش (بن‌بست) پلی‌اتیلن مسدود و با استفاده از چسب مخصوص لوله پلی‌اتیلن به صورت مخروطی شکل (جهت خروج کامل آب) عایق‌بند گردید. یک شیر آب جهت انجام زهکشی و خروج آب زهکشی شده در زیر درپوش لوله تعبیه شد. لوله با قطر کمتر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در داخل لوله بزرگ‌تر به منظور نگه‌دارنده صفحه مشبک کار گذاشته شد و صفحه مشبک بر روی آن قرار گرفت. همچنین به منظور ممانعت از عبور رسوبات دانه‌ریز از صفحه مشبک، بر روی صفحه توری قرار داده شد. بدین ترتیب یک مخزن کوچک در زیر صفحه مشبک جهت تجمع آب‌های زهکشی شده از رسوبات فوقانی که طی آزمایش‌های زهکشی مورد نظر بر روی صفحه ریخته و اشباع می‌شوند، ایجاد گردید. همچنین تعبیه مخزن طراحی شده سبب انجام زهکشی به صورت مداوم با تجمع آب زهکشی شده از رسوبات فوقانی در مخزن و جلوگیری از تبخیر و ایجاد خطا در محاسبات گردید. جهت انجام زهکشی، دستگاه بر پایه نگه‌دارنده ساخته شده مستقر و قسمت فوقانی آن به منظور ممانعت از تبخیر با استفاده از فوم عایق گردید. قطعات دستگاه مزبور به صورت شماتیک در شکل (۳-۶) و شکل (۳-۷) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است دستگاه مذکور طراحی شده در ابتدا با استفاده از لوله‌ی با جنس پلی‌کا ساخته شد که به دلیل عدم مقاومت آن در برابر وزن اعمالی رسوبات اشباع شده موجود در دستگاه، مجدداً از جنس لوله پلی‌اتیلن جهت ساخت استفاده گردید.



شکل ۶-۳- نمای شماتیک دستگاه زهکشی طراحی شده

### ۶-۳- انجام آزمایش‌های زهکشی بر رسوبات آبرفتی

به منظور برآورد تخلخل و آبدهی ویژه رسوبات جداسازی و تفکیک شده با استفاده از دستگاه زهکشی ساخته شده و تهیه رسوبات با اندازه ذرات مختلف، ابتدا مخزن زیرین صفحه مشبک دستگاه زهکشی با آب شرب اشباع گردید و سپس حجم رسوب مورد نظر بر روی صفحه مشبک درون دستگاه جهت انجام زهکشی قرار داده شد. با استفاده از آب شرب، رسوب موجود در دستگاه اشباع و قسمت فوقانی آن جهت جلوگیری از تبخیر با فوم عایق گردید. پس از در نظر گرفتن مدت زمانی مشخص بعد از اشباع نمونه‌ها به منظور تراکم کامل نمونه و خروج هوای محبوس شده جهت تعیین حجم آب لازم برای اشباع نمونه‌ها، با استفاده از شیر آب تعبیه شده در قسمت انتهایی دستگاه؛ زهکشی نمونه با در نظر گرفتن مدت زمان لازم با توجه به اندازه ذرات مورد آزمایش، انجام شد. پس از اتمام زهکشی در محاسبات مربوط به مقادیر حجم آب زهکشی شده از رسوب، مقدار آب مربوط به حجم مخزن زیرین صفحه مشبک از حجم کل آب زهکشی شده از نمونه کسر گردید. در نهایت با توجه به حجم آب مصرف شده در اشباع نمونه و حجم آب زهکشی شده، مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه هر یک از رسوبات برآورد گردید.





(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۳-۷- دستگاه زهکشی ساخته شده. الف) عایق بندی درپوش لوله پلی اتیلن با استفاده از چسب مخصوص ب) نصب شیر آب در قسمت انتهایی در پوش پلی اتیلن ج) صفحه مشبک فلزی د) جوش لوله پلی اتیلن بر درپوش و نصب صفحه مشبک در انتهای لوله ه) پایه دستگاه و) آزمایش زهکشی با دستگاه های ساخته شده



## فصل چهارم: تعیین آبدهی ویژه رسوبات

### با استفاده از آنالیز اندازه ذرات

با توجه به اهمیت بالای آبدهی ویژه در ارزیابی دقیق منابع آب زیرزمینی، توصیف ویژگی‌های آبخوان، محاسبه‌های مربوط به بیلان آب، امکان توسعه و بهره‌برداری و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب این منابع آبی، مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی و انجام طرح‌های پژوهشی؛ روش‌های مختلفی برای تعیین این پارامتر مهم هیدرودینامیکی آبخوان ارائه شده است. مهم‌ترین روش برای تعیین مقدار آبدهی ویژه در آبخوان‌های مختلف، روش آزمایش پمپاژ می‌باشد. با این حال، در بسیاری از آبخوان‌های آبرفتی داده‌های آزمایش پمپاژ به اندازه کافی وجود ندارد و یا تعداد آزمایش‌ها در مقایسه با وسعت دشت اندک می‌باشد. هم‌چنین به علت کم بودن افراد متخصص در تفسیر داده‌های پمپاژ و هزینه‌بر بودن این آزمایش‌ها و اتلاف مقادیر زیادی آب جهت انجام پمپاژ، سایر روش‌ها می‌توانند قابلیت کاربرد داشته باشند. در این تحقیق مقادیر آبدهی ویژه رسوبات آبرفتی با استفاده از ستون زهکشی تعیین شده است.

#### ۴-۱- اندازه‌گیری آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از ستون زهکشی

تعیین مقادیر آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از روش آزمایشگاهی ستون زهکشی، به عوامل مختلفی وابسته می‌باشند که مهم‌ترین آن‌ها شامل مدت زمان اشباع نمودن نمونه، مدت انجام زهکشی، قطر ستون زهکشی، کشیدگی ذرات رسوبی، اندازه ذرات و اختلاط رسوبات با یکدیگر می‌باشد. چگونگی اثر این عوامل در این بخش ارائه می‌شود.

#### ۴-۱-۱- بررسی تاثیر زمان اشباع شدگی

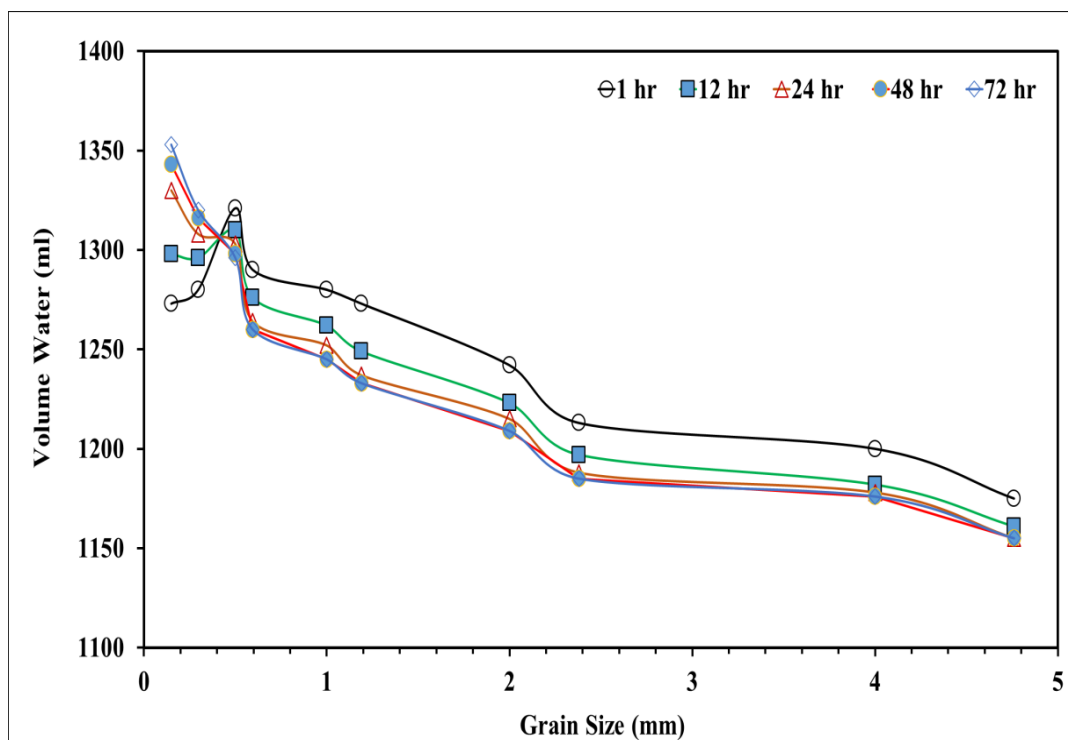
زمان اشباع شدگی رسوبات یا مدت زمانی که برای اشباع شدن رسوبات صرف می‌شود، یکی از پارامترهایی است که می‌تواند بر مقدار آبدهی ویژه تعیین شده به وسیله ستون زهکشی تاثیرگذار باشد. بدین ترتیب که اگر زمان اشباع شدگی رسوبات سریع انجام شود، ممکن است مقداری هوا در بین فضای خالی رسوبات به دام افتد و یا به عبارت دیگر آب به تمام خلل و فرج موجود در بین رسوبات (به ویژه در رسوبات ریز دانه) وارد نشده باشد. در نتیجه مقدار آب خروجی تحت نیروی ثقل نیز کمتر خواهد بود که خود سبب کاهش مقدار آبدهی ویژه تعیین شده می‌شود. بنابراین هر چه مدت زمان صرف شده برای اشباع شدن رسوبات طولانی‌تر باشد، مقدار آبی که برای اشباع شدن رسوبات مورد نیاز است و همچنین مقدار آب زهکشی شده تحت نیروی ثقل، دقیق‌تر برآورد خواهد شد. جدول (۴-۱) و شکل (۴-۱) حجم آب مصرف شده برای اشباع شدن نمونه‌ها در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همان طور که از داده‌های جدول (۴-۱) و روند تغییرات شکل (۴-۱) مشاهده می‌شود، با افزایش مدت زمان اشباع، در رسوبات دانه درشت‌تر به دلیل خروج هوای محبوس شده و تراکم رسوبات حجم آب مورد نیاز جهت اشباع کاهش یافته است. در رسوبات دانه ریزتر مربوط به رده‌های ماسه متوسط و ماسه ریز به دلیل عدم اشباع کامل آن‌ها در زمان‌های ابتدایی، با افزایش زمان حجم آب مصرفی برای اشباع شدن افزایش یافته است.

بنابراین، در تحقیق حاضر با توجه به تغییرات حجم آب مصرف شده جهت اشباع شدن کامل رسوبات در زمان‌های مختلف می‌توان یک برآوردی از حداقل زمان مورد نیاز برای اشباع شدن کامل رسوبات ارائه نمود. به این ترتیب که می‌توان این چنین اظهار نظر کرد که در رسوبات دانه درشت حداقل ۴۸ ساعت و در رسوبات دانه ریزتر مربوط به رده‌های ماسه متوسط و ماسه ریز حداقل ۷۲ ساعت زمان جهت اشباع شدن کامل رسوبات و در نتیجه تعیین تخلخل موثر رسوبات لازم است.

جدول ۴-۱- حجم آب مصرف شده جهت اشباع نمودن رسوبات در مدت زمان‌های مختلف

| حجم آب مصرفی (برحسب میلی لیتر) در زمان‌های مختلف |         |         |         |        | شماره الک |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| ۷۲ ساعت                                          | ۴۸ ساعت | ۲۴ ساعت | ۱۲ ساعت | ۱ ساعت |           |
| ۱۱۵۵                                             | ۱۱۵۵    | ۱۱۵۵    | ۱۱۶۱    | ۱۱۷۵   | ۴         |
| ۱۱۷۶                                             | ۱۱۷۶    | ۱۱۷۸    | ۱۱۸۲    | ۱۲۰۰   | ۵         |
| ۱۱۸۵                                             | ۱۱۸۵    | ۱۱۸۸    | ۱۱۹۷    | ۱۲۱۳   | ۸         |
| ۱۲۰۹                                             | ۱۲۰۹    | ۱۲۱۵    | ۱۲۲۳    | ۱۲۴۲   | ۱۰        |
| ۱۲۳۳                                             | ۱۲۳۳    | ۱۲۳۷    | ۱۲۴۹    | ۱۲۷۳   | ۱۶        |
| ۱۲۴۵                                             | ۱۲۴۵    | ۱۲۵۲    | ۱۲۶۲    | ۱۲۸۰   | ۱۸        |
| ۱۲۶۰                                             | ۱۲۶۰    | ۱۲۶۴    | ۱۲۷۶    | ۱۲۹۰   | ۳۰        |
| ۱۲۹۶                                             | ۱۲۹۶    | ۱۳۰۳    | ۱۳۱۰    | ۱۳۲۱   | ۳۵        |
| ۱۳۲۰                                             | ۱۳۱۶    | ۱۳۰۸    | ۱۲۹۶    | ۱۲۸۰   | ۵۰        |
| ۱۳۵۳                                             | ۱۳۴۳    | ۱۳۳۰    | ۱۲۹۸    | ۱۲۷۳   | ۱۰۰       |



شکل ۴-۱- مدت زمان صرف شده برای اشباع نمودن نمونه‌ها

#### ۴-۱-۲- بررسی تاثیر زمان زهکشی

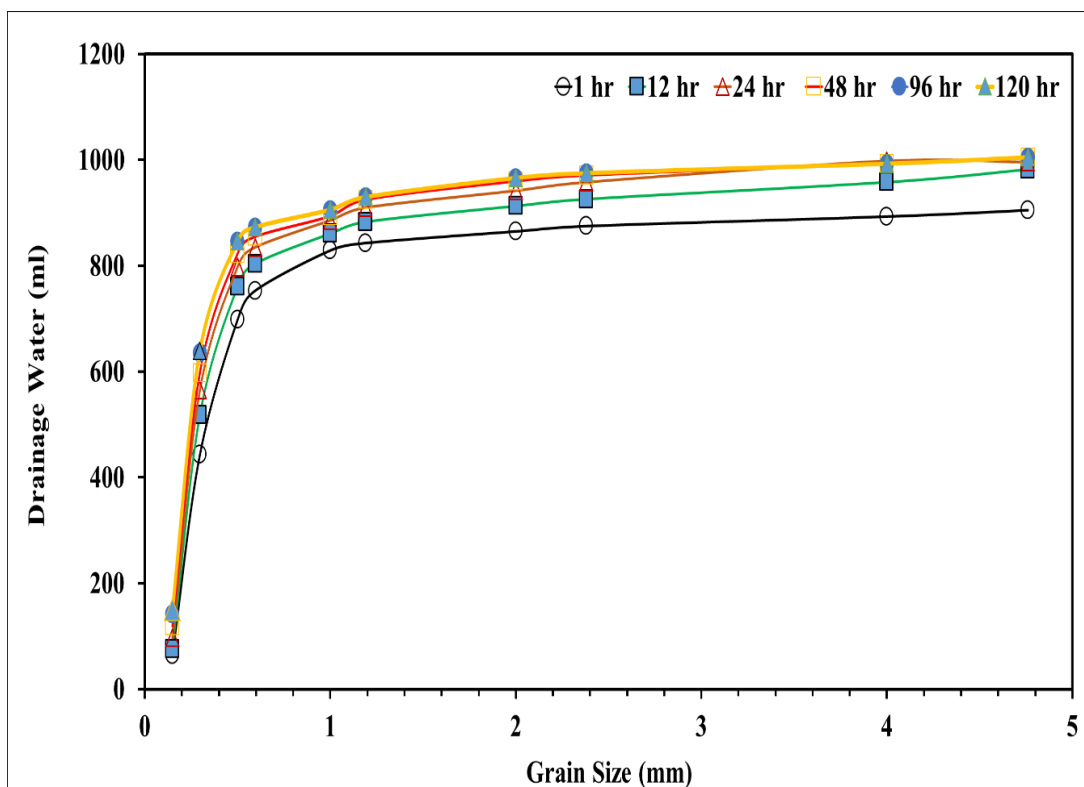
جهت بررسی اثر زمان زهکشی بر حجم آب زهکشی شده از رسوبات با اندازه ذرات مختلف، پس از شروع زهکشی در بازه‌های زمانی متفاوت حجم آب زهکشی شده از نمونه‌های رسوبی مورد آزمایش اندازه‌گیری شد. حجم آب زهکشی شده در بازه‌های زمانی مختلف پس از شروع زهکشی در جدول (۴-۲) و روند تغییرات آن در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.

همان‌طور که از نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در جدول (۴-۲) و روند تغییرات آن در شکل (۴-۲) مشاهده می‌شود، بیشترین حجم آب در زمان ابتدایی از نمونه زهکشی می‌شود. اما با گذشت زمان حجم آب زهکشی شده به خصوص در رسوبات دانه‌ریزتر افزایش می‌یابد. صرف مدت زمان زهکشی بیشتر در رسوبات با اندازه ذرات ریزتر، شاهی بر وابستگی آبدی ویژه رسوبات با اندازه ذرات ریز به مدت زمان انجام زهکشی نسبت به رسوبات با دانه‌بندی درشت می‌باشد. لذا با توجه به اندازه ذرات رسوبی مورد آزمایش، بازه زمانی متفاوتی جهت زهکشی کامل و در نتیجه تعیین آبدی ویژه رسوبات

مورد نیاز است. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان این چنین نتیجه‌گیری نمود که حداقل زمان برای زهکشی کامل رسوبات دانه درشت بین ۴۸ تا ۷۲ ساعت و در رسوبات دانه ریزتر حدود ۱۲۰ ساعت می‌باشد.

جدول ۴-۲- مقادیر آب زهکشی شده از رسوبات در بازه‌های زمانی متفاوت پس از شروع زهکشی

| حجم آب زهکشی شده (برحسب میلی لیتر) در بازه‌های زمانی مختلف |         |         |         |         |         |          | شماره الک |
|------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|
| ۱ ساعت                                                     | ۱۲ ساعت | ۲۴ ساعت | ۴۸ ساعت | ۷۲ ساعت | ۹۶ ساعت | ۱۲۰ ساعت |           |
| ۹۰۵                                                        | ۹۷۹     | ۹۹۶     | ۱۰۰۵    | ۱۰۰۵    | ۱۰۰۵    | ۱۰۰۵     | ۴         |
| ۸۹۳                                                        | ۹۵۸     | ۹۸۸     | ۹۹۳     | ۹۹۳     | ۹۹۳     | ۹۹۳      | ۵         |
| ۸۷۵                                                        | ۹۲۵     | ۹۶۰     | ۹۷۰     | ۹۷۰     | ۹۷۰     | ۹۷۰      | ۸         |
| ۸۶۵                                                        | ۹۱۳     | ۹۴۲     | ۹۶۰     | ۹۶۶     | ۹۶۶     | ۹۶۶      | ۱۰        |
| ۸۴۳                                                        | ۸۸۳     | ۹۱۰     | ۹۲۵     | ۹۳۰     | ۹۳۰     | ۹۳۰      | ۱۶        |
| ۸۲۹                                                        | ۸۶۱     | ۸۸۱     | ۸۹۹     | ۹۰۶     | ۹۰۶     | ۹۰۶      | ۱۸        |
| ۷۵۳                                                        | ۸۰۴     | ۸۳۵     | ۸۵۵     | ۸۶۷     | ۸۷۳     | ۸۷۳      | ۳۰        |
| ۶۹۸                                                        | ۷۶۱     | ۷۹۸     | ۸۲۳     | ۸۳۸     | ۸۴۶     | ۸۴۶      | ۳۵        |
| ۴۴۳                                                        | ۵۱۸     | ۵۶۴     | ۵۹۹     | ۶۲۳     | ۶۳۵     | ۶۳۹      | ۵۰        |
| ۶۵                                                         | ۷۵      | ۱۰۰     | ۱۱۷     | ۱۳۱     | ۱۴۲     | ۱۵۰      | ۱۰۰       |



شکل ۲-۴- حجم آب زهکشی شده از رسوبات در زمان‌های مختلف پس از شروع زهکشی

#### ۴-۱-۳- بررسی اثر قطر دستگاه زهکشی رسوبات آبرفتی

به منظور بررسی اثر قطر دستگاه زهکشی بر مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه رسوبات، مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده از آزمایش‌های انجام شده بر رسوبات با اندازه ذرات متفاوت مربوط به الک‌های هر رده رسوبی با استفاده از دستگاه زهکشی با قطر چهار اینچ، با نتایج برآوردی از زهکشی همان نوع رسوبات با استفاده از دستگاه زهکشی با قطر دو اینچ، با یکدیگر مقایسه شد. مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده از هر یک از آزمایش‌های مزبور جهت مقایسه در جدول (۳-۴) ملاحظه می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر برآوردی در آزمایش‌های انجام شده با قطر دستگاه کمتر برای رسوب مورد آزمایش از مقادیر برآوردی از زهکشی همان نوع رسوبات با استفاده از دستگاه با قطر بزرگتر؛ جز در محدوده رسوبی ریگ (الک‌های ۴ و ۵) و شن (الک‌های ۸ و ۱۰) تفاوت زیادی را نشان نمی‌دهد. علت تفاوت کم مشاهده شده در محدوده‌ی ذکر شده در مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه را

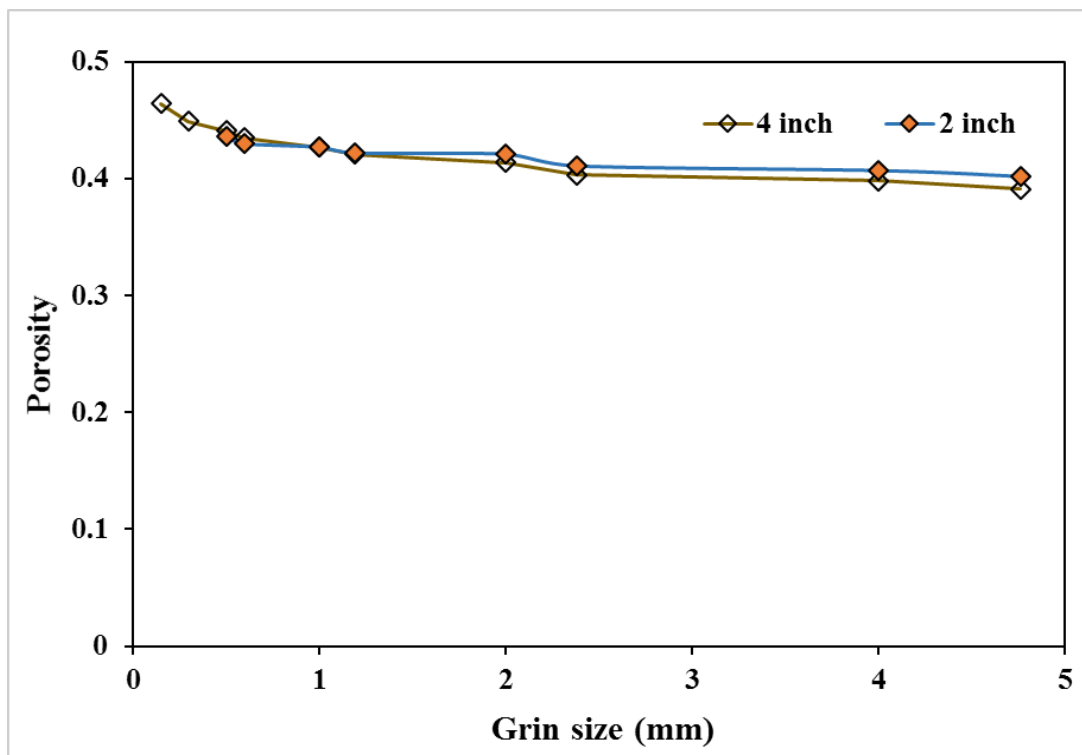


می‌توان اثر قطر دستگاه زهکشی بر فابریک و چیدمان رسوبات درشت دانه بیان نمود. روند تغییرات تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده در استفاده از دو دستگاه زهکشی با قطرهای مطرح شده در شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) مشاهده می‌شود.

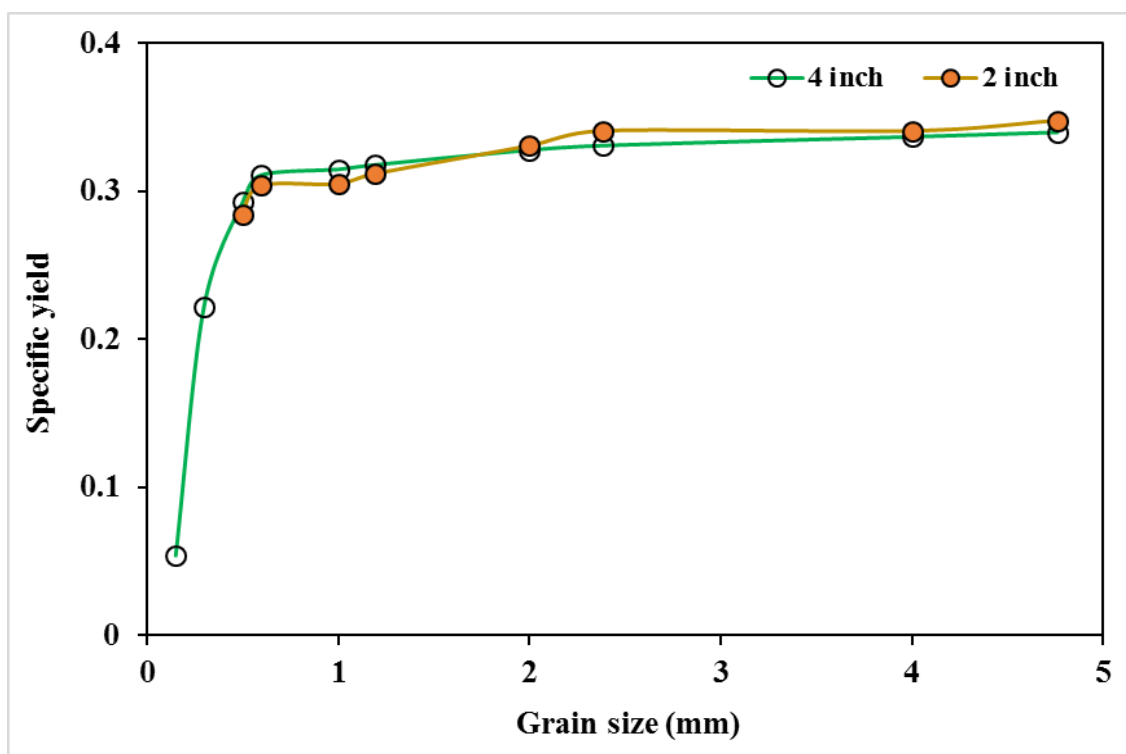
جدول ۴-۳- مقادیر تخلخل ( $\phi$ ) و آبدهی ویژه ( $S_y$ ) برآورد شده از زهکشی رسوبات با استفاده از دستگاه زهکشی با قطر متفاوت

| رده رسوبی      | شماره الک | پارامتر | دستگاه ۴ اینچی | دستگاه ۲ اینچی |
|----------------|-----------|---------|----------------|----------------|
| ریگ            | ۴         | $S_y$   | ۰/۳۳۵          | ۰/۳۲۶          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۳۸۵          | ۰/۳۹۰          |
|                | ۵         | $S_y$   | ۰/۳۳۰          | ۰/۳۲۱          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۳۹۰          | ۰/۳۹۵          |
| شن             | ۸         | $S_y$   | ۰/۳۲۵          | ۰/۳۱۵          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۳۹۵          | ۰/۴۰۱          |
|                | ۱۰        | $S_y$   | ۰/۳۲۰          | ۰/۲۹۶          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۰۰          | ۰/۴۱۰          |
| ماسه خیلی درشت | ۱۶        | $S_y$   | ۰/۳۱۰          | ۰/۲۸۸          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۱۰          | ۰/۴۱۱          |
|                | ۱۸        | $S_y$   | ۰/۳۰۱          | ۰/۲۹۱          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۱۵          | ۰/۴۱۵          |
| ماسه درشت      | ۳۰        | $S_y$   | ۰/۲۹۱          | ۰/۲۸۱          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۲۱          | ۰/۴۲۷          |
|                | ۳۵        | $S_y$   | ۰/۲۸۰          | ۰/۲۸۱          |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۳۱          | ۰/۴۳۳          |
| ماسه متوسط     | ۵۰        | $S_y$   | ۰/۲۱۰          | NR             |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۴۱          | NR             |
| ماسه ریز       | ۱۰۰       | $S_y$   | ۰/۰۷۱          | NR             |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۵۰          | NR             |

(NR = ثبت نشده)



شکل ۴-۳- اثر قطر دستگاه زهکشی بر روند تغییرات تخلخل بر آوردی از زهکشی رسوبات با اندازه ذرات مختلف



شکل ۴-۴- اثر قطر دستگاه زهکشی بر روند تغییرات آبدهی ویژه بر آوردی از زهکشی رسوبات با اندازه ذرات مختلف

با وجود اختلاف کم مشاهده شده می‌توان بیان نمود در آزمایش زهکشی برای حجم‌های بیشتر نمونه رسوبی با اندازه ذرات درشت‌تر و هم‌چنین استفاده از دستگاه زهکشی با تفاوت قطری بیشتر، اختلاف قابل توجه‌تری در مقادیر پارامترهای مزبور با اثرگذاری بر فابریک و چیدمان رسوبات مشاهده شود.

#### ۴-۱-۴- بررسی تأثیر شکل ذرات

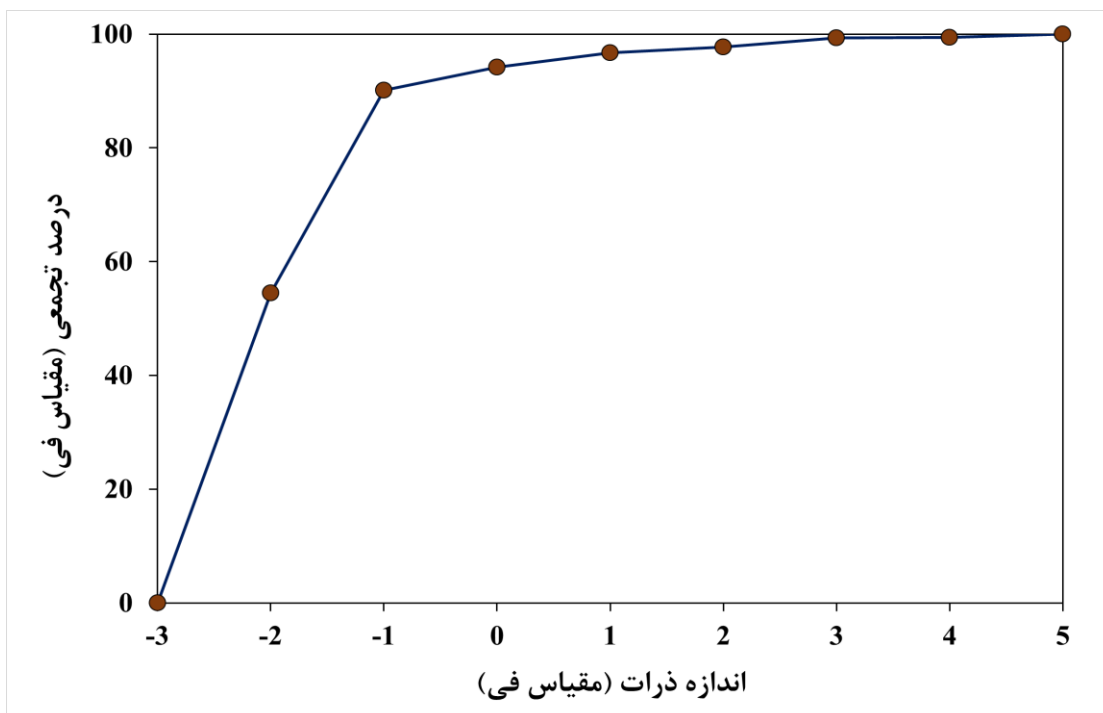
در بررسی تأثیر احتمالی شکل ذرات رسوبی بر مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه، رسوبات زاویه‌دار و کشیده‌تر برداشتی از مناطق آبرفتی با اندازه ذرات مختلف و رسوبات برداشت شده از مناطق با کشیدگی کمتر جهت مقایسه مورد آزمایش زهکشی قرار گرفتند. جهت تعیین کشیدگی دقیق هر دو رسوبات برداشتی، طی مرحله جداسازی بر اساس اندازه ذرات با استفاده از دستگاه لرزاننده وزن رسوب باقی مانده بر هر الک و هم‌چنین وزن کلی رسوبات اندازه‌گیری شد (جدول ۴-۴). درصد وزنی و تجمعی هر دو نوع رسوبات مشخص گردید و منحنی‌های تجمعی آن‌ها به صورتی که اندازه ذرات با مقیاس فی از چپ به راست با کاهش اندازه ذرات روی محور Xها و درصد تجمعی بر حسب مقیاس حسابی بر محور Yها قرار دارد، رسم گردید (شکل ۴-۵ و ۴-۶).

با تعیین شاخص کشیدگی رسوبات مربوط به هر یک از دو محل نمونه برداری (KG)، با استفاده از منحنی‌های رسم شده و استفاده از معادله (۴-۱) و مراجع به محدوده‌های تعیین شده در مقادیر کشیدگی رسوبات، کشیدگی رسوبات نمونه بردای شده از محل اول و دوم منطقه آبرفتی به ترتیب کشیده و متوسط برآورد شدند.

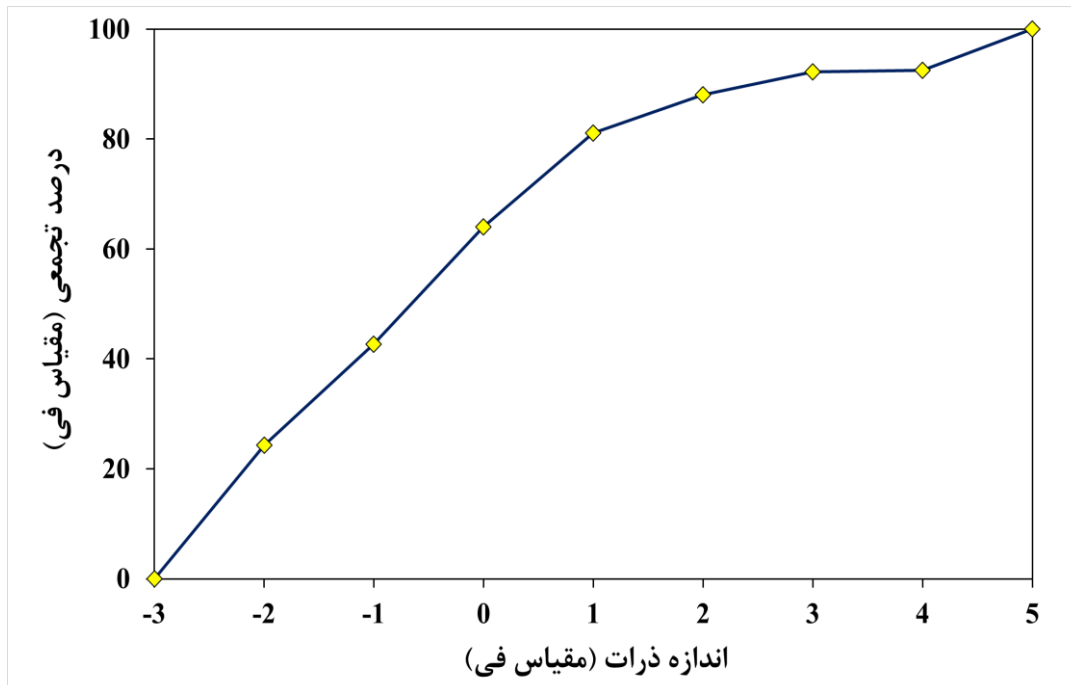
$$KG = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})} \quad \text{معادله (۴-۱)}$$

جدول ۴-۴- تعیین رده بندی اندازه ذرات رسوبی و درصد تجمعی آنها

| رده بندی<br>اندازه ذرات<br>(مقیاس فی) | درصد تجمعی | درصد فراوانی | فروانی وزن<br>رسوبات<br>در هر رده | شماره الک | محل نمونه برداری |
|---------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------------|-----------|------------------|
| ۳- تا ۲-                              | ۵۴/۸۰      | ۵۴/۸۰        | ۴۲/۵۵                             | ۴ و ۵     | الف              |
|                                       | ۲۴/۳۰      | ۲۴/۳۰        | ۲۹/۴۲                             |           | ب                |
| ۲- تا ۱-                              | ۹۰/۱۷      | ۳۵/۳۷        | ۲۷/۴۷                             | ۸ و ۱۰    | الف              |
|                                       | ۴۲/۷۰      | ۱۸/۴۰        | ۲۲/۲۷                             |           | ب                |
| ۱- تا ۰                               | ۹۴/۱۵      | ۳/۹۸         | ۲/۹۵                              | ۱۶ و ۱۸   | الف              |
|                                       | ۶۴/۰۰      | ۲۱/۳۰        | ۲۵/۱۸                             |           | ب                |
| ۰ تا ۱-                               | ۹۶/۶۹      | ۲/۵۴         | ۱/۹۷                              | ۳۰ و ۳۵   | الف              |
|                                       | ۸۱/۱۵      | ۱۷/۱۴        | ۲۰/۷۵                             |           | ب                |
| ۱ تا ۲                                | ۹۷/۷۱      | ۱/۰۲         | ۰/۷۹                              | ۵۰ و ۶۰   | الف              |
|                                       | ۸۸/۰۹      | ۶/۹۳         | ۸/۴۰                              |           | ب                |
| ۲ تا ۳                                | ۹۹/۳۱      | ۱/۶۰         | ۱/۲۵                              | ۱۰۰ و ۱۲۰ | الف              |
|                                       | ۹۲/۲۱      | ۴/۱۹         | ۴/۹۹                              |           | ب                |
| ۳ تا ۴                                | ۹۹/۴۱      | ۰/۱۰         | ۰/۰۸                              | ۲۰۰ و ۲۳۰ | الف              |
|                                       | ۹۲/۵۴      | ۰/۳۳         | ۰/۴۰                              |           | ب                |
| ۴ تا ۵                                | ۱۰۰        | ۰/۶۶         | ۰/۵۱                              | پن        | الف              |
|                                       | ۱۰۰        | ۷/۴۷         | ۹/۰۴                              |           | ب                |



شکل ۴-۵- منحنی تجمعی محل نمونه برداری اول



شکل ۴-۶- منحنی تجمعی محل نمونه برداری دوم

با مشخص شدن مقدار کشیدگی رسوبات نمونه برداری شده از دو محل متفاوت رسوبات آبرفتی، جهت بررسی اثر آن بر مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه رسوبات، آزمایش‌های زهکشی بر رسوبات با اندازه ذرات متفاوت با استفاده از دستگاه زهکشی با قطر چهار اینچ انجام شد. لازم به ذکر است از آنجا که حجم رسوبات برداشتی از محل اول عموماً دانه درشت بوده و حجم لازم جهت انجام آزمایش بر رسوبات دانه ریزتر مربوط به رده‌ی ماسه متوسط و ماسه ریز را در بر نداشته است، آزمایش‌های زهکشی بر رسوبات دانه درشت‌تر انجام شد. نتایج مقادیر آبدهی ویژه و تخلخل هر یک از آزمایش‌های انجام شده بر هر دو نوع رسوبات با کشیدگی متفاوت در جدول (۴-۵) مشاهده می‌گردد.

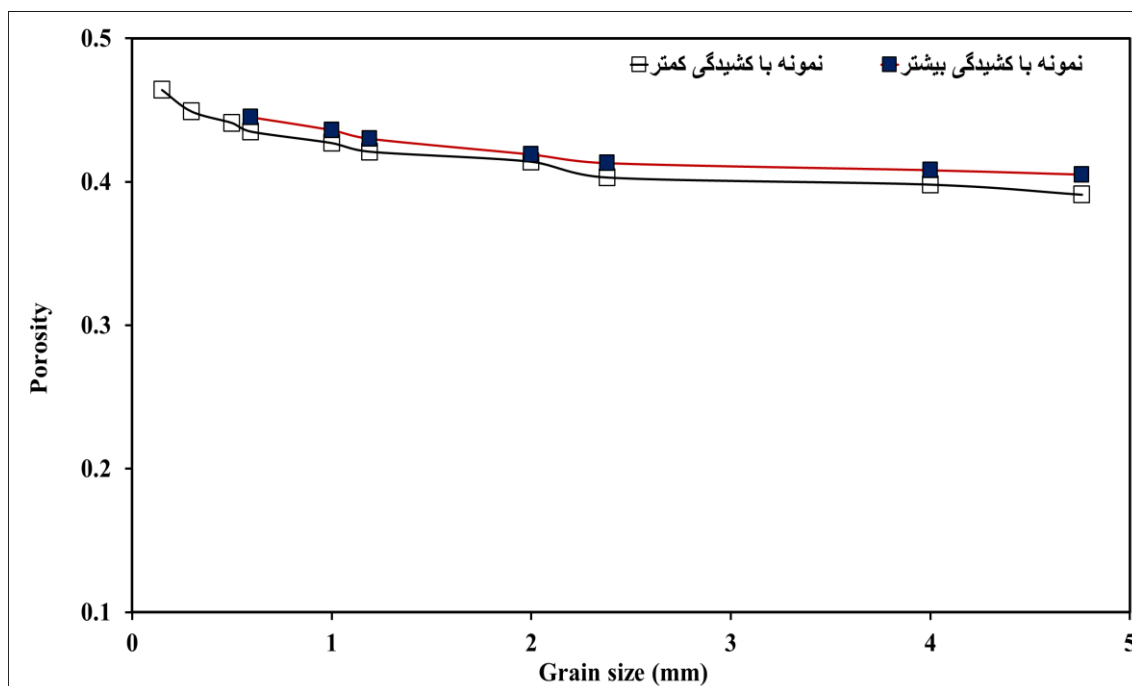
اختلاف مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده از زهکشی رسوبات با کشیدگی متفاوت در جدول (۴-۵) و همچنین روند تغییرات آن‌ها در شکل (۴-۷) و (۴-۸)، حاکی از اثر شکل رسوبات بر مقادیر پارامترهای مزبور می‌باشد. همان طور که ملاحظه می‌شود مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه رسوبات با کشیدگی بیشتر به دلیل زاویه‌دار بودن ذرات بیشتر برآورد شده است. در بررسی اثر رسوبات با گستره شکلی متفاوت بر مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه، این اختلاف می‌تواند قابل توجه‌تر باشد.

جدول ۴-۵- مقادیر تخلخل ( $\phi$ ) و آبدهی ویژه ( $S_y$ ) برآورد شده از رسوبات با کشیدگی متفاوت

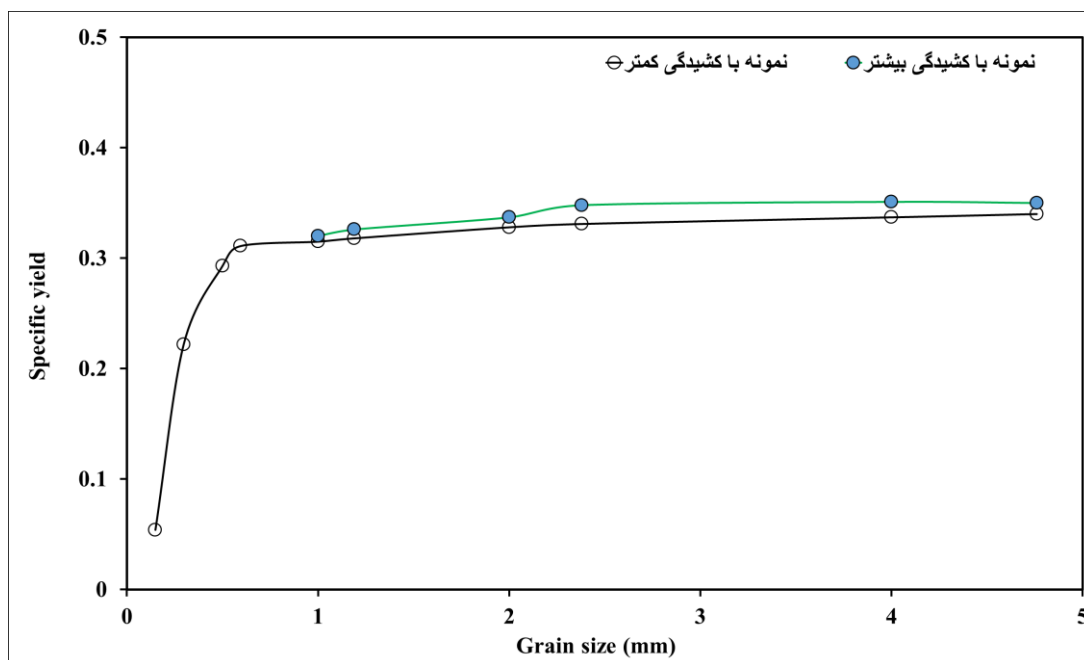
| رده رسوبی | شماره الک | پارامتر | کشیدگی بیشتر | کشیدگی کمتر |
|-----------|-----------|---------|--------------|-------------|
| شن        | ۴         | $S_y$   | ۰/۳۴۸        | ۰/۳۳۵       |
|           |           | $\phi$  | ۰/۴۰۵        | ۰/۳۸۵       |
|           | ۵         | $S_y$   | ۰/۳۴۶        | ۰/۳۳۰       |
|           |           | $\phi$  | ۰/۴۰۸        | ۰/۳۹۰       |

ادامه جدول ۴-۵- مقادیر تخلخل ( $\phi$ ) و آبدهی ویژه ( $S_y$ ) برآورد شده از رسوبات با کشیدگی متفاوت

| رده رسوبی      | شماره الک | پارامتر | کشیدگی بیشتر | کشیدگی کمتر |
|----------------|-----------|---------|--------------|-------------|
| شن             | ۸         | $S_y$   | ۰/۳۴۳        | ۰/۳۲۵       |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۱۳        | ۰/۳۹۵       |
|                | ۱۰        | $S_y$   | ۰/۳۳۹        | ۰/۳۲۰       |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۱۹        | ۰/۴۰۰       |
| ماسه خیلی درشت | ۱۶        | $S_y$   | ۰/۳۲۷        | ۰/۳۱۰       |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۳         | ۰/۴۱۰       |
|                | ۱۸        | $S_y$   | ۰/۳۲۲        | ۰/۳۰۱       |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۳۶        | ۰/۴۱۵       |
| ماسه درشت      | ۳۰        | $S_y$   | NR           | ۰/۲۹۱       |
|                |           | $\phi$  | NR           | ۰/۴۲۱       |
|                | ۳۵        | $S_y$   | NR           | ۰/۲۸۰       |
|                |           | $\phi$  | NR           | ۰/۴۳۱       |
| ماسه متوسط     | ۵۰        | $S_y$   | NR           | ۰/۲۱۰       |
|                |           | $\phi$  | NR           | ۰/۴۴۱       |
| ماسه ریز       | ۱۰۰       | $S_y$   | NR           | ۰/۰۷۱       |
|                |           | $\phi$  | NR           | ۰/۴۵۰       |



شکل ۴-۷- روند تغییرات تخلخل در رسوبات با کشیدگی متفاوت



شکل ۴-۸- روند تغییرات آبدهی ویژه در رسوبات با کشیدگی متفاوت



#### ۲-۴- مقادیر آبدهی ویژه و تخلخل در رده‌های مختلف رسوبات

به منظور برآورد تخلخل و آبدهی ویژه رسوبات، با در نظر گرفتن مدت زمان مورد نیاز جهت اشباع و زهکشی کامل با استفاده از دستگاه زهکشی با قطر چهار اینچ رسوبات مربوط به رده‌های مختلف رسوبی با اندازه ذرات متفاوت مورد آزمایش زهکشی قرار گرفتند. مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده حاصل از آزمایش‌های زهکشی انجام شده در جدول (۴-۶) ارائه شده است.

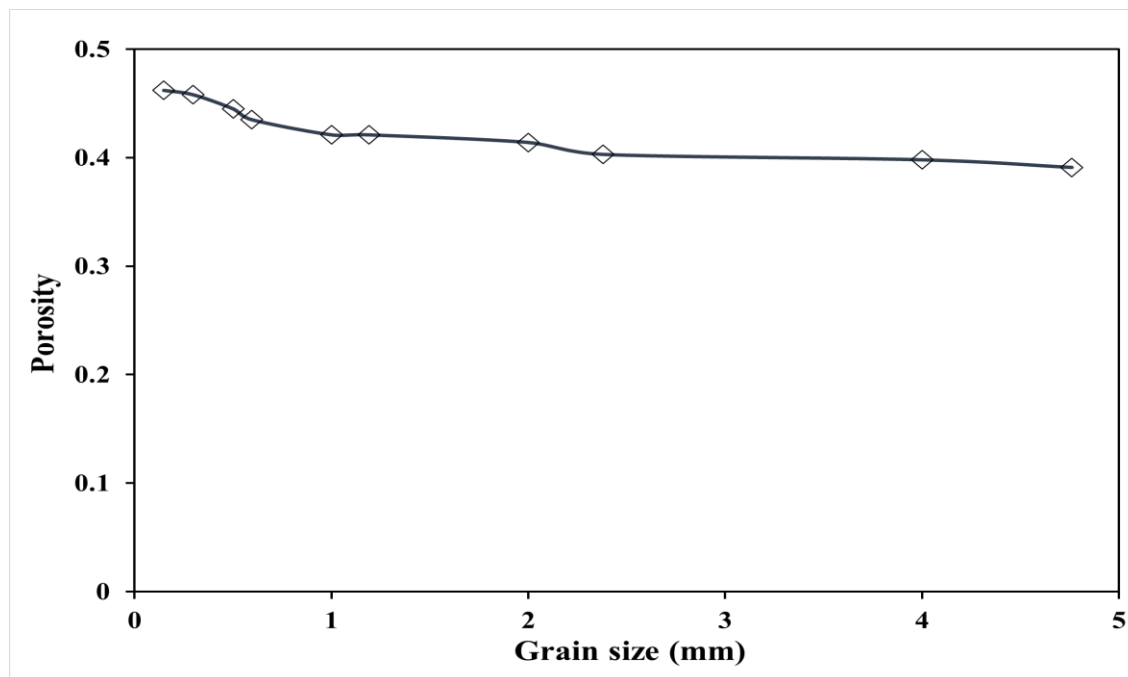
از مقایسه مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برآورد شده‌ی مربوط به هر یک از رسوبات با اندازه ذرات مختلف ارائه شده در جدول (۴-۶)، همان طور که ملاحظه می‌شود با کاهش اندازه ذرات رسوبی مقادیر تخلخل افزایش و آبدهی ویژه کاهش می‌یابد. به طوری که ماسه ریز بیشترین تخلخل با مقدار ۰/۴۵ و ریگ با مقدار ۰/۳۸۵ کمترین تخلخل را دارا می‌باشند. در رابطه با مقادیر آبدهی ویژه، بیشترین مقادیر آبدهی ویژه بر خلاف تصور عمومی و مورد انتظار که مربوط به ماسه خیلی درشت و درشت است، در رسوبات مربوط به محدوده گراول با مقدار ۰/۳۳۵ برآورد شده است که علت آن را می‌توان به جورشده‌گی بهتر رسوبات این محدوده نسبت به محدوده ماسه خیلی درشت و درشت نسبت داد. روند تغییرات مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه رسوبات با اندازه ذرات مختلف بررسی شده، جهت مقایسه و درک بهتر مطلب بیان شده‌ی فوق در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) ملاحظه می‌شود.

جدول ۶-۴- مقادیر تخلخل ( $\phi$ ) و آبدهی ویژه ( $S_y$ ) برآورد شده از رسوبات زهکشی شده

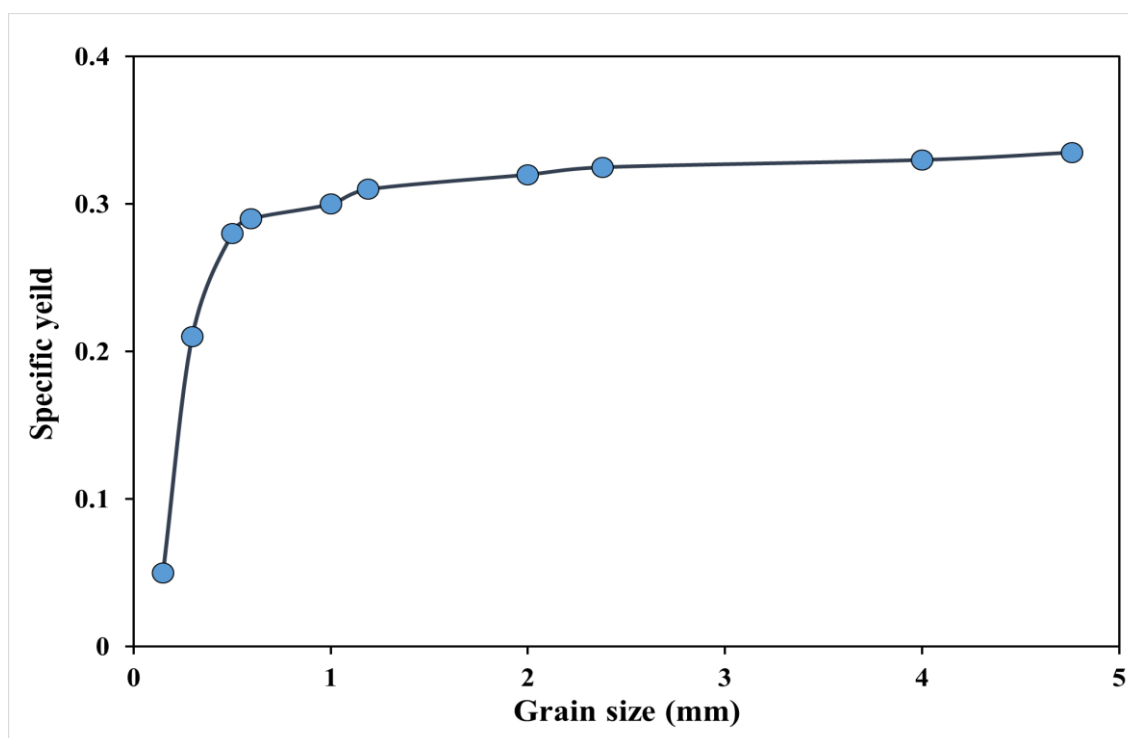
| رده رسوبی | شماره الک | پارامتر | مقادیر اندازه‌گیری شده |
|-----------|-----------|---------|------------------------|
| ریگ       | ۴         | $S_y$   | ۰/۳۳۵                  |
|           |           | $\phi$  | ۰/۳۸۵                  |
|           | ۵         | $S_y$   | ۰/۳۳                   |
|           |           | $\phi$  | ۰/۳۹                   |

ادامه جدول ۶-۴- مقادیر تخلخل ( $\phi$ ) و آبدهی ویژه ( $S_y$ ) برآورد شده از رسوبات زهکشی شده

| رده رسوبی      | شماره الک | پارامتر | مقادیر اندازه گیری شده |
|----------------|-----------|---------|------------------------|
| شن             | ۸         | $S_y$   | ۰/۳۲۵                  |
|                |           | $\phi$  | ۰/۳۹۵                  |
|                | ۱۰        | $S_y$   | ۰/۳۲                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۰                   |
| ماسه خیلی درشت | ۱۶        | $S_y$   | ۰/۳۱                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۱                   |
|                | ۱۸        | $S_y$   | ۰/۳۰                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۱۵                  |
| ماسه درشت      | ۳۰        | $S_y$   | ۰/۲۹                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۲                   |
|                | ۳۵        | $S_y$   | ۰/۲۸                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۳                   |
| ماسه متوسط     | ۵۰        | $S_y$   | ۰/۲۱                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۴                   |
| ماسه ریز       | ۱۰۰       | $S_y$   | ۰/۰۷                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۵                   |
| لوم            | —         | $S_y$   | ۰/۰۲                   |
|                |           | $\phi$  | ۰/۴۲                   |



شکل ۴-۹- روند تغییرات تخلخل در رسوبات زهکشی شده با اندازه ذرات متفاوت



شکل ۴-۱۰- روند تغییرات آبدهی ویژه در رسوبات زهکشی شده با اندازه ذرات متفاوت

#### ۴-۳- اندازه‌گیری مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های رسوبی مختلف

از آنجا که در طبیعت عموماً نهشته‌های رسوبی در لایه‌های یک آبخوان جورشدگی خیلی خوب و یکنواخت نداشته و به عبارتی رسوبات مربوط به هر رده رسوبی به تنهایی ته‌نشین نمی‌شوند، سعی شد اثر ترکیبی رسوبات رده‌های مختلف رسوبی با یکدیگر و با اندازه ذرات نزدیک به هم؛ از جمله مخلوط رسوبات رده‌های: ماسه خیلی درشت و درشت، ماسه خیلی درشت و متوسط، ماسه درشت و متوسط، ماسه درشت و ریز، و ماسه متوسط و ریزدانه در درصد‌های مختلف به منظور ایجاد جورشدگی متفاوت با یکدیگر ترکیب و مورد آزمایش زهکشی قرار گیرند و مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه این رسوبات با جورشدگی‌های متفاوت ایجاد شده، برآورد شود. لازم به ذکر است در آزمایش‌های ترکیبی انجام شده با توجه به اینکه هر رده رسوبی خود شامل چند الک می‌باشد، رسوبات مربوط به بزرگترین شماره الک از هر رده رسوبی جهت ترکیب رسوبات با یکدیگر انتخاب شد و مخلوط رسوبی تهیه شده از ترکیب رسوبات با اندازه ذرات مختلف در درصد‌های متفاوت با یکدیگر، مورد آزمایش زهکشی قرار گرفتند. مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه حاصل از آزمایش‌های زهکشی انجام شده بر رسوبات با اندازه ذرات مختلف در درصد‌های متفاوت با یکدیگر و همچنین درصد کاهشی پارامترهای مزبور که ناشی از اثر جورشدگی متفاوت ایجاد شده می‌باشد، اندازه‌گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

#### ۴-۳-۱- مخلوط ریگ و ماسه خیلی درشت

مخلوط ریگ (محتوی الک شماره ۴) و ماسه خیلی درشت (محتوی الک شماره ۱۶) در درصد‌های مختلف تهیه و مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه آن‌ها اندازه‌گیری شد. جدول (۴-۷) مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه مربوط به مخلوط‌های مختلف تهیه شده از رسوبات ذکر شده را نشان می‌دهد.

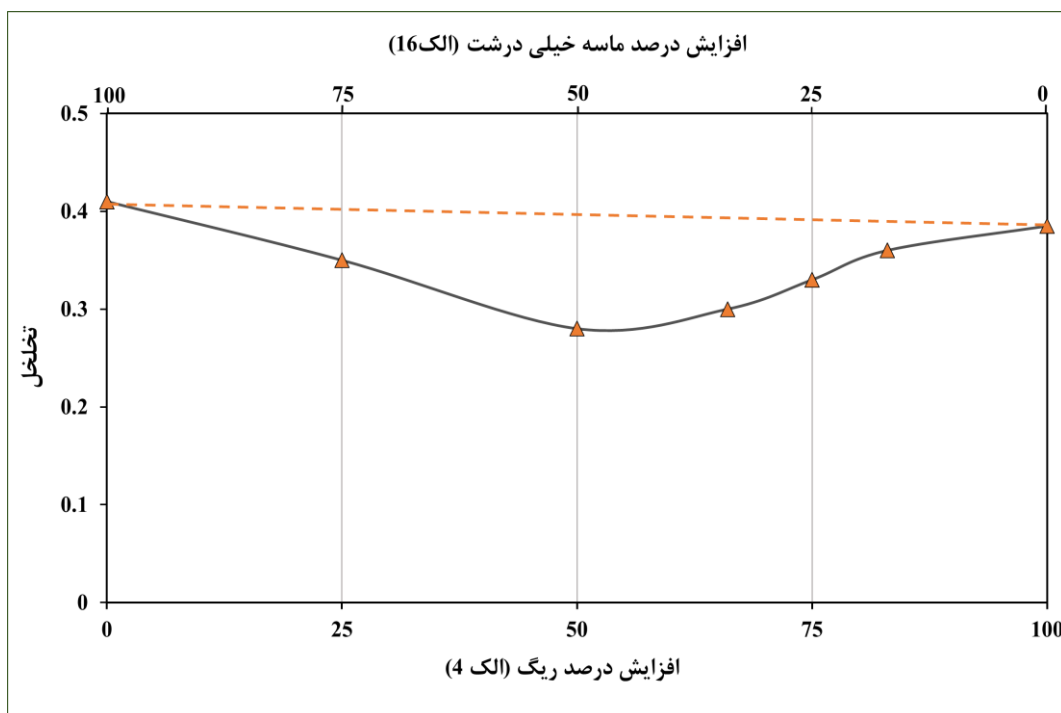
همان طور که اطلاعات مندرج در جدول (۴-۷) نشان می‌دهد بالاترین مقدار آبدهی ویژه مربوط به حالتی است که صد در صد رسوب مورد آزمایش از ریگ (محتوی الک ۴) انتخاب شده است که برابر با ۰/۳۳ می‌باشد. هم‌چنین بیشترین مقدار تخلخل از زهکشی ماسه خیلی درشت غیر ترکیبی برآورد

شده است که مقدار آن برابر با ۰/۴۱ می باشد. علاوه بر این با توجه به اندازه گیری های انجام شده در جدول فوق، ملاحظه می شود که در مخلوط های مختلف ریگ و ماسه خیلی درشت، مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه به طور قابل توجهی در مقایسه با مقادیر حاصل از زهکشی مجزای این رسوبات، کمتر برآورد شده است. کاهش مقادیر پارامترهای مزبور به دلیل اشغال تخلخل ریگ توسط ماسه خیلی درشت می باشد.

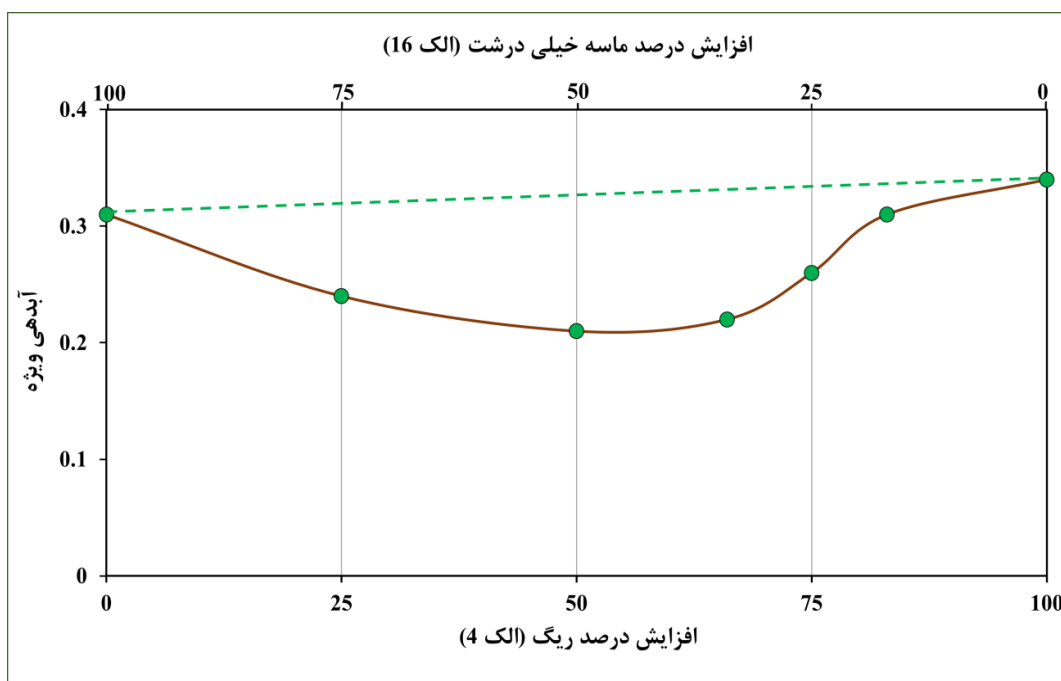
جدول ۴-۷- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه گیری شده در مخلوط های ریگ و ماسه خیلی درشت

| درصد ریگ | درصد ماسه<br>خیلی درشت | تخلخل | آبدهی ویژه |
|----------|------------------------|-------|------------|
| ۱۰۰      | ۰                      | ۰/۳۸  | ۰/۳۳       |
| ۸۳       | ۱۷                     | ۰/۳۶  | ۰/۲۹       |
| ۷۵       | ۲۵                     | ۰/۳۳  | ۰/۲۶       |
| ۶۶       | ۳۴                     | ۰/۳۰  | ۰/۲۲       |
| ۵۰       | ۵۰                     | ۰/۲۸  | ۰/۲۱       |
| ۲۵       | ۷۵                     | ۰/۳۵  | ۰/۲۴       |
| ۰        | ۱۰۰                    | ۰/۴۱  | ۰/۳۱       |

به منظور مقایسه ی مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای مخلوط های مختلف تهیه شده از رسوبات ریگ و ماسه خیلی درشت؛ مقادیر این دو پارامتر در برابر درصد های مختلف ترکیب مورد استفاده ترسیم شده است (شکل های ۴-۱۱ و ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۱- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف ریگ و ماسه خیلی درشت



شکل ۴-۱۲- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ریگ و ماسه خیلی درشت

با توجه به شکل‌های (۱۱-۴) و (۱۲-۴) ملاحظه می‌شود که مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای درصد‌های مختلف مخلوط ریگ و ماسه خیلی درشت در مقایسه با درون‌یابی (میانگین وزنی) بین این دو رده رسوبی به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌اند. علت کاهش این دو پارامتر در مقایسه با خط درون‌یابی، همان طور که بیان شد اشغال شدن فضای بین ذرات بزرگ‌تر (ریگ) با ذرات ریزتر (ماسه خیلی درشت) می‌باشد.

درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف ریگ و ماسه خیلی درشت محاسبه شده و در جدول (۸-۴) ارائه شده است.

جدول ۸-۴- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ریگ و ماسه خیلی درشت نسبت به خط درون‌یابی

| درصد کاهش<br>آبدهی ویژه | درصد کاهش<br>تخلخل | درصد ماسه<br>خیلی درشت | درصد ریگ |
|-------------------------|--------------------|------------------------|----------|
| ۱۲/۵                    | ۱۲/۵               | ۱۷                     | ۸۳       |
| ۱۹/۰                    | ۱۵/۵               | ۲۵                     | ۷۵       |
| ۳۲/۵                    | ۲۴                 | ۳۴                     | ۶۶       |
| ۳۵/۰                    | ۲۹/۵               | ۵۰                     | ۵۰       |
| ۲۴/۰                    | ۱۳/۵               | ۷۵                     | ۲۵       |

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۸-۴) ملاحظه می‌شود که بالاترین درصد کاهش تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط تهیه شده از ۵۰٪ ریگ با ۵۰٪ ماسه خیلی درشت می‌باشد.

#### ۴-۳-۲- مخلوط ماسه خیلی درشت و ماسه درشت

مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه حاصل از زهکشی مخلوط‌های تهیه شده از ماسه خیلی درشت (محتوی الک ۱۶) و ماسه درشت (محتوی الک ۳۰) در درصد‌های مختلف در جدول (۹-۴) ملاحظه می‌شود.

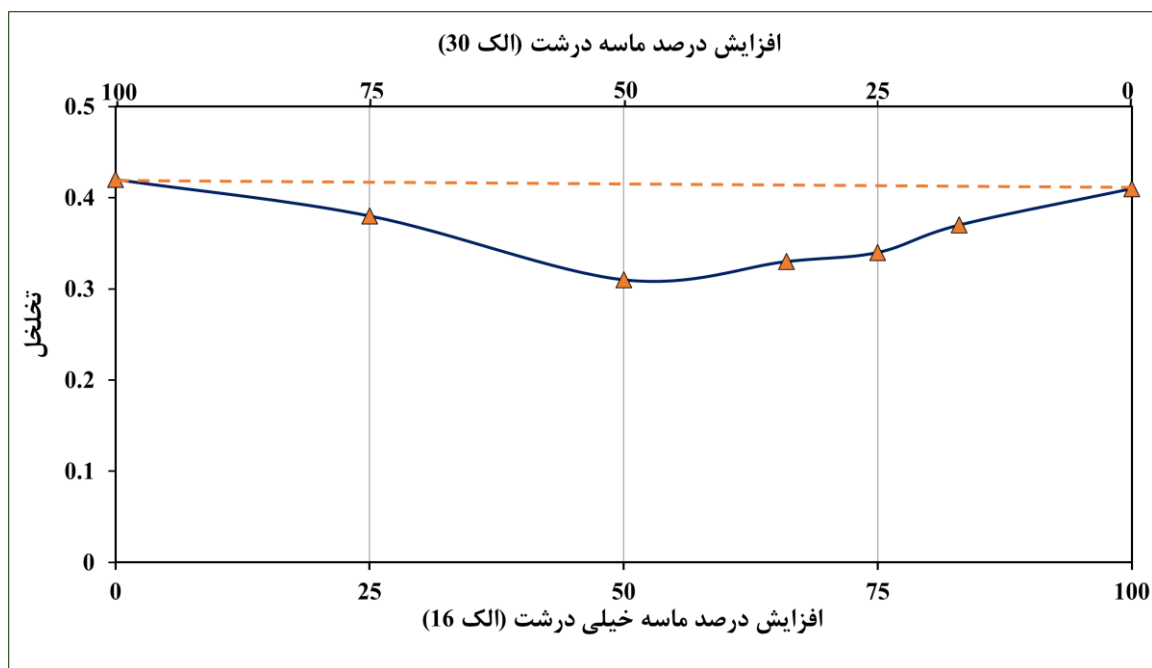
جدول ۹-۴- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و ماسه درشت

| درصد ماسه خیلی درشت | درصد ماسه درشت | تخلخل | آبدهی ویژه |
|---------------------|----------------|-------|------------|
| ۱۰۰                 | ۰              | ۰/۴۱  | ۰/۳۱       |
| ۸۳                  | ۱۷             | ۰/۳۷  | ۰/۲۶       |
| ۷۵                  | ۲۵             | ۰/۳۲  | ۰/۲۵       |
| ۶۶                  | ۳۴             | ۰/۳۳  | ۰/۲۲       |
| ۵۰                  | ۵۰             | ۰/۳۱  | ۰/۲۳       |
| ۲۵                  | ۷۵             | ۰/۳۸  | ۰/۲۷       |
| ۰                   | ۱۰۰            | ۰/۴۲  | ۰/۳۰       |

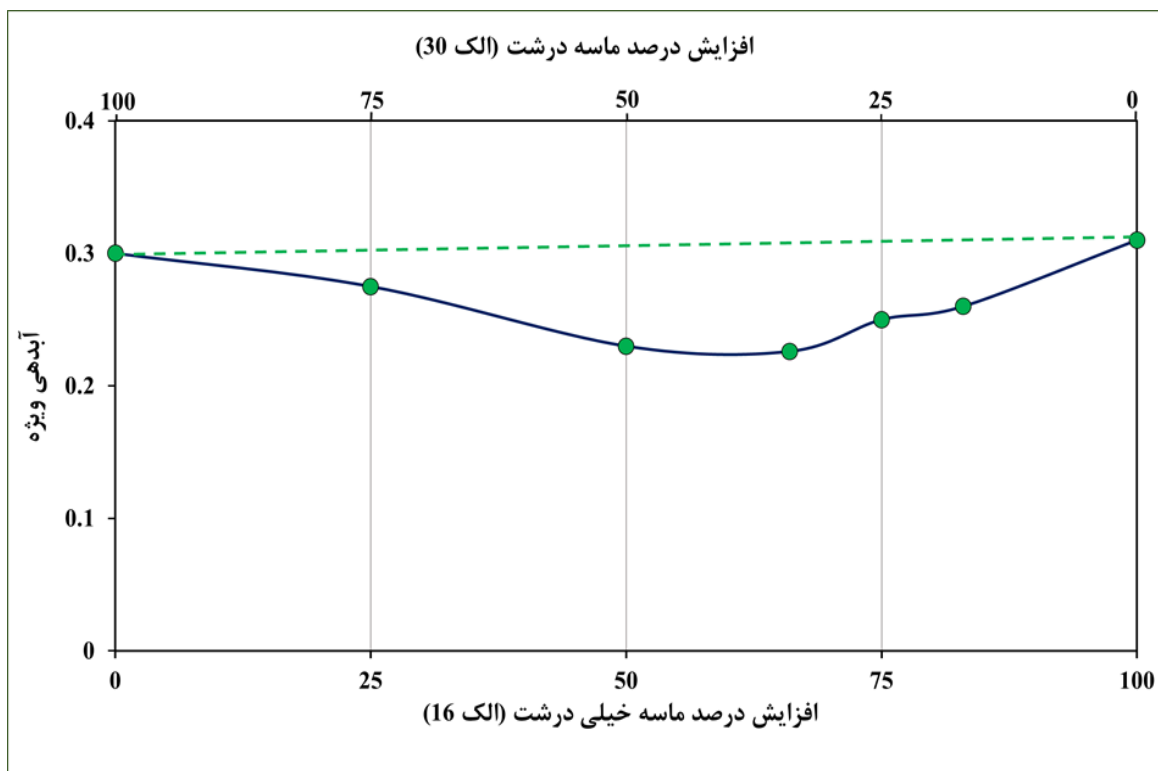
با توجه به مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول فوق، از آزمایش زهکشی بر ماسه خیلی درشت غیرترکیبی بیشترین مقدار آبدهی ویژه برآورد شده است که مقدار آن برابر با ۰/۳۱ می‌باشد. بیشترین مقدار تخلخل نیز با انجام آزمایش بر ماسه درشت غیرترکیبی برآورد شده است که مقدار آن برابر با ۰/۴۲ می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه‌ی برآوردی در آزمایش‌های ترکیبی فوق در مقایسه با مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه‌ی برآورد شده از زهکشی رسوبات مجزای ماسه خیلی درشت و ماسه درشت، کمتر برآورد شده است. علت کاهش مشاهده شده در مقادیر پارامترهای ذکر شده کاهش فضای خالی رسوبات ماسه خیلی درشت توسط رسوبات به نسبت ریزتر ماسه درشت می‌باشد.

روند تغییرات مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده حاصل از زهکشی مخلوط‌های مختلف تهیه شده از رسوبات ماسه خیلی درشت و ماسه درشت، در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) مشاهده می‌شود.





شکل ۴-۱۳- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه درشت



شکل ۴-۱۴- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و درشت

با توجه به روند تغییرات مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در درصدهای مختلف مخلوط تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه درشت مشاهده شده در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) در مقایسه با مقادیر آن‌ها در درون‌یابی بین این دو رده رسوبی، همان طور که مشاهده می‌شود پارامترهای مزبور به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌اند. علت کاهش این دو پارامتر در مقایسه با خط درون‌یابی، همان طور که بیان شد، اشغال شدن فضای بین ذرات بزرگ‌تر ماسه خیلی درشت توسط ذرات ریزتر ماسه درشت می‌باشد.

درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه درشت محاسبه و در جدول (۴-۱۰) ارائه شده است.

جدول ۴-۱۰- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و درشت نسبت به خط درون‌یابی

| درصد ماسه<br>خیلی درشت | درصد ماسه<br>درشت | درصد کاهش<br>تخلخل | درصد کاهش<br>آبدهی ویژه |
|------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| ۸۳                     | ۱۷                | ۱۰                 | ۱۵/۵                    |
| ۷۵                     | ۲۵                | ۹                  | ۱۹                      |
| ۶۶                     | ۳۴                | ۲۰                 | ۲۶/۵                    |
| ۵۰                     | ۵۰                | ۲۵                 | ۲۴/۵                    |
| ۲۵                     | ۷۵                | ۹/۵                | ۹                       |

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۴-۱۰) ملاحظه می‌شود که بالاترین درصد کاهش تخلخل محاسبه شده مربوط به ترکیب ۵۰٪ رسوب ماسه خیلی درشت با ۵۰٪ رسوب ماسه درشت می‌باشد. بیشترین درصد کاهش آبدهی ویژه نیز در ترکیب تهیه شده از ۶۶٪ رسوب ماسه خیلی درشت با ۳۴٪ رسوب ماسه درشت برآورد شده است.

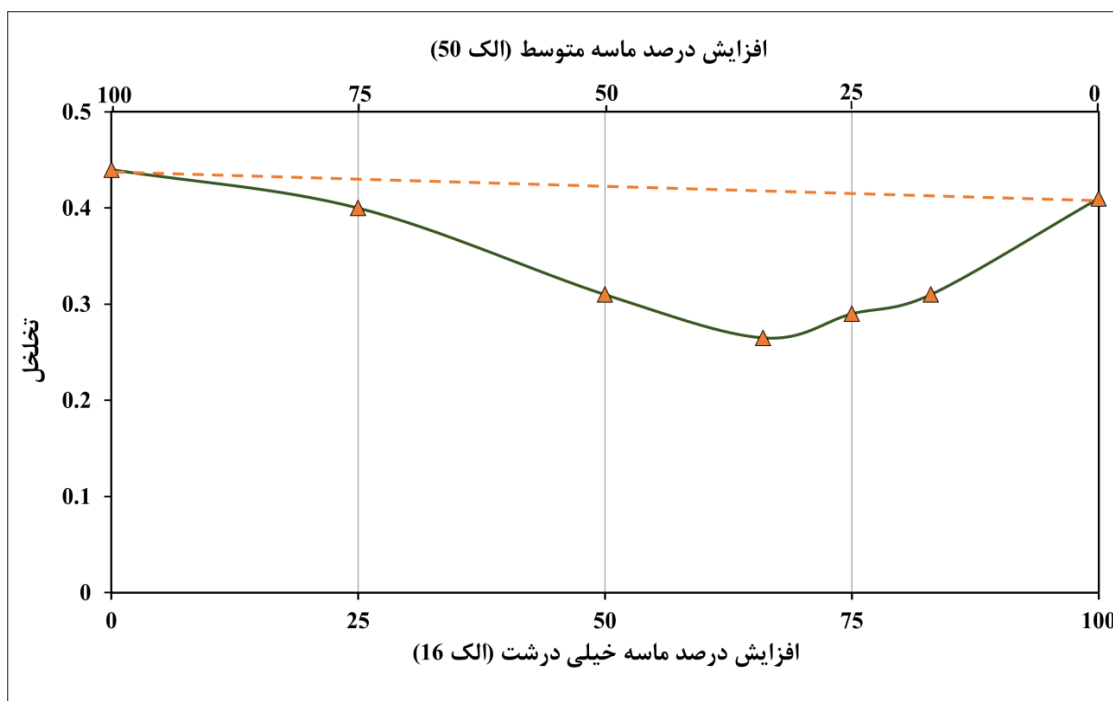
#### ۴-۳-۳- مخلوط ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط

مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه از زهکشی مخلوط‌های تهیه شده از ترکیب ماسه خیلی درشت (محتوی الک ۱۶) با ماسه متوسط (محتوی الک ۵۰) در درصدهای مختلف، برآورد و در جدول (۴-۱۱) نشان داده شده است.

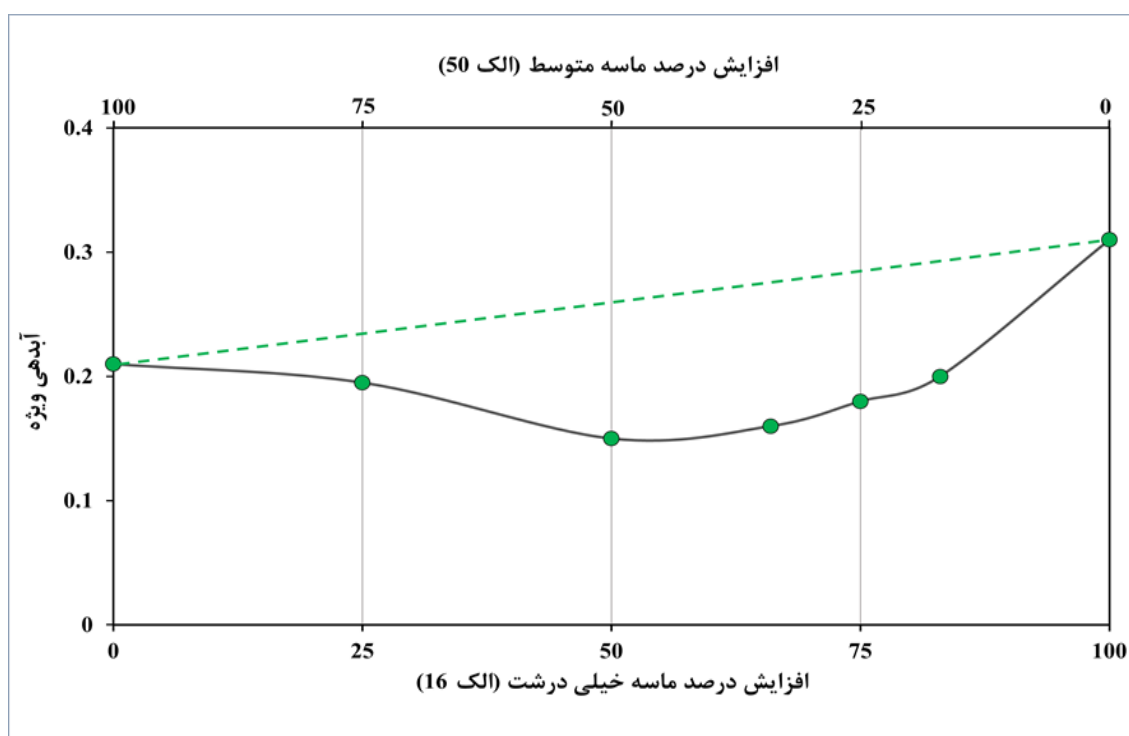
جدول ۴-۱۱- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط

| درصد ماسه خیلی درشت | درصد ماسه متوسط | تخلخل | آبدهی ویژه |
|---------------------|-----------------|-------|------------|
| ۱۰۰                 | ۰               | ۰/۴۴  | ۰/۳۱       |
| ۸۳                  | ۱۷              | ۰/۴   | ۰/۲        |
| ۷۵                  | ۲۵              | ۰/۳۱  | ۰/۱۸       |
| ۶۶                  | ۳۴              | ۰/۲۶۵ | ۰/۱۶       |
| ۵۰                  | ۵۰              | ۰/۲۹  | ۰/۱۵       |
| ۲۵                  | ۷۵              | ۰/۳۱  | ۰/۱۹۵      |
| ۰                   | ۱۰۰             | ۰/۴۱  | ۰/۲۱       |

از مقایسه‌ی مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه هر یک از مخلوط‌های تهیه شده در جدول (۴-۱۱) با مقادیر برآورد شده از زهکشی بر ماسه خیلی درشت و ماسه درشت غیر ترکیبی، کاهش مقادیر پارامترهای مزبور در رسوبات مخلوط شده به نسبت مقادیر تعیین شده در رسوبات غیر ترکیبی ذکر شده، ملاحظه می‌شود. به طوری که با توجه به مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول فوق، ماسه خیلی درشت غیر ترکیبی (حالت صد در صد ماسه خیلی درشت) از بیشترین مقدار تخلخل و آبدهی ویژه برخوردار می‌باشد که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۳۱ می‌باشد. روند تغییرات مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از رسوبات ماسه خیلی درشت و ماسه درشت در شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۵- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط



شکل ۴-۱۶- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط

با توجه به شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶)، از مقایسه مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های تهیه شده در درصدهای متفاوت از ماسه خیلی درشت و ماسه متوسط در مقایسه با مقادیر درون‌یابی شده بین این دو رده رسوبی، کاهش مقادیر اندازه‌گیری شده ملاحظه می‌شود. علت کاهش این دو پارامتر در مقایسه با خط درون‌یابی، اشغال شدن فضای بین ذرات بزرگ‌تر ماسه خیلی درشت با ذرات ریزتر ماسه متوسط می‌باشد.

درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف ماسه خیلی درشت و ماسه درشت محاسبه شده و در جدول (۴-۱۲) مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۱۲- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه خیلی درشت و متوسط نسبت به خط درون‌یابی

| درصد ماسه خیلی درشت | درصد ماسه متوسط | درصد کاهش تخلخل | درصد کاهش آبدهی ویژه |
|---------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| ۸۳                  | ۱۷              | ۸               | ۳۲                   |
| ۷۵                  | ۲۵              | ۲۸              | ۳۷                   |
| ۶۶                  | ۳۴              | ۳۸/۵            | ۴۲                   |
| ۵۰                  | ۵۰              | ۳۲              | ۴۳/۵                 |
| ۲۵                  | ۷۵              | ۲۶              | ۱۷                   |

با توجه به کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه‌ی ارائه شده در جدول (۴-۱۲) ملاحظه می‌شود که بالاترین درصد کاهش تخلخل در مخلوط تهیه شده از ۶۶٪ رسوب ماسه خیلی درشت با ۳۴٪ رسوب ماسه درشت برآورد شده است. بیشترین درصد کاهش آبدهی ویژه نیز حاصل ترکیب تهیه شده از ۵۰٪ رسوب ماسه خیلی درشت با ۵۰٪ رسوب ماسه درشت می‌باشد.

#### ۴-۳-۴- مخلوط ماسه درشت و ماسه متوسط

مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه حاصل از زهکشی مخلوط‌های تهیه شده از رسوب ماسه درشت (محتوی الک شماره ۳۰) با رسوب ماسه متوسط (محتوی الک شماره ۵۰) در جدول (۴-۱۳) ملاحظه می‌شود.

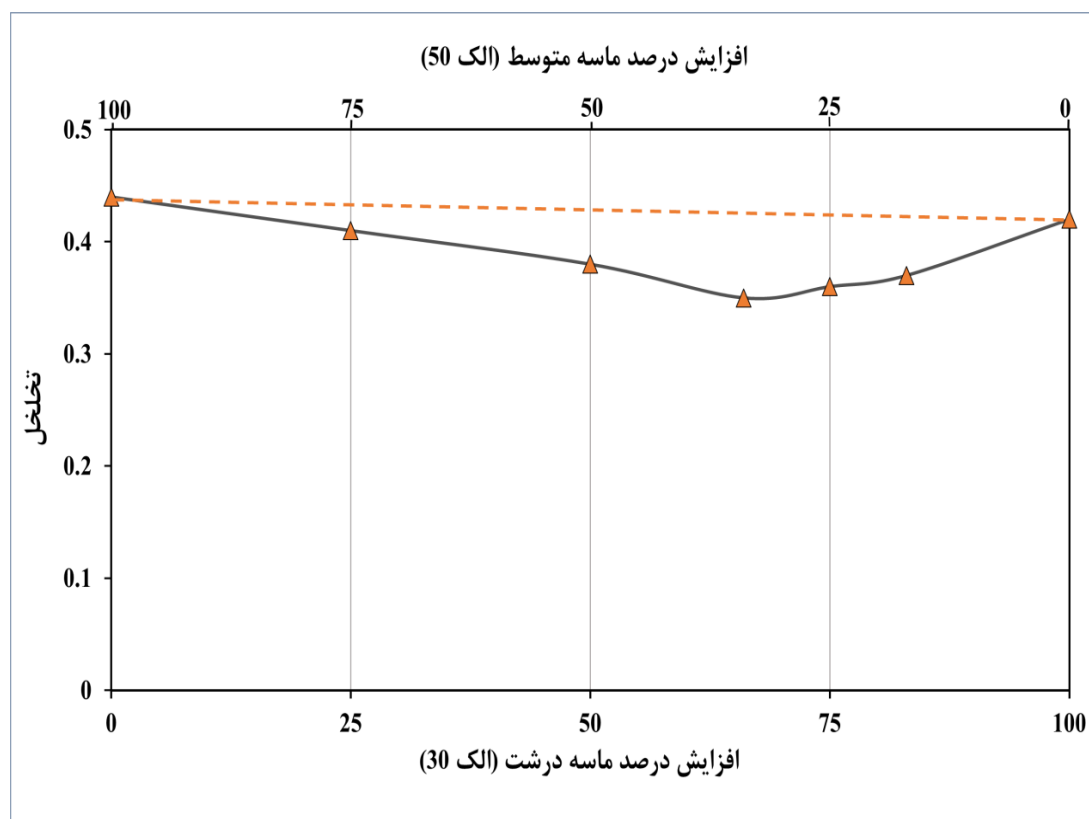
جدول ۴-۱۳- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه متوسط

| درصد ماسه درشت | درصد ماسه متوسط | تخلخل | آبدهی ویژه |
|----------------|-----------------|-------|------------|
| ۱۰۰            | ۰               | ۰/۴۲  | ۰/۳        |
| ۸۳             | ۱۷              | ۰/۳۷  | ۰/۲۶       |
| ۷۵             | ۲۵              | ۰/۳۶  | ۰/۲۴       |
| ۶۶             | ۳۴              | ۰/۳۵  | ۰/۲۲       |
| ۵۰             | ۵۰              | ۰/۳۸  | ۰/۲۳       |
| ۲۵             | ۷۵              | ۰/۴۱  | ۰/۲۲       |
| ۰              | ۱۰۰             | ۰/۴۴  | ۰/۲۱       |

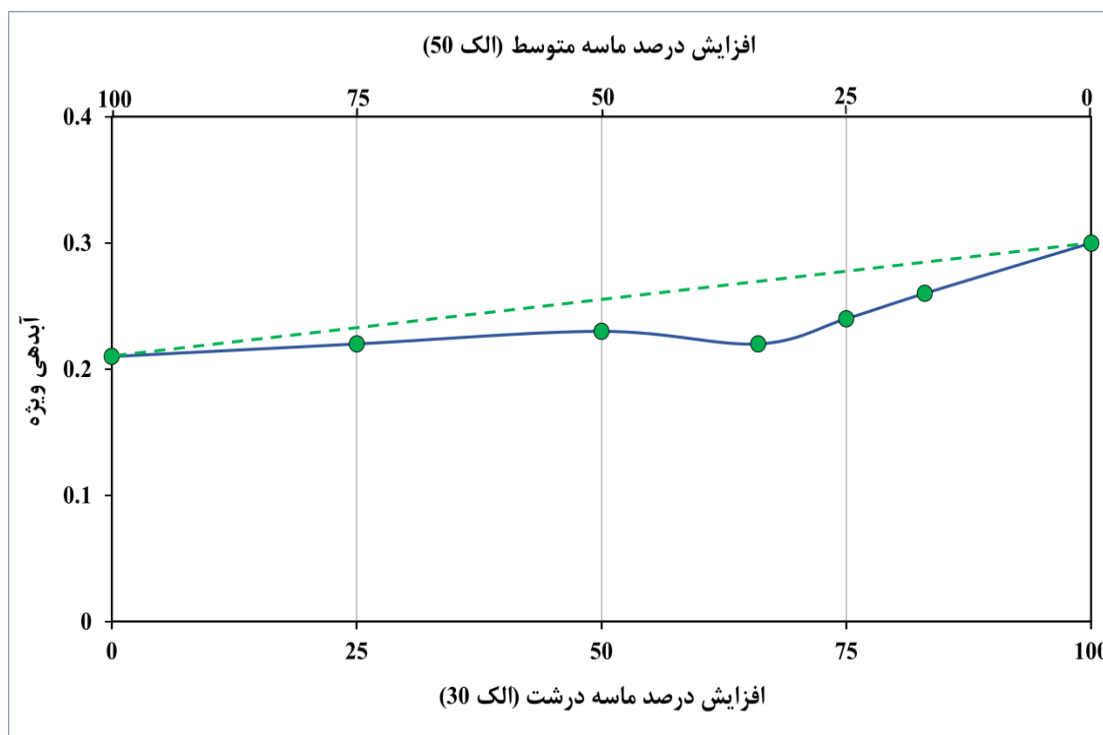
همان طور که از مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه حاصل از زهکشی مخلوط‌های رسوبی مختلف در جدول فوق ملاحظه می‌شود، بالاترین مقدار تخلخل تعیین شده برابر ۰/۴۴ می‌باشد که از انجام زهکشی بر ماسه متوسط غیرترکیبی (ترکیب نشده با ماسه درشت) برآورد شده است. همچنین بیشترین مقدار آبدهی ویژه مربوط به حالتی است که صد در صد رسوب مورد آزمایش از ماسه درشت (محتوی الک ۳۰) انتخاب شده است که برابر با ۰/۳ می‌باشد.

به منظور مقایسه‌ی مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای مخلوط‌های مختلف تهیه شده از رسوبات ماسه

درشت و ماسه متوسط، مقادیر این دو پارامتر در برابر درصدهای مختلف مخلوط مورد استفاده، ترسیم شده است. (شکل ۴-۱۷ و ۴-۱۸). با توجه به روند تغییرات تخلخل و آبدهی ویژه در شکل‌های بیان شده، ملاحظه می‌شود که مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای مخلوط‌های تهیه شده در درصدهای متفاوت از ماسه درشت و ماسه متوسط در مقایسه با درون‌یابی انجام شده در بین این دو رده رسوبی، به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌اند. کاهش این دو پارامتر در مقایسه با خط درون‌یابی (میانگین وزنی مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه)، همان طور که در خصوص دیگر مخلوط‌ها اشاره شده است به دلیل اشغال شدن فضای بین ذرات بزرگ‌تر ماسه درشت توسط ذرات به نسبت ریزتر ماسه متوسط می‌باشد.



شکل ۴-۱۷- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه متوسط



شکل ۴-۱۸- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه متوسط

درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در هر یک از مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ترکیب ماسه درشت و ماسه متوسط برآورد و در جدول (۴-۱۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۱۴- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه متوسط نسبت به خط درون‌یابی

| درصد ماسه درشت | درصد ماسه متوسط | درصد کاهش تخلخل | درصد کاهش آبدهی ویژه |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| ۸۳             | ۱۷              | ۱۲/۵            | ۹                    |
| ۷۵             | ۲۵              | ۱۵/۵            | ۱۳/۵                 |
| ۶۶             | ۳۴              | ۱۸              | ۱۸/۵                 |
| ۵۰             | ۵۰              | ۱۱/۵            | ۱۰                   |
| ۲۵             | ۷۵              | ۶               | ۵/۵                  |



با توجه به درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های مختلف تهیه شده نسبت به مقادیر درون‌یابی در جدول فوق، ملاحظه می‌شود که بالاترین درصد کاهش تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط تهیه شده از ترکیب ۶۶٪ رسوب ماسه درشت با ۳۴٪ رسوب ماسه متوسط برآورد شده است.

#### ۴-۳-۵- مخلوط ماسه درشت و ریز

با انجام زهکشی بر مخلوط‌های تهیه شده از ترکیب ماسه درشت (محتوی الک شماره ۳۰) و ماسه ریز (محتوی الک شماره ۱۰۰) در درصد‌های مختلف با یکدیگر، مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه هر یک اندازه‌گیری شد. مقادیر پارامترهای مذکور اندازه‌گیری شده در جدول (۴-۱۵) مشاهده می‌گردد.

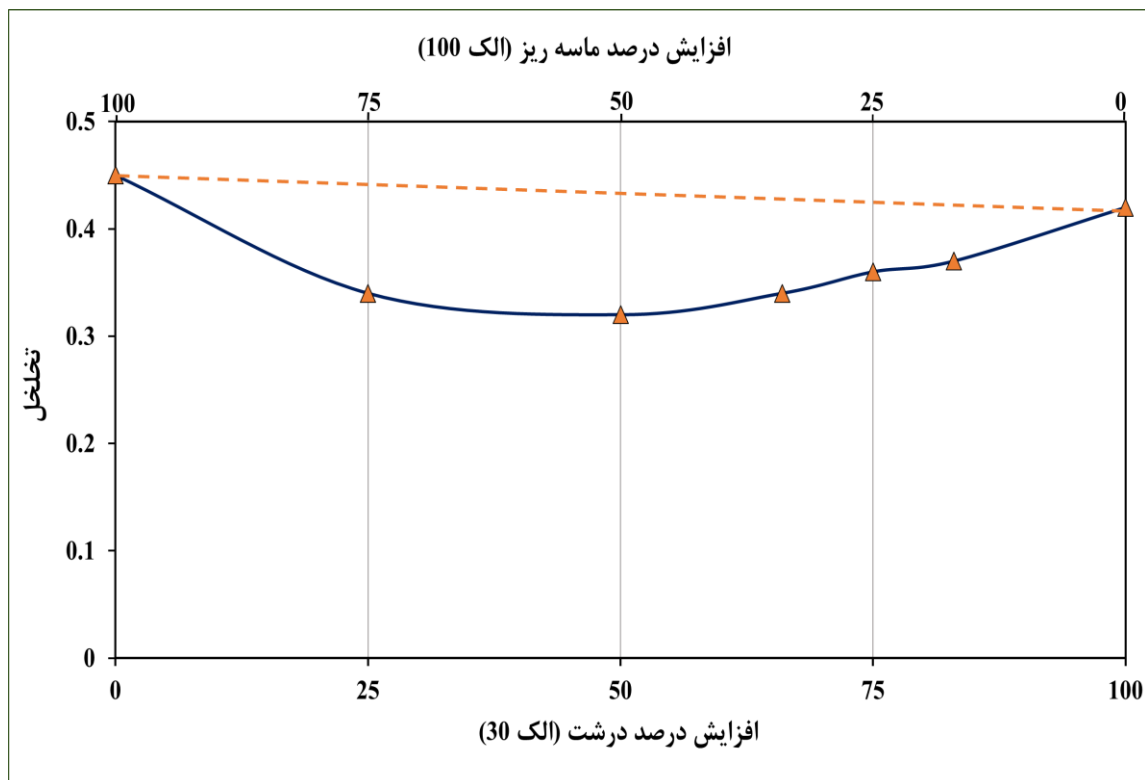
جدول ۴-۱۵- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه ریز

| درصد ماسه درشت | درصد ماسه ریز | تخلخل | آبدهی ویژه |
|----------------|---------------|-------|------------|
| ۱۰۰            | ۰             | ۰/۴۲  | ۰/۳        |
| ۸۳             | ۱۷            | ۰/۳۲  | ۰/۱۷       |
| ۷۵             | ۲۵            | ۰/۳۳  | ۰/۱۵       |
| ۶۶             | ۳۴            | ۰/۳۴  | ۰/۱۲       |
| ۵۰             | ۵۰            | ۰/۳۲  | ۰/۰۹       |
| ۲۵             | ۷۵            | ۰/۳۴  | ۰/۰۸       |
| ۰              | ۱۰۰           | ۰/۴۵  | ۰/۰۷       |

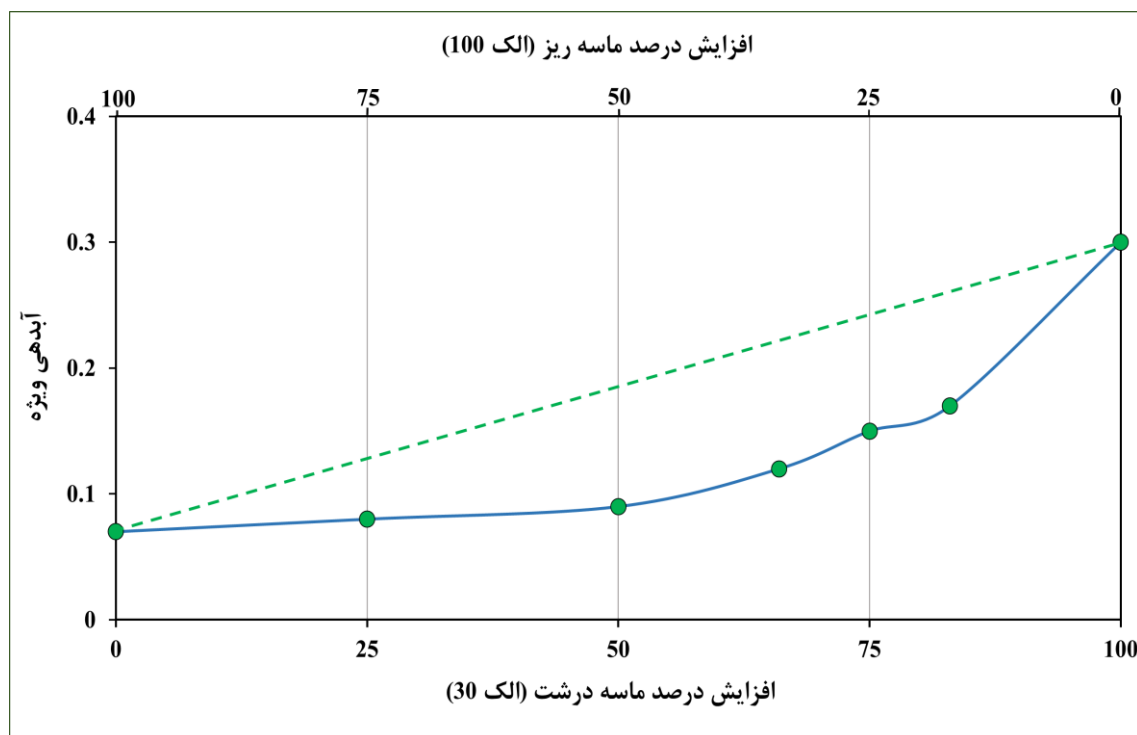
طبق اندازه‌گیری‌های بیان شده در جدول فوق بالاترین مقدار تخلخل برآورد شده مربوط به ماسه ریز و برابر با ۰/۴۵ می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار آبدهی ویژه حاصل از زهکشی انجام شده بر رسوب

ماسه درشت غیر ترکیبی (ترکیب نشده با ماسه ریز) است که برابر با ۰/۳ برآورد شده است. علاوه بر این با توجه به اندازه گیری های انجام شده در جدول فوق، ملاحظه می شود که در مخلوط های مختلف ماسه درشت و ماسه ریز، مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه به طور قابل توجهی در مقایسه با مقادیر حاصل از زهکشی رسوبات غیر ترکیبی، کمتر برآورد شده است. کاهش مقادیر پارامترهای مزبور به دلیل کاهش تخلخل ماسه درشت توسط ماسه ریز در مخلوط های تهیه شده بیان می شود.

روند تغییرات مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای مخلوط های مختلف تهیه شده از رسوبات ماسه درشت و ماسه ریز در برابر درصد های مختلف رسوبات استفاده شده جهت مقایسه در شکل های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۹- روند تغییرات تخلخل در مخلوط های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه ریز



شکل ۴-۲۰- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه درشت و ماسه ریز

با توجه به شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای درصد‌های مختلف مخلوط‌های تهیه شده از ماسه درشت و ماسه ریز در مقایسه با درونیابی انجام شده بین این دو رده رسوبی، به طور قابل توجهی کاهش یافته است. علت کاهش این دو پارامتر در مقایسه با خط درونیابی، همان طور که بیان شد اشغال شدن تخلخل ماسه درشت توسط ماسه ریز می‌باشد.

درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف ماسه درشت و ماسه ریز محاسبه شده و در جدول (۴-۱۶) مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۴-۱۶) ملاحظه می‌شود که بالاترین درصد کاهش تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط تهیه شده از ۵۰٪ ماسه درشت با ۵۰٪ ماسه ریز، و مخلوط تهیه شده از ۷۵٪ ماسه درشت با ۲۵٪ ماسه ریز بیشترین درصد کاهش را دارا می‌باشد.

جدول ۴-۱۶- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه درشت و ماسه ریز نسبت به خط درونیابی

| درصد ماسه درشت | درصد ماسه ریز | درصد کاهش تخلخل | درصد کاهش آبدهی ویژه |
|----------------|---------------|-----------------|----------------------|
| ۸۳             | ۱۷            | ۲۴/۵            | ۳۷                   |
| ۷۵             | ۲۵            | ۲۲/۷۵           | ۵۱/۵                 |
| ۶۶             | ۳۴            | ۲۱              | ۴۶                   |
| ۵۰             | ۵۰            | ۲۶/۵            | ۳۸                   |
| ۲۵             | ۷۵            | ۲۳              | ۳۵                   |

#### ۴-۳-۶- مخلوط ماسه متوسط و ماسه ریز

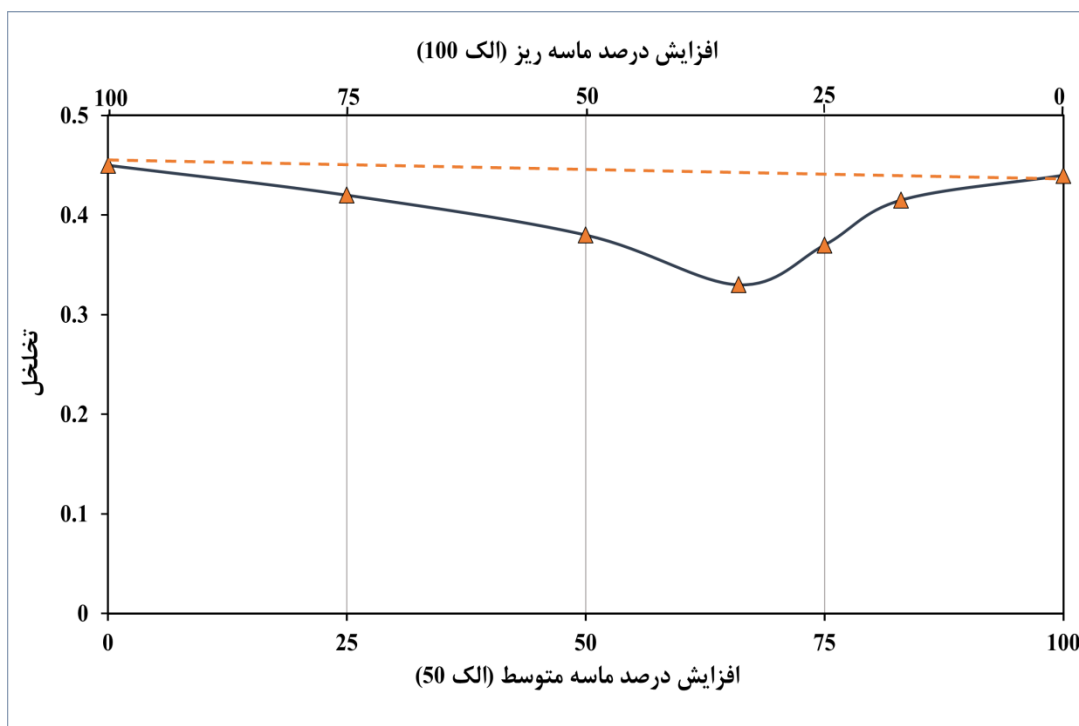
مخلوط ماسه متوسط (محتوی الک شماره ۵۰) و ماسه ریز (محتوی الک شماره ۱۰۰) در درصد‌های مختلف تهیه و مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه آن‌ها اندازه‌گیری شد. جدول (۴-۱۷) مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه مربوط به مخلوط‌های مختلف تهیه شده از رسوبات ذکر شده در فوق را نشان می‌دهد. همان‌طور که از اطلاعات مندرج در جدول (۴-۱۷) ملاحظه می‌شود، بالاترین مقدار آبدهی ویژه مربوط به حالتی است که صد در صد رسوب زهکشی شده از ماسه متوسط (محتوی الک ۵۰) انجام شده است که مقدار آن برابر با ۰/۲۱ می‌باشد. هم‌چنین بیشترین تخلخل از زهکشی انجام شده بر ماسه ریز غیرترکیبی (ترکیب با ماسه ریز) برابر با ۰/۴۵ برآورد شده است. علاوه بر این با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در جدول زیر، ملاحظه می‌شود که در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مقایسه با مقادیر حاصل از زهکشی رسوبات غیرترکیبی، کمتر برآورد شده است. کاهش مقادیر پارامترهای مزبور به دلیل اشغال تخلخل ماسه متوسط توسط ماسه ریز که به نسبت دانه ریزتر است، بیان می‌شود.

جدول ۴-۱۷- مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های ماسه متوسط و ماسه ریز

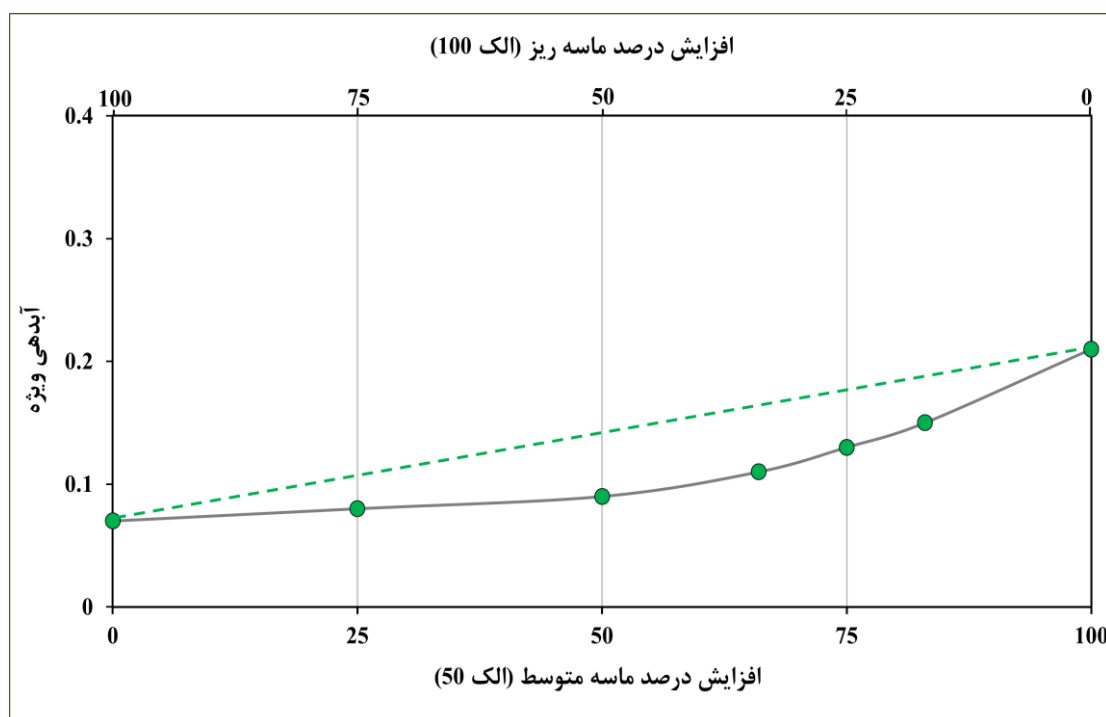
| درصد ماسه متوسط | درصد ماسه ریز | تخلخل | آبدهی ویژه |
|-----------------|---------------|-------|------------|
| ۱۰۰             | ۰             | ۰/۴۴  | ۰/۲۱       |
| ۸۳              | ۱۷            | ۰/۴۱۵ | ۰/۱۵       |
| ۷۵              | ۲۵            | ۰/۳۷  | ۰/۱۳       |
| ۶۶              | ۳۴            | ۰/۳۳  | ۰/۱۱       |
| ۵۰              | ۵۰            | ۰/۳۸  | ۰/۰۹       |
| ۲۵              | ۷۵            | ۰/۴۲  | ۰/۰۸       |
| ۰               | ۱۰۰           | ۰/۴۵  | ۰/۰۷       |

مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه برای مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز در برابر درصد‌های مختلف مخلوط مورد استفاده، جهت مقایسه در شکل‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز در مقایسه با درون‌یابی بین این دو رده رسوبی، کمتر برآورد شده است. علت کاهش پارامترهای مزبور در مقایسه با خط درون‌یابی، مانند دیگر مخلوط اشغال شدن تخلخل رسوبات دانه درشت‌تر (ماسه متوسط) توسط رسوبات به نسبت دانه ریزتر (ماسه ریز) می‌باشد.



شکل ۴-۲۱- روند تغییرات تخلخل در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز



شکل ۴-۲۲- روند تغییرات آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف تهیه شده از ماسه متوسط و ماسه ریز

درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف ماسه متوسط و ماسه ریز محاسبه و در جدول (۴-۱۸) ارائه شده است.

جدول ۴-۱۸- درصد کاهش مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه در مخلوط‌های ماسه متوسط و ماسه ریز نسبت به خط درون‌یابی

| درصد ماسه متوسط | درصد ماسه ریز | درصد کاهش تخلخل | درصد کاهش آبدهی ویژه |
|-----------------|---------------|-----------------|----------------------|
| ۸۳              | ۱۷            | ۶/۲۵            | ۱۹/۵                 |
| ۷۵              | ۲۵            | ۱۴/۵            | ۲۶                   |
| ۶۶              | ۳۴            | ۲۵/۵            | ۳۲                   |
| ۵۰              | ۵۰            | ۱۶/۵            | ۳۶                   |
| ۲۵              | ۷۵            | ۶               | ۲۴                   |

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول فوق ملاحظه می‌شود که بالاترین درصد کاهش تخلخل در مخلوط تهیه شده از ترکیب ۶۶٪ ماسه متوسط با ۳۴٪ ماسه ریز و بیشترین مقدار کاهش آبدهی ویژه در ترکیب تهیه شده از ۵۰٪ ماسه متوسط با ۵۰٪ ماسه ریز می‌باشد.

به طور کلی با توجه به مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه حاصل از آزمایش‌های زهکشی انجام شده بر مخلوط‌های تهیه شده از ترکیب رسوبات با اندازه ذرات متفاوت مربوط به رده‌های رسوبی مختلف در درصدهای متفاوت با یکدیگر، نسبت به مقادیر برآورد شده‌ی آن‌ها در آزمایش‌های زهکشی انجام شده بر رسوبات غیرترکیبی با جورشدگی خوب، مشاهده می‌شود در همه‌ی آزمایش‌های ترکیبی انجام شده مقادیر تخلخل و آبدهی ویژه‌ی به مراتب کمتری (به دلیل جورشدگی ضعیف ناشی از ترکیب رسوبات با اندازه ذرات متفاوت) نسبت به آزمایش‌های غیرترکیبی نشان می‌دهند. علت این کاهش قابل توجه جورشدگی ضعیف ایجاد شده ناشی از پر شدن تخلخل رسوبات درشت‌تر توسط رسوبات به نسبت دانه‌ریز ترکیب شده با آن‌ها می‌باشد.





## فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، مقادیر آبدهی ویژه برای رسوبات مختلف و مخلوط آن‌ها با استفاده از ستون زهکشی اندازه‌گیری شده است. در این بخش خلاصه‌ای از نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادهایی برای کار بیشتر ارائه می‌شود.

### ۵-۱- نتیجه گیری

#### الف- برآورد مقادیر آبدهی ویژه رسوبات با استفاده از ستون زهکشی

با انجام آزمایش‌های زهکشی بر رسوبات همگن (یکنواخت) با اندازه ذرات مختلف مربوط به رده‌های رسوبی دانه درشت (به دلیل اهمیت آن‌ها در ذخایر آب زیرزمینی) و اندازه‌گیری مقادیر آبدهی ویژه آن‌ها ملاحظه گردید که با کاهش اندازه ذرات رسوبی مقدار آبدهی ویژه کاهش می‌یابد. به طوری که بیشترین مقدار آبدهی ویژه مربوط به رسوبات دانه درشت ریگ با مقدار  $0/335$  و کمترین مقدار برآورد شده مربوط به ماسه ریز با مقدار  $0/07$  تا  $0/02$  در لوم می‌باشد.

#### ب- عوامل موثر بر مقدار آبدهی ویژه رسوبات

با بررسی عوامل احتمالی موثر بر مقدار آبدهی ویژه رسوبات از جمله: کشیدگی رسوبات، اندازه ذرات، مدت زمان زهکشی رسوبات و اختلاط رسوبات، مشاهده شد: با افزایش کشیدگی رسوبات، مقدار آبدهی ویژه افزایش می‌یابد. آبدهی ویژه با اندازه ذرات رسوبات به

طور کلی رابطه‌ی عکس دارد. به طوری که با کاهش اندازه ذرات مقدار آن کاهش می‌یابد. با افزایش مدت زمان زهکشی، مقدار آبدهی ویژه به خصوص در رسوبات دانه ریزتر افزایش می‌یابد. اختلاط رسوبات با اندازه ذرات متفاوت مربوط به رده‌های رسوبی مختلف با یکدیگر، به طور قابل ملاحظه‌ی باعث کاهش آبدهی ویژه می‌شود. به طوری که بیشترین درصد کاهش آبدهی ویژه با مقدار ۵۴٪ مربوط به مخلوط رسوبی تهیه شده از ۵۰٪ ماسه درشت با ۵۰٪ ماسه ریز می‌باشد. بنابراین با توجه به کاهش قابل ملاحظه‌ی آبدهی ویژه در اثر اختلاط رسوبات، رسوبات همگن (یکنواخت) بیشترین مقدار آبدهی ویژه را دارا می‌باشند. به طور کلی از عوامل بیان شده در فوق، اندازه ذرات و اختلاط رسوبات با یکدیگر اثرگذارترین عامل بر مقدار آبدهی ویژه رسوبات می‌باشند.

### ج- کاربرد مقادیر آبدهی ویژه رسوبات

در اکثریت دشت‌ها داده‌های آزمایش پمپاژ به تعداد کافی وجود ندارد و همان تعداد محدودی هم که وجود دارند به طور دقیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار نمی‌گیرند. همچنین مقادیر آبدهی ویژه علاوه بر تغییرات مکانی، به دلیل تغییر سطح آب در زمان‌های مختلف، دارای تغییرات زمانی نیز هست. علی‌رغم وجود تغییرات مکانی و زمانی آبدهی ویژه، به دلیل عدم وجود تعداد کافی داده‌های آزمایش پمپاژ و همچنین عدم ارزیابی دقیق آنها، در اکثریت دشت‌ها مقدار آبدهی ویژه در کل دشت به طور یکسان و به صورت تقریبی در نظر گرفته می‌شود.

وجود گمانه‌ها و چاه‌های متعدد حفر شده در نقاط مختلف دشت‌ها و دسترسی به نوع رسوبات در لاگ حفاری آن‌ها می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی برای تعیین آبدهی ویژه آبخوان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، لازم است که با روش‌های آزمایشگاهی (ستون‌های زهکشی) یک برآوردی از آبدهی ویژه رسوبات مختلف و مخلوط آن‌ها ارائه شود.

با استفاده از اطلاعات لاگ‌های حفاری، که در نقاط مختلف دشت‌ها توزیع شده‌اند، نه تنها می‌توان

مقادیر آبدهی ویژه را در نقاط مختلف دشت‌ها با دقت قابل قبولی برآورد نمود بلکه در دوره‌های مختلف با تغییر سطح آب زیرزمینی می‌توان لایه‌های رسوبی بخش اشباع آبخوان را در نظر گرفت و با توجه به مقادیر برآورد شده آبدهی ویژه رسوبات مختلف و اعمال میانگین وزنی، مقدار آبدهی ویژه آبخوان را در نقاط مختلف دشت برآورد نمود.

#### ۵-۲- پیشنهادها

با توجه به نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری مقادیر آبدهی ویژه در رسوبات مختلف و تجزیه و تحلیل آن‌ها، پیشنهادهای زیر برای انجام کار بیشتر در این زمینه ارائه می‌شود:

با توجه به کاهش قابل توجه مقادیر آبدهی ویژه در اختلاط رسوبات مختلف، پیشنهاد می‌شود که روی ترکیب رسوبات دانه ریز با رسوبات دانه درشت به طور وسیع‌تری کار شود تا مقدار کاهش آبدهی ویژه در مخلوط‌های مختلف رسوبات بهتر مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به درجه تراکم‌پذیری بالای رسوبات دانه ریز، پیشنهاد می‌شود که در اختلاط رسوبات دانه درشت با رسوبات دانه ریز (به ویژه در شرایطی که درصد مشارکت رسوب دانه ریز در مقایسه با رسوب دانه درشت بیشتر است)، آزمایش‌های زهکشی برای فشارهای متداول (تا حدود ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) در آبخوان‌ها انجام شود.

## مراجع

- اکبر پور ا. آقا حسینعلی شیرازی م. عزیزی م. و اعتباری ب، (۱۳۸۹) "مقایسه روش‌های تایس، ژاکوپ، برگشت تایس و هانتوش در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوانهای آزاد" نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- باقری ا، میرزایی م، مرادزاده ع، یوسفی راد م، (۱۳۸۷)، "محاسبه‌ی کیفی تخلخل، آبدهی ویژه و آب قابل استحصال سفره آب زیرزمینی با استفاده از نتایج مدلسازی مقاومت ویژه"، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ص ۱۲۲-۱۱۹، تهران.
- توسلی م، چیت سازان م، (۱۳۷۷) "مدیریت منابع آب دشت مہیار شمالی با استفاده از مدل ریاضی المانهای محدود"، دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، مشهد.
- حجت آ، رنجبر ح، (۱۳۹۰) "اصول ژئوفیزیک کاربردی: ژئوفیزیک، مهندسی معدن، زمین‌شناسی مهندسی، محیط زیست و مهندسی عمران" چاپ اول، تهران، موسسه‌ی انتشارات ستایش.
- روح الهی ع. شهیدی ع. اکبرپور ا. و اعتباری ب، (۱۳۹۰) "تخمین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در اکیفرهای آزاد مطالعه موردی دشت سربیشه استان خراسان جنوبی"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- سروری م، (۱۳۸۲)، پایان نامه ارشد: "هیدروژئولوژی و شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت دوسلق (چنانه)"، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- سعادت‌ی ف، محمدزاده ح، ارجمند شریف م، (۱۳۹۳) "تخمین آبدهی ویژه (Sy) آبخوان آبرفتی دشت مشهد با استفاده از روش ژئوالکتریک"، همایش ملی آب، انسان و زمین، اصفهان، شرکت توسعه سازان گردشگری اصفهان، ایران.
- طهماسبی هادی، (۱۳۸۱)، پایان‌نامه ارشد: "اکتشاف و ارزیابی منابع آب زیرزمینی دشت شورو به روش مقاومت ویژه ژئوالکتریک"، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

عابدی کوپایی ج. گلابچیان م، (۱۳۷۰) "برآورد منابع هیدرودینامیک ضرائب آب زیرزمینی حوضه آبخیز کوهپایه-سگری با استفاده از مدل MODFLOW" مجله ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۷۲.

عزیزی ف. و محمدزاده ح، (۱۳۹۲) "تخمین پارامترهای هیدروژئولوژیکی با روش‌های ژئوالکتریک و برآورد حجم تقریبی و حجم آب قابل استحصال از آبخوان دشت امامزاده جعفر گچساران" جغرافیای و توسع‌های ناحی‌های، شماره ی ۲۱.

کاظمی آ، (۱۳۸۵)، پایان نامه ارشد: "شبیه سازی جریان آب زیرزمینی و اثرات زیست محیطی ناشب از پمپاژ آب زیرزمینی در دشت رفسنجان"، دانشکده آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

کرمی غ، (۱۳۸۵) "انتخاب روش مناسب برای تحلیل داده های آزمایش پمپاژ در سفره های کارستی" نشریه علوم زمین ، شماره ۵۹، دوره ۱۵، ص ۵۰-۵۵.

ملکی ر، کرمی غ، دولتی ارده جانی ف، حسینی ح، (۱۳۹۰)، "بهینه سازی ضرائب هیدرولیکی دشت شاهرود با استفاده از مدل GMS6.0"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، شاهرود

Archie G. E. (1942) "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics" Transactions of the AIME., 146, 1, pp 54-62.

Briggs L.J. and McLane J.W. (1907) "moisture equivalents of soils" u.s. Bur. Soils Bull., 45.

Briggs L.J. and Shantz H.L. (1912) "The wilting coefficient for different plants: and its indirect determination" U.S Bur. Plant Industry Bul., 230, pp 1-82.

Cohen P. (1963) "Specific-yield and particle-size relations of Quaternary alluvium. Humboldt River Valley, Nevada" US Geological Survey Water-Supply Paper., 1669-M, pp 20-23.

Clark, W. O. (1917) "Ground water for irrigation in the Morgan Hill area, California" USGPO., 400, pp 82-83.

El-Bihery, Medhat A. (2009) "Groundwater flow modeling of Quaternary aquifer Ras Sudr, Egypt" Environmental geology., 58, 5, pp 1095-1105.

Ellis, A. J. and Lee C. H., (1919) "Geology and ground waters of the western part of San Diego County, California" U.S. Geology Survey Water-Supply Paper., 446, pp 121-123.

Fitts, C.R. (2002). "Groundwater Science." Academic Press, New York, pp.450.

Frohlich R. K. and Kelly W. E. (1988) "Estimates of specific yield with the geoelectric resistivity method in glacial aquifers" Journal of Hydrology., 97, 1, pp 33-44.

Hazen A., (1892) "Experiments upon the purification of sewage and water at the Lawrence experiment station" Massachusetts States Board of Health Twenty-Third Annual Report for 1891, pp.428-434, Massachusetts.

Israelson O. W. (1918) "Studies in Capacities of soils for irrigation water" J.A.R., 13, pp 1-28.

Jiu J.J. and David N.L. (1996) " USING SENSITIVITY ANALYSIS TO ASSIST PARAMETER ZONATION IN GROUND WATER FLOW MODEL" Journal of the American Water Resources Association., 32, 1 , pp 75-88.

Johnson A. I., and Kunkel F., (1963) "Some research related to groundwater recharge-

A progress report from the U.S. Geological Survey” Ground-water Recharge and Ground-water Basin Management Biennial Conf, Proc, University California, Berkeley, pp 17.

Johnson A. I. (1967) “Specific yield: compilation of specific yields for various materials” US Government Printing Office.

Johnson A.I. Prill R.C. and Morris D.A. (1963) “Specific Yield--Column drainage and centrifuge moisture content” USGPO., 1662-A, pp 60.

Kruseman, G.P. and N.A. De Ridder., (1991). “Analysis and Evaluation of Pumping Test Data” International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, Publication 47,pp.377.

King F.H., (1899) “Principles and conditions of the movements of ground water” U.S. Geol. Survey 19th Ann, pp 86-91, Washington.

Louis I. Karantonis G. Voulgaris N. and Louis F. (2004) “Geophysical methods in the determination of aquifer parameters: the case of Mornos river delta, Greece” Res J Chem Environ., 18, 4, pp 41-49.

Le Page M. Berjamy B. Fakir Y. Bourgin F. Jarlan L. Abourida A. Benrhanem M. Jacob G. Huber M. Sghrer F. and Simonneaux V. (2012) “An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing. The case of a semi-arid aquifer in Morocco” Water resources management., 26, 11, pp 3209-3230.

Mazáč O. Kelly W.E. and Landa I. (1985) “A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers” Journal of Hydrology., 79, 1, pp 1-19.

McDonald M.G. and Harbaugh A.W. (1988) “MODFLOW: A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model” U. S. Geological Survey, A1.

Meinzer O.E. (1932) “Outline of methods for estimating ground-water supplies” USGPO., 638-C.

Middleton H.E. (1920) “The moisture equivalent in relation to the mechanical analysis of soils” Soil Science., 9, 2, pp 159.

Moulder E. A. and Frazor D. R. (1957) "Artificial recharge Experiments at McDonald Well Field, Amarillo, Texas" Texas Board of Water Engineers., 5701, pp 34.

Neuman, S. P. (1975) "Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response" Water Resources Research., 11, 2, pp 329-342.

Niwas S. Tezkan B. and Israil M. (2011) "Aquifer hydraulic conductivity estimation from surface geoelectrical measurements for Krauthausen test site, Germany" Hydrogeology Journal., 19, 2, pp 307-315.

Nwankwor, G. I. Cherry, J. A. and Gillham, R. W. (1984) "A comparative study of specific yield determinations for a shallow sand aquifer". Ground Water., 22 , 6, pp 764-772.

Piper A.M. (1933) "Notes on the relation between the moisture-equivalent and the specific retention of water-bearing materials" Eos, Transactions American Geophysical Union., 14, 1, pp 481-487.

Prickett, T. A. (1965) "Type-Curve Solution to Aquifer Tests under Water-Table Conditions". Ground Water., 3, 3, pp 5-14.

Prill R.C. (1961) "Comparison of drainage data obtained by centrifuge and column-drainage methods" USGS Prof. Pap., 424, pp 399-401.

Prill R.C. Johnson A.I. and Morris D.A. (1965) "Specific yield-laboratory experiments showing the effect of time on column drainage" USGPO., 1662-B, pp 55.

Rushton K. R. and K. W. F. Howard. (1982) "The unreliability of open observation boreholes in unconfined aquifer pumping tests" Ground Water., 20, 5, pp 546-550.

Sedki A. and Ouazar D. (2011) "Simulation-optimization modeling for sustainable groundwater development: a Moroccan coastal aquifer case study" Water resources management., 25, 11, pp 2855-2875.

Sinha R. Israil M. and Singhal D.C. (2009) "A hydrogeophysical model of the relationship between geoelectric and hydraulic parameters of anisotropic aquifers" Hydrogeology Journal., 17, 3, pp 495-503.



Sniegocki R. T. (1963) “Problems in artificial recharge through wells in the Grand Prairie Region, Arkansas” US Geol. Survey Water-Supply Paper., 1515-G, pp 25.

Soupios P.M. Kouli M. Vallianatos F. Vafidis A. and Stavroulakis, G. (2007) “Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete–Greece)” Journal of Hydrology., 338, 1, pp 122-131.

Stallman R. W. (1971) “Aquifer-test design, observation, and data analysis” US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, pp 26.

Stearns N.D. (1927) “Laboratory tests on physical properties of water-bearing materials” U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper., 596-F, pp 55.

Theis, C. V. (1935). “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., 16, 2, pp 519-524.

Thiem, G. (1906). “Hydrologic methods”. Gebhardt, Leipzig, Germany. pp 56.

Tizro A.T. Voudouris K. and Basami Y. (2012) “Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method–A case study in western Iran” Journal of Hydrology., 454, pp 160-172.

Todd, D. K. (1980). “Groundwater hydrology”, Wiley, New York, pp.535.

Todd,D.K. and Mays L.W., (2005). “Groundwater Hydrology”, John Wiley and Sons, New York, pp.535.

Voudouris K.S. (2006) “Groundwater Balance and Safe Yield of the coastal aquifer system in NEastern Korinthia, Greece” Applied Geography., 26, pp 291–311.

Walton, W. C., (1987), “Groundwater pumping tests”, Lewis Publishers, Inc., U.S.A.

Wenzel L.K. (1942) “Methods of determining permeability of water-bearing materials” US Geological Survey Water-Supply Paper., 887, pp 192.

Wenzel L.K. Cady, R.C. and Waite, H.A. (1946) “Geology and ground-water resources of Scotts Bluff County, Nebraska” US Geological Survey Water-Supply Paper., 943, pp 66-67.

.Zheng C. and Bennett G.D. (2002), “Applied Contaminant Transport Modeling”, John Willy and Sons, Inc, pp.621.

**Abstract:**

Specific yield is one of the most important hydrodynamic parameters of aquifer that expresses storage capacity and releasing water in these aquifers. Several methods have been proposed to determine the specific yield in these aquifers that most reliable of them is pumping test method. In most of the aquifers, there is not insufficient pumping test data or if there is, not being accurately analyzed. Thus, many researchers have tried to estimate Specific yield values in the aquifer from alternative methods. One of the applicable methods for the Specific yield determination of the aquifer is use of sediment particle analysis derived from drilling wells. Since the aquifer Specific yield, controlled mainly by coarse sediments, in this study values of this parameter for the coarse sediments and their mixture, using drainage column is estimated. In this research, coarse sediments using 4 to 100 sieves, are separated and then using the drainage column for each of them and also their mixture, values of porosity and Specific yield are measured. Based on the results achieved, the amount of Specific yield varying in coarse sediments from 0.35 in gravels to 0.07 in fine sand and 0.02 in loam soil. In addition, the amount of Specific yield in different sediment mixture is significantly reduced compared to its weighted average. The cause of this issue is that in the mixture of fine and coarse particles, empty spaces between coarse particles occupied by fine particles and therefore Specific yield values and even porosity is significantly reduced relative to weighted average of mixed sediments.

**Keywords:** Specific yield, porosity, pumping, sedimentation, drainage column



**Faculty of Earth Sciences**  
**M Sc. Thesis in Hydrogeology**

**Determination of specific yield of sediments  
from grain size analysis**

**By:**

Fatemeh Emadi

**Supervisor:**

Dr. Karami

**january 2017**