

فصل 8

جریان در مجاورت مرزهای آبخوان

معادلاتی که در فصول پنجم، ششم و هفتم برای بررسی جریان شعاعی در اطراف چاه-های پمپاژ بررسی و استخراج شدند با فرض نامحدود بودن وسعت آبخوان و وجود تنها یک چاه پمپاژ به دست آمدند. با توجه به اینکه آبخوان‌های بسیار وسیع به ندرت در طبیعت وجود دارد، سوالی که به احتمال زیاد پیش می‌آید این است که جریان آب در مجاورت مرزهای یک آبخوان واقعی به چه صورت است و مرزهای آبخوان چه تأثیری بر مخروط افت جریان خواهند داشت؟

به طور کلی، عدم پیوستگی در سازندهای مختلف زمین‌شناسی مثل وجود گسل‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و لایه‌بندی رسوبات با خواص هیدرولیکی مختلف، وسعت آبخوان‌ها را محدود می‌کند. بنابراین اگر آزمایش پمپاژ در نزدیک مرزهای آبخوان انجام شود به طوریکه مرز آبخوان در داخل سطح تأثیر چاه قرار داشته باشد، نامحدود فرض نمودن

وسعت آبخوان، که در بسط معادلات فصول قبل از آن کمک گرفته شد، اعتبار نداشته و باید تصحیحاتی در معادلات مورد نظر انجام شود.

تحلیل جریان در مجاور مرزهای آبخوان با استفاده از اصل برهم نهی انجام می‌شود. بر طبق این اصل، افت ایجاد شده توسط دو یا چند چاه برابر با جمع جبری افت‌های ایجاد شده توسط هر یک از چاه‌ها به صورت مجزا می‌باشد. بنابراین با استفاده از مفهوم تئوری چاه‌های مجازی می‌توان یک آبخوان با ابعاد محدود را به یک آبخوان نامحدود تبدیل نمود و با استفاده از معادلات معرفی شده در فصول قبل جریان در آبخوان را تحلیل کرد.

۸-۱- تئوری چاه مجازی

شکل (8-1) دو حالت از آبخوانی را نشان می‌دهد که به دلیل نوع سازندهای زمین-شناسی یا وجود رودخانه، مرزهای محدودی دارند. مشاهده می‌شود که در شکل (8-1-الف) مخروط افت در سمتی که مرز غیر قابل نفوذ (حد سدی) قرار دارد پایین‌تر از سمت دیگر آن بوده و در نتیجه مخروط افت سطح آب نامتقارن است. به طور مشابه، شکل (8-1-ب) چاه پمپاژ را در مجاور یک رودخانه نشان داده که بخشی از دبی خروجی از چاه از طریق رودخانه تأمین می‌شود. لذا در این حالت نیز مخروط افت نامتقارن می‌شود. با توجه به نامتقارن بودن مخروط افت چاه، معادلات جریان شعاعی تیم یا تاپس در این نوع آبخوان‌ها قابل استفاده نیست.

برای تعیین مخروط افت در این نوع مسائل، می‌توان از تئوری چاه‌های مجازی¹ استفاده نمود که بر اصل برهم نهی² (تفکیک آثار) استوار است. تئوری چاه‌های مجازی اولین بار توسط فریس³ در سال 1962 میلادی و مولدر⁴ در سال 1963 میلادی معرفی شد.

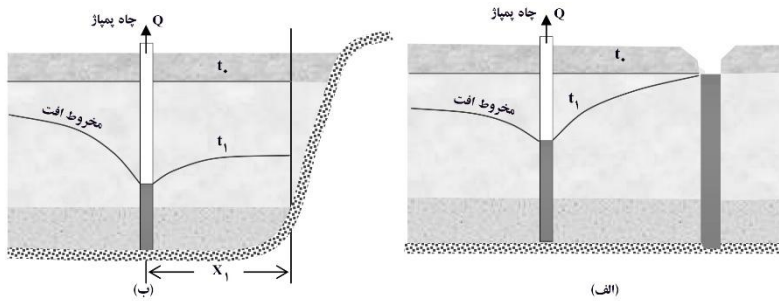
چاه مجازی یک چاه خیالی (غیرواقعی) است که به عنوان ایجاد کننده یک جریان هیدرولیکی معین در اثر وجود یک حد مرزی شناخته شده در مجاورت چاه پمپاژ (یا چاه تغذیه) واقعی در آبخوان، در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، برای تحلیل جریان در

¹ image well theory

² principle of superposition
³ Ferris

⁴ Moulder

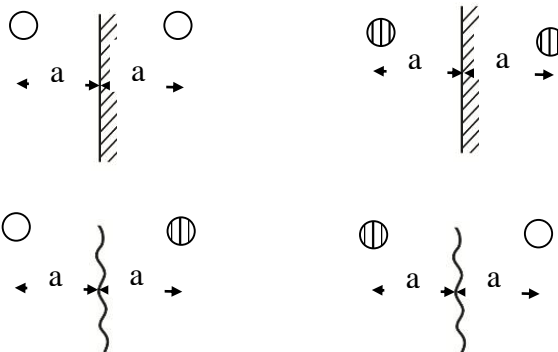
مجاور مرزهای آبخوان، چاه‌های مجازی جایگزین مرزهای آبخوان می‌شوند. در این فصل از علائم جدول (1-8) برای نشان دادن چاه‌ها و مرزهای آبخوان استفاده می‌شود.



شکل 1-8- چاه پمپاژ (الف) مجاور رودخانه، (ب) مجاور لایه نفوذناپذیر

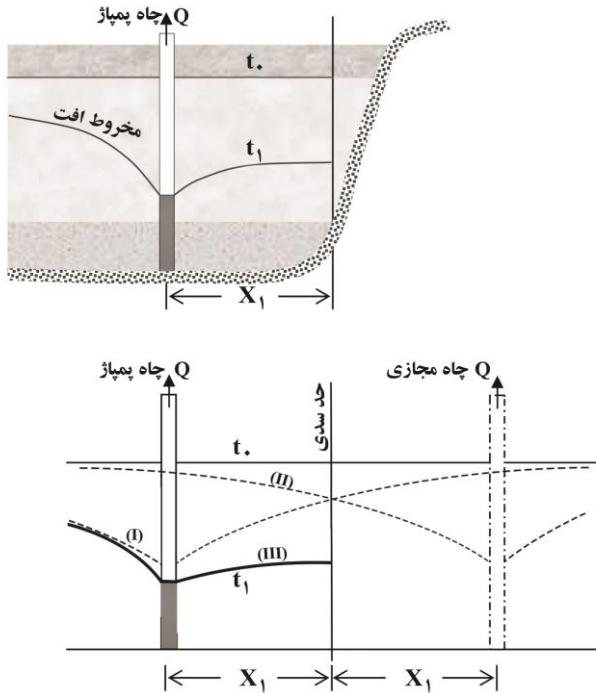
جدول 1-8- علائم چاهها و مرزها در تئوری چاه مجازی

مرز		چاه مجازی		چاه واقعی	
علامت	نوع مرز	علامت	نوع چاه	علامت	نوع چاه
	سدی		چاه پمپاژ		چاه پمپاژ
	تغذیه کننده		چاه تغذیه		چاه تغذیه



شکل 1-8-2- مدل سیستم تک مرزی

با توجه به جدول (8-1)، اگر تنها یک حد مرزی وجود داشته باشد، با توجه به نوع حد مرزی و چاه واقعی، یکی از چهار حالت شکل (8-2) می‌تواند اتفاق بیفتد.



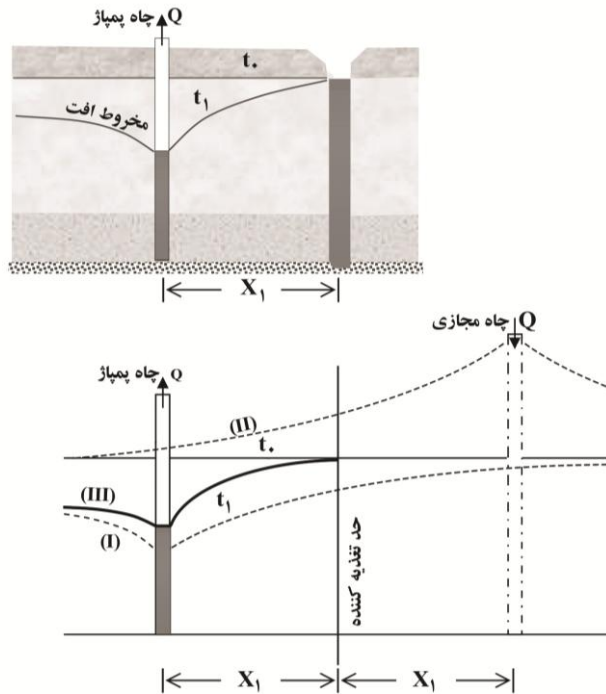
شکل 8-3: الف) چاه پمپاژ مجاور حد مرزی، ب) چاه مجازی و مخروط افت برآیند مجاور حد

سدی

بنابراین، اگر حد مرزی از نوع حد سدی⁵ باشد، چاه مجازی از نوع چاه واقعی و به فاصله مساوی در سمت دیگر حد مرزی انتخاب می‌شود. در شکل (8-3-الف) چاه پمپاژی با دبی Q و به فاصله X_1 از حد سدی نشان داده شده است. برای تعیین منحنی سطح آب، یک چاه مجازی با دبی پمپاژ Q و با همان فاصله X_1 نسبت به حد سدی در نظر گرفته می‌شود. شکل (8-3-ب) مخروط افت چاه واقعی و چاه مجازی انتخاب شده را نشان می‌دهد. برای

⁵ - barrier boundary

تعیین مخروط افت واقعی در مجاورت حد مرزی، مقادیر افت هد چاه مجازی در هر نقطه دلخواه بین چاه پمپاژ و مرز سدی، از مقدار افت چاه پمپاژ واقعی کم می‌شود. توجه شود که در این مسأله، وجود حد سدی باعث کاهش بیشتر سطح آب بین چاه و حد سدی شده است.



شکل 8-4- الف) چاه پمپاژ در مجاور حد تغذیه کننده (ب) چاه مجازی و مخروط افت برآیند در

مجاور حد تغذیه کننده

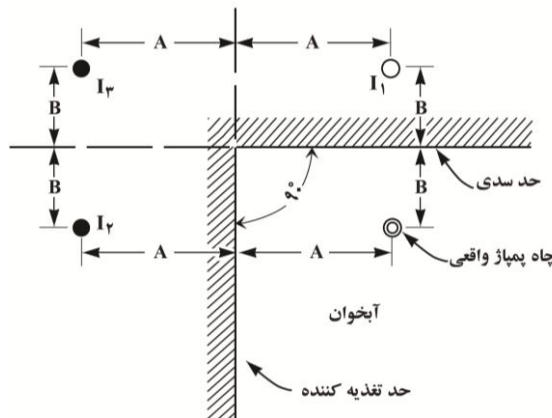
اگر حد مرزی از نوع حد تغذیه کننده (رودخانه، نهر، چاه تغذیه) بوده و چاه اصلی پمپاژ باشد، همانطور که در شکل (8-4-الف) مشاهده می‌شود، منحنی سطح آب در سمتی که مرز تغذیه وجود دارد بالاتر از سمت دیگر قرار می‌گیرد. در این حالت مشخص است که بخشی از دبی پمپاژ Q از طریق رودخانه تأمین شده و لذا سطح آب زیرزمینی کمتر افت پیدا می‌کند. برای تعیین مخروط افت جریان، چاه مجازی از نوع چاه تغذیه و به فاصله مساوی در سمت دیگر حد مرزی انتخاب می‌شود. در شکل زیر چاه پمپاژی با دبی Q و به

فاصله x_1 از رودخانه نشان داده شده است. شکل (8-4-ب) مخروط افت چاه واقعی و چاه مجازی انتخاب شده را نشان می‌دهد. برای تعیین مخروط افت واقعی در مجاور مرز تغذیه-کننده، مقادیر افت هد چاه مجازی را در هر نقطه دلخواه بین چاه پمپاژ و مرز تغذیه‌کننده به مقدار افت چاه پمپاژ واقعی اضافه می‌شود.

8-2- سیستم‌های چند مرزی

در صورتیکه دو یا چند مرز همدیگر را قطع کرده باشند و یا با هم موازی باشند نیز از همان اصول بیان شده برای جریان در مجاور یک مرز استفاده می‌شود. به طور کلی اگر دو حد مرزی با هم زاویه θ تشکیل دهند، تعداد چاههای مورد نیاز برای محاسبه افت هد (n_i) با رابطه زیر به دست می‌آید (تاد، 2005):

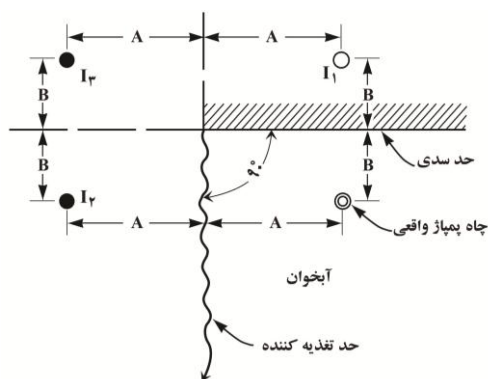
$$n_i = \frac{360}{\theta} - 1 \quad (1-8)$$



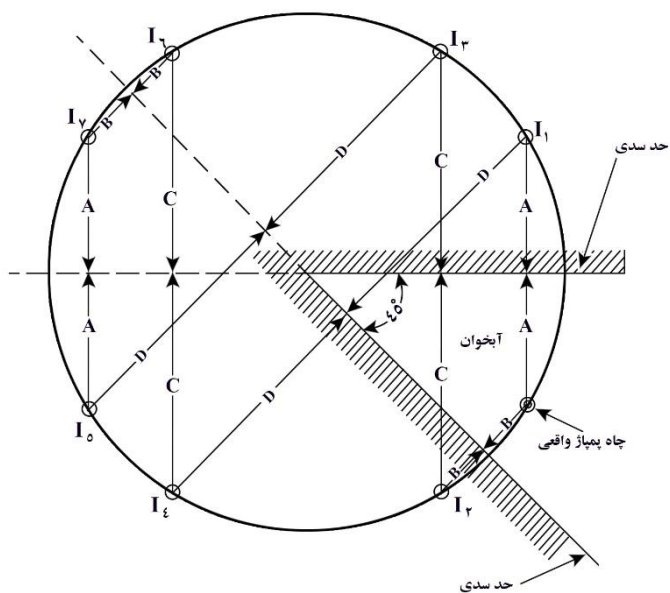
شکل 8-5- چاه پمپاژ بین دو حد سدی عمود بر هم

اگر چاه پمپاژی بین دو مرز سدی مطابق شکل (8-5) قرار داشته باشد، با توجه به اینکه زاویه بین دو مرز 90 درجه است، از رابطه (8-1) سه چاه مجازی برای مدل‌سازی آبخوان باید در نظر گرفته شود. تعداد چاههای مجازی برای چاه پمپاژی بین دو مرز متقاطع سدی و تغذیه‌کننده مطابق شکل (8-6) نیز سه عدد می‌باشد.

$$n_i = \frac{360}{90} - 1 = 3$$



شکل 8-6- چاه پمپاژ بین دو حد تغذیه عمود بر هم

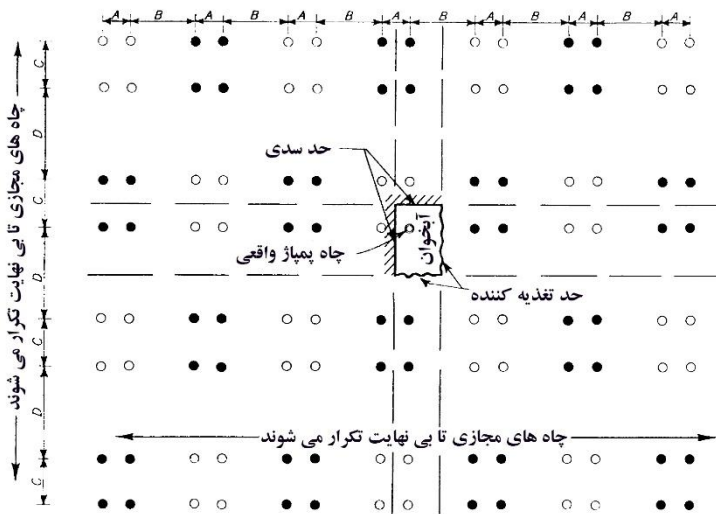


شکل 8-7- چاه پمپاژ بین دو حد سدی متقاطع با زاویه 45 درجه

به عنوان مثالی دیگر، در شکل (8-7) چاه پمپاژی بین دو حد سدی قرار دارد که زاویه بین دو مرز 45 درجه است. طبق رابطه (8-1) چاه مجازی باید در مدلسازی در نظر گرفته شود.

$$n_i = \frac{360}{45} - 1 = 7$$

همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، هر چاه باید نسبت به هر دو مرز تصویر شود. همچنین چاه‌های مجازی به دست آمده نیز باید مجدداً نسبت به مرز دوم و یا امتداد مرزها تصویر می‌شوند (تاد، 2005).



شکل 8-8- چاه پمپاژ بین چهار حد مرزی (دو حد سدی و دو حد تغذیه کننده)

اگر دو مرز با هم موازی باشند و چاه واقعی بین دو مرز قرار گیرد، بر طبق رابطه (8-1) بینهایت چاه مجازی به دست می‌آید. هر یک از چاه‌های مجازی به وجود آمده مربوط به یک حد، بر حد دیگر نیز اثر نموده و چاه مجازی دیگری را ایجاد می‌کند. شکل (8-8) چاه پمپاژ بین چهار حد مرزی را نشان می‌دهد.

۸-۳- تحلیل جریان ماندگار در مجاور مرزهای آبخوان محصور یا آزاد

برای بررسی جریان در مجاور مرزهای آبخوان و تعیین مشخصات هیدرولیکی آبخوان و یا محاسبه افت هد در پیزومترها یا چاه‌های مشاهداتی، تئوری چاه‌های مجازی بسیار مفید می‌باشد. قبل از اینکه نحوه استفاده از چاه‌های مجازی بیان شود، لازم است سیستم‌های چندچاهی و بحث تداخل حریم چاهها معرفی شود.

۸-۳-۱- تداخل چاه‌ها و سیستم‌های چند چاهی

در فصل‌های قبل هیدرولیک جریان شعاعی به سمت یک چاه پمپاژ در آبخوان آزاد یا محصور مورد بررسی قرار گرفت. موضوعی که باید به آن توجه داشت این است که بهره‌برداری از یک آبخوان معمولاً توسط چندین چاه پمپاژ صورت می‌گیرد و گاهی مواقع ممکن است شعاع تأثیر دو یا چند چاه با یکدیگر تداخل داشته باشند. اگر فاصله چاه‌های پمپاژ به هم نزدیک باشد به طوریکه شعاع تأثیر چاه‌ها با هم تلاقی نمایند، مخروط‌های افت با هم ترکیب شده و میزان افت سطح آب بیشتر از حالتی خواهد بود که فقط یک چاه وجود داشته باشد.

به طور کلی، تعیین مخروط افت هد ناشی از پمپاژ چند چاه در یک آبخوان محصور با استفاده از اصل برهم‌نهی انجام می‌شود. به این ترتیب که برای هر چاه پمپاژی مخروط افت ترسیم می‌شود؛ در صورتی که فاصله چاه‌های پمپاژ نسبت به هم از شعاع تأثیر چاه بیشتر باشد، مخروط افت هر چاه بر چاه دیگر تأثیری نخواهد داشت. اما، اگر مطابق شکل (8-9) حریم چاه‌ها حفظ نشود و مخروط افت چاه‌ها با هم همپوشانی داشته باشند، حجم آب قابل پمپاژ توسط چاه‌ها کاهش می‌یابد. در شکل (8-9) فرض شده که دبی پمپاژ دو چاه A و B یکسان باشد. با ترسیم مخروط افت هر کدام از چاه‌ها و حذف بخش‌های همپوشانی شده می‌توان مخروط افت نهایی را ترسیم نمود.

بر طبق اصل برهم‌نهی، افت هد (جریان ماندگار یا ناماندگار) یک نقطه دلخواه در محدوده متأثر از تداخل چند چاه پمپاژ در آبخوان محصور برابر با مجموع افت‌های ناشی از هر یک از چاه‌ها می‌باشد. به بیان دیگر:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + \dots \quad (2-8)$$

که در آن:

s [L] مجموع افت هد در نقطه مورد نظر در اثر پمپاژ همزمان چاه‌ها

s_1 [L] افت هد نقطه مورد نظر ناشی از پمپاژ از چاه 1 وقتی بقیه چاه‌ها خاموش باشند

s_2 [L] افت هد نقطه مورد نظر ناشی از پمپاژ از چاه 2 وقتی سایر چاه‌ها خاموش باشند و ...

اصل بر هم‌نهی خطی فقط در آبخوان‌های محصور که ضریب انتقال‌پذیری آبخوان T با تغییر افت هد ثابت می‌ماند، قابل استفاده است. در صورتی که افت هد در مقایسه با ضخامت اولیه آبخوان آزاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، مقدار افت هد پیش‌بینی شده با استفاده از اصل بر هم‌نهی خطی از مقدار واقعی افت هد کمتر خواهد بود و باید تصحیح شود. باید توجه داشت که با کاهش سطح ایستابی در اثر پمپاژ، ضخامت لایه اشباع آبخوان کاهش یافته و ضریب انتقال‌پذیری آبخوان آزاد کم می‌شود. بنابراین، سیستم چند چاهی در آبخوان آزاد در مقایسه با آبخوان محصور معادل آن، گرادیان هیدرولیکی بزرگتری خواهد داشت تا کاهش ضریب انتقال‌پذیری آن جبران شود.

با توجه به مطالب بیان شده برای تعیین افت هد سیستم چند چاهی در آبخوان آزاد، ابتدا باید افت هد آبخوان محصور معادل بر طبق رابطه (2-8) محاسبه شده و با استفاده از رابطه (3-8) مقدار افت واقعی به دست آید:

$$s = h_0 - (h_0^2 - 2s'h_0)^{1/2} \quad (3-8)$$

که در آن:

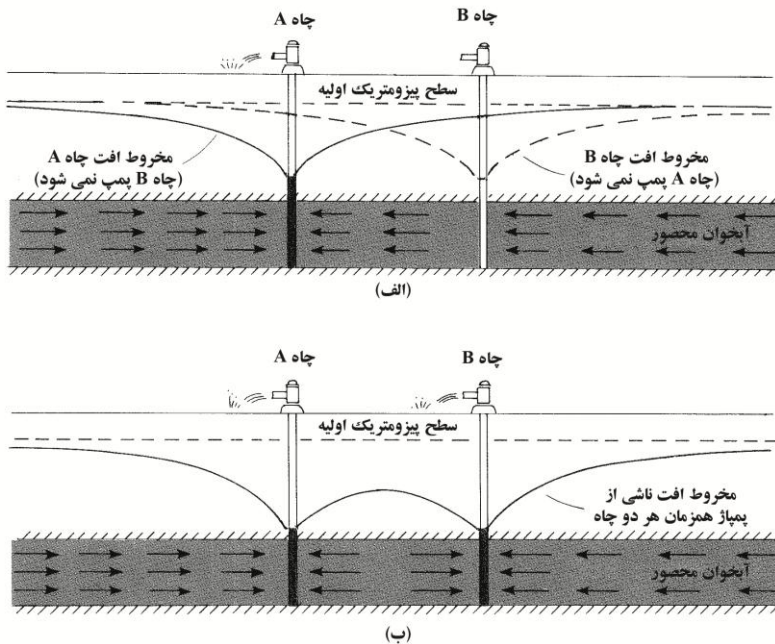
s [L] افت هد واقعی در آبخوان آزاد

s' [L] افت هد آبخوان محصور معادل

h_0 [L] سطح ایستابی اولیه آبخوان آزاد

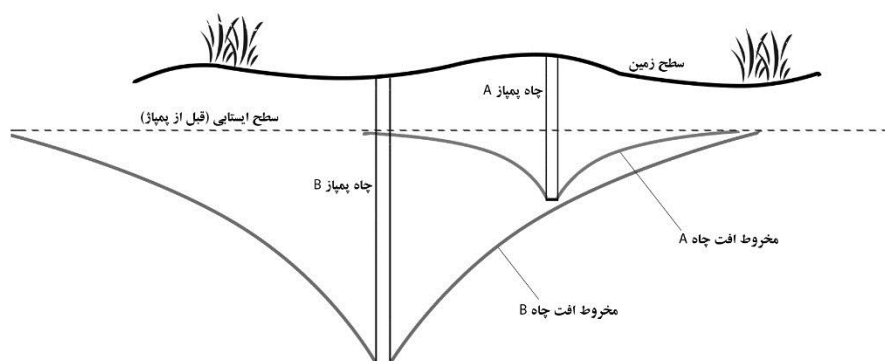
بررسی تداخل چاه‌ها در طراحی چاه‌های پمپاژ بسیار حائز اهمیت است. طول لوله مکش آب از چاه به سطح زمین و مشخصات پمپ مورد نیاز برای استخراج آب، به سطح آب در داخل چاه بستگی دارد. هر چقدر عمق دسترسی به آب در چاه افزایش یابد انرژی بیشتری برای پمپاژ آب نیاز خواهد بود. بنابراین، باید حتی المقدور سعی شود فاصله چاه‌ها

نسبت به هم طوری باشد که شعاع تأثیر آنها با هم تداخل نداشته باشند و مقدار افت هد در چاه‌ها کمترین مقدار ممکن را داشته باشند.



شکل 8-9- مخروط افت بین دو چاه

شکل (8-10) دو چاه پمپاژ را در یک آبخوان آزاد نشان می‌دهد. در صورتی که دبی پمپاژ و عمق چاه B بیشتر از چاه A باشد، مطابق شکل زیر مخروط افت چاه B پایین‌تر از چاه A قرار گرفته و عملاً چاه A خشک می‌شود. این پدیده‌ای است که اغلب اتفاق افتاده و باعث مشکلات زیادی بین کشاورزان بر سر چاه‌های کشاورزی شده و رقابت برای افزایش عمق چاه‌های موجود را به همراه داشته است.



شکل 8-10- تأثیر حفر چاه عمیق بر مخروط افت چاه

یکی از کاربردهای سیستم‌های چندچاهی پاکسازی و خروج آلودگی‌ها از آبخوان است. برای اینکه چاهی قادر باشد آلودگی را از آب زیرزمینی بگیرد، آلاینده باید در محدوده حریم چاه باشد. حریم حفاظت کیفی یا حریم بهداشتی مطابق شکل (8-11)، فاصله‌ای در اطراف منبع آبی است که در این شعاع آلودگی‌های میکروبی و شیمیایی می‌تواند وارد منبع آب آشامیدنی گردند.

آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی به دلیل دارا بودن ترکیبات آلی و معدنی به شکل‌های محلول، کلوئیدی و معلق هر کدام تا مسافتی مشخص و معین (با توجه به تشکیلات خاک) قادر به نفوذ در چاه می‌باشند. برای خروج سریع‌تر و موثرتر آلودگی از آبهای زیرزمینی بهتر است فاصله چاه‌ها نسبت به هم به گونه‌ای باشد که تداخل در حریم چاه‌ها رخ دهد و افت هد سریع‌تر اتفاق بیفتد. در مواردی که نیاز به زهکشی آب و خشک انداختن زمین جهت کارهای ساختمانی در زمین‌های اشباع است، تداخل چاه‌ها می‌تواند مفید واقع شود.

8-3-2- تعیین افت هد در مجاور مرزها با استفاده از تئوری چاه‌های مجازی

پس از آنکه مرزهای آبخوان با استفاده از چاه‌های مجازی جایگزین شد، آبخوان را می‌توان به صورت یک آبخوان نامحدود ساده‌سازی نمود که همزمان کلیه چاه‌های واقعی و مجازی به صورت سیستم چند چاهی در حال پمپاژ از آبخوان یا تغذیه آبخوان می‌باشند. بنابراین، افت هد کل را می‌توان به صورت جمع جبری افت‌های ناشی از چاه‌های واقعی و مجازی نوشت. اگر s_p افت هد ناشی از چاه پمپاژ در زمان t در چاه مشاهداتی به مختصات

(x, y) و s_i افت هد ناشی از چاه مجازی i ام باشد، s_0 افت هد کل در نقطه (x, y) در زمان t برابر است با:

$$s. = s_p \pm \sum_{i=1}^n s_i \quad (4-8)$$

که n تعداد چاه‌های مجازی با توجه به شرایط مرزی آبخوان می‌باشد. اگر چاه مجازی آبده باشد، افت هد ناشی از آن با علامت مثبت و در صورتیکه چاه مجازی تغذیه کننده باشد افت هد آن با علامت منفی در رابطه فوق وارد می‌شود.

معادله افت هد و در نتیجه تابع چاه مناسب در رابطه فوق با توجه به شرایط جریان (ماندگار یا ناماندگار)، شرایط آبخوان (آبخوان آزاد، محصور یا نشتی) و شرایط چاه (چاه کامل یا ناقص) انتخاب می‌شود. به عنوان مثال، اگر پمپاژ آب توسط چاه کامل در آبخوان محصور غیر نشتی انجام شود و جریان ناماندگار باشد، با استفاده از معادله تاپس، افت هد کل برابر است با:

$$s. = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \pm \sum_{i=1}^n \frac{Q}{4\pi T} W(u_i) \quad (5-8)$$

و یا:

$$s. = \frac{Q}{4\pi T} \left(W(u) \pm \sum_{i=1}^n W(u_i) \right) \quad (6-8)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (7-8)$$

$$u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt} \quad (8-8)$$

که در آن:

r [L] فاصله چاه مشاهداتی از چاه پمپاژ واقعی

r_i [L] فاصله چاه مشاهداتی از چاه مجازی i ام می‌باشد.

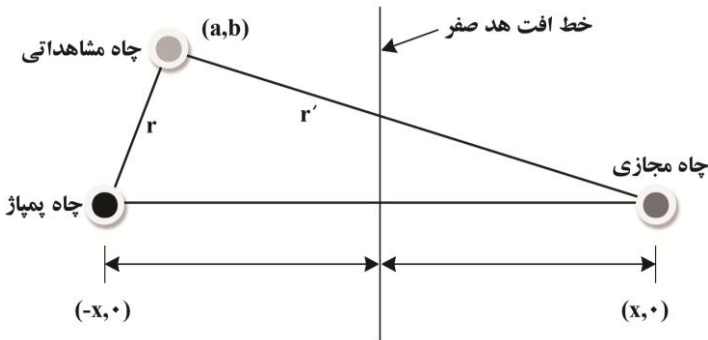
در رابطه (5-8) نیز در صورتی که چاه‌های مجازی آبده باشند علامت داخل پرانتز مثبت و در غیر اینصورت منفی می‌باشد.

اگر چاه پمپاژی در مجاور یک مرز نفوذناپذیر قرار داشته باشد و جریان ماندگار در آبخوان محصور برقرار باشد، مقدار افت هد در چاه مشاهداتی به مختصات (a, b) برابر است با:

$$s(a, b) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{r'}\right) + \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{r'}\right) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r^2}{r'^2}\right) \quad (9-8)$$

مثال 1-8

چاه پمپاژی در یک آبخوان محصور مطابق شکل (7-14) نزدیک یک رودخانه قرار دارد. مقدار افت چاه را در چاه مشاهداتی به فاصله r از چاه پمپاژ به دست آورید.



شکل 7-14- چاه پمپاژ در آبخوان محصور در مجاورت مرز تغذیه

حل:

اگر بخواهیم مقدار افت هد در نقطه دلخواه به مختصات (a, b) در آبخوان محصور، در اثر پمپاژ آب از چاه A که به فاصله x از حد مرزی تغذیه (رودخانه) قرار دارد را به دست آوریم، با استفاده از تئوری چاههای مجازی، چاه تغذیه مجازی را مطابق شکل (7-14) فرض نموده و مقدار افت هد با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

با توجه به اینکه مرز تغذیه کننده در مجاور چاه پمپاژ قرار دارد، طبق اصل چاه مجازی، چاه مجازی تغذیه بوده و بنابراین با فرض دائمی بودن جریان آب زیرزمینی، افت هد برآیند در چاه مشاهداتی برابر است با:

$$s(a,b) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) - \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_0}{r'}\right)$$

r_0 شعاع تأثیر چاه می باشد. رابطه فوق را می توان به صورت زیر نیز بازنویسی نمود:

$$s(a,b) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r'}{r}\right) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{(a+x)^2 + b^2}{(a-x)^2 + b^2}\right)^{1/4}$$

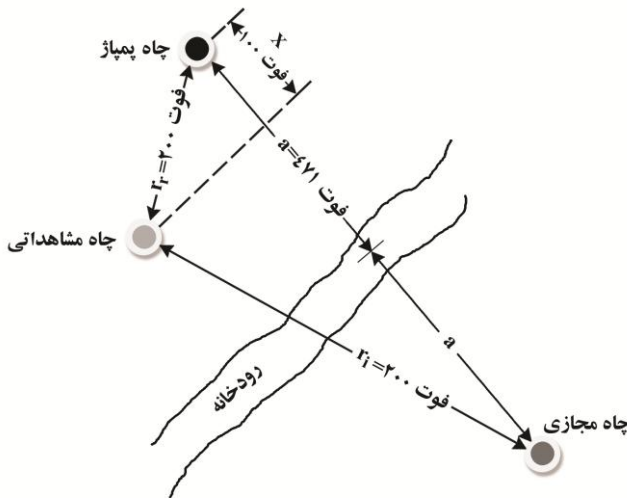
در صورتی که جریان غیردائمی باشد، مقدار افت هد در چاه مشاهداتی برابر است با:

$$s(a,b) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) - \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r'^2 S}{4Tt}\right)$$

مثال 8-2

مقدار افت هد در چاه مشاهداتی شکل (8-15) را 5500 دقیقه پس از پمپاژ آب از چاه به دست آورید. آبخوان محصور است.

$$Q = 115500 \text{ ft}^3/d, T = 4358 \text{ ft}^2/d, S = 0.0096, t = 5500 \text{ min} = 3.82 \text{ d}$$



شکل 8-15- اندازه گیری افت سطح آب در چاه مشاهداتی در مجاورت آبخوان محصور

حل:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} = \frac{200^2 \times 0.0096}{4 \times 4358 \times 3.82} = 0.005767$$

$$W(u) = 4/58$$

$$u' = \frac{r^* S}{4Tt} = \frac{86.7 \times 0.096}{4 \times 4358 \times 3/82} = 0.106625$$

$$W(u') = 1/66$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] = \frac{1155.0}{4\pi \times 4358} [4/58 - 1/66] = 6/16$$