

# روشهای مختلف تغذیه مصنوعی ، هیدرولیک

## و مدیریت آن

# روشهای مختلف تغذیه مصنوعی، هیدرولیک و مدیریت آن

## پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی اجتماعی و زیست محیطی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر کرده است. نظر به گستردگی دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن موارد بالا و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و از این رو، آب وزارت نیرو با همکاری سازمان برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب کرده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره کاریها و اتلاف منابع مالی و غیر مالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

امید است، مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب با به کارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش و صاحب نظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده، در تکامل این استانداردها همکاری کنند.

## ترکیب اعضای کمیته

ترجمه اولیه این نشریه از فصل چهارم کتاب Over View and Fundamental Consideration با نام :  
Artificial Recharge : Methods, Hydraulics and Monitoring نوشته Edward T.oaksford از بخش  
منابع آب سازمان زمین شناسی آمریکا به وسیله آقای مجید سلسله انجام شده است و سپس در کمیته تخصصی تغذیه  
مصنوعی، ضمن مطابقت با متن اصلی تجدیدنظر، ویرایش و تصویب شده است.  
اسامی اعضای گروه تغذیه مصنوعی (کمیته فنی شماره ۱۲) طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور به شرح زیر  
است :

کارشناس زمین شناسی	خانم فیروزه امامی
کارشناس مهندسی آب زیرزمینی	آقای کامبیز تفوق
کارشناس مدیریت ساخت	آقای علی توانایی مروی
کارشناس زمین شناسی	آقای محمدعلی ثنایی
کارشناس عمران - هیدرولیک	آقای محمد مهدی حاج زوار
کارشناس مهندسی هیدرولوژی	آقای محمد هاشم عبایی
کارشناس زمین شناسی	آقای ابوالفضل فروزنده
کارشناس زمین شناسی و آب شناسی	آقای مهدی هاشمی بابکی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه
۱	۲- مخزن آب زیرزمینی
۱	۲-۱ تغذیه طبیعی
۲	۲-۲ تغذیه مصنوعی
۵	۳- روش های تغذیه مصنوعی
۵	۳-۱ تغذیه مستقیم از سطح زمین
۱۴	۳-۲ تغذیه مستقیم زیرزمینی
۱۹	۳-۳ ترکیب تغذیه سطحی و زیرزمینی
۲۱	۳-۴ تغذیه غیر مستقیم
۲۶	۴- فاکتورهای موثر بر روشهای تغذیه
۲۶	۴-۱ ویژگیهای هیدروژئولوژیک
۲۷	۴-۲ توپوگرافی و جریان رودخانه
۲۸	۴-۳ مشخصات آب تأمین شده
۳۰	۴-۴ فاکتورهای متفرقه
۳۰	۵- هیدرولیک تغذیه
۳۰	۵-۱ جریان اشباع
۳۳	۵-۲ جریان غیر اشباع
۳۴	۵-۳ مدل سازی آب زیرزمینی
۴۵	۵-۴ مدل های مانسته
۴۹	۵-۵ تکنیک های عددی
۵۰	۵-۶ تکنیک های مطالعه صحرایی
۵۱	۶- رفتارسنجی تغذیه مصنوعی
۵۱	۶-۱ رفتارسنجی سطح ایستابی
۵۲	۶-۲ رفتارسنجی کیفیت آب
۵۵	۷- خلاصه
۵۶	۸- فهرست منابع و مآخذ

روش‌های گوناگونی برای تغذیه آبهای زیرزمینی ابداع شده‌اند و در اکثر این روش‌ها از انواع شیوه‌های مستقیم سطحی، مستقیم زیرزمینی، غیر مستقیم و یا ترکیبی از این شیوه‌ها استفاده می‌شود. هدف این نشریه معرفی ویژگی‌های اساسی روش‌های تغذیه مصنوعی، اصول هیدرولیک آنها، عوامل مؤثر بر انتخاب روش تغذیه و شناساندن شیوه‌های مدیریت آب زیرزمینی است.

## ۲- مخزن آب زیرزمینی

عبارت "مخزن"<sup>۱</sup> معمولاً به پهنه‌های آب سطحی مانند دریاچه‌های طبیعی یا مصنوعی اطلاق می‌شود ولی برای سیستم‌های آب زیرزمینی هم به کار برده می‌شود. آبخوان‌ها، یا مواد آبدار خاکی نه تنها مخزن‌هایی برای نگهداری آب هستند، بلکه به عنوان مسیرهایی برای انتقال آب هم عمل می‌کنند [۱].<sup>۲</sup> اکثر مخازن زیرزمینی ذخیره‌ای بسیار فراتر از مقدار آبی دارند که هر ساله از خلال آنها عبور می‌کند [۲].

### ۱-۲ تغذیه طبیعی

آب موجود در مخازن زیرزمینی نتیجه تغذیه طبیعی یا مصنوعی است. تغذیه طبیعی می‌تواند از منابع متعددی مانند نفوذ عمقی بارش، نفوذ آب از بستر انهار و جریان‌های زیرزمینی از سازندهای مجاور باشد. نفوذ عمقی در سازندهای اثر آبیاری، مخازن فاضلاب و پساب‌های صنعتی نیز از سوی گروهی به عنوان تغذیه مصنوعی در نظر گرفته می‌شود [۳] ولی احتمالاً بهتر است آن را به عنوان تغذیه مصنوعی با ماهیتی تصادفی در نظر بگیریم.

نفوذ عمقی بارندگی و نفوذ آب انهار در زمین بزرگترین منابع تغذیه طبیعی در اکثر نواحی هستند، ولی بعضی از مخازن زیرزمینی عمدتاً به وسیله جریان‌های زیرزمینی و یا به صورت تصادفی تغذیه می‌شوند.

در مقایسه با ذخیره آب در سطح زمین، ذخیره آب در زیرزمین به دلایل زیر دارای مزیت است:

- آب در مخازن زیرزمینی تبخیر نمی‌شود یا تبخیر آن جزئی است.
- نیازی به انجام عملیات ساختمانی برای احداث مخازن زیرزمینی وجود ندارد.
- مخازن زیرزمینی دارای ظرفیت ذخیره بالایی هستند.

1- Reservoir

۲- منظور شماره [۱] در فهرست مراجع است.

- مخازن زیرزمینی تداخلی با کاربری اراضی در سطح زمین ندارند.
- مخازن زیرزمینی کمتر در معرض آلودگی قرار می‌گیرند.
- مخازن زیرزمینی در مقابل خشک سالی آسیب پذیری کمتری دارند.

با وجود مزایای بارز ذخیره آب در زیرزمین، درمقایسه با مخازن سطح زمین، باید موارد خاص را قبل از انتخاب سیستم ذخیره مورد بررسی قرارداد از جمله؛ هزینه‌های پمپاژ، مسائل حقوقی آب زیرزمینی، هزینه و چگونگی تأمین آب مورد نیاز برای تغذیه در صورتی که جایگزین طبیعی ناکافی باشد [۴]. افزون بر این سرعت کم حرکت آب زیرزمینی هم می‌تواند مشکل ساز باشد، به ویژه در زمانهایی که کمبود شدید آب ناشی از ذخیره ناکافی و یا تغذیه نباشد، بلکه بخاطر حرکت کند آب زیرزمینی باشد که حتی در گرادیان‌های بالای هیدرولیکی نتواند نیازهای پمپاژ را تأمین کند [۱]. در نتیجه مداخله انسان در "سیکل هیدرولوژیک"، استخراج آب زیرزمینی می‌تواند به صورت منطقه‌ای از مقدار تغذیه تجاوز کند، و شرایط نامطلوبی در آبخوان و آب سطحی در ارتباط هیدرولیکی با آن ایجاد کند [۵]. مثلاً توسعه بیش از حد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌تواند باعث افت سطح آب زیرزمینی شود که به نوبه خود باعث کاهش‌هایی در جریان‌های سطحی می‌شود و در بعضی نواحی می‌تواند باعث پیشروی آب شور بشود. در بسیاری مناطق کاهش تغذیه به وسیله عوامل زیر تشدید می‌شود:

- ایجاد پوشش در سطح کانال‌های آب سطحی به منظور کنترل فرسایش
- جمع‌آوری و انحراف رواناب سطحی به دریا
- تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی به دریا
- پوشاندن نقاط تغذیه طبیعی با مواد نفوذناپذیر
- انتقال آب سطحی ناحیه به مناطق دیگر و جلوگیری از نفوذ طبیعی آنها به آبخوان‌ها. [۶].

هنگامی که هر کدام از این موارد، تغذیه طبیعی را به شدت مختل کند، تغذیه مصنوعی می‌تواند یکی از تدابیر اصلاحی موثر باشد.

## ۲-۲ تغذیه مصنوعی

تغذیه مصنوعی به عنوان فرایند احیا آب زیرزمینی با کارهایی که اختصاصاً برای این منظور طراحی می‌شوند، تعریف شده است [۶]. در این تعریف، هدف عنصر مهمی است زیرا پروژه‌های زیادی که برای دفع رواناب‌های سیلابی، بازگرداندن آب آبیاری، فاضلاب و آب خنک‌کننده‌ها و سایر پساب‌ها طراحی شده‌اند هم آب زیرزمینی را تقویت می‌کنند، ولی در آنها تغذیه مصنوعی به عنوان واقعه‌ای "فانوی" بر اثر عملکرد اولیه آنها است. والتون<sup>۱</sup> [۷]

1- Walton

واینه سون<sup>۵</sup>] به عبارت کلی تر تغذیه مصنوعی را به عنوان عملیاتی که موجب افزایش انتقال مصنوعی آب به یک مخزن زیرزمینی می شود، تعریف کرده اند.

## ۲-۲-۱ اهداف

هدف اولیه تغذیه مصنوعی همان گونه که در دو تعریف بالا عنوان شده، افزایش مقدار آب زیرزمینی در دسترس است. بعضی اهداف دیگر عبارتند از [۷]:

- حفاظت و دفع رواناب و سیلاب
- کاهش، ایجاد موازنه و یا پس زدن پیشروی آب شور
- ذخیره آب برای کاهش هزینه های پمپاژ و لوله کشی
- ذخیره آب در فصول سرد برای استفاده در فصول رویش
- ذخیره انرژی در کاربردهای ژئوترمال آب زیرزمینی
- بهبود کیفیت آب با حذف مواد معلق جامد به وسیله فیلتراسیون در زمین

تغذیه مصنوعی کاربردهایی در دفع فاضلاب، تصفیه آنها، بازیافت ثانویه نفت، پیشگیری از نشست زمین، ذخیره آب شیرین در آبخوان های شور، توسعه کشاورزی و افزایش جریان آب رودخانه ها دارد. لیکن مزیت های تغذیه مصنوعی و استفاده از آب زیرزمینی برای تأمین آب جوامع انسانی می تواند به طور کامل یا نسبی ایرادهای مشخصی نیز داشته باشد، مانند [۸]:

- ممکن است تمام آب اضافه شده قابل بازیافت نباشد
- سطح موردنیاز برای بهره برداری و نگهداری از یک سیستم تأمین آب زیرزمینی (شامل خود مخزن زیرزمینی) معمولاً بزرگتر از آن است که برای سیستم تأمین آب سطحی موردنیاز است
- نمکهای کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز یا سایر عناصر موجود در آب تغذیه شده را نمی توان به آسانی جدا کرد
- رفع کورشدگی آبخوانها مشکل است
- تأمین نیازهای ناگهانی ممکن است عملی نباشد زیرا مخازن زیرزمینی به آسانی مخازن سطحی قابل تخلیه نیستند
- گسترش سیستم های تأمین آب جوامع انسانی می تواند پرهزینه باشد

## ۲-۲-۲ روش ها

روش های گوناگونی برای تغذیه آبهای زیرزمینی ابداع شده اند و با وجودی که یافتن دو پروژه همانند امکان پذیر



نیست؛ اکثر پروژه‌ها از انواع و یا ترکیب‌هایی از تکنیک‌های مستقیم سطحی، مستقیم زیرزمینی و یا غیرمستقیم استفاده می‌کنند. روش‌های ویژه این چهار مقوله به قرار زیر است:

### تکنیک‌های مستقیم سطحی

پخش سیلاب  
سیستم‌های خندق و شیار  
استخرها  
بهبود بستر رودخانه‌ها  
افزایش جریان رودخانه  
آبیاری بیش از نیاز

### تکنیک‌های مستقیم زیرزمینی

چاله‌های طبیعی  
گودالها و شفت‌ها  
زهکشی وارون  
چاهها

### تکنیک‌های ترکیبی سطحی - زیرزمینی

زهکشی زیرزمینی (کلکتورها با چاهها)  
استخرهای همراه چاله، شفت یا چاه

### تکنیک غیر مستقیم

تغذیه القایی از منابع آب سطحی  
بهبود آبخوان

### ۳- روش‌های تغذیه مصنوعی

تاکنون تجربه افزایش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها از راه‌های مصنوعی در کشورهای زیادی انجام شده است و کارنوبی نیست. امروزه از همان روش‌هایی استفاده می‌شود که در تجارب آغازین در اروپای اوایل قرن نوزده شناسایی شده است [۱۷]. این روش‌ها به وسیله محققان بسیاری که امکان نام بردن از همه آنها در اینجا نیست شرح داده شده‌اند [۱۷ و ۱ و ۹ و ۸ و ۶ و ۳].

تغذیه مصنوعی به وسیله پخش آب بر سطح زمین، تزریق به زیرزمین و یا نفوذ القایی از آبهای سطحی انجام می‌شود. به طور کلی در تمام موارد احیا مصنوعی آبخوان، کمیت و سرعت تغذیه از تغذیه طبیعی تجاوز می‌کند. حتی در نقاطی که تغذیه آب زیرزمینی نسبت به هدف اولیه یک پروژه فرعی است، معمولاً تمهیدات خاصی برای کمک به جنبه‌های تغذیه به کار گرفته می‌شود. با افزایش تقاضا برای آب آشامیدنی در سطح جهان، بدون شک تغذیه ضمنی بیشتر مورد توجه قرار خواهد گرفت. روش‌هایی که در زیر شرح داده می‌شود به ترتیبی است که در بخش قبلی ارائه شده است.

### ۳-۱ تغذیه مستقیم از سطح زمین

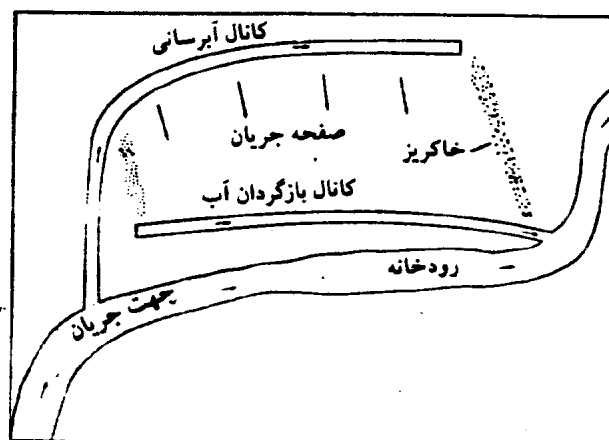
تکنیک‌های تغذیه مستقیم از سطح زمین ساده‌ترین، قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های کاربردی تغذیه مصنوعی هستند. در این روش‌ها، آب از سطح زمین با نشست از خاک به آبخوان می‌رسد. بررسی‌های صحرائی تکنیک‌های پخش آب نشان داده است، که از میان فاکتورهای متعدد حاکم بر مقدار آب وارد شده به آبخوان [۱۹ و ۱۸]، سطح مورد تغذیه و طول زمان تماس آب با خاک مهمترین فاکتورها هستند [۱۷]. روش‌های تغذیه مستقیم از سطح زمین به چند گروه تقسیم می‌شوند که شامل روش غرقابی، جوی و پشته، چاله‌ای، اصلاح انهار، افزایش آبدی انهار و آبیاری بیش از نیاز می‌شود. روش‌های دیگری (از این دسته) هم ممکن است به صورت منطقه‌ای به کار گرفته شوند ولی توضیح آنها خارج از هدف این نشریه است.

### ۳-۱-۱ پخش سیلاب

تغذیه با پخش سیلاب، تنها روی زمین‌هایی که دارای شیب ۱ تا ۳ درصد هستند امکان پذیر است. هدف آن پخش آب روی سطحی وسیع به صورت یک لایه نازک است که با حرکت آرام به طرف پای دامنه و بدون به هم خوردگی

خاک انجام می‌شود. برای به کارگیری یکنواخت، آب از چند نقطه روی زمین پخش می‌شود. خاکریزها یا جویبارها برای نفوذ منطقه‌ای یا حفاظت زمینهای مجاور می‌تواند به کار برده شود. آب اضافی را می‌توان از پایین‌ترین نقطه توپوگرافی جمع‌آوری و خارج کرد (شکل ۱). به طور کلی سرعتهای نفوذپذیری در محل‌هایی که خاک و پوشش گیاهی بهم نخورده، بالاتر است.

بزرگترین مشکل در تکنیک پخش سیلاب آلودگی است. مشکلات دیگر به سطح وسیع اراضی مورد نیاز و تبخیر مربوط می‌شود. بزرگترین مزیت این روش هزینه نسبتاً پایین احداث و نگهداری است.



شکل ۱- تغذیه مستقیم از سطح با روش غرقابی

### ۳-۱-۲ سیستم‌های خندق و شیار<sup>۱</sup>

در این روش، یک نهر آبرسان تأمین‌کننده آب مورد تغذیه است که از میان خندق یا شیارهای نزدیک به هم، کم عمق، با کف مسطح عبور داده می‌شود. اکثر سیستم‌های خندق و شیار یکی از سه الگوی کناری<sup>۲</sup>؛ شاخه‌ای<sup>۳</sup> یا تراز<sup>۴</sup> را دارند. [۲۰ و ۱۵].

سیستم‌های کناری: این سیستم‌ها مشخصاً دارای یک یا بیشتر کانال اصلی آبرسان هستند که خندق‌های کوچکتري با زاویه قائم از آنها منشعب می‌شوند (شکل ۲-الف). دریچه‌هایی در دهانه این سیستم سرعت جریان را کنترل

1- Ditch and Furrow

2- Lateral

3- dendritic

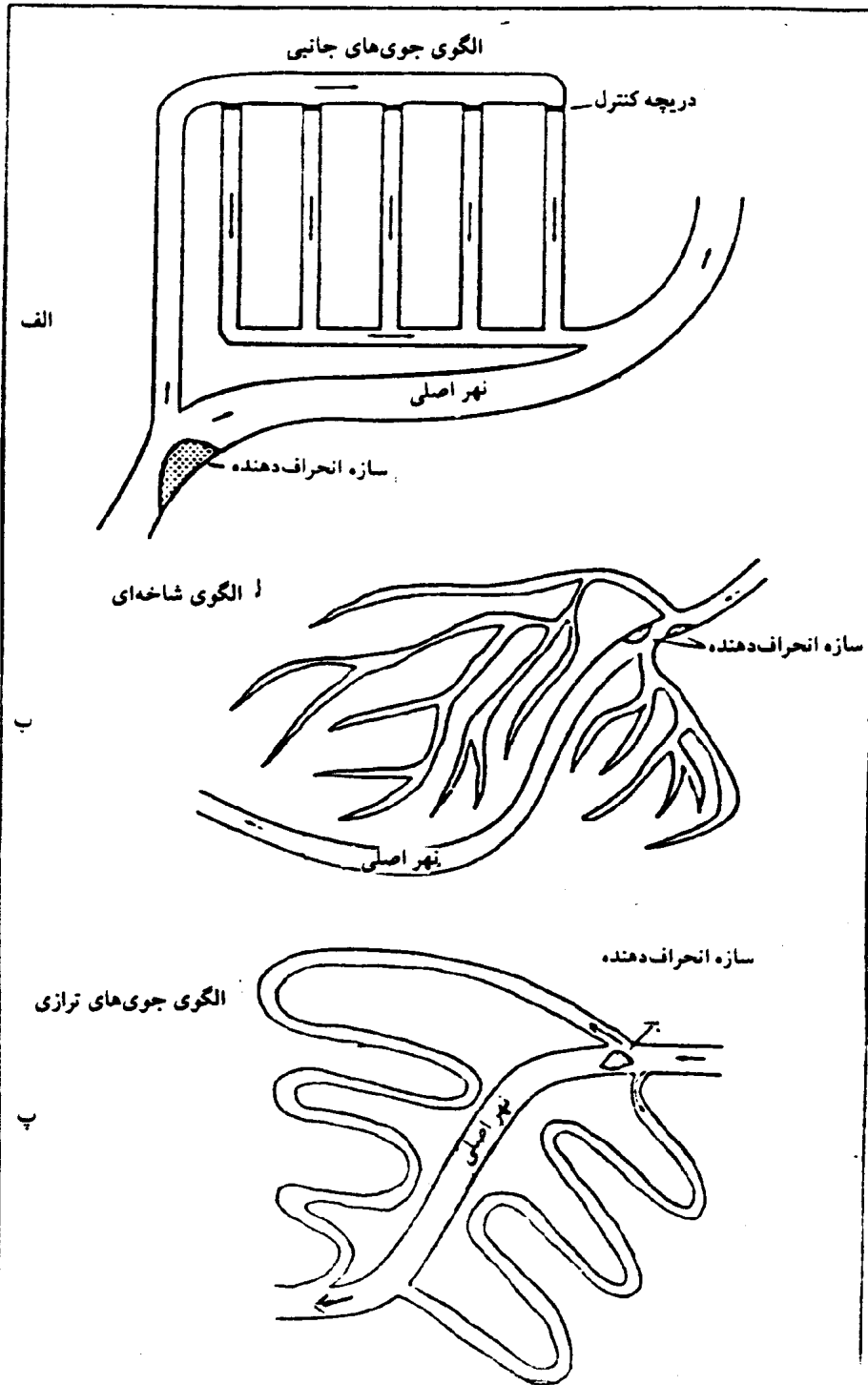
4- Contour

می‌کند. عمق شیارها بستگی به توپوگرافی دارد اما به ندرت از مقداری که برای حفظ یک سرعت یکنواخت با حداکثر سطح مرطوب شده لازم است، تجاوز می‌کند. در اکثر این سیستم‌ها آب رودخانه‌ها را به داخل کانال‌های اصلی منحرف می‌کنند و آنرا از میان یک سری شیارهای عمودی عبور می‌دهند و رواناب را در کانالی جمع‌آوری و در پایین دست به رودخانه تأمین‌کننده آب باز می‌گردانند.

سیستم‌های شاخه‌ای: در این سیستم‌ها جریان آب را از یک کانال اصلی به یک سری خندقهایی که به ترتیب کوچکتر می‌شوند منحرف می‌کنند (شکل ۲-ب). و دریچه‌هایی، جریان آب به هر سری از خندقها را کنترل می‌کند. این شاخه شاخه شدن خندقها آنقدر ادامه پیدا می‌کند که عملاً تمام آب نفوذ کند؛ احداث خندقهای جمع‌آوری آب در پایانه سیستم انتخابی است.

سیستم‌های تراز: در این سیستم‌ها آب در خندق یا خندقهایی که در امتداد خطوط تراز ساخته شده‌اند، پخش می‌شود (شکل ۲-پ). در هر جایی که خندق به انتهای ناحیه پخش نزدیک می‌شود، یک مسیر برگشت آب ساخته می‌شود در نتیجه، این خندق از سرتاسر ناحیه پخش آب به طور مکرر عبور می‌کند، و در پایین‌ترین نقطه، آب به رودخانه تأمین‌کننده آب باز می‌گردد.

سیستم خندق و شیار به ویژه برای نواحی که آب مورد تغذیه دارای بار معلق زیادی باشد، مناسب است. معمولاً سرعت جریان آب در این سیستم برای حمل مواد خارجی از میان سیستم و بازگرداندن آن به رودخانه تأمین‌کننده آب کافی است. اگر چه این روش برای زمینهای نامنظم مناسب است، معمولاً نفوذ آب در کمتر از ۱۰ درصد از سطح تغذیه انجام می‌شود.



شکل ۲- سیستم های نمونه خندق و شیار

الف: جانبی

ب: شاخه ای

پ: ترازوی

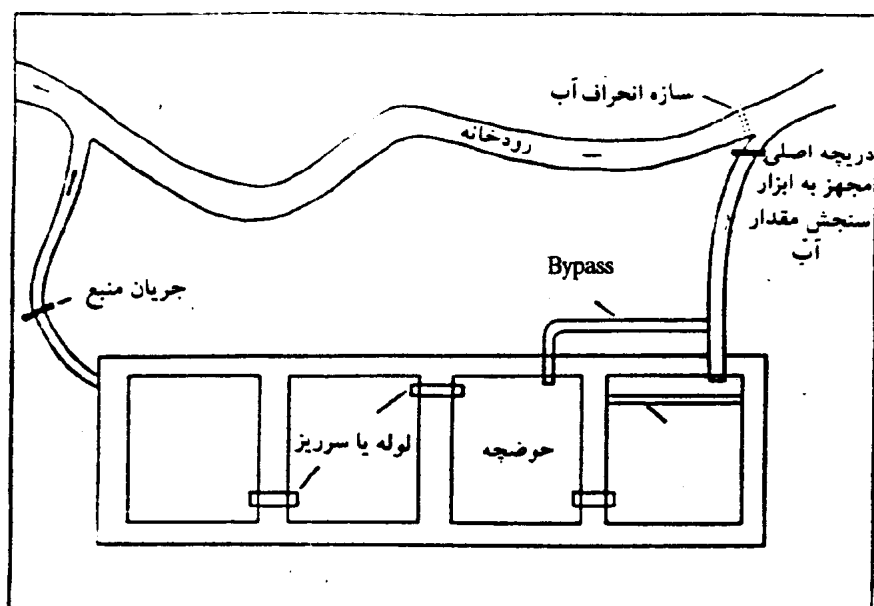
فلش جهت جریان را نشان می دهد.

استخرها احتمالاً مناسبترین روش تغذیه هستند زیرا امکان استفاده کارآ از فضا را فراهم آورده و به عملیات ساده نگهداری احتیاج دارند. استخرها در زمین حفر می‌شوند و یا اینکه با احداث دیواره یا سیل‌بند محصور می‌شوند. شکل هندسی استخر قابل تغییر است، که امکان هماهنگی ساخت آن با زمین را می‌دهد. استخرها را می‌توان مجزا ساخت، مانند سطوح کوچک زهکشی برای جمع‌آوری رواناب شهری، و یا مانند شکل ۳ به صورت سری‌هایی برای نفوذ آب رودخانه‌ها یا سیلاب، احداث کرد. استفاده از استخرهای چندگانه برای نفوذ آب رودخانه‌ها چند مزیت دارد: توانایی ذخیره‌سازی زمان طولانی‌تری برای تغذیه ایجاد می‌کند، استخرهای بالادست نسبت به پایینی‌ها به عنوان رسوبگیر عمل می‌کند؛ امکان خارج کردن بعضی استخرها از مدار برای عملیات نگهداری (مانند تراشیدن، دیسک زدن یا شخم زدن) و بازگرداندن سرعت نفوذپذیری. در نواحی مسطح، ساخت استخرها پرهزینه‌تر است زیرا نمی‌توان از اشکال طبیعی زمین استفاده کرد؛ استخرهایی که در این نواحی احداث می‌شوند معمولاً طویل، مستقیم، باریک و در کنار یکدیگر هستند.

ظرفیت نفوذ استخرها را می‌توان با اصلاح خاک، پوشش گیاهی و یا رویه‌های اجرایی ویژه بهبود داد [۱۸]. اصلاح خاک معمولاً شامل افزودن مواد شیمیایی یا تغییر فیزیکی سطح نفوذ برای افزایش فضای منافذ موثر است. پوشش گیاهی به وسیله ریشه‌ها، کانال‌هایی در خاک ایجاد می‌کند که خاک را پوک کرده و نشت را افزایش می‌دهد. زمان بندی دوره‌های "استراحت" با طول زمان کافی میان دوره‌های سیلابی امکان خشک شدن و فساد بیولوژیک لایه‌های سله بسته را فراهم می‌آورد. افزایش دوره‌ای عمق آب سبب افزایش فشار آب و رفع کورشدگی سطحی می‌شود.

مزایای استفاده از استخر به ترتیب زیر است:

- جریان‌های قابل انتظار را معمولاً می‌توان با ساخت استخرهایی با اندازه مناسب مهار کرد.
- سیلابهای فصلی را می‌توان برای نفوذ بعدی آنها ذخیره کرد.
- کورشدگی را می‌توان با اتخاذ تدابیری در تکنیک‌های ساخت [۲۲] و یا رویه‌های بهره‌برداری از حوضچه‌ها به آسانی مهار کرد.
- زمین به صورت مناسبی به کار گرفته می‌شود.

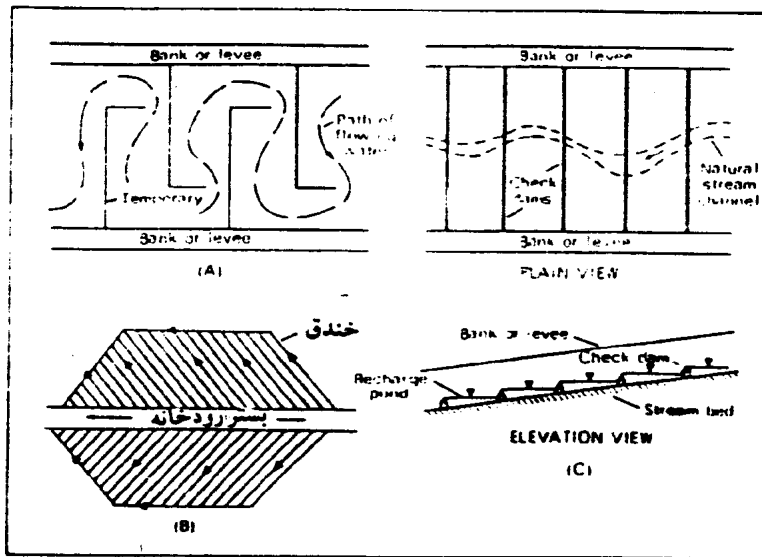


شکل ۳- یک سری استخرهای تغذیه دریافت کننده آب از رودخانه (برداشت شده از اثر [۲۱] Bianchi, Muckel)

#### ۴-۱-۲ بهبود بستر رودخانه

بهبود بستر رودخانه شامل ایجاد تغییر در کانال‌های زهکشی طبیعی برای افزایش نفوذپذیری به وسیله نگهداشتن جریان رودخانه و افزایش سطح تماس آب با بستر است. تغذیه مصنوعی از طریق بهبود بستر رودخانه را می‌توان همراه دیگر روشهای گفته شده مانند پخش سیلاب، خندق و شیار و استخر اجرا کرد (شکل ۴)، و یا با لایروبی، تسطیح و تعریض انجام داد. یکی از تکنیک‌ها شامل احداث سدهای کنترل کننده در سرتاسر دشت‌های سیلابی رودخانه است. در بالادست این سدها تجمع استخر مانند آب با افزایش سطح ترشده و بار هیدرولیکی متغیر حین نگهداشتن آن، تغذیه را افزایش می‌دهد. در پایین دست این سدها هم به دلیل تماس سطح بزرگتری از بستر رودخانه با آب؛ تغذیه بیشتر می‌شود. از آنجا که آب در رودخانه با سرعت‌های بیش از سرعت نفوذ بستر آن جریان دارد و عملاً از دست می‌رود، می‌توان مخازنی در بالادست ایجاد کرد و آب را با توجه به ظرفیت نفوذپذیری بستر رودخانه رها کرد.

لایروبی کانال‌ها کارایی نفوذپذیری را افزایش می‌دهد، و تعریض، تسطیح و تیغ زدن با افزایش سطح ترشده سرعت نفوذ را نیز افزایش می‌دهد. خندقها و شیارها حفر شده در دشت‌های سیلابی هم سطح نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. اکثر سازه‌های بهبود بستر رودخانه موقتی هستند و به گونه‌ای طراحی می‌شوند که تغذیه را فقط به صورت فصلی افزایش می‌دهند. تعداد زیادی از این سازه‌ها به وسیله سیلاب‌ها نابود می‌شوند. با این وجود بهبود بستر رودخانه در موارد موثر مناسبند، زیرا هزینه‌های ساخت آنها نسبتاً پایین بوده، عملیات نگهداری آنها گران نیست و احداث آنها به ندرت در تعارض با سایر کاربری‌های زمین است.



شکل ۴- تغذیه از راه بهبود بستر رودخانه

A: انحرافها .

B: خندقها

C: بندهای کنترل کننده

(اقتباس همراه با اصلاح از اثر تاد [۲۳])

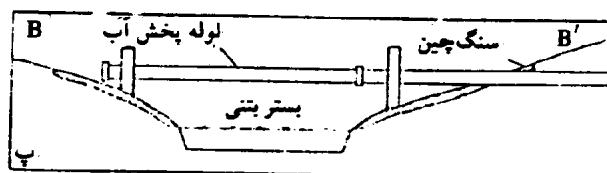
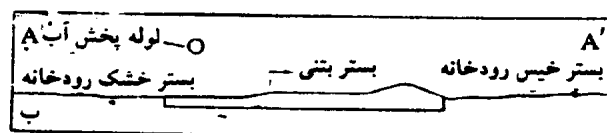
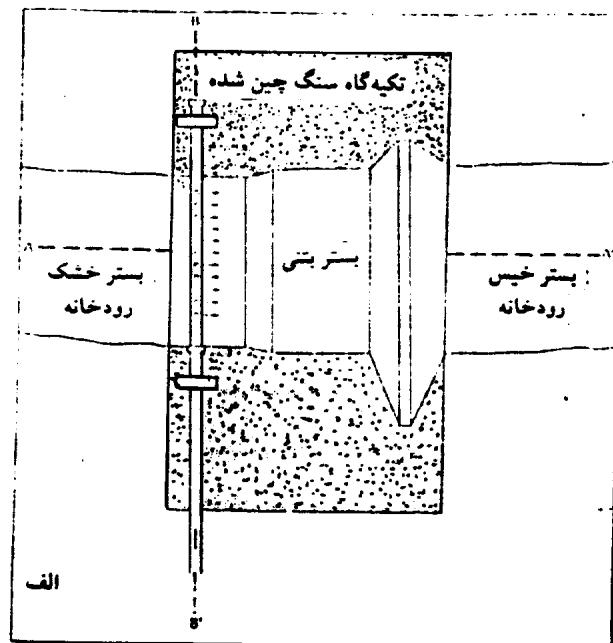
### ۳-۱-۵ افزایش جریان رودخانه

افزایش جریان رودخانه متضمن استفاده از آب برای تغذیه در بستر یک رودخانه در نزدیکی بالای حوضه زهکشی آن برای ایجاد یا افزایش نفوذ آب در بستر رودخانه است (شکل ۵). افزایش جریان رودخانه گزینه‌ای برای تغذیه مصنوعی از ناحیه‌هایی است که جریان رودخانه‌ای که با آب زیرزمینی تغذیه می‌شود به سبب افت سطح ایستابی در بالادست بند می‌آید یا خشک می‌شود.

برای مثال، امکانیابی افزایش جریان رودخانه در لانگ آیلند<sup>۱</sup> نیویورک، که در آنجا رودخانه‌ها به سبب افت سطح ایستابی به طور قابل ملاحظه‌ای کوتاه شده‌اند، بررسی شده است. زیرا در این محل انهار به صورت مشخصی در اثر افت در آبخوان طول کمتری آب دارند [۲۵]. افزون بر تغذیه، با تجدید جریان در بستر، زیبایی محیط رودخانه بهبود می‌یابد. کارایی این روش در مقایسه با تکنیک‌های دیگر معمولاً کمتر است زیرا سرعت جریان رودخانه بیش از سرعت نفوذپذیری است و همیشه منابع اقتصادی آب برای تغذیه در دسترس نیست. لیکن بازسازی اکوسیستم‌های رودخانه‌ای در این شکل تغذیه بخشی از معایب آن را می‌پوشاند.

1- long island





شکل ۵- سیستم افزایش جریان رودخانه

الف: تصویر پلان

ب: مقطع طولی A-A'

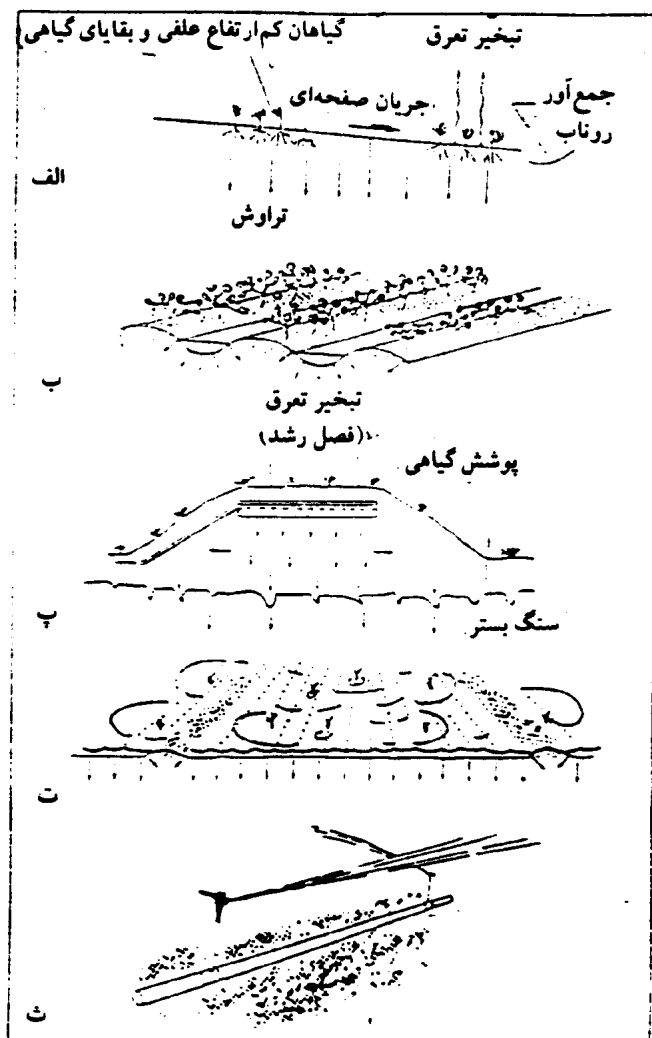
پ: مقطع عرضی کانال رودخانه در B-B'

اقتباس همراه با اصلاح از Beckman, Avendt [۲۴]

۳-۱-۶ آبیاری بیش از نیاز

هنگامی که آبیاری در غیر فصول رویش گیاه انجام شود، آب زیرزمینی به صورت مصنوعی تغذیه می شود. روش های آبیاری مانند روش هایی است که در تغذیه مصنوعی به کار می رود. و شامل جریان آب در سطح، سیستم های خندق و

شیار، آبیاری زیرزمینی، غرقایی و سیستم‌های بارانی است [۲۶] (شکل ۶). به دلیل آنکه آبیاری بیش از نیاز معمولاً با آب سطحی اضافی انجام می‌شود، معمولاً یکی از چهار تکنیک که گفته شده به کار گرفته می‌شود. هزینه‌های اجرایی در این روش حداقل است، زیرا تاسیسات توزیع آب قبلاً احداث شده‌اند.



شکل ۶- تکنیکهای آبیاری

الف: جریان سطحی،

ب: خندق و شیار،

پ: زیرزمینی،

ت: پخش سیلاب،

ث: بارانی [۲۷]

بیست و سه ایالت آمریکا از آب آبیاری برای تغذیه آب زیرزمینی استفاده می‌کنند [۲۸] (شکل ۶). از ۱ تا ۵۰ درصد آب آبیاری برای تغذیه به کار برده می‌شود که از منابع سطحی و زیرزمینی برداشت می‌شود. در جاهایی که از آب زیرزمینی برای آبیاری استفاده می‌شود؛ آب تأمین شده بر اثر تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد، لیکن با ایجاد تغییراتی در چاههای مورد استفاده برای تأمین آب آبیاری می‌توان در غیر فصل کشاورزی با آب سطحی آبخوان را تغذیه کرد. جمع‌بندی ایالت‌هایی که آب زیرزمینی را از راه سیستم‌های آبیاری تغذیه می‌کنند؛ حاکی از این است که معایبی نظیر شستشوی عناصر غذایی خاکها و ماندابی شدن آنها علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی و یا قانونی برای پمپاژ سبب می‌شوند که آبیاری بیش از نیاز بیشتر به عنوان یک روش جنبی تا یک روش برنامه‌ریزی شده تغذیه مطرح باشد [۲۸].

### ۲-۳ تغذیه مستقیم زیرزمینی

تغذیه مستقیم زیرزمینی در شرایطی انجام می‌شود که آب مستقیماً به درون آبخوان هدایت شود و در آن وارد شود. تغذیه مستقیم زیرزمینی معمولاً زمانی به کار گرفته می‌شود که یک لایه نیمه تراوای محدود کننده، منبع آب تغذیه کننده را از آبخوان دارای نیاز به تغذیه جدا کند. تکنیک‌های تغذیه مستقیم زیرزمینی شامل تزریق آب به (۱) حفره‌های طبیعی آبخوان، (۲) چاله‌ها یا میله‌ها، (۳) چاهها و (۴) شبکه لوله‌های زهکشی است.

در تمام روش‌های تغذیه زیرزمینی، کیفیت آب مورد استفاده برای تغذیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا آب بدون صاف شدن یا اکسید شدن، که در عبور از لایه‌های غیر اشباع رخ می‌دهد، وارد آبخوان می‌شود. در تمام روش‌های مستقیم تغذیه زیرزمینی از سازه‌هایی استفاده می‌شود که نسبت به روش‌های سطحی زمین کمتری را اشغال می‌کنند.

### ۱-۲-۳ حفره‌های طبیعی

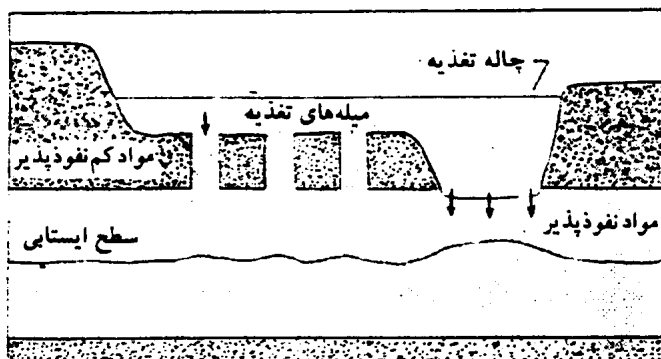
حفره‌های طبیعی مانند آنهایی که در اثر شکستگی یا انحلال در سنگهای آهکی غاردار یا دیگر سنگهای انحلال پذیر ایجاد می‌شود، می‌تواند مانند یک زهکش با خط انتقال به یک توده آب عمل کند. بسته به منبع آب و اندازه آن، شکل و موقعیت این حفره‌ها، ممکن است عملیات نگهداری حفاظت و اصلاح آنها ضروری نباشد. با وجودی که این نوع سیستم تغذیه نسبتاً ارزان است، شرایط زمین‌شناسی و زمینهای نامناسب می‌تواند محدود کننده کاربرد آن شود.

### ۲-۲-۳ چاله‌ها و میله‌های حفر شده

در جاهایی که لایه نیمه نفوذپذیر محصور کننده در سطح زمین و یا نزدیک به آن است، آبخوان‌های زیر آن باید از راه

چاله‌هایی عمیق و یا میله‌هایی که از این لایه عبور می‌کنند [۲۹] تغذیه شوند (شکل ۷). ابعاد این چاله‌ها متغیر است و عمق آنها معمولاً بستگی به قطر واحد محصور کننده دارد. کناره‌های با شیب تند این چاله‌ها امکان کورشدگی را که عمدتاً در کف چاله‌ها اتفاق می‌افتد، به حداقل می‌رساند. هزینه‌های احداث و نگهداری این روش‌ها در مقایسه با تکنیک‌های سطحی، بالا است، به ویژه اگر برای مقادیر نسبتاً کم آب به کار رود. در برخی نواحی می‌توان با استفاده از معادن و یا چاله‌های شنی متروک از این هزینه‌ها جلوگیری کرد. استفاده از حفره‌های ناشی از آزمایشهای اتمی هم برای تغذیه مصنوعی پیشنهاد شده است [۳۰].

میله‌ها نسبت به چاله‌ها دارای عمق بیشتر و قطر کم‌ترند. آنها را می‌توان دستی یا با استفاده از بکھو<sup>۱</sup> یا درگ لاین<sup>۲</sup> حفر کرد. می‌توان دیواره آنها را پوشش داد [۱۶] و یا آنها را با شن پر کرد. مانند تمام روش‌های تغذیه زیرزمینی دیواره میله‌ها و موادی که داخل میله‌ها با آن پر می‌شود در معرض کورشدگی به وسیله مواد جامد معلق در آب و یا فعالیت بیولوژیکی هستند. عملیات نگهداری میله‌ها مشکل است. اگر چه در اجرا مانند چاههای دهانه گشاد است، اما نمی‌توان میله‌هایی که بالای سطح ایستابی پایان می‌یابند را با پمپاژ توسعه داد. دوره‌های استراحت و پالایش شیمیایی معمولاً تنها روش‌های بازگرداندن ظرفیت نفوذپذیری هستند و معمولاً تنها تا حدی موفقیت آمیزند. صورتی که مواد فیلتری داخل میله‌ها به شدت بسته شده باشد، باید میله خارج شده و با مواد تمیز پر شود. به دلیل هزینه‌های بالای احداث و نگهداری، چاله‌ها و میله‌ها کاربرد محدودی دارند [۳۱].



شکل ۷- چاله‌ها و میله‌های تغذیه

### ۳-۲-۳ زهکشی وارون

زهکشی وارون، مانند آبیاری زیرزمینی، برای جلوگیری از تداخل با کاربری سطح زمین استفاده می‌شود (به شکل ۶ توجه کنید)، در این روش آب به داخل شبکه‌هایی زیرزمینی از لوله‌های سوراخدار پمپاژ می‌شود، و از آنها به خاک

1- Backhoe

2- dragline

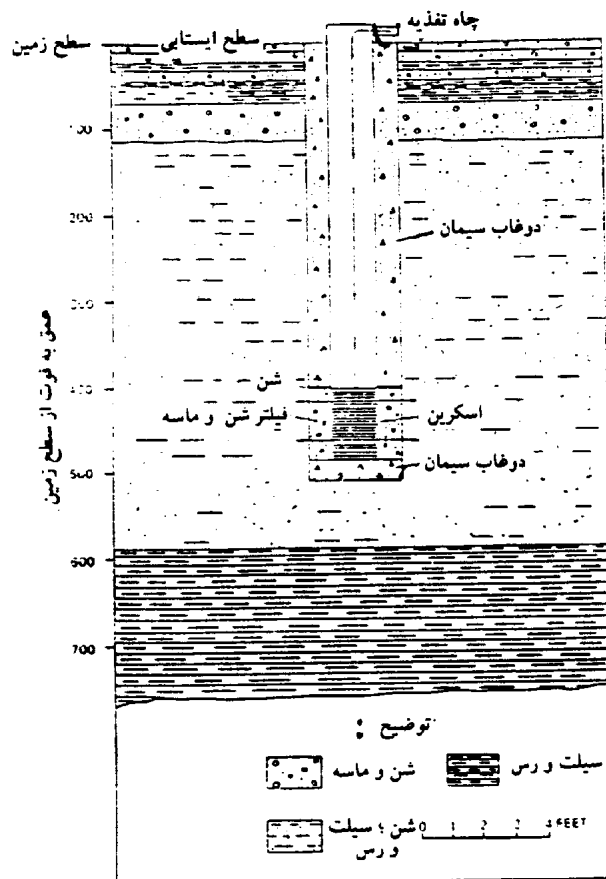
نفوذ می‌کند. این فرایند، وارون سیستم‌های تأمین آبی است که از لوله‌های زهکشی زیرزمینی برای جمع‌آوری و انتقال آب از مناطق (زون‌های) اشباع استفاده می‌شود. اولین مزیت زهکشی وارون اثر ناچیز آن بر کاربری سطح زمین است. شبکه‌های زهکشی وارون می‌توانند شکل‌بندیهای مختلفی داشته باشند، مثلاً لوله‌ها می‌توانند مستقیماً در خاک قرار داده شوند و یا اینکه برای افزایش اندازه موثر و سطح نفوذپذیری در میان مواد درشت دانه‌تر قرار داده شوند. اندازه لوله، عمق و نوع نصب و فاصله آنها بستگی به مقدار آب به کار برده شده، ژرفای سطح ایستابی و خواص هیدرولیکی محیط دارد.

تکنیک‌های زهکشی وارون در محل‌هایی که زمین نسبتاً پربها است، مطلوبیت دارد. ژاپن در این زمینه مثال بسیار مناسبی است [۳۲]. این تکنیک به صورت موفق در قبرس با احداث شبکه‌ای از تونل‌های زیرزمینی درست در بالای سطح ایستابی بکار گرفته شده است [۳۳].

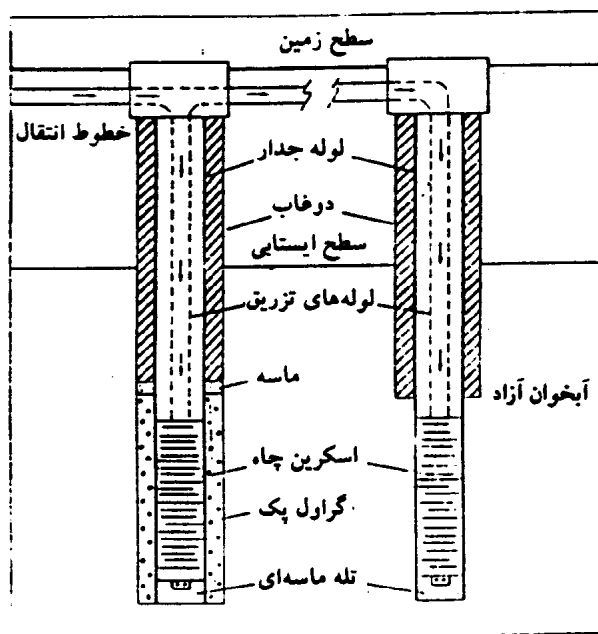
کورشدگی را می‌توان با پالایش آب تغذیه و یا در نظر گرفتن دوره‌های متناوب استراحت در بخشهای مختلف سیستم برای فراهم آمدن امکان تجزیه هوازی مواد آلی کورکننده به حداقل رساند.

### ۳-۲-۴ چاهها

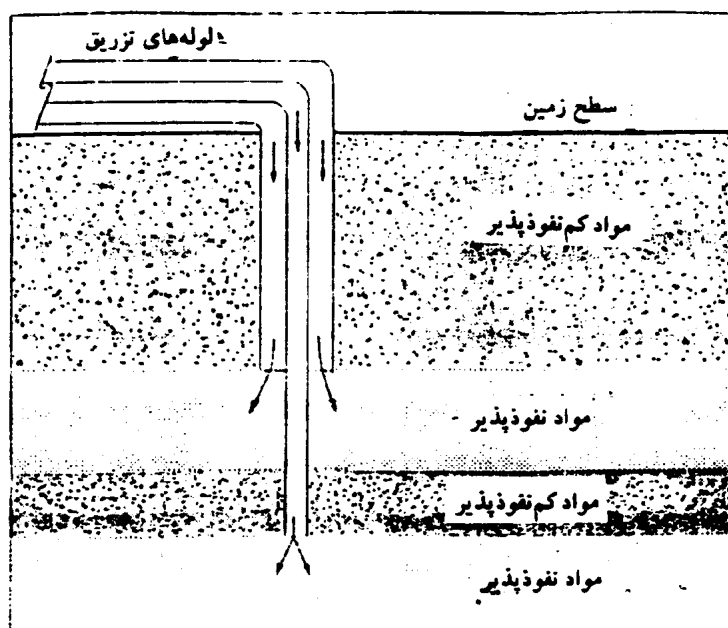
چاههای تغذیه، که معمولاً چاههای تزریق نامیده می‌شود، به طور معمول برای تغذیه آب زیرزمینی در شرایطی به کار گرفته می‌شود که آبخوان در عمق زیادی واقع شده و به وسیله مواد با نفوذپذیری کم از سطح زمین جدا شده است. در صورتی که چاههای تزریق در مواد غیر متراکم حفر شوند، بخش بالایی چاه با لوله جدار پوشش داده می‌شود و لوله مشبک یا مستقیماً در آبخوان قرار داده می‌شود یا با گراول پک مصنوعی پوشانده می‌شود (شکل ۸). از مشخصات این چاهها احداث یک لایه غیر قابل نفوذ بتنی در نقطه ورود به آبخوان است تا از بالا آمدن آب در اطراف کسینگ چاه بر اثر فشارهای تزریق جلوگیری کند. در آبخوان‌های سنگی که با رسوبات غیر قابل نفوذ متراکم پوشیده شده‌اند ممکن است نیازی به کسینگ یا توری چاه (اسکرین) نباشد. برای تغذیه آبخوان‌های نامحصور در جاهایی که زمین در دسترس محدود است نیز از چاهها استفاده می‌شود (شکل ۹). چاههای تغذیه تنها به احیا یک آبخوان محدود نمی‌شوند و آب لازم برای تغذیه هم لازم نیست از منابع آب سطحی به دست آمده باشد. می‌توان چاههای تغذیه را به گونه‌ای احداث کرد که به طور همزمان، آب را برای تغذیه دو آبخوان یا بیشتر تأمین کند. (شکل ۱۰)، و هنگامی که شرایط هیدرولیکی اجازه دهد می‌توان از آنها به عنوان ارتباط دهنده‌های غیرفعال میان آبخوان‌های مجاور جدا شده به وسیله مواد نفوذ ناپذیر استفاده کرد (شکل ۱۱).



شکل ۸- ساختمان چاه تغذیه در یک آبخوان محصور تحکیم نیافته (از Aronson) [۳۴]



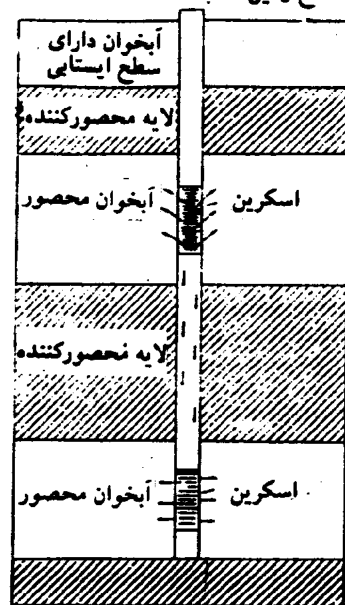
شکل ۹- ساختمان چاههای تغذیه در یک آبخوان نامحصور تحکیم نیافته (چپ) با گراول پک (راست) بدون گراول پک (از Aronson) [۳۵]



شکل ۱۰- چاه تغذیه کننده چند آبخوان که آب تغذیه کننده از طریق آن به چند آبخوان جریان می یابد (اقتباس از

سطح زمین چاه ارتباط دهنده

Pettyjohn [۱۶]



شکل ۱۱- چاه ارتباط دهنده در تغذیه آبخوانها. در این حالت آب از آبخوان دارای هد پتانسیومتری بیشتر آب به آبخوان دارای هد کمتر جریان می یابد (برداشت شده از اثر watkins ۳۶).

افزون بر هدف اولیه احیا آبخوانهای آب آشامیدنی، از چاههای تغذیه برای تغذیه آب زیرزمینی در تهویه و افزودن آب شیرین به آبخوانهای ساحلی که با پیشروی آب شور روبرو هستند نیز می‌توان استفاده کرد.

طراحی چاههای تغذیه بستگی به هدف تغذیه، مقدار آب تغذیه شونده و سرعت پذیرش آبخوان دارد [۳]. مورد آخر تابعی از شیب هیدرولیکی، نفوذپذیری آبخوان، طول و نوع توری چاه (اسکرین) است. به دلیل آنکه سطح تماس میان توری چاه (اسکرین) و آبخوان کوچک است، گراول پک اطراف توری چاه (اسکرین) برای افزایش قطر موثر چاه (و به این ترتیب سطح نفوذپذیری) و کاهش اثر کورشدگی توری چاه (اسکرین) و یا سطح نفوذپذیر آبخوان، به کار برده می‌شود.

عملکرد چاههای تغذیه می‌تواند به شدت بر اثر تجمع مواد جامد معلق و ناخالصی‌های شیمیایی و بیولوژیک، هوا، گازهای محلول و هوای محبوس در اثر جریانهای طغیانی، مختل شود. دمای آبخوان و آب تزریق شده هر دو می‌تواند اثری منفی بر روی عملکرد چاه تزریق داشته باشد [۳۴].

این فاکتورها ممکن است اثر کمی بر روی آبخوان‌های دانه درشت و نفوذپذیر داشته باشد ولی در آبخوانهای با نفوذپذیری کمتر اهمیت بسیار زیادی پیدا کنند. اکثر آثار ناشی از کورشدگی را با تصفیه مناسب آب قبل از تغذیه آن می‌توان پیشگیری کرد اما برای رفع کورشدگی که ممکن است اتفاق افتاده باشد به رویه‌های توسعه مختلف مانند:

- پمپاژ و سر جینگ چاه برای جدا کردن مواد غیر آلی و آلی دارای پیوند ضعیف
- اضافه کردن مواد اکسیدکننده و کشنده باکتری‌ها برای حذف مواد آلی تولید شده به وسیله باکتری‌ها و محصولات زاید آنها
- به کارگیری تصفیه شیمیایی برای حذف پوسته‌گذاری ناشی از رسوب گذاری شیمیایی

نیاز است.

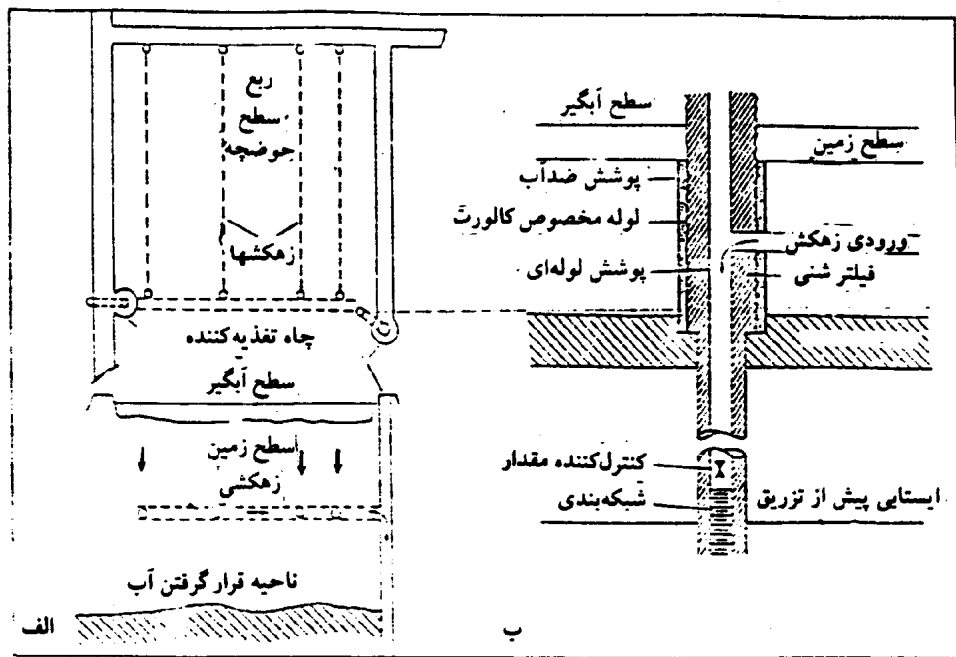
### ۳-۳ ترکیب تغذیه سطحی و زیرزمینی

تکنیک‌های مستقیم سطحی و زیرزمینی چندی را می‌توان در ترکیب با یکدیگر برای تأمین نیازهای تغذیه‌ای ویژه به کار برد. در میان مزایای کاربرد سطحی، سادگی عملیات نگهداری، سطوح تغذیه وسیع و امکان ذخیره آب است و مزایای روش‌های زیرزمینی شامل دسترسی به آبخوان‌های عمیق‌تر و کمینه کردن نیاز به اراضی است. در اینجا اغلب ترکیب تکنیک‌های سطحی و زیرزمینی نیاز به بحث جداگانه ندارند زیرا آنها نتیجه ترکیب آثار روش‌هایی است که تاکنون مورد بحث قرار گرفته است. لکن، برخی روشها در ترکیب با یکدیگر ممکن است خصوصیات جدیدی پیدا کنند، دو مثال معمولی در این باره در زیر تشریح می‌شود:



### ۱-۳-۳ کلکتورهای زهکشی زیرزمینی همراه چاه

پتانسیل تغذیه استخر تغذیه‌ای که در زیر آنها لایه‌ای ضخیم با نفوذپذیری کم قرار دارد را می‌توان با استفاده ترکیبی از کلکتورهای زهکشی زیرزمینی همراه چاه افزایش داد. در چنین سیستم‌هایی آب تغذیه شده از استخر به زمین تراوش می‌کند و بخشی از آن به وسیله زهکش‌های افقی میان استخر و ناحیه با نفوذپذیری کم جمع‌آوری می‌شود. این زهکشی‌ها آب را به چاههایی می‌رسانند که منطقه (زون) با نفوذپذیری کم را قطع کرده و آبخوانی را که در عمق قرار دارد احیا می‌کند [۳۸] (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- سیستم زیرزمینی جمع‌آوری زهکشی که همراه چاه تغذیه به کار رفته است.

الف: پلان و پروفیل استخر، سیستم جمع‌آوری زهکشی و چاه تغذیه

ب: مقطع عرضی چاه تغذیه (اقتباس شده از اثر Bianchi و دیگران) [۳۸]

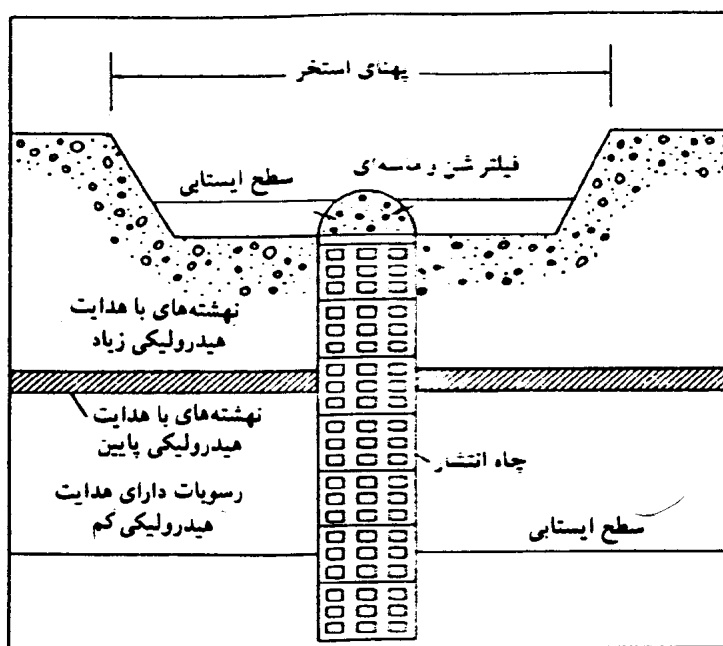
### ۲-۳-۳ استخرها همراه چاله، میله یا چاه

سیستم‌هایی که شامل ترکیبی از استخر با چاله‌ها، میله‌ها یا چاهها هستند بر استخرها برای ذخیره آب و میله‌ها، چاله‌ها یا چاهها برای پخش سریع آب در مناطق (زون‌های) با نفوذپذیری بیشتر زیر ساختگاه تغذیه متکی هستند. چنین سیستم‌هایی ممکن است با استوانه‌هایی از بتن پیش ساخته مشبک با قطر زیاد که در زیر یک منطقه (زون) با

نفوذپذیری کمتر نصب شده، همراه باشد (شکل ۱۳). برای مثال، در لانگ آیلند نیویورک در ۱۹۶۹، ۵ تا ۱۰ درصد از ۲۱۲۴ استخر تغذیه با سیلاب مجهز به "چاههای انتشار"<sup>۱</sup> هستند که دارای لوله جدار بتنی بوده و پشت آنها با شن و ماسه درشت دانه پر شده است. [۲۲]. چاههای با قطر کمتر در میشیگان برای زهکشی آبگیرهای معلق روی زمینهای کشاورزی بالقوه مناسب استفاده شده است [۳۹]. استخر پروژه تغذیه مصنوعی داکوتای شمالی شامل میله‌های ۳۰ و ۷۲ اینچی است که ۳۰ فوت زیر بستر استخرها پایین رفته‌اند تا آبخوانی را تغذیه کنند که زیر یک لایه سطحی با نفوذپذیری کم قرار گرفته است [۴۰].

### ۴-۳ تغذیه غیر مستقیم

تکنیک‌های غیر مستقیم تغذیه مصنوعی شامل: (۱) پمپاژ آبخوان‌ها برای القای تغذیه از آب‌های سطحی دارای ارتباط هیدرولیکی و (۲) اصلاح آبخوانها یا ایجاد آبخوانهای جدید برای افزایش و یا ایجاد مخازن زیرزمینی



شکل ۱۳- ترکیب سیستم تغذیه استخر و چاه (اقتباس از اثر Seaburn و Aronson) [۲]

### ۱-۴-۳ تغذیه القایی با استفاده از آب سطحی

با وجود اینکه تغذیه القایی از منابع سطحی به دلیل آنکه به طور طبیعی ذخیره آب زیرزمینی را افزایش نمی‌دهد،

همیشه به عنوان تغذیه مصنوعی در نظر گرفته نمی‌شود، این روش امکان افزایش نرخ برداشت آب زیرزمینی از آبخوان را فراهم می‌کند [۴۱]. در این نوع تغذیه، تجهیزات پمپاژ یا گالریهای نفوذ دهنده در نزدیکی دریاچه یا نهر محل برداشت نصب می‌شود و افزایش پمپاژ و در پی آن پایین افتادن سطح آب زیرزمینی نفوذپذیری از توده‌های آب سطحی مجاور را القا می‌کند.

سیستم‌های تغذیه مصنوعی القایی مشخصاً در نزدیکی رودخانه‌های دائمی که از راه رسوبات نفوذپذیر و غیر متراکم بستر رودخانه با آبخوان ارتباط هیدرولیکی دارند، تعبیه می‌شود. مقدار آب سطحی که می‌تواند به طور القایی آبخوان را تغذیه کند به حجم و فاصله منبع آب سطحی، آبگذری آبخوان، سطح بستر رودخانه (یا کف دریاچه) و نفوذپذیری آن، و شیب هیدرولیکی ایجاد شده در اثر پمپاژ بستگی دارد [۴۲]. می‌توان با قراردادن تجهیزات پمپاژ در بخشهایی از مسیر رودخانه که دارای سرعت کافی برای جلوگیری از رسوب گذاری هستند، مانند لبه بیرونی پیچ یک رودخانه، از رسوب سیلت که دلیل اولیه کاهش نفوذ پذیری بستر رود است، جلوگیری کرد. در جاهایی که مواد آبخوان زیر رودخانه کم ضخامت است، می‌توان در کف آبخوان چاههای جمع‌آوری کننده یا گالریهای نفوذ ایجاد کرد تا افت‌های بیشتر و استفاده کاراتر از آبخوان را در مقایسه با حالت‌های دیگر فراهم کرد. این سیستم در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

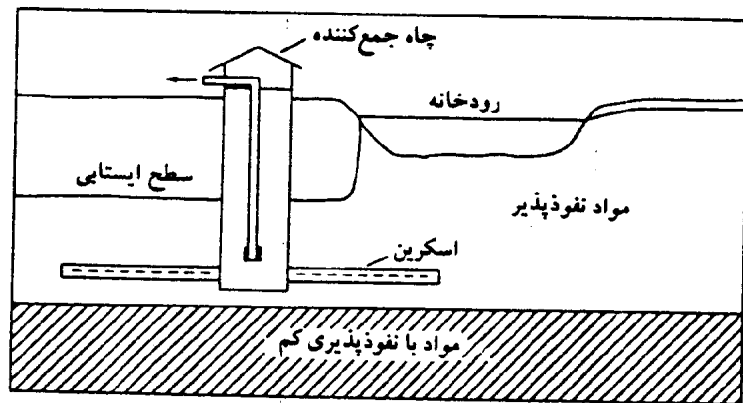
یک مثال از تغذیه القایی از آب سطحی در کالا مازو، میشیگان است، که در آنجا، آب از رودخانه "پورتاژ" به درون کانالهای تغذیه که میدان پمپاژ را احاطه می‌کند، انحراف داده می‌شود [۴۲]. پمپاژ از آبخوان پایین‌تر که تا حدودی محصور تراوش طبیعی آب به طرف بالا را وارون کرده و سطح آب در آبخوان بالایی را آنقدر پایین می‌آورد که آب را از کانالهای تغذیه دریافت کند (شکل ۱۵).

مثال دیگر از کانتون اوهایو است، که در آنجا تغذیه القایی برای فیلتر کردن آب رودخانه از میان یک آبخوان با ضخامت کم و انتقال آن به یک آبخوان با ضخامت زیاد انجام می‌شود، این آبخوان به شدت از یک چاه جمع‌کننده<sup>۱</sup> که هر دو آبخوان را قطع کرده است، پمپاژ می‌شود (شکل ۱۶).

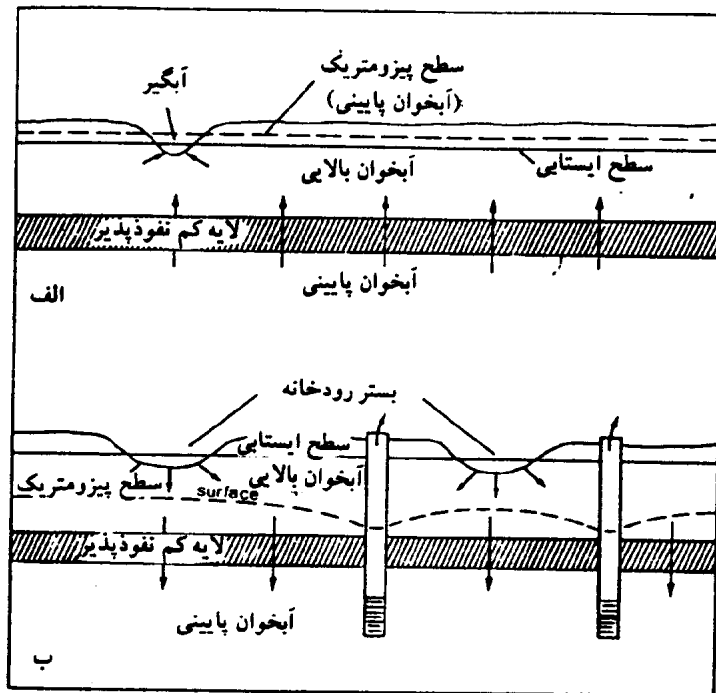
آب زیرزمینی پمپاژ شده از آبخوان حاوی مخلوطی از آب سطحی و زیرزمینی است. این آب سطحی بر اثر تراوش از رسوبات بستر، فیلتر شده و مواد جامد معلق، مواد آلی و باکتریهای آن خارج می‌شود و آب زیرزمینی نمکدار شده را ممکن است بر اثر رقیق شدن با آب سطحی اصلاح کرد. دما و کیفیت شیمیایی آب تأمین شده از تغذیه القایی میان دما و کیفیت آب سطحی و زیرزمینی مخلوط شده، نوسان دارد.

---

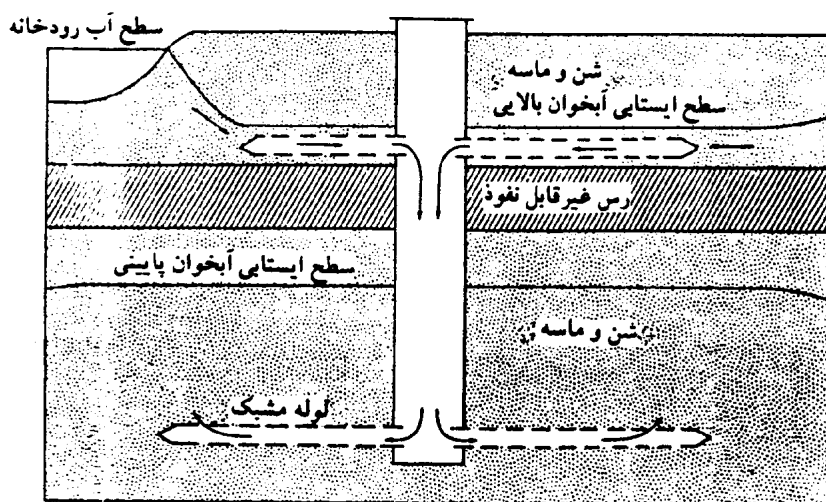
1- Collector well



شکل ۱۴- تغذیه القایی از رودخانه (اقتباس از اثر Petty john) [۱۶].



شکل ۱۵- شرایط در (الف) قبل و (ب) بعد از تغذیه القایی آب سطحی در کالامازو، میشیگان (اقتباس از Pettyjohn [۱۶]).



شکل ۱۶- تغذیه القایی از طریق چاه جمع کننده ارتباط دهنده دو آبخوان (اقتباس از Pettyjonn [۱۶]).

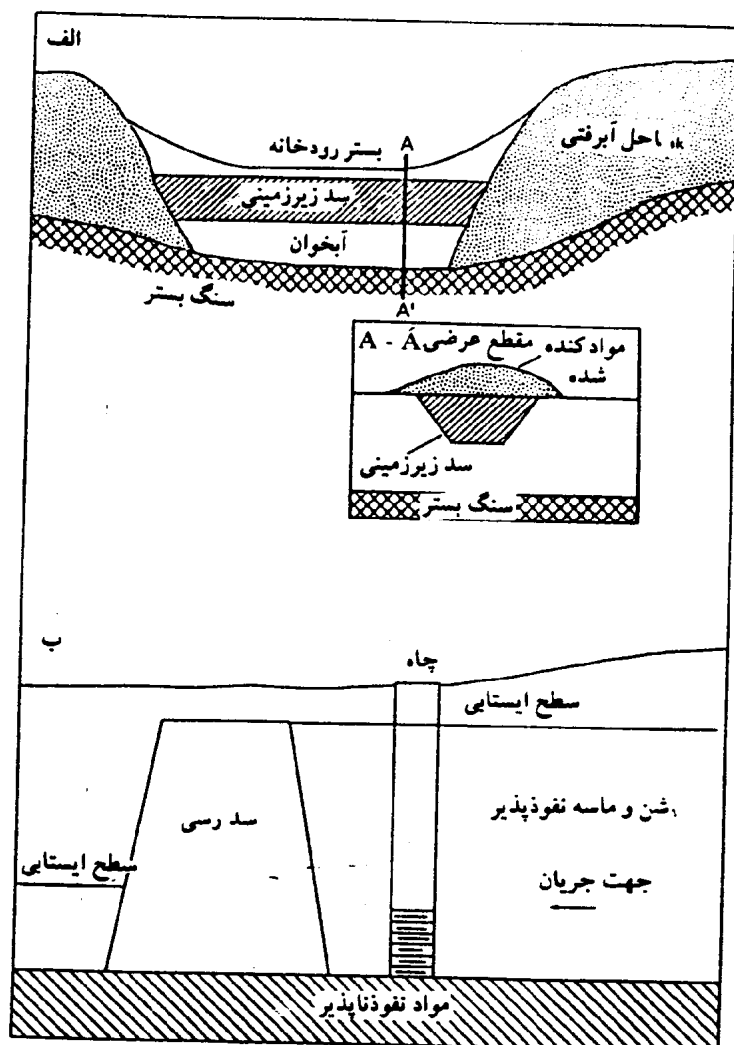
### ۲-۴-۳ بهبود آبخوان

آبخوانها را می‌توان با سازه‌هایی که خروج آب را محدود می‌کنند و یا تکنیک‌هایی که ظرفیت ذخیره اضافه ایجاد می‌کند، بهبود داد. سدهای زیرزمینی در بسیاری جاها برای جلوگیری از حرکت جریان و نگهداری آب زیرزمینی ساخته شده است [۴۳]. مثلاً در هندوستان چنین سازه‌هایی در عرض بستر رودخانه‌های فصلی در زیر رسوبات رودخانه‌ای ساخته می‌شود [۴۴]، (شکل الف ۱۷). برای این کار یک خندق در عرض رودخانه حفر می‌شود و آن را با مواد نسبتاً غیر قابل نفوذ که در محل وجود دارد و به این دلیل کم هزینه است، پر می‌کنند. این سد تنها در بخشی از رسوبات آبرفتی بالای سنگ کف گسترش دارد تا بتواند یک اثر تنظیم شده "برگشت آب" <sup>۱</sup> را ایجاد کند که سطح آب زیرزمینی افزایش یافته ناشی از بارانهای مانسون را نگهداری کند.

برای تأمین نیاز آبی شهر گلن بورن داکوتای شمالی <sup>۲</sup> نیز از سدهای زیرزمینی استفاده شده است [۱۶]. در این ناحیه یک رودخانه فصلی، نهشته‌های درشت دانه‌ای را در یک محیط زمین‌شناسی عمدتاً رسی بر جای گذاشته است. در فصل بهار که رودخانه جریان دارد، آبخوان بستر رودخانه که ظرفیت ذخیره قابل ملاحظه‌ای دارد، به آسانی با آب پر می‌شود. هنگامی که ماههای خشک فرارسد، آبخوان به شدت در اثر جریان خروجی سیستم تخلیه می‌شود. برای اصلاح این وضعیت، از یک میدان شنی متروک به عنوان حوضچه نگهداری آب برای تغذیه آبخوان استفاده شده، و یک سد زیرزمینی از رس در عرض کف بستر آبخوان رودخانه احداث شده است، و یک چاه در بالادست و مجاور سد حفر شده است (۱۷-ب).

1- Back water

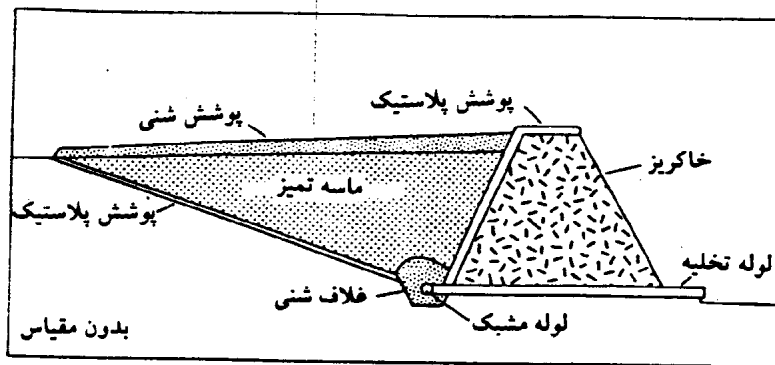
2- North Dakota, Glenburn



شکل ۱۷- مثالهایی از موانع آب زیرزمینی (الف) طرح استفاده شده در هندوستان (اقتباس از اثر Ratnoparkhi [۴۴]) (ب) طرح استفاده شده در داکوتای شمالی (اقتباس از Pettyjohn [۱۶])

این سد زیرزمینی، جریان را آنقدر کند می‌کند که ظرفیت آبخوان را برای نیازهای آبی در دوره‌های بیشترین تقاضا نگهدارد.

احداث آبخوانهای کامل کوچک مقیاس هم قابل توجیه به نظر می‌رسد [۴۵]. با ایجاد پوشش در دیواره کانال یک زهکش طبیعی، پر کردن آن با ماسه تمیز یکنواخت و پوشاندن سطح آن با پوشش شنی برای محافظت آن در مقابل تبخیر می‌توان یک آبخوان مصنوعی ایجاد کرد تا آب صاف شده را به صورت ثقلی با حداقل عملیات نگهداری تأمین کند (شکل ۱۸). چنین آبخوانی در اقامتگاه سرخپوستان سانتاکالارای نیومکزیکو احداث شده است. مهمترین فاکتورها در احداث یک آبخوان مصنوعی، انتخاب یک حوضه آبریز با اندازه مناسب، طراحی برای تمام ظرفیت ذخیره آن و انتخاب هندسه مخزن برای به حداقل رساندن کورشدگی آن است [۴۵].



شکل ۱۸- ساختمان آبخوان مصنوعی (اقتباس از Helwey و smitn [۴۵]).

#### ۴- فاکتورهای موثر بر روشهای تغذیه

تعیین بهترین محل احداث تاسیسات تغذیه متضمن مطالعه کامل هیدروژئولوژی برای اطمینان از عملکرد کارای اقتصادی آن است. در این مبحث اگرچه نکات اختصاصی انتخاب ساختگاه<sup>۱</sup> به تفصیل آورده نشده است، اما خلاصه‌ای از این موارد به وسیله سرز<sup>۲</sup> و دیگران ارائه شده است [۴۶].

در برخی موارد، انتخاب ساختگاه را نمی‌توان از قبل انجام داد، و انتخاب روش تغذیه باید بر اساس اهداف تغذیه و شرایط مشخص باشد. افزودن بر مشخصات هیدروژئولوژیک این موارد ممکن است شامل بررسی توپوگرافی و جریان رودخانه، ویژگیهای منبع آب، جنبه‌های قانونی، قابلیت دسترسی به زمین، نوع کاربری اراضی در نواحی مجاور و پذیرش اجتماعی باشد. بعضی از این جنبه‌ها در زیر توضیح داده می‌شود:

#### ۴-۱ ویژگیهای هیدروژئولوژیک

روش تغذیه انتخاب شده تا حدود زیاد بستگی به نوع آبخوان دارد. آبخوانهای نامحصور مشخصاً به وسیله وارد کردن آب از سطح، تغذیه می‌شوند. در حالی که آبخوانهای محصور با تزریق زیر سطحی، تغذیه می‌شوند. در مورد اخیر، ترکیب لایه‌هایی که در بالای آبخوان قرار می‌گیرند از اهمیت کمی برخوردار است. اما توجه روشهای تغذیه سطحی به خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک بستگی دارد و مهمترین این خواص عبارتند از [۳]:

- بافت
- نفوذپذیری
- وجود رس، آهن یا لایه نیمه تراوا

- عمق پروفیل خاک
- وجود مواد آلی
- خصوصیات تراکم پذیری

ارزیابی دیگر فاکتورهای هیدروژئولوژیک مانند سرعتهای نفوذپذیری، ظرفیت ذخیره و سرعتهای جریان آب زیرزمینی بر اساس ویژگیهای فیزیکی و ساختاری رسوبات زیر سطحی است، که مهمترین آنها در پایین توضیح داده می‌شود [۳]:

- نفوذپذیری رسوبات غیر اشباع زیر سطحی و عمق آب زیرزمینی، که نگهداری سرعت نفوذ مجاز برای کاربریهای سطحی را تعیین می‌کند.
- نفوذپذیری، آبدهی ویژه، ضخامت رسوبات اشباع زیر سطحی و وضعیت و نوسان مجاز سطح ایستابی که مشخص کننده کل ظرفیت ذخیره آب است.
- آبگذری و شیب هیدرولیکی، که تعیین کننده سرعت حرکت آب زیرزمینی از نواحی تغذیه به نواحی برداشت است.
- سدهای ساختاری و لیتوژیک زیرزمینی که بر آبگذری و شیب هیدرولیکی تاثیر می‌گذارد که آنها به نوبه خود بر جهت و سرعت حرکت آب زیرزمینی مؤثر هستند.

#### ۲-۴ توپوگرافی و جریان رودخانه

بر جستگيهای توپوگرافی تاثیر زیادی بر انتخاب روش تغذیه مصنوعی دارد، مخصوصاً هنگامی که تکنیکهای سطحی کاربری آب مدنظر باشد. کاربری آب به صورت پخش سیلاب، آبیاری یا بهبود اراضی نیاز به زمین نسبتاً مسطح دارد. این روشها معمولاً شامل عبور دادن آب از روی سطح زمین به صورت یک لایه نازک است. بهترین نتایج از زمینهای با شیب ملایم فاقد شیار یا برآمدگی به دست می‌آید. در مقابل استخرها، کانالها و جویها معمولاً از ترازهای توپوگرافی پیروی می‌کنند و می‌توانند در نواحی با برجستگی بیشتر به کار گرفته شوند. توپوگرافی معمولاً بر تغذیه زیرزمینی از طریق چاله‌ها، میله‌ها یا چاهها اثر محدود داشته یا بی‌اثر است. این روشها گزینه‌هایی برای کاربریهای سطحی در محلهایی است که توپوگرافی نامناسب است. ویژگیهای رودخانه و حوضه آن مرتبط با توپوگرافی است و بر تعیین روش تغذیه همان اندازه مؤثر است. چمرودها (رودخانه‌های مئاندری) با دشتهای سیلابی کم ارتفاع و عریض برای روشهای تغذیه سطحی با اصلاح بستر مناسب است زیرا روشهای پخش سیلاب، خندق و شیار یا استخر نفوذ را می‌توان در بستر رودخانه به کار برد. در جایی که یک رودخانه تأمین‌کننده آب تغذیه است و بستر آن را نمی‌توان به صورت مؤثری اصلاح کرد، می‌توان از انحراف آب در بالادست برای بردن آن به نواحی مناسب برای تغذیه سطحی زمین استفاده کرد. به همین ترتیب، نهر یا رودخانه‌ای با جریان ثابت منبع بالقوه‌ای برای تغذیه القایی است. این روش معمولاً احتیاج به احداث سازه دیگری بجز یکسری چاه در نزدیکی رودخانه ندارد. در بعضی از سیستمها آب رودخانه برای پخش در نواحی نزدیک مراکز پمپاژ آب زیرزمینی منحرف می‌شود.



#### ۳-۴ مشخصات آب تأمین شده

مقدار، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و محل منبع آب استفاده شده برای تغذیه یک آبخوان مستقیماً بر کیفیت و کمیت آب تزریق شده تاثیر می‌گذارد و بنابراین اثر مهمی در انتخاب روش تغذیه دارد [۳۵].

#### ۱-۳-۴ موقعیت و مقدار آب در دسترس

هنگامی که مقدار و قابل دسترس بودن آب مورد استفاده برای تغذیه به شدت متغیر باشد، مانند یک رودخانه فصلی، هر کدام از روشهای تغذیه سطحی مناسب است. روشهای حوضچه‌ای و چاله‌ای بیشترین مزیت را دارند زیرا می‌توانند طوری طراحی شوند که جریانهای سیلابی مورد انتظار را به کار گیرند. در مقابل میله‌ها و چاهها ظرفیت ذخیره کمی دارند و نیاز به منبع آب یکنواخت تری دارند. روشهای غیر مستقیم مانند تغذیه القایی عملاً تحت تاثیر تغییرات جریان منبع آب قرار نمی‌گیرد زیرا تغذیه القایی با مقدار برداشت آب کنترل می‌شود.

#### ۲-۳-۴ کیفیت آب

کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک آب مورد استفاده در تغذیه هم بر انتخاب روش تغذیه تاثیر می‌گذارد. کیفیت فیزیکی آب تغذیه شونده بیانگر نوع و مقدار مواد جامد معلق، دما و مقدار هوای محلول در آن است. کیفیت شیمیایی به نوع و غلظت مواد جامد و گازهای محلول مربوط می‌شود. کیفیت بیولوژیک بیانگر نوع و غلظت موجودات زنده است. تمام این مشخصات و یا هر کدام از آنها به تنهایی در شرایط خاص می‌تواند مقدار تغذیه را کاهش دهد.

#### ۱-۲-۳-۴ کیفیت فیزیکی

اگر در آب مورد تغذیه مواد جامد معلق وجود داشته باشد روشهای تغذیه سطحی دارای بازدهی بیشتری از روشهای تغذیه زیرزمینی است. اگر چه در این حالت هم ممکن است ذرات معلق باعث کورشدگی سطوح نفوذ شوند، اما این سطوح برای انجام عملیات احیاء در دسترس است. در نقاطی که از روشهای تغذیه غیر مستقیم استفاده می‌شود، مواد جامد معلق عملاً باعث بروز مشکلی نمی‌شود و در این شرایط تغذیه القایی یکی از بهترین روشها خواهد بود. روش جوی و پشته هم برای بارهای جامد معلق زیاد مناسب است زیرا جریان مداوم آب از رسوب‌گذاری جلوگیری می‌کند. نباید آبهای گل‌آلود را بدون بررسی لازم وارد حوضچه‌ها کرد، زیرا کورشدگی سطحی تقریباً به طور حتم به وقوع خواهد پیوست. در صورتی که برای تغذیه با حوضچه‌ها اجباراً از آب گل‌آلود استفاده شود می‌توان آنها را به صورت سری استفاده کرد. و در این حالت حوضچه اول به عنوان رسوب‌گیر حوضچه‌های بعدی عمل می‌کند. ولی این روش احتیاج به زمین بیشتری دارد و تنها در نقاطی که زمین به راحتی در دسترس باشد، توجیه دارد.

در نواحی که بار مواد جامد معلق در آب تغذیه زیاد باشد، روشهای تغذیه زیرزمینی از راه چاله‌های عمیق، میله‌ها و چاهها نامناسب است. هنگامی که منبع آب مورد استفاده گل‌آلود باشد، نباید از روشهای تغذیه زیرزمینی استفاده کرد مگر آنکه از پیش تدابیر رفع گل‌آلودگی شده باشد زیرا کورشدگی چاههای تزریق به نحو خاصی مشکل‌زا بوده و احیای دوباره چاهها پرهزینه است.

#### ۲-۲-۳-۴ کیفیت شیمیایی

آب مورد استفاده در تغذیه باید از نظر شیمیایی با مواد سازنده آبخوانی که در آن جریان می‌یابد و آب موجود در آن سازگار باشد تا از پیدایش واکنشهای شیمیایی کاهش دهنده تخلخل موثر بر ظرفیت تغذیه جلوگیری شود. رسوب شیمیایی، واکنشهای تبدلی نامطلوب، و هم چنین پیدایش گازهای محلول موجب نگرانی است. واکنشهای تبادل کاتیونی حاوی سدیم در آب تغذیه، می‌تواند باعث تورم و یا پخش ذرات رس شود، و به این ترتیب سرعت نفوذ یا آبگذری آبخوان را کاهش دهد. گازهای محلول در آب می‌تواند pH آبخوان را تغییر دهد و یا از حالت محلول خارج شده، توده‌های گازی تشکیل دهد که فضای خلل و خرج را اشغال کرده و آبگذری آبخوان را کاهش دهد.

مواد سمی در حد بیش از استانداردهای بهداشتی نباید در آب تغذیه وجود داشته باشد مگر آنکه بتوان آنها را با پیش‌پالایی حذف کرد و یا با زمین مناسب یا سیستم پالایش آبخوان به صورت شیمیایی تجزیه کرد.

#### ۳-۲-۳-۴ کیفیت بیولوژیک

عوامل بیولوژیک مانند جلبکها و باکتریها هم ممکن است در آب مورد تغذیه وجود داشته باشد. زباله‌های آلی ممکن است حاوی باکتریهای مضر باشند و یا رشد این گونه باکتریها را افزایش دهد، فساد مواد آلی ممکن است نیترات اضافی و یا سایر محصولات جنبی سمی تولید کند [۳۷]. رشد جلبکها و باکتریها در دوره تغذیه می‌تواند سبب سله‌بندی سطوح نفوذ شده و منجر به تولید گازهایی شود که عملیات تغذیه را دچار مشکل بیشتر کند. اگر چه پخش آب در سطح، اکثر باکتریها و جلبکها را از طریق فیلتراسیون قبل از ورود به داخل آبخوان حذف می‌کند، سله‌بندی سطحی می‌تواند سرعت نفوذ را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. تزریق آب حاوی باکتریها و جلبکها از راه چاهها معمولاً توصیه نمی‌شود زیرا سبب سله‌بندی توری چاه و یا مواد آبخوان شده که احیاء آنها پرهزینه و مشکل است [۴۷].

ملاحظات فرهنگی متأثر از شرایط اقتصادی - اجتماعی معمولاً در انتخاب روش تغذیه مصنوعی نقش دارد. در دسترس بودن اراضی، کاربری زمین در نواحی مجاور، افکار عمومی و جنبه‌های قانونی ممکن است همگی نقش داشته باشند.

در نواحی شهری که زمین در دسترس پر ارزش و کاربری اراضی در نواحی مجاور می‌تواند باعث محدودیت‌هایی شود چاههای تزریقی، میله‌ها و یا گودالها که احتیاج به منابع آب با کنترل شدید و سطح اراضی کم دارند، ممکن است به روشهای تغذیه مصنوعی مبتنی بر پخش آب در مقیاسی بزرگتر، برتری داشته باشد. تاسیسات تغذیه سطحی معمولاً احتیاج به دیواره‌های محافظت‌کننده محدود، نگهداری منظم و نظارت مداوم برای کسب حمایت عمومی دارد.

حقوق مربوط به تخصیص آب برای تغذیه و قوانین مربوط به آن، پس از اینکه به صورت قسمتی از مخزن زیرزمینی درآمد همیشه دارای تعریف روشن و کافی برای مقابله با تفاوت‌های هیدروژئولوژیک ایجاد شده به وسیله طبیعت نیست. لکن بر اختلافات قانونی که ممکن است از هر کدام از این فاکتورها ناشی شود تا حدود زیادی با ارزیابی کامل اهداف تغذیه، روشهای آن و همچنین آثار زیست محیطی قبل از شروع پروژه می‌توان غلبه کرد.

#### ۵- هیدرولیک تغذیه

جریان آب در حالت اشباع از میان یک محیط اشباع متخلخل مشابه با جریان خطی در لوله‌های نازک و نرم بوده ولی به طور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌تر است. در هر دو حالت، مایع به وسیله شیب اولیه شتاب حرکت پیدا می‌کند و به وسیله اصطکاک و جاذبه‌های بین مولکولی از حرکت باز داشته می‌شود. ولی در یک محیط متخلخل، فضای حفره‌ها شامل مسیرهای نامنظمی است که با یکدیگر ارتباط دارند و معمولاً فاقد امتداد مشخص بوده و این امر به ویژه جریان را در مقیاس میکروسکوپی پیچیده می‌کند. برای ساده‌تر کردن قضیه، عبور جریان از میان یک محیط متخلخل اشباع در مقیاس بزرگتر به صورت یک بردار سرعت و یا متوسط مجموع سرعت‌های میکروسکوپی در داخل مجموع حجم محیط متخلخل، نمایش داده می‌شود.

#### ۱-۵ جریان اشباع

تدوین معادله تعیین کمیت جریان آب زیرزمینی نیاز به ترکیب دو اصل بنیادی فیزیکی دارد: قانون داریسی<sup>۱</sup> و قانون

1- Darcy's law

بقای ماده<sup>۱</sup>. برای مایعی که در یک محیط متخلخل جریان دارد، مقدار جریان (Q) آن مستقیماً متناسب است با سطح مقطع (A) و مقدار افت از ابتدای مسیر ( $\Delta H$ ) و نسبت معکوس دارد با مسافت حرکت مایع (L)

$$Q \approx \frac{A\Delta H}{L} \quad (1-f)$$

هدایت هیدرولیکی اشباع (K) عبارت از سهولت حرکت آب از میان یک محیط متخلخل مشخص است. هر چه هدایت هیدرولیکی محیط بیشتر باشد، یک مایع راحت تر از میان آن عبور خواهد کرد. اگر هدایت هیدرولیکی به صورت تناسب ثابتی از رابطه نشان داده شده در معادله (1-f) باشد، معادله ای را تشکیل می دهد که از نظر ریاضی بیان کننده قانون داریسی است.

$$Q = \frac{KA\Delta H}{L} \quad (1-b)$$

با تقسیم دو طرف این معادله بر A؛ q به دست می آید که به عنوان سرعت داریسی، سرعت جریان یا آبدهی ویژه<sup>۲</sup> نامیده می شود.

$$q = K \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

و اگر این معادله به صورت صحیح تر در حالت یک بعدی دیفرانسیلی نمایش داده شود به شکل زیر است:

$$q = -K \frac{dH}{dx} \quad (3)$$

که در آن شدت جریان q مستقیماً متناسب است با هدایت هیدرولیکی و شیب هیدرولیکی ( $dH/dx$ )  
 لکن قانون داریسی تنها توصیف کننده مکانیک ساده جریان از میان محیط متخلخل است، برای توصیف جریان عمومی آب زیرزمینی، لازم است که قانون بقای ماده، در معادله پیوستگی<sup>۳</sup> به صورت جریان ورودی (I) مساوی جریان خروجی (O) به علاوه یا منهای هرگونه تغییرات در اثر ذخیره ( $\Delta S$ ) است، بیان شود. بقای ماده برای واحد حجم آبخوان در یک سیستم مشخصات سه بعدی در شکل ۱۹ رسم شده است. معادله پیوستگی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$(I_x + I_y + I_z) - (O_x + O_y + O_z) = \pm \Delta S \quad (4)$$

1- Law of mass conservation

2- Specific discharge

3- Continuity equation

تغییرات در مقدار ذخیره به صورت نوسانات سطح ایستابی در یک آبخوان نامحصور و تراکم و انبساط آبخوان و آب در یک آبخوان محصور است.

جابجایی‌های حجمی انجام شده در واحد حجم آبخوان را می‌توان به حسب دبی ویژه بیان کرد که در قانون داری می‌تواند به صورت عبارت هدایت هیدرولیکی و شیب خلاصه شود. این ترکیب قانون داری با قانون بقای ماده با عنوان معادله جریان ناپایدار<sup>۱</sup> آب زیرزمینی نامیده می‌شود. این معادله در تمام متون هیدرولوژی آب زیرزمینی به صورت جدی مورد بحث قرار می‌گیرد و حالت سه بعدی دیفرانسیلی آن برای یک آبخوان محصور عبارت است از:

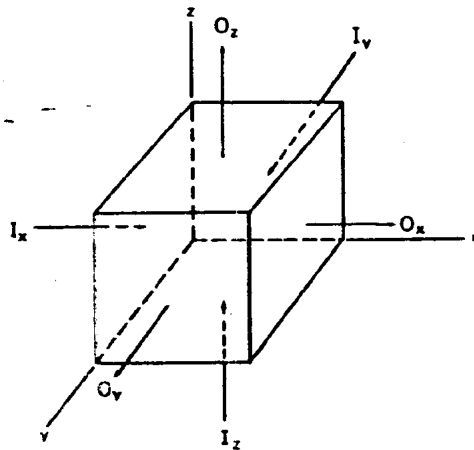
$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

که در آن  $S_s$  ذخیره ویژه و  $t$  زمان است. اگر به جای واحد حجم روی ضخامت آبخوان (b) انتگرال بگیریم، می‌توانیم معادله (5) را برای جریان دو بعدی در یک آبخوان محصور، به حسب آگذری (T، که  $T=kb$ ) و ضریب ذخیره (S) بنویسیم به طوری که:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

همین معادله برای جریان شعاعی یک بعدی آب زیرزمینی در یک آبخوان همگن محصور در مختصات استوانه‌ای برابر است با:

$$T \left( \frac{\partial^2 r}{\partial r^2} + \frac{\partial h}{\partial r} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$



شکل ۱۹- بقای ماده در واحد حجم در مواد اشباع آبخوان

در شرایط سطح ایستابی، که در آن تغییر ضخامت آبخوان نامحصور ناشی از بار هیدرولیکی و مؤلفه عمودی جریان قابل چشم‌پوشی باشد، معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x b \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y b \frac{\partial h}{\partial y}) = s_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

که در آن  $S_y$  آبدهی ویژه آبخوان است.

## ۲-۵ جریان غیر اشباع

اصول بنیادی مربوط به جریان اشباع در تدوین معادله جریان آب زیرزمینی را می‌توان به جریان در محیط غیر اشباع هم تعمیم داد. لیکن فرآیندهای جریان در محیط غیر اشباع با روابط پیچیده میان آب موجود ( $\theta$ )، فشار بارهیدرولیکی ( $h_p$ )، و هدایت هیدرولیکی ( $K$ ) پیچیده‌تر می‌شود. نیروهای هدایت‌کننده جریان در شرایط اشباع، مجموع بارهای هیدرولیکی شیبها هستند که شامل مجموع فشار بارهای هیدرولیکی مثبت است؛ در حالیکه نیروهای هدایت جریان در شرایط غیر اشباع عبارتند از مجموع بار هیدرولیکی شیبهایی که شامل فشار بارهای هیدرولیکی منفی‌اند.

با افزایش میزان رطوبت، آب از میان روزنه‌هایی که اندازه آنها افزایش می‌یابد با فشار افزایش یابنده جریان می‌یابد تا زمان اشباع که به فشار اتمسفری می‌رسد. فشارهای منفی وارد شده به جریان در محیط غیر اشباع معمولاً به مکش خاک یا کشش خاک مربوط می‌شود و هم ارز منفی فشار بارهیدرولیکی است. تفاوت مشهود میان جریان در محیط اشباع و غیر اشباع رفتار هدایت هیدرولیکی است. وقتی یک محیط متخلخل از حالت اشباع خارج شود فضای منافذ با هوا پر می‌شود، سطح مقطع هدایت‌کننده محیط کاهش می‌یابد. با ادامه خارج شدن آب از محیط، بزرگترین هدایت‌کننده‌ترین منافذ در آغاز تخلیه می‌شود و تنها منافذ کوچک باقی می‌مانند که باقیمانده آب می‌تواند از میان آنها جریان یابد. در یک محیط ریزدانه، منافذی که در کشش بالای خاک پرو هدایت‌کننده باقی می‌ماند، بیشتر از محیط درشت دانه با همان کشش است. بنابراین در یک محیط ریزدانه با افزایش کشش خاک، هدایت هیدرولیکی با همان سرعت محیط درشت دانه کاهش نمی‌یابد. اگر چه یک محیط درشت دانه در شرایط اشباع نسبت به یک محیط ریزدانه دارای هدایت‌کنندگی بیشتری است، اما در شرایط غیر اشباع معین یک محیط ریزدانه ممکن است آب بیشتری را جابجا کند. اگر یک محیط درشت دانه با هدایت‌کنندگی بیشتر در یک پروفیل خاک ریزدانه واقع شده باشد عملاً در شرایط معین غیر اشباع تا زمانی که آب کافی در آن جمع شده و منافذ نسبتاً بزرگ آن را که بیشترین جریان از طریق آنها صورت می‌گیرد، را پر کند، مانع جریان آب خواهد شد.

معادله عمومی جریان در محیط غیر اشباع به همان شکل معادله در جریان اشباع است و بر حسب فشار بار هیدرولیکی ( $h_p$ ) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} [k(\theta)_x \frac{\partial h_p(\theta)}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k(\theta)_y \frac{\partial h_p(\theta)}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [k(\theta)_z \frac{\partial h_p(\theta)}{\partial z}] \\ + \frac{\partial}{\partial z} [K(\theta)_z] = \frac{\partial \theta}{\partial h_p} \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن  $k$  و  $h_p$  تابع‌هایی از مقدار رطوبت ( $\theta$ )، موقعیت مکانی و زمان هستند. به دلیل آنکه این معادله بر حسب فشار بار هیدرولیکی نوشته شده است، دو جمله در جهت  $Z$  نمایانگر مؤلفه‌های بار فشار و بار ارتفاع هد کل است.

### ۳-۵ مدل سازی آب زیرزمینی

معادله‌های جریان آب زیرزمینی در محیط‌های اشباع و غیر اشباع که قبلاً توضیح داده شد امکان تحلیل تنشهای هیدرولیکی وارد شده بر سیستم آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. تاثیر هیدرولیکی تغذیه مصنوعی را می‌توان قبل از شروع تغذیه به وسیله روشهای متعدد مدل آب سازی زیرزمینی که تمامی آنها از معادله جریان آب زیرزمینی مشتق شده‌اند و بر اساس آن رفتار می‌کنند، تحلیل، مدلسازی و پیش‌بینی کرد.

تکنیکهای مدلسازی که در پایین فهرست می‌شود و در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرند برای کاربری فعلی یا تاریخی آنها در حل مسائل تغذیه آب زیرزمینی اهمیت دارند [۴۸]:

۱- مدل‌های ریاضی (روشهای تحلیلی)

۲- مدل‌های محیط متخلخل

۳- مدل‌های آنالوگ

۴- مدل‌های عددی

با وجود اینکه دستور کار آزمایشهای صحرائی یک روش مدلسازی در نظر گرفته نمی‌شود اما این روشها در پیش‌بینی آثار تغذیه مصنوعی کمک می‌کنند و در انتهای این بخش مورد بحث قرار می‌گیرند.

اینکه چقدر تنشهای هیدرولوژیک تغذیه مصنوعی را بتوان با دقت به وسیله هر کدام از این روشها پیش‌بینی کرد، نخست به داشتن تصور صحیحی از مسئله و دوم به انتخاب تکنیک بستگی دارد. تکنیکهایی که در بالا فهرست شده‌اند و ارزش نسبی آنها در رابطه با تغذیه مصنوعی، در پاراگرافهای زیر توضیح داده می‌شود.

### ۵-۳-۱ مدل‌های ریاضی (روشهای تحلیلی)

بنا به گفته گلوور [۴۹]، معادله‌های دیفرانسیل اساس تدوین فرمولهای ریاضی هستند که جریان آب زیرزمینی را بیان می‌کند. معادلاتی که قبلاً توضیح داده شد، اجازه حساسی دقتی آب وارد و خارج شده واحد حجم آبخوان را می‌دهد. امکان پذیر کردن این نوع بررسی ریاضی به فرضیات معینی برای ساده کردن شرایط مرزی نیاز دارد. سادگی نسبی مدل‌های ریاضی باعث شده تا آنها گزینه‌ای متداول در حل مسائل جریان آب زیرزمینی بشوند. در اکثر کاربریها، مشاهده‌های صحرایی از توزیع تراز سطح آب در نرخهای متفاوت برداشت آب زیرزمینی برای تعیین خصوصیات آبخوان به کار برده می‌شود. لیکن آثار تغذیه مصنوعی هنگامی که خصوصیات آبخوان، اندازه‌گیری یا تخمین زده شود، برای شرح توزیع تراز آب در نرخهای مختلف بازیابی آبخوان به کار می‌رود. راه‌حلهای جبری توصیف کننده تغذیه زیرزمینی از راه چاهها همان راه‌حلهایی است که برداشت آب زیرزمینی را شرح می‌دهند، بجز آنهایی که افزایش آب زیرزمینی را به جای برداشت آن بررسی می‌کنند. بررسیهای گوناگون متعدد جبری را می‌توان در آثار walton [۷] و Bear [۵۰] یافت.

مبحث زیر برخی راه‌حلهای جبری مفید در بررسی آثار هیدرولیکی تغذیه مصنوعی را به طور خلاصه بررسی می‌کند. از آنجایی که افزایش (یا برآمدگی)<sup>۱</sup> آب زیرزمینی یکی از جنبه‌های بحرانی تغذیه مصنوعی است، راه‌حلهای جبری این مبحث از این نقطه نظر ارائه می‌شود، هر چند که به آن محدود نمی‌شود.

### ۵-۳-۱-۱ تغذیه زیرزمینی

شرایط ماندگار<sup>۲</sup> هنگامی که آب از یک چاه به عمق یک آبخوان تزریق می‌شود، برآمدگی ایجاد شده تصویر آینه‌ای مخروط افقی است که با برداشت همان مقدار از آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. طرحهای جبری مختلفی می‌توان برای توصیف برآمدگی همراه با تغذیه، بسته به شرایط تحلیل به کاربرد. ساده‌ترین راه حل جبری برای جریان ماندگار شعاعی در یک آبخوان نامحدود است. این معادله جریان آب زیرزمینی در مختصات شعاعی است. معادله جریان ماندگار برای پمپاژ چاهها در آبخوانهای محصور و نامحصور از نشریه‌های گوناگون برداشت شده [۵۲ و ۵۱ و ۱۷]. مشتق‌های آنها برای چاههای تغذیه مشابه است و این معادله‌ها را می‌توان به حسب هد یا بالآمدگی هد بیان کرد. تحلیل با راه‌حلهای جریان ماندگار، به دلیل فرضیات ذاتاً ساده آن، یعنی اینکه چاه تغذیه در تمام ضخامت یک آبخوان متجانس، همگن حفر شده و جریان شعاعی است، شرایط جریان به تعادل رسیده و هیچ تلفات از اسکرین نیز وجود ندارد دارای کاربرد محدود است. لیکن بروی زمین معدودی از این فرضیات به طور کامل دست یافتنی است که در ارزیابی یک تحلیل باید به حساب آورده شود.

1- Mounding

2- Steady state



در آبخوانهای محصور (شکل ۲۰-الف) که از آن برداشت نشود بیان جبری جریان ماندگار عبارت است از:

$$h_w - h_o = \frac{Q}{2\pi bk} \ln\left(\frac{r_o}{r_w}\right) \text{ یا } \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_o}{r_w}\right) \quad (10)$$

که در آن:

$[L] = h_o$  بار فشار روی مرز زیرین غیر قابل نفوذ در فاصله  $r_o$  از چاه تغذیه

$[L] = h_w$  بار فشار روی مرز زیرین غیر قابل نفوذ درست در بیرون چاه تغذیه

$[L] = r_o$  فاصله‌ای از چاه تغذیه که در آن  $h_o$  اندازه‌گیری شده است

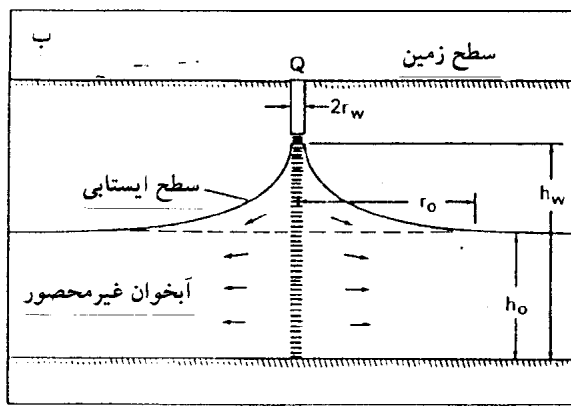
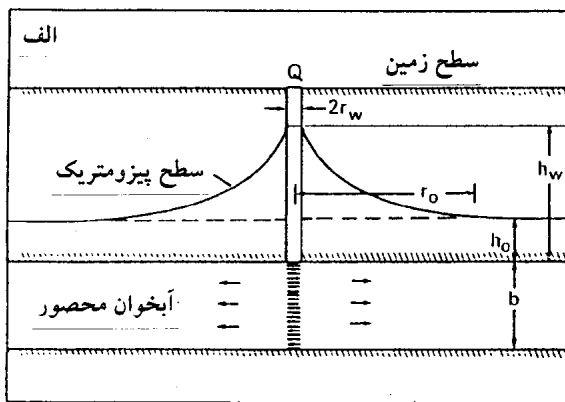
$[L] = r_w$  شعاع چاه

$[L^3 t^{-1}] = Q$  سرعت تغذیه

$[L t^{-1}] = K$  هدایت هیدرولیکی آبخوان

$[L] = b$  ضخامت آبخوان

$[L^2 T^{-1}] = T$  آبگذری آبخوان



شکل ۲۰- تزریق در شرایط ماندگار در الف) آبخوان محصور ب) آبخوان نامحصور (Todd [۱۷])

تحلیل آبخوانهای نامحصور با فرض دوپویی<sup>۱</sup> که در آن بار فشار در سراسر مقاطع عمودی آبخوان اشباع برابر است، ساده می‌شود. این فرض نیاز به در نظر گرفتن مولفه جریان عمودی را حذف می‌کند و تراز سطح ایستابی بالای کف آبخوان در یک نقطه مشخص را با بار فشار در سراسر آبخوان برابر در نظر می‌گیرد. در آبخوانهای با سطح ایستابی، به

1- Dupuit

ویژه هنگامی که شیبهای تند در نزدیک چاههای تغذیه ایجاد شود، این فرض محدودیت دارد. راه حل جبری حالت ماندگار برای یک آبخوان نامحصور (شکل ۲۰-ب) به عبارت است از:

$$h_w^y - h_o^y = \frac{Q}{\pi K} \text{Ln} \left( \frac{r_o}{r_w} \right) \quad (11)$$

در این معادله، متغیرها همان تعریفهای حالت آبخوان محصور (معادله شماره ۱۰) را دارند. اگر محدودیتهای ضروری هد معلوم باشد، معادلات جریان شعاعی ماندگار را هم در حالت محصور و هم نامحصور برای تعیین میزان برآمدگی در طی تغذیه و یا حداکثر سرعتهای تغذیه می توان به کار برد.

شرایط ناماندگار: عبارت جبری برای جریان شعاعی ناماندگار از یک چاه برداشت آب از آبخوان محصور از همان نشریه‌هایی گرفته شده که معادلات شرایط ماندگار برداشت شده است [ ۵۲-۵۱-۱۷].

برای چاهی که آب با نرخ ثابتی با شرایط مرزی  $(h=ho)$  در  $(t=0)$  و  $(h \rightarrow ho)$  در  $(r \rightarrow \infty)$  در  $(t \geq 0)$ ، به آن تزریق می شود، عبارت به این شکل در می آید:  
که در آن:

$$s = h - h_o = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u} = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$[L] = s$  برآمدگی در سطح آب زیرزمینی

$[L] = h_o$  هد اولیه آبخوان

$[L] = h$  هد در فاصله  $r$  از چاه تغذیه

$[M^0 L^0 T^0] = u$   $r^2 S / 4 T t$

$[L] = r$  فاصله از چاه تغذیه

$[M^0 L^0 T^0] = S$  ضریب ذخیره آبخوان

$[L^2 T^{-1}] = T$  آبگذری آبخوان

$[T] = t$  زمان

$[L^3 T^{-1}] = Q$  سرعت تغذیه

$[M^0 L^0 T^0] = W(u)$  انتگرال نمایی (تابع چاه)

لومان<sup>۱</sup> [۵۲] جدول مقادیر گسترده‌ای برای این انتگرال نمایی در دامنه وسیعی از مقادیر  $u$  محاسبه کرده که در حدود برآوردهای ضریب ذخیره و آبگذری آبخوان دقت دارد و تا حد بسیار زیادی حل معادله را آسان می کند. کاربردهای

این معادله مشابه با کاربرد آنهایی است که برای جریان ماندگار توضیح داده شد. دخالت دادن ضریب ذخیره نیاز به شرایط تعادلی را از میان می‌برد و تغییراتی در هد در هر فاصله‌ای از چاه و برای هر دوره زمانی را می‌توان به راحتی محاسبه کرد. این کار اجازه می‌دهد که با رسم زمان در برابر برآمدگی سطح ایستابی و یا فاصله در برابر برآمدگی بتوان آن را برای مجموعه معینی از شرایط تغذیه تعمیم داد. محدودیتهای سرعت تغذیه، به گونه‌ای که برای حالت ماندگار توضیح داده شد، قابل بررسی است.

راه حل به کار رفته برای جریان ناماندگار محصور را می‌توان برای جریان ناماندگار در آبخوانهای نامحصور نیز استفاده کرد، به شرطی که میزان بالای آمدگی آب نسبت به ضخامت اشباع آبخوان کم باشد. در آبخوانهای کم ضخامت نامحصور که بالای آمدگی در مقایسه با ضخامت اشباع آبخوان بزرگ است هنگامی که از روش ناماندگار شرایط محصور استفاده می‌شود باید تصحیحاتی برای برآورد مقادیر به کار برد. این تصحیح برای پیش‌بینی برآمدگی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$s' = \sqrt{b^2 - 2bs} - b \quad (13)$$

که در آن :

$s'$  برآمدگی مورد انتظار آب زیرزمینی تصحیح شده در آبخوان نامحصور،  
 $s$  بالای آمدگی آب زیرزمینی

از معادله جریان ناپایدار آبخوان محصور (معادله ۱۲) [L]؛ و  $b$  ضخامت اولیه آبخوان [L] است. این تصحیح، که معمولاً به عنوان تصحیح ژاکب<sup>۱</sup> [۵۳] نامیده می‌شود، را نباید برای تصحیح‌های دقیق در شرایطی که مولفه‌های جریان قائم غالبند، مانند نزدیک چاه تغذیه در ابتدای فرآیند تزریق به کار برده شود. این تکنیک تصحیح را زمانی می‌توان به کار برد که برآمدگی به ۲۵ درصد ضخامت اولیه آبخوان برسد. برای شرایط بیش از این مقدار، که فراتر از محدوده روشهای ساده جبری است، باید عملیات پیچیده‌تر ریاضی به کار گرفته شود.

فرضهای معادله جبری حالت ناماندگار برای شرایط محصور و یا نامحصور عبارتند از [۱۷]:

- آبخوان همگن، متجانس، با ضخامت یکسان و گسترش سطحی نامحدود است.
- پیش از تغذیه سطح پتانسیومتریک، افقی است.
- چاه، آبخوان را با سرعت ثابتی تغذیه می‌کند.
- چاه تغذیه کننده تمام آبخوان را سوراخ کرده باشد، و جریان در داخل آبخوان افقی باشد.

- قطر چاه آنقدر کم باشد که مقدار ذخیره در داخل چاه قابل صرفنظر کردن باشد.
- با افزایش هد آب بلافاصله به ذخیره آبخوان اضافه شود.

برآورده شدن دقیق این فرض‌ها، حتی اگر امکانپذیر باشد، نادر است و شناسایی این واقعیت باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شود.

روش تصویر<sup>۱</sup> [۵۱] را می‌توان برای جریان ماندگار یا ناماندگار به کار برد و استفاده از آن در ارزیابی تغذیه القایی به طور مصنوعی مفید است. مثلاً، افت در یک چاه بهره‌برداری با نرخ ثابت در نزدیکی یک رودخانه که تغذیه از آن القاء می‌شود برابر با تاثیر افت ناشی از بهره‌برداری از چاه و بالآمدن سطح آب در یک چاه تغذیه فرضی است که در همان فاصله از رودخانه اما در جهت مخالف آن وجود دارد. این اثر در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

کازمان<sup>۲</sup> [۵۵] هم استفاده از تئوری تصویر در نفوذ القایی آب رودخانه به چاهها را مورد بحث قرار داده است. هنگامی که تغذیه القایی با استفاده از چاههای کولکتور<sup>۳</sup> انجام می‌شود تئوری تصویر باید همراه روشهای جبری به کاربرد که به وسیله هانتوش<sup>۴</sup> و پاپادوپولوس<sup>۵</sup> [۵۶] و هانتوش [۵۷] تدوین شده و جریان به چاههای کولکتور را توصیف می‌کند. این روشهای جبری خارج از چارچوب این مبحث است ولی به وسیله والتون<sup>۶</sup> [۷] به شکل مناسبی خلاصه شده است. یکی دیگر از فرمولهای تئوریک مفید در تعیین تخلیه آب یک رودخانه به وسیله یک چاه در حال پمپاژ نزدیک به آن، به وسیله گلوور و بالمر<sup>۷</sup> [۵۸] ارائه شده است. در شکل ۲۲ منحنی نشان دهنده درصد آب یک رودخانه نزدیک به چاه، در جریان پمپاژ آب از چاه است که در مقابل متغیر بی بعد  $x / \sqrt{4(KD/V)t}$  رسم شده است. در این متغیر:

$$x = \text{فاصله چاه از رودخانه [L]}$$

$$K = \text{هدایت هیدرولیکی آبخوان [LT}^{-1}\text{]}$$

$$D = \text{ضخامت آبخوان [L]}$$

$$V = \text{آبدهی ویژه [M}^{\circ}\text{L}^{\circ}\text{T}^{\circ}\text{]}$$

$$t = \text{زمان [T]}$$

$$q/Q = \text{درصد آب رودخانه در آب خروجی از چاه [M}^{\circ}\text{L}^{\circ}\text{T}^{\circ}\text{]}$$

1- The method of image

2- Kazmann

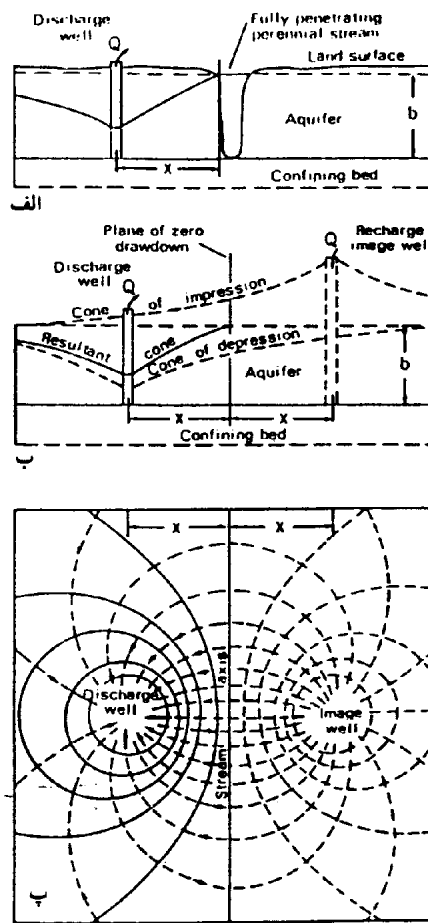
3- Collector well

4-Hantush

5- Papadopulos

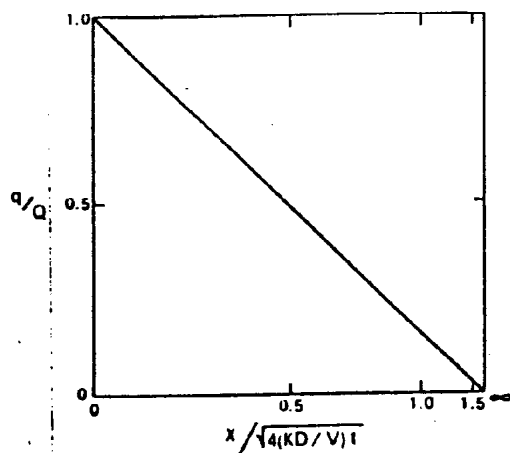
6-Walton

7- Glover & Balmer



شکل ۲۱- تغذیه القایی نشان داده شده به وسیله تئوری چاههای تصویری

- (الف) پروفیل سیستم واقعی با چاه بهره‌برداری  
 (ب) شمای پروفیل نشان دهنده برآمدگی آب زیرزمینی که به وسیله تئوری چاههای تصویری پیش‌بینی شده است.  
 (پ) نمای پلان الگوهای جریان در چاه بهره‌برداری و چاه تغذیه تصویری با رودخانه‌ای در فاصله مساوی از این دو (اقتباس از Ferrs و دیگران [۵۴])



شکل ۲۲- درصد آب رودخانه وارد شده از طریق تغذیه القایی (اقتباس از گلوور و بالمر) [۵۸]

روشهای جبری می‌تواند برای برآورد برآمدگی در سطح آب زیرزمینی زیر تاسیسات تغذیه سطحی به کار رود. به دلیل آنکه استخر عمده‌ترین روش تغذیه سطحی را تشکیل می‌دهند در اینجا عمدتاً بر روی آنها تمرکز می‌شود. چند رویکرد برای تشکیل برآمدگی در سطح ایستابی زیر اراضی پخش آب تشریح شده است. [۶۳-۵۴]: یکی از روشهای مناسب، روش تشریح روش هانتوش [۶۴] است که خلاصه‌ای از آن به وسیله والتون [۷] ارائه شده است. در این مراجع معادله‌هایی برای سطوح مربع و مدور تدوین شده است، اما در اینجا تنها آنچه که مربوط به استخرهای مدور است ارائه می‌شود زیرا هم محاسبه آن می‌تواند سریعتر و آسانتر باشد و هم برآمدگی زیر یک ناحیه تغذیه مربع شکل را می‌توان از یک ناحیه هم‌اندازه مدورش تخمین زد.

ارتفاع برآمدگی به وسیله معادله‌های زیر برآورد می‌شود:

$$h_m^2 = \left\{ \frac{W_m R_m^2}{2K} [W(u_0) - \left(\frac{r}{R_m}\right)^2 e^{-u_0} + \frac{1}{u_0} (1 - e^{-u_0})] \right\} + h_i^2 \quad (14)$$

و

$$t \geq \frac{r^2}{2Km/S_y} \text{ و } r \leq R_m$$

$$h_m^2 = \left\{ \frac{W_m R_m^2}{2k} [W(u) + 0.5 u_0 e^{-u}] \right\} + h_i^2 \quad (15)$$

$$t \geq \frac{R_m^2}{2Km/S_y} \text{ و } r \leq R_m \quad \text{که در آن:}$$

در حالیکه:

$$[L] = h_i = \text{ارتفاع اولیه سطح ایستابی بالای لایه محصورکننده}$$

$$[L] = h_m = \text{ارتفاع سطح ایستابی در بالای لایه محصورکننده در خلال تغذیه}$$

$$[LT^{-1}] = W_m = \text{سرعت تغذیه}$$

$$0.5 (h_i + h_m)[L] = \bar{m}$$

$$[T] = t = \text{زمان بعد از شروع تغذیه}$$

$$r^2 S_y / 4KmT [M^{\circ}L^{\circ}T^{\circ}] = u$$

$$R_m^2 S_y / 4KmT [M^{\circ}L^{\circ}T^{\circ}] = u_0$$

$$[M^{\circ}L^{\circ}T^{\circ}] = S_y = \text{آبدهی ویژه آبخوان}$$

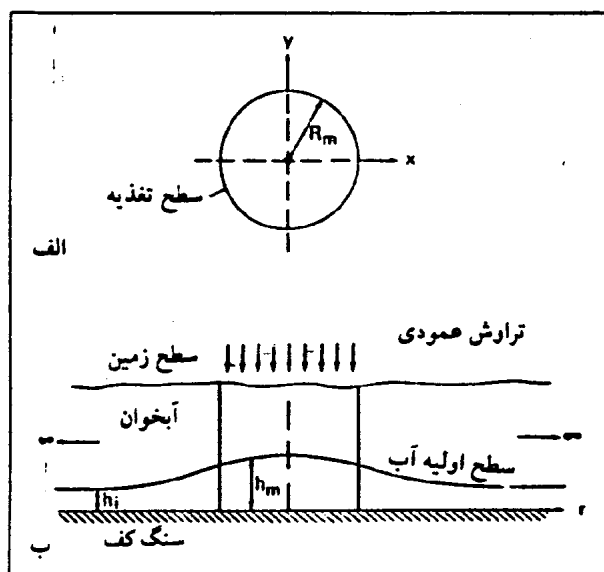
$$[LT^{-1}] = K = \text{هدایت هیدرولیکی آبخوان}$$

$$[L] = r = \text{فاصله مرکز ناحیه تغذیه تا نقطه مشاهده}$$

$$[L] = R_m = \text{شعاع ناحیه تغذیه}$$

نموداری در شکل ۲۳ ارائه شده است. در آن از همان انتگرال نمایی  $W(u)$  استفاده می‌شود که در معادله جریان ناماندگار شعاعی به کار گرفته شد. جدولهای  $W(u)$  برای دامنه وسیعی از مقادیر ارائه شده است که دامنه وسیعی از سرعتهای تغذیه را پوشش می‌دهند، که به ویژه اگر سرعتهای نفوذپذیری زیاد باشد، مفید است. در این تحلیل فرض می‌شود که آبخوان همگن، متجانس بوده و روی یک مرز افقی نفوذناپذیر قرار گرفته است. سرعت ثابت تغذیه هم به اندازه کافی کوچک هست که نشت عمودی در جهت کج شدگی سطح ایستابی بازگردد. [۶۴]. برای محاسبه برآمدگی سطح ایستابی در فاصله‌های بزرگتر از  $2/5$  برابر شعاع استخر تغذیه، استخر تغذیه را می‌توان چاه در نظر گرفت و از معادله جریان شعاعی ناماندگار برای تشریح برآمدگی استفاده کرد [۶۳].

تحلیل‌های تئوریک منتشر نشده گلوور [۶۵] از برآمدگی سطح آب زیرزمینی در زیر فراوانترین شکل استخرها (مربع و مستطیل) به تفصیل به وسیله بیانکی و موکل<sup>۱</sup> [۲۱] و به صورت خلاصه‌تر به وسیله تاد<sup>۲</sup> [۱۷] ارائه شده است. از روش گلوور مانند دیگر روشهای جبری می‌توان برای برآورد ارتفاع برآمدگی یا تعیین خواص آبخوان با اطلاعات مشاهده‌ای استفاده کرد.



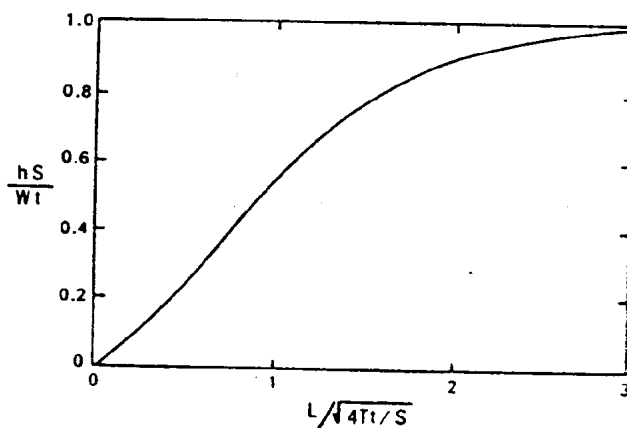
شکل ۲۳- برآمدگی آب زیرزمینی در زیر یک استخر مدور

(الف) تصویر پلان

(ب) مقطع عرضی (اقتباس با اصلاح از هانتوش [۶۴])

ارتفاع برآمدگی با استفاده از نمودار چند متغیری بی بعد  $hS/Wt$  و  $L/\sqrt{4Tt/s}$  و  $x/L$  تعیین می‌شود، که در آن  $h$  ارتفاع برآمدگی روی سطح ایستابی اولیه،  $S$  ضریب ذخیره،  $W$  سرعت تغذیه،  $t$  زمان،  $L$  عرض استخر،  $T$  آبگذری و  $x$  فاصله از مرکز استخری است که ارتفاع برآمدگی آب در زیر آن باید تعیین شود. برای تخمین ارتفاع برآمدگی آب در زیر مرکز یک استخر مربعی، مقدار  $hS/Wt$  از مقدار رسم شده  $L/\sqrt{4Tt/s}$  شکل ۲۴ تعیین شده، و  $h$  نیز به صورت جبری محاسبه می‌شود. برای تعیین ارتفاع برآمدگی در بیرون یک استخر چهارگوش در فاصله‌های تا یک دوم پهنای استخر، مقادیر  $x/L$  و  $L/\sqrt{4Tt/s}$  محاسبه و رسم می‌شوند تا مقدار  $hS/Wt$  (شکل ۲۵) مشخص شود. در اینجا هم، ارتفاع برآمدگی ( $h$ ) را می‌توان به طور جبری به دست آورد. راه‌حلهایی برای استخر مستطیلی معمولی نیز وجود دارد [۶۵ و ۲۱].

برای تعیین ارتفاع برآمدگی به دست آمده از تغذیه از کانال‌های مستقیم با طول بی‌نهایت؛ گلوور [۴۹] عبارت جبری زیر را ارائه داده است:



شکل ۲۴- تعیین ارتفاع برآمدگی در زیر یک استخر مربع شکل (اقتباس از بیانکی و موکل [۲۱])

$$h = \frac{qx}{2\pi KD} \left[ \sqrt{\pi} \int_{\frac{x}{\sqrt{4ct}}}^{\infty} \frac{e^{-u^2}}{u^2} du \right] \quad (۱۶)$$

که در آن :

$$[L^2 T^{-1}] = q \text{ مقدار تغذیه در واحد طول کانال}$$

$$[L] = x \text{ فاصله از مرکز کانال}$$

$$[L T^{-1}] = K \text{ هدایت هیدرولیکی آبخوان}$$

$$[L] = D \text{ ضخامت آبخوان}$$

$$[L^2 T^{-1}] = \alpha = KD/V$$

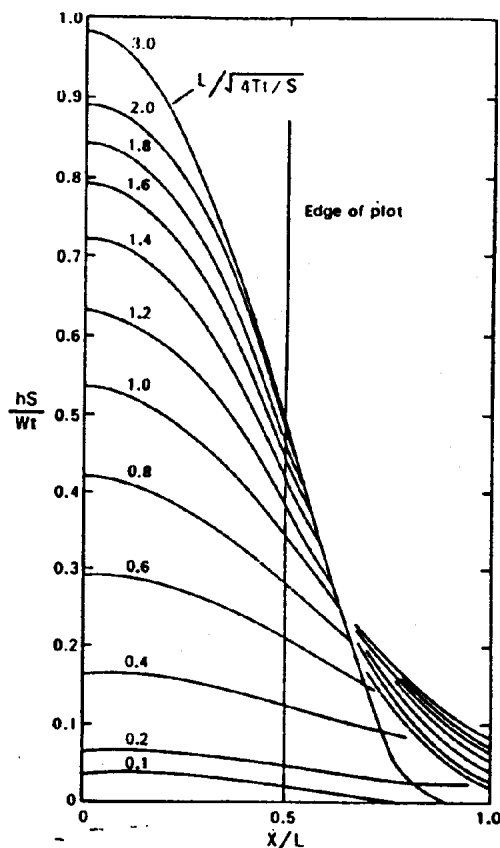
$$[M^{\circ} L^{\circ} T^{\circ}] = V \text{ آبدهی ویژه آبخوان}$$

$$[T] = t \text{ زمان سپری شده از آغاز تغذیه}$$

$$[M^{\circ} L^{\circ} T^{\circ}] = u = x^2 / V / 4Tt$$

مقادیر جمله‌های درون پرانتز (۱۶) را می‌توان از جدولها به دست آورد.





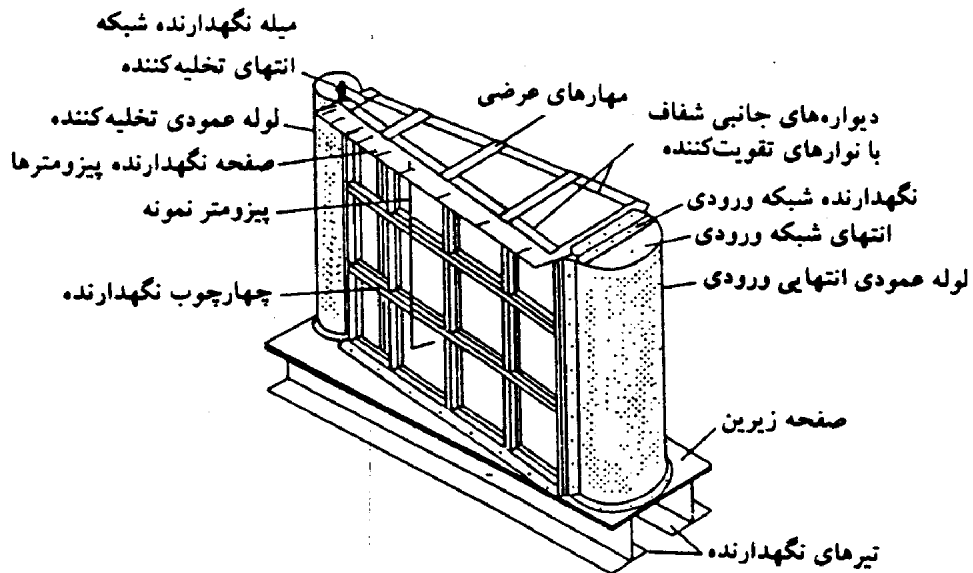
شکل ۲۵- تعیین ارتفاع برآمدگی آب در خارج یک استخر مربعی در فاصله‌های تا نصف پهناي استخر (اقتباس از بیانکی و موکل [۲۱])

### ۳-۱-۳-۵ مدل‌های محیط‌های متخلخل

مدل محیط متخلخل محفظه‌ای است که مرزهای آبخوان واقعی را نشان می‌دهد و با موادی پر شده است که با خواص هیدرولیکی آبخوان شبیه سازی شده است. آب را به این محفظه وارد یا از آن خارج می‌کنند و توزیع بار و الگوهای جریان مشاهده می‌شود. مدلی در این رده مدل مخزن شنی است که در آن تنشهای کنترل شده رامی توان به کاربرد. متداول ترین شکل آنها قطاعهای شعاعی (مخازن گرد، شفاف آب بند) هستند ولی از اشکال مستطیلی و ستونی هم استفاده می‌شود (شکل ۲۶). آبخوانهای محصور را می‌توان با تدارک پوشش آب بند برای کنترل فشار در این محفظه‌ها، شبیه سازی کرد. آبخوانهای نامحصور با آزاد گذاشتن سطح آب در محفظه برای نمایش سطح ایستابی شبیه سازی می‌شود. مقادیر فشار بار در این محفظه‌ها از پیژومترهای کوچکی که چنان طراحی شده‌اند که با جریان آب تداخل نداشته باشد، به دست می‌آید. میدان جریان در مدل با تزریق رنگ به سادگی آشکار می‌شود.

مدل‌های مخازن ماسه‌ای برای کاوش در وضعیت‌های گوناگون آب زیرزمینی استفاده شده است و اغلب برای تایید

نتایج تئوریک به دست آمده از مدل‌های ریاضی به کار برده می‌شود. برای مثال پانی کار و متور<sup>۱</sup> [۵۹] از یک مدل مخزن ماسه‌ای به همین منظور در مطالعه برآمدگی‌های آب زیرزمینی در زیر سطوح پخش آب استفاده کرده‌اند و ل<sup>۲</sup> [۶۷] از تغییر در یک مدل مخزن شنی برای مطالعه رابطه میان شکل گودال تغذیه و سرعت نفوذ استفاده کرد.



شکل ۲۶- مدل مخزن ماسه‌ای (اصلاح از هال<sup>۳</sup> [۶۶])

در یک تغییر، مدل مخزن ماسه‌ای استفاده از محیطی است که ضریب شکست آن برابر با مایع باشد تا بتوان اثر یک محیط ناپیدا را ایجاد کرد. تزریق مواد رنگی به سیستم موقعیت مرز سطوح آزاد و الگوهای جریان مایع و پخش آن را آشکار می‌کند. تاد<sup>۳</sup> [۶۰] این مدل را برای مطالعه پخش آب زیرزمینی در زیر سطوح تغذیه به کار برده است.

#### ۴-۵ مدل‌های مانسته<sup>۴</sup>

مدل‌های مانسته با استفاده از ویژگیهای فیزیکی ماده یا محیطی معین برای نمایش جریان آب زیرزمینی و یا توزیع بار پتانسیومتریک در یک آبخوان به کار می‌رود. مدل‌های مانسته الکتریکی همانند سیستم‌های فیزیکی غیر الکتریکی مانند جریان لایه‌ای، جریان موینگی<sup>۵</sup>، جریان گرما، تغییر شکل غشایی<sup>۶</sup> و لوزی برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی استفاده شده است. اساس این سیستم‌ها بر قوانین پیوستگی و بقا انرژی استوار است و با معادله‌های دیفرانسیل همانند معادله‌های جریان آب زیرزمینی تعریف می‌شوند.

1- Panikar and Mathure

2- Lehr

3- Todd

4 - Analog models

5- Capillary flow

6- membrane deformation

معادله‌های مانسته نمایشگر این دو سیستم را سپس می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از فاکتورهای مقیاس‌دار به هم مربوط کرد و این فاکتورهای مقیاس‌دار را برای طراحی مدل و تبدیل اندازه‌گیری‌های مدل به مقادیر تقریبی برای جریان آب زیرزمینی به کار برد. امروزه این روش‌ها تنها جذابیت تاریخی دارند، زیرا مدل‌های عددی، که از آغاز دهه هفتاد میلادی به کار گرفته شده‌اند و با کامپیوترها حل می‌شوند، راه‌حل‌های سریعتری را به وجود آورده‌اند. در بخش‌های بعدی انواع مدل‌های مقایسه‌ای که در بالا نام برده شد، به اختصار و همراه با نقش آنها در تغذیه مصنوعی، توضیح داده می‌شوند.

#### ۵-۴-۱ مدل‌های مانسته غیرالکتریکی

جریان موبینگی، تکنیک‌های اپتیکی و تغییر شکل غشایی، تنها کاربرد محدودی در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دارند. مدل‌های جریان گرما که ظرفیت گرمایی محیط را با ضریبهای ذخیره آبخوان، هدایت گرمایی را با هدایت هیدرولیکی و جریان گرما را با جریان آب و دما را با هدایت ارتباط می‌دهد؛ ارتباط می‌دهد هم گاهی استفاده شده‌اند، اما به دلیل مشکلات ذاتی طراحی مدل و ابزارسازی کاربرد گسترده‌ای نیافته‌اند.

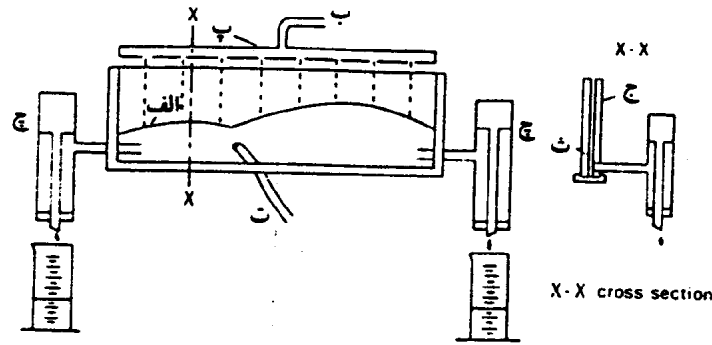
مدل‌های جریان لزج<sup>۱</sup> بر پایه شباهت‌های میان معادله‌های جریان دوبعدی آب زیرزمینی و جریان لزج میان دو صفحه موازی نزدیک به هم طراحی شده‌اند. این صفحه‌های موازی معمولاً شفاف هستند و می‌توانند به صورت افقی یا عمودی قرارداد شوند. مخازنی از نفت، گلسیرین یا آب به دو انتها یا دو پهلوئی مدل برای کنترل جریان مایع وصل می‌شود. مرزهای نفوذناپذیر میدان با مرزهای نفوذناپذیر مدل نشان داده می‌شود. پایین رفتن آب زیرزمینی یا تغذیه مصنوعی آن با بیرون کشیدن و یا وارد کردن مایع در محل‌های مناسب مدل بازسازی می‌شود. تغییرات در ذخیره آب زیرزمینی را می‌توان با تغییر در سطح آب لوله‌های عمودی متصل به مدل نشان داد. هدایت هیدرولیکی با فاصله صفحه‌ها و خواص مایع به دقت قابل محاسبه است (شکل ۲۷). اطلاعات تفصیلی درباره اصول مشتق‌گیری و تعیین ابعاد در آثار والتون<sup>۲</sup> [۷]، تاد [۱۷] و دیوس و دی ویست<sup>۳</sup> ارائه شده است.

امکان دیدن الگوهای جریان و موقعیت سطح ایستابی، دستکاری آسان متغیرهای مدل و مناسب بودن آن برای هر دو حالت ماندگار و ناماندگار، سیستم صفحه‌های موازی را به یک روش مدل‌سازی متداول ساخته است. به ویژه، روش‌های تغذیه مصنوعی سطحی با استفاده از مدل‌های صفحه‌های موازی، به شکل گسترده‌ای بررسی شده‌اند [۷۱ و ۷۰ و ۵۱].

1- Viscous-flowmodels

2- Walton

3-Davis & Dewiest



شکل ۲۷- مدل جریان لزوج (الف) سطح ایستابی (ب) منبع تأمین آب (پ) آبپاش (ت) لوله زهکشی (ث) مایع لزوج (ج) صفحه‌های شفاف (چ) سرریز قابل تنظیم عمودی (اصلاح از سان‌تینگ [۶۸])

#### ۲-۴-۵ مدل‌های مانسته الکتریکی

جریان الکتریکی در یک هادی مانند جریان آب در مواد متخلخل اشباع است. در مدل الکتریکی هدایت الکتریکی مستقیماً متناسب با هدایت هیدرولیکی، ولتاژ مستقیماً متناسب با بار و جریان الکتریکی مستقیماً متناسب با تخلیه و زمان واقعی به طور مستقیم با زمان مدل الکتریکی متناسب است. فاکتورهای مقیاس دار واقعی که رابطه میان خواص هیدرولیکی و الکتریکی را تعریف می‌کند به شکل کاملتری به وسیله تاد [۱۷] و والتون [۷] تکمیل شده‌اند. مدل‌های مانسته الکتریکی از دو نوع عمده هستند: سیستم‌های پیوسته و ناپیوسته<sup>۱</sup>.

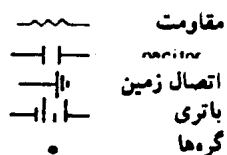
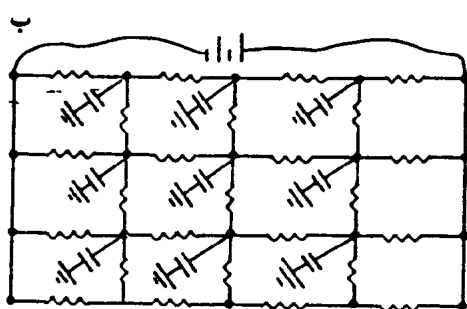
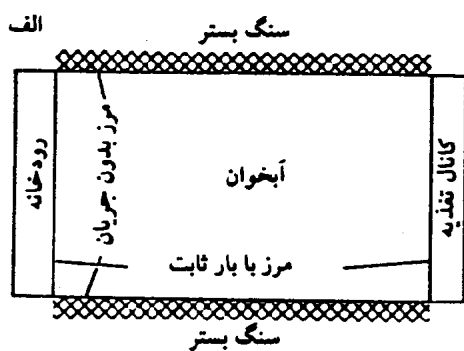
در سیستم پیوسته<sup>۲</sup> از یک محیط پیوسته و هدایت‌کننده الکتریسته برای شبیه‌سازی ویژگی‌های آبخوان استفاده می‌شود.

در سیستم ناپیوسته از مجموعه‌ای از عناصر جداگانه الکتریکی (مقاومت‌ها و خازن‌ها) برای ایجاد یک شبکه الکتریکی نمایانگر آبخوان استفاده می‌شود.

در سیستم‌های پیوسته، مخازن مایعات و یا جامدات هادی الکتریسته چنان ساخته می‌شوند که روایت مقیاس داری از هندسه آبخوان باشند. تغذیه، تخلیه و شرایط مرزی را می‌توان به صورت الکتریکی شبیه سازی کرد. می‌توان با استفاده از یک ولت‌متر، پتانسیل‌های ولتاژ در سراسر مدل را ردیابی و به بار هیدرولیکی تبدیل کرد. مدل‌هایی از این نوع برای وضعیت‌های متجانس، دو بعدی و ماندگار کاملاً مناسب است، و به برای مدل‌سازی تغذیه مصنوعی به کار نمی‌رود.

از شبکه‌های مقاومت و یا مقاومت - خازن برای شبیه سازی جریان دو یا سه بعدی در مخازن آب زیرزمینی به کار برده می‌شود و شکل ناپیوسته سیستم آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. هر عنصر الکتریکی نماینده حجم ویژه‌ای از آبخوان است، و این عناصر به "نقاط گره" مربوط می‌شوند تا نمایانگر مجموعه آبخوان باشند. (شکل ۲۸). یک شبکه با فاصله‌های مناسب گره‌ها می‌تواند پاسخهای یک آبخوان پیوسته به پمپاژ یا تغذیه را به دقت برآورد کند [۷]. شبکه‌های مقاومت تاثیرات ذخیره را به حساب نمی‌آورد و بنابراین تنها برای نمایش شرایط جریان ماندگار استفاده می‌شود. شبکه‌های مقاومت - خازن که از خازن‌ها برای نمایش ذخیره آبخوان استفاده می‌شود، می‌توانند شرایط جریان ناماندگار را شبیه سازی کنند. پالس‌های الکتریکی و مولدهای موجی، پالس‌های زمان بندی شده‌ای از جریان الکتریکی در مدل ایجاد می‌کنند که متناسب با تخلیه آب زیرزمینی است.

اسیلوسکوپ‌ها<sup>۱</sup> تغییرات زمانی پتانسیل‌های ولتاژ در مدل را اندازه‌گیری می‌کنند و نمایانگر تغییرات زمانی بار هیدرولیکی در آبخوان هستند [۱۷].



شکل ۲۸- شبکه مقایسه‌ای مقاومت - خازن. (الف) نمایش تصویری سیستم آب زیرزمینی، (ب) مانسته‌سازی الکتریکی ناپیوسته همان سیستم آب زیرزمینی

اغلب مدل‌های مانسته ناپیوسته برای بررسی نواحی نسبتاً وسیع به کار برده شده است [۷۲, ۷۳]، والتون [۷] لیستی از موارد تاریخی که در آنها از چنین مدل‌هایی استفاده شده ارائه کرده است. مدل‌های مانسته الکتریکی کوچک مقیاس برای پیش‌بینی توسعه برآمدگی آب زیرزمینی در زیر تاسیسات تغذیه پخش سطحی آب استفاده شده است [۷۴, ۷۵].

## ۵-۵ تکنیک‌های عددی

واقعه افزایش توانایی‌های کامپیوتری موجب استفاده تقریباً انحصاری مدل‌های عددی در حل مسائل پیچیده آبهای زیرزمینی شده است. دو رویکرد اساسی تحلیل عددی جریان آب زیرزمینی فرمول بندی تفاضل‌های محدود<sup>۱</sup> و اجزای محدود<sup>۲</sup> است. در هر دو حالت، معادله‌های دیفرانسیل جزئی پیوسته به وسیله مجموعه‌ای از معادله‌های ناپیوسته در زمان و مکان تخمین زده می‌شوند. این معادله‌ها سپس ترکیب می‌شوند تا مجموعه‌ای از معادله‌های همزمان را بسازند که برای هر مقطع زمانی حل می‌شوند. تعریف کامل از این تکنیک‌ها خارج از محدوده این مبحث است؛ ولی روش تفاضل‌های محدود معادلات دیفرانسیل را با رویکرد دیفرانسیلی تخمین می‌زند، و روش اجزای محدود معادلات دیفرانسیل را با رویکرد انتگرالی تخمین می‌زند. این تکنیک‌ها به تفصیل به وسیله فاست و مرسر<sup>۳</sup> [۷۶] تشریح شده است.

روش‌های عددی و کامپیوترهای با سرعت زیاد، امکان نمایاندن شرایط پیچیده هیدرولوژیکی ایجاد شده در حین انواع مشخص تغذیه مصنوعی را فراهم کرده است. بعضی از نمونه‌های این پیچیدگی‌ها عبارتند از: (۱) جریان در آبخوانهای آزاد دارای تغییرات نسبتاً زیاد در ضخامت لایه اشباع، (۲) جریان در سیستم‌های نیمه اشباع که در آنها مدل‌های رواناب - بارندگی با به شمار آوردن رطوبت خاک و مدل‌های جریان آبخوان همراه است، (۳) جریان در سیستم‌های پیچیده آب زیرزمینی - آب سطحی، (۴) اندرکنش ملاحظات اقتصادی و هیدرولوژیکی و (۵) جابجایی آلاینده‌ها در یک آبخوان [۷۷]

با وجود آنکه هر دو تکنیک تفاضل‌های محدود و اجزای محدود روشهای قوی هستند، تکنیک‌های تفاضل محدود به دلیل ایجاد مدل‌های عملی، مستند و با قدرت بررسی کامل برتری دارند. مدل‌های اجزای محدود مزیت‌های مشخصی بر مدل‌های تفاضل‌های محدود دارند که شامل توانایی تعریف مرزهای دارای پیچیدگی، به شمار آوردن غیر ایزوتروپ بودن (ناهمسانگردی) و فراهم آوردن امکان انعطاف در ناپیوسته کردن آبخوان‌ها تعریف تفصیلی در جایی که به آن بیشترین نیاز است.

1- finite-difference

2- finite-element

3- Faust & Mercer

سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا از سال ۱۹۷۰ چندین مدل عددی جریان آب زیرزمینی را به کار می‌برد [۷۸-۷۹]. تشریح مدل‌های عددی مورد استفاده در پیش‌بینی چگونگی تغذیه مصنوعی از طریق حوضچه‌هایی با اشکال گوناگون به وسیله مارینو<sup>۱</sup> [۸۰-۸۱] ارائه شده است. مدل عددی برای جریان‌های ناپایدار از میان چاههای تغذیه به وسیله اسمایلی<sup>۲</sup> [۸۲] مورد بحث قرار گرفته است. مزایای تکنیک‌های عددی در حل مسائل جریان آب زیرزمینی، آنها را در مدیریت آب زیرزمینی قابل استفاده کرده است، اما قابل اعتماد بودن این روش‌ها به برآوردهای با دقت منطقی از ویژگیهای آبخوان بستگی دارد. استفاده از مدل‌های عددی در مطالعات منطقه‌ای یا در بررسیهای ویژه ساختگاهی کوچک مقیاس قابل اعتماد بودن و انعطاف پذیری این روش‌ها، از آنها ابزارهایی بسیار مفید برای پیش‌بینی‌ها ساخته است. مدل‌های عددی ابزاری در مراحل طراحی و توسعه پروژه‌های اصلی تغذیه مصنوعی بوده و خواهند بود.

## ۶-۵ تکنیک‌های مطالعه صحرائی

صرف نظر از اینکه روش‌های ریاضی، مقایسه‌ای و یا عددی چقدر موثر می‌توانند باشند، آزمایشهای صحرائی هنوز هم به عنوان بخش جدایی ناپذیر پیش‌بینی آب زیرزمینی باقی مانده‌اند. آزمایشهای ساده تراوش با استفاده از نفوذسنجها<sup>۳</sup> [۸۳] می‌تواند برای برآورد سرعت بالقوه نفوذپذیری به کار برده شود. تجارب صحرائی در مقیاس بزرگ را می‌توان با استخرهای پخش آب به مقیاس کوچک شده انجام داد تا بتوان تغییرات درازمدت در سرعت نفوذ را با دستیابی به یکنواختی کیفیت آب تغذیه و برآمدگی سطح ایستابی تعیین کرد.

تجارب صحرائی در کالیفرنیا به وسیله هاسکل و بیانکی<sup>۴</sup> [۸۴] برای بررسی آثار لایه‌بندی خاک رشد یا کاهش برآمدگی سطح ایستابی در زیر یک استخر مربع شکل هدایت شده است. بی‌تینگر و ترلیز [۶۳] یک مطالعه صحرائی برای اثبات پیش‌بینی‌های تحلیلی برآمدگی سطح ایستابی را در مخزن الدز<sup>۵</sup> در شرق کلرادو انجام داده‌اند.

تصور می‌شود که آزمایشهای پمپاژ برای تعیین ویژگیهای آبخوان و الگوهای جریان در محلهای تغذیه آبخوان به وسیله چاههای تزریق مفید باشد. با حفر یک چاه پمپاژ و شبکه‌ای از چاههای مشاهده‌ای می‌توان یک آزمایش کامل صحرائی را انجام داد. در صحرا، افت سطح آب در زمان برای محاسبه ویژگیهای آبخوان به کار می‌رود، در حالی که در وضعیتهای مبتنی بر پیش‌بینی، مقادیر تخمینی برای محاسبه افت‌ها به کار می‌رود. اگر راه‌حل‌های تحلیلی مناسب انتخاب شوند، برآورد به طور منطقی دقیقی از ویژگیهای آبخوان امکان پذیر است. جاهایی که سرعتهای تغذیه

1- Marino

2- Esmaili

3- In filtrometer

4- Haskell & Biancli

5- Olds Reservoir

تزریقی از آبدی‌های چاه تخمین زده می‌شود، افتها نشان دهنده بزرگی قابل انتظار برآمدگی سطح ایستابی خواهد بود. با وجود زیاد بودن هزینه‌های آزمایشهای پمپاژ، نتایج آن قطعی است.

آزمونهای صحرایی آزمایشی خوب طراحی شده تنشهای مورد انتظار برای آشکار کردن آثار هیدرولوژیک را بسیار مطمئنتر از تکنیک‌های عددی یا مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی می‌کند. با وجود آنکه ممکن است اغلب شرایط مرزی متعادل مورد نظر وجود نداشته باشد، نتایج به دست آمده نشان دهنده شرایط واقعی آن ساختگاه خاص است. اگر تجارب صحرایی به طور اقتصادی هم قابل اجرا باشد، نیاز به مدل‌ها برطرف نمی‌شود، بلکه وابستگی به آنها راکاهش می‌دهد.

## ۶- رفتارسنجی تغذیه مصنوعی

برنامه‌های رفتارسنجی تغذیه مصنوعی برای بررسی تغییرات کیفیت آب و سطح آب زیرزمینی در خلال تغذیه طراحی می‌شوند [۸۵]. داده‌های تغییرات بار پتانسیومتری در خلال تغذیه مصنوعی، نیاز به تعیین ذخیره پتانسیل، جهت جریان و سرعت حرکت آب زیرزمینی دارد. در سراسر جهان، چاههای مشاهده‌ای به عنوان ابزاری نسبتاً ارزان قیمت برای تأمین این اهداف به کار می‌رود. تغییرات کیفیت آب که ناشی از ترکیب آب موجود در آبخوان و آب تغذیه شده و اندرکنش‌های مختلف آب و خاک است، نیاز به رفتارسنجی دارد به طوری که بتوان استانداردهای کیفیت آب برای کاربردهای موردنظر را حفظ کرد. برنامه‌های موثر رفتار سنجی کیفیت آب تنها پس از ارزیابی تغییرات بالقوه شیمیایی و هیدرولیک آبخوان می‌تواند تدوین شده باشد.

## ۱-۶ رفتارسنجی سطح ایستابی

برنامه‌های رفتارسنجی سطح آب زیرزمینی نیاز به شبکه‌ای از چاههای مشاهده‌ای دارد. داده‌های به دست آمده به‌طور تپیک برای تعیین (۱) آثار تخلیه یا افت آب زیرزمینی در شرایط تغذیه و تخلیه طبیعی (۲) ویژگیهای هیدرولیکی سیستم آب زیرزمینی و (۳) شرایط مرزی آبخوان [۸۶]، به کار می‌رود. سیستم‌های رفتارسنجی بر سه نوعند: شبکه‌های هیدرولوژیک، شبکه‌های مدیریت آب و شبکه‌های پایه<sup>۱</sup>. شبکه‌های هیدرولوژیک برای تعیین گسترش آبخوان، ویژگیهای جریان و تغییرات در ذخیره ساخته شده‌اند؛ شبکه‌های مدیریت آب برای تعیین ویژگیهای آبخوان و ارزیابی آثار تنشهای هیدرولیکی و شبکه‌های پایه برای تعیین تغییرات طبیعی درازمدت در سیستم‌های آب زیرزمینی ساخته می‌شود [۸۶]. شبکه‌های هیدرولوژیک و پایه معمولاً تنها به تراکم نسبتاً کم چاه نیاز دارد که بستگی به حداکثر فاصله‌ای دارد که در آن ویژگیهای آبخوان رامی‌توان درون یابی<sup>۲</sup> کرد [۸۷]، در حالی که شبکه‌های مدیریت آب معمولاً به تراکم بیشتر چاهها نیاز دارد.

1- base-line network

2- inter polation



به‌طور آرمانی، مناسبترین نوع شبکه چاه برای رفتار سنجی تغذیه مصنوعی یک شبکه مدیریت آب خواهد بود که در آن چاهها در آبخوانی که قرار است تغذیه شده به همان شکل هر آبخوان، بالا یا پایین آن دارای توری چاه (اسکرین) خواهد بود. چنین شبکه‌ای دارای چاههایی (۱) نزدیک به مرکز تاسیسات تغذیه، (۲) فاصله کافی از تاسیسات تغذیه برای مشاهده آثار ترکیبی، (۳) در نزدیکی مرز آثار هیدرولوژیک تغذیه خواهد بود [۸۶]. چاههایی که از لایه‌های محصورکننده برداشت می‌کند را می‌توان برای تشخیص نشت آب از آبخوان مورد تغذیه استفاده کرد [۸۸].

## ۲-۶ رفتارسنجی کیفیت آب

نوع برنامه رفتارسنجی به کار رفته برای کیفیت آب بستگی به ویژگی‌های مسئله مورد بررسی دارد. برنامه‌های رفتارسنجی عملیات تغذیه مصنوعی باید اهداف تغذیه، کیفیت و کمیت آب تغذیه، روش تغذیه مصنوعی و ژئوهیدرولوژی مخزن آب زیرزمینی را اداره کند. تاد و دیگران [۸۹] یک رویه جامع ۱۵ مرحله‌ای برای رفتارسنجی و آثار اقدامات انسان بر کیفیت آب زیرزمینی را ارائه کرده‌اند. این مراحل به شرح زیر است:

- انتخاب ناحیه‌ای که باید رفتارسنجی شود
- شناسایی منابع آلودگی، علل و روش‌های برطرف کردن آنها
- شناسایی آلاینده‌های بالقوه
- تعیین کاربری آب زیرزمینی
- تعیین وضعیت هیدروژئولوژیک
- تشریح کیفیت آب زیرزمینی در وضع موجود
- ارزیابی پتانسیل نفوذپذیری زباله‌ها از سطح زمین
- ارزیابی قابلیت حرکت آلاینده‌ها از سطح زمین
- ارزیابی رقیق‌شوندگی آلاینده‌ها در منطقه (زون) اشباع
- اولویت بندی منابع و علتها
- ارزیابی برنامه‌های جاری رفتارسنجی
- شناسایی رویکردهای رفتارسنجی
- انتخاب و تشریح برنامه رفتارسنجی
- بازنگری و تفسیر نتایج
- خلاصه کردن نتایج

اگر چه این روش برای مشخص کردن نواحی آلوده تدوین شده است، بسیاری از اجزای آن برای رفتارسنجی آثار تغذیه مصنوعی مناسب است.

هنگامی که یک برنامه تغذیه مصنوعی تطبیق داده و تشریح می‌شود، کار بسیاری برای هیدرولوژی یا شبکه‌های رفتارسنجی کیفیت ساختگاه عملاً انجام شده است. شبکه‌های چاههای مشاهده‌ای هیدرولوژی بزرگ مقیاس برای تعیین گسترش آبخوان، ویژگیهای جریان و تواناییهای ذخیره آن معمولاً پیشتر برای تعیین موثرترین روش تغذیه و بهترین محل برای آن تاسیس می‌شود. می‌توان بخشی از شبکه‌های چاههای مشاهده‌ای را که برای توسعه یک برنامه تغذیه به کار می‌روند پس از اصلاح و تکمیل به شبکه‌های مدیریت آب برای رفتار سنجی هیدرولوژی و آثار کیفی آب تغذیه و تأمین داده‌های لازم برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تبدیل کرد. چاههای مورد استفاده برای شبکه مدیریت را می‌توان بعداً با انجام اصلاحاتی با توجه به نیازها یا اهداف ویژه، برای رفتارسنجی کیفیت آب استفاده کرد.

هنگامی که از آب آشامیدنی برای جایگزینی آب زیرزمینی استفاده شود، از شبکه‌های چاههای مشاهده‌ای عمدتاً برای ارزیابی آثار هیدرولوژیک و طرحهای مدیریتی استفاده می‌شود. در این موارد، ملاحظات مربوط به کیفیت آب اهمیت درجه یک ندارد. لکن در جاهایی که آب غیر آشامیدنی برای تغذیه به کار می‌رود، باید تدابیری اندیشیده شود تا دامنه حرکت آب را محدود کرد و یا برداشت از آب زیرزمینی را به نواحی محدود کرد که فرایندهای فیزیکی و شیمیایی طبیعی آب را برای کاربردهای مورد نظر مناسب کرده‌اند. شبکه‌های رفتارسنجی داده‌های لازم برای تعیین حرکت آب اضافه شده و نیز ویژگی‌های کیفی الزامی برای مصرف آن را تأمین می‌کنند. برای پالایش زمین سیستم‌های تغذیه که نفوذپذیری سریع دارند، پیشنهاد شده است که آب تغذیه شونده به بخشهای ویژه‌ای از آبخوان‌ها با استفاده از چاهها، زهکش‌ها و یا زهکشی طبیعی از جویبارها وارد و محدود شود [۹۱ و ۹۰].

در جاهایی که توده‌های آب سطحی دارای ارتباط هیدرولیکی هستند و به عنوان خروجی‌های آبخوان مورد تغذیه عمل می‌کنند، رفتارسنجی هیدرولیک آب سطحی همراه خصوصیات کیفی آن قابل توصیه است.

برنامه‌های رفتارسنجی کیفیت آبخوانهای تغذیه شونده معمولاً برای تأمین یکی از اهداف زیر اجرا می‌شوند: (۱) رسیدن به نیازهای تنظیمی، (۲) تهیه اطلاعات تفصیلی تحقیق و توسعه و (۳) انجام وظیفه به عنوان یک سیستم هشدار اولیه و تهیه داده برای بهره‌برداری بهینه از سیستم [۹۳ و ۹۲]. از آنجاکه، سیستم‌های تغذیه مشخصاً متأثر از شرایط ساختگاهی هستند بنابراین نیازهای رفتارسنجی و طراحی برنامه آن به طور گسترده‌ای تفاوت دارد. به دلیل این تفاوت‌ها، قواعد کلی برای تعیین تعداد چاههای رفتارسنجی یا فراوانی نمونه برداری بسیار کم است و یا اصلاً وجود ندارد. به دست آوردن نمونه‌های معرف آب زیرزمینی، به خودی خود، مرحله مهمی در تعیین خصوصیت آب زیرزمینی است. برای به دست آوردن نمونه‌های معرف باید ساز و کار پمپاژ مناسب انتخاب شود. پیش از نمونه‌برداری، آب درون چاه به طور کامل خارج شود و نمونه برداشته شده به خوبی آماده، نگهداری و انبار شود [۹۴].

موضوع گردآوری نمونه‌های آب زیرزمینی معرف، طولانی‌تر از آن است که قابل درج در این قسمت باشد، اما در نشریات دیگری ارائه شده است [۹۵ و ۹۶].

درباره برنامه‌های رفتارسنجی کیفیت آب مرتبط با تغذیه مصنوعی به فراوانی در کتابها بحث شده است، برای مثال، در لانگ آیلند، نیویورک، تلاش‌های ویژه‌ای برای تعیین خصوصیات آب زیرزمینی به عمل آمده است تا در ناحیه‌ای که روزانه ۴ میلیون گالن پساب سومین مرحله پالایش است به سیستم آبخوان کم عمق وارد شود [۹۷]. رفتار سنجی مواد آلی موجود در آب بازیافتی تزریق شده به یک آبخوان در ناحیه خلیج پالواتو کالیفرنیا به وسیله رابرتز<sup>۱</sup> و دیگران [۹۸] تشریح شده است. در آریزونا، برنامه‌ای برای رفتار سنجی کیفیت آب و کارایی یک سیستم با سرعت زیاد پالایش زمین به وسیله باوئر<sup>۲</sup> و دیگران [۹۹] بیان شده است.

در فلسطین اشغالی، یک شبکه مشاهده‌ای برای رفتارسنجی تغذیه آب زیرزمینی به وسیله پساب سه بار پالایش شده ناحیه پایتخت به وسیله ایدلویچ<sup>۳</sup> و دیگران حاصل [۱۰۰] توصیف شده است. آنها سه رده از نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی را توضیح داده‌اند: نمونه‌های شاخص<sup>۴</sup>، نمونه‌های پایه<sup>۵</sup> و نمونه‌های جامع<sup>۶</sup>.

نمونه‌های شاخص با فاصله‌های ۱ تا ۴ ماه برداشته می‌شوند و برای اطمینان از وجود پساب تزریق شده استفاده می‌شود. نمونه‌های پایه ماهانه از چاههایی گرفته می‌شود که تحت تاثیر تغذیه قرار دارند و برای تعیین اثر پساب تغذیه شده بر کیفیت آب زیرزمینی و پالایش ناشی از جریان آب از میان خاک و سیستم آبخوان است. نمونه‌های جامع در فاصله‌های ۶ ماه تا ۱ سال از چاههای مشاهده‌ای و بهره‌برداری برای تعیین کیفیت آب با توجه به استانداردهای خاص کاربری آن برداشت می‌شود.

یکی از برنامه‌های رفتارسنجی بسیار جامع درازمدت برای ناحیه‌ای گسترده تحت تاثیر تغذیه در ناحیه مونتابلوفوری<sup>۷</sup> بخش لس‌آنجلس کالیفرنیا است، که در آنجا پساب بازیافت شده از سال ۱۹۶۲ به آبخوان تزریق شده است [۱۰۲ و ۱۰۱]. با استفاده از یک مدل ردیاب یون سولفات، درصد آب تغذیه شده‌ای که به مصرف عمومی رسیده را می‌توان با دقت برآورد کرد و برای تعیین جمعیت واقعی که در تماس با آن قرار می‌گیرند به کاربرد.

---

1- Roberts

2- Bouwer

3- Idelovitch

4- Indicative samples

5- Basic samples

6- Comprehensive samples

7- Montalebo forebay

سرفصل‌هایی که در این برنامه رفتارسنجی مرتب شده است ارزیابی‌های شیمیایی، باکتریولوژیک، سم‌شناسی و همه‌گیرشناسی (اپیدمیولوژیک) را شامل می‌شود. نتایج چنین مطالعاتی ارزیابی جامعی از تغذیه در مقیاس بزرگ را به دست می‌دهد و اطلاعات لازم برای تدقیق قوانین مربوط به تغذیه آب زیرزمینی با آب بازیافتی در آینده را فراهم خواهد کرد [۱۰۲].

## ۷- خلاصه

در این نشریه روش‌های سطحی، زیرزمینی؛ غیر مستقیم و ترکیبی تغذیه مصنوعی توصیف شده است. ملاحظات موثر بر انتخاب روش تغذیه و ویژگی‌های اجرایی برای ارائه بنیادهای تغذیه آب زیرزمینی بحث شده است. تکنیک‌های اساسی مدل سازی آب زیرزمینی برای دستیابی به گزینه‌هایی در پیش‌بینی آثار تغذیه آبخوان ارائه شده است. فلسفه‌های رفتار سنجی کیفیت آب و سطح ایستابی برای تاکید بر لزوم پاسداری و محافظت از مخازن آب زیرزمینی نیز آورده شده است.

صنعتی شدن و تراکم جمعیت شهری در نواحی در حال توسعه مانند کشورهای توسعه یافته تقاضای عظیمی برای استفاده از آب ایجاد می‌کند. تقاضای مصرف آب در آینده افزایش خواهد یافت، که نیروی پیش‌رانی برای اجرای، بر پایه روال رایج، فن‌آوری‌های گوناگون تغذیه مصنوعی است.

- 8-1 Brashears, M.L. "Recharging Ground Water Reservoirs With Wells and Basins." Mining Engineering 5:1029-1032 (1953).
- 8-2 Thomas, H.E., and Phoenix, D.A. "Summary Appraisals of the Nation's Ground - Water Resources - California Region. "U.S. Geological Survey Professional Paper 813-E (1976), pp. E1-E51.
- 8-3 Committee on Ground Water, "Recharge and Withdrawal." In: American Society of Civil Engineers Manual of Engineering Practice, no. 40 (1961), pp. 72-92.
- 8-4 Espina, J.M. "The Case for Artificial Recharge." Drillers Journal (Jan.- feb.): 7-11 (1980).
- 8-5 Ineson, J. "Hydrogeological and Ground - Water Aspects of Artificial Recharge." In: Proceedings of the Artificial Groundwater Recharge Conference, 21-24 September 1970. Vol. 1. Ferry Lane, England: Water Research Association, 1971, pp. 1-14.
- 8-6 Muchel, D.C. "Artificial Recharge in Relation to Groundwater Storage." In: Annual Conference on Water for Texas. College Station, Texas: Water Research and Information Center, 1958, pp. 85-94.
- 8-7 Walton, W.C. Groundwater Resource Evaluation. New York: McGraw - Hill, 1970. Chaps. 4,6, and 9.
- 8-8 Buchan, S. "Replenishment of Aquifers by Artificial Methods." In: Symposium on Ground Water, Calcutta, 1955. Pub. 4. Calcutta, India: Central Board of Geophysics, 1958, pp. 327 - 334.
- 8-9 Bianchi, W.C. "Artificial Ground - Water Recharge." In: Irrigation Drainage and Flood Control State - of - the - Art. No. 1. International Commission on Irrigation and Drainage, 1978, pp. 331-335.
- 8-10 Nightingale, H.L., and Bianchi, W.C. "Environmental Aspects of water Spreading for Ground-Water Recharge," U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1568(1977).
- 8-11 Tolman, C.F. Ground water. New York: Mc Graw-Hill, 1937, Chap.7.
- 8-12 Mitchelson, A.T., and Muckel. D.C. "Spreading Water for Storage Under-ground,"

- U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 578 (1937).
- 8-13 Meinzer, O.E. "General Principles of Artificial Ground-water Recharge." *Economic Geology* 41 (3): 191 -201(1946).
- 8-14 Muckel, D.C. and Schiff, L."Replenishing Ground Water by Spreading, U.S. Department of Agriculture, Yearbook of Agriculture(1955), pp. 302-310.
- 8-15 Muckel, D.C. "Replenishment of Ground Water Supplies by Artificial Means," U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1195 (1959).
- 8-16 Pettyjohn, W.A. Introduction to Artificial Ground Water Recharge. Worthington, Ohio: National Well Water Association, 1981.
- 8-17 Todd, D.K. Groundwater Hydrology. 2nd ed. New York: Wiley, 1980. Chaps 4,10,and 13.
- 8-18 Schiff, L. "The Status of Water Spreading for Ground-Water Replenishment." *American Geophysical Union Transactions* 36(6):1009-1020 (1955).
- 8-19 Schiff, L. "Disposal (Conservation) of Water by Percolation in Soil." Proceedings, Symposium on Agricultural Waste Waters. Davis, CA, Water Resources Center University of California, 1966, pp. 203 - 215.
- 8-20 Rafter, G.W. "Sewage Irrigation." U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No.3 (1897).
- 8-21 Bianchi, W.C., and Muckel, D.C. "Ground-Water Recharge Hydrology." U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Pub. No. 41-161(1970).
- 8-22 Aronson, D.A., and Seaburn. G.E. "Appraisal and Operating Efficiency of Recharge Basins on Long Island, New York, in 1969. "U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No.2001-D (1974).
- 8-23 Todd, D.K. "Groundwater."In: V. Chow (Ed). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1964. Chap. 13
- 8-24 Beckman, W.J., and Avendt. R.J. "Correlation of Advanced Wastewater Treatment and Ground Water Recharge." Project No. R-801478, Office of Research and Monitoring. U.S. Environmental Protection Agency (1973).
- 8-25 Prince, K. "Stream Augmentation at Fosters Brook, Long Island, New York A Hydraulic Feasibility Study." U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No.2208 ,

1982.

- 8-26 Israelson, O.W. Irrigation Principles and Practices. New York: Wiley, 1950 Chap.6.
- 8-27 U.S.Environmental Protection Agency, "Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater." Environmental Research Information Center, U.S. Environmental Protection Agency Report No. 625/1-77-00S (1977).
- 8-28 Task Group 2440-R on Artificial Ground-water. "Artificial Ground Water Recharge." American Water Association Journal 59(1): 103-113 (1967).
- 8-29 Sandford, H.J. "Diffusing pits for Recharging Water into Underground formations: Chemical well Cleaning Methods". American Water Works Association Journal 30 (11): 1755-1766 (1938).
- 8-30 Todd, D.K. "Nuclear Craters For Ground-Water Recharge." American Water Works Association Journal 57(4): 429-436(1965).
- 8-31 Todd, D.K. Groundwater Hydrology. 1st ed. New York: Wiley, 1959. Chap. 11.
- 8-32 Public Works Research Institute. Principles and Effect of Underground Piping. Japan: The Author, 1980.
- 8-33 Whetstone, G.A. "Artificial Recharge Through Tunnels."American Water well Association Journal 48 (11): 1444 (1956).
- 8-34 Aronson, D.A. "Artificial Recharge on Long Island, New York." Long Island Water Resources Bulletin No. 9, Nassau County Department of Public Works (1978).
- 8-35 Aronson, D.A. "The Meadowbrook Artificial Recharge Project in Nassau County, Long Island, NY." Long Island Water Resources Bulletin No. 14, Nassau County Department of Public Works (1980).
- 8-36 Watkins, F., Jr. "Effectiveness of Pilot Connector Well in Artificial Recharge of the Floridian Aquifer, Western Orange County, Florida." U.S. Geological Survey Water -Resources Investigations No.77-112 (1977).
- 8-37 U.S. Department of Agriculture. "Ground-Water Recharge." Soil Conservation Service Engineering Division Technical Release No.36 (1967).
- 8-38 Bianchi, W.C., Nightingale, H.L., and McCormick, R.L. "Fresno. California, Subsurface Drain Collector-Deep Well Recharge System." American Water Works Association Journal 70 (8): 427-435 (1978).

- 8-39 Horton, N.E. "The Drainage of Ponds into Drilled Wells." U.S. Geological Survey Water-Supply and Irrigation Paper No. 145, pp.30-39 (1905).
- 8-40 Pettyjohn, W.A. "Design and Construction of a Dual Recharge System in Minot, North Dakota." *Ground Water* 6(4):4-8 (1968).
- 8-41 Buchan, S. "The Problem of Ground-Water Recharge-Artificial Recharge as a Source of Water." *Institute of Water Engineers Journal* 18(3):239-246 (1994)
- 8-42 Reed, J.E., Deutsch, M., and Wutala, S.W. "Induced Recharge of an Artesian Glacial-Drift Aquifer at Kalamazoo, Michigan." U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No. 1594-D (1966).
- 8-43 Keller, G. "Grundwassersperran" [Ground-Water Barriers], *Die Bautechnik* 11(2): 270-272 (1933)
- 8-44 Ratnoparkhi, T.G. "Underground Bunds for Artificial Recharge." In: R.N. Athavale (Ed). *Proceedings of Indo-German Workshop*. Padmanagar. Secundcrabad, India: National Geophysical Research Institute, 1978. pp. 351-358.
- 8-45 Helweg, O.J., and Smith, G. "Appropriate Technology for Artificial Aquifers." *Ground Water* 16(3): 144-148 (1978)
- 8-46 Cehrs, D., Soenke, S., and Bianchi, W.C. "A Geologic Approach to Artificial Recharge Site Selection in the Fresno-Clovis Area, California." U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1604 (1979).
- 8-47 Vecchioli, J. "A Note on Bacterial Growth Around a Recharge Well at Bay Park, Long Island New York." *Water Resources Research* 6 (5): 1415 - 1419 (1970).
- 8-48 Prickett, T.A. "State-of-the-Art of Groundwater Modeling." *Water Supply and Management* 3:131-141 (1979).
- 8-49 Glover, R.E. "Ground-Water Movement." U.S. Bureau of Reclamation Engineering Monograph No.31 (1966).
- 8-50 Bear, J. *Hydraulics of Groundwater*. New York: McGraw-Hill, 1979. Chap.5.
- 8-51 Jacob, C.E. "Flow of Groundwater." In: H. Rouse (Ed). *Engineering Hydraulics Proc. 4 th Hydraulics Conference*. New York: Wiley, 1950. Chap. 5.
- 8-52 Lohman, S.W. "Ground-Water Hydraulics." U.S. Geological Survey Prof. Paper No. 708 (1972).



- 8-53 Jacob, C.E. "Determining the Permeability of Water-Table Aquifers," U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No. 1536-I, pp. 245-271 (1963).
- 8-54 Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H., and Stallman, R.W. "Theory of Aquifer Tests." U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No 1536-E, pp. 69-74 (1962).
- 8-55 Kazmann, R.G. "The Induced Infiltration of River Water to Wells." American Geophysical Union Transactions 29 (1):85-89 (1948).
- 8-56 Hantush, M.S., and Papadopoulos, L.S. "Flow of Ground-Water to Collector Wells." Proceedings of the American Society of Civil Engineers 88 (HY5). (1962).
- 8-57 Hantush, M.S. "Hydraulics of Wells." In: V. Chow (Ed). Advances in Hydrosience. Vol. 1. New York: Academic Press, 1964.
- 8-58 Glover, R.E., and Balmer, G.G. "River Depletion Resulting from Pumping a Well Near a River," American Geophysical Union Transactions 35 (3): 468-470 (1954).
- 8-59 Panikar, J.T., and Mathur, A.L. "Study of Groundwater Mounds Under Spreading Areas." In P. Sivalingam (Ed). International Symposium on Development of Ground Water Resources, pp.43-54 (1973).
- 8-60 Todd, D.K. "Distribution of Ground Water Beneath Artificial Recharge Areas." International Association of Scientific Hydrology Pub. 56. pp.254-262 (1961).
- 8-61 Dagan, G. "Linearized Solutions of Free-Surface Ground-Water Flow With Uniform Recharge," Journal of Geophysical Research 72 (4): 1183-1193 (1967).
- 8-62 Marino, M.A. "Growth and Decay of Ground -Water Mounds Induced by Percolation." Journal of Hydrology 22: 295-301 (1974).
- 8-63 Bittenger, M.W., and Trelease, F.J. "Development and Dissipation of a Ground-Water Mound." American Society of Agricultural Engineers Transactions 8 (1):103-104 (1965).
- 8-64 Hantush, M.S. "Growth and Decay of Ground-Water Mounds in Response to Uniform Percolation," Water Resources Research 3 (1):227-234 (1967).
- 8-65 Glover, R.E. "Mathematical Derivations as Pertain to Ground-Water Recharge." Agr. Res. service, U.S. Department of Agriculture Mimeograph, unpublished, 81 pp. (1961).
- 8-66 Hall, H.P. "An Investigation of Steady State Flow Toward a Gravity Well" La

Houille Blanch 10:8-35 (1955).

- 8-67 Lehr, J.H. "Relation of Shape of Artificial Recharge Pits to Infiltration Rate," American Water Works Association Journal 56 (6): 699 -702 (1964).
- 8-68 Santing, G. "A Horizontal Scale Model, Based on the Viscous Flow Analogy, for Studying Ground-Water Flow in Aquifers Having Storage." IASH General Assembly, pp. 105-114 (1951).
- 8-69 Davis, W.N., and DeWiest, R.j. Hydrogeology. New York: Wiley. 1966. Chap.7.
- 8-70 Dvoracek, M.J., and Scott, V.H. "Ground-Water Flow Characteristics Influenced by Recharge Pit Geometry." American Society of Agricultural Engineers Transactions 6(3):262-265,267 (1963).
- 8-71 Grodzensky, V.D. "Formation of Fresh Ground-Water Lenses as a Result of Percolation from Canals and Pits." International Association of Scientific Hydrology Pub. 72,pp. 360-364 (1967).
- 8-72 Gelzen, R.T. "Analog-Model Analysis of Regional Flow in the Ground-Water Reservoir of Long Island, New York." U.S. Geological Survey Professional Paper No.892 (1977).
- 8-73 Reilly, T.E., and Harbaugh. A.W. "A Comparison of Analog and Digital Modeling Techniques for Simulating Three-Dimensional Ground-Water Flow on Long Island, New York." U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations No. 80-14 (1980).
- 8-74 Bouwer, H. "Analyzing Ground- Water Mounds by Resistance Network." American Society of Civil Engineers Procedure, Irrigation. and Drainage Division Journal 88 (IR3):15-36 (1962).
- 8-75 Bouwer, H. "The Flow System Below a Water Spreading Basin." Fifth International Comm. Irrig. and Gong. Trans. Tokyo. Japan. v.6, question 8,pp. 89-106 (1963).
- 8-76 Faust, C.R., and Mercer, J.W. "Ground-Water Modeling: Numerical Models." Ground Water 18 (4): 385-409(1980).
- 8-77 Appel, C.A., and Bredehoeft, J.D."Status of Ground -Water Modeling in the U.S. Geological Survey." U.S. Geological Survey Circular 737 (1976).
- 8-78 Mc Donald, M.G., and Harbaugh, A.W. "A Modular Three-Dimensional

- Finite-Difference Ground-Water Flow Model," U.S. Geological Survey Open File Report No. 83-875 (1983).
- 8-79 Trescott, P.C. "Documentation of Finite-Difference Model for Simulation of Three-Dimensional Ground-Water Flow." U.S. Geological Survey Open-File Rept. No. 75-438 (1976).
- 8-80 Marino, M.A. "Artificial Ground-Water Recharge 1: Circular Recharging Area." *Journal of Hydrology* 25(3/4): 201-208 (1975).
- 8-81 Marino, M.A. "Artificial Ground-Water Recharge II: Rectangular Recharging Area." *Journal of Hydrology* 26 (1/2): 29-37 (1975).
- 8-82 Esmaili, H. "A Solution for Determination of Aquifer Characteristics and Unsteady Flow Through-Injection Wells by Numerical Methods." *Dissertation Abstracts* 27(11): 3923-B(1966).
- 8-83 Bouwer, H. "Field Measurements of Saturated Hydraulic Conductivity in Initially Unsaturated Soil." *Intern. Association of Scientific Hydrology Pub.* 72, pp. 243 -251 (1967).
- 8-84 Haskell, E.E., and Bianchi, W.C. "Development and Dissipation of Ground-Water Mounds Beneath Square Recharge Basins." *American Water Works Association Journal* 57 (3):349-353 (1965).
- 8-85 Kazmann, R.G. "An Introduction to Ground-Water Monitoring." *Monitoring Review* 1(1):28-31 (1981).
- 8-86 Heath, R.C. "Design of Ground-Water Level Observation-Well Programs." *Ground Water* 14(2):71-77 (1976).
- 8-87 Mandel, S., and Shiftan, Z.L. *Groundwater Investigation and Development*. New York: Academic Press, 1981. Chaps. 11 and 14.
- 8-88 Warner, D.L., and Lehr, J.H. "An Introduction to the Technology of Subsurface Wastewater Injection." *Ground water Research Branch, U.S. Environmental Protection Agency, Report No. 600/2-77-240*(1977).
- 8-89 Todd, D.K., Tinlin, R.M., Schmidt, K.D., and Everette, L.G. "Monitoring Ground-Water Quality; Monitoring Methodology." U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 1976.

- 8-90 Bower, H., Rice, R.C., Lance, J.C., and Gilbert, R.G. "Renovation of Sewage Effluent With Rapid-Infiltration Land-Treatment System," In: T. Asano and P.V. Roberts (Eds). Wastewater Reuse for Groundwater Recharge Symposium, Symposium Proceedings, Pomona, CA PP. 265-282. California State Water Resources Control Board, Sacramento (1980).
- 8-91 Bower, H. "Protecting the Quality of Our Ground Water: What we Can Do." Ground Water Monitoring Review 1 (2):22-26(1981).
- 8-92 Bastian, R.K."Monitoring Requirements for Land Treatment Systems." State of Knowledge in Land Treatment of Wastewater, Symposium Proceeding. Vol. 1, pp. 347-354 (1978).
- 8-93 Bauer, J.W. "A Prototype Program for Monitoring Domestic Wastewater Land Treatment Systems." State of Knowledge in Land Treatment of Waste water, Symposium Proceedings. Vol.2, pp. 317-321 (1978).
- 8-94 Schuller, R.,M., Gibb, J.P., and Griffin, R.A. "Recommended Sampling Procedures for Monitoring Wells," Ground Water Monitoring Review 1 (1): 42-46 (1981).
- 8-95 Scalf, M.R., Mcknabb, J.F., Dunlap, W.J., Grosby, R.L., and Fryberger, J.S. Manual of Ground Water Sampling Procedures. Worthington, OH: National Well Water Association, 1981.
- 8-96 U.S. Geological Survey, Office of Water Data Coordination, "National Handbook of Recommended Methods for Water-Data Acquisition." Washington, D.C.: The Author, 1977.
- 8-97 Katz, B.G. and Mallard, G.E. "Chemical and Microbiological Monitoring of a Sole Source, Aquifer Intended for Artificial Recharge, Nassau County, New York." In: W.J. Cooper (Ed). Chemistry in Water Reuse. Vol.1.ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers, 1981. Chap.7.
- 8-98 Roberts, P.V., Schreiner, J., and Hopkins, G.D. "Field Study of Organic Water Quality Changes During Ground-Water Recharge in the Palo Alto Baylands." In: T. Asano and P.V. Roberts (Eds). Wastewater Reuse for Ground Water Recharge, Symposium Proceedings, Pomona, CA, pp. 283-316. California State Water Resources Control Board, Sacramento (1980).

- 8-99 Bower, H., Lance. C.L., and riggs, M.S. "High Rate Land Treatment II. Water Quality and Economic Aspects of the Flushing Meadow Project." *Journal of the Water Pollution Control Fed.* 46(5):844 (1974).
- 8-100 Idelovitch, E., Terkeltoub, R., and Michail, M. "The Role of Groundwater Recharge in Wastewater Reuse: The Dan Region Project, Israel." In: T.Asano and P.V. Roberts (Eds). *Wastewater Reuse for Groundwater Recharge, Symposium Proceedings, Pomona, CA, PP. 146-178. California State Water Resources Control Board, Sacramento (1980).*
- 8-101 Dryden. F.D., and Chen, C. "Groundwater Recharge with Reclaimed Waters from the Pomona, San Jose Creek, and Whitter Narrows Plants." *State of Knowledge in Land Treatment of Wastewater, Symposium Proceedings. Vol.1.pp.241-251(1978).*
- 8-102 Garrison, W.E., Nellor, M.H., and Baird, R.B. "A Study on the Health Aspects of Groundwater Recharge in Southern California." In: Asano and P.V. Roberts (Eds). *Wastewater Reuse for Groundwater Recharge, Symposium Proceedings, Pomona, CA, pp.217-254. California State Water Resources Control Board, Sacramento (1980).*