

کاربرد مدل ریاضی در تخمین ذخیره آب قنوات

حسن احمدی* - عبدالرحیم ذوالانوار**

مقدمه

ایران بدلیل وضع جغرافیائی خاص خود جزو مناطق خشک یا نیمه خشک جهان محسوب می‌شود. توزیع زمانی بارندگی طوری است که بیش از پنجاه درصد از نزولات جوی فقط در سه ماه زمستان به زمین می‌رسد و در فصل تابستان که گیاهان احتیاج بیشتری به آب دارند مقدار بارندگی بجز در حاشیه دریای خزر ناچیز و یا صفر است. ایرانیان از زمانهای قدیم جهت آبیاری مزارع خود شروع به بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی نموده و چاههای افقی به نام قنات حفر کرده‌اند که بکمک آنها مقداری از آبهای زیرزمینی توسط نیروی ثقل تا سطح زمین پائین دست، هدایت می‌شود [۱].

جریان آب قناتها معمولا "دائمی بوده و تقریبا" غیر قابل کنترل است. در فصل زمستان که احتیاج به آب آبیاری نیست قسمت اعظم آب بدون آنکه استفاده قابل توجهی از آن بعمل آید با تبخیر و نفوذ از دسترس خارج می‌شوند. مقداری از آن هم بعد از نفوذ در دشتها دو مرتبه به آبهای زیرزمینی می‌پیوندد. از آنجائیکه بافت رسوبات در مرکز دشتها معمولا "ریزدانه است، لذا حرکت این آبها بسیار کند می‌باشد. در نتیجه مقدار زیادی از نمکهای موجود در رسوبات در آب نفوذی حل شده و آب را غیر قابل استفاده می‌نمایند. می‌توان نتیجه گرفت که احتمالا" قسمت اعظم آب قناتها

* کارشناس هیدرولیک شرکت مهندسی مشاور - تهران سهاب
** استادیار دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

در فصل غیرآبیاری به هدر می‌رود.

اکثر قریب به اتفاق قنات‌های ایران در دامنه مخروط افکنه‌هایی که در حاشیه دشتهای ایران بطور فراوان یافت می‌شود حفر گردیده‌اند. این مخروط افکنه‌ها در راس دارای رسوبات دانه درشت بوده به طرف دشت از قطر دانه‌ها کاسته می‌شود، طبیعتاً "سرعت نفوذ و سرعت حرکت آبهای زیرزمینی در این مخروط افکنه‌ها از راس مخروط افکنه بطرف دشت دائماً کم می‌شود بطوری که ۰/۸ تا ۰/۹ نزولات جوی که بصورت جریانهای سطحی از کوهستان از طریق مخروط افکنه‌ها بطرف دشتهای جریان پیدا می‌کنند در عرض چند کیلومتر اول به داخل مخروط افکنه نفوذ کرده و به آبخوان داخل مخروط افکنه اضافه می‌شوند.

با توجه به بافت مخروط افکنه‌های حاشیه دشتهای، سطح سفره آب زیرزمینی در قسمت‌های بالادست این مخروط افکنه‌ها دارای شیبی نسبتاً تند و در قسمت‌های پائین دست دارای شیبی نسبتاً کم و در مرکز دشتهای سطح سفره تقریباً افقی و دارای حداقل سرعت می‌باشد.

تعداد و دبی متوسط قنات‌های ایران

طبق آخرین آمار منتشر شده توسط وزارت نیرو تعداد قنات‌های دایر در ایران بالغ بر ۲۱۵۰۰ رشته می‌باشد که در سال ۱۶۳۲ در حدود ۸۰۱۴ میلیون مترمکعب آبدهی داشته‌اند [۲ و ۳]. در حدود $\frac{1}{4}$ این آب در فصل غیرآبیاری جاری است که اکثراً بدون بازدهی از دسترس خارج می‌شود و فقط مقدار کمی از آن از طریق نفوذ مجدد در مرکز دشتهای به ذخائر زیرزمینی می‌پیوندد احتمالاً این مقدار هم بعلت شوری غیر قابل استفاده خواهد بود. البته لازم به یادآوری است که در فصل غیرآبیاری دبی قنات‌ها عموماً "بیشتر از متوسط دبی سالانه اندازه‌گیری شده

است .

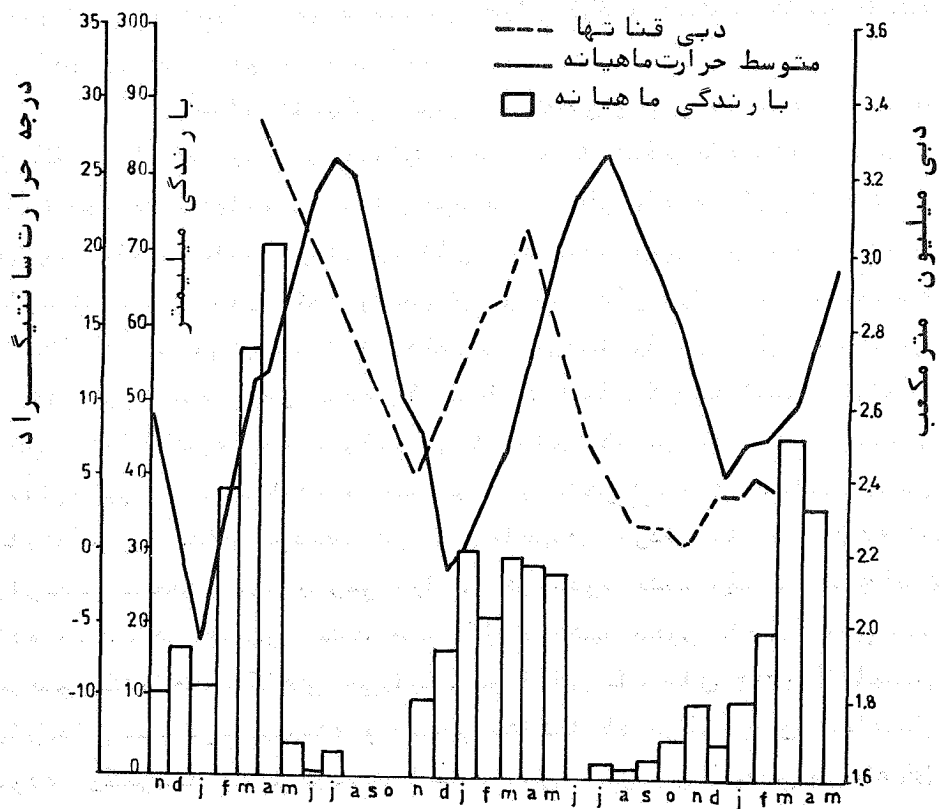
تغییر دبی قنات‌ها در فصول مختلف سال

در ناحیه مشهد ۲۴ قنات در سالهای ۱۳۴۳ و ۱۳۴۴ از طرف وزارت نیرو دقیقاً مورد بررسی قرار گرفته است . نتایج حاصله از این بررسی بصورت زیر است :

رابطه بسیار نزدیکی بین بارندگی و دبی مشاهده می‌شود (شکل ۱ رابطه بین دبی قنات‌ها ، متوسط بارندگی ماهیانه و متوسط درجه حرارت ماهیانه را نشان می‌دهد) . بطوریکه در این شکل دیده می‌شود ، مقدار بارندگی در زمستان کم بوده ولی در سه ماهه بهار بارندگی بسیار شدید شده و پس از آن بارندگی برای مدت یک ماه کاملاً متوقف می‌گردد . اندازه‌گیری دبی قنات‌ها از اول بهار سال ۱۳۴۳ شروع شده و هر ماه یک برداشت انجام گرفته است . اولین دبی اندازه‌گیری شده بزرگترین عددی است که در مدت دو سال اندازه‌گیری بدست آمده و همچنین در ماهی است که بیشترین بارندگی را نشان می‌دهد . در طول ماههای خرداد تا مهر ۱۳۴۳ کل بارندگی منطقه مورد بررسی ، رقمی در حدود هشت میلیمتر اندازه‌گیری شده است . در همین مدت دبی کل قنات‌ها بطور فاحش ، ولی با سرعتی یکنواخت ، کاهش می‌یابد . در آبان ماه سال ۱۳۴۳ اولین بارندگی به وقوع پیوسته و آبدهی قنات‌ها که در آن زمان حداقل بوده یکمرتبه زیاد گردیده است . این افزایش آبدهی در ماههای آذر و دی نیز ادامه می‌یابد . در این مدت مقدار بارندگی کل هر ماه نیز افزایش پیدا می‌کند . کاهش مقدار کل بارندگی در ماه بهمن در ارقام دبی بصورت کاهش میزان افزایش قنات ، منعکس شده است .

ماکزیمم دبی قنات در اواخر اسفند ماه و اوائل فروردین ماه مشاهده می‌شود و پس از آن با سرعتی یکنواخت کاهش می‌یابد .

دبی قناتهای اطراف مشهد



شکل ۱- ارتباط مابین متوسط بارندگی و درجه حرارت ماهیانه و دبی قناتها

می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که رابطه نزدیکی بین بارندگی و دبی قناتهای مورد بررسی وجود دارد. اضافه بر این مشاهده می‌شود نزولات جوی در این منطقه که دارای رسوبات آبرفتی می‌باشد سریعاً نفوذ کرده و به آبهای زیرزمینی می‌پیوندد. بطوریکه که قبلاً هم بدان اشاره شد از آنجائیکه اکثر قریب به اتفاق قناتهای ایران درحاشیه دشتهای آبرفتی و در دامنه مخروط افکنه‌ها قرار دارند این نتیجه‌گیری می‌تواند احتمالاً برای اکثر قناتهای ایران صادق باشد.

طول قسمت آبدۀ قناتها در ایران

بطور کلی طول قناتها و طول قسمت آبدۀ آنها با شیب زمین و شیب سفره آب زیرزمینی رابطه معکوس دارد. هرچه شیب زمین و شیب سفره آب زیرزمینی تندتر باشد، طول قنات و طول قسمت آبدۀ کمتر و برعکس هرچه شیب زمین کمتر باشد طول قنات و طول قسمت آبدۀ بیشتر خواهد بود. طبق مطالعات پیتربومات در سال ۱۹۶۸ [۴]، طول قسمت آبدۀ قناتهای ایران را می‌توان بطور تقریب بین ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ متر تخمین زد (اطلاعات عمومی در مورد قناتهای ایران در مراجع [۵ تا ۸] داده شده‌اند).

سرعت حرکت آبهای زیرزمینی در دامنه مخروط افکنه‌ها

طبق اندازه‌گیری‌هایی که در چندین نقطه اطراف قناتهای استان اصفهان و یزد انجام شده [۹ و ۱۰] ضریب نفوذ پذیری (K) بطور متوسط در قسمت خشک قناتها (تقریباً) در انتهای قسمت آبدۀ (رقمی در حدود 10^{-4} m/d) است. شیب سفره در نقاط اندازه‌گیری شده بطور متوسط $1/1000$ تا $1/1500$ بوده است. سرعت آبهای زیرزمینی در این نقاط طبق فرمول دارسی (Darcy) معادل $0/17$ تا $2/592$ متر در ماه است البته هرچه بطرف مرکز

دشتها نزدیکتر شویم سرعت آبهای زیرزمینی بعلت افت شیب و ریزدانه شدن بافت زمین کمتر خواهد شد، بطوریکه در مرکز دشتها آبهای زیرزمینی تقریباً "بدون حرکت بوده و سرعت آنها به صفر نزدیک می‌شود [۱۱ و ۱۲]."

کنترل جریان آب قنات

هدف از کنترل جریان آب قنات ابداع روشی است که با استفاده از آن بتوان جلوی به هدر رفتن آب قناتها را در فصول غیر آبیاری بطریقی گرفت که لطمه‌ای به قنات وارد نشود و در ضمن مقدار قابل ملاحظه‌ای آب که بدون کنترل از ذخائر زیرزمینی برداشت می‌شود تحت کنترل قرار گیرد.

بسیاری بر این عقیده‌اند که آب جاری قناتها غیر قابل کنترل بوده و چنانچه بهرطریقی جلوی جریان آب قنات گرفته شود این آب پس از پیمودن مسافتی به آبهای شور مرکز کویرها و یا دشتها میپیوندد و یا بصورت زه آب در نقاط پست نفوذ کرده و از دسترس خارج می‌شود. این نظریه البته تا زمانی صحت داشت که حداقل تعداد ۱۱۵۸۶۳ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق مجاز پمپاژ شونده با تخلیه سالانه حدود ۲۲۴۰۹ میلیون مترمکعب در ایران مورد بهره‌برداری قرار نگرفته بود. امروزه برداشت بیش از اندازه از آبهای زیرزمینی در بسیاری از نقاط کشور بویژه دشت یزد، کرمان، مشهد و اطراف اصفهان و... باعث پائین افتادن سطح آبهای زیرزمینی در سالهای اخیر شده است. در نتیجه مقدار آبی که در اثر کنترل آب قنات از ذخائر زیرزمینی برداشت نشود، با سرعتی که قبلاً ذکر شد بطرف مرکز دشتها جریان یافته و می‌تواند در ایجاد تعادل بیلان آبهای زیرزمینی کمک نماید.

صاحب نظران جهت صرفه‌جویی در آب قنات روشهایی از

قبیل استفاده از مازاد آب قنات در سالهای پر آب و یا در فصول غیر آبیاری جهت تغذیه مصنوعی و یا پر کردن آب انبارها از آب قنات، ساختن تالابها (برکه‌ها)، ساخت یخچالها و یخ زدن قسمتی از آب قنات و غیره را پیشنهاد کرده‌اند، که انجام این روشها مستلزم صرف هزینه‌های زیاد بوده و بازدهی آنها بطور متوسط چیزی در حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد بیشتر نمی‌باشد.

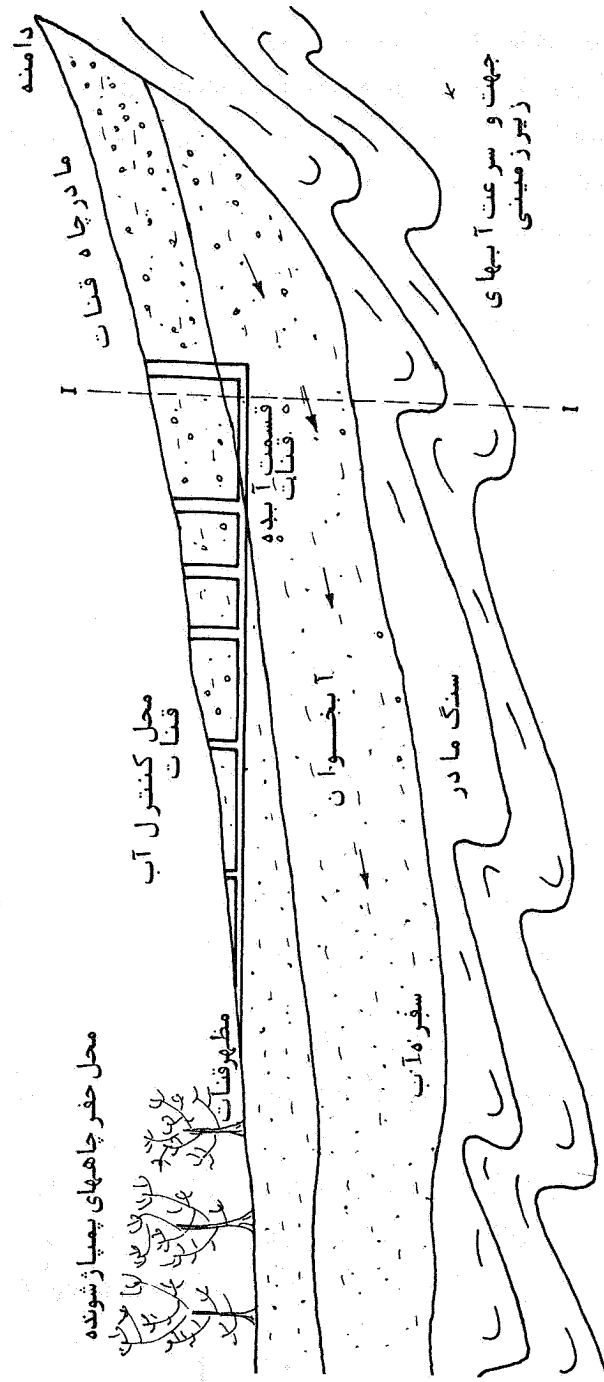
در این مقاله روشی خاص برای کنترل آب قنات مورد بررسی قرار می‌گیرد. احتمال دارد که این روش قبلا پیشنهاد شده و در مورد آن مطالعاتی صورت گرفته باشد ولی ما موفق نشدیم به هیچ گونه مدرک یا اطلاعی در این زمینه دسترسی پیدا کنیم. اساس این روش مبتنی بر ساختن یک قسمت بتونی در انتهای قسمت آبد و کار گذاشتن یک دریچه کشویی (Slide Gate) و یا یک دریچه پروانه‌ای (Butter-fly Valve) در مجرای قنات می‌باشد تا بتوان با بستن این دریچه در فصل غیر آبیاری آب قنات یا حداقل قسمتی از آن را در همان آبخوان قنات تغذیه نمود. این دریچه باید زیریکی از میله‌های قنات بوده و از سطح زمین قابل کنترل باشد (شکل ۲).

در نگرش اول سه مسئله عمده در استفاده از این روش به چشم می‌خورد که عبارتند از:

– اشکالات اجرائی نصب تعمیر و مانور این دریچه و طول عمر مفید آن.

– پیش‌بینی‌های لازم جهت جلوگیری از ریزشهای احتمالی مجرا، مادرچاه و میله با میله‌های قنات بوسیله سنگ‌چین یا کول گذاری مشبک و یا ...

– امکان فیزیکی ذخیره آب در آبخوان قنات با توجه به اینکه سفره آب زیرزمینی معمولا "دارای شیب اسلپینگ" (Sloping Aquifer) .



شکل ۲ - یک روش برای کنترل آب فئات

بررسیهای بیشتر می‌تواند امکان پذیر بودن یا نبودن روش پیشنهاد شده را در عمل نشان دهد. این احتمال وجود دارد که این روش اگر بتوان بر مشکلات آن فائق آمد روشی بسیار ساده و کم خرج باشد. البته باید اذعان نمود که مشکلات تئوریک و اجرائی در بررسی مسئله و کاربرد روش اجازه اظهار نظر خوشبینانه را نمی‌دهد.

طبیعی است که امکان فیزیکی ذخیره آب قنات در سفره آبدۀ آن باید قبل از همه بررسی شود چه در صورت امکان پذیر نبودن این عمل در مسئله منتفی خواهد گردید. در صورتیکه بررسی تئوریک مسئله، ذخیره کردن آب را امکان پذیر نشان دهد باید نتایج بررسی تئوریک با آزمایش مدل هیدرولیک تأیید شود. آنگاه می‌توان روشهای اجرائی نصب دریچه و حفاظت قنات را از بالا آمدن سطح سفره آبدۀ مطالعه نمود. تمامی این موارد در حوصله یک مقاله نمی‌گنجد و بعلاوه روشهای اجرائی کار هنوز بدقت مطالعه نگردیده‌اند. آنچه که بعد از این خواهد آمد عمدتاً "مسائل تئوریک مربوط به چگونگی ذخیره آب در سفره آبدۀ قنات می‌باشد.

مسئله تغذیه سفره آبدۀ قنات اصولاً یک مسئله سه بعدی است در صورتیکه شیب لایه آبدۀ صفر یا بسیار کم باشد می‌توان مسئله را در حالت دو بعدی در نظر گرفت. اما در اغلب موارد شیب لایه آبدۀ قابل ملاحظه است و لذا مراجعه به حالت سه بعدی اجتناب ناپذیر است [۱۳].

در قسمتهای بعدی ابتدا حالت دو بعدی مسئله در حالت پایدار (Steady) در نظر گرفته می‌شود. این حالت مربوط به رژیم عادی عبور جریان از مجرای قنات است. سپس حالت دو بعدی ولی ناپایدار (Unsteady) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این حالت مربوط به رژیم جریان در فصل غیرآبیاری یعنی

بسته شدن مجرای قنات با دریچه می‌باشد. آنگاه بحث مختصری در حالت سه بعدی مسئله در حالت پایدار و نیز ناپایدار (متناظر با مجرای باز قنات و مجرای بسته قنات) بعمل خواهد آمد و در خاتمه خطوط کلی مدل هیدرولیک دو بعدی برای تائید جوابهای تحلیلی تشریح می‌گردد.

تعیین پروفیل سطح سفره آب زیرزمینی در مجاورت مجرای قنات (حالت باز)

تعیین پروفیل سطح سفره آب زیرزمینی در مجاورت مجاری قنات بروش تحلیلی فقط با فرض دو بعدی بودن مسئله امکان پذیر است. بدین ترتیب که صفحه‌ای قائم را در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که این صفحه عمود بر امتداد مجرای قنات است. همچنین فرض می‌کنیم که حرکت کلیه ذرات آب واقع در هر امتداد عمود بر این صفحه کاملاً مشابه حرکت ذره آب واقع روی این صفحه و خط مزبور می‌باشد. با این فرض حرکت آب در صفحه فوق معرف حرکت آب در تمام صفحات قائم موازی با این صفحه خواهد بود. بدیهی است مولفه‌های سرعت ذرات آب روی این صفحه واقع شده و مقدار این مولفه‌ها تابعی از موقعیت ذرات روی صفحه خواهد بود.

با فرض یکنواخت بودن خاک (Homogeneous) و یکسان بودن هدایت هیدرولیکی آن در جهات مختلف (Isotropic) معادلات اساسی جریان دو بعدی آب در خاک بصورت زیر بیان می‌شوند:

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad , \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (1)$$

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad , \quad v_y = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2)$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (۳)$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (۴)$$

$$\phi = -kh = k (y - p/\gamma) \quad (۵)$$

در این معادلات: x و y محورهای مختصات در صفحه جریان، V_x و V_y مولفه‌های سرعت هر ذره در جهات x و y ، k ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، p فشار آب در هر نقطه معین، γ وزن مخصوص آب، h ارتفاع معادل فشار، ϕ پتانسیل سرعت (Velocity Potential) و بالاخره ψ تابع جریان (Stream Function) می‌باشد. معادلات (۴) و (۵) نشان می‌دهند که توابع ϕ و ψ در محدوده جریان، هارمونیک (Harmonic) هستند.

از آنجائیکه در تعیین پروفیل سطح سفره آب زیرزمینی در مجاورت مجرای قنات، از توابع مختلط (Complex) استفاده خواهد گردید لذا یادآوری پاره‌ای تعاریف در این زمینه ضروری است. متغیر مختلط $z = x + iy$ محدوده جریان (Domain) را در صفحه اعداد مختلط نشان می‌دهد. پتانسیل مختلط ω (Complex Potential) نیز بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\omega = \phi + i\psi \quad (۶)$$

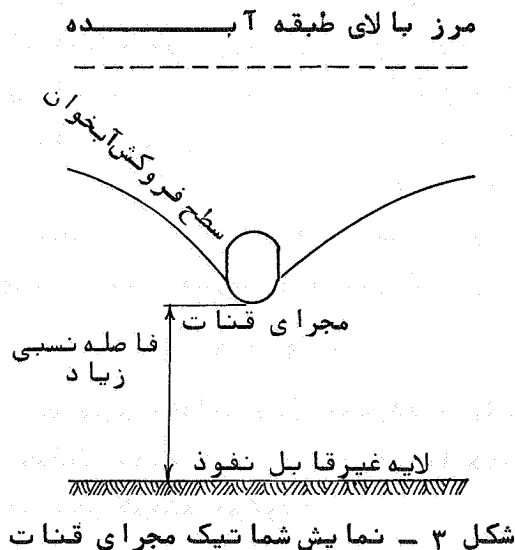
می‌توان نشان داد که تابع مختلط ω در محدوده جریان تحلیلی است [۱۴]. پتانسیل مختلط ساده شده ω_r (Reduced Complex Potential) نیز بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\omega_r = \frac{\omega}{k} = \phi + i\psi_r = \frac{\phi}{k} + i \frac{\psi}{k}, \quad \frac{\phi}{k} = -h \quad (۶)$$

بدیهی است تابع ω_i نیز در محدوده جریان تحلیلی می‌باشد و بالاخره تابع تحلیلی ژوکوفسکی ω_j (Zhukovskii) که بصورت زیر تعریف می‌شود :

$$\begin{aligned}\omega_j &= z - i \omega_r = v_j + iv_j \\ &= (x + \psi_r) + i(y - \phi_r)\end{aligned}\quad (7)$$

شکل ۴ را در نظر می‌گیریم . این شکل نشان دهنده جریان در صفحه‌ای عمود بر مجرای قنات می‌باشد (مقطع I-I در شکل ۲) . فرض می‌کنیم که طبقه غیر قابل نفوذ خاک در مسافت بعیندی زیر مجرای قنات قرار دارد . برای تعیین معادله سطح سفره آب زیرزمینی ، استفاده از روش واریانت دوم هودوگراف سرعت ، (Hodograph Method)



شکل ۳ - نمایش شماتیک مجرای قنات

مناسب است. فشار آب در طول سطح سفره آب زیرزمینی برابر فشار اتمسفر است و همچنین سرعت v_j در طول این منحنی برابر صفر است. با توجه به شکل ۴ داریم:

$$u_j = 0 \quad \text{در نقطه (۱)}$$

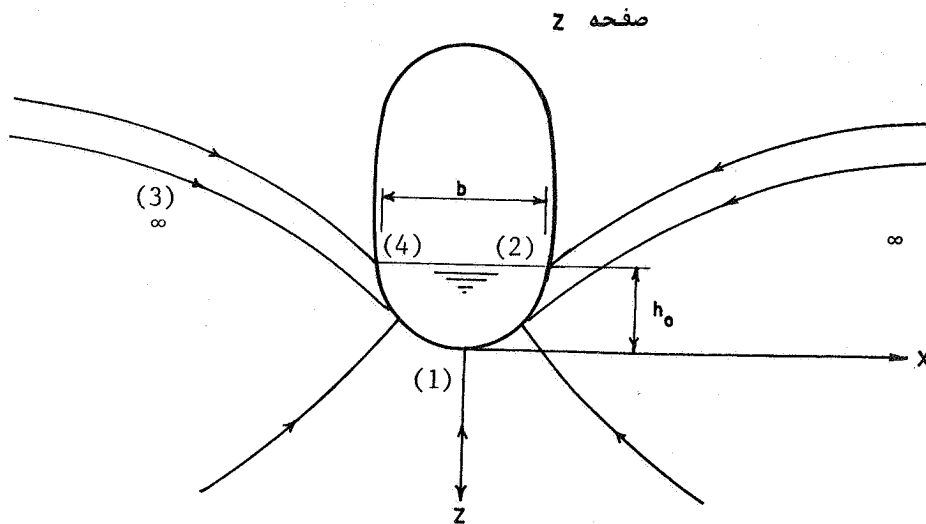
$$u_j = 0.5(b + q_r) \quad \text{در نقطه (۲)}$$

$$u_j = -0.5(b + q_r) \quad \text{در نقطه (۳)}$$

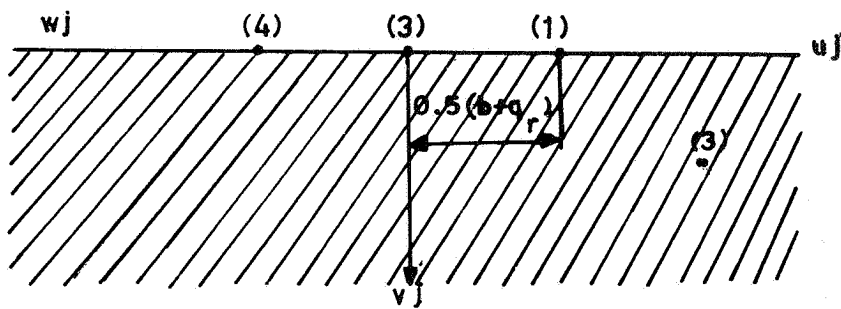
$$u_j = \pm \infty \quad \text{در نقطه (۴)}$$

در این روابط b عوض مجرا و q_r تخلیه ساده شده مجرای قنات است. یعنی $q_r = \frac{q}{k}$ که q مقدار نفوذ آب به مجرا در واحد طول آن می‌باشد. (واحد زمان / واحد طول / واحد حجم). محدوده تابع ژوکوفسکی در سیستم مختصات w_j بصورت نیم صفحه زیرین مطابق شکل ۵ خواهد بود. حال هودوگراف سرعت را در مرزهای محدوده جریان تعیین می‌کنیم. در امتداد سطح سفره آب زیرزمینی واقع در سمت چپ مجرای قنات از نقطه (۳) تا نقطه (۴) زاویه منحنی با محور X از صفر شروع و به حداکثر مقدار خود در نقطه (۴) می‌رسد. لذا می‌توان گفت که هودوگراف سرعت در این شاخه بصورت قوس دایره (۳)(۴) به شعاع $\frac{k}{2}$ و به مرکز مختصات $(0, \frac{k}{2})$ است (شکل ۶). هودوگراف سرعت برای شاخه سمت راست سطح سفره آبخوان بصورت قوس (۲)(۳) است. که امتداد قوس (۳)(۴) می‌باشد. بعلاوه فرض می‌کنیم که هودوگراف سرعت برای کف مجرای قنات بصورت قوس (۴)(۱)(۲) است و مرکز آن طوری قرار دارد که این قوس به قوس (۳)(۴)(۲) عمود است. بعداً خواهیم دید که این فرض با تقریب کافی، صحیح می‌باشد. محدوده هودوگراف سرعت برای قسمت‌های دیگر، بصورت سطح هاشور خورده در شکل ۶ نشان داده می‌شود. تبدیل (Transformation) صفحه بعد را در نظر می‌گیریم:

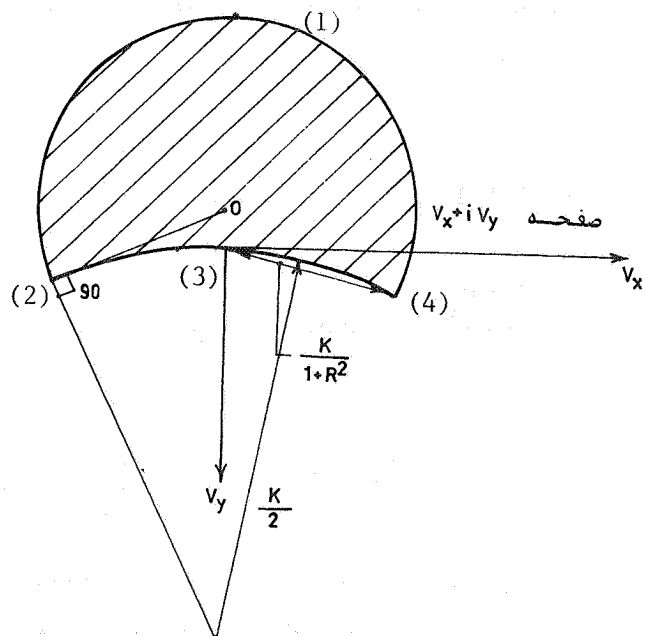
$$\omega = \frac{ki}{v_x - iv_y} + 1 = 1 + i \frac{dz}{d\omega_r} \quad (۸)$$



شکل ۴ - جریان در صفحه عمود بر مجرای قنات



شکل ۵ - محدوده تابع ژوکوفسکی



شکل ۶- هودوگراف سرعت

سطح هودوگراف سرعت ، با بکار بردن این تبدیل ، به نیم صفحه راست منهای یک قسمت دایره‌ای در صفحه ω تبدیل می‌گردد (شکل ۷). در حقیقت تابع بصورت زیر تعریف شده است :

$$z = \int \left(1 - \frac{1}{\omega} \right) d\omega_j \quad (9)$$

با در نظر گرفتن مقدار ω یعنی :

$$\omega = -iR \left(\frac{2\omega_j}{b+q_r} + \sqrt{\left(\frac{2\omega_j}{b+q_r} \right)^2 - 1} \right) \quad (10)$$

و قرار دادن آن در رابطه (۱) و رعایت شرط $\omega_j = 0$ و $Z = 0$ خواهیم داشت :

$$z = \omega_j - A \left[i \omega_j^2 + \omega_j \sqrt{\left(\frac{b+q_r}{2}\right)^2 - \omega_j^2} + \left(\frac{b+q_r}{2}\right)^2 \arcsin \frac{2\omega_j}{b+q_r} \right] \quad (11)$$

در این رابطه $A = \frac{1}{(b+q_r)R}$ یک عدد ثابت مثبت است که

مقدار آن از مشخصات نقطه (۲) یعنی $\omega_j = 0.5(b+q_r)$ و $z = 0.5b - ih$ تعیین می‌گردد. با محاسبه مقدار A و با در نظر

گرفتن $h_0 = \frac{1^0}{\pi} q_r$ خواهیم داشت (h_0 عمق آب مجرا) :

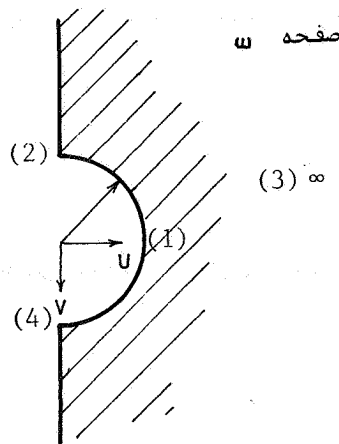
$$z = \omega_j - \frac{1}{\pi} q_r \left[i \left(\frac{2\omega_j}{b+q_r}\right) + \frac{2\omega_j}{b+q_r} \sqrt{1 - \left(\frac{2\omega_j}{b+q_r}\right)^2} + \arcsin \frac{2\omega_j}{b+q_r} \right] \quad (12)$$

رابطه (۲) پتانسیل مختلط ساده شده ω_r را تعیین می‌کند. در بررسی فوق برای هودوگراف سرعت در کف مجرای قنات قوس دایره (۴)(۱)(۲) در نظر گرفته شد. حال ببینیم به ازاء چه شکلی از پروفیل کف مجرا این فرض صحیح است. در طول

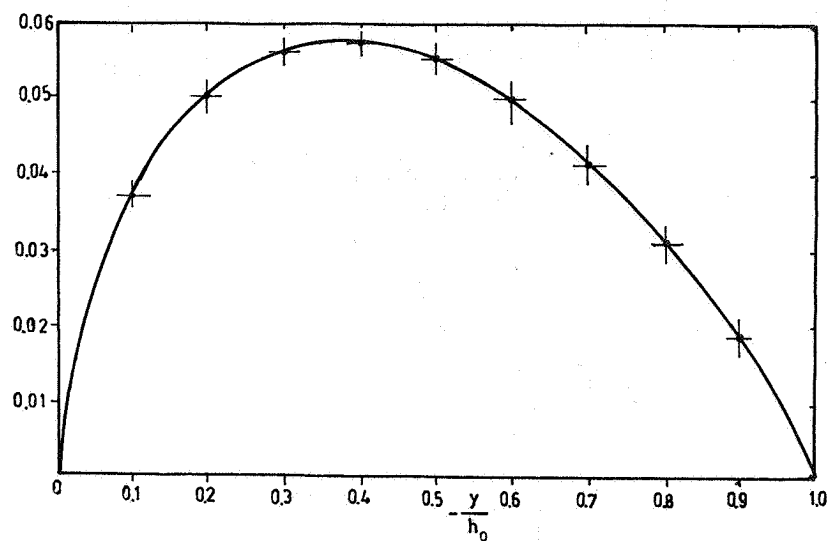
کف مجرا رابطه $\omega_j = x + \psi_r$ برای $-0.5(b + q_r) < x < 0.5(b + q_r)$ برقرار است. اگر در رابطه (۱۲) قسمتهای حقیقی و مجازی از هم جدا کردند خواهیم داشت:

$$x = x + \psi_r - \frac{q_r}{\pi} \left[2 \frac{x + \psi_r}{b + q_r} \sqrt{1 - \left(\frac{2x + 2\psi_r}{b + q_r} \right)^2} + \text{arc Sin} \frac{2x + 2\psi_r}{b + q_r} \right] \quad (13)$$

$$y = - \frac{q_r}{\pi} \left(\frac{2x + 2\psi_r}{b + q_r} \right)^2$$



شکل ۷ - نگاشت هودوگراف سرعت در صفحه ω



شکل ۸ - تغییرات عبارت دوم معادله ۱۴ بر حسب y/h_0

با حذف جمله $\frac{2x + 2\Psi_r}{b + q_r}$ از این دو معادله می‌توان منحنی

پروفیل کف مجرا را بدست آورد. این پروفیل نسبت به محور y متقارن است و معادله قسمت واقع در سمت راست محور به صورت زیر خواهد بود:

$$x = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{-y}{h_0}} - q_r \left[\sqrt{-\frac{y}{h_0}} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sqrt{1 + \frac{y}{h_0}} \right) + \frac{1}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{-y}{h_0}} \right], \quad h_0 < y < 0 \quad (14)$$

تغییرات جمله دوم سمت راست رابطه فوق بر حسب مقادیر مختلف $0 \leq -y/h_0 \leq 1$ در شکل ۸ رسم گردیده است. مشاهده می‌شود که این جمله اصولاً ناچیز بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. در نتیجه معادله پروفیل کف مجرای قنات در سمت راست محور y بصورت $-y = -4h_0 X^2/b^2$ در می‌آید که یک سهمی است. با توجه به شکل بیضی‌کول، این فرض کم و بیش صادق است. می‌توان معادله سطح سفره آب را در نیمه راست محور y با استفاده از رابطه $\omega_j = X + 0.5q_r$ و $0.5b < X < \infty$ و قرار دادن آن در معادله (۱۲) بدست آورد. نتیجه نهائی بصورت زیر خواهد بود:

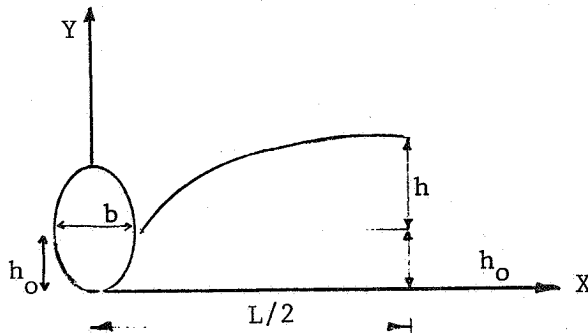
$$y = -h_0 - \frac{q_r}{\pi} \left\{ \sqrt{\frac{2x+q_r}{b+q_r}} - 1 \left[\sqrt{\left(\frac{2x+q_r}{b+q_r}\right)^2 - 1} - \frac{2x+q_r}{b+q_r} \right] + \operatorname{arc} \operatorname{Cosh} \frac{2x+q_r}{b+q_r} \right\} \quad (15)$$

$$0.5b \leq X \leq \infty$$

برای رسم منحنی پروفیل سطح سفره آب متغیرهای بی‌بعد η و ξ را بصورت زیر تعریف کرده و جهت محور y را عوض می‌کنیم (شکل ۹):

$$\eta = \frac{y}{h_0}$$

$$\xi = \frac{2x + q_r}{b + q_r} \quad \text{و} \quad (q_r = \pi h_0)$$



شکل ۹- روش رسم منحنی پروفیل سطح سفره آب

معادله (۱۵) بصورت زیر خواهد بود:

$$\eta = \xi^2 - \xi \sqrt{\xi^2 - 1} + \text{arc Cosh } \xi \quad (16)$$

منحنی تغییرات η بر حسب $\log \xi$ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بجانب به این منحنی دارای معادله‌ای بصورت:

$$\eta = 0.5 + \ln 2 + \ln \xi \quad (17)$$

می‌باشد که برای مقادیر بزرگ ξ می‌توان با تقریب از آن استفاده

نمود .

در روابط فوق مقدار q_r مجهول است ولی می‌توان از شرایط یک نقطه روی سطح سفره آب، آن را تعیین نمود. فرض می‌کنیم عرض سفره آب زیرزمینی (محدوده اثر قنات) برابر L (شکل ۹) و ارتفاع سطح سفره از سطح آب در مجرا برابر h باشد. در این صورت نقطه مختصات $L/2$ و $h+h_0$ روی سطح سفره قرار خواهد گرفت. این

$$\text{نقطه در سیستم مختصات } \eta \text{ و } \xi \text{ بصورت } \eta = 1 + \frac{h}{h_0} \text{ و } \xi = \frac{L+q_r}{b+q_r}$$

بیان می‌گردد. همچنین این نقطه بحد کافی از محور بدور است لذا می‌توان معادله جانب (۱۷) را بکار برد. از این شرط، نتیجه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\frac{L}{h} + \frac{q_r}{h}}{\frac{b}{h} + \frac{q_r}{h}} = \frac{\sqrt{e}}{2} e^{\frac{\pi}{(q_r/h)}} \quad (18)$$

بایبوردی معادله کلی زیر را [۱۳] برای جریان بداخل مجرای قنات در نظر می‌گیرد:

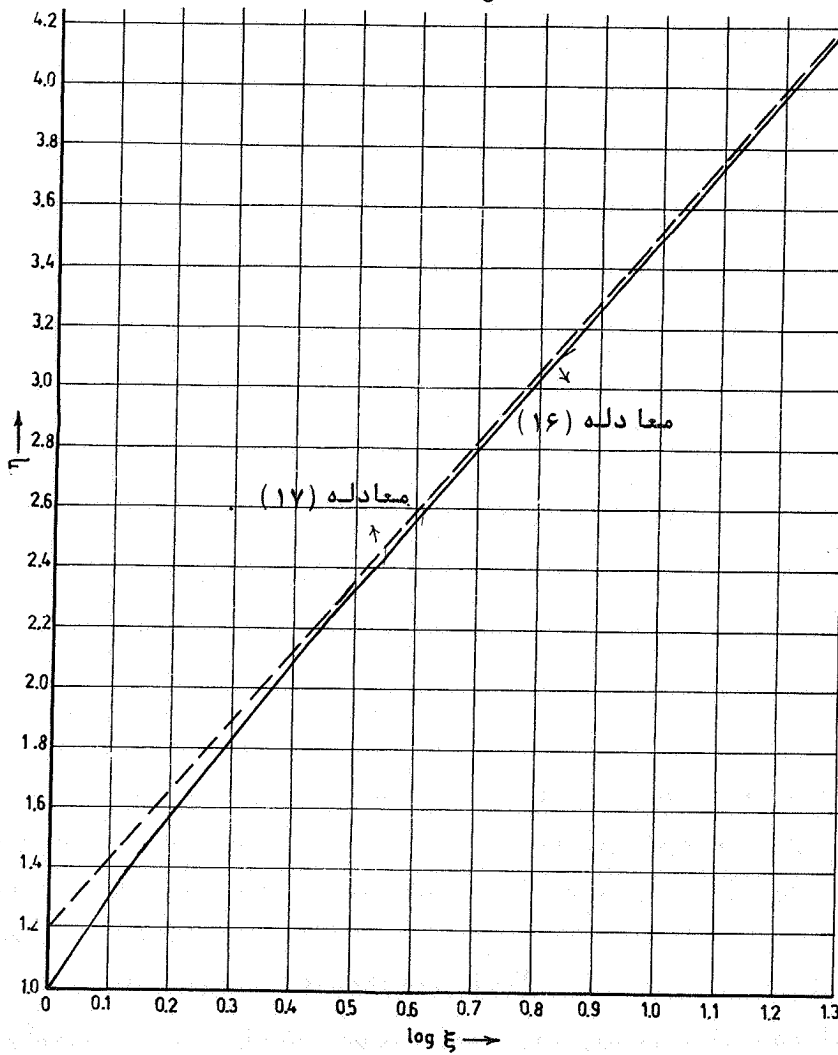
$$h/L = f(q) \quad (19)$$

البته رابطه پیشنهادی ایشان جمله h را با تغییر مختصری بیان می‌کند. جالب است که یکی از روابط تجربی موجود برای جریان به زهکشهای با مقطع استوانه‌ای را بعنوان مثال با رابطه (۱۷) مقایسه نمود.

رابطه هوگو (Hooghoudt) [۱۵] را برای این منظور در نظر می‌گیریم. این رابطه بصورت صفحه بعد پیشنهاد گردیده است.

$$h = q_r L \cdot F_H / 2 \pi r_o \quad (20)$$

$$P_H = \frac{(L - D\sqrt{2})^2}{8DL} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{D}{r_o\sqrt{2}} + f(D, L) \quad (21)$$



شکل ۱۰ - تغییرات η بر حسب $\log \xi$

در این رابطه D فاصله محور لوله تا لایه غیر قابل نفوذ، h فاصله سطح سفره آب زیرزمینی تا محور لوله و r_0 شعاع لوله است. مقدار تابع $f(D \text{ و } L)$ معمولاً کوچک و قابل صرفنظر است [۱۵]. می‌توان r_0 را معادل $b/2$ در نظر گرفت. و می‌توان نشان داد که برای $D \geq \frac{1}{4}L$ مقدار تابع FH تقریباً ثابت می‌ماند. در بحث فعلی مقدار D برابر بینهایت در نظر گرفته شده است، لذا برای مقایسه می‌توان در رابطه (۲۱) بجای D مقدار $\frac{L}{4}$ و بجای r_0 مقدار $\frac{b}{2}$ را قرار داد. نتیجه نهایی بر حسب متغیرهای معادله (۱۸) صورت زیر خواهد بود:

$$\left(\frac{q_r}{h}\right)\left(\frac{L}{h}\right)\left[\ln\frac{L}{h} - \ln\frac{b}{h} - 0.383\right] = \pi^2\left(\frac{b}{h}\right) \quad (22)$$

تعیین پروفیل سطح سفره آب زیرزمینی در مجاورت مجرای قنات (حالت بسته):

فرض می‌کنیم در حالت پایدار پروفیل سفره آب زیرزمینی وضعیتی بخود گرفته است که معادله آن در قسمت قبل محاسبه گردید. با بسته شدن مجرای قنات سطح فروکش شده آب زیرزمینی بالا می‌آید. در این حالت با یک مسئله غیر پایدار (گذرا) مواجه هستیم. فرض می‌کنیم در این حالت نیز پتانسیل سرعت $\phi(x \text{ و } y \text{ و } t)$ از قانون داری تبیعت می‌نماید. پتانسیل مختلط $\omega(z \text{ و } t) = \phi(x \text{ و } y \text{ و } t) + i\Psi(x \text{ و } y \text{ و } t)$ با Ψ با زمان نیز تغییر می‌کند. اگر فشار در روی سفره آب زیرزمینی باشد می‌توان گفت که این فشار مساوی فشار اتمسفر p_a منهای فشار موئینگی p_b است (شکل ۱۱):

$$p = p_a - p_b$$

لذا با توجه به رابطه کلی بین ϕ ، p و y در هر نقطه یعنی
 $(\phi = -k \frac{p - p_a + p_b}{\gamma} + y)$ می‌توان گفت که روی پروفیل سفره
 آب :

$$\phi = -ky \quad (23)$$

این معادله اولین شرط متناظر با سطح سفره آب زیرزمینی
 است. با مشتق‌گیری از این معادله داریم :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} = -k \frac{dy}{dt} \quad (24)$$

جملات $\frac{dx}{dt}$ و $\frac{dy}{dt}$ تصاویر مقادیر واقعی سرعت جریان را در دو
 جهت نشان می‌دهند. ارتباط آنها با سرعت نفوذ بصورت زیر
 است :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{vx}{p} = \frac{1}{p} \frac{\partial\phi}{\partial x}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{vy}{p} = \frac{1}{p} \frac{\partial\phi}{\partial y}$$

در این رابطه p پورازیته خاک (نسبت حجم آب قابل عبور از
 خلل و فرج خاک بطریق ثقلی به کل حجم خاک) می‌باشد. با
 قرار دادن این مقادیر در معادله (۲۴) و صرفنظر از جملات
 دارای توان ۲، خواهیم داشت :

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{k}{p} \frac{\partial\phi}{\partial y} = 0 \quad (25)$$

فرض می‌کنیم تغییر سطح سفره (یعنی y) نسبت به ابعاد x

ناچیز است لذا می‌توان دو شرط بدست آمده را به محور x استناد نمود.

$$\phi \Big|_{y=0} + ky = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{k}{p} \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (27)$$

این طرز ساده نمودن از روش آنالیز امواج سطحی آبی اقتباس گردیده است. معادلات فوق نوسانات سفره را تعیین می‌کنند به شرطی که پتانسیل سرعت ϕ معلوم باشد. فرض می‌کنیم در لحظه $t = 0$ معادله سفره آب بصورت $y = f(x)$ است (معادله ۱۵) منظور تعیین پتانسیل سرعت هارمونیک ϕ در نیمه پائین صفحه ($y < 0$) است به قسمی که شرط سرحدی و اولیه:

$$\phi \Big|_{\substack{y=0 \\ t=0}} = -k f(x) \quad , \quad -\infty < x < +\infty \quad (28)$$

برقرار باشد.

می‌توان نشان داد که تابع زیر جواب مسئله است:

$$\phi = \frac{k}{\pi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(y - \frac{k}{p}t) f(s)}{(y - \frac{k}{p}t)^2 + (x-s)^2} ds \quad (29)$$

زیرا اگر این تابع دوبار نسبت به x و t مشتق گرفته شود، معادله لاپلاس را اکتفا می‌کند (برای $y < 0$). همچنین با مشتق گیری معادله (۷) نیز اکتفا می‌گردد. بالاخره با قرار دادن $y = 0$

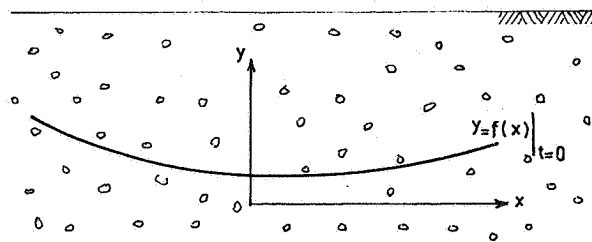
$$\theta = \arctan \frac{x-s}{kt/p} \quad \text{و فرض}$$

$$\phi \Big|_{y=0} = -\frac{k}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} f\left(x + \frac{k}{p} t \cdot \tan \theta\right) d\theta \quad (۳۰)$$

و برای $t = 0$ نتیجه می‌دهد $\phi \Big|_{y=0} = -k f(x)$ که همان رابطه (۸) است.

با قرار دادن ϕ از معادله (۲۹) در معادله (۲۶) می‌توان معادله سطح آب زیرزمینی را در هر لحظه t بدست آورد:

$$y = \frac{kt}{\pi p} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(s)}{\left(\frac{kt}{p}\right)^2 + (x-s)^2} ds \quad (۳۱)$$



شکل ۱۱- تغییرات فشار سفره آب زیرزمینی در لحظه $t=0$

برای تعیین تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی با زمان، بعد از بسته شدن مجرای قنات یعنی بعد از لحظه $t = 0$ معادله پروفیل سطح سفره آب زیرزمینی در حالت پایدار (معادله ۴) را در نظر می‌گیریم.

برای سمت راست محور y ها متغیر ξ بصورت $\xi = \frac{2x+q}{b+q_r}$

تعریف گردیده است ($0.5b < x < +\infty$ یا $\xi < +\infty$). از آنجائیکه فاصله $0 < x < 0.5b$ خارج از شرایط تعریف شده برای مسئله است، لذا باید این فاصله را مستثنی نمود. همچنین بعلاوت تقارن نسبت به محور y ها می‌توان محاسبات را فقط برای نیمه راست محور y ها محدود کرد. نیمه دیگر قرینه آن خواهد بود. اگر در معادله (۲۹) تابع $f(s)$ با استفاده از معادله (۱۵) جایگزین گردد خواهیم داشت:

$$\phi = \frac{k}{\pi} \int_{0.5b}^{\infty} \frac{(y - \frac{k}{p}t)}{(y - \frac{k}{p}t)^2 + (x-s)^2} \left\{ h_0 + \frac{q_r}{\pi} \left[\sqrt{\left(\frac{2s+q_r}{b+q_r}\right)^2 - 1} \right. \right. \quad (22)$$

$$\left. \left. \left(\sqrt{\left(\frac{2s+q_r}{b+q_r}\right)^2 - \left(\frac{2s+q_r}{b+q_r}\right)} + \text{arc Cos h } \frac{2s+q_r}{b+q_r} \right) \right] \right\} ds$$

این معادله بر حسب متغیرهای ξ و t بصورت زیر در می‌آید:

$$\phi = \frac{\tau kh_0}{\pi} \int_{+1}^{\infty} \frac{s^2 - s\sqrt{s^2 - 1} + \text{arc Cos h } s}{\tau^2 + (\xi - s)^2} ds \quad (23)$$

$$\tau = \frac{2}{(b+q_r)} \left(y - \frac{k}{p}t \right) \quad (24)$$

محاسبه انتگرال (۲۳) با استفاده از روشهای عددی بسهولت امکان پذیر است. از آنجائیکه برای اکثر مقادیر تفاوت جمله $s^2 - s\sqrt{s^2 - 1} + \text{arc Cos h } s$ با $0.5 + \ln 2s$ یعنی آن مجانب آن در این صورت محاسبه تحلیلی انتگرال (۲۳) هر چند پیچیده و مفصل

ولی امکان پذیر است. جواب نهائی بصورت زیر خواهد بود:

$$\phi = \frac{k h_0}{\pi} \left\{ (0.5 + \ln 2) \left(\pi/2 + \arctan \frac{\xi-1}{\tau'} \right) + \left(1 + \frac{\tau' \xi}{\tau'^2 + \xi^2} \right) \right. \\ \left. \left(\ln \sqrt{\tau'^2 + \xi^2} \right) \left(\arcsin \frac{\tau'}{\sqrt{\tau'^2 + \xi^2}} \right) \right\}, \quad (35)$$

$$+ 1 < \xi < + \infty$$

رابطه فوق پتانسیل سرعت را در نیمه راست محور y در حالت غیر پایدار نشان می‌دهد.

برای محاسبه تغییرات سطح فروکش طبقه آبدی در مجاورت مجرای قنات از رابطه (۳۱) استفاده می‌کنیم این رابطه بر حسب متغیرهای ξ و η و

$$\tau = 2kt / p(b + q_r) \quad (36)$$

با استفاده از معادله جانب (۱۷) برای نیمه راست محور y بصورت زیر است:

$$\eta = \frac{\tau}{\pi} \int_{+1}^{\infty} \frac{s^2 - s\sqrt{s^2-1} + \operatorname{arc} \operatorname{Cosh} s}{\tau^2 + (\xi - s)^2} ds \quad (37)$$

$$\approx \frac{\tau}{\pi} \int_{+1}^{\infty} \frac{0.5 + \ln 2s}{\tau^2 + (\xi - s)^2} ds$$

بعد از انتگرال گیری :

$$\eta = \frac{0.5 + \ln 2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \arctan \frac{\xi - 1}{\tau} \right) + \frac{1}{\pi} \left(1 + \frac{\tau \xi}{\tau^2 + \xi^2} \right) (\arcsin \frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + \xi^2}}) (\ln \sqrt{\tau^2 + \xi^2}) \quad (38)$$

در معادله (۳۸) :

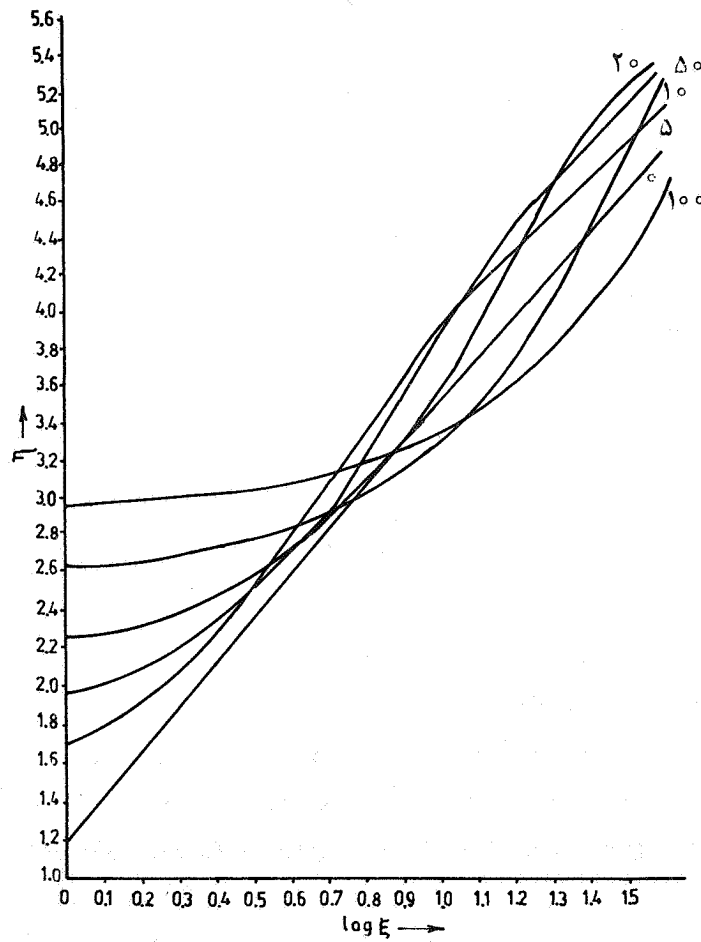
$$\tau = \frac{2kt}{p(b + q_r)} \quad (36)$$

$$\xi = \frac{2x + q_r}{b + q_r} \quad (39)$$

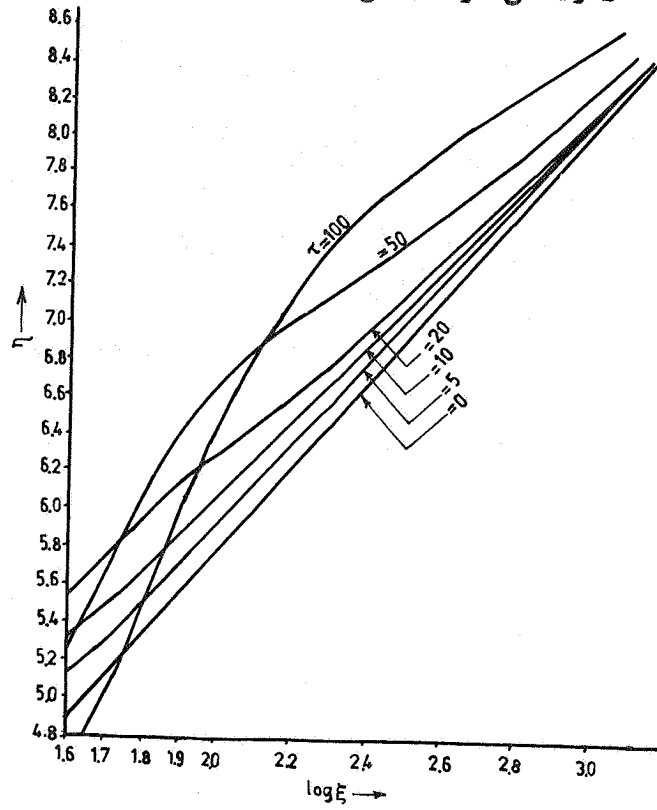
$$\eta = \frac{y}{h_0} = \pi y / q_r \quad (40)$$

با در نظر گرفتن مقادیر عددی پورازیته p در حدود ۱۰٪ هدایت هیدرولیکی k در حدود $(m/d) \times 10^{-4}$ و مقادیر معمولی عرض مجرای قنات، می‌توان گفت که مقدار τ در رده ۱ می‌باشد به شرطی که t بر حسب روز سنجیده شود. منحنی تغییرات η بر حسب $\log \xi$ در τ های مختلف در اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است این شکل نشان می‌دهد که چگونه با بسته شدن مجرای قنات سطح فروکش طبقه آبد به با زمان بالا می‌آید. نکته جالب در این منحنی‌ها چگونگی پسرفت موج ایجاد شده روی سطح سفره آب با گذشت زمان می‌باشد.

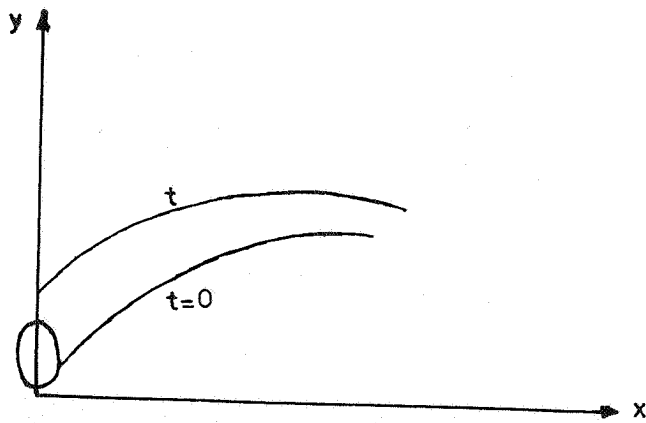
امکان ذخیره آب در طبقه آبد به با بسته شدن دریچه مجرای قنات در واحد طول مجرا با سطح بین پروفیل سطح سفره در هر لحظه معین و سطح سفره در زمان صفر با احتساب پورازیته



شکل ۱۲ - تغییرات η بر حسب $\log \xi$



شکل ۱۳ - تغییرات η بر حسب $\log \xi$



شکل ۱۴ - ذخیره آب در واحد طول

مشخص می‌گردد (سطح هاشور خورده در شکل ۱۴) این سطح با انتگرال زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta S_t = 2p \int_{0.5b}^{\infty} (y_t - y_o) dx \quad (41)$$

و یا بر حسب متغیرهای τ ، η ، ξ :

$$\delta S_t = \int_{+1}^{\infty} \left\{ (0.5 + \ln 2) \left(\text{arc Tan } \frac{\xi-1}{\tau} - \frac{\pi}{2} \right) - \pi \ln \xi \right. \quad (42)$$

$$\left. + \left(1 + \frac{\tau \xi}{\tau^2 + \xi^2} \right) \left(\text{arc Sin } \frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + \xi^2}} \right) \left(\ln \sqrt{\tau^2 + \xi^2} \right) \right\} d\xi$$

در معادله (۴۲) کمیت بدون بعد δS_t بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta S_t = \frac{4\pi^2 \cdot \Delta S_t}{pq_r(b+q_r)} \quad (43)$$

δS_t از معادله (۴۲) محاسبه می‌گردد و تابعی از زمان بدون بعد τ می‌باشد. می‌توان نشان داد که انتگرال (۴۲) برابر است با:

$$\delta S_t = 2\pi^2 \tau \quad (44)$$

برای کنترل نتایج کافی است مقدار ΔS_t یعنی ذخیره آب

زمان $t=0$ تا زمان را با استفاده از معادلات (۴۳) و (۴۴) بدست آورد. نتیجه نهائی با استفاده از (۳۶) بصورت زیر خواهد بود:

$$\Delta S_t = q_r \cdot K \cdot t \quad (45)$$

بدیهی است این مقدار برابر با ذخیره آب در واحد طول مجرا از لحظه $t=0$ تا t می‌باشد.

هیدرولیک قنات در رژیم های پایدار و ناپایدار (حالت سه بعدی) :

مهمترین محدودیت در فرض دو بعدی مسئله وجود شیب سفره آب زیرزمینی است که باعث ایجاد حرکت با مولفه‌ای در امتداد مجرای قنات می‌گردد. بررسی تحلیلی در حالت سه بعدی امکان پذیر نیست و باید از روشهای تقریبی استفاده نمود. مراجع [۱۶] تا [۱۹] که مبانی زهکشی سفره‌های شیب دار را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

بررسی مسئله هیدرولیک قنات در حالت سه بعدی و در جریان پایدار توسط دکتر بایبوردی صورت گرفته است [۱۳] و از تکرار آن در اینجا خود داری می‌گردد. آنچه که به این بررسی می‌توان اضافه کرد استفاده از نتایج روش هودوگراف سرعت است. عبارت بهتر می‌توان معادله سطح سفره آبده قنات را (معادله ۷) بجای معادلات فرضی و تقریبی (روابط ۸،۷ و ۹ در مرجع [۱۳]) مورد استفاده قرار داد .

بررسی سه بعدی جریان در حالت ناپایدار (بسته بودن مجرای قنات) قاعدتا " باید بروش تقریبی و مشابه به حالت

پایدار و با استفاده از نتایج حاصله از تجزیه و تحلیل دو-بعدی جریان ناپایدار (بحث فعلی) صورت گیرد. خطوط کلی این بررسی مشخص گردیده‌اند و بعد از تکمیل مطالعات در آینده ، در صورت لزوم ، ارائه خواهد گردید. روش دیگری برای بررسی مسئله جریان ناپایدار در قنات بچشم می‌خورد که حداقل چشم‌انداز جالبی دارد. این روش بر مبنای استفاده از جوابهای تقریبی معادله لاپلاس مشابه با جوابهایی است که در تجزیه و تحلیل منابع نفتی بکار می‌رود. از نقطه نظر مقایسه می‌توان مسئله بستن مجرای قنات و صعود سطح فروکش سفره آبدی را مشابه با بستن در چاه نفت و بالارفتن فشار نفت و گاز در چاه^۱ فرض نمود. بدیهی است در این تشابه پارامترهای مختلف را می‌توان فقط با تبدیل و تغییرات زیادی ، همسان نمود. بهر حال این روش آنالیز نیز جالب است و باید همپای آنالیز قبلی جلورود. مراجع در این زمینه بسیار زیاد است از جمله مراجع [۲۰ ، ۲۱ ، ۲۲] را می‌توان نام برد که مسئله ایجاد و ازدیاد فشار چاههای نفت را بررسی می‌کند و می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. روش بررسی مذکور در دست مطالعه است و در صورت حصول نتایج مفید ، ارائه خواهد گردید.

سومین روش تجزیه و تحلیل بر مبنای روابط متداول در مبحث تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد، اگر چه مطالعات انجام شده نشان داده است که احتمالاً این روش‌های تقریبی به نتایج مفیدی منجر نخواهد گردید. می‌توان در این زمینه به مراجع [۲۳ ، ۲۴ و ۲۵] اشاره نمود. بالاخره می‌توان به روشهای تقریبی در بررسی تغذیه

1. Pressure Build - up

آبخوان قنات اشاره نمود. این روشها عبارتند از :

- روش قطعات (Method of Segments)
- روش ترسیمی (Graphical Method)
- روش عددی تفاضل‌های محدود (Method of Finite Differences)
- روش تشابه الکتروهیدرودینامیکی

(Method of Electrohydrodynamic Analogies) EHDA

از بین روشهای فوق روش تفاضل‌های محدود و بویژه روش تشابه الکتروهیدرودینامیکی (EHDA) مناسب‌تر بنظر می‌رسد . روش تشابه الکتروهیدرودینامیکی در جریان ناپایدار بر این اساس استوار است که در طول هر مدت زمان t می‌توان جریان را پایدار فرض نمود. تغییرات سطح سفره آبدی برای هر فاصله زمانی از میزان جابجائی سطح منتج از خطوط تجربی جریان (Streamlines) و خطوط تجربی فشار ثابت (Isopiestic Lines) تعیین می‌گردد. این روش نیاز به یک مدل دارد. مطالعات مربوط به این روش نیز هم اکنون ادامه دارد. بعلت اجتناب از طولانی شدن میحث، از ذکر جزئیات و ساختمان مدل الکتروهیدرولیکی لازم خودداری می‌گردد.

مدل هیدرولیکی

حرکت سطح سفره آب زیرزمینی در اثر تغذیه مصنوعی ناشی از انسداد مجرای قنات، یک حرکت ناپایدار (Unsteady Flow) است که تقریباً "همواره همراه با شرایط حدی (Boundary Conditions) پیچیده‌ای می‌باشد. فرضیات ایده‌آلی که در قسمتهای پیش بعمل آمد تا بتوان راه حلی تحلیلی به حالت دوبعدی مسئله بدست آورد. از آنجائیکه معمولاً "مشخصات سفره از قبیل پورازیتته و ضریب آبگذاری ممکن است در محدوده جریان متغیر باشد لذا لازم است که راه حل عددی برای حالت کلی مسئله

و با فرض جریان سه بعدی در نظر گرفته شود. بدیهی است در حالت سه بعدی می‌توان شیب سفره و امتداد طولی مجرای قنات را هم در نظر گرفت. یک مدل هیدرولیکی نیز مورد نیاز است تا بتوان قبل از کاربرد راه حل عددی در چند حالت آزمایشی جوابهای حاصله را کنترل نمود. بدیهی است مدل صفحات موازی (Hele-shaw) مناسب برای این منظور نمی‌باشد و احتمالاً "مدل‌های شفاف (Translucent Models) مناسبتر خواهد بود. می‌توان از دو صفحه شفاف استفاده نمود که فضای فیما بین آنها با ماده قابل نفوذ پر گردیده است. اگر از ذرات شیشه‌ای و یا پلاستیکی بعنوان ماده قابل نفوذ و از آب یا روغنهای سبک بعنوان مایع استفاده گردد، نور می‌تواند تا حدودی از مدل عبور کند. در صورتیکه صفحه پشتی با ورق تیره پوشانده شده و نور از جلو بتابد، قسمتهای اشباع شده از آب تیره و قسمتهای غیر اشباع سفید بنظر خواهند آمد. مرز بین دو قسمت و در نتیجه سطح سفره آب مشخص است و می‌توان از آن عکسبرداری نمود. بهترین نتایج از نقطه نظر سهولت مدل در حالت دوبعدی بدست می‌آید ولی می‌توان با اتخاذ ترکیبات خاصی هر دو مقطع موازی با مجاری قنات و عمود بر آن را مطالعه نمود. و با وجود این دو مدل مجزا که مبین حرکت در دو مقطع باشد توصیه می‌گردد. سیستم مجرای قنات، پیشکار و میله‌ها را می‌توان با لوله‌های مشبک ایجاد نمود. بهتر است تعداد بیشتری میله در محدوده سفره آب زیرزمینی قرار داد و اگر تمام این میله‌ها مجهز به دریچه‌های مدل باشند انعطاف مدل بیشتر خواهد بود و می‌توان اثرات هر یک را جداگانه محاسبه نمود. زاویه شیب سفره در مدل مقطع طولی مجرای قنات با انحراف کل مدل قابل تغییر است. زاویه شیب خود مجرا نسبتاً ثابت بوده و تغییر آن تاثیر قابل ملاحظه‌ای در موضوع مورد

بحث نخواهد داشت .

پیشنهاد برای مطالعات آینده

- در صورتیکه بررسی‌های انجام شده مفید تشخیص داده شود باید مطالعات زیر بترتیب صورت گیرد:
- ۱- بررسی مسئله در حالت سه بعدی با روشهای عددی
 - ۲- بررسی مسئله از روشهای دیگر (مندرج در متن مقاله) همزمان با مطالعات مرحله ۱ .
 - ۳- آزمایشات مدل هیدرولیک یا مدل الکترو هیدرودینامیکی .
 - ۴- بررسی روشهای اجرائی نصب دریچه .
 - ۵- اجرای روش پیشنهاد شده برای یک قنات و آزمایش سیستم برای مدت زمانی کافی با اندازه‌گیری‌های لازم .
 - ۶- شناسائی وضعیت قناتهای مختلف و تنظیم برنامه اجرائی در سطح کشور .
- بدیهی است انجام مطالعات هر مرحله منوط به اخذ نتیجه مثبت از مراحل قبلی خواهد بود .

مراجع

- ۱ - عنایت‌اله رضا ، غلامرضا نورس ، محمد علی امام شوشتری و علی اکبر انتظامی ، آب و فن آبیاری در ایران باستان ، وزارت آب و برق .
- ۲ - خلاصه آمار آبهای زیر زمینی کشور (بتفکیک حوزه آبریز) ، وزارت نیرو اسفند ماه ۱۳۵۹ .
- ۳ - سیر مطالعات آبهای زیر زمینی در ایران ، سمپوزیوم صنعت آب (ایران - هلند) ، وزارت نیرو ، خرداد ماه ۱۳۶۳ .
- ۵ - هرمز پازوش ، نگاهی به برنامه بهره‌برداری از منابع آب ایران در گذشته ، نشریه دانشکده فنی شماره ۴۱ ، مهرماه ۱۳۵۹ .
- ۶ - هرمز پازوش ، نقش قنات در آبادانی کویرها ، نشریه دانشکده فنی ، شماره ۴۴ ، خرداد ماه ۱۳۶۱ .
- ۷ - منوچهر وحیدی ، قنات ایران ، سازمان برنامه ، امور عمران روستائی ، شهریور ماه ۱۳۴۲ .
- ۸ - سید منصورسیدسجادی ، قنات " کاریز " تاریخچه ، ساختمان و چگونگی گسترش در جهان ، انجمن فرهنگی ایتالیا - ایران ، شماره ۱ ، ۱۳۶۱ .
- ۹ - عبدالرحیم ذوالانوار ، مطالعه در سفره آبدۀ قناتها ، گزارش منتشر نشده .

- ۱۰- عبدالرحیم ذوالانوار، فرهاد موسوی، " بررسی اجمالی، آبهای زیرزمینی دشت کهنوج "، نشریه استقلال، شماره ۳، آذرماه ۱۳۶۲، دانشگاه صنعتی اصفهان.
4. Beaumont, P., " Ghanats on the Varamin Plain, Iran ",
Trans. Inst. of Brit. Geogs. Pub. No. 45, 1968.
11. Hoelting, B., Hydrogeologie, Einfugrung in die Allgemeine
U. Angemandte Hydrogeologie, 1980.
12. Keller, G., Angemandte Hydrogeologie, 1969.
13. Mohammed Baybordi, M., "Ghanats of Iran Drainage of
Sloping Aquifer", Journal of the Irrigation and Drainage
Division, ASCE, vol. 100, No. IR3, Proc. Paper 10785,
Sept. 1974.
14. Aravin, V. I., and Numerov, S. N., Theory of Fluid Flow
in Undeformable Porous Medi., Trans. from Russian,
Israel Program of Scientific Translations, 1965.
15. Drainage Principles and Application, International
Institute for Land Reclamation and Improvement.
Netherlands, 1974.
16. Luthin, J. N., and Taylor, G. S., " Computer Solution
for Drainage of Sloping Land ", Transactions of the

- American Society of Agricultural Engineers, vol. 9, No. 4, pp. 546-549, 1966.
17. Massoumi, A., Some Introductory Notes on Ghanats in Iran, Ministry of Water and Power, Iran, pp. 1-8, 1972.
 18. Schmid, P., and Luthin, J. N., "The Drainage of Sloping Land ", Journal of Geophysical Research, vol. 69, No. 8, pp. 1525-1529, 1964.
 19. Thiel, T. J., and Bornstein, J., " Tile Drainage of Sloping Fragipan Soils ", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 8, No. 4, pp. 555-557, 1965.
 20. Russell, D. G., " Extensions of Pressure Build-Up Analysis Methods ", J. of Petroleum Technology, Dec., 1966.
 21. Odeh, A. S., " The Effect of Production History on Determination of Formation Characteristics from Flow Tests ", J. of Petroleum Technology, Oct. 1965.
 22. Larson, V. C., Understanding the Muskat Method of Analysing Pressure Build-Up Curves, Jour, Can. Petroleum Tech., vol. 2, No. 3, 1963.

23. Todd, D. K., The Distribution of Ground-Water Beneath Artificial Recharge Areas, International Association of Scientific Hydrology, Symposium of Athens, vol. 1, Pub. No. 56, 1961.
24. Schiff, L. and Dyer, K. L., Some Physical and Chemical Considerations in Artificial Ground-Water Recharge, International Association of Scientific Hydrology, General Assembly of Berkeley, Pub. No. 64, 1964.
25. Dooge, J. O. I., The Routing of Ground-Water Recharge Through Typical Elements of Linear Storage, General Assembly of Helsinki, Pub. No. 2, 1960.