

## بررسی اثر زهکش حائل شور هزار قزوین بر سطح ایستابی منطقه با استفاده از مدل Seep/w

عباس ستوده نیا<sup>۱\*</sup>، محدثه جعفری<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی و مهندسی
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۲۰)

### چکیده

افت سطح آب زیرزمینی مشکلات زیادی را به همراه دارد که یکی از مهمترین این آن، پیشروی آب زیرزمینی شور به سمت اراضی بالادست در دشت‌ها است. همچنین، کاهش خروج املاح از طریق جریان آب زیرزمینی مشکل دیگری است که رخ خواهد داد. از راه‌های مقابله با این مشکلات، استفاده از زهکش حائل است. پژوهش پیشرو مربوط به طرح پایش و مدل‌سازی زهکش حائلی است که در حاشیه شور هزار مرکزی دشت قزوین و به منظور کنترل و جلوگیری از پیشروی شوری به سمت اراضی بالادست آن احداث شده است. برای پایش اثر این زهکش، تعداد ۹۹ حلقه چاهک مشاهده‌ای در ۹ مقطع عمود بر زهکش (A تا I) حفر شد. در هر مقطع، تعداد هفت چاهک در بالادست و به فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر و چهار چاهک در پایین‌دست و به فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۲۵۰ متری از خط زهکش حفر شد. هر ماه یک بار سطح آب این چاهک‌ها قرائت و یک نمونه آب از هر یک تهیه شد. با انجام آنالیز شیمیایی این نمونه‌ها، تغییرات شیمیایی سفره آب زیرزمینی در اثر وجود زهکش مشخص شد. همچنین، شرایط منطقه تحت تأثیر زهکش با استفاده از بسته نرم‌افزاری Geostudio شبیه‌سازی شد. از مدل Seep/w یکی از مدل‌های این بسته نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی منطقه استفاده شد. مدل عددی مورد استفاده با استفاده از مشاهدات مرداد ماه ۸۹ در مقطع B واسنجی و سپس با آمار برداشت شده در چهار ماه بعد از آن صحت سنجی شد. مقادیر کارایی مدل‌سازی و ضریب تبیین در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۷ بود. همچنین، کارایی مدل‌سازی و ضریب تبیین در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب بیش از ۰/۸۷ و ۰/۹۱ بود که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی است.

واژه‌های کلیدی: پیشروی آب شور زیرزمینی، Geostudio، هدایت هیدرولیکی.

### مقدمه

ایران از جمله کشورهایی است که سطح بزرگی از اراضی آن متأثر از املاح است. آمار دقیق و روزآمدی در مورد گستره زمین‌های شور و ماندابی در ایران وجود ندارد؛ اما، زابلکس در سال ۱۹۸۵ برآورد کرده که حدود ۲۳/۵ میلیون هکتار (۱۴/۲ درصد مساحت کل و ۳۰ درصد مساحت دشت‌ها) از اراضی کشور به نوعی متأثر از فرآیند شوری است. استان‌های خراسان، خوزستان و مازندران دارای بیشترین خاک‌های تحت تأثیر املاح هستند. بیشترین وسعت خاک‌های باتلاقی شور در مازندران، خراسان، خوزستان و سیستان و بلوچستان وجود دارد. از کل ۲۳/۵ میلیون هکتار، ۷/۷ میلیون هکتار آن غیرقابل اصلاح تشخیص داده شده است. در تحقیقی اراضی زهدار بحرانی کشور را ۱/۵ تا دو میلیون هکتار و اراضی زهدار تحت شبکه‌های مدرن آبیاری و زهکشی را حدود ۷۰۰ هزار هکتار برآورد نموده‌اند

( Newsletter of the Committee on Irrigation and Drainage, )

۲۰۰۰). بر این اساس ایران چهارمین کشور دارای اراضی شور، در آسیاست (Azari et al., 2002). از سوی دیگر، رشد جمعیت و نیاز به تأمین منابع غذایی برای آن را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. به همین دلیل، استفاده از منابع آب زیرزمینی در کشور روز به روز در حال افزایش است. در نتیجه، میزان برداشت از آبخوان‌ها بیشتر از تغذیه و سطح جایگزینی سفره شده، سطح آب در سفره زیرزمینی دچار افت خواهد شد.

افت سفره آب زیرزمینی مشکلات بسیاری به همراه دارد که از آن جمله می‌توان به خشک شدن چاه‌های نیمه عمیق و نیاز به حفر چاه‌های عمیق‌تر برای دسترسی به آب، فشردگی خاک و کاهش ضریب ذخیره سفره در اثر نشست خاک در دشت و در نهایت کاهش میزان جریان آب زیرزمینی و کاهش میزان خروجی دشت‌ها اشاره نمود. در پژوهشی تأثیر افت سطح آب زیرزمینی بر کیفیت آن در دشت فریمان تربت‌جام مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس این مطالعات، سفره آب منطقه در

اجرا شده در منطقه شورزار مرکزی قزوین، برای کنترل شوری و جلوگیری از پیشروی آب شور به منطقه بالادست آن است. منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات کشوری در بخشی از استان قزوین و در حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد که شامل حاشیه شورزار قزوین با محدوده جغرافیایی طول شرقی ۳۸۰۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰۰ و عرض شمالی ۳۹۲۰۰۰۰ تا ۳۹۸۰۰۰۰ (برحسب UTM) است. شورزار مرکزی قزوین قسمتی از جنوب شرقی دشت قزوین به مساحت ۶۴۴۰۰ هکتار است که در ۹۵ درصد از اراضی آن شوری عصاره اشباع خاک بیش از ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی در ۷۵ درصد از اراضی آن نزدیک‌تر از ۱/۵ متر سطح خاک است.

توسعه شوری از شورزار به سمت بالادست آن، مشکلاتی به وجود آورده و امکان کشاورزی در برخی از این مناطق را از بین برده است. برای بررسی تغییرات شوری، نقشه شوری خاک منطقه در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۸۵ مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه این دو نقشه نشان داد که در این فاصله زمانی، شوری از سمت شورزار به سمت خارج از آن در حال پیشروی بوده و در هر نقطه نیز بر غلظت آن افزوده شده است. طبق مطالعات ۴۰ سال اخیر، سطح آب سفره زیرزمینی دشت قزوین به علت برداشت بی رویه و کاهش نزولات جوی سال‌های اخیر دچار افت شدید (حدود ۳۰ متر) شده است؛ تا جایی که دشت قزوین جزء دشت‌های ممنوعه بحرانی قرار گرفته است. دشت، کاسه‌ای شکل و شیب آن در انتها ناچیز است. افت سطح آب در دشت در حالی اتفاق افتاده است که افت سطح آب در داخل شورزار ناچیز است. در نتیجه شور شدن دشت نمی‌تواند به دلیل بالابودن سطح ایستایی باشد بلکه علت، افت سفره و قطع جریان سرریز انتهایی دشت و عدم تخلیه نمک است که در انتهای حوضه و اکوسیستم باتلاقی شورزار بیشتر نمایان شده است. همبستگی افت آب و شیب شوری منطقه نیز این نظریه را تأیید می‌کند (Akram and Sotoodehnia, 2011).

با اجرای این زهکش حائل انتظار می‌رود پیشروی شوری متوقف شده، اراضی بالادست زهکش با آبشویی خاک در اثر بارش و جریان آب زیرزمینی و در نتیجه خروج این زهاب به-وسیله زهکش به تدریج اصلاح شوند. زهکش مورد نظر تقریباً موازی خطوط کنتور زمین به طول حدود ۳۰ کیلومتر و دوزنقه-ای شکل احداث شده است. برای پایش اثر زهکش حائل حفر شده در حاشیه شور زار، تعداد ۹۹ حلقه چاهک مشاهده‌ای در ۹ مقطع عمود بر زهکش (A تا I) حفر شد. چاهک‌ها پس از جانمایی با استفاده از دستگاه GPS، به شیوه دستی و با مته کوچک حفر شد. پس از اتمام حفاری، برای باز شدن حفره‌های

سال‌های اخیر ۱/۴۴ متر در هر سال افت نموده است. در مناطق شمالی دشت کیفیت آب زیرزمینی مناسب برای شرب و از نوع بیکربناته بوده و به تدریج به سمت جنوب، در جهت جریان آب زیرزمینی آب سولفات می‌شود (Lashgaripur et al., 2007).

Lashgaripur et al (2009) در بررسی دیگری به بررسی تأثیر افت سطح آب زیرزمینی بر کیفیت آب در دشت رشتخوار پرداختند. این دشت از جمله دشت‌های ممنوعه خراسان رضوی است و از زیر حوضه‌های کویر نمک محسوب می‌شود. آنان در این پژوهش به بررسی ارتباط افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان با تغییرات کیفی ده‌ساله آن با استناد از GIS پرداخته و با بررسی سطح آب زیرزمینی دشت، مطالعه کمی آبخوان را انجام دادند.

برای مدل‌سازی آبخوان‌ها و بررسی کیفی و کمی سفره‌های آب زیرزمینی تاکنون مدل‌های متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است. اغلب شرایط پروژه، نوع داده‌های موجود و توانمندی مدل‌های مختلف، علت برگزیدن هر مدل در هر پروژه بوده است. در پژوهشی اثر عمق ترانشه‌ها در خاک‌های آبرفتی با استفاده از Drainmod شبیه‌سازی شد (Moriasi et al., 2007). در مطالعه‌های دیگر برای بررسی هیدرولیک جریان آب تالاب‌های واقع در دشت‌های شمال فنلاند از مدل Modflow استفاده شد (Ronkanen and Klove, 2008). Honar et al. (2011) مدل Hydrus را برای شبیه‌سازی جریان آب و نفوذ در سیستم آبیاری بارانی استفاده کرد. در پژوهشی دیگر برای ارزیابی و مدل‌سازی تأثیر شبکه‌های ساخت بشر بر هیدرولوژی یک دشت، از مدل Seep/w استفاده شد. در این پژوهش برای ارزیابی نفوذ آب از شبکه‌ها و حل معادله ریچارد به روش Finite Element در یک نهر از مدل Seep/w استفاده شد (Carluer and Marsily, 2004). طی پژوهشی دیگر در ایرلند بر روی آبرفت‌های ریزشی از یک کوه و مهار جابجایی آنها برای مدل‌سازی آب در آن از Seep/w استفاده شد (Dykes et al., 2008).

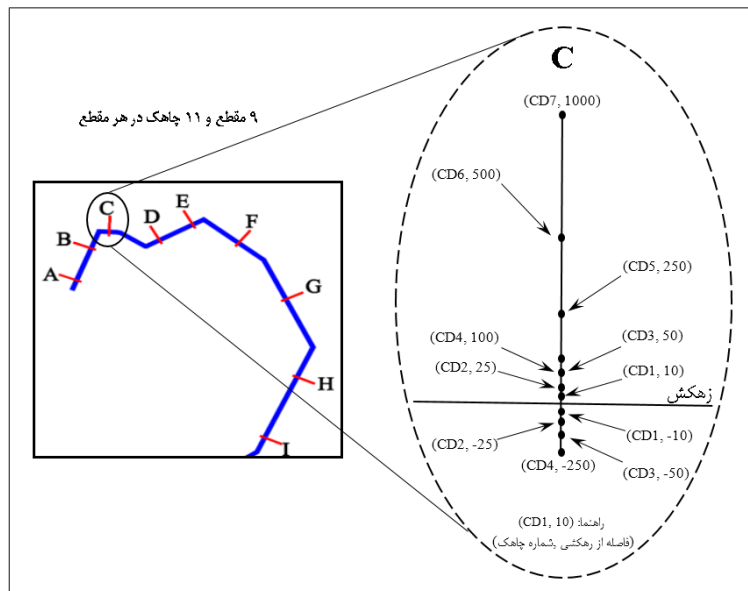
همان‌گونه که مشخص است شبیه‌سازی اثرات سازه‌های آبی گوناگون برای بررسی اثرات کمی و کیفی آن بر شرایط طبیعی منطقه با استفاده از مدل‌ها روشی متداول و منطقی است. در این پژوهش، با استفاده از مدل Seep/w اثر زهکش حائل احداث شده در مجاورت شورزار قزوین بر وضعیت سطح ایستایی منطقه بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

این مطالعات مربوط به طرح پایش و مدل‌سازی زهکش حائل

های پایین‌دست با علامت AD و از شماره ۱ تا ۴ مشخص شده‌اند. عمق چاهک‌های شماره ۶ و ۷ بالادست پنج متر و بقیه چاهک‌ها سه متر است. علت عمیق‌تر بودن این دو چاهک نیز این است که با فاصله گرفتن از زهکش در بالادست، عمق آب بیشتر شده و برای نمونه‌گیری از سفره باید تا عمق بیشتری پایین رفت. هر ماه یک بار سطح آب این چاهک‌ها قرائت می‌شود و از طریق یک بویلر از هر یک از چاهک‌ها یک نمونه آب تهیه می‌شود. با انجام آنالیز شیمیایی این نمونه‌ها، تغییرات شیمیایی سفره آب زیرزمینی در اثر وجود زهکش مشخص می‌شود. نمونه‌برداری از تیر ماه ۱۳۸۹ به مدت ۱۳ ماه انجام شد. شکل (۱) مسیر زهکش و مقاطع چاهک‌ها را بر روی آن نشان می‌دهد.

خاک که بر اثر حفاری بسته شده‌اند، آب داخل چاهک با یک بیلر کوچک تخلیه می‌شود. سپس از لوله پولیکا که انتهای آن با یک گونی پوشش داده شده بود، استفاده شد. تا عمق یک متری، فیلتر ریخته شده و یک متر انتها از خاک خود چاهک پر می‌شد تا دور لوله محکم‌تر شود. سپس شستشو دیواره انجام شد. پس از این مرحله یک درپوش فلزی سوراخ‌دار یک متری روی لوله چاهک نصب می‌شود تا در برخورد احتمالی آسیب نبیند و گل و لای از بالا وارد چاهک نشود. در هر مقطع تعداد هفت چاهک در بالادست و به فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر و در پایین‌دست چهار چاهک به فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۲۵۰ متری از خط زهکش حفر شد چاهک‌های بالادست مقطع A با علامت AU و از شماره ۱ تا ۷ و چاهک-



شکل ۱. مسیر زهکش حائل شورزار قزوین و مقاطع چاهک‌های مشاهده‌ای عمود بر آن

حاضر با توجه به مدل‌های بررسی شده، برنامه Seep/w برای مدل‌سازی شرایط منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. علت این انتخاب، داده‌های مسئله مورد مطالعه و همچنین خصوصیات ویژه این بسته نرم‌افزاری از جمله روش حل عددی مورد استفاده در مدل، حل کاملاً ریاضی و عدم انطباق بر یک منطقه یا اقلیم خاص، عدم وجود پیش‌فرض کشاورزی در منطقه و مقیاس مناسب مدل‌سازی بود. تعریف شرایط مرزی مدل با استفاده از راهنمای مدل صورت گرفت. از آنجا که مدل، یک مدل ژئوتکنیکی است و از ابتدا بر اساس شرایط اطراف سدها، نوشته شده است؛ تعریف مسئله زهکش نیاز به دقت بسیار در پیش‌فرض‌ها و معنی عبارات و قابلیت‌های در نظر گرفته شده با استفاده از مدل دارد. به‌عنوان مثال در مسئله مورد نظر شرایط

پایش زهکش به صورت هم‌زمان انجام شد. داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی زهکش نیز از گزارش شرکت مشاور تهیه شد (Akram, M and Sotoodehnia, A, 2011). داده‌های ورودی مورد نیاز برای مدل‌سازی در ادامه ارائه شده است.

#### مدل Seep/w

مجموعه Geostudio شامل یک گروه نرم‌افزاری است که از این میان مدل Seep/w قادر به شبیه‌سازی حرکت آب در محیط متخلخل خاک است. این مدل بر اساس روش حل عددی عناصر محدود (Finite element) مدل‌سازی را انجام می‌دهد. این برنامه یک مدل کاملاً ریاضی است که برای مسائل ژئوتکنیکی نوشته شده و می‌تواند از مقیاس آزمایشگاهی تا مقیاس‌های بزرگ صحرایی را به‌خوبی مدل‌سازی کند (Krahn, 2004). در پژوهش

ماههای سرد و فصل زمستان صفر در نظر گرفته شد.

### ترسیم شبکه طرح

در ترسیم شبکه و اجزا طرح در مدل، سعی شد فاصله رئوس شبکه در نزدیک زهکش کمتر شود و با نزدیک شدن به زهکش در طول و عرض، اندازه اجزا کوچکتر شده، محاسبات در فواصل کمتری تکرار شد. به این ترتیب در فاصله نزدیک زهکش که تغییرات سطح آب و خطوط جریان بیشتر بود با کم شدن فاصله شبکه‌بندی، دقت محاسبات افزایش یافت.

### مقطع مدل‌سازی شده

پس از بررسی تمام مشاهدات انجام‌شده، مقطع B برای مدل‌سازی شرایط حاکم بر مسئله انتخاب شد. دلایل انتخاب این مقطع، وابسته به شرایط منطقه و تأثیر مورد انتظار زهکش بود. به این ترتیب که مقطع B به علت قرار داشتن در محدوده ابتدایی مسیر زهکش کمتر تحت تأثیر جریان بالادستی زهکش قرار گرفته است. خاک منطقه با توجه به فاصله نسبتاً کوتاه ۱۲۵۰ متری در طول مقطع B (فاصله دورترین چاهک‌ها در بالادست و پایین‌دست زهکش) همگن فرض شده و هدایت هیدرولیکی و میزان رطوبت خاک در طول این فاصله ثابت فرض شد. فرض همگن بودن منطقه در این فاصله توسط نمونه‌های خاک تهیه شده در زمان حفر چاهک‌ها تأیید شد. به‌طوری‌که نوع خاک منطقه در تمام طول مقطع از نوع رسی تا رس ماسه‌ای بود.

### نتایج و بحث

#### واسنجی مدل

عمق لایه محدودکننده، تأثیر معنی‌داری بر هیدرولیک جریان دارد. به طور کلی، جریان آب زیرزمینی قبل از احداث زهکش، از بالادست به سمت انتهای دشت وجود داشته است. پس از احداث زهکش، قسمتی از جریان از بالادست و پایین‌دست زهکش به سمت آن تغییر مسیر داده، از دیواره و کف زهکش از محیط خاک خارج می‌شود. در زیر زهکش نیز جریان تا عمق مشخصی به سمت زهکش تغییر مسیر می‌دهد که عمق مؤثر زهکش نامیده می‌شود. در پایین‌تر از این عمق نیز مانند محدوده خارج از شعاع تأثیر زهکش، جریان عمومی دشت ادامه خواهد یافت. برای یافتن عمق مؤثر زهکش، ابتدا چهار عمق متفاوت برای لایه محدودکننده به مدل معرفی شد و نتایج آن مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. اعماق لایه محدودکننده در مدل‌سازی، ۷، ۵۷، ۱۰۷ و ۴۰۷ متری بود. نتایج مدل با هریک از این اعماق با یکدیگر مقایسه شد. هدف از این مرحله یافتن

مرزی در ۱۰۰۰ متری بالادست و ۲۵۰ متری پایین‌دست، سطح آب تعریف شده است. توجه به این نکته بسیار ضروری است که مدل این شرایط را بدون محدودیت فرض می‌کند و سطح آب در این نقاط تحت هر شرایطی همچون سطح یک دریاچه پشت سد، ثابت فرض می‌شود. بنابراین، تنها شیب هیدرولیکی، تعیین‌کننده ورود یا خروج آب در نقطه معرفی‌شده به‌عنوان مرز است. میزان بارش بر سطح منطقه در زمان مورد نظر بسیار کم گزارش شد. به‌طوری‌که طی زمان پایش، میزان بارش مؤثر در محدوده طرح، سه مرتبه بیشتر اتفاق نیفتاد. این میزان برای زمان‌هایی که بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر در روز بود مؤثر فرض شده و به میزان ۱/۳ میلی‌متر بارش گزارش شده به سطح ایستایی منطقه اضافه شد. آمار بارش و سایر پارامترهای هواشناسی منطقه، بر اساس گزارش ایستگاه هواشناسی فرودگاه آزادی (ایستگاه هواشناسی موجود در محل با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه) محاسبه شد. برای معرفی مرزهای خروج آب در مدل، سه سطح و جریان متفاوت وجود دارد که یکی اصلی و بقیه در عرض آن هستند. جریان اصلی، همان جریان آب زیرزمینی است که بر اثر وجود شیب هیدرولیکی به سمت پایین‌دست زهکش (مرکز شوره‌زار) در حال حرکت بوده است.

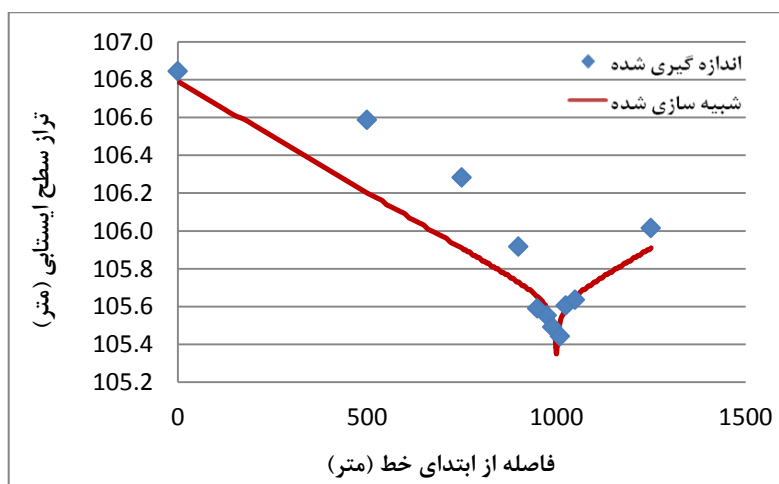
پس از حفر زهکش، اگرچه جریان در لایه‌های بالایی آب زیرزمینی، به سمت زهکش تغییر مسیر داده است؛ اما جریان اصلی از زیر محدوده تأثیر زهکش همچنان ادامه دارد و حجم زیادی از آب را جابجا می‌کند. جریان مورد نظر و هدف بررسی طرح، جریان به سمت زهکش بود که مسیر بخشی از جریان آب زیرزمینی را به سمت خود تغییر داد. محل خروج این بخش از جریان دیواره زهکش و بیشتر از آن کف زهکش بود. بر این اساس دیواره‌ها و کف کانال زهکش به‌عنوان سطح نشست به مدل معرفی شد. میزان حداکثر خروج آب از زهکش در پیش‌فرض مدل ۱۰ در نظر گرفته شده بود که پس از سعی و خطا و مشاهده نتایج این میزان به ۳۰ تعدیل شد. جریان آب سوم، جریان تبخیر از خاک منطقه و سطح آب زیرزمینی منطقه است. با توجه به عمق آب زیرزمینی بر اساس حداکثر موینگی (Azari et al., 2002) و نوع خاک منطقه، میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی به‌دست آمد. این میزان با توجه به شوری زیاد آب و خاک منطقه و همچنین با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه تعدیل شد. سطح تبخیر در نقاطی که آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیک بود، سطح آب زیرزمینی تعریف شد؛ اما با نزدیک شدن به زهکش و افزایش عمق آب زیرزمینی، میزان تبخیر و تأثیر آن ناچیز فرض شده و از آن صرف‌نظر شد. میزان تبخیر در

افزایش یافت. نتایج این مرحله، تنها با این تفاوت که شعاع تأثیر واقعی به مدل معرفی شده است، مشابه نتایج مرحله قبل بود. این بدان معنی است که در این مرحله نیز جریان به سمت انتهایی دشت در مدل مشاهده نشده است؛ اما خطوط جریان به شکل منطقی به سمت زهکش آمده و خطوط هم‌پتانسیل همگرایی جریان به سمت زهکش را نشان می‌دهد. عمق مورد بررسی دیگر، ۴۰۷ متری بود. نتایج مدل‌سازی در این عمق، علاوه بر نشان دادن خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان به شکل مورد انتظار، جهت جریان عمومی دشت را نیز به خوبی نمایش می‌دهد.

اما بر اساس این نتایج، عمق مؤثر زهکش در منطقه حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ متری زیر زهکش به دست می‌آید. با توجه به نقشه سنگ بستر در دشت قزوین، عمق لایه محدودکننده در محدوده مقطع B حدود ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. بنابراین، برای واسنجی مدل از تغییر نسبت  $kx$  به  $ky$  استفاده شد. شکل (۲) نشان دهنده نتایج مدل با نسبت  $kx$  به  $ky$  یک و عمق لایه محدودکننده حدود ۱۰۰ متری است. طبق این شکل خطوط هم‌پتانسیل در اطراف زهکش کاملاً دایره‌ای بوده، عمق مؤثر زهکش نیز بیشتر از ۱۰۰ متر است. این در حالی است که عمق لایه محدودکننده در منطقه بیش از ۱۰۰ متر نیست. همچنین، نمودار شکل (۲) نشان‌دهنده نتایج مدل در مقایسه با نتایج مشاهدات در مرداد ماه ۸۹ است.

عمقی است که در پروفیل خاک روی آن جریان آب زیرزمینی کامل باشد. منظور از کامل بودن جریان این است که خطوط جریان به طور منطقی به سمت زهکش همگرا شده و همچنین جریان عمومی دشت از زیر زهکش در پایین‌تر از عمق مؤثر جریان برقرار باشد. اگر عمق لایه محدودکننده حدود هفت متری سطح خاک در نظر گرفته شود، شکل خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در مدل برای مرداد ماه ۸۹ نشان می‌دهد که جریان به سمت زهکش همگرایی ندارد. به علاوه جریان عمومی دشت نیز در مدل مشاهده نمی‌شود. این مسئله بیانگر آن است که عمق مؤثر جریان در مدل لحاظ نشده است.

عمق لایه محدودکننده بعدی بررسی شده توسط مدل ۵۷ متری بوده است. در این مدل، مرزهای مدل در بالادست به جای ۱۰۰۰ متری در ۷۵۰ متری زهکش معرفی شد تا با کوچکتر شدن شعاع تأثیر در واحد طول، عمق مؤثر در زیر زهکش بهتر مشاهده شود. نتایج این مرحله از مدل‌سازی نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین عمق مؤثر و شعاع تأثیر زهکش است، به طوری که با کاهش شعاع تأثیر در مدل، تأثیر عمق مؤثر در فاصله ۵۰ متری زیر زهکش مشاهده می‌شود. در این عمق، اگرچه همگرایی جریان در خطوط هم‌پتانسیل تا حدی مشاهده شده و مسیر خطوط جریان روند منطقی به خود می‌گیرد، اما همچنان مسیر عمومی جریان و عمق مؤثر مشاهده نمی‌شود. عمق لایه محدودکننده بعدی ۱۰۷ متری بود. در این عمق شعاع تأثیر بالادست دومرتبه اصلاح شده و به ۱۰۰۰ متری



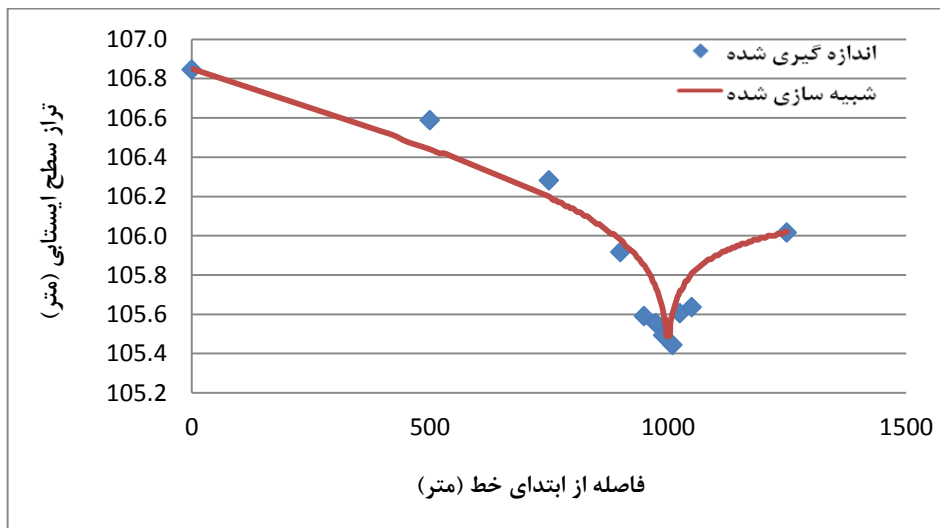
شکل ۲. مقایسه نتایج مدل Seep/w با مشاهدات صحرائی با نسبت  $kx$  به  $ky$  یک و لایه محدودکننده در ۱۰۷ متری

نیز تغییری در نتایج حاصل نشده، شعاع تأثیر در مدل به همان اندازه توسعه می‌یابد. علت اصلی این خطا در مدل، در نظر نگرفتن افت جریان در اثر اختلاف بین هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی در پروفیل خاک است. همواره در طبیعت هدایت

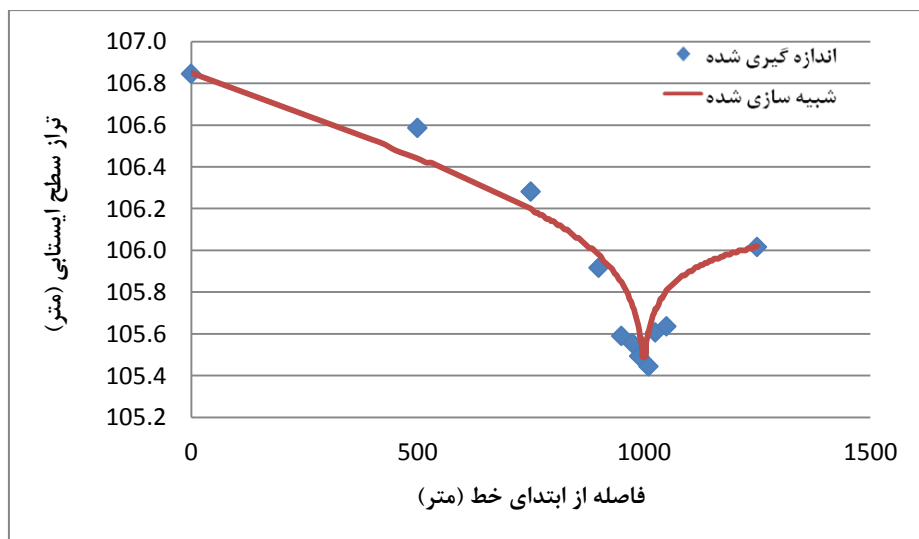
طبق شکل (۲)، سطح ایستایی حاصل از نتایج مدل، کاملاً به صورت یک خط مستقیم بوده است. این بدان معنی است که آب بدون هیچ نوع مقاومتی از فواصل دور به سمت زهکش حرکت می‌کند. هرچه فاصله معرفی شرایط مرزی بیشتر شود

هیدرولیکی در جهت افقی بیشتر از جهت عمودی است. دلیل این امر یکی اختلاف فشار در لایه‌های مختلف خاک ارائه می‌شود، به طوری که در لایه بالایی آب زیرزمینی، فشار صفر است، اما پنج متر یا ۱۰ متر پایین‌تر، فشار آب به ۰/۵ تا حدود یک اتمسفر می‌رسد. این اختلاف فشار بر هدایت هیدرولیکی آب در خاک مؤثر است و سبب افزایش نسبت  $k_x$  به  $k_y$  می‌شود. همچنین، با مداومت جریان در یک مسیر مشخص و به مرور زمان، ذرات ریز و قابل جابجایی در طول مسیر جریان و به همراه آب جابجا و شسته می‌شوند و این خود سبب دیگری برای افزایش هدایت هیدرولیکی جریان در مسیر عمومی جریان یک آبخوان است که در طرح مذکور، شیب کم دشت در انتها و حرکت جریان در مسیر تقریباً افقی، سبب افزایش هدایت

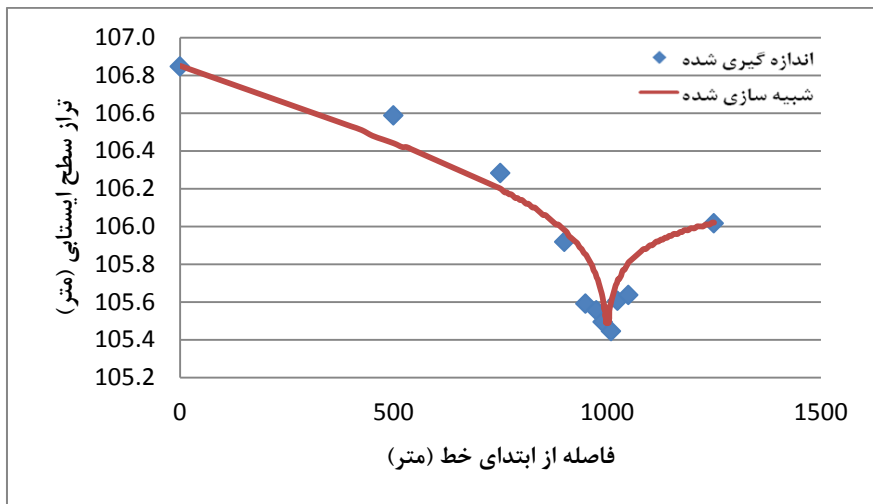
هیدرولیکی در جهت افقی نسبت به عمودی شده است. با افزایش نسبت  $k_x$  به  $k_y$  در مدل، سطح ایستابی به شکل منحنی درآمد، به نتایج مشاهدات نزدیک شد. همچنین، با افزایش این نسبت، عمق مؤثر زهکش شروع به کاهش نموده، جریان عمومی دشت در زیر زهکش مشاهده شد. با افزایش نسبت  $k_x$  به  $k_y$  تا ۲۰۰، نتایج همچنان به مشاهدات نزدیک‌تر شد. شکل (۴) مقایسه بین نتایج مدل و مشاهدات صحرائی را برای نسبت  $k_x$  به  $k_y$ ، ۲۰۰ نشان می‌دهد. از این مرحله به بعد افزایش این نسبت تغییر محسوسی در نتایج مدل و انطباق آن بر مشاهدات صحرائی ایجاد نکرد. شکل (۵) مقایسه بین نتایج مدل با نسبت  $k_x$  به  $k_y$ ، ۳۰۰ است. در انتها نسبت ضریب  $k_x$  به  $k_y$  حدود ۲۰۰ در نظر گرفته شد.



شکل ۳. مقایسه بین نتایج مدل Seep/w و مشاهدات صحرائی با نسبت  $k_x$  به  $k_y$ ، ۱۰۰



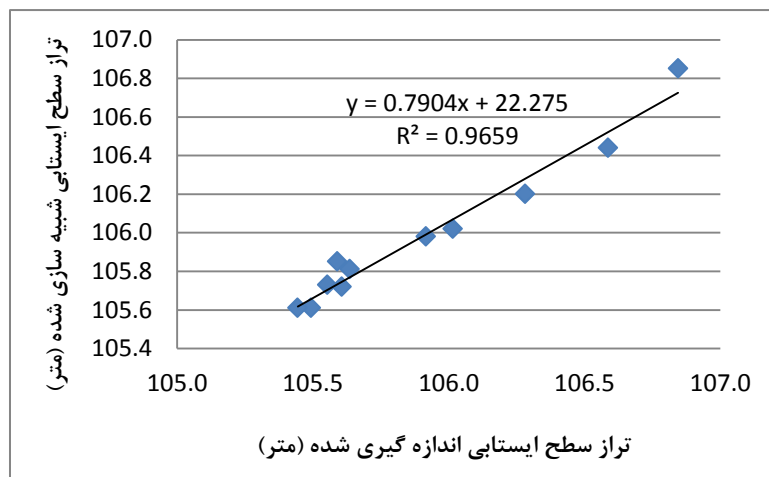
شکل ۴. مقایسه بین نتایج مدل Seep/w و مشاهدات صحرائی با نسبت  $k_x$  به  $k_y$ ، ۲۰۰



شکل ۵. مقایسه بین نتایج مدل Seep/w و مشاهدات صحرایی با نسبت  $kx$  به  $ky$  ۲۰۰

در نتایج نهایی مدل عمق مؤثر زهکش در حدود ۶۰ تا ۷۰ متری مشاهده می‌شود. میزان بار هیدرولیکی در مرداد ماه برای مقطع B و در عمق حدود ۳ متری زمین (حداقل عمق چاهک‌ها) نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین، رگرسیون بین نتایج این مدل و مشاهدات در شکل (۶)، با  $R^2 = ۰.۹۶/۶$ ، انطباق بسیار خوبی نشان می‌دهد. به علاوه روند منطقی نتایج مدل، مؤید صحت مراحل واسنجی مدل است و می‌توان مطرح نمود مدل برای این شرایط واسنجی شده است.

این نسبت در بسیاری مطالعات زهکشی بین هشت تا ۱۶ در نظر گرفته می‌شود. شاید یکی از دلایل افزایش غیرمنتظره این ضریب در این مطالعه، عمق حدود ۱۰۰ متری لایه نفوذناپذیر باشد. در اغلب پروژه‌های زهکشی که به صورت تحلیلی حل و بررسی می‌شوند عمق مورد بررسی و مطالعه نهایتاً حدود ۱۰ متر است، در حالی که در این پژوهش این عمق ۱۰ برابر شده است. فشار آب در عمق ۱۰۰ متری سبب تشدید این فرایند شد.



شکل ۶. رگرسیون بین نتایج مدل Seep/w در مقایسه با نتایج مشاهدات سطح ایستابی

فاصله حداقل ۵۰۰ متری زهکش به طرف آن است که با تخلیه آب شور توسط زهکش می‌تواند اهداف احداث آن را محقق سازد. عملکرد زهکش و تخلیه زهاب توسط آن در نتایج مشاهدات و مدل، تأییدکننده فرض انجام‌شده در ابتدای طراحی زهکش است. با تخلیه زهابی با شوری حدود ۲۰۰ دسی‌زیمنس بر متر از منطقه در درازمدت می‌توان انتظار داشت شوری دشت

جدول (۱) با محاسبه شاخص‌های آماری مختلف مؤید این نکته است که شرایط مدل به آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد بسیار نزدیک بوده و برای منطقه مورد مطالعه قابل استفاده است. به بیان دیگر، مدل توانسته است شرایط منطقه را به خوبی شبیه‌سازی نماید. به علاوه، نتایج مشاهدات صحرایی و مدل، هر دو نشان‌دهنده افزایش میزان شیب هیدرولیکی در

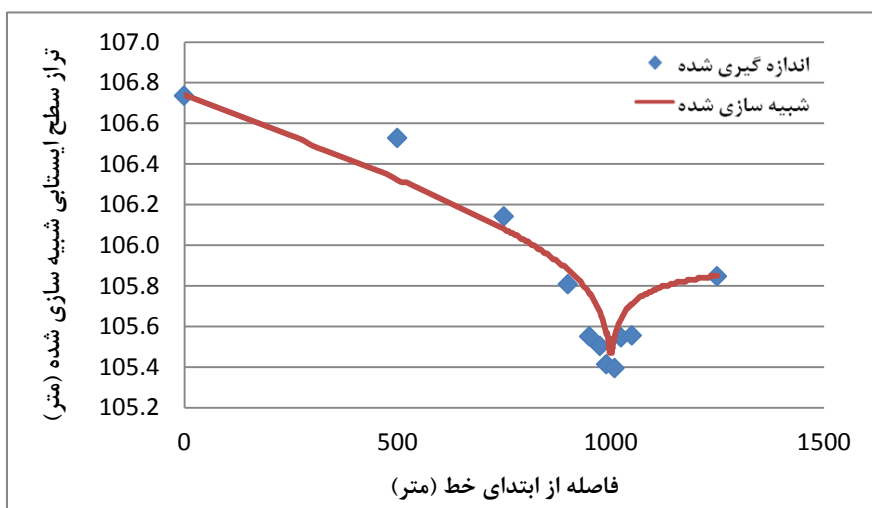
در قسمت بالادست زهکش، کاهش یابد.

داده است. به عنوان مثال شکل‌های (۷) و (۸) و جدول (۱) مقایسه بین نتایج مدل و مشاهدات صحرائی را نشان می‌دهد. کارایی مدل‌سازی در مرحله صحت‌سنجی همواره بیش از ۰/۸۷ بود که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی است.

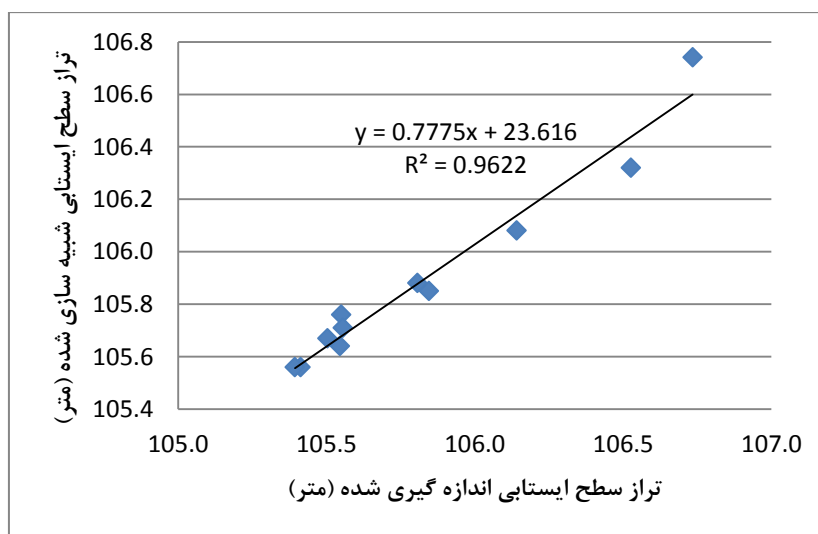
برای صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی منطقه، داده‌های صحرائی مربوط به چهار ماه دیگر نیز به آن معرفی شده و نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفته است. مدل برای این چهار ماه بدون نیاز به اصلاح کمیت‌های واسنجی شده، نتایج بسیار دقیقی ارائه

جدول ۱. شاخص‌های آماری بین نتایج مدل Seep/w با نتایج مشاهدات سطح ایستابی

شاخص‌های آماری	ضریب تبیین (-)	انحراف معیار (متر)	خطای نسبی (%)	میانگین ریشه دوم خط کارایی مدل‌سازی (متر)	کارایی مدل‌سازی (-)
واسنجی مرداد ماه	۰/۹۶۶	۰/۴۲	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۹۱
صحت‌سنجی شهریور ماه	۰/۹۴۳	۰/۴۲	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۸۷
صحت‌سنجی مهر ماه	۰/۹۶۲	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۹۰
صحت‌سنجی آبان ماه	۰/۹۱۳	۰/۳۸	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۹۰
صحت‌سنجی آذر ماه	۰/۹۵۸	۰/۳۸	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۸۷



شکل ۷. مقایسه بین نتایج مدل Seep/w و مشاهدات صحرائی برای مهر ۸۹



شکل ۸. رگرسیون بین نتایج مدل Seep/w در مقایسه با نتایج مشاهدات سطح ایستابی برای مهر ۸۹



این مدل‌ها باید واسنجی و صحت‌سنجی صورت پذیرد. در این پژوهش اقدام با واسنجی و صحت‌سنجی مدل Seep/w برای شبیه‌سازی اثر زهکش حائل احداث‌شده در مجاورت شورزار قزوین بر وضعیت سطح ایستابی منطقه شد. مقادیر کارآیی مدل‌سازی و ضریب تبیین در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۷ بود. همچنین، کارآیی مدل‌سازی و ضریب تبیین در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب بیش از ۰/۸۷ و ۰/۹۱ بود که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی است. پس از تأیید مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان از آن برای بررسی شرایط و سناریوهای گوناگون در منطقه استفاده کرد.

## REFERENCES

- Akram, M. and Sotoodehnia, A. (2011). "Monitoring plan of interceptor drain in Qazvin". *Company Reports, Kamab Pars Saman Abran*, Ministry of Agricultural. (In Farsi)
- Azari, A., Liaghat, Z. and Darbandi, S. (2002). "Drainage, quantity and quality of the return flow". *Drainage Working Group, publisher of Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, first published*. (In Farsi)
- Carluer, N. and Marsily, G. D. (2004). "Assessment and modeling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management". *Journal of Hydrology*, 285, 76–95.
- Dykes, A. P., Gunn, J. and Convery, K. J. (2008) "Landslides in blanket peat on Cuilcagh Mountain, northwest Ireland", *Geomorphology*, 102, 325–340.
- Honar, M. R., Shamsnia, S. A. and Gholami, A. (2011). "Evaluation of water flow and infiltration using HYDRUS model in sprinkler irrigation system". *2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE*. IACSIT Press, Singapore.

به طور میانگین رگرسیون بین مقادیر سطح ایستابی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهدات صحرایی طی پنج ماه شبیه‌سازی شده حدود ۹۵ درصد است. انطباق بالای نتایج مدل با نتایج مشاهدات در این ماه‌ها، واسنجی مدل را تأیید می‌کند. با اتمام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، می‌توان به نتایج مدل اطمینان داشت و از آن برای تخمین پارامترهایی که اندازه‌گیری نشده‌اند بهره گرفت.

## نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی اثرات سازه‌های آبی گوناگون بر هر منطقه با استفاده از مدل‌های گوناگون بسیار مؤثر است؛ اما پیش از استفاده از

- Iranian National Committee on Irrigation and Drainage Development Committee Newsletter, (2008). *Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, No. 71*.
- Lashgaripur, Gh. R., Kazemi Golian, R. and Mirshahi, M. (2007). "Effect of groundwater level decline in the quality of the plain frame - Torbatjam". *Proceedings of the First International Congress of Applied Geology*, May (2007), Mashhad. (in Farsi)
- Lashgaripur, Gh. R., Gafuri, M., Babai, M. and Salehi moteahed, F., (2009). "Effect of indiscriminate harvesting of the quality and quantity of Sabzevar Aquifer using Arcview GIS software and Plotchem" *Proceedings of the Second National Conference on Drought Management Strategies*, May 2009, Isfahan, Iran (In Farsi).
- Moriasi, D. N, Fouss. J.L, Bengtson. R.L, 2007, "Modeling the Effects of Deep Chiseling with DRAINMOD for Alluvial Soils". *Transactions of the ASABE*, 50(2), 543-556.
- Ronkanen, A. K, Klove. B, 2008, "Hydraulics and flow modeling of water treatment wetlands constructed on peatlands in Northern Finland". *Water Search*. 42, 3826–3836.