فصل دهم

حرکت آب در لایه‌های زیرزمینی

کلّیات — جریان در لایه غیرمحصور در حالت ماندگار
شبکه جریان — مسائل
جریان آب در لایه‌های آبدار — منابع برای مطالعه بیشتر
جریان در لایه محصور در حالت ماندگار

۱-۱۰ کلّیات

مطالعه حرکت آب در زیرزمین و کاربردهای آن از مهمترین جنبه‌های هیدرولوژی آبهای زیرزمینی است. در این مورد معمولاً جریان آب در دو حالت در نظر گرفته می‌شود. یکی *حالت تعادل* (equilibrium) یا *ماندگار* (steady) و دیگری حالت *غیرتعادل* (non-equilibrium) یا *غیرماندگار* (unsteady). در حالت تعادل فرض می‌شود که سطح ایستابی (در لایه‌های آبدار آزاد) یا سطح فشار (در لایه‌های محصور) در وضعیت خود ثابت مانده و نسبت به زمان تغییر نمی‌کند. بعبارت دیگر مقدار جریان ورودی و خروجی به یک منطقه با یکدیگر معادلند. اما در حالت غیرماندگار سطح ایستابی یا سطح فشار در طی جریان آب، نسبت به زمان متغیر در نظر گرفته شده و مقادیر جریان ورودی و خروجی معادل نیستند. مسلماً حالت غیرماندگار بیشتر با واقعیت مطابق می‌باشد اما حل مسائل مربوط به جریان در حالت ماندگار بمراتب ساده‌تر از حالت غیرماندگار است. معادلات اساسی در حل مسائل آبهای زیرزمینی همان معادله دارسی، معادله پیوستگی جریان، و معادله بقاء جرم می‌باشد که در مورد لایه‌های محصور و غیرمحصور بصورت متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. چون در توصیف این معادله‌ها از ضرایب هیدرودینامیک و دیگر مشخصه‌های لایه‌های آبدار، مانند ضرایب K یا T در معادله دارسی و یا ضریب ذخیره S در معادله بقاء جرم، استفاده می‌شود لذا حل همزمان این معادله‌ها می‌تواند منجر به محاسبه ضرایب هیدرودینامیک و در نهایت شناخت لایه‌های آبدار گردد.

با استفاده از معادلات اساسی جریان و کاربرد آنها در حرکت آب زیرزمینی برای یک لایه‌آبدار غیر همگن و غیر همروند که درآن ضریب هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف متفاوت باشد (K_x , K_y , K_z) تغییرات بار فشار (h) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad (۱-۱۰)$$

که اگر آکیفر را همروند فرض کنیم در این صورت $K_z = K_y = K_x$ بوده و خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad (۲-۱۰)$$

این معادله را بصورت ساده زیر نیز نمایش می‌دهند.

$$\nabla^2 h = 0 \qquad (۳-۱۰)$$

معادله ۱۰-۲ که یک معادله دیفرانسیلی درجه ۲ می‌باشد بنام **معادله لاپلاس** معروف است و نه تنها در مورد جریان آب زیرزمینی بلکه برای هدایت **گرما و الکتریسیته** نیز بکار می‌رود. در این معادله تغییرات بار فشار در جهات z, y, x لحاظ شده و این تغییرات نسبت به زمان ثابت فرض شده‌اند. معادلاتی مشابه معادله لاپلاس توسط دو نفر دیگر که مستقل از هم روی جریان آب زیرزمینی کار کرده بودند ارائه شده است. این دو نفر عبارت بودند از **دوپوئی** در سال ۱۸۶۳ (Jules Dupuit) و **فورشایمر** در سال ۱۸۸۶ (P. Forchheimer). بهمین دلیل در مطالعات آبهای زیرزمینی از این دو نفر همیشه یاد می‌شود.

در حالتی که آکیفر غیر همروند و غیر همگن بوده و جریان را در وضعیت غیر ماندگار در نظر بگیریم بار فشار نه تنها در جهات مختلف بلکه نسبت به زمان نیز تغییر می‌کند. در این صورت بجای معادله ۱۰-۱ معادله زیر بدست می‌آید (به منابع شماره‌های ۳ و ۴ مراجعه شود):

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۴-۱۰)$$

در این معادله S_s ضریب ذخیره ویژه آکیفر می‌باشد. چنانچه آکیفر را همروند فرض کنیم در این صورت K_x و K_y و K_z برابر بوده و بجای آنها می‌توانیم هدایت هیدرولیکی را در تمام جهات یکسان و برابر K در نظر بگیریم لذا خواهیم داشت:

$$K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۵-۱۰)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۶-۱۰)$$

چون ضریب ذخیره ویژه S_s برابر است با:

$$S_s = \frac{S}{b} \qquad (۷-۱۰)$$

که در آن b ضخامت آکیفر و S ضریب ذخیره آکیفر می‌باشد لذا می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{K\,b} \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۸-۱۰)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۹-۱۰)$$

در معادله فوق که یک معادله دیفرانسیلی جزئی درجه ۲ می‌باشد اگر آکیفر محصور باشد S ضریب ذخیره و اگر آکیفر آزاد باشد بجای S باید آبدهی مخصوص (S_y) را قرار داد. بسیاری از

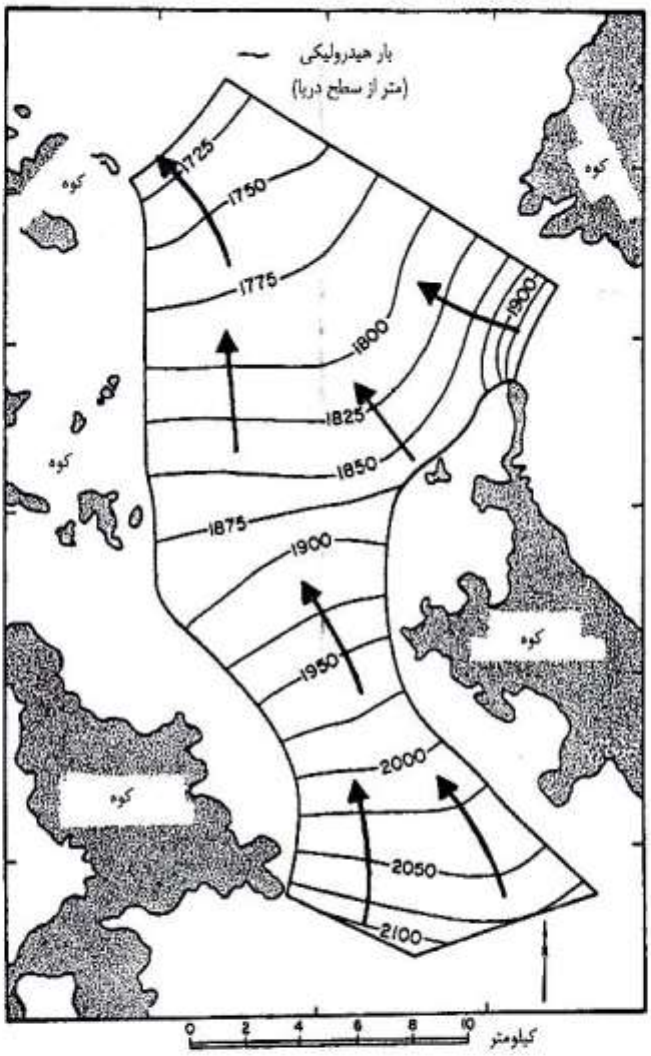
مسائل مربوط به آبهای زیرزمینی در گرو حل معادله فوق می‌باشد. با حل معادله لاپلاس بسیاری از خصوصیات جریان آب زیرزمینی قابل تفسیر می‌باشد.

۱۰-۲ شبکه جریان

همانطور که گفته شد در وضعیت تعادل، برای توصیف جریان آب در لایه‌های آبدار همگن و همروند از *معادله لاپلاس* (Laplace) استفاده می‌شود که حل آن به یکی از روشهای تحلیلی، عددی و یا ترسیمی انجام پذیر است. گرچه راه حل تحلیلی این معادله با انجام فرضیاتی بسیار ساده می‌باشد اما استفاده از روشهای تجربی و ترسیمی نه تنها به ساده شدن کار کمک می‌کند بلکه با رسم وضعیت جریان می‌توان نمایه‌های سرعت و جهت حرکت آب زیرزمینی را بصورت عینی مشاهده کرد. در حل ترسیمی معادله لاپلاس در منطقه جریان دو گروه منحنی که همدیگر را بصورت عمودی قطع می‌کنند مورد بررسی قرار می‌گیرند. یک دسته از این منحنی‌ها نشان دهنده جهت جریان هستند که بنام *خطوط جریان* (stream lines) معروفند و دسته دیگر نشان دهنده پتانسیل آب می‌باشند که بنام *خطوط هم‌پتانسیل* (equipotential) نامیده می‌شوند. منطقه محصور بین دو خط جریان را *لوله جریان* گویند. رسم خطوط هم-پتانسیل و خطوط جریان در یک منطقه از جریان آب زیرزمینی تشکیل چهار گوشه‌هایی را می‌دهند که *شبکه جریان* (flow net) نام دارد.

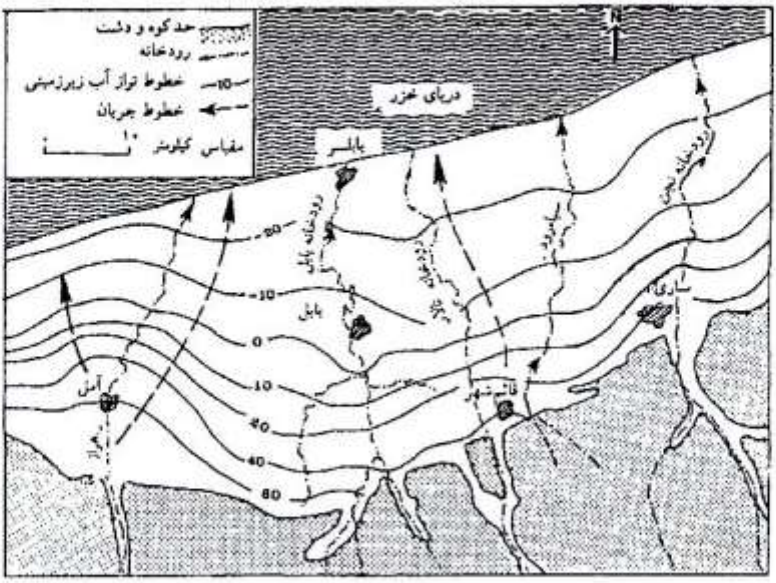
اگر فرضاً در یک لایهٔ آبدار غیرمحصور اقدام به حفر چندین حلقه چاه کرده و عمق سطح ایستابی (H) را با وسایلی مانند عمق‌یاب اندازه‌گیری کنیم با داشتن رقوم (تراز) سطح آب زیرزمینی می‌توانیم نقشه تغییرات سطح ایستابی را با فواصل ارتفاعی مورد نظر (ΔH) رسم کنیم. چنین خطوطی که نشان دهنده تراز سطح ایستابی یا سطح فشار هستند خطوط هم-پتانسیل نام دارند. مسلم است که هرجا این خطوط بهم نزدیک شوند نشان دهنده شیب هیدرولیکی زیاد و هرجا از همدیگر فاصله بگیرند، نشان می‌دهد که در آن موقعیت شیب هیدرولیکی کم است. چون اصولاً حرکت به دلیل اختلاف پتانسیل بوده و در مورد آب زیرزمینی نیز این اصل صادق می‌باشد، لذا در صورتی که در یک منطقه آب زیرزمینی اختلاف پتانسیل، وجود داشته باشد حرکت آب نیز وجود دارد و این حرکت در جاهایی که خطوط هم-پتانسیل بهم نزدیکترند سریعتر می‌باشد. حرکت از محلی که پتانسیل آن زیاد است به سمت محلی که پتانسیل آن کم است انجام شده و جهت حرکت در هر نقطه عمود بر خطوط هم-پتانسیل می‌باشد. شکل ۱۰-۱ نقشه خطوط هم-پتانسیل را در یک دشت نشان می‌دهد که در آن پتانسیل سطح ایستابی از ۲۱۰۰ متر (ارتفاع از سطح دریا) در قسمت جنوب تا ۱۷۲۵ متر در شمال‌غربی تغییر می‌کند. در این شکل خطوط جریان بصورت پیکانهای عمود بر خطوط هم-پتانسیل نشان داده شده است . در شمال شرقی نقشه خطوط هم-پتانسیل نزدیک به هم می‌باشند که

نشان‌دهنده بالا بودن گرادیان هیدرولیکی در این قسمت از دشت می‌باشد.



شکل ۱۰-۱ تیپ خطوط هم-پتانسیل در یک دشت آب زیرزمینی

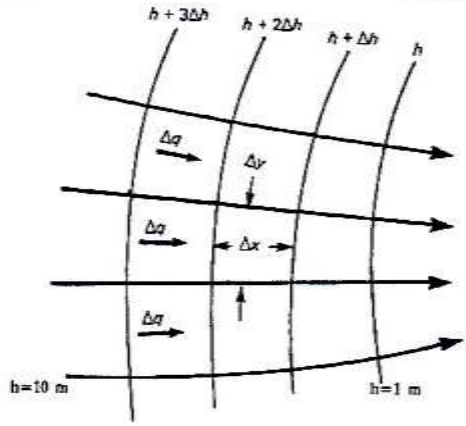
در شکل ۱۰-۲ نیز خطوط هم-پتانسیل آب زیرزمینی برای بخشی از جلگه مازندران رسم شده است. بطوریکه ملاحظه می‌شود در قسمت شمالی آمل خطوط هم-پتانسیل نزدیک هم بوده و نشانگر آن است که گرادیان هیدرولیکی در این قسمت از جلگه زیاد می‌باشد. دراین شکل جهت جریان آب زیرزمینی بصورت پیکانهای خط چین نشان داده شده است که نشان می‌دهد در تمام قسمت‌های جلگه جهت جریان آب زیرزمینی بطرف دریای مازندران است.



شکل ۱۰-۲ نقشه خطوط تراز سطح ایستابی در بخشی از جلگه مازندران

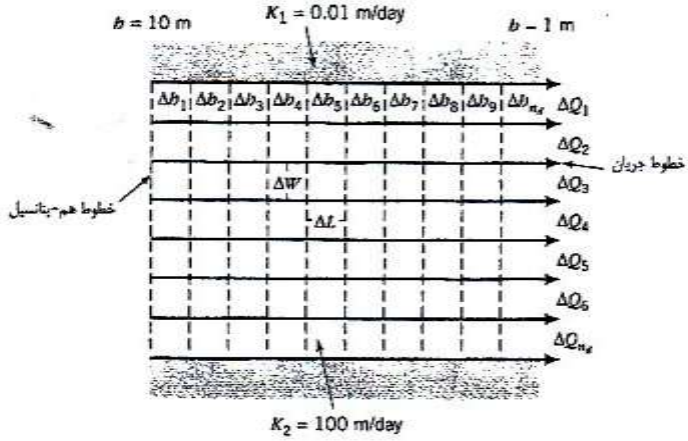
آنچه در شکل ۱۰-۲ مشاهده می‌شود مربوط به خط تراز سطح ایستابی است که بعنوان خط هم-پتانسیل در نظر گرفته شده است. برای لایه‌های آبدار تحت فشار نیز رسم خطوط هم-پتانسیل مرسوم است که در آن بجای سطح ایستابی از تراز فشار یا پیزومتریک استفاده می‌شود. بعبارت دیگر نقشه‌های *خطوط هم-فشار* (isopiez) رسم می‌شود.

اگر محدوده مشخصی را از یک منطقه که آب زیرزمینی در آن جریان دارد در نظر بگیریم و فرض کنیم خطوط هم-پتانسیل با فواصل Δh از یکدیگر در یک شکل رسم شده باشند چنانچه روی این شکل خطوط جریان راکه عمود بر خطوط هم-پتانسیل هستند نیز طوری رسم کنیم که فواصل آنها از یکدیگر از نظر ظاهری تقریباً مساوی فواصل خطوط هم-پتانسیل باشد در اینصورت محدوده مورد نظر ما به مجموعه‌ای مرکب از مربعها تبدیل می‌شود که به آن شبکه جریان (flow net) گویند. در شکل ۱۰-۳ مشاهده می‌شود که اولین خط هم-پتانسیل در سمت راست شکل h و بقیه خطوط هر کدام از نظر پتانسیلی به اندازه Δh از یکدیگر فاصله دارند ولی فواصل آنها از یکدیگر روی نقشه به لحاظ ترسیمی Δx است، در این شکل خطوط جریان بفواصل Δy از یکدیگر که تقریباً مساوی Δx است ($\Delta x = \Delta y$) رسم شده‌اند و در نهایت منطقه به یک شبکه جریان تبدیل شده است. همانطور که گفته شد فاصله هر دو خط جریان را یک لوله جریان گویند که در هر لوله مقدار جریانی معادل Δq در حرکت است و مقدار کل جریان در منطقه حاصل جمع Δq ها می‌باشد ($Q = \Sigma \Delta q$).



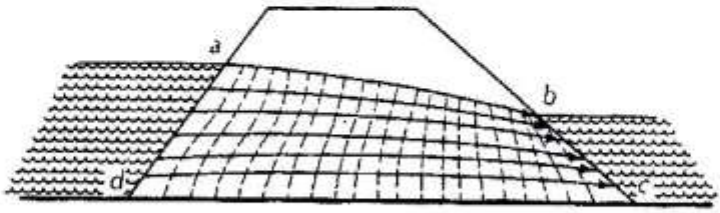
شکل ۱۰-۳ یک شبکه دو بعدی جریان آب زیرزمینی

برای لایه‌های تحت فشار نیز می‌توان شبکه جریان را رسم نمود. مثلاً در شکل ۱۰-۴ یک لایه آبدار تحت فشار با هدایت هیدرولیکی ۱۰۰ متر در روز بین دو لایه نسبتاً غیرقابل نفوذ که هدایت هیدرولیکی آنها ۰/۰۱ متر در روز می‌باشد محصور شده است. بار هیدرولیکی (h) در سمت چپ ۱۰ و در سمت راست ۱ متر می‌باشد. در اینجا نیز ۱۰ خط هم-پتانسیل با فواصل ΔL و ۸ خط جریان با فواصل Δw رسم شده‌اند که در هر لوله جریان مقدار دبی ΔQ می‌باشد. این مجموعه نیز شبکه جریان نامیده می‌شود. توجه شود که در شبکه جریان باید مرزها مشخص باشد، مثلاً در این شکل محدود جریان در قسمت‌های بالا و پایین لایه‌های محصورکننده و در طرفین محدوده‌هایی است که برای خود مشخص کرده‌ایم.



شکل ۱۰-۴ شبکه جریان در یک لایه تحت فشار

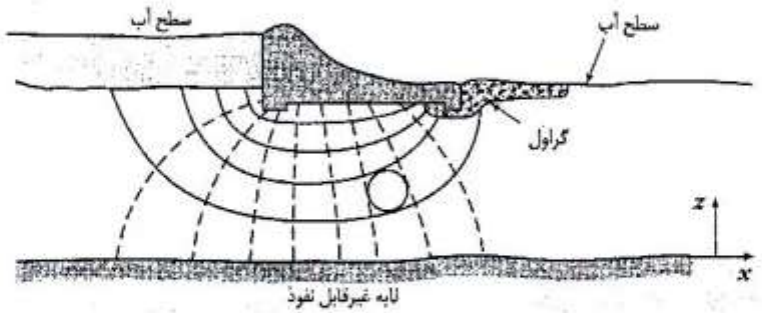
برای تمام کارهای عملی می‌توان شبکه جریان را رسم و مورد استفاده قرارداد. مثلاً شکل ۱۰-۵ شبکه جریان را برای یک سد خاکی که روی لایه غیرقابل نفوذ احداث شده و در طرفین آن آب می‌باشد در محدوده abcd نشان می‌دهد. این شکل دارای ۲۲ خط هم-پتانسیل و ۷ خط جریان است که آب در ۶ لوله جریان از سمت چپ (خط هم-پتانسیل ad) به سمت راست (خط هم-پتانسیل bc) در حرکت می‌باشد. در این شکل خط ad یک خط هم-پتانسیل است که برای



شکل ۱۰-۵ شبکه جریان برای نشان دادن نفوذ آب در داخل یک سد خاکی

تمام نقاط آن بار هیدرولیکی برابر ارتفاع آب در پیشانی سدّ می‌باشد. بطریق مشابه خط bc یک خط هم-پتانسیلی دیگر است که برای تمام نقاط آن بار هیدرولیکی برابر ارتفاع آب در پایاب سدّ می‌باشد. این دو خط مرزهای طرفین شبکه جریان در نظر گرفته می‌شوند. خط ab بالاترین خط جریان و dc پایین‌ترین خط جریان می‌باشند که بعنوان مرزهای بالا و پایین شبکه جریان در نظر گرفته شده‌اند.

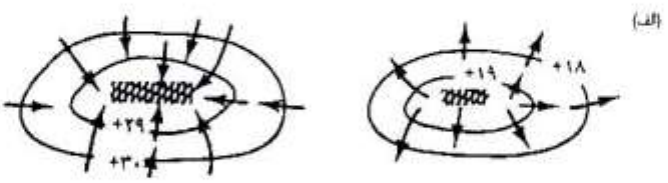
در شکل ۱۰-۶ نیز شبکه جریان برای محاسبهٔ نفوذ آب در زیر یک سد رسم شده است. در این شکل لایه غیرقابل نفوذ پایین و کف سد دو خط مرزی جریان بوده و کف مخزن در سمت چپ و سطح زمین در قسمت راست که آب نفوذی از آن خارج می‌شود دو خط مرزی هم-پتانسیل می‌باشند.



شکل ۱۰-۶ شبکه جریان در زیر یک سد که به فاصله‌ای روی لایه غیر قابل نفوذ ساخته شده است.

شبکه جریان می‌تواند تصویر گویایی از وضعیت حرکت آب در زیرزمین را بدست دهد. مثلاً اگر در رسم نقشه آب زیرزمینی منحنی‌های بسته مشاهده گردید این نقاط نشان دهنده

محل‌های تغذیه آب زیر زمینی (شکل ۱۰-۷ الف) و یا نقاط برداشت آب زیر زمینی می‌باشند (شکل ۱۰-۸ ب). چنانچه پتانسیل در جهت نزدیک شدن به مرکز دایره کاهش یابد نشان دهنده یک نقطه برداشت و هر زمان که با نزدیک شدن به مرکز دایره پتانسیل افزایش یابد نشان دهنده یک نقطه تغذیه یا بالا بودن سطح آب زیرزمینی است.

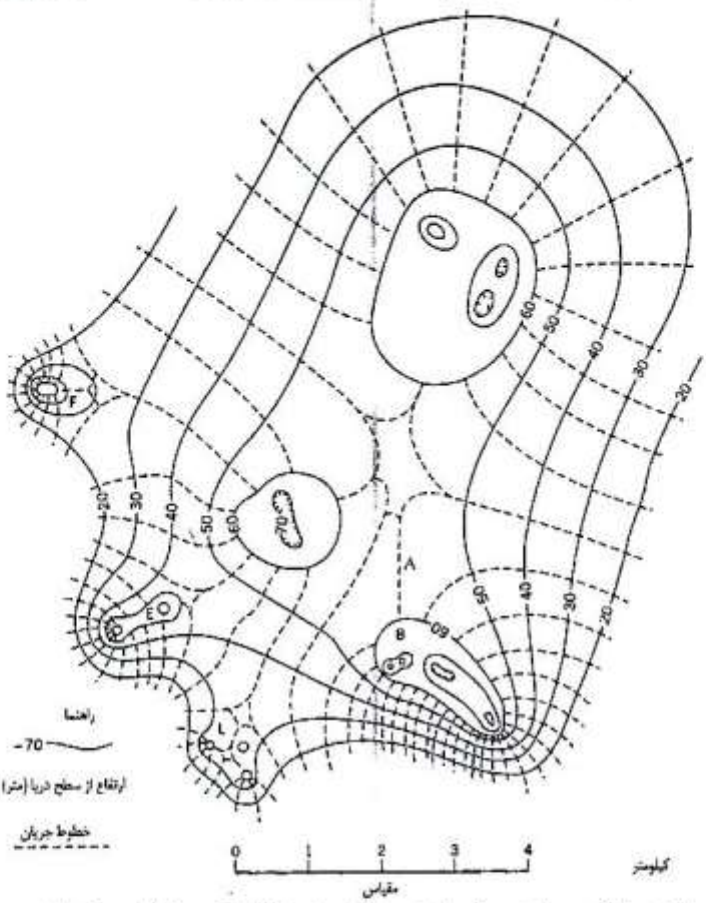


شکل ۱۰-۷ منحنی‌های بسته در یک نقشه آب زیرزمینی. الف ـ منطقه تغذیه (رقوم سطح آب به سمت خارج کاهش می‌یابد) ب ـ منطقه برداشت (رقوم سطح آب به سمت داخل کاهش می‌یابد)

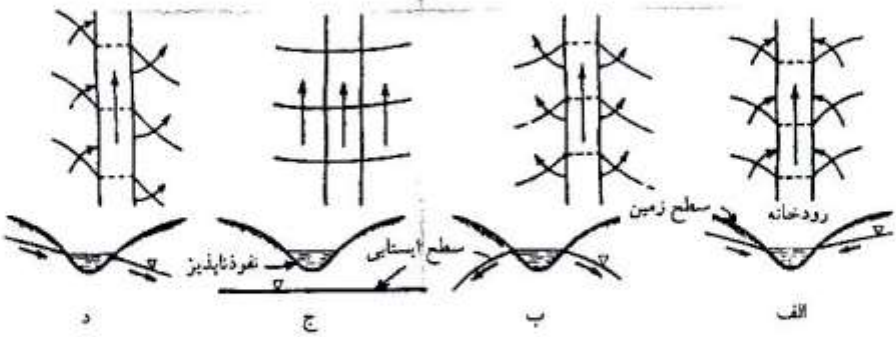
شکل ۱۰-۸ نیز یک شبکه جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهد که بر اساس عمق سطح ایستابی رسم شده است. خطوط جریان بصورت خط‌چین عمود بر خطوط هم-پتانسیل‌ها رسم شده‌اند. با توجه به اینکه هر چه از مراکز دوایر بسته دور می‌شویم عمق سطح ایستابی کاهش می‌یابد این امر نشان‌دهنده پایین بودن سطح آب زیرزمینی در این نقاط می‌باشد. بطوریکه مشاهده می‌شود در این دشت چندین نقطه که با علائم A، B، E، L و F مشخص شده‌اند وجود دارند که در آنها سطح آب زیرزمینی پایین است و لذا نقاط برداشت از آب زیرزمین می‌باشند.

در شکل ۱۰-۹ خطوط جریان و هم-پتانسیل در ۴ وضعیت برای یک رودخانه رسم شده است. حالت الف که در آن خطوط هم-پتانسیل با زوایای حاده از حاشیه رودخانه دور می‌شوند نشان دهنده آن است که رودخانه **تغذیه شونده** (effluent) است حال آنکه در حالت ب خطوط هم-پتانسیل با زوایه منفرجه از رودخانه دور می‌شوند و نشان از آن دارد که رودخانه تغذیه کننده(influent) است. در حالت ج خطوط هم پتانسیل عمود بر حاشیه رودخانه است که نشان می‌دهد رودخانه نه تغذیه کننده است و نه تغذیه شونده. در حالت د، رودخانه از یک طرف (سمت چپ) تغذیه شونده و از سمت راست تغذیه کننده است. بطوریکه مشاهده می‌شود با رسم شبکه جریان در اطراف یک رودخانه یا چاه می‌توان به رفتار هیدروژئولوژیکی آن پی‌برد.

بطور کلی شبکه جریان کاربردهای زیادی داشته و علاوه بر ارائه تصویر عینی از جهت حرکت آب می‌توان، با تحلیل آن به بسیاری از خصوصیات جریان پی‌برد که از جمله آنها تعیین کمّی مقدار جریان است. اگر به شکل ۱۰-۱۰ توجه شود در آن قسمتی از یک شبکه جریان و چگونگی حرکت آب در داخل یکی از لوله‌های جریان نشان داده شده است. بطوریکه مشاهده می‌شود خطوط هم-پتانسیل ۱، ۲، ۳ و ۴ بفاصله dl از یکدیگر رسم شده و فاصله خطوط جریان از همدیگر dm است،لذا اگر فرضاً مقدار دبی بین دو خط هم‌پتانسیل ۱ و ۲ را Δq درنظر



شکل ۱۰-۸ شبکه جریان در یک دشت و نشان دادن نقاطی که سطح آب در آنها پایین است. خطوط همپتانسیل (خطوط سیاه) بر اساس عمق سطح آب رسم شده‌اند.



شکل ۱۰-۹ ارتباط بین آب زیرزمینی و آب سطحی الف ـ رودخانه لایه آبدار را زهکشی می‌کند ب ـ رودخانه‌لایه آبدار را تغذیه می‌کند ج ـ رودخانه با لایه آبدار ارتباط مستقیم ندارد. د ـ رودخانه از سمت چپ لایه آبدار را زهکشی کرده و از طرف دیگر (سمت راست) آن را تغذیه می‌کند.

بگیریم براساس قانون دارسی مقدار دبی برای واحد عرض لایه آبدار عبارت است از:

$$\Delta q = KAi \qquad (۱۰-۱۰)$$

چون سطح مقطع جریان (A) برابر 1×(dm) می‌باشد لذا خواهیم داشت

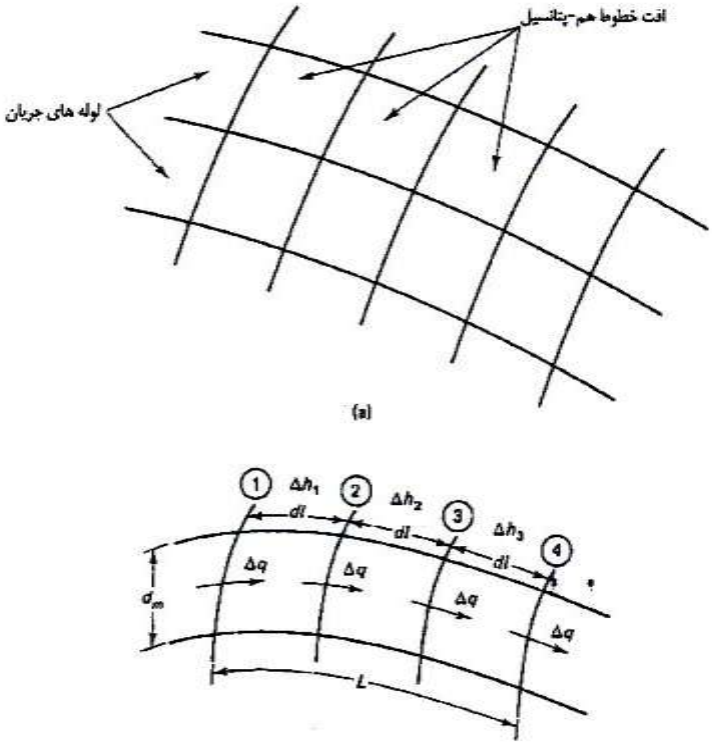
$$\Delta q = K(dm \times 1)\left(\frac{\Delta h_1}{dl}\right) \qquad (۱۱-۱۰)$$

و برای همان مقدار جریان که بین دو خط هم‌پتانسیل ۲ و ۳ عبور می‌کنند نیز بطریق مشابه خواهیم داشت:

$$\Delta q = K(dm \times 1)\left(\frac{\Delta h_2}{dl}\right) \qquad (۱۲-۱۰)$$

چون $\Delta h = \Delta h_3 = \Delta h_2 = \Delta h_1$ می‌باشد اگر مقدار کل اختلاف فشار در دو طرف شبکه (h) را به n_d که تعداد مربع‌های موجود در داخل یک لوله جریان است قسمت تقسیم کنیم همان Δh بدست خواهد آمد.

$$\Delta h = \frac{h}{n_d} \qquad (۱۳-۱۰)$$



شکل ۱۰-۱۰ قسمتی از یک شبکه جریان (a) و یک لوله جریان (b)

لذا Δq برابر خواهد بود با:

$$\Delta q = K\frac{dm}{dl}\frac{h}{nd} \qquad (۱۴-۱۰)$$

حال چنانچه در یک شبکه جریان تعداد لوله‌های جریان نیز nf باشد مقدار کل دبی یا q حاصل جمع Δq ها بوده و در نتیجه:

$$q = \Sigma \Delta q \qquad (۱۵-۱۰)$$

$$q = nf\,(\Delta q)$$

$$q = nf\left(K\frac{dm}{dl}\frac{h}{nd}\right)$$

$$q = \frac{nf}{nd} K \frac{dm}{dl}(h) \qquad (۱۶-۱۰)$$

با فرض این‌که شبکه بصورت مربعی رسم شده باشد $dm = dl$ بوده و در نتیجه:

$$q = \frac{nf}{nd} K\,(h) \qquad (۱۷-۱۰)$$

بنابراین از روی این معادله می‌توان با رسم یک شبکه جریان و مشخص کردن تعداد لوله‌های جریان (nf) و تعداد تقسیمات پتانسیلی (nd) و نیز داشتن اختلاف پتانسیل بین دو طرف شبکه (h) و داشتن ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار (K)، مقدار جریان آب زیرزمینی یا دبی در واحد عرض (q) را بدست آورد. دقت این روش بستگی به میزان دقت در رسم خطوط جریان و خطوط هم-پتانسیل دارد. توجه شود که معادله ۱۰-۱۷ مقدار جریان را در واحد عرض بدست می‌دهد و اگر بخواهیم برای کل عرض مورد نظر مقدار جریان را بدست آوریم باید آن را در عرض لایه آبدار که b می‌باشد ضرب کنیم. در نتیجه معادله مذکور به صورت زیر خواهد بود که در آن T قابلیت انتقال لایه آبدار بوده و حاصل ضرب K.b می‌باشد.

$$q = \frac{nf}{nd} K.b.h = \frac{nf}{nd} T.h \qquad (۱۸-۱۰)$$

در رسم شبکه جریان باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

الف- ابتدا منطقه‌ای را که جریان آب زیرزمینی صورت می‌گیرد بصورت یک مستطیل تقریبی مشخص کنید. البته لازم نیست که منطقه حتماً شکل مستطیل داشته باشد.

ب - در منطقه مشخص شده خطوط هم-پتانسیل و خطوط جریان را رسم کنید.

ج - دو ضلع مستطیل که مرزهای منطقه می‌باشد خطوط جریان و دو ضلع یا مرزهای دیگر آن خطوط هم-پتانسیل خواهد بود.

د ـ سعی شود خطوط هم-پتانسیل و خطوط جریان نسبتاً عمود بر هم رسم شوند.

هـ ـ شبکه بندی جریان حتی‌الامکان بصورت مربعی رسم گردد.

و ـ لایه‌های غیرقابل نفوذ بالا و پایین بعنوان خطوط جریان درنظر گرفته شوند.

ز ـ سطح آب در دو طرف شبکه بعنوان خطوط هم-پتانسیل تلقی شود.

ح ـ سطح منطقه نشت (seepage surface) نیز یک خط جریان در نظر گرفته شود. بنابراین شبکه جریان از دو طرف به خطوط جریان و از دو طرف دیگر به خطوط هم-پتانسیل محدود می‌شود.

ط ـ شرایط مرزی را مشخص کرده و ابتدا خطوط جریان را رسم کنید. تعداد خطوط جریان می‌تواند به دلخواه باشد اما این تعداد نه آنقدر زیاد باشد که شبکه را به اصطلاح شلوغ کند و نه آنقدر کم که از دقت کار بکاهد.

ی ـ با رسم خطوط عمود بر جهت جریان، خطوط هم-پتانسیل را رسم کنید. خطوط هم-پتانسیل حتی‌الامکان عمود بر خطوط جریان رسم شوند. هرچند در بعضی قسمتها ممکن است این امر امکان‌پذیر نباشد.

ک ـ با آزمون و خطا این عمل را تکرار کنید تا یک شبکه مطلوب رسم شود. توجه داشته باشید که برای یک موقعیت، شما می‌توانید بی‌نهایت شبکه رسم کنید که اگر در تمام آنها اصول فوق رعایت شده باشد نتیجه محاسبه تقریباً مساوی خواهد بود. در هر حال دقت و مهارت در رسم شبکه جریان در نتیجه نهائی کار بسیار مؤثر است.

● **مثال ۱۰-۱**

یک سد خاکی به پهنای ۱۰۰ فوت روی لایه قابل نفوذ ساخته شده است (شکل ۱۰-۱۱). بطوریکه ارتفاع آب در قسمت پیشانی سد (فرازآب) ۴۰ فوت و در قسمت پایاب آن ۵ فوت می‌باشد. عمق لایه غیرقابل نفوذ نسبت به سطح زمین ۶۰ فوت و ضریب هدایت هیدرولیکی مواد زیر سد ۱۵۰ فوت در روز است. برای کاهش نفوذ، صفحات مانع جریان (sheet pile) در جلو سد نصب شده است. با این وضعیت ضمن رسم شبکه جریان مقدار جریانی راکه از زیر سد نفوذ کرده و از قسمت فرازآب به پایاب منتقل می‌شود محاسبه کنید.

حل

مطابق شکل ۱۰-۱۱ شبکه جریان را با رسم ۵ لوله جریان و ۱۷ تقسیم‌بندی پتانسیلی رسم می‌کنیم. اولین خط هم‌پتانسیل سطح زمین در جلو سد و آخرین خط هم-پتانسیل سطح زمین در پاشنه سد می‌باشد. اولین خط هم جریان خط مماس بر کف سد و آخرین آنها سطح لایه غیرقابل نفوذ است. توجه داشته باشید که با در نظر گرفتن لایه‌های غیرقابل نفوذ در واقع ۶ خط جریان و ۱۸ خط هم‌پتانسیل در این شکل رسم شده است. باتوجه به این شبکه خواهیم داشت :

$n_f = 5$

$n_d = 17$

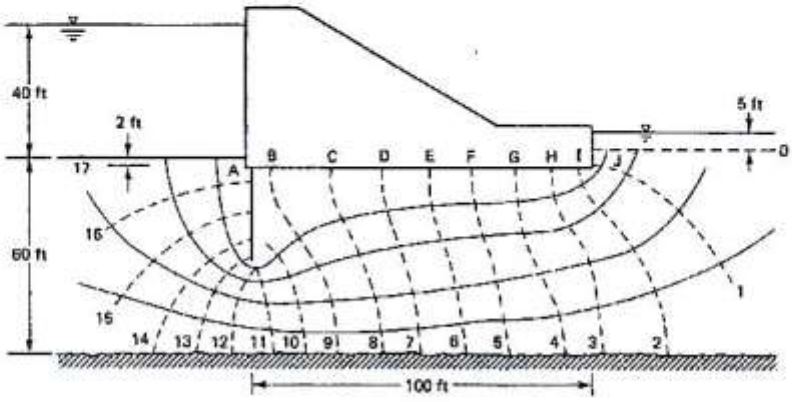
$K = 150$ ft/day

$h = (40 - 5) = 35$ ft

$$q = \frac{n_f}{n_d} Kh$$

$$q = \frac{5}{17} (150)(35) = 1544 \text{ ft}^3/\text{day.ft}$$

وچون عرض یا پهنای سد ۱۰۰ فوت است لذا مقدار کل دبی که از زیر سد عبور می‌کند ۱۵۴۴۰۰ فوت مکعب در روز می‌باشد.



شکل ۱۰-۱۱

فرمول ۱۰-۱۷ برای وضعیتی است که خاک همروند بوده و ضریب K در تمام جریان یکسان باشد اما در صورتی که منطقه جریان وضعیت غیرهمروند داشته و مقادیر K در جهات افقی (K_x) و عمودی (K_z) متفاوت باشند معادله ۱۰-۱۷ بصورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$q = \frac{n_f}{n_d} (\sqrt{K_x} . K_z) (h) \qquad (۱۰-۱۹)$$

در این فرمول بجای ضریب K میانگین هندسی آن بصورت ($\sqrt{K_x} K_z$) منظور شده است.

● **مثال ۱۰-۲**

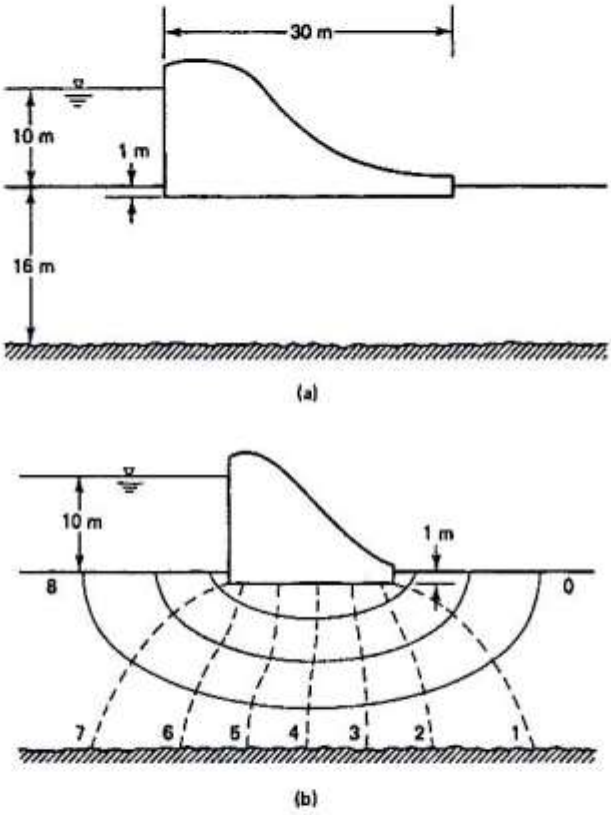
در شکل ۱۰- ۱۲ که مربوط به یک سد بتونی احداث شده روی لایه نفوذپذیر می‌باشد مقادیر K_x و K_z در زیر بدنه سد به ترتیب ۳۰ و ۶ متر در روز است با رسم خطوط جریان و هم-پتانسیل ، مقدار نشت آب از زیر سد را برای هر متر محاسبه کنید.

حل

با رسم شبکه جریان $n_f = 4$ و $n_d = 8$ می‌باشد. لذا خواهیم داشت:

$$q = \frac{n_f}{n_d} (\sqrt{K_x K_z}) (h)$$

$$q = \frac{4}{8} [\sqrt{(30)(6)}] (10) = 67 \ m^3/day.m$$



شکل ۱۰-۱۲

حال موضوع را بصورت دیگری مطرح می‌کنیم. در شکل ۱۰-۴ با رسم شبکه جریان مشاهده می‌شود که جریان عبوری از داخل لایه آبدار به مقادیر ΔQ_1 و ΔQ_2 و ... ΔQ_{nd} تقسیم شده است که هر کدام بصورت مساوی از داخل یک لوله جریان عبور می‌کنند. خطوط هم-پتانسیل نیز با تقسیم‌بندی‌های مساوی Δh_1 ، Δh_2 ، ... و Δh_{nd} رسم شده‌اند. در این شکل فاصله خطوط جریان ΔW و فاصله خطوط هم-پتانسیل ΔL می‌باشند که چون سعی شده است شبکه مربعی باشد لذا $\Delta L \approx \Delta W$ است. اگر مقدار جریان را از داخل یک لوله جریان در نظر

بگیریم با استفاده از فرمول دارسی خواهیم داشت:

$$\Delta Q = KiA \qquad (۲۰-۱۰)$$

سطح مقطع (A) برابر است با حاصلضرب ارتفاع (ΔW) در عرض لایه آبدار (b) لذا:

$$A = b\,(\Delta W) \qquad (۲۱-۱۰)$$

چنانچه اختلاف پتانسیل بین دو خط هم-پتانسیل Δh باشد با توجه به فاصله ΔL بین آنها خواهیم داشت:

$$\text{گرادیان هیدرولیکی} = i = \frac{\Delta h}{\Delta L} \qquad (۲۲-۱۰)$$

بنابر این معادله ۱۰-۱۸ بصورت زیر خواهد بود.

$$\Delta Q = K\left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right)[b\,(\Delta W)] = Kb\,\Delta h\,\frac{\Delta W}{\Delta L} \qquad (۲۳-۱۰)$$

و چون Kb برابر ضریب انتقال T می‌باشد ($T = Kb$) لذا:

$$\Delta Q = T\,\Delta h\,\frac{\Delta W}{\Delta L} \qquad (۲۴-۱۰)$$

چنانچه ΔW و ΔL را مساوی فرض کنیم $\frac{\Delta W}{\Delta L} = 1$ بوده و اگر تعداد لوله‌های جریان n_f باشد مقدار کل جریان ($Q = n_f\,(\Delta Q)$) خواهد بود که خواهیم داشت:

$$Q = \Sigma\Delta Q = n_f\,(\Delta Q) \qquad (۲۵-۱۰)$$

$$Q = n_f\,T\Delta h \qquad (۲۶-۱۰)$$

Δh اختلاف پتانسیل در طرفین دو خط هم-پتانسیل است. اگر از ابتدا تا انتهای جریان به تعداد n_d خط هم-پتانسیل داشته باشیم در اینصورت اختلاف کل پتانسیل بین دو طرف جریان (ΔH) برابر خواهد بود با:

$$\Delta H = n_d\,(\Delta h) \qquad (۲۷-۱۰)$$

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{n_d} \qquad (۲۸-۱۰)$$

بنابراین معادله ۱۰-۲۶ بصورت زیر در می‌آید:

$$Q = n_f\,T\left(\frac{\Delta H}{n_f}\right) \qquad (۲۹-۱۰)$$

$$Q = \frac{n_f}{n_d}\,T\,\Delta H \qquad (۳۰-۱۰)$$

از روی این معادله که مشابه معادله ۱۰-۱۷ و ۱۰-۱۸ می‌باشد، می‌توان با رسم شبکه جریان قابلیت انتقال لایه آبدار را بدست آورد.

● مثال ۱۰-۳

با توجه به شکل ۱۰-۸ اگر از نقطه A روزانه یک میلیون مترمکعب آب برداشت شود قابلیت انتقال لایه آبدار در این دشت چقدر است.

حل

در شکل مشاهده می‌شود که در اطراف این نقطه (A) تعداد ۱۵ لوله جریان و ۳ خط هم-پتانسیل رسم شده است لذا:

$n_d = 3$

$n_f = 15$

$Q = 10^6\ m^3/day$

$\Delta H = 60 - 30 = 30\ m$

$$Q = \frac{n_f}{n_d} T.\Delta H$$

$$T = \frac{n_d}{n_f}\ \frac{Q}{\Delta H} = \frac{(3)\ (10^6\ m^3/d)}{(15)(30\ m)}$$

$$= 6670\ m^2/\ day$$

البته نباید انتظار داشت که شبکه جریان همیشه و الزاماً از مربع تشکیل شده باشد زیرا در لایه های غیرهمگن که جریان از محیطی با هدایت‌های هیدرولیکی مختلف می‌گذرد ممکن است بجای مربع تعدادی مستطیل داشته باشیم. مثلاً شکل ۱۰-۱۳ شرایطی را نشان می‌دهد که در قسمتی از لایه آبدار هدایت هیدرولیکی ۱۰۰ و در قسمت دیگر ۲۰۰ متر در روز است. در بخش اول به ازاء طول ΔL_1 بار هیدرولیکی ۱ متر تغییر می‌کند و در آن فاصله دو خط جریان (ΔW_1) طوری است که $\Delta W_1 = \Delta L_1$ بوده و شبکه مربعی است. اما در قسمت دوم که هدایت هیدرولیکی زیادتر می‌باشد برای تغییر بارهیدرولیکی ۱ متر باید طول ΔL_2 طی شود که مقدار آن بمراتب بزرگتر از ΔW_2 بوده و شبکه مستطیلی خواهد بود. از آنجایی که مقدار دبی که از هر لوله جریان عبور می‌کند ثابت است بر طبق معادله ۱۰-۲۴ خواهیم داشت:

$$\Delta Q = T_1\ \Delta h_1\ \frac{\Delta W_1}{\Delta L_1} \qquad (۱۰-۳۱)$$

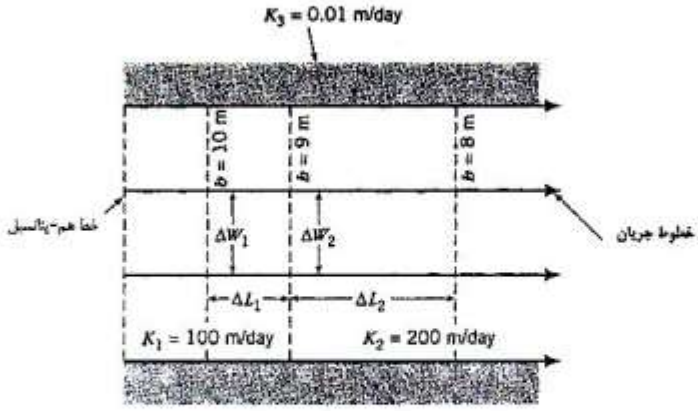
$$\Delta Q = T_2\ \Delta h_2\ \frac{\Delta W_2}{\Delta L_2} \qquad (۱۰-۳۲)$$

$$\Delta Q = T_1\ \Delta h_1\ \frac{\Delta W_1}{\Delta L_1} = T_2\ \Delta h_2\ \frac{\Delta W_2}{\Delta L_2} \qquad (۱۰-۳۳)$$

چون $\Delta h_1 = \Delta h_2$ می‌باشد لذا:

$$T_1\ \frac{\Delta W_1}{\Delta L_1} = T_2\ \frac{\Delta W_2}{\Delta L_2} \qquad (۱۰-۳۴)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2}\ \frac{\Delta W_2}{\Delta W_1} \qquad (۱۰-۳۵)$$



شکل ۱۰-۱۳ نمونه‌ای از شبکه جریان در یک لایه آبدار تحت فشار غیرهمگن

چنانچه $\Delta W_1 = \Delta W_2$ باشد خواهیم داشت:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} \qquad (۳۶-۱۰)$$

این معادله نشان می‌دهد که در هر کجای لایه آبدار قابلیت انتقال افزایش یابد طول هر یک از اجزاء شبکه بهمان نسبت افزایش می‌یابد.

● مثال ۱۰-۴

با در نظر گرفتن شکل ۱۰-۱۳ حساب کنید مقدار دبی عبوری از یک لوله جریان بطول ΔL_2 را. فرض کنید $\Delta W_1 = \Delta W_2 = \Delta L_1 = 10m$ و عرض لایه آبدار ۵۰ متر باشد.

حل

$$\Delta Q = T\Delta h \frac{\Delta W}{\Delta L}$$

$$\Delta Q = [(100\ m/day)\ (50m)]\ (1m)\ \frac{(10\ m)}{(10\ m)}$$

$$\Delta Q = 5000\ m^3/day$$

حال طول ΔL_2 بصورت زیر محاسبه می‌شود (با توجه به معادله ۱۰-۳۴):

$$\Delta L_2 = \frac{T_2}{T_1} \Delta L_1$$

$$\Delta L_2 = \frac{(200\ m/day)(50m)}{(100\ m/day)(50\ m)}(10\ m) = 20\ m$$

یکی دیگر از کاربردهای شبکه جریان محاسبه تخمینی ضریب K یا T در لایه‌های آبدار می‌باشد. فرض کنید در یک دشت آب زیرزمینی شبکه جریان رسم شده و یک لوله از آن مطابق

شکل ۱۰-۱۴ باشد. چنانچه مقدار T در یکی‌ازقطعات این لوله (مثل A) معلوم باشد با توجه به ضخامت لایهٔ آبدار (b) می‌توان مقادیر T را در قطعات دیگر بدست آورد زیرا:

$$q_A = (K_A)a \frac{\Delta H}{\Delta L} \qquad (۳۷-۱۰)$$

$$q_A = (K_A)(b \cdot W_A) \frac{\Delta H_A}{L_A} \qquad (۳۸-۱۰)$$

$$q_A = (K_A \cdot b)W_A \frac{\Delta H_A}{L_A} \qquad (۳۹-۱۰)$$

$$q_A = T_A W_A \frac{\Delta H_A}{L_A} \qquad (۴۰-۱۰)$$

که در این معادلات:

q_A = جریان آب در قطعه A (مترمکعب در روز)

T_A و K_A = قابلیت انتقال (مترمربع در روز) و ضریب آبگذری (متر در روز) در قطعه A

b = ضخامت لایه آبدار در قطعه A

a = مساحت جریان در قطعه A

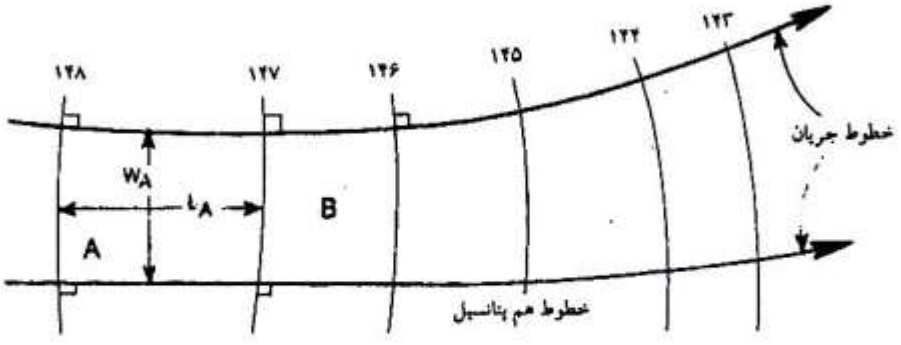
W_A = عرض متوسط قطعه A

L_A = طول متوسط قطعه A

ΔH_A = اختلاف پتانسیل در طول قطعه A

بهمین ترتیب برای قطعه B در قسمت دیگر از این لوله خواهیم داشت:

$$q_B = (T_B)(W_B)\frac{\Delta H_B}{L_B} \qquad (۴۱-۱۰)$$



شکل ۱۰-۱۴

از تقسیم دو معادله ۱۰-۳۸ و ۱۰-۳۹ بر یکدیگر و با فرض این که $\Delta H_A = \Delta H_B$ و $q_A = q_B$ باشد، مقدار T_B بدست می‌آید.

$$T_B = \frac{L_B}{L_A} T_A \left(\frac{W_A}{W_B}\right) \qquad (۴۲-۱۰)$$

و چنانچه فاصله خطوط هم- پتانسیل نیز مساوی باشد.

$$T_B = \frac{W_A}{W_B} T_A \qquad (۴۳-۱۰)$$

بدین‌ترتیب می‌توان ضریب T را برای نقاط مختلف دشت آب زیرزمینی تخمین زده و در نهایت نقشه تغییرات T را در دشت رسم نمود. چنانچه ضخامت لایه آبدار در یک قطعه معلوم باشد با داشتن K در یک قطعه می‌توان K را در قطعات دیگر محاسبه کرد.

۱۰-۳ جریان آب در لایه‌های آبدار

با در نظر گرفتن مسائلی که حرکت آبهای زیرزمینی بوجود می‌آورد ایجاب می‌کند که هر متخصص هیدرولوژی آشنایی نسبی با قوانین هیدرولیکی حاکم بر جریان آب زیرزمینی پیدا کند تا بتواند این موضوعات مربوطه را بررسی و از آن نتیجه‌گیری نماید. در این بخش به پاره‌ای از این مسائل که بسیار معمول می‌باشند پرداخته می‌شود.

مطالعهٔ دقیق خصوصیات هیدرولیکی جریانهای زیرزمینی پیچیده و وقت‌گیر است. بنابراین به لحاظ کاربردی، اعمال برخی فرضیات بدون این که از دقت عمل بکاهد محاسبات را ساده‌تر می‌سازد. بر این اساس در این مبحث فرض خواهیم کرد که لایه آبدار از مواد همگن و همروند تشکیل شده باشد. علاوه بر آن موضوع را در دو حالت ماندگار و غیرماندگار (فصل ۱۱) بررسی خواهیم کرد و بدون ذکر حل نظری معادلات مربوطه از روشهای عملی که در بررسی آبهای زیرزمینی استفاده می‌شود سود خواهیم برد. باتوجه به این که وضعیت جریان در لایه‌های محصور و غیرمحصور با یکدیگر متفاوت است هریک از این موارد جداگانه مورد بحث قرار می‌گیرند.

۱۰-۳-۱ جریان افقی در لایه‌های محصور در حالت ماندگار

اگر در یک لایه تحت فشار جریانی به صورت ماندگار وجود داشته باشد، شیب هیدرولیکی در امتداد مسیر حرکت برقرار خواهد بود و حرکت به سمتی است که شیب هیدرولیکی کاهش پیدا می‌کند. در این حالت می‌توان قانون دارسی را مستقیماً به کار برد. در شکل ۱۰-۱۵ مقطعی از یک لایه تحت فشار که در آن دو چاه با فاصله L از یکدیگر حفر شده‌اند نشان داده شده است. سطح فشار دارای شیبی است که تصویر آن در شکل به صورت خط مستقیم مشاهده می‌شود. بار هیدرولیکی در محل چاه اول h_1 و در چاه دوم h_2 است. باتوجه به این که گرادیان هیدرولیکی $\frac{dh}{dl}$ می‌باشد لذا مقدار دبی که از مقطع لایه آبدار به‌ضخامت m و عرض یک

$(A = m \times 1)$ عبور می‌کند عبارت خواهد بود از:

$$q = -K\,A\frac{dh}{dl} \qquad (۴۴-۱۰)$$

$$q = -K\,(m \times 1)\,\frac{dh}{dl}$$

$$dh = -q\,\frac{dl}{(K \times m)}$$

اگر از این معادله بین دو حدّ $(h_1, 0)$ و (h_2, L) انتگرال گرفته شود نتیجه عبارت خواهد بود از:

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = -\int_0^L q\,\frac{dl}{K.m}$$

$$(h_2 - h_1) = -\frac{q}{K.m}L$$

بنابراین مقدار دبی در واحد عرض لایه آبدار عبارت است از:

$$q = (h_1 - h_2)\,\frac{K.m}{L} \qquad (۴۵-۱۰)$$

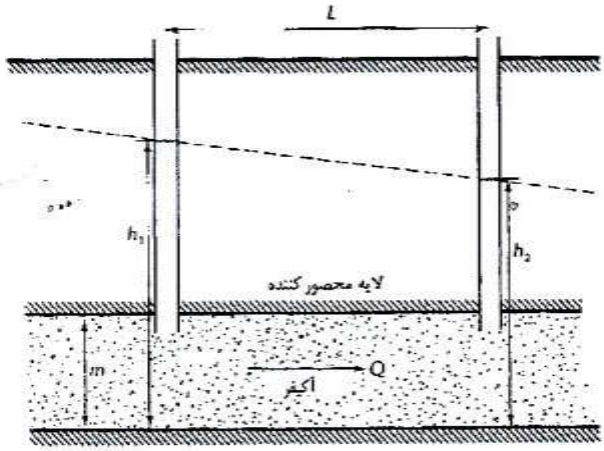
و اگر بخواهیم ارتفاع هیدرولیکی را در فاصله‌ای برابر a از چاه اول به دست آوریم نتیجه عبارت خواهد بود از:

$$h = h_1 - \frac{q}{K.m}\,a \qquad (۴۶-۱۰)$$

بدین ترتیب از روی فرمول‌های فوق می‌توان با اندازه‌گیریهای موردنظر مقادیر K یا h را در لایه آبدار بدست آورد. توجه شود که علامت منفی در جلو فرمول ۱۰-۴۴ به این دلیل است که با پیشروی جریان به سمت جلو پتانسیل هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

حال وضعیت دیگری را مطابق شکل ۱۰-۱۶ در نظر می‌گیریم که در آن جریان زیرزمینی بین دو توده آب از داخل یک لایه محصور صورت می‌گیرد. با مراجعه به معادله ۱۰-۲ چون جریان یک بعدی (در جهت x) بوده و جهات z , y حذف شده‌اند می‌توانیم بنویسیم:

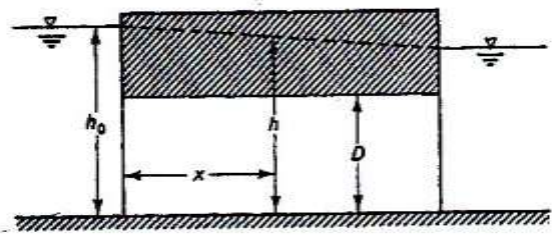
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \qquad (۴۷-۱۰)$$



شکل ۱۰-۱۵ جریان ماندگار در یک آکیفر محصور

حل عمومی این معادله دیفرانسیلی بصورت زیر است:

$$h = Ax + B \qquad (۴۸-۱۰)$$



شکل ۱۰-۱۶

با توجه به شرایط مرزی دو طرف جریان به ازای $x = 0$ مقدار $h = h_0$ می‌باشد لذا:

$$h_0 = A(0) + B \qquad (۴۹-۱۰)$$

$$h_0 = B \qquad (۵۰-۱۰)$$

بر اساس قانون دارسی مقدار دبی که از این لایه عبور می‌کند عبارت است از:

$$q = -K\,a\,i \qquad (۵۱-۱۰)$$

$$q = -K(D\times 1)\frac{dh}{dx} \qquad (۵۲-۱۰)$$

که a سطح مقطع جریان برای یک واحد عرض و D ضخامت لایه می‌باشد. برای بدست آوردن $\frac{dh}{dx}$ باید از معادله ۱۰-۴۶ مشتق گرفته شود.

$$h = Ax + B \qquad (۵۳-۱۰)$$

$$\frac{dh}{dx} = A \qquad (۵۴-۱۰)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$q = -K\,D\frac{dh}{dx} \qquad (۵۵-۱۰)$$

$$q = -K\,D\,A \qquad (۵۶-۱۰)$$

$$A = -\frac{q}{K\,D} \qquad (۵۷-۱۰)$$

اگر در معادله ۱۰-۴۸ بجای A و B مقادیر مربوطه را قرار دهیم خواهیم داشت:

$$h = \left(\frac{-q}{K\,D}\right)x + h_0$$

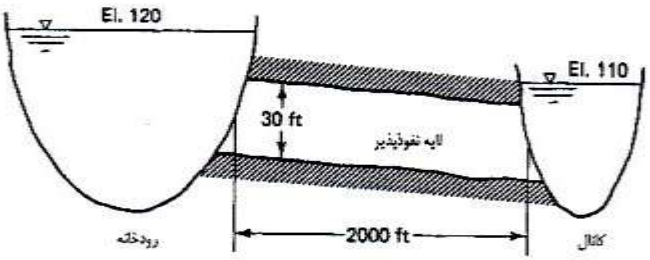
که نتیجه شکل دیگری از همان معادله ۱۰-۴۶ می‌باشد و عبارت خواهد بود از:

$$q = -\left(\frac{h-h_0}{x}KD\right) \qquad (۵۸-۱۰)$$

$$q = \frac{h_0 - h}{x}KD \Rightarrow h = h_0 - \frac{q}{KD}x \qquad (۵۹-۱۰)$$

● **مثال ۱۰-۵**

یک کانال به موازات رودخانه‌ای احداث شده است. تراز سطح آب رودخانه ۱۲۰ و تراز آب در کانال ۱۱۰ فوت است. فاصله رودخانه و کانال ۲۰۰۰ فوت می‌باشد و بین آنها یک لایه محصور به ضخامت ۳۰ فوت که هدایت هیدرولیکی آن ۰/۲۵ فوت در ساعت است قرار گرفته است حساب کنید مقدار نشت آب از رودخانه به کانال راکه از داخل این لایه صورت می‌گیرد.



شکل ۱۰-۱۷

حل

برای هر فوت طول کانال می‌توانیم بنویسیم :

$$q = \frac{h_0 - h}{x} KD$$

$h_0 - h = 120 - 110 = 10$ ft

$x = 2000$ ft

$K = 0.25$ ft/hr $= 6$ ft/day

$D = 30$ ft

$$q = \left(\frac{120 - 110}{2000}\right)(6)(30)$$

$q = 0.005 \times 180 = 0.9$ ft^3/day/ft

بنابراین مقدار نشت آب ۰/۹ فوت مکعب در روز در هر فوت طول کانال می‌باشد.

● **مثال ۱۰-۶**

ضخامت یک لایه آبدار تحت فشار ۳۳ متر و عرض آن ۷کیلومتر است. دو چاه مشاهده‌ای به فاصلهٔ ۱/۲ کیلومتر از یکدیگر در جهت جریان حفر شده‌اند. هر دو چاه تا لایهٔ غیرقابل نفوذ و افقی زیرین حفر شده‌اند. بار هیدرولیکی در چاه اول ۹۷/۵ متر و در چاه دوم ۸۹ متر است. اگر ضریب نفوذپذیری مواد آکیفر ۱/۲ متر در روز باشد جریان روزانهٔ آب از لایه به چه میزان خواهد بود. ارتفاع پیزومتریک در نقطه‌ای به فاصلهٔ ۰/۳ کیلومتر از چاه h_1 چقدر است؟

حل

اگر عرض لایه آبدار b باشد خواهیم داشت: $Q = -km\frac{dh}{dl} \times (b)$

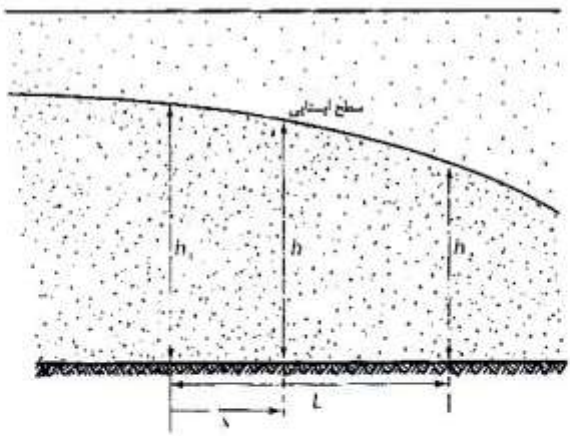
$$Q = 1.2 \times 33 \times \frac{97.5 - 89}{1200} \times 7000 = 1963.5\ m^3/day$$

چون $q = \frac{Q}{7000} = \frac{1963.5}{7000} = 0.2805$ می‌باشد بر اساس معادله ۱۰-۲۸ خواهیم داشت:

$$h = 97.5 - \frac{0.2805}{1.2 \times 33} \times 300 = 95.375\ m$$

۱۰-۳-۲ جریان افقی در لایه‌های غیرمحصور در حالت ماندگار

در لایه‌های غیرمحصور (آزاد) سطح ایستابی مرز بالایی منطقه جریان را تشکیل می‌دهد. مطابق شکل ۱۰-۱۸ اگر ارتفاع آب در مقطع اول h_1 و در مقطع دوم h_2 باشد، با فرض این که هیچ گونه آبی در اثر تبخیر یا تعرق تلف نشود مقدار دبی که از مقطع اول عبور می‌کند برابر مقدار دبی است که از مقطع دوم می‌گذرد. مشاهده می‌شود که در این حالت سطح ایستابی یک خط مستقیم نیست، یعنی شیب هیدرولیکی در تمام نقاط عدد ثابتی نمی‌باشد. بالتبع خطوط جریان نیز افقی نخواهد بود. این امر باعث پیچیده شدن هیدرولیک جریان می‌شود. ولی اگر فرض شود که جریان در امتداد خطوط افقی صورت گرفته و شیب هیدرولیکی برای تمامی نقاط جریان از شیب سطح ایستابی در بالای همان نقطه پیروی کند، می‌توان قانون دارسی را در این مورد نیز به صورت زیر به کار برد.



شکل ۱۰-۱۸ جریان ماندگار در آکیفر آزاد که روی یک لایهٔ غیرقابل نفوذ افقی قرار گرفته باشد.

$$q = -K\,A\frac{dh}{dx} \qquad (۶۰-۱۰)$$

برای سطح مقطعی به عرض یک واحد و ارتفاع h که به صورت دلخواه بین دو مقطع h_1 و h_2 در نظر گرفته می‌شود سطح مقطع جریان برابر خواهد بود با:

$$A = h \times 1 \qquad (۶۱-۱۰)$$

انتگرال معادلهٔ فوق بین دو حد $x = 0$ ، $h = h_1$ و $x = L$ ، $h = h_2$ برابر است با:

$$\int_0^L q\,dx = -K \int_{h_1}^{h_2} h.\,dh \qquad (۶۲-۱۰)$$

$$q = -\frac{1}{2} K\left(\frac{h_2^2 - h_1^2}{L}\right) \qquad (۶۳-۱۰)$$

معادلهٔ ۱۰-۶۲ براساس فرضیاتی که در بالا به آن اشاره شد بدست آمده است. این فرضیات به نام *فرضیات دوپویی* معروف است و این معادلهٔ نیز به نام *معادلهٔ دوپویی* نامیده می‌شود که از روی آن می‌توان حجم آبی را که بین دو مقطع از لایه آبدار در جریان می‌باشد محاسبه کرد.

● **مثال ۱۰-۷**

ضریب نفوذپذیری در یک لایه آبدار غیرمحصور ۰/۰۰۲ سانتی‌متر در ثانیه و تخلخل مواد آن ۰/۲۷ است. آکیفر در بستری از شن به فاصله ۳۱ متر از سطح زمین واقع می‌باشد. دو چاه به فاصلهٔ ۱۷۵ متر از یکدیگر در امتداد جریان حفر شده است. سطح ایستابی در چاه اول ۲۱ متر (زیرسطح زمین) و در چاه دوم ۲۳/۵ متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. حساب کنید:

الف ـ مقدار دبی را در هر واحد عرض آکیفر.

ب ـ سرعت منفذی را در محل چاه اول.

حل

(الف)

$$q = K\,\frac{(h_2^2 - h_1^2)}{2L}$$

$h_1 = 31 - 21 = 10$ m

$h_2 = 31 - 23.5 = 7.5$ m

$K = 0.002$ cm/sec $= 1.7$ m/day

$L = 175$ m

$$q = 1.7 \text{ m/day} \times \frac{(31-21)^2 - (31-23.5)^2}{2 \times 175}$$

$q = 0.21$ m^3/day دبی در هر واحد عرض آکیفر

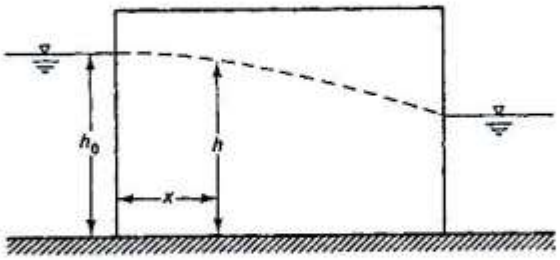
(ب)

$v = (q/n)\,A$

$A = h_1 \times$ (یک واحد عرض آکیفر)

$$v = \frac{0.21 \text{ m}^3/\text{day}}{0.27 \times 10 \times 1} = 0.078 \text{ m/day}$$

حال این موضوع را به صورت دیگری نیز در نظر می‌گیریم. فرض کنید مطابق شکل ۱۰-۱۹ جریان بین دو توده آب از داخل یک لایه متخلخل غیر محصور صورت گیرد. اگر معادله لاپلاس را در شرایط ماندگار برای حالت یک بعدی در نظر بگیریم معادله زیرحاصل می‌شود:



شکل ۱۰-۱۹

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \qquad (۶۴-۱۰)$$

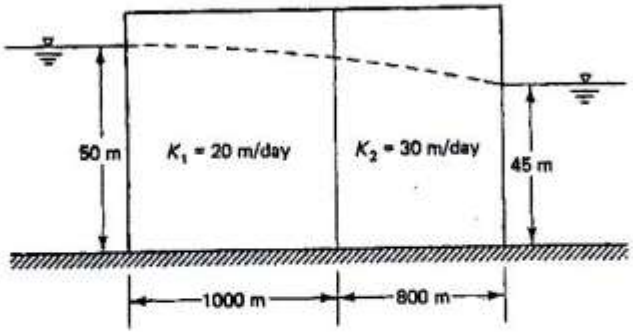
این معادله همان معادله ۱۰-۴۵ است که جواب آن برابرمعادله ۱۰-۵۸ گردید. لذا:

$$q = \frac{h_0 - h}{x} KD \qquad (۶۵-۱۰)$$

در لایه‌های محصور D ضخامت لایه است که مقدار آن عدد ثابتی در نظر گرفته می‌شود ولی در لایه‌های آزاد D متوسط ضخامت آکیفر در نظر گرفته می‌شود.

●مثال ۱۰-۸

با توجه به شکل زیر (شکل ۱۰-۲۰) مقدار جریان آب راکه از داخل تودهٔ متخلخل عبور می‌کند محاسبه کنید. توجه شود که این توده از دو قسمت با هدایت هیدرولیکی مختلف تشکیل شده است.



شکل ۱۰-۲۰

حل

چون جریان آب ۱۰۰۰ متر اول را با هدایت هیدرولیکی ۲۰ و ۸۰۰ متر دوم را با هدایت هیدرولیکی ۳۰ متر در روز طی می‌کند. متوسط هدایت هیدرولیکی بر اساس معادله ۹-۱۷

عبارت است از:

$$\overline{K} = \frac{b}{\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}} = \frac{(1000 + 800)}{\frac{1000}{20} + \frac{800}{30}} = 23.48 \text{ m / day}$$

و میانگین ضخامت آکیفر عبارت می‌باشد از:

$$D = \frac{50 + 45}{2} = 47.5 \text{ m}$$

با توجه به موارد فوق مقدار q برای واحد عرض لایه برابر خواهد بود با:

$$q = \frac{h_0 - h}{x} KD$$

$$q = (\frac{50 - 45}{1800}) (23.48) (47.5) = 3.1 \text{ m}^3/\text{day}$$

بطریق دیگر نیز می‌توان این مسأله را حل کرد.

الف - فرض کنید در حد فاصل دو لایه که ضرایب هدایت هیدرولیکی متمایز می‌شوند بار فشار h باشد. در این صورت جریانی که در هر واحد عرض از لایه اولی می‌گذرد عبارت است از:

$$q = (\frac{50 - h}{1000}) (20) (\frac{50 + h}{2}) = (\frac{1}{100}) (50^2 - h^2) \qquad \text{(الف)}$$

و همین جریان از لایه دوم عبور می‌کند که عبارت خواهد بود از:

$$q = (\frac{h - 45}{800}) (30) (\frac{h + 45}{2}) = (\frac{3}{160} (h^2 - 45^2) \qquad \text{(ب)}$$

اگر دو معادله بالا (الف و ب) را مساوی قرار دهیم مقدار $h = 46.8$ m بدست می‌آید. چنانچه مقدار h را در هر کدام از معادلات فوق قرار دهیم q برابر ۳/۱ متر مکعب در روز به ازاء هر متر عرض لایه بدست می‌آید.

برای حل مسائل جریان آب در زیرزمین مدل‌های مختلفی نوشته و ارائه شده است که از جمله می‌توان به مدل MODFLOW اشاره کرد (برای دسترسی به این مدل و download کردن آن به سایت اینترنتی www.wiley.com/college/schwartz مراجعه کنید).

مسائل

۱۰-۱ در شکل زیر تصویر طولی و عرضی از یک دره نشان داده شده است. ۲ پیزومتر در مرکز این دره نصب شده است. با توجه به اطلاعات زیر حساب کنید.

الف - حجم کل جریان آب زیرزمینی از لایه آبدار را.

ب - چنانچه مواد آلاینده‌ای باسرعتی معادل سرعت آب حرکت کنند چقدر طول می‌کشد تا مواد آلوده کننده از محل تغذیه در بالای دره ۵ کیلومتر بطرف پایین حرکت کند.

$w = 1700$ $z_1 = 103.7$ m

ضخامت لایه اشباع = y = 24 m

L = 1102 m

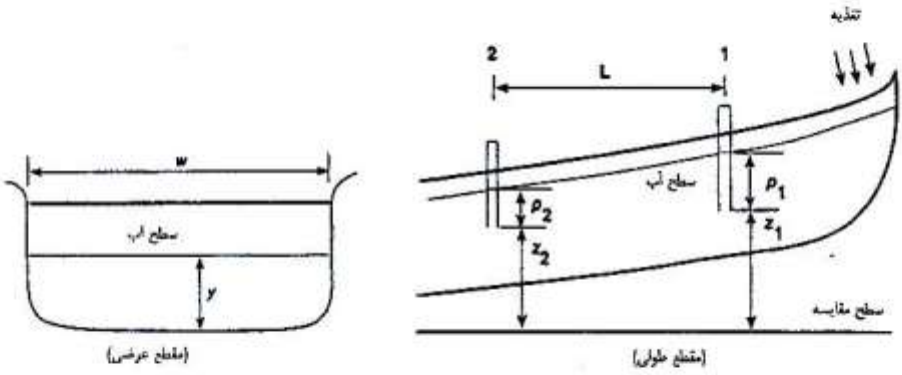
K = 25 m/d

n = 40%

z_2 = 102.0 m

P_1 = 20.2 m

P_2 = 19.5 m

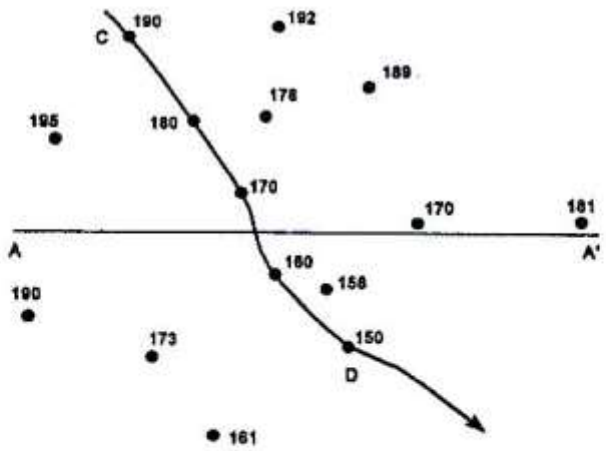


۲-۱۰ درنقشه زیر مسیر یک رودخانه (CD) با پیکان نشان داده شده است. ارقام روی خط(متر) نشان دهنده رقوم سطح آب در چاههای مشاهده‌ای می‌باشد.

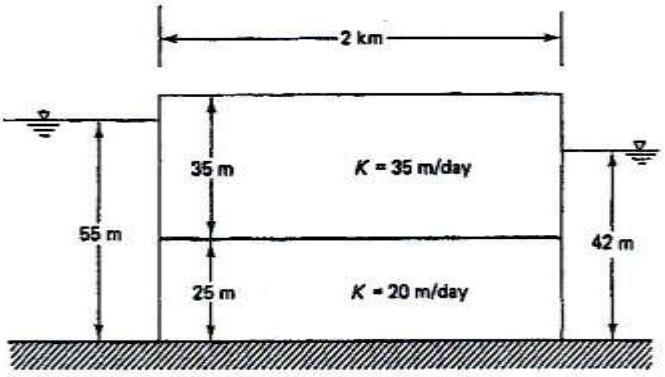
الف - شبکه جریان را رسم کنید (با فواصل ۱۰ متری)

ب - چنانچه ضخامت لایه آبدار ۲۰ متر و هدایت هیدرولیکی ۲/۹ متر در روز باشد حساب کنید مقدار q را در بین دو خط جریان و مقدار کل دبی (Q) را بین نقاط C و D

ج - درپایین‌شکل تغییرات سطح ایستابی را بین A و A' بصورت گراف نشان دهید.



۱۰-۳ در شکل زیر مقدار جریان آب از نهر سمت چپ به نهر سمت راست را محاسبه کنید.



منابع برای مطالعه بیشتر

۱- صداقت، محمود، (۱۳۷۲)، زمین و منابع آب ، انتشارات متون درسی، دانشگاه پیام نور.

2- Fetter C.W. *Applied hydrogeology*, Merrill Pub. Co. Columbus Ohio, 1982.

3- Gupta, R. *Hydrology and hydraulic systems*. Prentice Hall, New Jersy, 1989.

4- McCuen, R. *Hydrologic analysis and design*, Pentice Hall, New Jersy, 1989.

5- Schwartz, F.W. and H. Zhang, *Fundamentals of ground water* , John Wiley and Sons, Ins., New York, 2002.