2019, Vol.5, No.2, Pages 101 to 116
Journal of Water and Sustainable Development

سال پنجم، شماره ۲، ۱۳۹۷، صفحات ۱۰۱ تا ۱۱۶
نشریه آب و توسعه پایدار

A Review on Methods and Models of Surface Water and Groundwater Interaction with Focus on Regional Integrated Models

Z. Mahmoodi[1*], A. Bahremand[2], Kh. Abdollahi[3]

1,2- Ph.D. Student & Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural Resources, Iran. 3- Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran.

*(Corresponding Author Email: Zeinab.mahmoodi68@gmail.com)

Received: 04-11-2017

Accepted: 31-07-2018

Abstract

Surface water (SW) and groundwater (GW) are connected components of the hydrologic system with a dynamic interaction at different local or regional scales. In the first part of this study, the review of principles and general concepts of GW-SW, including the importance of interaction between these two water components is carried out. In the second part, a review of the scientific studies on the interaction of GW-SW at different spatial scales ranging from the point scale to the regional scale is presented. In each of these scales, the differences between the mechanisms of interaction with other scales are investigated and then regional modeling is specifically studied. Regional GW-SW is rarely examined in experimental field studies, which almost exclusively cover small areas. There are various modeling approaches and a few of them can be used in the regional scale but there are still uncertainties about using them. If GW-SW at the regional scale is essentially regarded as the sum of all hydrological processes in a region/catchment, then the most appropriate way to address this seems to be the use of fully coupled, physics-based models. These models attempt to acquire a holistic description of the hydrological cycle and have an ability to connect various processes over a range of spatial and temporal scales. Most authors agree that regional scale integrated modeling is constrained by data availability. Therefore, despite the attractiveness of fully complex schemes, coupling relatively simple models may still provide a suitable approach even if this means an oversimplification in the regional systems.

Keywords: Surface water and groundwater interaction, regional scale, Regional modeling.

مروری بر روش‌ها و مدل‌های برهمکنش آب سطحی-زیرزمینی با تمرکز بر مدل‌های جامع منطقه‌ای

زینب محمودی[۱*]، عبدالرضا بهره‌مند[۲]، خدایار عبدالهی[۳]

۱و۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی گرگان. ۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: Zeinab.mahmoodi68@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۰۹

چکیده

آب‌های سطحی و زیرزمینی در سیستم هیدرولوژی اجزای جدا از هم نیستند و در مقیاس‌های مختلف محلی یا منطقه‌ای دارای برهمکنشی پویا می‌باشند. در بخش اول این تحقیق به مرور مفاهیم و مطالب کلی در زمینه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی پرداخته شده است و در بخش دوم ضمن مروری بر اهداف اصلی و همچنین مطالعات علمی انجام شده در زمینه GW-SW[۱] در مقیاس‌های مختلف مکانی از مقیاس نقطه‌ای تا مقیاس منطقه‌ای بررسی شد. در هر یک از این مقیاس‌ها تفاوت‌های مکانیسم برهمکنش با سایر مقیاس‌ها بررسی و سپس مدل‌سازی جامع منطقه‌ای در مقیاس منطقه‌ای به‌صورت خاص مطالعه شد. بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با GW-SW در مقیاس منطقه‌ای نشان می‌دهد که مطالعات اندکی مستقیماً در این مقیاس انجام شده‌اند. بهترین منبع اطلاعات درباره GW-SW در مقیاس منطقه‌ای، مدل‌سازی جامع است. انواع زیادی از روش‌های مدل‌سازی وجود دارند که برخی از این روش‌ها قابلیت کاربرد در مقیاس منطقه‌ای را دارند اما هنوز کاربردهای واقعی مقیاس منطقه‌ای آن‌ها نادر و دانش در دسترس در این رابطه پراکنده و برای استفاده مشکل می‌باشد. از آنجایی‌که در مقیاس منطقه‌ای باید برهمکنش به‌عنوان مجموعه‌ای از فرآیندهای هیدرولوژیکی در یک منطقه در نظر گرفته شود، مدل‌های جامع فیزیک-محور روش مناسبی برای بررسی این موضوع می‌باشند. بیشتر محققان معتقدند مدل‌سازی جامع منطقه‌ای محدود به دسترسی به داده‌ها است و علی‌رغم جذابیت مدل‌های فیزیکی، بهره‌گیری از مدل‌های نسبتاً ساده پیچیدگی‌های سیستم‌های منطقه‌ای را ساده‌سازی می‌نماید.

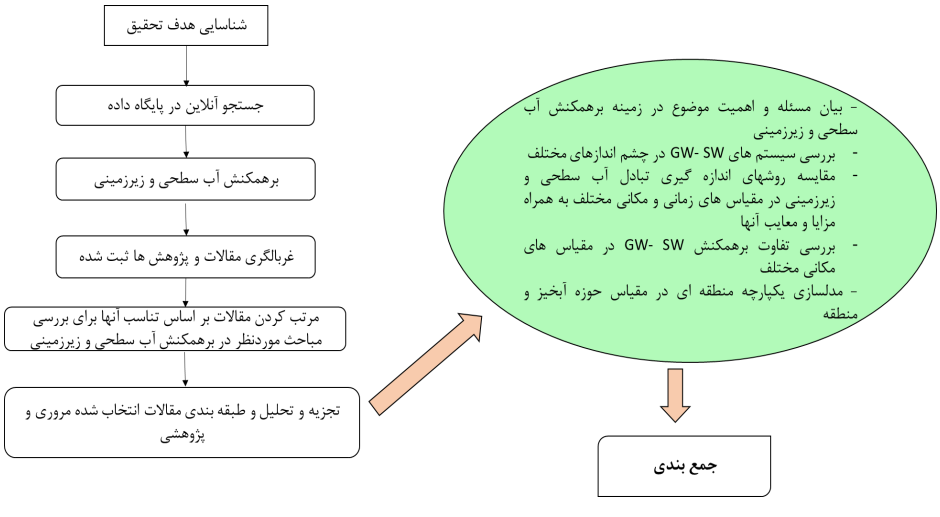
واژه‌های کلیدی: برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی، مقیاس منطقه‌ای، مدل‌سازی منطقه‌ای.

DOI: 10.22067/jwsd.v5i2.68488

مقدمه

در سال‌های اخیر تأکید محققین بر لزوم جامع منابع آب باعث شده تا بررسی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی اهمیت زیادی پیدا کند. هم‌اکنون مراکز تحقیقاتی زیادی در سرتاسر دنیا بر شناسایی مکانیزم‌ها و پیامدهای برهمکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی متمرکز شده‌اند. روش‌های مختلف صحرایی و مدل‌سازی همگام با این تلاش‌ها توسعه یافته است. با رونق نگرش مولفه‌ای در علوم آب، تحقیقات اولیه منابع آب سطحی و زیرزمینی جداگانه توصیف شدند (Winter و همکاران، ۱۹۹۸). اما به‌تدریج مباحث طرح شده در حیطه علمی مدیریت بهینه منابع آب باعث شد تا درک بهتری از ارتباط آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌وجود آید (Sophocleous، ۲۰۰۲). بنابراین موضوع مدیریت توام آب‌های سطحی و زیرزمینی سرآغازی پیدا کرد و مدیران ناگزیر به کمی‌سازی جریان بین آب‌های سطحی و زیرزمینی شدند (Jacobs و Holway، ۲۰۰۴). گوناگونی مناطق مورد مطالعه برای بررسی ارتباط آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث توسعه روش‌های متعددی برای توصیف و کمی‌سازی جریان بین این دو منبع شده است. برخلاف تلاش‌های اخیر محققان روی این موضوع، همچنان کمی‌سازی برهمکنش بین دو سیستم مشکل می‌باشد. مشکل نه تنها در فرموله‌کردن فرآیندها بلکه برای تعیین آن‌ها در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف ظاهر می‌شود (Winter و همکاران، ۱۹۹۸).

در این تحقیق در ابتدا به خلاصه‌ای از مفاهیم کلی در زمینه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی پرداخته شده است، سپس به برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مختلف به‌ویژه مناطق کوهستانی، کارستی، یخچالی و مخروط افکنه پرداخته شده است. در انتها برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های مختلف (نقطه‌ای، محلی، حوضه آبخیز و منطقه) با تمرکز بر مقیاس منطقه‌ای پرداخته شده است. باتوجه‌به کمبود مطالعات انجام شده در این زمینه در کشور مرور این مطالعات امری لازم می‌باشد. زیرا باتوجه‌به موقعیت جغرافیایی و اقلیمی ایران از نظر قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک می‌توان بیان کرد مدیریت مؤثر منابع آب تا حدودی به توجه و اندازه‌گیری میزان برهمکنش و اثرات هریک از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر یکدیگر وابسته است. در شکل (۱) نمودار جریانی روند مرور نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار جریانی تحقیق

سامانه‌های برهمکنش آب سطحی و آب زیرزمینی

۱- برهمکنش‌های آب‌زیرزمینی و رودخانه‌ها: تبادل آب‌زیرزمینی و آب سطحی در مقیاس وسیع تحت تأثیر نحوه توزیع هدایت هیدرولیکی و اندازه ذرات آن در آبراهه‌ها، رسوبات دشت آبرفتی اطراف رودخانه و شکل و موقعیت آبراهه در دشت آبرفتی کنترل می‌شود. دو حالت اصلی جریان در این سیستم عبارتند از شرایط کاهشی جریان در رودخانه که در آن جریان سطحی به زیرسطحی تبدیل می‌شود (رود کاهنده) و شرایط افزایشی که آب‌زیرزمینی به داخل رودخانه زهکشی می‌شود (رود زاینده).

۲- برهمکنش آب‌زیرزمینی و دریاچه‌ها: خصوصیات هیدرولوژیکی دریاچه به شدت تحت تأثیر جریان سیستم آب‌زیرزمینی موجود در منطقه است. این ارتباط در ارزیابی بیلان آبی دریاچه نقش اساسی دارد. نحوه برهمکنش دریاچه‌ها با آب‌زیرزمینی مشابه رودخانه‌ها می‌باشد و تفاوت اصلی آن‌ها بزرگی سطح کف و تراز آب دریاچه است. میزان جریان ورودی از آب‌زیرزمینی به توپوگرافی حوضه آبخیز و هیدرولوژی منطقه وابسته است.

۳- برهمکنش آب‌زیرزمینی و تالاب‌ها: تالاب‌ها معمولاً در مناطقی که دبی ورودی از آب‌زیرزمینی به سطح زمین قابل توجه است یا در مناطقی که دارای مشکل زهکشی دارند رخ می‌دهد. درصورتی‌که

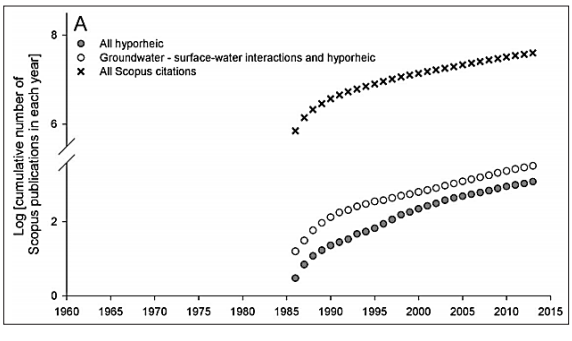
مشکل زهکشی وجود داشته باشد تخلیه و پمپاژ آب سطحی به‌دلیل زهکشی نامناسب لایه‌های زیرین مشکلی را حل نخواهد کرد اما در مناطقی که چشمه‌های آب‌زیرزمینی آب را به تالاب می‌آورند پمپاژ آبخوان‌های زیرین روی مقدار دبی آب‌زیرزمینی به تالاب تأثیرگذار خواهد بود (Sophocleous، ۲۰۰۲).

مروری بر توسعه علم برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی طی ۲۰ سال گذشته

تا سال ۱۹۶۰ تحقیقات چندانی بر روی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها از نگاه ارتباط این منابع با سیستم‌های جریان آب‌زیرزمینی انجام نشده بود. اولین تحقیق توسط Toth (۱۹۶۳) انجام شد که اثر توپوگرافی، زمین‌شناسی و عوامل اقلیمی در مقیاس نقطه‌ای تا منطقه‌ای بر سیستم‌های جریان آب‌زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد. وی در نهایت الگوهای مکانی برهمکنش‌های آب سطحی و زیرزمینی را ایجاد کرد. Rorabaugh (۱۹۶۴) روشی را برای برآورد اجزای جریان از ذخیره مخزن و خروجی آبخوان توسعه داد. Rushton و Tomlinson (۱۹۷۹) مفاهیمی را برای تشریح مرز مشترک آب‌زیرزمینی و آب سطحی (زون هایپریک) توسعه دادند که به مدل‌های عددی GW در سال ۱۹۸۰ ختم شد و ماژول‌ها و الحاقیاتی شامل کدهایی را برای نمایش دادن بهتر فرآیندهای تبادل آب سطحی و آب‌زیرزمینی ایجاد کردند. برنامه‌های ابتدایی به‌طوراساسی مرتبط با مدیریت کمی آب بوده و مدل‌هایی را برای ارزیابی سناریوهای مربوطه توسعه دادند. به‌دلیل مقیاس‌های نسبتا بزرگ زون‌هایپریک و برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در این مدل‌ها به تفکیک مکانی یا دقت تفکیک مشخص مقیاس زمانی و مکانی خاصی نیاز دارد. اولین تلاش‌ها در سال ۱۹۸۰ برای توسعه مدل‌های جامع پیچیده متشکل از مولفه‌های سطحی و زیرسطحی چرخه هیدرولوژیک شکل گرفت و کمبودهای نمایش سیستم‌ها را مشخص نمود.

از سال ۱۹۹۰ فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی بر روی برهمکنش‌های آب سطحی و زیرزمینی در طیف‌های وسیعی از هیدرولوژی و هیدروژئولوژی تا مطالعات اکولوژی، بیوژئوشیمی و قوانین و مدیریت محیط‌زیستی انجام شد. بیشتر مدل‌های پیچیده آب‌های سطحی با مدل‌های آب‌زیرزمینی موجود به‌هم اتصال داده شدند و یک بخش کاملا جدید از مدل‌های کاملا جامع در این بازه زمانی توسعه داده شد که می‌توانستند سیستم‌های آب سطحی و زیرزمینی مرتبط را به‌عنوان یک توالی شبیه‌سازی کنند. همچنین از سال ۱۹۹۰ یک افزایش انگیزه و علاقه در راستای به‌کارکردن مقیاس‌های کوچکتر فرآیندهای تبادلی GW–SW، فرآیندهای بیوژئوشیمی و عملکردهای اکولوژیکی مرتبط به‌وجودآمد. به‌عنوان مثال Brunke و Gonser (۱۹۹۷) بر اهمیت اکولوژیکی زون‌هایپریک و ارتباطات پیچیده بین هیدرولوژی و اکولوژی تاکید کرده است. در شروع این قرن تا سال ۲۰۱۵ مقالات متعددی با مباحثی در بخش‌های مختلف در زمینه برهمکنش‌های GW-SW در بین دانشمندان کشورهای مختلف به چاپ رسید. در شکل (۲) رابطه نمایی تعداد مقالات چاپ شده از سال ۱۹۸۰ نشان داده شده است.

از جمله مطالعات انجام شده در ایران در زمینه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی پژوهش شمسایی و فرقانی (۱۳۹۰) می‌باشد که به تدوین الگوی ماهیانه برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی پرداختند. زیبایی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از یک مدل ریاضی در دشت فیروزآباد استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با اعمال محدودیت‌های مدیریتی و هیدرولوژیکی نشان دادند. آذری و همکاران (۱۳۹۲) شبیه‌سازی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در شرایط بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از ایجاد اتصال دینامیکی بین منابع آب سطحی و آب‌زیرزمینی در دشت دز را انجام دادند. فاریابی و چیت‌سازان (۱۳۹۵) برهمکنش رودخانه و آبخوان در بخش شمالی محدوده دزفول-اندیمشک با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی بررسی نمودند.



شکل ۲- رابطه نمایی تعداد مقالات چاپ شده مرتبط با مطالعات زون هایپریک و برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی (Steven، ۲۰۱۵)

باتوجه‌به بررسی مطالعات انجام شده و تعداد مقالات چاپ شده در این زمینه می‌توان بیان نمود که مدل‌های مفهومی، تجربی و ریاضی زیادی برای مدل‌سازی سیستم‌های آب‌زیرزمینی-آب سطحی در مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است که این مطالعات ابزارهایی برای روشن نمودن پویایی فرآیندها در شبیه‌سازی‌های سناریوهای مختلف می‌باشند. با استفاده از دانش به‌دست‌آمده از مطالعات مدل‌های موجود برای توسعه مدل‌های مفهومی جدیدتری برای برهمکنش آب سطحی-زیرزمینی استفاده شد. بنابراین تدوین استراتژی‌هایی برای فرآیندهای در مقیاس‌های مختلف سرشاخه، رودخانه و حوضه از چالش‌های تحقیقاتی آینده محسوب می‌شوند. ارتباط آبخوان با رودخانه در آبخوان‌های آبرفتی و ترکیبات ناهمگن زمین‌شناسی در مقیاس‌های مختلف در مدل‌های برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی از چالش‌های دیگر به‌شمار می‌رود.

بررسی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مختلف

برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مکانی مختلف به فیزیوگرافی و ویژگی‌های اقلیمی آن‌ها وابسته است. به‌عنوان مثال یک جریان رودخانه‌ای در اقلیم مرطوب ممکن است از آب‌زیرزمینی دریافتی داشته باشد اما همین جریان در منطقه‌ای با فیزیوگرافی یکسان و اقلیم خشک ممکن است به‌عنوان تغذیه کننده آب‌زیرزمینی عمل نماید. در ادامه برای بررسی دقیق‌تر برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مخروط‌افکنه‌ای، کارستی، کوهستانی، رودخانه‌ای، ساحلی و یخچالی مطالعه شد.

• **مخروط‌افکنه:** مخروط‌افکنه‌ها در بیشتر نواحی کره زمین نقش مهمی در سیستم رسوبی کوهستانی و ژئومورفولوژی دارند و محل ته‌نشست بخش بزرگی از رسوبات می‌باشند که با اندازه‌های مختلف از حوضه‌های آبخیز خود سرچشمه می‌گیرند. این مجموعه‌های رسوبی ممکن است متناسب با حجم، دبی آب و رسوب، عوامل اقلیمی، تغییرات شیب، سطح اساس و عوامل تکتونیکی در ابعادی کوچک تا بسیار بزرگ به وجود آیند. فرآیندهای تبادلی آبخوان در مخروط‌افکنه‌ها می‌تواند به دو حالت باشد:

۱- جریان آب‌زیرزمینی از طریق بستر رودخانه وارد رودخانه می‌شود (رودخانه زاینده)

۲- آب رودخانه از طریق رسوبات به آب‌زیرزمینی نفوذ می‌کند (رودخانه کاهنده).

نکته قابل توجه در رابطه با مخروط‌افکنه‌ها، شناسایی آن‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی برای تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب می‌باشند. در مناطق خشک مساحت رخساره‌های فرسایش آبراهه‌ای و مخروط‌افکنه‌ای که عرصه‌های وسیعی از مناطق خشک و بیابانی کشور را تشکیل می‌دهند اهمیت دارد. بهره‌برداری بیش‌ازحد از سفره‌های آب زیرزمینی موجود به مدیریت دوچندان در این بخش برای تغذیه مصنوعی نیاز دارد. در انجام پروژه‌های تغذیه مصنوعی مخروط‌افکنه‌ها باید به‌عنوان راهکاری در بهره‌برداری و مدیریت بهینه در این مناطق برای برنامه‌ریزی جهت استفاده از سیلاب‌های فصلی لحاظ شوند.

• **کارست:** در اغلب نواحی کارستی جریان‌های سطحی و رودخانه‌های زیرزمینی هم‌زمان توسعه می‌یابند. در این میان جریان رو زمینی در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند از نوع سطحی به جریان زیرزمینی و برعکس تبدیل شود. علاوه‌براین هنگامی که تبادل جریان سطحی و زیرزمینی اتفاق می‌افتد همه جریان به داخل حوضه کارستی برگشت داده نمی‌شود و بخشی از آن به‌صورت چشمه ظاهر شده و به حوضه‌های دیگر منتقل می‌شود (White، ۱۹۹۸). در آبخوان‌های کارستی ساحلی، تحت این شرایط مقداری از جریان ممکن است به داخل دریا جریان یابد و به‌صورت چشمه‌های زیردریایی ظاهر شود. این امر باعث پیچیدگی بیشتر هیدرولوژی کارست می‌شود. در نواحی کارستی به دلیل پوشش گیاهی متفرق کم‌پشت و رخنمون سنگ‌های بدون پوشش خاک، میزان تبخیر و تعرق نسبتا زیاد است. در این نواحی سطح آب‌زیرزمینی مشخصی وجود ندارد. معمولا در آبخوان‌های آبرفتی هیدرولوژی آب‌زیرزمینی در یک محیط متخلخل بررسی می‌شود اما در کارست جریان آب‌زیرزمینی با آبرفت متفاوت است و نمی‌توان آن را مانند محیط‌های متخلخل آبرفتی بررسی نمود. لذا مفاهیم متداول در مورد آبرفت‌ها مانند ضریب آبگذری در کارست کاربرد زیادی نداشته و یا کاربرد آن خیلی محدود است. لذا کاربرد قانون دارسی در این محیط‌های کارستی مناسب نمی‌باشد (Ford و Williamsm، ۲۰۰۷).

• **زمین‌های کوهستانی:** هیدرولوژی مناطق کوهستانی به‌واسطه بارندگی بسیار متغیر و حرکت سریع آب از شیب‌های تند متمایز می‌شود. منافذ ماکرو ایجاد شده به‌وسیله میکروارگانیسم‌ها و چشمه‌های تشکیل شده در دامنه شیب‌های کوهستانی، ظرفیت انتقال جریان زیرسطحی در شیب‌های پایین را تسریع می‌کند. علاوه‌براین برخی از انواع سنگ‌های زیرین خاک ممکن است هوازده یا شکسته شده باشد و مقدار جریان قابل توجهی را از طریق لایه زیرسطحی انتقال دهند. اما یکی از عوامل مهم در مناطق کوهستانی که در برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی نقش مهمی دارد ذوب برف می‌باشد. برف از اشکال مهم بارش در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی می‌باشد که در تأمین آب شرب و کشاورزی به‌صورت جریان‌های تاخیری در فصول پرآبی، جریان‌های کمینه در فصول کم‌آبی و تولید انرژی نقش مهمی را ایفا می‌کند. اثر تاخیری برف در جریان و هیدرولوژی رودخانه مهم است زیرا رواناب حاصل از ذوب برف طی بهار و تابستان باتوجه‌به نقش تاخیری آن، منبع اصلی تغذیه سفره‌های آب‌زیرزمینی می‌باشد. در برخی موارد به‌دلیل هم‌زمانی حضور برف با بارش‌های مایع بهاره بروز سیلاب‌های مخرب با حجم جریان بیش از ظرفیت رودخانه‌ها رخ می‌دهد که علاوه‌بر خسارت زیاد موجب هدررفت آب مورد نیاز برای اهداف آبیاری، شرب و تولید انرژی خواهد شد. جهت بررسی شرایط ذوب برف عناصر هیدروکلیماتیک مختلفی مانند دمای محیط، وزش باد گرم، بیلان انرژی، نقطه شبنم، باران و آب محتوای برف دخالت دارند. از بین متغیرهای مذکور عامل دما در ذوب برف نقش اصلی دارد. پوشش برف معرف میزان آب ذخیره شده در حوضه‌های کوهستانی است و این عامل در مدل‌سازی‌های باد مورد توجه قرار می‌گیرد.

• **چشم‌اندازهای یخچالی:** یخچال‌ها یکی از منابع آبی مهم در چرخه هیدرولوژیک به‌شمار می‌روند. سیستم‌های منابع آب کوهستانی مرتفع به‌طور خاصی نسبت به تغییر اقلیم حساس هستند. رژیم هیدرولوژیک چنین مناطقی به‌شدت تحت تأثیر تجمع آب به‌صورت برف و یخ و فرآیندهای ذوب مربوط به آن است. افزایش درجه حرارت می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر رژیم هیدرولوژیکی و منابع

آب تأثیر داشته باشد. یخچال یک توده یخی سطحی روی زمین است که تحت تأثیر جاذبه در سراشیبی جریان می‌یابد و توسط تنش و اصطکاک داخلی در پایین و کناره‌ها فشرده می‌شود. به‌طور کلی یخچال‌ها با جمع شدن برف‌ها در ارتفاعات خیلی بالا شکل گرفته و از طریق ذوب شدن در ارتفاعات پایین و یا با تخلیه به‌سمت دریاچه‌ها متعادل می‌شوند. توزیع یخچال‌ها در ابتدا تابعی از دمای متوسط سالانه و میزان بارش تجمعی متأثر از عوارض زمین است. به‌عنوان مثال میزان خالص تشعشعات یا الگوی تجمع. بررسی وضعیت یخچال‌ها با اندازه‌گیری تغییرات طولی و بیلان (تعادل-ذخیره) توده یخچال انجام می‌گیرد (WGMS و UNEP، ۲۰۰۸). نحوه تشکیل یخچال‌ها به‌صورت انباشت لایه‌های ضخیم برف و تبدیل به یخ‌های انباشته یخچالی است که فرآیند پیچیده‌ای را طی می‌کند. این فرایند بیشتر از سایر پارامترها تحت تأثیر خورشید، تصعید و در نهایت فشار فزاینده قرار می‌گیرد. یخچال‌های طبیعی بسته به میزان توسعه‌یافتگی، شکل و ارتباط بین منبع تغذیه و محدوده تخلیه آن‌ها به انواع مختلف تقسیم می‌شوند. مهمترین نوع آن یخچال کوهستانی است که یخچال‌های طبیعی ایران در این دسته قرار می‌گیرند. سهم چشمگیر ذوب یخچال در مشارکت در جریان‌های آبراهه‌ای تأثیر کاهش یخچال‌ها بر اکوسیستم و تأمین آب، به‌خصوص در فصول گرم و دوران‌هایی که از تراکم برف کاسته می‌شود، می‌باشد. درصد زیادی از منابع آب کشور از ذخایر برفی در یخچال‌های کوهستانی تامین می‌شوند. در کشور ما که در ناحیه خشک و نیمه‌خشک واقع شده و تاریخچه‌ی مشخصی از وقوع خشکسالی‌های پیاپی دارد مرور مطالعات انجام‌شده در یخچال‌های کوهستانی ایران در برآورد میزان آب معادل ناشی از ذوب یخ در جریان رودخانه‌ها و بررسی تداوم این منابع در دوره‌های خشکسالی بسیار حیاتی است. برنامه‌ریزی در جهت تخصیص صحیح منابع و مدیریت بحران‌های آبی محتمل پیش‌رو باتوجه‌به افزایش جمعیت و رشد روز افزون تقاضای آب بدون اقدام در جهت فراگیر شدن مطالعاتی از این دست امکان‌پذیر نخواهد بود (Corinna و همکاران، ۲۰۰۸).

تغییر اقلیم و برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی

تغییراقلیم یک پدیده پیچیده اتمسفری-اقیانوسی در مقیاس جهانی و درازمدت محسوب می‌شود. این پدیده متأثر از عواملی چون فعالیت‌های خورشیدی، آتشفشان‌ها، اقیانوس‌ها و درصد گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است که دارای اثرات متقابلی می‌باشند و منجر به دگرگونی در وضعیت آب و هوا شده است. به‌طورکلی تغییر اقلیم روند جدیدی را در اقلیم جهانی موجب می‌شوند. مدل‌های گردش عمومی جو، آینده گرم‌تری را برای کره زمین پیش‌بینی می‌کند. از طرفی منابع آب زیرزمینی همواره یکی از مهمترین منابع آبی در مناطق خشک محسوب می‌شود که مدیریت و بهره‌برداری این منابع بدون شناخت آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. شناخت و بهره‌برداری اصولی از منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی آن منطقه نقش مؤثری داشته باشد. از آنجایی‌که مهمترین منبع تغذیه‌کننده آب‌زیرزمینی رودخانه‌ها هستند بنابراین با کاهش حجم آب و بارندگی یا خشک شدن آب رودها بر اثر خشکسالی سطح آب‌های زیرزمینی نیز کاهش پیدا می‌کند.

مهمترین تأثیر تغییر اقلیم نوسانات در میزان آب‌های سطحی و کیفیت آن‌ها می‌باشد که کاهش بالقوه و کمیت منابع آب زیرزمینی را به همراه دارد. از آنجایی‌که آب‌های زیرزمینی منبع اصلی آب آشامیدنی برای مصرف انسان و آبیاری تولیدات کشاورزی در سراسر جهان می‌باشند این موضوع یک نگرانی جدی برای مدیران آب و دولت محسوب می‌شود. باتوجه‌به اینکه لایه‌های آبدار زیرزمینی عمدتا از بارش یا از طریق برهمکنش با آب‌های سطحی تغذیه می‌شوند تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و آب سطحی و در نهایت بر سیستم آب زیرزمینی اثر خواهد گذاشت. همچنین تغییر اقلیم به‌صورت مستقیم بر منابع آب سطحی از طریق تغییر در متغیرهای اصلی بلند مدت اقلیم مانند بارش، دما و تبخیر تأثیر می‌گذارد اما تعیین رابطه بین متغیرهای تغیر اقلیم و آب زیرزمینی پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌باشد. بنابراین بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی نه تنها به پیش‌بینی قابل اطمینان از تغییرات متغیرهای اساسی اقلیمی نیاز دارد بلکه به تخمین دقیق تغذیه آب زیرزمینی نیازمند است. تعیین مقدار تغذیه برای بهبود استراتژی مدیریت موثر حوضه آبخیز مهم است زیرا می‌تواند حفاظت منابع آب زیرزمینی را از تغییراقلیم و سایر مشکلات مانند شهرسازی تضمین کند. انتقال بیشتر آلاینده‌های آب زیرزمینی در لایه اشباع به‌عنوان بخشی از فرآیند تغذیه رخ می‌دهد به‌این‌ترتیب تغذیه آب زیرزمینی از جهت خصوصیاتی که آسیب‌پذیری لایه آبدار را تعیین می‌کند ضروری است. در مناطقی که لایه آبدار زیرین به‌صورت گسترده برای مقاصد آب شرب بهره‌برداری می‌شود نیز مهم می‌باشد. مناطقی که کمترین تغذیه آب زیرزمینی را دارند درصورتی می‌توانند برای محل دفن زباله‌های شهری و ضایعات هسته‌ای و سایر ضایعات خطرناک مورد استفاده قرار گیرد که کمترین آسیب آلودگی به لایه آبخوان زیرین را داشته باشد (Zhuoheng و همکاران، ۲۰۰۴). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مطالعات کمتری روی تأثیر تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی انجام شده و اکثر مطالعات صورت گرفته به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی مربوط می‌شود.

برهمکنش آبیاری و آب زیرزمینی

برهمکنش آبیاری و آب زیرزمینی را می‌توان با استفاده از معادله بیلان آبی تشریح نمود. بیلان آب شامل جریان ورودی (آبیاری و باران)، خروجی (زهکشی و رواناب) و تغییرات ذخیره (سطح سفره آب) می‌باشد. اما چگونه این بیلان مدیریت شود که به‌طور مؤثر قابلیت دسترسی و کیفیت آب زیرزمینی و کلیه مصارف آب در هردو بخش آب سطحی و زیرزمینی را در استفاده تلفیقی از آب تنظیم نماید؟ کیفیت آب فاکتور بسیار مهمی در این رابطه می‌باشد به‌طوری‌که آب با کیفیت بد اثرات منفی زیادی بر کشاورزی و سلامت انسان و محیط می‌گذارد و به راحتی می‌تواند آب شیرین را به آب بی‌کیفیت تبدیل نماید. غرقاب شدن و شورشدن دو مسئله اصلی هستند که در رابطه سیستم‌های آبیاری و منابع آب مشکل ایجاد می‌کنند. این مشکل عمدتا مربوط به عدم وجود زهکش‌ها می‌باشد. بنابراین سامانه‌های آبیاری باید به درستی مدیریت شوند.

آبیاری با آب رودخانه مانع از جریان طبیعی آب می‌شود در نتیجه با تحمیل بیلان آبی جدید بیلان طبیعی آب زیرزمینی هم تغییر خواهد کرد. آبیاری نمک‌ها، آب را به‌صورت غیرطبیعی به محل‌های دیگر می‌آورد بنابراین بیلان آب زیرزمینی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر آبیاری تغییر می‌کند. به‌همین‌دلیل از ابتدای زمان آبیاری وجود زهکشی ضروری می‌باشد. هنگامی‌که سطح سفره آب خیلی بالا باشد مشکل زهکشی وجود دارد و هنگامی‌که خیلی پایین باشد ممکن است خاک به اندازه کافی مرطوب نشود بنابراین سفره آب زیرزمینی باید به‌دقت مدیریت شود. رطوبت خاک برای فرآیندهایی مانند تثبیت نیتروژن اهمیت زیادی دارد گاهی تنظیم سطح آب زیرزمینی ممکن است با تنظیم آبیاری حاصل شود. هنگامی‌که آب سطحی کاهش پیدا می‌کند راندمان آب زیرزمینی بالا می‌رود و تلفات نفوذ عمقی و نشت کانال‌ها سطح آب زیرزمینی را بالا می‌برد. مشکل این است که در هر مترمربع شرایط با سایر مناطق متفاوت می‌باشد، به‌عنوان‌مثال زمین‌شناسی یک فاکتور مهم است. هنگامی‌که یک منطقه دارای سازند زمین‌شناسی سخت باشد ویژگی‌های آبخوان باید به‌خوبی شناسایی شوند. به‌عنوان‌مثال اگر لایه‌های غیرقابل نفوذ وجود داشته باشد هنگامی‌که نوع خاک به آسانی زهکشی نشود زمین‌های اطراف تبدیل به یک تشتک تبخیر می‌شوند (Born، ۲۰۱۱).

در بسیاری از سیستم‌های آبیاری هنگامی‌که آب سطحی کافی نباشد، کشاورزان به سمت آبیاری با آب زیرزمینی می‌روند. آبیاری آب سطحی و زیرزمینی به هم پیوسته هستند و برای مدیریت آب هردو منبع باید در نظر گرفته شوند. استفاده تلفیقی می‌تواند باعث بهبود امنیت و زمان‌بندی بهتر آب شود که مانع از غرقاب شدن و شورشدن زمین‌ها و در نتیجه کاهش محصول خواهد شود. برای بهره‌وری از سود کامل استفاده تلفیقی باید مدیریت به‌درستی انجام شود.

مدیریت تلفیقی به تلاش‌های طرح ریزی شده برای بهینه‌سازی حق بهره‌برداری و پایداری محیط‌زیست اشاره می‌کند. نهادهای تخصیص دوباره آب نقش مهمی در این موضوع دارند و درصورتی‌که آب سطحی و زیرزمینی جداگانه مدیریت شوند مشکلاتی ایجاد خواهد شد. این مدیریت باید به‌صورت هم‌زمان و بر اساس موقعیت مکانی انجام شود. در حال حاضر برای تغییر به سمت مدیریت تلفیقی انگیزه‌های زیادی وجود دارد.

روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری برهمکنش آب‌های سطحی و زیرسطحی

هیدروژئولوژیست‌ها و هیدرولوژیست‌های آب‌های سطحی توجه ویژه‌ای به ارتباط و برهمکنش بین آب سطحی و زیرزمینی از دیدگاه‌های مختلف دارند. در مطالعات تکنیک‌های خاصی از شناسایی و اندازه‌گیری جریان‌های تبادلی وجود دارد که نظمی نسبی به روش کار محققان هیدرولوژیست می‌دهد. هدف اصلی از کنار هم قرار دادن جوانب و دیدگاه‌های مختلف مطالعه سیستم رودخانه-آبخوان به‌عنوان یک واحد از کل (چرخه) می‌باشد. طیفی از تکنیک‌های در دسترس برای تعیین برهمکنش‌های بین آب‌های سطحی و زیرزمینی توسعه یافته است وباتوجه‌به اهداف مطالعه روش‌هایی متناسب با مقیاس زمانی و مکانی برای انتخاب فراهم می‌آورد. روش‌های مختلفی برای کمی کردن و اندازه‌گیری شار تبادلی بین سیستم‌های آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (۱) چندین روش اندازه‌گیری نشت از بستر جریان به همراه مقیاس زمانی و مکانی و همچنین مزایا و معایب آن آورده شده است.

نشت‌سنج‌ها تنها ابزارهایی هستند که به‌طور مستقیم شار تبادلی مخازن آب سطحی و زیرزمینی را اندازه‌گیری می‌کنند. نشت‌سنج‌ها تکنیک‌های ساده‌ای دارند اما به‌دلیل مشکلات نصب و اجرای آن‌ها در عملیات میدانی عدم قطعیت‌های زیادی در اندازه‌گیری ایجاد می‌کنند. اندازه‌گیری‌های تراز آب زیرزمینی با استفاده از پیزومترها و گمانه‌ها در بستر رودخانه یا نزدیک بستر می‌تواند محاسبات جریان‌های عمودی را انجام دهد اما برآورد دقیق جریان زون‌هایپریک به‌علت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با مشکل مواجه است. پیزومترها در بستر رودخانه‌ها نصب می‌شوند اما مستعد آبشویی و خسارت توسط سیل‌ها و جریان‌های گلی هستند. روش‌های دیگر غیرمستقیم محاسبه شار تبادلی بین آب زیرزمینی و سطحی شامل اندازه گیری‌های دبی دیفرانسیل، مدل‌سازی عددی و استفاده از ردیاب‌های محافظتی مانند رنگ، نمک و سایر ایزوتوپ‌های پایدار می‌باشد. همچنین سنجش از دور روش نسبتاً جدیدی را در این زمینه پیشنهاد کرده است که برآورد کیفی توزیعی پیوسته از شار تبادلی زون هایپریک را فراهم می‌کند. حرارت نیز به‌عنوان یک ردیاب برای محاسبه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود.

جدول ۱- مقایسه روش‌های اندازه‌گیری میزان نشت از بستر جریان (Christine و همکاران، ۲۰۰۶)

روش	مقیاس مکانی	مقیاس زمانی	مزایا	معایب
نشت‌سنج	Cm^2- m^2	از چند ساعت تا چند روز (تا یک ماه)	اندازه‌گیری مستقیم مقدار نشت؛ ارزان و آسان برای استفاده در زمان‌های مختلف	اندازه‌گیری نقطه‌ای (در زمان و مکان)، خطاهای ناشی از نصب و استقرار نشت‌سنج
پیزومتر	Cm^2- m^2	ثانیه تا دقیقه	ساده، ارزیابی دقیق گرادیان هیدرولیکی	اندازه‌گیری نقطه‌ای (در زمان و مکان)، حجم کار بالا هنگام نصب پیزومتر
دمای بستر جریان	Cm^2- m^2	ثانیه تا دقیقه	نسبتاً ارزان، اندازه‌گیری‌های دمایی دقیق، قابلیت اندازه‌گیری میزان نفوذ و جهات آن	اندازه‌گیری نقطه‌ای (مکان)، عدم توانایی برای جدا کردن جریان زیرسطحی از مقدار تغذیه
اندازه‌گیری تغییرات یا گرادیان دبی	$10m^2$-Km^2	ساعت (بیشتر از ماه تا سال)	ساده، اندازه‌گیری مستقیم حجم آب جریان، محاسبه بیلان جرمی آب	حجم کار بالا، مشکل بودن هنگام جریان کم یا آشفته، برای ایجاد منحنی سرعت در همه مناطق باید تبخیر و جریان ورودی و خروجی را محاسبه کرد،
تزریق ردیاب	$10m^2$-Km^2	ساعت تا روز	اندازه‌گیری هدررفت و جریان‌های جانبی داخلی در کل شاخه	اندازه‌گیری نقطه‌ای (زمان)، عدم تشخیص جریان زیرسطحی از هدررفت (تلف شده)، اثرات جذب ردیاب

تفاوت‌های مفهومی GW-SW در مقیاس‌های مکانی مختلف

• انواع مقیاس

مقیاس نقطه‌ای به‌عنوان کوچکترین ساختار فضایی که برای مطالعه GW-SW به‌صورت میدانی استفاده شود، تعریف می‌شود. مقیاس محلی به‌اندازه‌ای هست که برهمکنش یک رودخانه با آبخوان مورد مطالعه، واقع شود. مقیاس حوضه یا حوضه به سطوح مطالعه‌ای اشاره می‌کند که تمامی حوضه‌های کوچک را در بر می‌گیرد. مقیاس منطقه‌ای برای حوضه‌های با اندازه ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ کیلومترمربع به‌کار می‌رود.

• ویژگی‌های مقیاس نقطه‌ای

فرآیندهای فیزیکی-زیستی و شیمیایی در منافذ باز مرز بین آب سطحی و آبخوان با استفاده از مقیاس نقطه‌ای به‌صورت دقیق و جزیی بررسی می‌شود که ویژگی اصلی این مقیاس می‌باشد. بنابراین تشریح فرآیند کمی‌سازی برهمکنش بر اساس قوانین ابتدایی مکانیسم سیالات به آسانی در این مقیاس امکان‌پذیر است. محرک‌های اصلی برهمکنش‌های GW-SW، گرادیان‌های فشار در داخل و بین مخازن آب سطحی و زیرزمینی می‌باشند. در این مقیاس تعیین ویژگی‌های خاص برهمکنش با استفاده از اندازه، توزیع و شکل منافذ و اتصال آبخوان و بستر جریان انجام می‌شود. بااین‌حال تحقیقات جزیی و دقیق‌تر می‌توانند در این مقیاس مورد بررسی گیرند. در این دامنه منحصر به‌فرد فرآیندهای ابتدایی می‌توانند با دقت کافی مشاهده و بررسی شوند اما نمی‌توان تمام فرآیندهایی که در یک آبخوان اتفاق می‌افتد را بررسی نمود. زیرا برای بررسی تمام فرآیندها باید کلیه عوامل از جمله شرایط مرزی در نظر گرفته شود.

شرایط مقیاس نقطه‌ای می‌تواند برای نشان دادن مفاهیم اصلی GW-SW مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان‌مثال شار تبادلی بین آب سطحی و زیرزمینی که با استفاده از اختلاف هد هیدرولیکی و یک ضریب که هدایت هیدرولیکی از لایه‌های پایینی رودخانه را تشریح می‌کند اندازه‌گیری می‌شود. یک اصل ساده و واضح درپشت این مفهوم، قانون دارسی است . در این قانون جریان در مرز مشترک بین آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از ضریب ثابت نشت بستر جریان و اختلاف تراز هیدرولیکی به‌دست می‌آید. این مفهوم به‌طور گسترده در تشریح سیستم‌های آب‌زیرزمینی و سطحی در رویکردهای مدل‌سازی استفاده می‌شود. باوجود واضح بودن این مفهوم اما ضریب نشت در همه مکان‌ها و زمان‌ها قابل اندازه‌گیری نبوده و رابطه‌ای واضح و دقیق برای تعیین آن وجود ندارد. بنابراین با استفاده از مدل‌سازی معکوس توام با پارامترهای دیگر مانند هدایت هیدرولیکی آبخوان‌ها یا در برخی موارد تغذیه آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. این ضریب یک پارامتر واسنجی شده مدل‌سازی است که صحت‌سنجی آن دشوار است از طرفی محدودیت‌های مشاهدات میدانی نشان‌دهنده یک ضعف قابل توجه از مفاهیم مدل‌سازی تجربی می‌باشد. بنابراین یک فایده از مفاهیم مدل‌سازی فیزیکی یا طرح‌های با اتصال کامل این است که به ضریب تبادل وابسته نیستند. همچنین با بزرگتر شدن مقیاس‌ها، این مفهوم در برخی موارد نادیده گرفته می‌شود اما برای تمرکز بیشتر باید به‌طور پیوسته فاصله از بستر رودخانه بیشتر شود و کلیه فرآیندها در مناطق مجاور، بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

• ویژگی‌های مقیاس محلی

مقیاس محلی (یا مقیاس شاخه) یک مقطع بزرگتر رودخانه با دشت سیلابی آن و واحدهای زمین‌شناسی مجاور را دربرمی‌گیرد. تفاوت اصلی آن با مقیاس نقطه‌ای این است که فرآیندهای پایه و اساسی آن نمی‌تواند در روش‌های مجزا تشریح شوند و راه دیگری نیز برای جمع‌آوری برخی مشاهدات مورد نیاز وجود ندارد. در این مقیاس محدودیت‌های عملی زیادی وجود دارد که نباید فراموش شود، این جمله به این معنی است که فرآیندهای اساسی مانند تغییرات یا از بین رفتن ارتباطات را نمی‌توان نادیده گرفت اما در عمل به پارامترهای موثر نیاز است. بعضی از نتایج ریاضی نیاز به جمع‌بندی و یا تعمیم دارند.

در عمل مفهوم GW-SW با استفاده از اختلاف هد آب سطحی و زیرزمینی و یک ضریب نشت کنترل می‌شود. چالش‌های موجود در این بخش ناهمگنی‌های مکانی و زمانی بزرگ مقیاس می‌باشد. از سوی دیگر هنوز هم ممکن نیست محاسبه بیلان برای مخازن آب‌های زیرزمینی و سطحی لحاظ شود. کل آب سطحی و زیرزمینی حوضه در آبخوان اندازه‌گیری نمی‌شود و این مسئله نیاز به مطالعه و بررسی بیشتر در این مقیاس دارد. بنابراین فرآیندهایی که در بیرون از سطوح میانی اتفاق می‌افتد می‌تواند یک انگیزه برای بررسی کلیه فرآیندها و فعل و انفعالات (ایجاد رواناب، تغذیه آب‌زیرزمینی، جریان آب‌زیرزمینی منطقه‌ای) در این سیستم‌ها باشد که این موضوع بررسی همان شرایط مرزی است. چالش اصلی در این مقیاس، بزرگ بودن منطقه برای تشریح مجزای تک تک بخش‌های سیستم و بیش‌ازحد کوچک بودن این سیستم برای مطالعه سیستم‌های هیدرولوژیک جامع و کامل است. مقیاس محلی به‌همین‌دلیل باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد و به آن به مراتب اهمیت بیشتری داده شود.

• ویژگی‌های مقیاس حوضه

مقیاس زیرحوضه تمام سطوح زهکشی تا رسیدن آن‌ها به یک نقطه در ایستگاه اندازه‌گیری جریان (خروجی) را پوشش می‌دهد. معمولا فرض بر این است که بیلان آبی برای حوضه با استفاده از دبی در خروجی حوضه به‌عنوان یک ابزار کنترل ضروری لحاظ می‌شود. در این مقیاس باید برای مطالعه آب زیرزمینی، شارهای تبادلی کل مرزهای ممکن حوضه آبخیز را در نظر گرفت.

شاخه‌های مختلف جریان در مقیاس زیرحوضه GW-SW باید با سازندهای مختلف آبخوان ارتباط داشته باشد. یک حوضه باید به‌اندازه‌ای باشد که بیشتر سیستم‌های زیرسطحی را با نگاه جامع مورد توجه قرار دهد. به‌عنوان‌مثال باید انواع سازندهای زمین‌شناسی، تفاوت‌های عمودی (چینه‌شناسی و ساختارهای تکتونیکی) و فعل و انفعالات آن‌ها با توپوگرافی در نظر گرفته شود. در مناطق پرجمعیت ویژگی‌های طبیعی و دخالت‌های انسانی (ساختارهای هیدرولیکی، کاهش آب‌های سطحی و زیرسطحی) اهمیت خیلی زیادی دارند. اگرچه در مقیاس‌های بزرگتر نیاز به توجه به ساختارهای ناهمگن افزایش می‌یابد اما نتایج ریاضی فرآیندها در حوضه نیاز به تعمیم دارند.

• ویژگی‌های مقیاس منطقه‌ای

مقیاس منطقه‌ای با طیف وسیعی از عوامل شامل اقلیم، ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و انواع لنداسکیپ و فاکتورهای بیولوژیک که به موازات هم در یک منطقه یکسان باشد تعیین می‌شود. هر اندازه منطقه مورد مطالعه بزرگتر می‌شود فاکتورهای مورد بررسی مورد نیاز بیشتر شده و اندازه‌گیری و بررسی‌ها نیز پیچیده‌تر می‌شود.

لازم به ذکر است که ناهمگنی‌ها در همه مقیاس‌ها اتفاق می‌افتد و مختص مقیاس منطقه‌ای نمی‌باشد. اما از آنجاکه یک سیستم از تعدادی زیرسیستم متفاوت ساخته شده پیچیدگی‌ها و ناهمگنی‌های آن بیشتر از زیرسیستم های مجزا می‌باشد.

• فرآیندهای مربوط به GW-SW در مقیاس‌های مختلف

وابستگی‌های مقیاس فرآیندهای هیدرولوژیکی و قابلیت انتقال ویژگی‌ها، تشریح فرآیندها و پارامترهای مدل از یک مقیاس به مقیاس‌های دیگر را به‌وجود می‌آورد (کوچک کردن مقیاس و بزرگ‌نمایی آن و منطقه‌بندی) که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تعدادی از نویسندگان دلایل روشنی را برای وابستگی مقیاس برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی ارائه کرده‌اند اغلب کارهای انجام شده با وابستگی مقیاس، محدود به گسترش‌های مکانی هستند که معمولاً کوچکتر از مقیاس منطقه می‌باشند. در نتیجه لازم است دانش و آگاهی زیادی برای انجام این‌کار به‌دست‌آورد تا بتوان تحلیل فرآیندها را از مقیاس محلی به مقیاس منطقه‌ای سوق داد. به‌طورکلی در تحقیقات زیادی این فرآیندهای ممکن است در مقیاس‌های کوچک با هم ارتباط داشته باشند و در مقیاس‌های بزرگ با هم ارتباطی نداشته باشند مانند برخی مطالعاتی که Grayson و Bloeschl (۲۰۰۰)؛ Sivakumar (۲۰۰۴)؛ Sivakumer (۲۰۰۸)؛ Sivapalan و همکاران (۲۰۰۳) پیشنهاد کردند معادلات حاکم که در مقیاس کوچک به‌کارگرفته می‌شوند نمی‌توانند به اندازه کافی فعل و انفعالات هیدرولوژیکی را در سیستم‌های ناهمگن مورد بررسی قرار دهند. محققان مختلف در تلاش هستند که مفهوم‌سازی و فرموله کردن ارتباطات و ویژگی‌های عوامل مختلف در مقیاس‌های مختلف را در لنداسکیپ‌ها و اقلیم‌های مختلف که این روابط را به یک تئوری از فرآیندهای غالب تبدیل نموده به‌کار گیرند. باتوجه‌به اینکه ارتباط فرآیندها گاهی از بین می‌روند و گاهی به‌وجود می‌آیند، در ادامه مقایسه سیستم‌ها در مقیاس‌های مختلف بررسی می‌شود:

- فرآیندهای زون‌هایپریک در تعیین ماهیت و میزان برهمکنش GW-SW نقش زیادی دارند . این فرآیندها به‌طور جزیی در مقیاس‌های کوچک قابل مشاهده هستند و با افزایش مقیاس، این فرآیندها تغییر نمی‌کنند بلکه محدودیت‌های عملی قوی‌تری را می‌طلبد.

- به‌دلایل کاربردی و عملی مطالعه GW-SW در مقیاس‌های کوچک به این معنی است که مشاهدات در سطوح کوچک بررسی شود که منجر به ساده‌سازی فرآیندها خواهد شد. مطالعه GW-SW در مقیاس‌های بزرگ به معنی استفاده از مشاهدات با فاصله‌های بیشتر بین آن‌ها و ساده‌سازی‌های فرآیند در سطح مشترک آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد.

• مدل‌سازی GW-SW در مقیاس منطقه‌ای

برخلاف GW-SW مقیاس منطقه‌ای به‌عنوان یک موضوع تحقیقاتی دقیق بررسی نشده است اما شواهدی وجود دارد که در مدل‌های جامع به آن توجه زیادی شده است. مدل‌سازی جامع اغلب به‌طور گسترده بر GW-SW تمرکز می‌کند و به‌صورت متصل با مدل‌های اتمسفری، مدل‌های رشد گیاه، مدل‌های اقتصادی-اجتماعی و ... می‌باشد. نمایش واقعی مدل‌های منابع آب می‌تواند از روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گیرد که تا حدودی بررسی و تحلیل جوانب خاص ارتباط GW-SW

را مشکل می‌کند. به‌طورکلی ادغام GW-SW با مدل‌های گسترده‌تر می‌تواند بر اساس ویژگی‌های زیر طبقه‌بندی شود:

۱- فرآیندها و عوامل چرخه هیدرولوژیک که سیستم جامع را تشکیل می‌دهد.

۲- نمایش خاص مفهومی/ریاضی فرآیندها و عوامل مختلف چرخه هیدرولوژیکی

۳- درجه ارتباط بین فرآیندها و عوامل مختلف چرخه هیدرولوژیکی

۴- توصیف ماهیت و نوع اجزا و فرآیندهای به‌کار گرفته شده در مدل شامل پرسش‌هایی درباره فرآیندهای مدل‌سازی شده و یا چگونه نشان دادن شرایط مرزی

۵- جنبه‌های زمانی مدل‌های گسسته و پیوسته

۶- تنظیم اهداف، تعریف مسئله و تمرکز بر موضوعات مورد علاقه در زمینه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی (حوضه‌های آبخیز فاقد آمار).

• بسته‌های نرم‌افزاری پیش آماده برای محاسبات و بررسی برهمکنش GW-SW

باتوجه‌به اینکه ترکیب کلیه عوامل و ویژگی‌های مرتبط کار بسیار مشکلی است، بررسی این موضوع در روش‌های سیستماتیک و منظم تقریباً غیرممکن است. در ادامه بررسی‌های استراتژی‌های ارتباطی مختلف انجام شده در این زمینه ارائه شده است:

- طبقه‌بندی مدل‌های جامع بر طبق تنها طرح اتصال آن‌ها

- مدل‌های کاملاً متصل: معادله حاکم بر جریان‌های سطحی و زیرسطحی به‌طور هم‌زمان در درون یک بسته نرم‌افزاری ادغام می‌شود.

- مدل‌های با اتصال ضعیف: دو یا چد مدل منفرد با استفاده از تبادل نتایج یک مدل برای مدل دیگر به یکدیگر وصل می‌شوند. یعنی خروجی یک مدل به‌عنوان ورودی مدل دیگر به‌کار برده می‌شود.

مدل‌های با اتصال ضعیف به بخش‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- بسته‌های نرم‌افزاری آماده برای استفاده که شامل اجزای دو یا چند مدل منفرد می‌باشد و در یک چارچوب مشترک جاسازی شده است.

- اتصال ضعیف بر اساس ویژگی‌های منحصربه‌فرد و با دقت و استاندارد کمتر

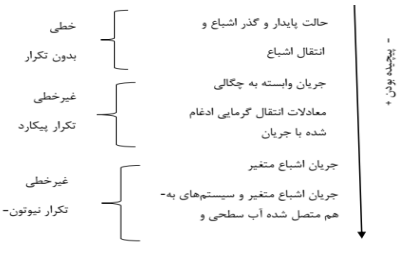
- طرح‌های کاملاً متصل: طرح‌های مدل‌سازی کاملاً متصل گاهی به مدل‌های فیزیک محور ارجاع داده می‌شوند که پیشرفت و توسعه زیاد آن‌ها در سال‌های اخیر چشمگیر بوده است. بسته‌های نرم‌افزاری که بیشترین استفاده را دارند شامل ParFlow (Kollet و Maxwell، ۲۰۰۶)، HydroGeoSphere (Therrien و همکاران، ۲۰۰۹)، InHM (VanderKwaak، ۱۹۹۹) و OpenGeoSys (Kolditz و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین می‌توان به مثال‌های بیشتری توسط Sebben و همکاران (۲۰۱۳)؛ Shi و همکاران (۲۰۱۳)؛ Partington و همکاران (۲۰۱۳)؛ Maxwell و همکاران (۲۰۱۴)؛ Bronstert و همکاران (۲۰۰۵) در این زمینه اشاره کرد. به‌طورکلی طرح‌های کاملاً متصل در تلاش هستند که به یک تشریح فیزیک-محور از همه فرآیندهای مرتبط در زون اشباع، زون غیراشباع و آب‌های سطحی برسند بنابراین این طرح‌ها مانع اجرای ماژول‌های مدل‌ها مجزا می‌شود (Brunner و Simmons، ۲۰۱۲). در این روش آن‌ها مرزهای بین بخش‌های قدیمی را (با درجات مختلف) حذف کردند و مانع ایجاد تعداد زیادی از مشکلاتی در ارتباط با استفاده از مفاهیم و بسته‌های نرم‌افزاری مختلف برای بخش‌های مختلف می‌شوند. به‌عنوان‌مثال مدل HydroGeoSphere به شبکه زهکشی رودخانه اجازه می‌دهد به این معنی است که یک رودخانه را به‌صورت طبیعی در یک مدل و برهمکنش آن با آب زیرزمینی را از طریق یک روش فیزیک محور نشان می‌دهد. در این مدل نیازی به تعریف مرزهای رودخانه یا هد هیدرولیکی آن نیست که بتواند به‌عنوان یک فایده فوق‌العاده مانع ایجاد مسائل مرتبط با مفهوم هدایت بستر جریان شود. به‌طورکلی این روش بر تغییر مسیر از نوع مفهوم‌سازی قدیمی شار از طریق سطح مشترک پایین رودخانه به‌سمت چرخه آب تأکید می‌کند. درحال‌حاضر چندین مدل از بسته‌های نرم افزاری کاملا متصل وجود دارد، از جمله این مدل‌ها می‌توان HydroGeoSphere، OpenGeoSys و PARFLOW-LCM را نام برد. در جدول (۲) مطالعات انجام شده در مقیاس‌های مختلف با استفاده از مدل‌های کاملاً متصل ارائه شده است.

جدول ۲- مرور کلی طرح‌های کاملاً متصل و کاربردهای آن‌ها در مقیاس‌های منطقه‌ای (Barthel و Banzhaf، ۲۰۱۶)

نام مدل	HydroGeosphere	OpenGeoSys	ParFlow/ParFlow.CLM
کاربردهای مقیاس منطقه‌ای/ کاربردهای بزرگ مقیاس‌شده/ کاربردهای کوچک مقیاس‌شده	Continental scale model for the whole of Canada mentioned (Sudicky، ۲۰۱۳) Rokua esker aquifer (۲۵۰ km^2) (Ala-aho و همکاران، ۲۰۱۵) Haean-myun Catchment South Korea (۶۲/۷ km^2) (Bartsch و همکاران، ۲۰۱۴) Geer Basin, Belgium, ۴۸۰ km^2 (Goderniaux و همکاران، ۲۰۱۱)	Western Dead Sea escarpment, Israel, Palestine, ۳/۸۰۰ km^2 (Grabe و همکاران، ۲۰۱۳) Meijiang catchment, China, ۶/۹۸۳ km^2 (Sun و همکاران، ۲۰۱۱)	Ringkobing Fjord / Skjern River basin catchment, western • Denmark ۲۰۸ km^2 (Ajami و همکاران، ۲۰۱۴a؛ Ajami و همکاران، ۲۰۱۴b) Little Washita basin Oklahoma, USA, ۱/۶۰۰ km^2 (Condon و Maxwell، ۲۰۱۴)

• **مدل HydroGeosphere**

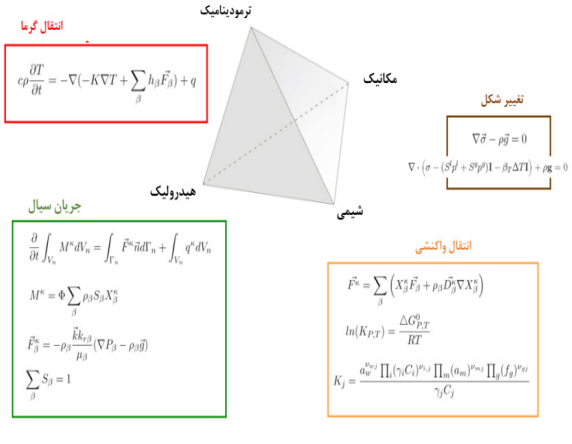
یک مدل آب زیرزمینی جز محدود کنترل حجم سه بعدی است که بر اساس مفهوم‌سازی دقیق سیستم هیدرولوژیکی متشکل از آب‌های سطحی و زیرزمینی طراحی شده است. این مدل تمام اجزای چرخه هیدرولوژیک را در نظر می‌گیرد و برای شبیه‌سازی جریان‌های سطحی و زیرسطحی برای هر مرحله از معادلات انتقال انرژی و ماده به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌نماید و یک بیلان آب کامل آب و ماده را فراهم می‌کند (Brunner و Simmons، ۲۰۱۲). در شکل (۳) بررسی اجمالی فرآیندهای با پیچیدگی‌های مختلف به‌کار گرفته شده در مدل هیدروژئوسفر و روش‌های حل آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳- بررسی اجمالی فرآیندهای با پیچیدگی‌های مختلف به‌کار گرفته شده در مدل هیدروژئوسفر و روش‌های حل آن‌ها در مدل HydroGeosphere) Brunner و Simmons، ۲۰۱۲)

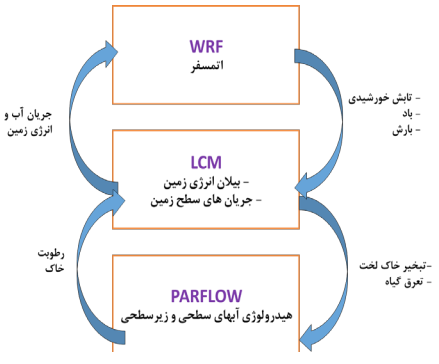
• **مدل OpenGeoSys**

این مدل یک پروژه منبع باز علمی برای توسعه روش‌های عددی و به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی، هیدرولیک، مکانیک و حرارتی در محیط‌های متخلخل و دارای شکستگی می‌باشد. استفاده از این مدل در زمینه آلاینده‌های هیدرولوژی، مدیریت فاضلاب و منابع آب، کاربردهای ژئوتکنیکی، سیستم‌های انرژی زمین گرمایی و ذخیره انرژی بسیار موفقیت آمیز بوده است. در شکل (۴) چارچوب ریاضی مدل مذکور نشان داده شده است.



شکل ۴- چارچوب ریاضی مدل شی‌گرا OpenGeosys (Kolditz O و همکاران، ۲۰۱۲)

ParFlow یک مدل عددی است که چرخه هیدرولوژی را از سنگ بستر تا بالای تاج پوشش گیاه شبیه‌سازی می‌کند. این مدل جریان آب زیرزمینی سه بعدی را با جریان سطحی و فرآیندهای گیاهی را با استفاده از معادلات فیزیک-محور برای شبیه‌سازی دقیق تبادل آب و انرژی در سیستم‌های واقعی جهان ادغام می‌کند. در شکل (۵) اجزا و متغیرهای به‌هم متصل شده و ارتباط بین آن‌ها در مدل Parflow ارائه شده است (Maxwell و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۵- شماتیک اجزا و متغیرهای بهم متصل شده و ارتباط بین آن‌ها در مدل Maxwell (Parflow و همکاران، ۲۰۱۰)

• **محدودیت و پتانسیل‌های کاربردهای مدل‌های کاملاً متصل**

قابلیت و کارآیی بیشتر مدل‌های کاملاً متصل، روشن و واضح به نظر می‌رسد درحالی‌که آن‌ها نمی‌توانند برای هر سوال در رابطه به منابع آب پاسخگو باشند (Brunner و Simmons، ۲۰۱۲). به‌وجودآمدن این مدل‌ها در درجه اول برنامه‌های مختلف آزمایشی را اثبات کرده است (Sebben و همکاران، ۲۰۱۳؛ Kollet و همکاران، ۲۰۱۰). اثبات قابلیت این مدل در مدیریت عملی هنوز در حال بررسی و آماده‌سازی است (Miller و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین کاربرد مدل‌های نرم‌افزاری کاملاً متصل برای مطالعات علمی در مقیاس‌های کوچکتر و در مناطق آزمایشی خاص با محدودیت‌های زیادی مواجه می‌باشد.

• **طرح‌های با اتصال ضعیف**

مفاهیم مدل‌سازی فیزیک محور و کاملاً متصل برای شناسایی و تشریح نسبتا ساده هستند و معمولا با عنوان جامع تعریف می‌شوند. اما ارزیابی طرح‌های با اتصال ضعیف به این‌دلیل که دو یا چند مدل با بسته‌های مجزا را در برمی‌گیرند کمی دشوار است. در حقیقت تعداد زیادی از مدل‌های مختلف برای نشان دادن پارامترهای تبادلی و جوانب زمانی و مکانی به یکدیگر متصل شده‌اند. بیشتر طرح‌های با اتصال ضعیف در یک روش و یا بیشتر بر اساس مدل MODFLOW هستند که نشان‌دهنده بخش‌های آب زیرزمینی و گزینه‌های مختلف آن می‌باشد که بخش آب سطحی را همراه با شرایط مرزی نشان می‌دهند.

در اصل MODFLOW شار کل مرز بین آبخوان و رودخانه را بر اساس اختلاف هد هیدرولیکی که یک ضریب تبادل که نشان‌دهنده هدایت هیدرولیکی از عمق و پارامترهای هندسی رودخانه از سطح مشترک است، محاسبه می‌کند. این بررسی‌ها می‌تواند با استفاده از ماژول‌های مختلفی مانند بسته رواناب سطحی، بسته زهکشی، بسته روندیابی مسیر جریان انجام شود. در جدول (۳) مطالعات انجام شده در مقیاس‌های مختلف با استفاده از مدل‌های با اتصال ضعیف ارائه شده است.

جدول ۳- مرور کلی طرح‌های با اتصال ضعیف، ماژول‌ها و بسته‌های نرم‌افزاری آماده برای استفاده (Barthel و Banzhaf، ۲۰۱۶)

نام مدل	مدل آب زیرزمینی	مدل آب سطحی	مدل زون غیراشباع	نمونه‌ای از کاربرد مدل در مقیاس منطقه‌ای
CATHY	روش اجزا محدود سه بعدی و معادله ریچارد	دیفرانسیل محدود یک بعدی، روش موج پخشی دیفیوژن	روش اجزا محدود سه بعدی و معادله ریچارد	- Des Anglais watershed, Quebec, Canada, ۶۹۰ km^2 (Sulis و همکاران، ۲۰۱۱؛ Trudel و همکاران، ۲۰۱۴) - Ged Deeble-Kalqoray catchment, Somalia, ۳۵۶ km^2 (Camporese و همکاران، ۲۰۱۰)
FEFLOW	روش اجزا محدود سه بعدی	جریان غیرماندگار یک بعدی و MIKE 11	HELP	- Middle reaches of the Heihe River Basin, Northwest China, ۱,۲۰۰ km^2 (Zhou و همکاران، ۲۰۱۱) - Annapolis Valley, Nova Scotia, Canada, ۲,۱۰۰ km^2 (Rivard و همکاران، ۲۰۱۴)
FIPR Hydrologic Model (FHM)	MODLFOW	کانال جریان یک بعدی، HSPF	مخزن ذخیره واحد، HSPF	Big Lost River, Idaho, USA,۳,۷۳۰ km۲ (Said و همکاران، ۲۰۰۵)
GSFLOW	MODLFOW	کانال جریان یک بعدی، PRMS	موج سینماتیک یک بعدی و معادله ریچارد	- Santiam river basin, Oregon, USA, ۴,۷۰۰ km^2 (Surfleet و همکاران، ۲۰۱۲؛ Surfleet، Tullos و ۲۰۱۳) - Sardon catchment, Spain, ۸۰ km^2 (TanvirHassan Hassan و همکاران، ۲۰۱۴)
IHMS	MODLFOW	DiCaSM	DiCaSM	Kouris catchment, Cyprus, ۳۰۰ km^2 (Ragab و همکاران، ۲۰۱۰)
IWFM	اجزا محدود سه بعدی و روش دیفرانسیل محدود	موج سینماتیک یک بعدی	Morel-Seytoux	California central valley, California, USA, ۵۱,۰۰۰ km^2 (Miller و همکاران، ۲۰۰۹)
MIKE SHE	دیفرانسیل محدود سه بعدی	سنت-ونانت دو بعدی	روش بیلان آب دو لایه‌ای	The North China Plain, China, ۱۴۰,۰۰۰ km^2 (Qin و همکاران، ۲۰۱۳)
MODBRANCH	MODFLOW	سنت-ونانت یک بعدی	عدم توانایی شبیه‌سازی زون اشباع	Rio Grande, New Mexico, USA, ۵۱ km^2 (Wilcox و همکاران، ۲۰۰۷)
MODCOU/ EauDyssée	مدل SAM	RAPID، مدل ماسکینگام یک بعدی و HEC- RAS	مدل مفهومی بیلان آب و خاک	- Seine basin, France, ۹۵,۶۰۰ km^2 (Ledoux و همکاران، ۲۰۰۷) - Rhône basin, ۸۶,۵۰۰ km^2 (Etchevers و همکاران، ۲۰۰۱)
MODHMS	MODFLOW	بسته جریان کانال، سنت-ونانت یک بعدی	معادله ریچارد سه بعدی	Sandy Creek, Australia, ۴۲۰ km^2 (Werner و همکاران، ۲۰۰۶)
MODFLOW stream package	MODFLOW	موج سینماتیک یک بعدی و معادله ریچارد	بسته جریان مدل MODFLOW	Cosumnes river basin, California, USA, ۳,۴۰۰ km^2 (Fleckenstein و همکاران، ۲۰۰۶)
SWAT-MOD/ SWAT-MODFLOW	MODFLOW	SWAT	عدم توانایی شبیه‌سازی زون اشباع	Musimcheon Basin, South Korea, ۱۹۸ km^2 (Kim و همکاران، ۲۰۰۸)
WaSiM, WaSiM-ETH	روش دیفرانسیل دوبعدی	موج سینماتیک دو بعدی و ذخیره خطی واحد	TOPMODEL و معادله‌ریچارد	Rems catchment, Germany, ۵۸۰ km^2 (Singh و همکاران، ۲۰۱۲)
WetSpass	MODFLOW	استدلالی اصلاح شده	بیلان آب در خاک	Black Volta Basin, ۱۵۵۰۰۰ km^2 (Abdollahi و همکاران، ۲۰۱۷)

• محدودیت‌ها و پتانسیل‌های کاربردهای مدل‌های با اتصال ضعیف

طرح‌های مدل‌سازی با اتصال ضعیف به‌طور گسترده‌ای برای مقیاس‌های منطقه‌ای در حال توسعه هستند اما تعداد مقالات و کاربردهای منطقه‌ای چاپ شده کم است. باتوجه‌به کارهای انجام شده می‌توان گفت که هر مدل منحصربه‌فرد تنها برای زمان‌ها و وقایع خاصی به‌کار گرفته می‌شود و نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقایسه آن‌ها کار مشکلی است.

از مشکلات مربوط با طرح‌های با اتصال ضعیف این است که مدل‌ها قادر به اندازه‌گیری سطح رودخانه در هر نقطه در امتداد رودخانه نیستند. برای به‌دست‌آوردن اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه جریان هیدرولیکی بر اساس اختلاف فشار، درون‌یابی تراز رودخانه بین اندازه‌گیری‌ها یا راه‌حل‌های ساده و عملی مورد نیاز می‌باشد. همچنین ارتفاع‌های پایین رودخانه در بالای سطح مبنا (سطح آزاد دریا)، اغلب قادر به اندازه‌گیری در تمام انشعابات رودخانه نیست. به‌این ترتیب ارتفاعات پایین کانال را ثابت فرض کرده و یا از داده‌های کمکی مشتق می‌شود (Wolf و همکاران، ۲۰۰۸؛ Scibek و همکاران، ۲۰۰۷). مشکلات رایجی که در سیستم‌های با اتصال ضعیف در رابطه با بررسی برهمکنش GW-SW وجود دارد بر اساس محاسبه جریان در نتیجه دیفرانسیل و تفاضل هد، هندسه بستر جریان و ویژگی‌های هیدرولیکی به‌وجود می‌آید.

جمع‌بندی

در بخش اول این بررسی مروری به مفاهیم و کلیات برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی از جمله اهمیت بررسی برهمکنش، سیستم‌های برهمکنش و مقایسه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مختلف پرداخته شد. در بخش دوم به‌عنوان هدف اصلی تحقیق، مطالعات علمی انجام شده در زمینه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های مختلف مکانی از مقیاس نقطه‌ای تا مقیاس منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت در هر یک از این مقیاس‌ها تفاوت‌های مکانیسم برهمکنش با سایر مقیاس‌ها بررسی شد. سپس مدل‌سازی جامع منطقه‌ای در مقیاس منطقه‌ای به‌صورت خاص مطالعه شد.

نتایج بررسی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مختلف، ضرورت مدیریت جامع این دو زیرسیستم را به‌عنوان یک سیستم واحد یادآوری می‌کند. در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک که بارش‌ها به‌صورت فصلی و تغییرات زیاد بوده و به میزان قابل توجهی کمتر از میزان تبخیر محیط هستند برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی (تالاب‌ها از نظر زمانی و مکانی) پویایی قابل توجهی دارد. در فصول سرد آب‌های زیرزمینی که شوری پایینی دارند تأثیر مثبتی بر اکولوژی تالاب دارند اما در دوره‌های خشک هنگامی‌که سطح آب زیرزمینی کاهش می‌یابد جریان‌های ورودی به اراضی مرطوب کم و یا کاملاً متوقف می‌شوند. برعکس اگر آب زیرزمینی شور باشد و افزایش جریان تالاب ناشی از ورود جریان آب زیرزمینی باشد ممکن است اثرات زیان‌باری برای آبزیان و کاربری‌های مختلف اراضی داشته باشد. به‌طورکلی مقایسه برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در چشم‌اندازهای مختلف نشان می‌دهد، میزان برهمکنش تحت تأثیر فاکتورهای مختلف فیزیکی چشم‌اندازها مانند توپوگرافی و زمین‌شناسی، عوامل اقلیمی و... می‌باشد. برای مدیریت جامع منابع آب باید چشم‌اندازهای مختلف کلیه فرآیندهای فیزیکی، زمین‌شناسی و اقلیمی و عوامل انسانی، اقتصادی، اکولوژیکی و محیط‌زیستی در نظر گرفته شوند. اما در چشم‌انداز مخروط‌افکنه و کارست مدل‌سازی برهمکنش می‌تواند اهمیت ویژه‌ای داشته باشد به‌طوری‌که فرآیندهای تبادلی آبخوان در مخروط‌افکنه‌ها می‌تواند به‌صورت دو سناریو شکل گیرد: ۱- رودخانه زاینده باشد و جریان آب‌زیرزمینی از طریق بستر رودخانه وارد رودخانه شود. ۲- به‌صورت رودخانه کاهنده باشد و آب رودخانه از طریق رسوبات به آب زیرزمینی نفوذ کند. اغلب آمیزه‌ای از این دو در یک جریان رودخانه‌ای به‌وجود می‌آید به‌نحوی‌که در برخی انشعابات زاینده و در برخی دیگر کاهنده است. اما جهت تبادل جریان وابسته به هدایت هیدرولیکی است. در انشعابات زاینده تراز سفره آب زیرزمینی بالاتر از ارتفاع بستر رودخانه است و برعکس در رودخانه کاهنده تراز سفره آب زیرزمینی پایین‌تر از ارتفاع بستر رودخانه است. در رودخانه کاهنده، درجایی‌که سفره آب زیرزمینی زیر بستر جریان هست جریان ناپیوسته از سیستم آب زیرزمینی توسط زون غیراشباع قطع می‌شود. تغییرات فصلی در الگوهای بارش و همچنین وقایع بارشی منفرد می‌تواند سفره آب زیرزمینی و تراز رودخانه را تغییر دهد و باعث تغییر در جهت تبادل جریان شود. بنابراین در مدل‌سازی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های مختلف توجه به کلیه فرآیندهای موجود در سیستم از جمله رودخانه‌های کاهنده و زاینده که از جهت هدایت هیدرولیکی جریان تبعیت نمی‌کنند، ضروری می‌باشد.

هدف این مقاله مروری بررسی مطالعات علمی مرتبط با مدل‌سازی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی بوده تا به‌عنوان یک راهنما برای چگونگی تجزیه و تحلیل کردن، تشریح و تفسیر مدل‌سازی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای قابل استفاده باشد. بخش زیادی از مطالعات در دسترس نشان می‌دهد بحث GW-SW در مقیاس‌های کوچک در این زمینه هم از نظر تجربی و هم مدل‌سازی به‌سرعت در حال افزایش است اما این موضوع در مقیاس منطقه‌ای به درستی بررسی نشده و نیازمند مطالعه تکمیلی است. بخشی از بررسی مسئله GW-SW در مقیاس منطقه‌ای، تعریف دقیق برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی به‌عنوان فرآیندی با موقعیت، جهت و نیروهای غالب مشخص مشکل است اما در مقیاس محلی به‌راحتی قابل تشریح است. GW-SW در

مقیاس منطقه‌ای می‌تواند در نتیجه ترکیب همه فرآیندهای موجود در یک آبخیز منطقه‌ای باشد. اما چگونه این فرآیندها با ویژگی‌های منطقه‌ای و ترکیب فاکتورهای مختلف با هم ارتباط پیدا می‌کنند؟ آنچه که اهمیت بیشتری می‌یابد تعیین ارتباط فرآیندهای مختلف نیازمند تعریف مسئله، در دسترس بودن داده‌ها، محدودیت‌های عملی و تقاضاها، می‌باشد. بنابراین تعریف چارچوب GW-SW در مقیاس منطقه‌ای از مقیاس محلی ضروری‌تر می‌باشد. GW-SW در مقیاس منطقه‌ای کل چرخه هیدرولوژیکی زمینی، همه فرآیندهای منجر به تغییر فشار، اشباع و.... در داخل و حتی خارج از محیط مورد بررسی را در برمی‌گیرد. بهترین منبع اطلاعات درباره GW-SW در مقیاس منطقه‌ای، مطالعه مدل‌سازی جامع است. انواع زیادی از مفاهیم مدل‌سازی وجود دارند که قادر به نشان دادن برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی هستند. تعدادی از این مفاهیم قابلیت کاربرد در مقیاس منطقه‌ای را دارند اما هنوز کاربردهای واقعی مقیاس منطقه‌ای آن‌ها نادر می‌باشند. دانش در دسترس در این رابطه پراکنده و برای استفاده مشکل خواهد بود. اگر GW-SW در مقیاس منطقه‌ای به‌عنوان مجموعه‌ای از همه فرآیندهای هیدرولوژیکی در یک منطقه یا حوضه در نظر گرفته شود مدل‌های جامع فیزیک-محور روش مناسبی برای بررسی این موضوع می‌باشند. این مدل‌ها به توصیف کلی چرخه هیدرولوژیک و ارتباط بین فرآیندهای مختلف در همه مقیاس‌های زمانی و مکانی نیاز دارند. بسیاری از محققان معتقدند که مدل‌سازی جامع منطقه‌ای در زمینه دسترسی به داده‌ها دچار محدودیت بوده و مدل‌های کاملاً متصل هنگامی‌که با محدودیت داده مواجه باشند نمی‌توانند به‌کار گرفته شوند. بنابراین برخلاف جذابیت مدل‌های کاملا متصل، اتصال مدل‌های نسبتا ساده با استفاده از مدل‌های متصل ساده ممکن است رویکرد مناسبی را ارائه دهند که پیچیدگی‌های سیستم‌های منطقه‌ای را بیش‌ازحد ساده‌سازی نماید (Brunner و همکاران، ۲۰۱۰؛ Semenova و Beven، ۲۰۱۵).

درحال‌حاضر نمی توان هیچ‌یک از دیدگاه‌های با پیچیدگی بیشتر یا کمتر به‌عنوان رویکرد بهتر معرفی کرد. مقایسه سیستماتیک با استفاده از چندین دیدگاه جایگزین برای مقیاس منطقه‌ای در حال کمرنگ شدن هستند بنابراین مزایا و معایب یک رویکرد نسبت به سایر رویکردها به‌خوبی مشخص نیست. تعیین مناسب‌ترین استراتژی برای مدل‌سازی جامع مقیاس منطقه‌ای با تمرکز کردن تنها بر روی یک نقطه نظر ممکن نیست. اگر جامعه علمی رویکردهای کاربردی، عمومی و قابل انتقال برای مقابله با GW-SW در مقیاس منطقه‌ای را مطلوب بدانند امکان ندارد که یک رویکرد بتواند مستقل از زمینه مدیریت کاربردی، تعریف شود. بنابراین در تعریف مسائل مدیریتی نیاز به راه‌حل‌هایی در سطوح مختلف با دقت زمانی و مکانی خاص هست که گامی ضروری در تعیین درجه عدم قطعیت قابل قبول آن‌ها می‌باشد. بنابراین رویکردها نیاز به زمینه تخصصی دارند و همیشه نیازمند تعریف روابط آن‌ها با ذی‌نفعان و کاربران نهایی می‌باشد. مدل‌های منطقه‌ای ممکن است از جوانب مختلف و صرفا برای اهداف خاص اجرا شوند. همچنین این مدل‌ها می‌توانند بر اساس تقاضا در مقیاس‌های مختلف در مدیریت کاربردی منابع آب یا توسعه مدل‌های جامع با هدف ارائه یک چارچوب منطقه‌ای برای راه‌حل‌های محلی آشیانه‌ای و تودرتو، توسعه پیدا کنند. رویکردهای مشارکتی و بین‌رشته‌ای ممکن است برای ارائه راه‌حل‌های منطقه‌ای به‌صورت معنی‌داری مفید باشند. به‌جای اینکه سوال شود که چگونه می‌توان به‌طوراساسی همه فرآیندهای مرتبط در مقیاس منطقه را تعریف، درک، تشریح و مدل‌سازی کرد باید سوال شود که ماهیت نتیجه مدل‌ها در جهت نیازهای مدیریت کاربردی در مقیاس منطقه‌ای چگونه است. در دو پروژه مقیاس منطقه‌ای که یک گفتگوی فشرده با ذی‌نفعان و کاربران نهایی مدل انجام شده است به کرات اشاره شده که بین علم و عمل شکاف زیادی وجود داشته و دانشمندان علم را در عمل به‌کار نمی‌گیرند و نیاز به اعتماد کاربران به مدل‌های توسعه داده شده توسط دانشمندان ملموس می‌باشد (Argent و همکاران، ۱۹۹۹؛ Borowski و Hare، ۲۰۰۷؛ Brugnach و همکاران، ۲۰۰۷؛ de Kok و Wind، ۲۰۰۳؛ Lerner و همکاران، ۲۰۱۱؛ Olsson و Andersson، ۲۰۰۷)

بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با GW-SW در مقیاس منطقه‌ای نشان می‌دهد مطالعات اندکی در این ارتباط وجود دارد که مستقیماً به این مبحث تخصیص پرداخته باشد. مطالعات و آزمایش‌های میدانی بر پایش‌های منطقه‌ای آب‌های سطحی و زیرزمینی عمدتا بسیار محدود می‌باشند، که به‌عنوان محدودیت‌های اساسی تئوریکی برای چگونگی بررسی آن‌ها مشکل ایجاد می‌کند. دانش اینکه چگونه GW-SW در مقیاس منطقه‌ای آزمایش شود از مطالعات خارج از مقیاس محلی و فاقد یک تئوری شفاف در مورد مقیاس نشات می‌گیرد (Sebbenو همکاران، ۲۰۱۳). ارتباط فرآیندها ممکن است در مقیاس‌های مختلف متفاوت باشد، اما هیچ اثبات عددی و کمی از این موضوع در رابطه با GW-SW وجود ندارد. در جمع‌بندی نهایی دانش موجود مربوط به GW-SW در مقیاس منطقه‌ای خیلی پراکنده بوده و در دامنه گسترده‌ای از زمینه‌های تحقیقاتی توزیع شده است.

پی‌نوشت

1- Groundwater- Surface Water Interaction

منابع

آذری، آ.، علی محمد آخوند، ع.، رادمنش، ف. و حقیقی، ع. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در شرایط بهره‌برداری

تلفیقی (مطالعه موردی: دشت دز). نشریه علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)،۳۸(۲): ۳۳-۴۷.
زیبایی، م.ح.، زیبایی، م. و اردوخانی، ک. ۱۳۹۲. ارزیابی سناریوهای استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت فیروزآباد فارس. مجله علمی -پژوهشی تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱:۱۵۷-۱۸۱.
شمسایی، ا و فرقانی، ع. ۱۳۹۰. بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک. مجله علمی پژوهشی تحقیقات- منابع آب ایران، ۷: ۲۶-۳۷.
فاریابی، م. و چیت‌سازان، م. ۱۳۹۵. بررسی برهمکنش رودخانه و آبخوان با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی، مطالعه موردی: بخش شمالی محدوده دزفول- اندیمشک. فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست، ۱۰(۳۴): ۱۰۱-۱۱۵.

Abdollahi K.h. Bshir I., Verbeiren B., Harouna M.R., Griensven A.V., Huysmans M. and Batelaan O. 2017. A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. Environ Earth Sci, 76: 198.

Ajami H. Evans J.P. McCabe M.F. and Stisen S. 2014a. Technical note: Reducing the spin-up time of integrated surface water-groundwater models. Hydrol Earth Syst Sci, 18: 5169–5179.

Ajami H. McCabe M.F. Evans J.P. Stisen S. 2014b. Assessing the impact of model spin-up on surface watergroundwater interactions using an integrated hydrologic model. Water Resour Res, 50: 2636–2656.

Ala-aho P., Rossi P.M., Isokangas E. and Kløve B. 2015. fully integrated surface–subsurface flow modelling of groundwater–lake interaction in an esker aquifer: Model verification with stable isotopes and airborne thermal imaging. J Hydrol, 522: 391–406.

Argent R.M., Grayson R.B. and Ewing S.A. 1999. Integrated models for environmental management: Issues of process and design. Environ Int, 25: 693–699.

Barthel R. and Banzhaf S. 2016. Groundwater and Surface Water Interaction at the Regional-scale – A Review with Focus on Regional Integrated Models. Water Resour Manage, 30: 1–32.

Bartsch S., Frei S., Ruidisch M., Shope C.L., Peiffer S., Kim B. and Fleckenstein J.H. 2014. River-aquifer exchange fluxes under monsoonal climate conditions. J Hydrol, 509: 601–614.

Born N. 2011. Conjunctive water management: how to use the full potential, a literature research, Bachelor thesis Irrigation and Water Engineering submitted in partial fulfillment of the degree of Bachelor of Science in International Land and Water Management at Wageningen University, the Netherlands.

Borowski I. and Hare M. 2007. Exploring the gap between water managers and researchers: Difficulties of modelbased tools to support practical water management. Water Resour Manag, 21: 1049–1074.

Bronstert A., Carrera J., Kabat P. and Lütkemeier S. 2005. Coupled models for the hydrological cycle – integrating atmosphere, biosphere, and pedosphere. Springer.

Brugnach M., Tagg A., Keil F. and De Lange W.J. 2007. Uncertainty matters: Computer models at the science-policy interface. Water Resour Manag, 21: 1075–1090.

Brunke M. and Gonser T. 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and ground-water. Freshwater Biol, 37: 1–33.

Brunner P., Simmons C.T., Cook P.G. and Therrien R. 2010. Modeling Surface Water-Groundwater Interaction with MODFLOW: Some Considerations. Ground Water, 48:174–180.

Brunner P. and Simmons C.T. 2012. HydroGeoSphere: A Fully Integrated, Physically Based Hydrological Model. Ground Water, 50: 170–176.

Camporese M., Paniconi C., Putti M. and Orlandini S. 2010. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data. Water Resour Res, 46: 22.

Christine E., Hatch Andrew T., Fisher Justin S., Revenaugh Constantz J. and Ruehl C. 2006. Quantifying surface water–groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development. WATER RESOURCES RESEARCH, 42.

Condon L.E. Maxwell RM. 2014. Groundwater-fed irrigation impacts spatially distributed temporal scaling behavior of the natural system: A spatio-temporal framework for understanding water management impacts Environ Res Lett 9.

Corinna A., Thorsten W. and Gunnar N. 2008. Groundwater-Surface Water Interaction: Process Understanding, Conceptualization and Modelling (IAHS Proceedings & Reports). ISSN ,0144- 7815.

De Kok J.L. and Wind H.G. 2003. Design and application of decision-support systems for integrated water management: lessons to be learnt. Phys Chem Earth 28: 571–578.

Etchevers P., Golaz C. and Habets F. 2001. Simulation of the

Harris B. 2011. Challenges in developing an integrated catchment management model. Water Environ J., 25: 345–354.

Maxwell R.M., Kollet S.J., Smith S.G., Woodward C.S., Falgout R.D., Ferguson I.M., Baldwin C., Bosl W.J., Hornung R. and Ashby S. 2010. ParFlow User's Manual. International Ground Water Modeling Center Report GWMI, 01: 132.

Maxwell R.M., Putti M., Meyerhoff S., Delfs J.O., Ferguson I.M., Ivanov V., Kim J., Kolditz O., Kollet S.J., Kumar M., Lopez S., Niu J., Paniconi C., Park Y.J., Phanikumar M.S., Shen C., Sudicky E.A. and Sulis M. 2014. Surface-subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. Water Resour Res, 50: 1531–1549.

Miller N.L., Dale L.L., Brush C.F., Vicuna S.D., Kadir T.N., Dogrul E.C. and Chung F.I .2009. Drought resilience of the California central valley surface-ground-water- conveyance system. J AmWater Resour As, 45: 857–866.

Miller C.T., Dawson C.N., Farthing M.W., Hou T.Y., Huang J.F., Kees C.E., Kelley CT. and Langtangen H.P. 2013. Numerical simulation of water resources problems: Models, methods, and trends. Adv Water Resour, 51: 405–437.

Olsson J.A. and Andersson L. 2007. Possibilities and problems with the use of models as a communication tool in water resource management. Water Resour Manag, 21: 97–110.

Qin H., Cao G., Kristensen M., Refsgaard J.C., Rasmussen M.O., He X., Liu J., Shu Y. and Zheng C. 2013. Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management. Hydrol Earth Syst Sci, 17: 3759–3778.

Ragab R., Bromley J. D., Rflinger G. and Katsikides S. 2010. IHMS-Integrated hydrological modelling system. Part 2.application of linked unsaturated, DiCaSM and saturated zone, MODFLOW models on Kouris and Akrotiri catchments in Cyprus. Hydrol Process, 24: 2681–2692.

Rivard C., Lefebvre R. and Paradis D. 2014. Regional recharge estimation using multiple methods: An application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). Environ Earth Sci, 71: 1389–1408.

Rorabaugh. M.I. 1964. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow: International Association of Scientific Hydrology, Publication 63: 432-441.

Rushton K.R. and Tomlinson L.M. 1979. Possible mechanisms for leakage between aquifers and rivers. J Hydrol 40: 49–65.

Said A., Stevens D.K. and Sehlke G. 2005. Estimating water budget in a regional aquifer using HSPF-modflow interwater budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994. J Hydrol, 244: 60–85.

Fleckenstein J.H., Niswonger R.G. and Fogg G.E. 2006. River-aquifer interactions, geologic heterogeneity, and low-flow management. Ground Water, 44: 837–852.

Ford D. Williamsm P. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology: ohn&Sons, Ltd.

Jacobs K.L. and Holway J. M. 2004. Managing for sustainability in an arid climate: Lessons learned from 20 years of groundwater management in Arizona, USA. Hydrogeology Journal, 12(1): 52-65.

Gräbe A., Rödiger T., Rink K., Fischer T., Sun F., Wang W., Siebert C. and Kolditz O. 2013. Numerical analysis of the groundwater regime in the western Dead Sea escarpment, Israel + West Bank. Environ Earth Sci, 69: 571–585.

Goderniaux P., Brouyére S., Blenkinsop S., Burton A., Fowler H.J., Orban P. and Dassargues A. 2011. Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios. Water Resour Res, 47(12): 1-17.

Grayson R.B. and Bloeschl G. 2000. Spatial Patterns in Hydrological Processes: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge.

Kim N.W., Chung I,M., Won Y.S. and Arnold J.G. 2008. Development and application of the integrated SWATMODFLOW model. J Hydrol, 356: 1–16.

Kolditz O. and et al . 2012. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media, Environ Earth Sci, 67: 589–59.

Kollet S.J. and Maxwell R.M. 2006. Integrated surface-groundwater flow modeling: a freesurface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. Adv Water Resour, 29: 945–58.

Kollet S.J., Maxwell RM., Woodward CS., Smith S., Vanderborght J., Vereecken H. and Simmer C. 2010. Proof of concept of regional scale hydrologic simulations at hydrologic resolution utilizing massively parallel computer resources. Water Resour Res, 46(4): 1-7.

Ledoux E., Gomez E., Monget J.M., Viavattene C., Viennot P., Ducharne A., Benoit M., Mignolet C., Schott C. and Mary B. 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. Sci Total Environ, 375: 33–47.

Lerner D.N., Kumar V., Holzkämper A., Surridge B.W.J. and

Surfleet C.G. and Tullos D. 2013. Uncertainty in hydrologic modelling for estimating hydrologic response due to climate change (Santiam River, Oregon). Hydrol Process, 27: 3560–3576.

TanvirHassan. S.M., Maciek W., L., Richard G.N. and Zhongbo S.u.2014. Surface–groundwater interactions in hard rocks in Sardon Catchment of western Spain: An integrated modeling approach. Journal Hydrol, 517(19): 390–410.

Therrien R., McLaren R.G., Sudicky E.A. and Panday S.M .2009. HydroGeoSphere – a three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Groundwater Simulations Group.

Trudel M., Leconte R. and Paniconi C. 2014. Analysis of the hydrological response of a distributed physically-based model using post-assimilation (EnKF) diagnostics of streamflow and in situ soil moisture observations. J. Hydrol, 514: 192–201.

VanderKwaak J.E. 1999. Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface-subsurface hydrologic systems. University of Waterloo, Thesis, 243.

Werner A.D., Gallagher M.R. and Weeks S.W. 2006. Regional-scale, fully coupled modelling of stream–aquifer interaction in a tropical catchment. J Hydrol, 328: 497–510.

White W.b. 1998. Geomorphology and hydrology of a karst terrains: Oxford University press.

Wilcox L.J., Bowman R.S. and Shafike N.G. 2007. Evaluation of Rio Grande Management Alternatives Using a Surface-Water/Ground-Water Model1. J Am Water Resour As, 43: 1595–1603.

Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. and Alley W.M. 1998. Groundwater and surface water - a single resource, 1139. USGS.

WGMS and UNEP. 2008. Global glacier changs: facts and figures.

Wolf J., Barthel R. and Braun J. 2008. Modeling ground water flow in alluvial mountainous catchments on a watershed scale. Ground Water, 46: 695–705.

Zhou J., Hu B.X., Cheng G., Wang G. and Li X. 2011. Development of a three-dimensional watershed modeling system for water cycle in the middle part of the Heihe rivershed, in the west of China. Hydrol Process 25: 1964–1978.

Zhuoheng C., Stephen E., Grasby Kirk G. and Osadet Z. 2004. Relationship between climate variability and ground Water Levels in the upper carbonate aquifer southern, Manitoba, Canada. Journal of Hydrology, 290(1-2): 43-62.

grated model. J Am Water Resour As, 41: 55–66.

Sebben M.L., Werner A.D., Liggett J.E., Partington D. and Simmons C.T .2013. On the testing of fully integrated surface-subsurface hydrological models. Hydrol Process, 27: 1276–1285.

Semenova O. and Beven K. 2015. Barriers to progress in distributed hydrological modelling. Hydrol Process:n/a-n/a.

Scibek J., Allen D.M., Cannon A.J. and Whitfield P.H. 2007. Groundwater–surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. J Hydrol, 333:165–181.

Singh S.K. Liang J.Y. and Bardossy A. 2012. Improving the calibration strategy of the physically-based model WaSiM-ETH using critical events. Hydrol Sci J., 57: 1487–1505.

Sivakumar B. 2004. Dominant processes concept in hydrology: moving forward. Hydrol Process, 18: 2349–2353.

Sivakumar B. 2008. Dominant processes concept, model simplification and classification framework in catchment hydrology. Stoch Env Res Risk A, 22: 737–748.

Sivapalan M.B.G., Zhang L. and Vertessy R. 2003. Downward Approach to Hydrological Prediction. Hydrol Process, 17: 2101–2111.

Sophocleous M.A .2002. Groundwater recharge. In: Silveira L (Ed) Encyclopedia of life support systems. EOLSS, Oxford. GROUNDWATER, 126- 164.

Steven M.W. 2015. Groundwater – surface water interactions: perspectives on the development of the science over the last 20 years. Freshwater Science, 34(1): 368–376.

Sudicky E.A. 2013. A Physically-Based Modelling Approach to Assess the Impact of Climate Change on Canadian Surface and Groundwater Resources. In: 3rd International HydroGeoSphere User Conference 2013. Neuchatel Switzerland.

Sulis M., Paniconi C., Rivard C., Harvey R. and Chaumont D. 2011. Assessment of climate change impacts at the catchment scale with a detailed hydrological model of surface-subsurface interactions and comparison with a land surface model. Water Resour Res, 47: W01513.

Sun F., Chen C., Wang W., Wu Y. and Lai G. 2011. Kolditz O Compartment approach for regional hydrological analysis: Application to the Meijiang catchment, China. IAHS-AISH Publication, In, 102–108.

Surfleet C.G., Tullos D., Chang H. and Jung I.W.2012. Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures. J Hydrol, 464-465: 233–248.