

ارائه روشی تحلیلی برای تخمین عوامل مؤثر بر نشست زمین با استفاده از داده‌های صحرایی و تصاویر InSAR در دشت نیشابور

هادی نامقی^{۱*}، سید محمود حسینی^۲، محمدباقر شریفی^۳

دریافت مقاله: ۹۱/۰۸/۰۳ پذیرش مقاله: ۹۲/۰۲/۲۴

چکیده

توسعه برداشت از آب‌های زیرزمینی به اندازه‌ای که مقدار تخلیه آبخوان از تغذیه آن بیشتر شود، موجب برهم خوردن تعادل در آبخوان شده و به صورت زمانی یا مکانی موجب کاهش ارتفاع هیدرولیکی می‌گردد. کاهش ارتفاع هیدرولیکی و یا افت سطح آب باعث کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر وارد بر ذرات آبخوان می‌شود. این پدیده، تحکیم لایه‌هایی از رسوبات ریزدانه را به دنبال دارد، که نتیجه آن به صورت نشست در سطح زمین نمایان می‌شود. در سال‌های اخیر افزایش برداشت از آبخوان دشت نیشابور واقع در شمال شرقی ایران، گزارش شده است که نتیجه آن افت سطح آب با میانگین ۹۰ سانتی‌متر در سال و ثبت حداکثر نرخ نشست موضعی ۱۹ سانتی‌متر در سال، بوده است. در این تحقیق بر روی برآورد پارامترهای مؤثر بر نشست دشت نیشابور تمرکز شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل ضخامت مؤثر لایه‌های ریزدانه تراکم‌پذیر و ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان (S_{skv})، می‌باشند که به‌طور مستقیم در محاسبات مربوط به نشست‌های برگشت‌ناپذیر، وارد می‌شوند. در گام اول، ضمن بررسی اطلاعات ۲۳۱ گمانه، با روش درون‌یابی کریجینگ، نقشه توزیع ریزدانه‌ها در سطح دشت نیشابور تهیه و ارتباط منطقی بین نشست ثبت شده و پتانسیل آبدی چاه‌های دشت، با ضخامت لایه‌های ریزدانه تحقیق گردید. نتایج حاصل نشان داد که بین ضخامت ریزدانه‌ها در پهنه دشت و میزان تخلیه از چاه‌ها، ارتباطی معکوس وجود دارد. به عبارت دیگر کم‌ترین میزان تخلیه در عمده نواحی دارای بیشترین مقدار ریزدانه (رس و سیلت) دیده می‌شود و ریزدانه بودن بافت آبخوان، و به تبع آن کم بودن هدایت هیدرولیکی، بر کاهش آبدی چاه‌ها تأثیر مستقیم داشته است. در گام دوم، روند تغییرات نرخ نشست حاصل از تصاویر ماهواره‌ای InSAR و افت سطح آب برای چاه‌های پی‌زومتری واقع در محدوده نشست، مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که تراکم آبخوان نیشابور عمدتاً در نتیجه تغییر شکل‌های پلاستیک بوده و سهم تغییر شکل‌های الاستیک ناچیز می‌باشد. لذا با صرف‌نظر از تغییر شکل‌های الاستیک، به استناد نقشه‌های نرخ سالانه نشست و نقشه‌های هم‌افت سطح آب، روشی مبتنی بر آنالیز تنش-کرنش برای تعیین مقادیر ذخیره ویژه کالبد پلاستیک آبخوان ارائه گردید. سپس به کمک نتایج حاصل از گام نخست، مقادیر ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان (S_{skv}) محاسبه شد. نتیجه حاصل از تعمیم روش فوق منجر به تهیه نقشه توزیع مقادیر S_{skv} برای رسوبات ریزدانه پراکنده در سطح دشت نیشابور گردید.

کلید واژه‌ها: آب زیرزمینی، دشت نیشابور، ذخیره ویژه کالبد آبخوان، نشست زمین

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. پست الکترونیکی: Nameghi@mshdiau.ac.ir

۲. استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۱. مقدمه

کشور ایران در دهه‌های اخیر رشد جمعیت را در کنار توسعه کشاورزی تجربه کرده‌است. محدودیت منابع آب سطحی و روش‌های غیرصحيح آبیاری در بخش کشاورزی، به همراه الگوهای کشت نامتناسب با منابع آبی موجود در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، موجب حفر بی‌رویه چاه‌های آب در اغلب آبخوان‌ها گردیده است. به دنبال اضافه برداشت از آبخوان‌ها و افت سطح آب‌های زیرزمینی، پدیده نشست زمین در بسیاری از دشت‌های ایران گزارش شده‌است. بررسی جامعی در خصوص پی‌آمدهای نشست در دشت‌های ایران توسط شریفی‌کیا (۱۳۸۹) انجام شده‌است. اگرچه موضوع نشست زمین در بسیاری از کشورهای دنیا مشاهده شده‌است، اما اندازه‌گیری‌های اخیر و ثبت نرخ نشست سالانه نشان می‌دهد که دشت‌هایی نظیر تهران (Dehghani et al., 2010)، مشهد (Motagh et al., 2007) و نیشابور (Dehghani et al., 2009) به ترتیب با حداکثر نرخ نشست موضعی ۲۵، ۲۸ و ۱۹ سانتی‌متر در سال، در دنیا کم‌نظیر می‌باشند (Galloway and Burbey, 2011).

روش‌های متعددی برای فرمول‌بندی پدیده نشست ارائه گردیده‌است که همگی بر پایه ایجاد ارتباط بین تغییر ارتفاع هیدرولیکی آب‌زیرزمینی و تراکم‌پذیری آبخوان استوار است. بخش عمده تراکم‌پذیری آبخوان به ذخیره ویژه کالبدی (Skeletal specific storage) رسوبات تراکم‌پذیر آن بستگی دارد. تحقیقات گذشته چهار روش را برای برآورد ذخیره ویژه آبخوان‌ها ارائه داده‌اند که عبارتند از: نتایج حاصل از آزمایش پمپاژ، تحلیل تنش-کرنش براساس داده‌های اکستنسومترها، آزمایش تحکیم و نتایج حاصل از واسنجی مدل‌های شبیه‌سازی.

آزمایش پمپاژ با اندازه‌گیری نرخ افت و بالآمدگی مجدد سطح آب، تخمینی از ضریب ذخیره آبخوان را (مخصوصاً در محدوده رسوبات درشت‌دانه)، ارائه می‌دهد. مطالعات زیادی در خصوص استفاده از این روش موجود است که از آن جمله می‌توان به (Poland, 1961)، (Riley and McClelland, 1971)،

(Kruseman et al., 1990)، (Butler, 2009)، (Yeh and

(Huang, 2009) و (Mishra, 2010) اشاره کرد.

روش تحلیل تنش-کرنش براساس داده‌های اکستنسومترها اولین بار توسط (Riley, 1969) ارائه گردید. در صورتی که در یک نمودار، مقادیر تنش (یا تراز هیدرولیکی) در محور Y و تغییر مکان عمودی بر محور X مشخص شود، عکس شیب خط برازش داده شده، مقدار ضریب ذخیره کالبدی را ارائه می‌دهد. این روش در مناطقی از آبخوان، که پاسخ سریعی نسبت به تغییرات تنش از خود نشان می‌دهند، جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهد و برای محدوده‌های دارای لایه‌های ریزدانه ضخیم مناسب نیست (Hoffmann, 2003; Johnson, 1975; Bull and Poland, 1975; Poland et al., 1984).

جزئیات تئوری تحکیم اولین بار توسط (Terzaghi, 1943)، مطرح گردید. در آزمایش تحکیم با اندازه‌گیری ضریب تحکیم (C_v) و تخمین هدایت هیدرولیکی قائم (K_v)، به برآوردی از ذخیره ویژه کالبدی در حالت پلاستیک ($S_{skv} = K_v/C_v$)، خواهیم رسید (Jorgensen, 1980).

نتایج حاصل از واسنجی مدل‌های جریان آب‌زیرزمینی و نشست زمین می‌تواند تخمینی از ضرایب ذخیره و هدایت هیدرولیکی قائم را در اختیار ما قرار دهد. داده‌های مورد استفاده در واسنجی، به استناد اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل ایستگاه‌های سیستم مکان‌یابی جهانی (GPS) یا اکستنسومترهای نصب شده در سطح دشت برداشت می‌شود. نخستین مطالعات انجام شده با این روش توسط (Helm, 1975, 1976) (Prudic and Williamson, 1986) و (Hanson, 1989)، انجام پذیرفت. در سال‌های اخیر با رشد استفاده از مدل‌های رایانه‌ای در محاسبه نشست زمین، کاربرد این روش نیز گسترش یافته‌است (Hoffmann et al., 2003; Burbey, 2006; Faunt, 2009; Leak and Galloway, 2010; Therrien et al., 2010; Calderhead et al., 2011).

در این تحقیق پس از برآورد ضخامت مؤثر لایه‌های ریزدانه تراکم‌پذیر، بر ارائه یک روش تحلیلی مبتنی بر معادلات نشست، برای محاسبه ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان (S_{skv})، در سطح دشت نیشابور تمرکز شده‌است. این پارامترها

داده‌اند. بنابراین در آبخوان‌های باز، افت سطح آب باعث کاهش نیروی شناوری وارد بر ذرات خاک شده، در نتیجه وزن سرباره افزایش می‌یابد، که این پدیده افزایش تنش مؤثر وارد بر ذرات خاک را به دنبال دارد. در آبخوان‌های بسته، برداشت آب باعث افت تراز پیزومتری و کاهش فشار روبه بالا، از طرف لایه آبدار به لایه ناتراوای فوقانی می‌گردد. کاهش فشار وارد بر لایه فوقانی موجب افزایش وزن سربار بر لایه آبدار شده که این پدیده افزایش فشار وارد بر ذرات خاک را در پی خواهد داشت (Bouwer, 1977). ارتباط بین تغییر تنش مؤثر و تغییر سطح آب (در آبخوان‌های باز) یا تغییر تراز پیزومتری (در آبخوان‌های بسته)، به ترتیب با روابط (۳-الف) و (۳-ب) بیان می‌گردد (Poland and Davis, 1969).

$$\Delta\sigma' = -\gamma_w(1 - n + n_w)\Delta h_{wt} \quad (3-f)$$

$$\Delta\sigma' = -\gamma_w\Delta h_c \quad (3-b)$$

در این روابط n تخلخل، n_w سهم رطوبت آب از حجم ذرات در ناحیه غیر اشباع، Δh_{wt} تغییر سطح آب در آبخوان باز و Δh_c تغییر تراز پیزومتری در آبخوان بسته می‌باشد. تراکم آبخوان در اثر افزایش تنش مؤثر، بر روی دو پارامتر مهم آن یعنی ذخیره ویژه (S_s) و ضریب ذخیره (S) اثرگذار است.

ذکر یک نکته ضروری است که، پدیده نشست خاک در اثر افزایش تنش مؤثر در دو حالت قابل بررسی می‌باشد. زمانی که در اثر افت ارتفاع هیدرولیکی، میزان افزایش تنش مؤثر، از تنش تجربه شده توسط ذرات بیشتر باشد، ساختار قرارگیری ذرات در لایه‌لای یکدیگر، تغییر یافته و تراکم نسبتاً پایداری رخ می‌دهد. این تغییر شکل (در اثر بار برداری) برگشت‌ناپذیر بوده و به عنوان تراکم غیرالاستیک شناخته می‌شود. در حالتی که تنش وارد بر ذرات به آستانه تنش تجربه شده (تنش پیش‌تحکیمی) نرسد، تغییر شکل‌های رخ داده کوچک و برگشت‌پذیر (الاستیک) خواهد بود. شکل ۱ نشان می‌دهد که در اثر افزایش تنش مؤثر ناشی از افت تراز هیدرولیکی، لایه‌های ریزدانه متراکم می‌گردند. پس از افزایش مجدد تراز هیدرولیکی (تغذیه آبخوان) بخشی از تغییر شکل‌های لایه‌های ریزدانه، که در محدوده الاستیک به وقوع پیوسته، برگشت

بطور مستقیم در معادله خطی محاسبه نشست‌های غیرالاستیک (Leak and Prudic, 1991) وارد می‌شوند. معادله مورد بحث در زیربرنامه محاسبه نشست آبخوان‌های آزاد SUB-WT (Leak and Galloway, 2007)، از مدل جریان آب‌زیرزمینی Modflow استفاده شده است. در حقیقت دستیابی به مقادیر این پارامترها تا آنجا اهمیت پیدا می‌کند که گام نخست مدل‌سازی نشست توسط مدل‌های شبیه‌ساز و معیار واسنجی این مدل‌ها، دستیابی به توزیع ضخامت مؤثر لایه‌های ریزدانه تراکم‌پذیر و ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان (S_{skv})، در سطح دشت می‌باشد.

۱. تئوری

اگر در بافت آبخوان لایه‌هایی از رسوبات ریزدانه تحکیم‌نشده (شامل رس و سیلت) وجود داشته باشد، هم‌زمان با افت ارتفاع هیدرولیکی، تنش مؤثر افزایش یافته و پدیده تحکیم رخ می‌دهد که نتیجه آن به صورت نشست در سطح زمین نمایان می‌شود. در یک لایه آبدار تنش مؤثر (σ') به صورت تفاضل بین تنش کل (σ) و فشار آب منفذی (p)، بیان می‌شود (Terzaghi, 1925).

$$\sigma' = \sigma - p \quad (1)$$

بنابراین بخشی از تنش کل وارد بر یک توده خاک (که در آبخوان‌های محصور مقدار آن ثابت است) توسط فشار آب منفذی و مابقی توسط تنش مؤثر وارد بر ذرات خاک تحمل می‌شود. اگر تنش کل را ثابت در نظر بگیریم (این فرض در آبخوان‌های باز و عمیق نیز چندان دور از واقعیت نیست)، با دیفرانسیل‌گیری از طرفین معادله (۱) خواهیم داشت:

$$d\sigma' = -dp \quad (2)$$

بنابراین وقتی که فشار آب منفذی کاهش می‌یابد، تنش مؤثر افزایش یافته و جمع این دو (به شرط ثابت بودن تنش کل) همواره مقداری ثابت است. لازم به ذکر است مکانیزم افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش ارتفاع هیدرولیکی در آبخوان‌های باز و بسته متفاوت است. در آبخوان‌های باز، افزایش تنش مؤثر در اثر افزایش وزن ناشی از کاهش نیروی شناوری ناحیه‌ای است که ذرات خاک در آن ناحیه، آب از دست

تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر، برای مواد درشت‌دانه بسیار ناچیز بوده و می‌توان از مقادیر آن، در مقایسه با میزان تراکم ریزدانه‌ها، صرف‌نظر کرد. در رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر، ارتباط بین تغییر شکل ناشی از تغییر تنش مؤثر، با رابطه لگاریتمی (۵) بیان می‌شود (Jorgensen, 1980).

$$\Delta b = C_c \frac{b_0}{1+e_0} \Delta \log_{10} \sigma' \quad (5)$$

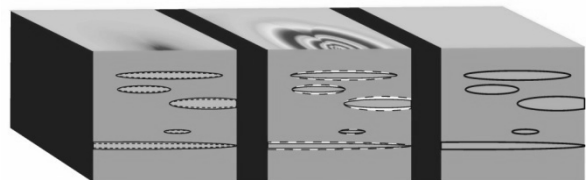
در این رابطه C_c شاخص تراکم‌پذیری نامیده می‌شود و مقدار آن را می‌توان با انجام آزمایش تحکیم خاک‌های ریزدانه و از شیب منحنی تغییرات تخلخل در مقابل لگاریتم تنش مؤثر، بدست آورد. شاخص تراکم‌پذیری تنها وقتی به کار می‌رود که تنش مؤثر، از تنش پیش‌تحکیمی تجاوز کند و در حالتی که تنش مؤثر به مرز پیش‌تحکیمی نرسیده، به جای (C_c) از شاخص تورم (C_e) استفاده می‌شود. از مقایسه رابطه (۵) با روابط (۴-الف) و (۴-ب)، مقادیر S_{ske} و S_{skv} به صورت زیر بدست می‌آید (Leak and Galloway, 2007).

$$S_{ske} = \frac{0.434 C_c \gamma_w}{\sigma' (1+e_0)} \quad (6-الف)$$

$$S_{skv} = \frac{0.434 C_c \gamma_w}{\sigma' (1+e_0)} \quad (6-ب)$$

معادلات (۴-الف) و (۴-ب) بر این فرض استوارند که در همان بازه زمانی که تغییر تنش مؤثر رخ می‌دهد، تغییر شکل‌ها نیز به حد نهایی خود می‌رسند. عامل زمان مفهومی است که برای بیان اختلاف فاز بین بار فشاری در داخل لایه ریزدانه تراکم‌پذیر و خارج از این لایه تعریف می‌شود. زمان لازم برای متعادل شدن تراز هیدرولیکی در لایه ریزدانه، با ذخیره ویژه مواد و توان دوم ضخامت لایه تراکم‌پذیر، نسبت مستقیم و با هدایت هیدرولیکی قائم (K_v) ، نسبت عکس دارد. برای رس‌های تحکیم نشده یا رسوبات سیلتی، مقدار S_{skv} ممکن است حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بزرگتر از S_{ske} باشد (Riley, 1998). به تبع آن، اثر عامل زمان در رسیدن به حد نهایی تغییر شکل‌های الاستیک معمولاً در محدوده چندین روز بوده ولی برای تغییر شکل‌های غیرالاستیک، برحسب ضخامت لایه‌های ریزدانه، ممکن است به حدود چندین سال نیز برسد (Hoffmann, 2003). نظر به اینکه در بیان معادلات (۴-الف) و (۴-ب)، تغییر ارتفاع هیدرولیکی در داخل لایه‌های ریزدانه

نموده و تغییر شکل‌های رخ داده در محدوده پلاستیک، به صورت غیرقابل برگشت باقی مانده و در سطح زمین به صورت نشست نمایان می‌شود. البته همان‌طور که بعداً اشاره خواهد شد، سهم تغییر شکل‌های الاستیک نسبت به تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار ناچیز می‌باشد.



(الف) قبل از افت هد (ب) بعد از افت هد (ج) بعد از برگشت هد

شکل ۱. الف) وجود لایه‌های ریزدانه (Interbed) در بافت خاک و اثر آن در پدیده نشست. **ب)** کاهش تراز هیدرولیکی و افزایش تنش مؤثر وارد بر لایه‌های ریزدانه تحکیم نیافته موجب تراکم این لایه‌ها می‌گردد. **ج)** در بخشی از ریزدانه‌ها که تنش مؤثر وارد بر آن‌ها از تنش پیش‌تحکیمی بیشتر بوده، پدیده تحکیم و به دنبال آن تغییر شکل برگشت‌ناپذیر، رخ داده‌است (Hoffmann, 2003).

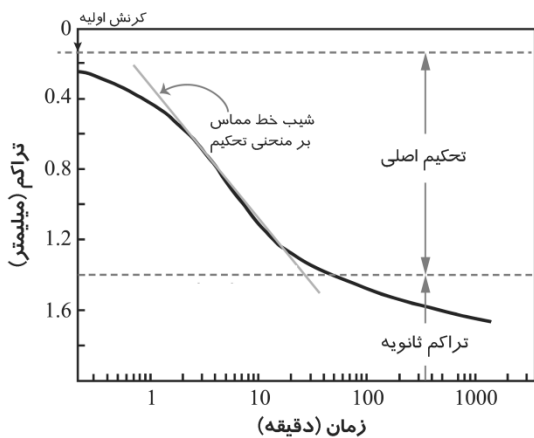
بر حسب اینکه تنش مؤثر وارد بر ذرات خاک (σ') بیشتر یا کمتر از تنش پیش‌تحکیمی (σ'_{max}) باشد، ذخیره ویژه کالبدی رسوبات تراکم‌پذیر آبخوان (S_{sk}) ، به ترتیب با ذخیره ویژه کالبدی آبخوان در حالت پلاستیک (S_{skv}) یا الاستیک (S_{ske}) ، برابر است. در یک لایه از مواد ریزدانه (یا درشت‌دانه) به ضخامت (b_0) ، در اثر افزایش تنش مؤثر به مقدار $(\Delta \sigma' < \sigma'_{max})$ ، تغییر شکل‌های الاستیک حاصل، بطور تقریبی با رابطه خطی (۴-الف) تعریف می‌شود (Leak and Prudic, 1991).

$$\Delta b_{elastic} = \frac{S_{ske} \cdot b_0}{\gamma_w} \cdot \Delta \sigma' \quad (4-الف)$$

در این رابطه γ_w وزن مخصوص آب می‌باشد. اگر تنش مؤثر از تنش پیش‌تحکیمی تجاوز کند، تغییر شکل‌های حاصل برگشت‌ناپذیر بوده و مقدار آن از رابطه (۴-ب) بدست می‌آید (Leak and Prudic, 1991).

$$\Delta b_{inelastic} = \frac{S_{skv} \cdot b_0}{\gamma_w} \cdot \Delta \sigma' \quad (4-ب)$$

نشست باشیم، تخمین شرایط آبی دست پایین و اگر در مراحل میانی تاریخچه نشست باشیم، دست بالا خواهد بود.



شکل ۲. منحنی حاصل از آزمایش یک‌بعدی تحکیم

برگرفته از (Taylor, 1948) همراه با تغییر.

۲. محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز نیشابور در شمال شرقی ایران و در دامنه جنوبی ارتفاعات بینالود، در طول جغرافیایی $58^{\circ}13'$ تا $59^{\circ}30'$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ}40'$ تا $36^{\circ}39'$ شمالی واقع گردیده است. این حوضه با ارتفاع ۱۹۰۰ متری از سطح دریا وسعتی بالغ بر ۷۳۳۰ کیلومتر مربع دارد که ۳۴۷۷ کیلومتر مربع (حدود ۴۷ درصد) آن را دشت و مابقی را ارتفاعات منطقه تشکیل می‌دهد. حوضه آبریز نیشابور حدود ۱۱ درصد از مساحت حوضه آبریز درجه ۲ کویر مرکزی (از زیرحوضه‌های فلات مرکزی ایران) را تشکیل می‌دهد. این حوضه در تقسیمات سیاسی جزو استان خراسان رضوی بوده و ۵/۷ درصد از وسعت این استان را شامل می‌شود.

دشت نیشابور با روند جنوب شرق-شمال غرب بخشی از حوضه آبریز نیشابور می‌باشد. شهر تاریخی نیشابور که یکی از قطب‌های گردشگری شرق کشور محسوب می‌شود، در نواحی مرکزی این حوضه و در دشت نیشابور واقع گردیده است. جمعیت شهر نیشابور از حدود ۵۹۰۰۰ نفر در سال ۱۳۵۵ به ۲۷۰۰۰۰ نفر در سال ۱۳۹۰ (حدود ۴/۵ برابر) رسیده است که

تراکم‌پذیر هم‌زمان با تغییر آن، در خارج لایه‌های تراکم‌پذیر فرض گردیده، از نقش عامل زمان در تحکیم لایه‌های ریزدانه، در اثر تغییر بار (یا افزایش تنش مؤثر) صرف‌نظر شده است. البته این فرض در مورد لایه‌های کم ضخامت از مواد ریزدانه، چندان دور از واقعیت نیست. در صورت بزرگ بودن عامل زمان (در لایه‌هایی ضخیم از مواد تراکم‌پذیر)، نشست‌های مشاهداتی در هر زمان با آنچه از معادلات فوق انتظار داریم متفاوت خواهد بود. اگرچه به‌زای یک مقدار مشخص در افزایش تنش مؤثر، بزرگ شدن عامل زمان فقط رسیدن تراکم به مقدار نهایی خود را به تأخیر انداخته و در میزان تراکم مورد انتظار، تأثیری ندارد.

رابطه (۶-ب) نشان می‌دهد که مقدار S_{skv} با شاخص تراکم‌پذیری رابطه مستقیم و با تنش مؤثر رابطه عکس دارد. پس با گذشت زمان و با افزایش تنش مؤثر در اثر افت بار هیدرولیکی، مقدار S_{skv} کاهش خواهد یافت. بنابراین علاوه بر جنس خاک‌های ریزدانه، تاریخچه افزایش تنش مؤثر یا به عبارتی بارگذاری بر لایه‌های ریزدانه نیز در تعیین مقدار S_{skv} تأثیرگذار خواهد بود. هنگام استفاده از رابطه (۴-ب) و با ثابت فرض کردن S_{skv} ، ارتباطی خطی بین مقدار نشست در برابر تغییر تنش مؤثر برقرار می‌گردد، این در حالی است که در فرآیند نشست زمین، نرخ تحکیم ثابت نبوده (شکل ۲) و مرحله میانی تحکیم با نرخی به مراتب بیشتر از مراحل اولیه و نهایی آن، اتفاق می‌افتد (Helm, 1998). از سوی دیگر میزان تجاوز از تنش پیش تحکیمی یا به عبارت دیگر تاریخچه افت سطح آب در نقاط مختلف دشت تعیین کننده نرخ تراکم‌پذیری لایه‌های ریزدانه در پروسه زمانی تحکیم می‌باشد. با توجه به نهفته بودن این اثر در S_{skv} ، فرض ثابت بودن این پارامتر در سرتاسر دشت و همچنین در گذر زمان صحیح نبوده و تغییرات مکانی S_{skv} علاوه بر جنس و عمق رسوبات ریزدانه، به تاریخچه افت سطح آب نیز بستگی خواهد داشت. بنابراین در مدل‌های نشست می‌بایست علاوه بر تغییرات مکانی S_{skv} ، اثر کاهش مقدار آن در گذر زمان نیز در نظر گرفته شود، در غیر این صورت هنگام پیش‌بینی‌های دراز مدت، اگر در مراحل اولیه

۰/۹ متر بوده و متوسط افت ۰/۵ و ۱۵ ساله آبخوان نیشابور به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۸۷ و ۰/۹ متر در سال است. بر این اساس تغییرات حجم مخزن ۵، ۱۰ و ۱۵ ساله برابر ۱۹۳/۰۶-، ۲۰۳/۷۸- و ۲۰۹/۵۳- میلیون مترمکعب به دست آمده است (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۹). افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت نیشابور تبعات منفی بسیاری داشته که مشخص‌ترین آن نشست زمین می‌باشد.

۳. مراحل انجام تحقیق و نتایج حاصل

بخش نخست تحقیق بر تعیین ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر در محدوده آبخوان دشت نیشابور متمرکز شده است. سپس ارتباط بین ضخامت ریزدانه‌ها با میزان آبدی دشت و نشست زمین مورد بررسی قرار گرفته‌است. در بخش دوم با داشتن ضخامت رسوبات ریزدانه و با توجه به روند افت سطح آب و نشست رخ داده در محل چاه‌های مشاهده‌ای واقع در محدوده نشست، مقادیر ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان محاسبه و از نتیجه حاصل توزیع S_{skv} در محدوده آبخوان دشت نیشابور به دست آمده‌است.

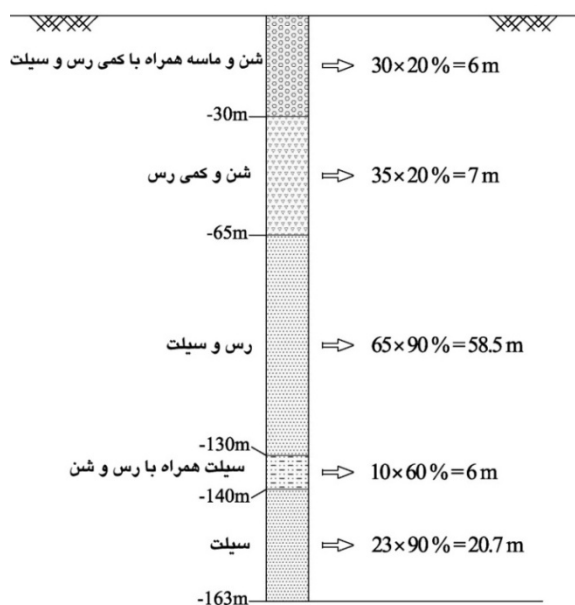
۳-۱. تعیین ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر

همان‌طور که در روابط (۴-الف و ۴-ب) مشاهده گردید، ضخامت مؤثر ریزدانه‌ها در بافت آبخوان، به‌طور مستقیم در برآورد حداکثر نشست برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر اثرگذار است. اگر در یک نقطه از آبخوان مجموعه‌ای از N میان‌لایه تراکم‌پذیر (Interbed) موجود باشد، حداکثر نشست مورد انتظار، با مجموع نشست برآورد شده در N لایه مورد بحث معادل است. بدیهی است شناخت پراکندگی ضخامت لایه‌های تراکم‌پذیر در سطح آبخوان، در شناسایی موقعیت‌های مستعد نشست مؤثر بوده، همچنین مقدار ضخامت و توزیع قائم میان لایه‌ها در برآورد میزان نشست مورد انتظار در اثر افت سطح آب، نقش بسزایی دارد. معمولاً میان لایه‌های ریزدانه در آبخوان توزیعی بسیار پراکنده داشته و عمدتاً مواد ریزدانه در لایه‌هایی از سایر مواد مختلف یا به صورت مخلوطی از ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها یافت می‌شوند. از این رو شناخت

این افزایش جمعیت حاکی از پتانسیل‌های بالای این منطقه برای رشد و توسعه می‌باشد.

سطح سفره آب زیرزمینی در محدوده بیلان (شبکه تپسن)، ۲۹۱۴/۵ کیلومتر مربع وسعت دارد. تراز آب زیرزمینی در شبکه رفتارسنجی آبخوان آبرفتی نیشابور از سال ۱۳۶۵ اندازه‌گیری شده است و در حال حاضر در این شبکه ۵۷ حلقه چاه مشاهده‌ای وجود دارد. مطالعات علی‌پور (۱۳۹۰)، متوسط آبدی ویژه (S_y) آبخوان نیشابور را ۱۰/۲ درصد و متوسط ضخامت لایه اشباع آبخوان را ۹۵/۸۵ متر نشان می‌دهد.

اگرچه ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی دشت نیشابور از سال ۱۳۶۶ به تصویب رسید و تا این زمان این محدوده جزو دشت‌های ممنوعه کشور محسوب می‌شود، اما افزایش جمعیت و به تبع آن توسعه کشاورزی در کنار محدودیت منابع آب سطحی و وقوع خشکسالی‌های اخیر، موجب بهره‌برداری هرچه بیشتر از آب‌های زیرزمینی گردیده، به‌طوری‌که منابع تغذیه‌کننده دشت جوابگوی میزان تخلیه نبوده و هر ساله شاهد افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت نیشابور می‌باشیم. بررسی آمار برداری‌های انجام شده در دشت نیشابور نشان می‌دهد که با گذشت زمان (از سال ۱۳۴۷ تا سال ۱۳۸۱) تعداد چاه‌های حفر شده به تدریج افزایش یافته و میزان بهره‌برداری از چاه‌ها در کل دوره آماری افزایش چشمگیر داشته‌است. به عنوان مثال تعداد چاه‌ها از ۳۰۶ حلقه در سال ۱۳۴۷ به ۲۶۱۴ حلقه در سال ۱۳۸۱ (بیش از ۸ برابر) و میزان بهره‌برداری از چاه‌ها از ۱۷۶ به ۹۹۲/۷۸ میلیون مترمکعب در سال (بیش از ۵ برابر) افزایش یافته‌است. در سال ۱۳۸۱، از تعداد ۲۶۱۴ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق، ۹۳۴ دهانه چشمه و ۹۲۶ رشته قنات آماربرداری شده و کل تخلیه سالانه آنها ۱۱۸۴/۱ میلیون مترمکعب در سال اندازه‌گیری شده‌است. از کل آب استحصالی از چاه‌ها، حدود ۹۶/۳۵ درصد در بخش کشاورزی، ۳/۱ درصد در بخش شرب و ۰/۵۵ درصد در بخش صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌است. بررسی آخرین آمارها نشان می‌دهد، متوسط افت یک‌ساله سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت نیشابور در سال آبی ۸۸-۱۳۸۷،



مجموع ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر = 98.2 m

شکل ۳. نمونه محاسبات تعیین ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر

سه روش مختلف شامل روش کریجینگ (Kriging)، روش وزنی عکس فاصله (Inverse distance weighted) و روش توابع چندجمله‌ای (Spline) برای درون‌یابی مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است انتخاب هر یک از این روش‌ها و ضرایب مربوط به توابع آن، منجر به نتیجه واحدی نمی‌گردد (برای مطالعه بیشتر رجوع شود به Welhan و Chaplot et al., 2006 et al., 2006). پس از انتخاب هر یک از این روش‌ها، درونیابی برای لایه اطلاعاتی متشکل از ۱۹۱ گمانه، انجام و توزیع ریزدانه‌ها در دشت به دست آمد. برای رسیدن به این هدف، محاسبات مربوط به هر روش، در شبکه‌هایی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر و به تعداد ۹۵۶۴ عدد در سطح دشت نیشابور، انجام پذیرفت. سپس با محاسبه تابع جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، تفاوت بین ضخامت لایه‌های ریزدانه در ۴۰ گمانه شاهد، با مقادیر برآورد شده از هر روش درونیابی به دست آمد. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از توابع چند جمله‌ای (Spline) برای بدست آوردن توزیع ضخامت ریزدانه‌ها در سطح دشت منجر به جواب‌های معنی‌داری نمی‌گردد. زیرا علاوه بر داشتن بیشترین مقدار خطا ($RMSE_{Spline} = 24.63$),

وضعیت لایه‌بندی و توزیع ذرات به عملیات اکتشافی گسترده‌ای نیاز دارد.

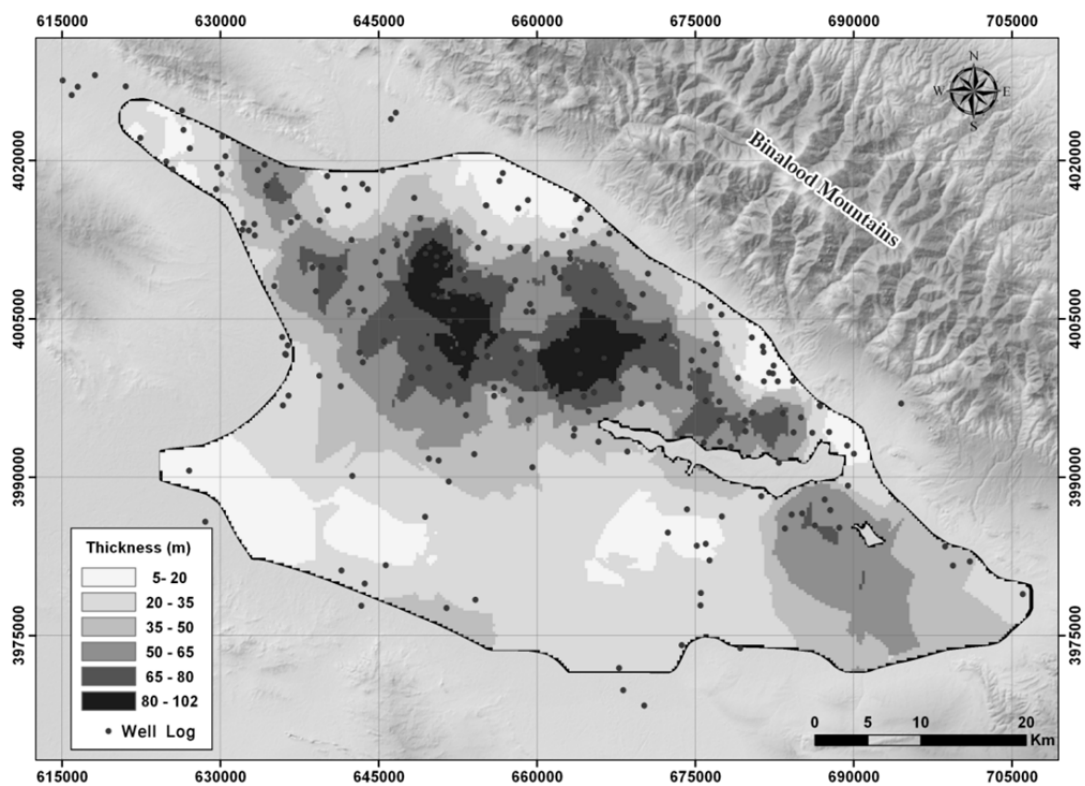
در دشت نیشابور در مجموع اطلاعات ۱۰ چاه اکتشافی در دسترس می‌باشد. علاوه بر آن، تعداد ۲۹۸ گمانه از چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای مورد بررسی قرار گرفت که از این تعداد ۲۲۱ عدد، که به لحاظ عمق حفاری به سنگ کف نزدیک‌تر بوده و کیفیت داده‌های آن‌ها مناسب تشخیص داده‌شد، جهت تعیین توزیع ریزدانه‌ها در دشت مورد بررسی قرار گرفت.

روش تعیین ضخامت قشر ریزدانه در هر گمانه به این صورت است که برحسب مواد تشکیل دهنده خاک، درصدی از ضخامت هر لایه، به مواد ریزدانه تراکم‌پذیر اختصاص داده شد. انتخاب این درصدها برای تعداد محدودی از چاه‌های دشت و همچنین چاه‌های اکتشافی به استناد منحنی دانه‌بندی امکان‌پذیر بود و برای سایر چاه‌های فاقد منحنی دانه‌بندی، از اظهار نظر تیم حفار در پروفیل چاه استفاده گردید. به‌عنوان مثال درصد رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر، برای رس و سیلت ۹۰٪، شن، ماسه و کمی رس ۲۰٪، مخلوط رس، سیلت و ماسه ۶۰٪ و ... تخمین زده شد. سپس درصد ریزدانه هر نوع خاک در ضخامت همان لایه ضرب شده و حاصل جمع اعداد، معادل با ضخامت ریزدانه‌ها در محل چاه معرف هر منطقه، در نظر گرفته شد. روش کار برای یکی از گمانه‌های مورد بررسی به صورت شماتیک در شکل ۳ ارائه شده است.

از آنجا که اطلاعات حاصل از هر گمانه، ضخامت ریزدانه‌ها در همان محل را ارائه می‌دهد، برای تعیین نقشه پراکندگی ریزدانه‌ها در محدوده دشت، از روش درونیابی استفاده گردید. برای این کار، اطلاعات مربوط به موقعیت هر گمانه به همراه مجموع ضخامت لایه‌های ریزدانه‌های موجود در آن، برای ۱۹۱ چاه بهره‌برداری و مشاهده‌ای، وارد لایه اطلاعاتی GIS گردید. اطلاعات مربوط به ۴۰ گمانه دیگر شامل ۱۰ چاه اکتشافی به همراه ۳۰ چاه بهره‌برداری (که در سطح دشت از پراکندگی خوبی برخوردار بودند)، برای صحت‌سنجی محاسبات درونیابی، در لایه جداگانه‌ای گنجانده شد.

کریجینگ، به عنوان مناسب ترین روش درون یابی تشخیص داده شد. در نهایت برای رسیدن به حداکثر دقت و استفاده از تمام داده های موجود، محاسبات درون یابی برای ۲۳۱ گمانه با روش کریجینگ مجدداً تکرار گردید. نقشه حاصل که معرف پراکندگی مجموع ضخامت لایه های ریزدانه در سطح آبخوان دشت نیشابور می باشد، در شکل ۴ نشان داده شده است.

در برخی نقاط شبکه مقادیر منفی نیز مشاهده گردید. روش وزنی عکس فاصله نیز اگرچه منجر به پاسخ بهتری نسبت به توابع چندجمله ای گردید ($RMSE_{IDW} = 20.53$)، اما روش کریجینگ با اختلاف ناچیزی نسبت به روش وزنی عکس فاصله، حداقل خطا را در به دست آوردن پراکندگی ریزدانه ها، در پی داشت ($RMSE_{Kriging} = 20.14$). در نتیجه روش



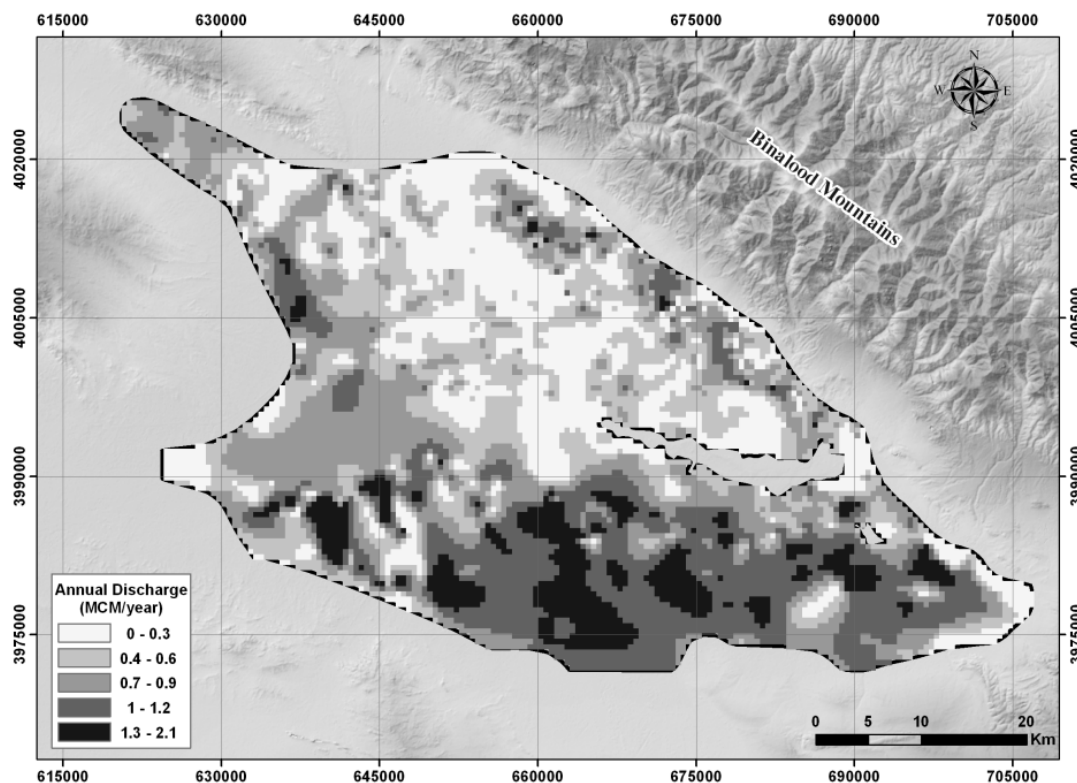
شکل ۴. توزیع ضخامت لایه های ریزدانه در سطح آبخوان دشت نیشابور

مترمکعب)، مطابق شکل ۵ تهیه گردید. مقایسه شکل های ۴ و ۵ گویای این مطلب است که کمترین میزان تخلیه به طور عمده در نواحی دیده می شود که ضخامت ریزدانه ها بیشترین مقدار را دارد. در برخی از نواحی بسیار محدود، مقایسه نقشه ها نشان می داد که مقادیر دبی تخلیه و ضخامت ریزدانه ها قابل توجه است. رجوع به گمانه های مربوط به این چاه ها، نشان داد که در این نواحی، ریزدانه ها یا عمدتاً به صورت عدسی های رسی در محیط خاک های درشت دانه (و نه به صورت مخلوط) بوده و یا بیشتر در لایه های تحتانی دشت و نزدیک به سنگ بستر یافت می شوند. ارتباط منطقی بین شکل های ۴ و ۵ تأیید کننده

تأثیر لایه های ریزدانه بر آبدهی چاه های دشت نیشابور معمولاً در مناطقی که بافت آبخوان ریزدانه تر است، کم بودن هدایت هیدرولیکی، بر آبدهی چاه ها تأثیر مستقیم خواهد گذاشت. برای تحقیق این موضوع، نقشه به دست آمده از توزیع ریزدانه ها در سطح دشت با میزان پمپاژ آب از چاه های واقع در آن مقایسه شده است. برای این کار، اطلاعات دبی برداشت از چاه های دشت نیشابور، به استناد آماربرداری سال آبی ۸۱-۸۲، وارد محیط GIS شده و نقشه توزیع مکانی میزان تخلیه سالانه از محدوده دشت نیشابور (برحسب میلیون

تبع آن کاهش هدایت هیدرولیکی)، کاهش آبدهی چاه‌ها را شاهد خواهیم بود.

این مطلب است که در سطح آبخوان نیشابور، بین ضخامت ریزدانه‌ها و میزان تخلیه از چاه‌ها، ارتباطی معکوس وجود داشته و با افزایش ضخامت ریزدانه‌ها در عمق آبخوان (و به

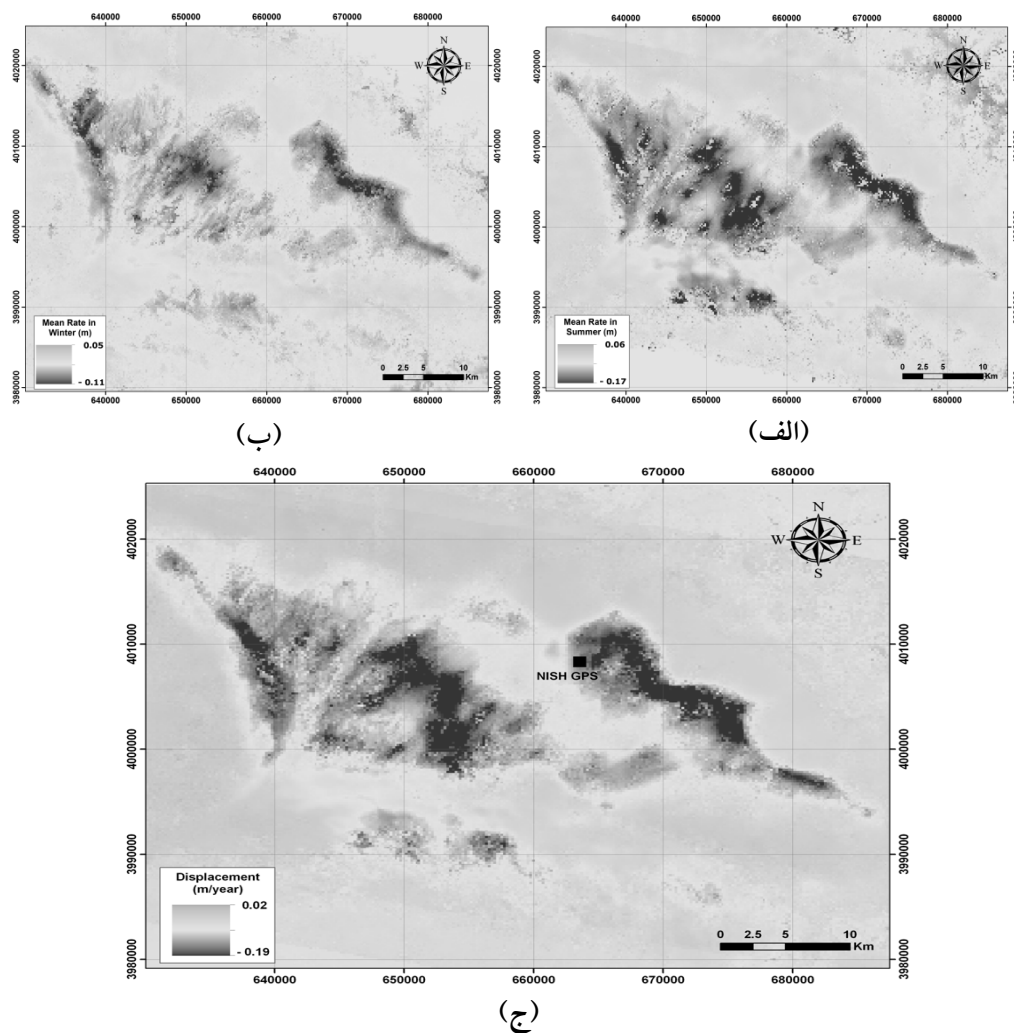


شکل ۵. میانگین تخلیه سالانه از چاه‌های محدوده آبخوان دشت نیشابور، براساس آماربرداری سال ۸۱-۸۲

تحلیل ۱۴ تصویر راداری خام ENVISAT ASAR، در بازه‌های زمانی ۲۰۰۴/۰۱/۱۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۰۵ (دی‌ماه ۱۳۸۲ تا آبان‌ماه ۱۳۸۴) نقشه نرخ نشست فصلی و سالانه دشت نیشابور را ارائه دادند. نتایج حاصل بیش‌ترین نرخ نشست موضعی را ۱۹ سانتی‌متر در سال نشان می‌دهد. در شکل ۶ نرخ نشست در فصول تابستان (تخلیه) و زمستان (تغذیه) و همچنین متوسط نرخ نشست سالانه دشت نیشابور ارائه شده‌است. مقایسه شکل‌های (۶-الف و ب) نشان می‌دهد، رفتن از فصول تخلیه به تغذیه، تنها بر کاهش حداکثر سرعت نشست از ۱۷ به ۱۱ سانتی‌متر در سال، تأثیر داشته‌است (Dehghani et al., 2009).

تأثیر لایه‌های ریزدانه بر نشست دشت نیشابور

اندازه‌گیری‌های اولیه نشست دشت نیشابور مربوط به ترازیابی انجام شده در حدفاصل سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ بوده که بیش‌ترین نرخ نشست سالانه را در امتداد مسیر ترازیابی، حدود ۱۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد (آمیغ‌پی و همکاران، ۱۳۸۸). بعد از آن ایستگاه سیستم مکان‌یابی جهانی نیشابور (NISH GPS) است که ثبت داده‌های آن از سال ۲۰۰۵ آغاز شده و تا پایان سال ۲۰۱۱، نشستی معادل ۵۸ سانتی‌متر (متوسط نرخ ۹/۶ سانتی‌متر در سال) را نشان می‌دهد. (Dehghani et al., 2009) به منظور بررسی مکانی و زمانی نشست دشت نیشابور از روش تداخل سنجی راداری استفاده کردند. آن‌ها به کمک



شکل ۶. نقشه نرخ نشست در الف: تابستان - فصل تخلیه، ب: زمستان - فصل تغذیه و ج: سالانه (برگرفته از Dehghani et al., 2009، همراه با تغییر)

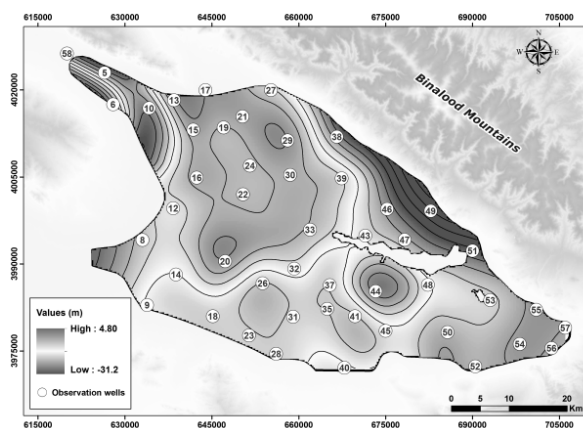
ساله (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۴) و ۱۰ ساله (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹) تهیه گردید که حاصل آن در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه نقشه‌های هم‌افت سطح آب در بازه‌های زمانی ۵ و ۱۰ ساله به روشنی نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، افت سطح آب در دشت نیشابور، از یک الگوی کلی پیروی کرده و همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، این الگو متناسب با مقدار پمپاژ از چاه‌های سطح دشت بوده است. بنابراین، با توجه به اینکه نقشه نرخ نشست سالانه دشت را در اختیار داریم، تقریباً با ثابت بودن روند افت سطح آب، انتظار می‌رود نشست درازمدت دشت نیز از الگویی مشابه با شکل ۶- ج پیروی کند.

از مقایسه نقشه‌های میانگین نشست سالانه و هم‌افت در کنار نقشه پراکنده‌ی ریزدانه‌ها در دشت، می‌توان دریافت مناطق

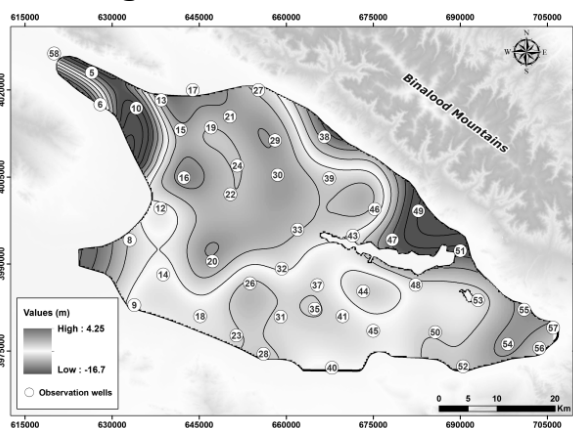
مقایسه نقشه توزیع ضخامت ریزدانه‌ها (شکل ۸)، با نقشه میانگین نشست سالانه دشت (شکل ۶- ج)، نشان می‌دهد، در عمده مناطقی که ضخامت ریزدانه‌ها قابل توجه است، نشست ثبت شده و یا به عبارتی پتانسیل نشست ناشی از تحکیم رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر، زیاد می‌باشد. با مراجعه به رابطه ۴- ب می‌توان دریافت، مقدار تراکم ناشی از تحکیم رسوبات ریزدانه، علاوه بر ضخامت آن‌ها، به افزایش تنش مؤثر نیز بستگی داشته، که خود نیز تابع افت سطح آب می‌باشد. برای بررسی وابستگی نشست دشت نیشابور، با دو عامل افت سطح آب و ضخامت لایه‌های ریزدانه، ابتدا نقشه هم‌افت سطح آب، به استناد داده‌های ۴۶ عدد از چاه‌های مشاهداتی واقع در محدوده شبکه تیسین دشت نیشابور، برای بازه‌های زمانی ۵

نسبت به سایر نقاط، میزان نشست بیشتری را شاهد هستیم.

مستعد نشست، در نقاطی واقع شده‌اند که در آن‌ها تراکم ریزدانه‌ها بیشتر است، به طوری که با مقدار افت سطح آب کمتر



(ب)



(الف)

شکل ۷. نقشه هم‌افت سطح آب در بازه‌های زمانی الف: ۵ ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۴، ب: ۱۰ ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹

از مجموع مطالب فوق نقش دو عامل ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر و افت سطح آب در نشست دشت نیشابور تحقیق گردید. ذکر این نکته ضروری است که با ادامه روند افت سطح آب در سال‌های اخیر، و عبور تنش مؤثر از مرز تنش پیش‌تحکیمی، نشست بوجود آمده در دشت، جزو تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر می‌باشد. ادامه نشست علاوه بر مشکلاتی که در نواحی سطحی ایجاد می‌کند، باعث تراکم و کاهش هدایت هیدرولیکی آبخوان در نواحی ریزدانه‌تر خواهد شد. از آنجا که این مناطق بین نواحی جنوبی و شمالی آبخوان واقع شده‌اند، بر تغذیه نواحی جنوبی آبخوان، از سمت جبهه‌های تغذیه‌کننده اصلی آن، واقع در ارتفاعات شمالی، تأثیر منفی خواهد شد. بنابراین ضروری است نواحی مستعد نشست تعیین گردیده و مدیران صنعت آب و کشاورزی با انجام اقداماتی در جهت کاهش برداشت از آبخوان و حتی ایجاد محدودیت در پمپاژ آب از نواحی مستعد نشست، خطری که منابع آب زیرزمینی دشت را تهدید می‌کند، تا حد امکان کاهش دهند.

۴-۱. تعیین ذخیره ویژه کالبدی رسوبات تراکم‌پذیر

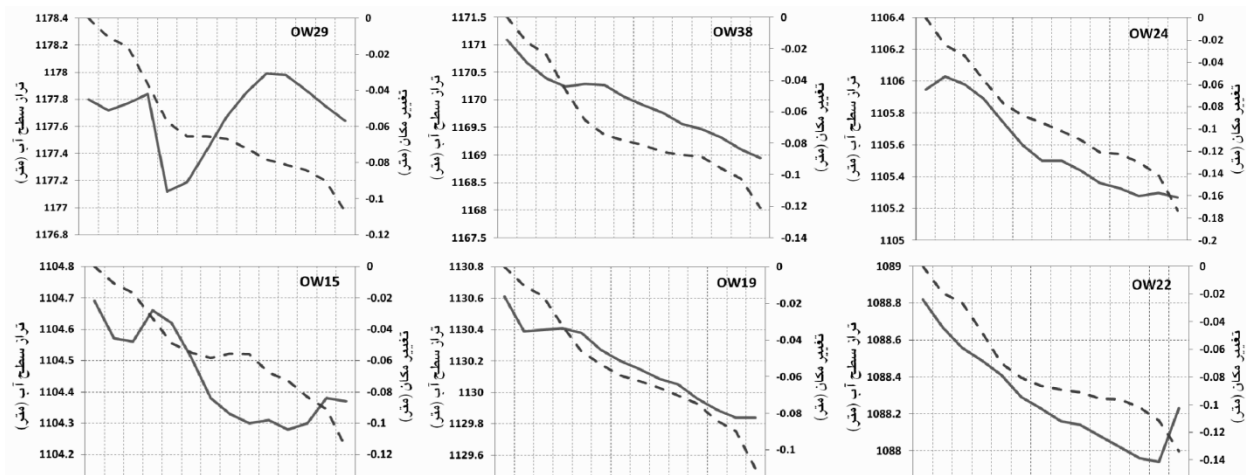
اکنون که در یک بازه زمانی مشخص، وضعیت افت سطح آب، مقادیر نشست و پراکندگی رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر در سطح دشت نیشابور مشخص گردید، با مراجعه به روابط (۴-الف و ب)، می‌توان در خصوص برآورد مقادیر S_{skv} و S_{ske} نتیجه‌گیری کرد. برای محاسبه مقادیر S_{skv} و S_{ske} باید سهم نشست الاستیک و نشست پلاستیک از یکدیگر تفکیک شود. در صورتی که الگوی تغییر شکل در فصول تغذیه و تخلیه رفتاری سینوسی داشته باشد، در فصول تخلیه با کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش تنش مؤثر شاهد پدیده تراکم خواهیم بود، و بالعکس. از رفتار الاستیک خاک در اثر بارگذاری در فصل تخلیه و باربرداری در فصل تغذیه، می‌توان ذخیره ویژه الاستیک کالبد آبخوان (S_{ske}) را استخراج نمود. برای این کار باید در نموداری که محور افقی تغییر مکان و محور قائم تنش مؤثر را نشان می‌دهد، مقادیر تنش (در اثر تغییر سطح آب) در مقابل تغییر مکان ترسیم شود. عکس شیب بهترین خط برازش داده شده بیانگر ذخیره ویژه الاستیک کالبد آبخوان (S_{ske}) خواهد بود (Riley, 1969). اگر در شکل سینوسی منحنی تغییر شکل الاستیک روند (Trend) وجود داشته باشد، این روند نشان دهنده تغییر شکل‌های پلاستیک خاک می‌باشد. در صورتی که روند موجود ناچیز باشد، برای بدست آوردن S_{ske} می‌توان با حذف روند از آن صرف‌نظر کرد.

شکل ۸ سری زمانی تغییرات سطح آب و نشست زمین در محل تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای واقع در نواحی مستعد نشست دشت نیشابور، را نشان می‌دهد. نظر به اینکه اطلاعات نشست در محل این چاه‌ها، در یک بازه زمانی ۲۲ ماهه موجود بود، به جهت مقایسه بهتر، تغییرات تراز سطح آب نیز در همان بازه زمانی ترسیم گردید. بررسی سری زمانی مقادیر سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای دشت نیشابور، بویژه چاه‌های واقع در محدوده نشست، نشان می‌دهد که در بیشتر چاه‌ها، روند شدیدی در افت سطح آب دیده می‌شود، به طوری که نوسانات فصلی سطح آب را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. دلیل آن را می‌توان این‌گونه توضیح داد که با توجه به نزول عمده بارش در ارتفاعات و ریزدانه بودن بافت خاک در نواحی مرکزی دشت، قبل از آنکه جبهه‌های تغذیه از سمت دامنه‌های شمالی تأثیر چشمگیری در سطح آب ایجاد نمایند، به دلیل برداشت بیش از اندازه در فصل بهره‌برداری (بویژه در نوار شمالی دشت)، در عمل فرصت چندانی برای تغذیه ایجاد نمی‌گردد. به عنوان نمونه تراز سطح آب در چاه مشاهده‌ای راه باغرود (چاه شماره ۳۸)، در حداقل سال‌های ۸۰ تا ۸۵ با متوسط افت ۱/۶ متر در سال، روندی کاملاً نزولی داشته است. بررسی روند نشست در کنار تغییرات سطح آب نتایج زیر را به دنبال دارد:

۱- در نواحی مستعد نشست دشت نیشابور، سهم تغییر شکل‌های الاستیک (تراکم و تورم خاک) عمدتاً ناچیز بوده و روند شدید موجود در سری زمانی نشست، نشان دهنده این است که لایه‌های تراکم‌پذیر به کاهش تنش مؤثر ناشی از افزایش سطح آب حساسیت کمی نشان می‌دهند. سری زمانی نشست در محل چاه‌های مشاهده‌ای ۲۹ و ۱۵ گویای این مطلب است که در فصول تخلیه، افزایش نرخ نشست و در فصول تغذیه تنها کاهش نرخ نشست را شاهد هستیم. این در حالی است که اگر تراکم لایه‌های ریزدانه در محدوده الاستیک رخ داده باشد، با افزایش سطح آب و کاهش تنش مؤثر می‌بایست شاهد تورم خاک باشیم. مراجعه به نقشه نرخ نشست در فصول تغذیه و تخلیه دشت، شکل ۶، تأیید می‌کند که در عمده نواحی مستعد نشست، با رسیدن به فصل تغذیه تنها از نرخ نشست کاسته شده است.

۲- اگر در سیستم آبخوان مجموعه‌ای از میان لایه‌های ریزدانه با ضخامت کم وجود داشته باشد، تراکم و تورم ناشی از کاهش و افزایش سطح آب، کاملاً مشهود خواهد بود. اما زمانی که سهم لایه‌هایی ضخیم از رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر در سیستم آبخوان افزایش می‌یابد، تغییر فشار منفذی ناشی از تغییر سطح آب به‌طور هم‌زمان در فضای ریزدانه‌ها منتشر نمی‌شود. می‌توان گفت در این نقاط نقش هدایت هیدرولیکی قائم لایه‌های ریزدانه ضخیم (K_v) در انعکاس دیر هنگام تغییرات آبی یا فصلی تراز سطح آب به بافت ریزدانه قابل توجه است. نتیجه آن است که تنها روند درازمدت یا سالانه تغییرات سطح آب (که در نواحی تراکم‌پذیر دشت نیشابور عمدتاً نزولی می‌باشد)، بر روی نرخ نشست دشت تأثیرگذار خواهد بود.

۳- با حذف روند از سری زمانی نشست، می‌توان سهم لایه‌های ریزدانه نازک و ضخیم را از نشست کلی دشت بدست آورد. همان‌طور که گفته شد، معمولاً رفتار الاستیک خاک تحت تأثیر نوسانات فصلی (توأم با تورم و تراکم) بیشتر در لایه‌های ریزدانه نازک دیده می‌شود. شیب زیاد و نوسانات فصلی ناچیز سری زمانی نشست در شکل ۸، نشان می‌دهد که سهم رفتار پلاستیک خاک بسیار بیشتر از رفتار الاستیک آن بوده است. از طرفی با توجه به اینکه مقدار S_{ske} در تغییر شکل الاستیک، حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر کوچکتر از S_{skv} در تغییر شکل پلاستیک می‌باشد، می‌توان از سهم نشست الاستیک در مقایسه با نشست پلاستیک صرف نظر کرد. این موضوع برای عمده نواحی مستعد نشست دشت نیشابور که در بازه چندین ساله بطور پیوسته دچار افت سطح آب گردیده، دور از واقعیت نیست. بنابراین با مراجعه به رابطه ۴-الف می‌توان در یک بازه زمانی مشخص، با داشتن افزایش تنش مؤثر ناشی از افت سطح آب، مقدار نشست ثبت شده (نرخ سالانه نشست) و مجموع ضخامت لایه‌های ریزدانه، مقدار S_{skv} را در نواحی تراکم‌پذیر محاسبه کرد.



شکل ۸. تغییرات تراز سطح آب (—) و نشست زمین (---) در محل ۶ چاه مشاهده‌ای واقع در محدوده نشست دشت نیشابور برای بازه زمانی از ۲۰۰۴/۱ تا ۲۰۰۵/۱۱ (آبان ماه ۱۳۸۴)، (داده‌های نشست برگرفته از (Dehghani et al., 2009)).

مشاهده‌ای واقع در محدوده نشست، در جدول ۱ ارائه گردیده‌است. هنگام استفاده از رابطه ۳-الف، برای انتخاب مقادیر متوسط تخلخل آبخوان (n)، به نتایج تحقیقات (Morris and Johnson, 1967) مراجعه شد. آنها با انجام آزمایش‌های متعدد، مقدار متوسط تخلخل را برای سیلت و رس به ترتیب ۴۶٪ و ۴۲٪ و برای شن و ماسه با دانه‌بندی متوسط به ترتیب ۳۹٪ و ۳۲٪ پیشنهاد دادند. بنابراین با توجه به عدم وجود تعداد قابل قبولی منحنی دانه‌بندی در سطح آبخوان دشت نیشابور، با پذیرش کمی تقریب، مقدار متوسط تخلخل آبخوان ۰/۴ و سهم رطوبت خاک از واحد حجم ناحیه غیر اشباع برابر ۰/۱ فرض گردیده است.

برای محاسبه مقادیر ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان (S_{skv})، با مراجعه به هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای واقع در محدوده نشست، مقادیر افت سطح آب در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۴ تا نوامبر ۲۰۰۵ برداشت گردید. لازم به ذکر است چون هدف محاسبه ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان می‌باشد، و از آنجا که در تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر، افزایش سطح آب فقط موجب کاهش (یا توقف) نرخ نشست می‌گردد (شکل ۸)، هنگام استفاده از رابطه ۴-الف تنها می‌بایست بر روی افزایش تنش مؤثر ناشی از افت سطح آب تمرکز کرد. بنابراین برای محاسبه مقادیر افزایش تنش مؤثر (از رابطه ۳-الف)، مقدار Δh_{wt} با مجموع افت‌های سطح آب در بازه زمانی نشست مشاهداتی، برابر خواهد بود. نتایج حاصل برای ۸ چاه

جدول ۱. محاسبه S_{skv} در محدوده چاه‌های مشاهده‌ای واقع در نواحی تراکم‌پذیر آبخوان دشت نیشابور

شماره چاه‌های مشاهده‌ای	تغییر مکان محاسبه شده* (m)	ضخامت رسوبات تراکم‌پذیر (m)	افت سطح آب	افزایش تنش مؤثر	ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان ($S_{skv}(m^{-1})$)	
15	-0.116	44.3	1.21	8306	3.09×10^{-3}	
16	-0.088	61.8	2.65	18190	7.70×10^{-4}	
19	-0.110	60.5	0.96	6590	2.71×10^{-3}	
22	-0.133	73.9	1.45	9953	1.78×10^{-3}	
24	-0.173	85.2	1.20	8237	2.42×10^{-3}	
29	-0.107	50.3	1.34	9198	2.27×10^{-3}	
30	-0.079	53.3	8.39	57591	2.50×10^{-4}	
38	-0.121	45.7	3.45	23681	1.10×10^{-3}	
* مقادیر نشست برگرفته از (Dehghani et al. 2009)					میانگین	1.80×10^{-3}
					انحراف از معیار	1.00×10^{-3}

است، تفاوت تاریخیچه افت سطح آب، می‌تواند تفاوت در مقدار S_{skv} را به دنبال داشته باشد.

۵- در استفاده از روش ارائه شده برای برآورد S_{skv} ، چندین عامل را می‌توان به عنوان منابع ایجاد خطا نام برد که از آن جمله می‌توان به عدم قطعیت در برآورد ضخامت لایه‌های تراکم‌پذیر (به دلیل عدم شناخت دقیق جنس و لایه‌بندی خاک) و خطاهای اندازه‌گیری نشست و فرض هم‌زمانی تغییرات سطح آب و نشست لایه‌های تراکم‌پذیر ضخیم، در بازه زمانی مورد مطالعه، اشاره کرد.

۴-۲. تعیین مقادیر ذخیره ویژه کالبدی در محدوده دشت

نیشابور

تعیین مقادیر صحیح ذخیره ویژه الاستیک و پلاستیک کالبد آبخوان، یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی نشست می‌باشد. علاوه بر راهکاری که برای محاسبه ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان در دشت نیشابور مورد استفاده قرار گرفت، استفاده از چهار روش؛ ۱- آزمایش پمپاژ(عمدتاً برای تعیین ضریب ذخیره رسوبات درشت‌دانه آبخوان)، ۲-تحلیل تنش کرنش با استفاده از داده‌های اکستنسومتر، ۳- آزمایش تحکیم و ۴- نتایج حاصل از واسنجی مدل‌های نشست، برای تعیین S_{skv} مرسوم می‌باشد.

استفاده از روش آزمایش تحکیم برای تعیین S_{skv} ، نیازمند صرف هزینه زیاد و انجام تعداد قابل توجهی آزمایش بر روی ریزدانه‌های واقع در نقاط مختلف دشت می‌باشد. از آنجا که مقدار S_{skv} با افزایش عمق، کاهش می‌یابد (Leake and Galloway, 2010) در یک مکان مشخص، مقدار حاصل از یک نمونه، معرف متوسط این پارامتر برای آن ناحیه نخواهد بود و ممکن است انجام آزمایش‌های بیشتر بر روی نمونه‌های واقع در اعماق مختلف نیز مورد نیاز باشد. روش‌هایی که برپایه تحلیل تنش-کرنش و واسنجی مدل‌های نشست با استفاده از داده‌های اکستنسومتر استوارند، اگر چه دقت خوبی دارند، ولی تعیین میزان پراکندگی این پارامترها در نقاط مختلف دشت تابع افزایش تعداد اکستنسومترها می‌باشد.

نکات ذیل نقش عوامل تأثیرگذار در محاسبه S_{skv} را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۱- همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به دلیل اینکه سری زمانی نشست در فصول مختلف تغذیه و تخلیه، روندی نزولی دارد و به دلیل ناچیز بودن تغییر شکل‌های الاستیک، در فرآیند محاسبه S_{skv} از سهم تغییر شکل‌های الاستیک صرف‌نظر گردید. بنابراین با قبول کمی تقریب، سهم ذخیره ویژه الاستیک کالبد آبخوان (S_{ske}) که ده‌ها برابر از S_{skv} کوچک‌تر است) در مقدار محاسبه شده S_{skv} ، به صورت پنهان باقی مانده‌است.

۲- رابطه ۶-ب نشان می‌دهد که S_{skv} با تنش مؤثر نسبت عکس داشته و با افزایش عمق از مقدار آن کاسته می‌شود. همچنین مقدار این عامل برای لایه‌های ضخیم رسوبات ریزدانه، بیشتر از لایه‌های نازک‌تر می‌باشد (Sneed and Galloway, 2000). بنابراین S_{skv} محاسبه شده برای هر نقطه از آبخوان، در حقیقت مقدار متوسط آن برای ریزدانه‌های تراکم‌پذیر واقع در تمام عمق آبخوان خواهد بود.

۳- در اثر افت سطح آب، درصد تغییر تنش مؤثر، برای رسوبات تراکم‌پذیری که در لایه‌های سطحی و عمیق آبخوان قرار دارند، به یک اندازه نخواهد بود. به عبارت دیگر مقدار تنش مؤثر برای رسوبات تراکم‌پذیر واقع در لایه‌های بالاتر، کمتر از رسوبات واقع در لایه‌های عمیق‌تر است و در اثر افت سطح آب، رسوبات واقع در لایه‌های بالایی درصد بیشتری تغییر در تنش مؤثر را تجربه خواهند کرد. بنابراین نحوه توزیع عمقی رسوبات تراکم‌پذیر در نقاط مختلف می‌تواند باعث ایجاد تفاوت در مقادیر S_{skv} گردیده و نرخ نشست در اعماق مختلف و به تبع آن در نواحی مختلف را تغییر دهد.

۴- با تداوم افت سطح آب و افزایش تنش مؤثر وارد بر رسوبات تراکم‌پذیر، از مقدار S_{skv} کاسته می‌شود. بنابراین مقدار S_{skv} تابع زمان نیز خواهد بود و برای دو نقطه که توزیع قائم و ضخامت رسوبات تراکم‌پذیر در آن‌ها یکی

محاسبه نمود. نقشه حاصل که پراکندگی S_{skv} در سطح آبخوان دشت نیشابور را نشان می‌دهد، در شکل ۹ ارائه گردیده است.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نشست‌های دائمی به عواملی نظیر ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر، ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان، افت سطح آب و در نتیجه افزایش تنش مؤثر، بستگی دارد. در این تحقیق چگونگی توزیع ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر و محاسبه ذخیره ویژه کالبدی رسوبات ریزدانه در حالت پلاستیک برای آبخوان دشت نیشابور، مورد بررسی قرار گرفت.

برای محاسبه توزیع مکانی ریزدانه‌ها، روش‌های درونیابی $Spline$ ، $Kriging$ و IDW بررسی گردید و روش $Kriging$ با داشتن کمترین خطا برای تخمین ضخامت رسوبات ریزدانه در نقاط شاهد، به عنوان روش منتخب مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نقشه پراکندگی رسوبات ریزدانه با میزان آبدهی سالانه چاه‌های واقع در دشت نیشابور، ارتباط منطقی بین افزایش ضخامت ریزدانه‌ها با کاهش میزان آبدهی چاه‌ها را نشان می‌دهد. این موضوع تأثیر رسوبات ریزدانه در کاهش هدایت هیدرولیکی آبخوان و کاهش آبدهی چاه‌ها را اثبات می‌کند.

بررسی روند تغییر شکل‌های زمین در فصول تغذیه و تخلیه و در محل چاه‌های مشاهده‌ای واقع در محدوده نشست، نشان داد که تراکم آبخوان عمدتاً در نتیجه تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر بوده و سهم تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر ناچیز می‌باشد. لذا با صرف‌نظر از تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر، به استناد نقشه‌های نرخ سالانه نشست (حاصل از تصاویر ماهواره‌ای InSAR) و نقشه‌های هم‌افت سطح آب، روشی مبتنی بر آنالیز تنش- کرنش برای تعیین مقادیر S_{skv} برای رسوبات ریزدانه محدوده آبخوان دشت نیشابور ارائه گردید.

ذخیره ویژه الاستیک کالبد آبخوان (S_{ske}) را می‌توان از رفتار الاستیک خاک در اثر بارگذاری (در فصل تخلیه) و باربرداری (در فصل تغذیه)، استخراج نمود. بررسی سری زمانی سطح آب در چاه‌های واقع در محدوده نشست، نشان داد که در بیشتر چاه‌ها، روند شدیدی در افت سطح آب دیده می‌شود،

در این قسمت با تعمیم راهکار ارائه شده برای محاسبه ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان، مقادیر S_{skv} در سطح آبخوان دشت نیشابور محاسبه گردیده است. روش معرفی شده در این تحقیق ما را قادر می‌سازد تا با استفاده از نقشه میانگین نرخ دشت (حاصل از تصاویر ماهواره‌ای) و معادله خطی ۴-ب، مقادیر S_{skv} را در سطح دشت محاسبه نماییم. برای محاسبه مقادیر S_{skv} در سطح آبخوان دشت نیشابور، به ترتیب زیر عمل گردید:

۱- در هر نقطه متوسط نشست سالانه از روی نقشه نرخ سالانه نشست در بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۴ (Dehghani et al., 2009) به دست آمد. بدیهی است هر چه تعداد بیشتری از این نقشه‌ها در ماه یا سال‌های مختلف تهیه گردد، برقراری ارتباط منطقی بین نشست و افت سطح آب و در نتیجه برآورد مقادیر S_{skv} با دقت بهتری صورت می‌پذیرد. از آنجا که روند افت سطح آب در دشت نیشابور در سال‌های مختلف تقریباً از یک الگوی ثابت پیروی کرده است (اشکال ۷-الف و ب)، با قبول کمی تقریب، وجود نقشه میانگین نشست در یک سال نمونه، در کوتاه مدت تأثیر قابل توجهی در دقت نتایج حاصل نخواهد داشت.

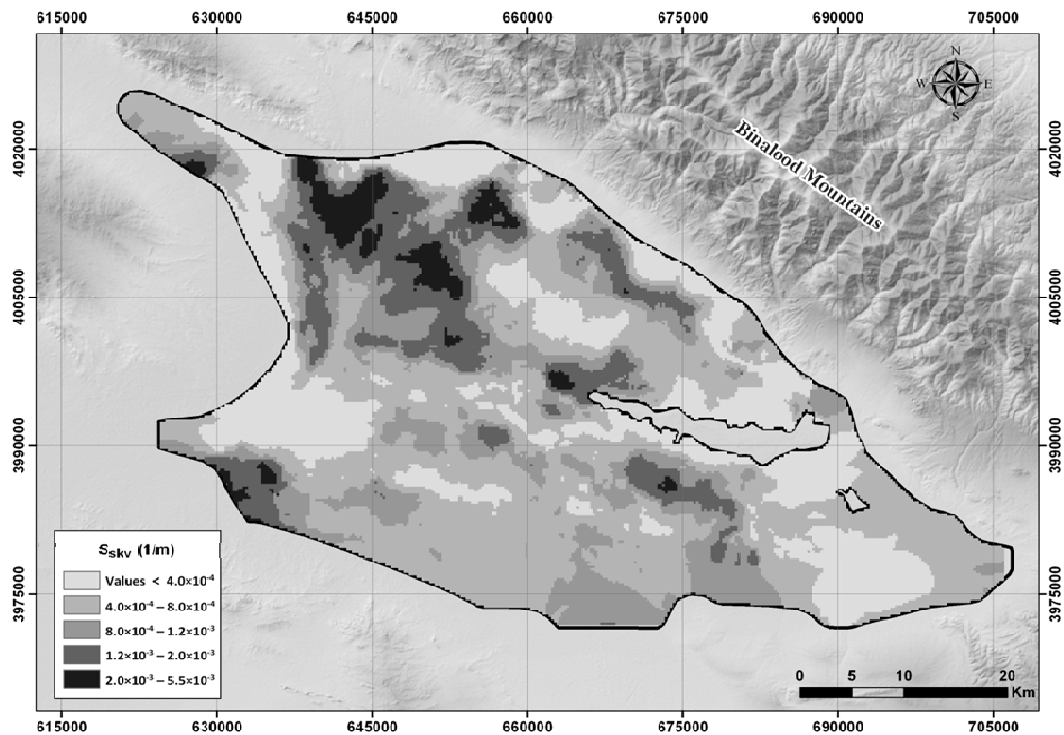
۲- ضخامت لایه‌های ریزدانه تراکم‌پذیر، در نقاط مختلف آبخوان دشت نیشابور، براساس آنچه در بخش ۴-۱ اشاره گردید، محاسبه شده است.

۳- افزایش تنش مؤثر ناشی از افت سطح آب در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۰۵، به استناد تغییرات ماهانه سطح آب در محل چاه‌های پیژومتری دشت نیشابور محاسبه و با انجام درونیابی برای تمام محدوده مورد مطالعه محاسبه گردید. یادآوری می‌گردد، با توجه به کوچک بودن مقدار S_{ske} در مقایسه با S_{skv} و تأکید بر وقوع تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر در محدوده دشت نیشابور، از اثرات تورم جزئی ناشی از افزایش مقطعی سطح آب، صرف‌نظر گردیده است.

در نهایت با استفاده از رابطه خطی ۴-ب، می‌توان برای هر یک از نقاط محدوده مورد مطالعه، مقدار پارامتر مجهول S_{skv} را

ناچیز سری زمانی نشست، نشان داد که سهم رفتار پلاستیک خاک بسیار بیشتر از رفتار الاستیک آن بوده است. از طرفی با توجه به کوچک بودن مقدار S_{ske} در مقایسه با S_{skv} ، از سهم نشست‌های الاستیک در مقایسه با نشست‌های پلاستیک صرف نظر گردید.

به طوری که سهم نوسانات فصلی سطح آب، در مقایسه با روند نزولی سطح آب ناچیز می‌باشد. روند شدید موجود در سری زمانی نشست، نشان دهنده این است که لایه‌های تراکم‌پذیر نسبت به کاهش تنش مؤثر ناشی از افزایش سطح آب حساسیت کمی نشان می‌دهند. شیب زیاد و نوسانات فصلی



شکل ۹. نقشه پراکندگی مقادیر ذخیره ویژه پلاستیک کالبد آبخوان (S_{skv})، در محدوده آبخوان دشت نیشابور

تا شناسایی رفتار آبخوان در مقابل تغییرات تنش مؤثر، با دقت بیشتری صورت پذیرد. از آنجا که تدقیق تصاویر ماهواره‌ای نیازمند نقاط ثبات زمینی می‌باشد، افزایش تعداد ایستگاه‌های GPS دشت نیشابور، می‌تواند افزایش دقت نتایج حاصل را به دنبال داشته باشد.

۵. تشکر و قدردانی

محققین بر خود لازم می‌دانند از همکاری شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی و سازمان نقشه برداری کشور و همچنین راهنمایی‌های ارزنده آقای Stanley A. Leake، از سازمان زمین‌شناسی آمریکا، قدردانی نمایند.

با توجه به وابستگی S_{skv} با مقدار تنش مؤثر، نحوه توزیع عمقی رسوبات تراکم‌پذیر در نقاط مختلف می‌تواند موجب تفاوت مقادیر S_{skv} گردیده و نرخ نشست در اعماق مختلف و به تبع آن در نواحی مختلف را تغییر دهد. با تداوم افت سطح آب و همگام با افزایش تنش مؤثر وارد بر رسوبات تراکم‌پذیر، از مقدار S_{skv} کاسته می‌شود. بنابراین مقدار S_{skv} تابع زمان نیز خواهد بود و برای دو نقطه که توزیع قائم و ضخامت رسوبات تراکم‌پذیر در آنها یکی است، تفاوت تاریخچه افت سطح آب در نقاط مختلف دشت، می‌تواند تفاوت مقادیر S_{skv} را به دنبال داشته باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد در مدل‌های نشست، اثر گذشت زمان بر روی کاهش مقادیر S_{skv} مدنظر قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، با افزایش تعداد تصاویر راداری، نرخ نشست در ماه‌ها و سال‌های مختلف تهیه گردد،

منابع

- آمیغ پی، م.، عربی، س.، طالبی، ع.، جمور، ی.، ۱۳۸۸. بررسی مناطق نشست خیز ایران براساس داده‌های ترازیابی. مجله نقشه برداری، شماره ۱۰۴.
- علی‌پور، ا.، ۱۳۹۰. تعیین پتانسیل لایه آبدار آزاد با استفاده از ارتباط بین داده‌های ژئوالکتریک و پارامترهای آبخوان (مطالعه موردی: دشت نیشابور). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی- دفتر مطالعات آب‌های زیرزمینی، ۱۳۸۹. گزارش پیشنهاد ممنوعیت دشت نیشابور.
- شریفی‌کیا، م. ۱۳۸۹. بررسی پی‌آمدهای ناشی از پدیده فرونشست در اراضی و دشت‌های مسکونی ایران. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد سوم، شماره ۳ و ۴ (۴۳-۵۸).
- Bouwer, H., 1977. Land Subsidence and Cracking Due to Ground-Water Depletion. *Ground Water*, 15: 358-364.
- Bull, W.B., Poland, J.F., 1975. Land subsidence due to ground-water withdrawal in the Los Banos-Kettleman City area, California, Part 3. Interrelations of water level change, change in aquifer-system thickness, and subsidence: U.S. Geological Survey Professional Paper 437-G, 62 p.
- Burbey, T.J., Warner, S.M., Blewitt, G., Bell, J.W., Hill, E., 2006. Three dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, part 1: analysis of field data. *Journal of Hydrology*, 319(1-4):123-142
- Butler, J. J., 2009. Pumping Tests for Aquifer Evaluation—Time for a Change?. *Ground Water*, 47: 615-617.
- Calderhead, A.I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., Garfias, J., 2011. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34:83-97.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédou, S., Silvera, N., Phachomphon, K., 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, Vol. 77: 126-141.
- Dehghani, M., Hooper, A., Hanssen, R.F., Zoj, M.J.V., Saatchi, S., Entezam, I., 2010. Hybrid conventional and persistent scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in Tehran Basin, Iran. *Proceedings FRINGE Workshop 2009*, Frascati, Italy.
- Dehghani, M., Mansourian, A., Zoj, M.J.V., Entezam, I., Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 178:47-56.
- Faunt, C.C. (Ed), 2009. Ground-water availability of California's Central Valley Aquifer, California. U.S. Geological Survey Professional Paper 1766, 225 p.
- Galloway, D.L. (Ed), 2010. Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development: proceedings. Eighth International Symposium on Land Subsidence, Santiago de Querétaro, Mexico, IAHS publication, no. 339, pp. 61-67
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8):1459-1486.
- Hanson, R.T., 1989. Aquifer-system compaction, Tucson Basin and Avra Valley, Arizona: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 88-4172, 69 p.
- Helm, D.C., 1975. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California 1. Constant parameters: *Water Resources Research*, vol. 11, no. 3, pp. 465-478.
- Helm, D.C., 1976. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California 2. Stress-dependent parameters: *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 375-391.
- Helm, D.C., 1998. Poroviscosity. In: Borchers, J.W. (Ed.), *Land subsidence case studies and current research*. Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence, vol. 8, 4-5 Oct 1995, Sacramento, CA., Association of Engineering Geologists, Special Publication, Star, Belmont, CA., pp. 395-405.
- Hoffmann, J., 2003. The application of satellite radar interferometry to the study of land subsidence over developed aquifer systems. Ph.D. thesis, Stanford University.
- Hoffmann, J., Leake, S.A., Galloway, D.L. & Wilson, A.M., 2003. MODFLOW-2000 ground-water model, user guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package, U.S. Geological Survey Open-File Report 03-233.
- Johnson, A.I., 1984. Laboratory tests for properties of sediments in subsiding areas, part 1, chapter 4, of Poland, J.F., ed., *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*: Paris, UNESCO, Studies and Reports in Hydrology 40, pp. 55-88.

- Jorgensen, D.G., 1980. Relationships between basic soils engineering equations and basic ground-water flow equations: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2064, 40 p.
- Kruseman, G. P., Ridder, N. A. (1990). Analysis and evaluation of pumping test data. ILRI publication, (47).
- Leake, S.A., Galloway, D.L., 2007. MODFLOW ground-water model—User guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction Package (SUB-WT) for water-table aquifers: U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 6–A23, 42 p.
- Leake, S.A., Galloway, D.L., 2010. Use of the SUB-WT Package for MODFLOW to simulate aquifer-system compaction in Antelope Valley, California, USA., Proceedings of EISOLS 2010, Querétaro, Mexico, IAHS Publication. 339, pp. 61-67.
- Leake, S.A., Prudic, D.E., 1991. Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A2.
- Mishra, P.K., 2010. Pumping Test Inference of Saturated/Unsaturated Aquifer Properties. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson.
- Morris, D.A., Johnson, A.I., 1967. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey 1948-1960. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1839-D. 42 p.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.U., Zschau, J., Arabi, S., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168: pp. 518–526.
- Poland, J.F., 1961. The coefficient of storage in a region of major subsidence caused by compaction of an aquifer system, Geological Survey Research 1961: U.S. Geological Survey Professional Paper 424-B, pp. B52–B54.
- Poland, J.F., Davis, G.H., 1969. Land subsidence due to withdrawals of fluids, in Varnes, D.J., Kiersch, G., (Eds.), *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, vol. 2, pp. 187–269.
- Poland, J.F., Lofgren, B.E., Ireland, R.L., Pugh, R.G., 1975. Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1972: U.S. Geological Survey Professional Paper 437-H, 78 p.
- Prudic, D.E., Williamson, A.K., 1986. Evaluation of a technique for simulating a compacting aquifer system in the Central Valley of California, U.S.A., in Johnson, A.I., Carbognin, Laura, and Ubertini, Lucio, (Eds.), *Land subsidence: Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence held in Venice, Italy, Wallingford, Oxfordshire, IAHS Press, Institute of Hydrology, IAHS publication 151*, pp. 53–63.
- Riley, F.S., 1969. Analysis of borehole extensometer data from central California, in Tison, L.J., (Ed.), *Land subsidence: Brussels, IASH–Unesco, International Association of Scientific Hydrology Publication 89*, vol. 2, pp. 423–431
- Riley, F.S., 1998. Mechanics of aquifer systems, The scientific legacy of Dr. Joseph F. Poland, in Borchers, J.W., (Ed.), *Land subsidence case studies and current research: Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence, Association of Engineering Geologists Special Publication, No. 8*, pp. 13–27.
- Riley, F.S., McClelland, E.J., 1971. Application of the modified theory of leaky aquifers to a compressible multiple-aquifer system: *Mechanics of aquifer systems: Analysis of pumping tests near Pixley, California: U.S. Geological Survey Open-File Report*, 96 p.
- Sneed, M., Galloway, D.L., 2000. Aquifer-system compaction and land subsidence: measurements, analyses, and simulations: the Holly site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Report 00–4015.
- Taylor, D.W., 1948. *Fundamentals of soil mechanics*, Wiley, New York, 700 p.
- Terzaghi, K., 1925. Principles of soil mechanics: IV; settlement and consolidation of clay: *Erdbaummechanik*, vol. 95, no. 3, pp. 874–878.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical soil mechanics*: New York, Wiley, 510 p.
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., Panday, S.M., 2010. HydroGeoSphere: a three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport (draft edition 23 July 2010). Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo.
- Welhan, J.A., Farabaugh, R.L., Merrick, M.J., Anderson, S.R., 2006. Geostatistical modeling of sediment abundance in a heterogeneous basalt aquifer at the Idaho National Laboratory, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2006-5316 (DOE/ID-22201), 32 p.
- Yeh, H.D., Huang, Y.C., 2009. Analysis of pumping test data for determining unconfined-aquifer parameters: Composite analysis or not?. *Hydrogeology Journal*, Vol. 17, Issue 5, pp 1133-1147