

تحلیل عوامل مؤثر بر ارتفاع آب در سدهای زیرزمینی و ارایه روشی برای تخمین آن

امید طیاری^۱ و ابوالفضل شمسایی^۲

چکیده

سدهای زیرزمینی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک دنیا برای توسعه منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از هدر رفتن آب در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش اجرای طرح شیبه سیستم آب‌بندی پی سدهای سطحی است. در این تحقیق از یک مدل فیزیکی سد زیرزمینی به ابعاد $4 \times 0.85 \times 1/3$ متر و مدل عددی MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان در مخزن سد و تعیین ارتفاع آب بر روی سد زیرزمینی استفاده شده است. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی، از اعداد اندازه‌گیری شده توسط مدل فیزیکی استفاده به عمل آمده است. ۲۰۶ آزمایش در شرایط مختلف به وسیله مدل فیزیکی و ۴۳۰۰ اجرا به وسیله مدل عددی شبیه‌سازی شده سد زیرزمینی انجام شد. متوسط خطای نتایج آزمایش‌های مدل‌های فیزیکی و عددی ۱/۳٪ بود. این شرایط نشان‌دهنده تطبیق مناسب مدل عددی با شرایط فیزیکی است. نتایج نشان می‌دهد که مهمترین پارامترها در تعیین ارتفاع آب بر روی سدهای زیرزمینی به ترتیب اهمیت، دبی، ارتفاع سد، سطح ایستابی اولیه، ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار، ضخامت سد و شیب کف لایه آبدار می‌باشند. برای محاسبه ارتفاع آب بر روی سد زیرزمینی (H) می‌توان از رابطه $H=S \cdot F$ استفاده نمود. S، ضریب مربوط به عوامل دبی، ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار، ضخامت سد و شیب کف لایه آبدار می‌باشد و از رابطه $S=ST \cdot Sq \cdot Sk \cdot Ss$ بدست می‌آید. F تابعی از نسبت ارتفاع سد (H_{dam}) به سطح ایستابی اولیه (H_0) می‌باشد و از رابطه $F=2/0.632(H_{dam}/H_0)$ محاسبه می‌شود.

واژه های کلیدی: سد زیرزمینی، مدل فیزیکی، مدل عددی، واسنجی، صحت سنجی

۱ - دانشجوی دوره دکتری تأسیسات آبیاری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران omtayari@yahoo.com

۲ - استاد دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف

مقدمه و بررسی منابع

سدهای زیرزمینی به مانعی گفته می‌شود که در مسیر جریان آب زیرزمینی در یک لایه آبدار طبیعی یا مصنوعی قرار داده شده و وضعیت جریان را اغلب به منظور ذخیره آب زیرزمینی تغییر می‌دهد. بدنه اصلی یک سد زیرزمینی را پرده یا دیواره نفوذ ناپذیر آن تشکیل می‌دهد. قدمت استفاده از سدهای زیرزمینی عملاً به زمان‌های کهن می‌رسد و می‌توان به ساخت سدهای زیرزمینی در جزیره ساردینیا در زمان رومیان باستان اشاره نمود (۵). نمونه‌هایی از سدهای زیرزمینی به مفهوم واقعی در نیمه اول قرن بیستم ساخته شده‌اند. رشد و تکوین سدهای زیرزمینی و برخورد علمی با آن‌ها در واقع از نیمه دوم قرن بیستم آغاز گردیده و در سه دهه اخیر رشد زیادی نموده است. اسکیتزکی (۱۹۶۱) مطالعاتی را در مورد موقعیت سدهای زیرزمینی از نظر زمین شناسی انجام داد (۱۰). ماتسو (۱۹۷۵) برای اولین بار گزارشی از احداث یک سد زیرزمینی با عمق ۱۰ تا ۲۵ که در جزیره کاباشیما در غرب ژاپن که با استفاده از روش تزریق ساخته شده بود ارایه نمود و تا پیش از آن سدهای زیرزمینی فقط برای لایه‌های آبدار کم عمق مورد استفاده قرار می‌گرفتند (۸). لارسن و سدروال (۱۹۸۰) مطالعاتی را بر روی گنجایش حجم مخزن سدهای زیرزمینی انجام دادند (۷). در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی نیز در طراحی سدهای زیرزمینی گسترش یافته است. ساجیو

(۱۹۸۷)، مدل عددی تفاضل‌های محدود^۱ را برای طراحی و مدیریت پیشروی آب دریا از میان سد زیرزمینی نیمه نفوذ پذیر در یک لایه آبدار آزاد ساحلی بکار برد (۱۱). جینو (۱۹۹۶) یک سد زیرزمینی را برای جلوگیری از پیشروی آب دریا به بخش شمالی استان اوکیناوا ژاپن و برای تعیین قابلیت کاربرد یک مدل دو بعدی جریان آب زیرزمینی شیرین و شور، ارزیابی نمود (۶). گوپتا (۱۹۹۷)، مدل تفاضل‌های محدود^۲ را برای تحلیل جریان در مخزن سد زیرزمینی جزیره فوکت تایلند و تخمین حجم مخزن بکار برد. در کشورهای نظیر تانزانیا، چین و امارات متحده عربی نیز نمونه‌های متعددی از سدهای زیرزمینی در مراحل مطالعاتی و اجرایی قرار دارند (۳). در کشور ایران با وجود شرایط توپوگرافی و اقلیمی مناسب در بسیاری از مناطق، تنها چند نمونه بسیار کوچک مانند سد زیرزمینی کهنوج و اندوهجرد شهداد در استان کرمان و سد زیرزمینی میمه در استان اصفهان احداث شده‌اند. برای اجرای مناسبتر طرح‌های سد زیرزمینی مطالعاتی به وسیله مرکز تحقیقات آبخیزداری و منابع طبیعی برای مناطق بهورد چند آب و کوه زردامغان در استان سمنان تحت بررسی است (۱). در این تحقیق سعی شده است تا پارامترهای مؤثر بر سدهای زیرزمینی و اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر از طریق بسط مدل‌های عددی و فیزیکی تحلیل شده و همچنین یک روش نسبتاً ساده برای تعیین ارتفاع آب روی سد ارایه گردد.

¹ - Finite difference

² - MODFLOW

مواد و روش‌ها

الف) مدل فیزیکی

سد زیرزمینی مورد مطالعه در دره آبرفتی هاشم آباد اندوهجرد در استان کرمان در موقعیت طول جغرافیایی 57° و $57'$ و عرض جغرافیایی 22° و $1'$ و 30° قرار داشت. عرض بالای لایه آبدار در محل سد $42/5$ متر، عرض پایین آن در این محل 15 متر و ارتفاع سد 15 متر بود. جنس دیواره‌های تنگه زیرزمینی از سنگهای شیستی بازیک با مقدار کمی شیستهای پلتی و کالک شیست با نفوذپذیری متوسط 6×10^{-6} متر بر ثانیه بود. لایه آبدار از رسوبات کواترنر شامل رسوبات آبرفتی جدید و رسوبات آبرفتی مسیلی با ضریب هدایت هیدرولیکی متوسط $1/14 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه تشکیل شده بود. عمق سنگ بستر در محل سد $32/5$ متر و 200 متری از آن عمق به 30 متر می‌رسید. شیب کف لایه آبدار $1/25$ ٪ و ارتفاع آب از کف لایه آبدار قبل از احداث سد در این منطقه بطور متوسط $7/5$ متر بود. یک چاه پیزومتری در 25 متری از محل سد حفر شده است (۱). برای شناخت عوامل مؤثر و تخمین ارتفاع آب روی سدهای زیرزمینی نیاز به اطلاعات آماری و آزمایش‌های زیادی می‌باشد، به همین دلیل در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل مسایل هیدرولیکی سدهای زیرزمینی از مدل‌های فیزیکی و عددی استفاده شده است.

مدل فیزیکی سد زیرزمینی بر اساس شرایط فوق ساخته شد. این مدل یک جعبه ماسه‌ای^۱ به

قاعده $3/4$ متر مربع بود (شکل ۱). برای تشابه هندسی بین مدل واقعی و مدل فیزیکی از مقیاس افقی $L_{HF} = 50$ (نسبت طول مؤثر جریان در سیستم پرتوتیپ به مدل) و مقیاس عمودی 25 $L_{VT} =$ (نسبت ارتفاع مؤثر جریان در سیستم پرتوتیپ به مدل) استفاده شد. به دلیل بزرگ بودن طول منطقه مدل شده نسبت به ارتفاع از مقیاس عمودی کوچکتر استفاده شد. 8500 مترمربع از سطح لایه آبدار مخزن مدل شد. به این ترتیب طول و عرض مدل برابر 4 و $0/85$ متر و ارتفاع مدل برابر $1/3$ متر ساخته شد. وسایل اندازه‌گیری مدل شامل نه عدد پیزومتر از جنس برنج با دقتی در حد میلی‌متر، چهار عدد ارتفاع‌سنج در تماس با جدار طلق شفاف^۲ با دقت در حد میلی‌متر و یک ارتفاع‌سنج با دقت در حد میلی‌متر روی سد زیرزمینی بود. برای شبیه‌سازی جریان در مخزن سد زیرزمینی مدل مذکور، دو صفحه مشبک به فاصله 5 سانتی‌متر به منزله احداث سد زیرزمینی نصب گردید، همچنین برای تنظیم سطح ایستابی اولیه و جریان آب دو حلقه چاه، دو مخزن تامین آب و یک لوله زهکش در انتهای مدل در نظر گرفته شد. شکل ۲ و جدول ۱ پلان و جزئیات مدل فیزیکی ساخته شده را نشان می‌دهد.

برای تشابه دینامیکی بین مدل‌های واقعی و فیزیکی از معادله دارسی (۱) $Q_T = K_T A_T i_T$ استفاده شد. که در آن $i_T = 0/5$ ($i_T = L_{VT} / L_{HT}$)، نسبت گرادیان هیدرولیکی جریان در سیستم پرتوتیپ به مدل، $A_T = 50 \times 25$ ($A_T = L_{HT} * L_{VT}$)، نسبت

² - Plexiglass

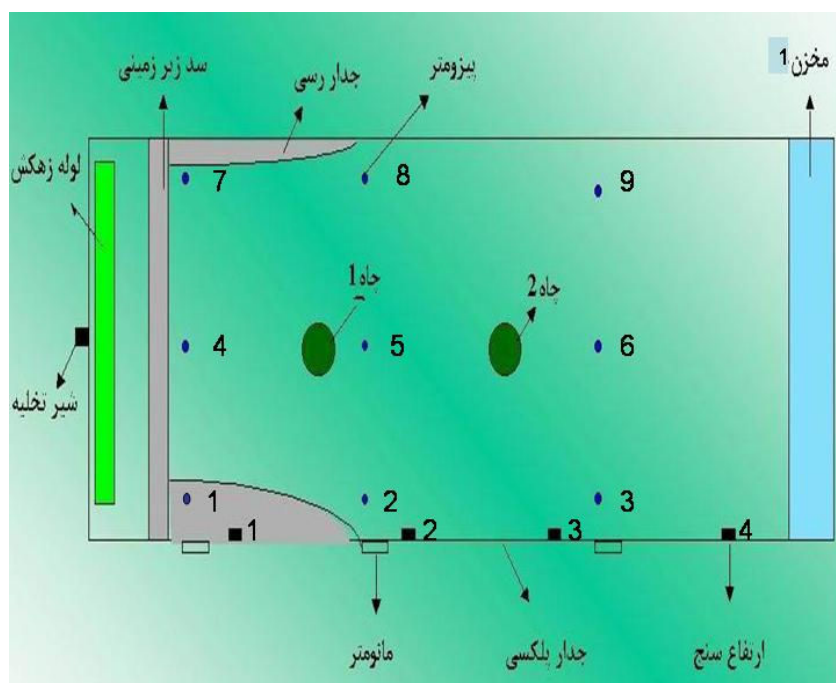
¹ - Sand Box

کالیبره شده قابل تنظیم که بطور مجزا بروی مخزن شماره ۱ قرار گرفته، استفاده شده. پس از ساخت مدل با استفاده از اطلاعات و آمار چاه پیزومتری نسبت به کالیبراسیون مدل فیزیکی اقدام گردید. برای این منظور آمار سطح ایستابی مشاهده شده در چاه پیزومتری و ارتفاع آب روی سد زیرزمینی در مدل واقعی با مقادیر مشاهده شده آنها در مدل فیزیکی مقایسه گردید. متوسط خطای مشاهده شده ۱/۱٪ و حداکثر آن ۱/۵٪ بوده است. این نتایج حاکی از دقت بالا در مدل فیزیکی است. برای تحلیل عوامل مؤثر بر ارتفاع سطح ایستابی بر روی سد زیرزمینی، آزمایش‌ها با تغییر در مقادیر مبنا مدل فیزیکی انجام گرفت، لذا برای ارتفاع سد مقادیر ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متر، ارتفاع سطح ایستابی اولیه ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر، دبی ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر مکعب بر روز در نظر گرفته شد. برای بررسی عامل ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار از سه نوع خاک با هدایت هیدرولیکی $1/76 \times 10^{-4}$ ، $6/4 \times 10^{-4}$ و $8/52 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه استفاده شد. به این ترتیب بر روی هر نمونه خاک ۶۴ آزمایش و جمعاً ۲۰۶ آزمایش با مدل فیزیکی در شرایط مذکور انجام شد. از نتایج حاصله برای تجزیه و تحلیل ارتفاع آب بر روی سد، واسنجی و صحت سنجی مدل عددی استفاده گردید.

سطح مقطع مؤثر سیستم جریان پرتوتیپ به مدل، $K_f = 0/65$ نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی پرتوتیپ به مدل با توجه به اندازه ذرات خاک و $Q_f = 406/25$ نسبت جریان در سیستم پرتوتیپ به مدل می‌باشند. با توجه به نسبت‌های مذکور مقادیر مبنا در مدل فیزیکی بر اساس داده‌های مدل واقعی برای ضریب هدایت هیدرولیکی $1/76 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه، شیب کف لایه غیر قابل نفوذ $0/25$ ، دبی عبوری $1/5$ متر مکعب بر روز، هدایت هیدرولیکی بدنه سد $9/3 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه، ضخامت سد زیرزمینی ۵ سانتی‌متر، ارتفاع سد ۶۰ سانتی‌متر و سطح ایستابی اولیه ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای تهیه نمونه خاک لایه آبدار پس از انجام آزمایش‌ها با نفوذسنج با بار ثابت بر روی نمونه‌های متعدد خاک، یک نمونه ماسه با دانه‌بندی بین $0/075$ میلی‌متر تا ۲ میلی‌متر با قطر متوسط ذرات $0/7$ میلی‌متر و تخلخل $0/34$ که دارای ضریب هدایت هیدرولیکی $1/76 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه است، انتخاب گردید. برای شبیه‌سازی بدنه سد زیرزمینی و دیواره تنگه با استفاده از آزمایش نفوذسنج با بار افتان بر روی نمونه‌های متعدد خاک رس، یک نمونه خاک رس با ضریب هدایت هیدرولیکی معادل $9/3 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه استفاده شد. برای تنظیم دبی ورودی به سیستم از یک مخزن (شماره ۲) به ابعاد $85 \times 25 \times 45$ سانتی‌متر با دبی خروجی



شکل ۱- مدل فیزیکی سد زیرزمینی ساخته شده



شکل ۲- پلان مدل فیزیکی سد زیرزمینی ساخته شده

جدول ۱- مشخصات مدل فیزیکی سد زیرزمینی

توضیحات	Y(cm)	X(cm)	عنوان	ارتفاع Z(cm)	Y(cm)	X(cm)	عنوان
D=4cm	۴۲/۵	۹۰	چاه ۱	۲۰	۱۱	۵۰	پیزومتر ۱
D=4cm	۴۲/۵	۱۹۰	چاه ۲	۲۰	۱۱	۱۴۰	پیزومتر ۲
H=120cm	۰	۸۵	ارتفاع سنج ۱	۲۰	۱۱	۲۵۰	پیزومتر ۳
H=120cm	۰	۱۷۵	ارتفاع سنج ۲	۴۰	۴۲	۵۰	پیزومتر ۴
H=120cm	۰	۲۶۵	ارتفاع سنج ۳	۴۰	۴۲	۱۴۰	پیزومتر ۵
H=120cm	۰	۳۵۵	ارتفاع سنج ۴	۴۰	۴۲	۲۵۰	پیزومتر ۶
T _{dam} =5cm	۰-۸۵	۳۵-۴۰	سد زیرزمینی	۵۰	۷۴	۵۰	پیزومتر ۷
			ارتفاع سنج ۵	۵۰	۷۴	۱۴۰	پیزومتر ۸
			لوله زهکش به طول ۶۵cm در انتهای مدل	۵۰	۷۴	۲۵۰	پیزومتر ۹
			روی سد زیرزمینی				
			مخزن ۲				
			به ابعاد ۴۵×۲۵×۸۵ روی مخزن شماره یک یا دبی خروجی کالیبره شده				
			مخزن ۱				
			به ابعاد ۱۰۰×۲۵×۸۵ سانتی متر در ابتدای مدل				

ب) مدل عددی

معادله تصحیح شده ریچارد که توسط هابرت (۱۹۸۷) ارائه گردیده است (۴)، شرایط کلی حاکم بر جریان را در محیط‌های متخلخل مخزن یک سد زیرزمینی بیان می‌کند:

$$\nabla \frac{\rho k}{\mu} (\rho g \nabla z + \nabla P) = \rho \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial t} + \rho n \beta \frac{\partial P}{\partial t} \quad (۲)$$

در این معادله کرنش و تنش در خاک ناشی از تغییرات سطح ایستابی، به همراه معادله جریان در نظر گرفته شده است. با توجه به مصالح به کار رفته در مدل فیزیکی از آنجایی که نشست در خاک انجام نشد، می‌توان از فاکتورهای کرنش و

تنش در معادله (۲) صرف نظر نموده و از معادله

جریان آب زیرزمینی ساده شده زیر بهره گرفت:

(۳)

$$\frac{d}{dx} (K_{xx} \frac{dh}{dx}) + \frac{d}{dy} (K_{yy} \frac{dh}{dy}) + \frac{d}{dz} (K_{zz} \frac{dh}{dz}) - w = S_s \frac{dh}{dt}$$

در این فرمول K_{xx} و K_{yy} و K_{zz} مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی در امتداد محورهای Z, Y, X ، می‌باشند.

h بار پیزومتری، w دبی جریان در واحد حجم که نشان دهنده منبع فزاینده یا کاهش دهنده است، S_s ضریب ذخیره ویژه مواد محیط متخلخل و t زمان است.

معادله پیوستگی جریان آب زیرزمینی با فرض

جدارهای مخزن و تنگه زیرزمینی از سلول های غیر فعال و برای شبیه سازی مخزن سد زیرزمینی از سلول های فعال استفاده بعمل آمده است.

پارامترهای مدل شامل زمان، ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی، شرایط اولیه بار هیدرولیکی و تخلخل مؤثر می باشد. این اطلاعات بر اساس نتایج حاصل از مدل فیزیکی به مدل عددی تخصیص داده شده است. از بین بسته های تنش موجود در مدل عددی MODFLOW، بسته چاه برای شبیه سازی مرز هم پتانسیل با دبی معلوم بین مخزن و لایه آبدار، بسته بار هیدرولیکی عمومی برای شبیه سازی مرز خروجی مدل (زهکش)، بسته دیوار آب بند برای شبیه سازی سد زیرزمینی و بسته قابلیت رطوبتی برای شبیه سازی تغییرات سطح ایستابی در مدل عددی، استفاده گردیده است.

روش های محاسباتی MODFLOW شامل روش حل مستقیم DE45، روش PCG2، روش به شدت ضمنی SIP و روش فوق تخفیف متوالی SSOR می باشند. از بین روش های مذکور، از روش SIP به علت ارائه نزدیک تر به نتایج مدل فیزیکی استفاده شده است. داده های خروجی مورد نظر مدل، شامل بیلان آبی، شرایط جدید بارهای هیدرولیکی تحت تنش های وارده، ترسیم شبکه جریان و خطوط هم پتانسیل و ترسیم سطح ایستابی در پشت سد می باشد.

واسنجی مدل، فرآیندی است که در آن مجموعه ای از شرایط مرزی، تنش ها و پارامترهای

ثابت بودن جرم مخصوص آب زیرزمینی به قرار زیر است:

(۴)

$$P / \partial t + \partial \theta / \partial t] = - \nabla \cdot q$$

$$[\theta(\alpha + \beta) \partial$$

که در آن α ضریب تراکم پذیری الاستیک محیط متخلخل، β ضریب تراکم پذیری آب، θ عیار رطوبت خاک، p فشار آب، t زمان و q دبی در مساحت مقطع جریان است. این معادلات در شرایط دایمی و غیر دایمی در محیط های همسان و غیر همسان توسط روش تفاضل های محدود و در شرایط مرزی مختلف حل گردیده است. برای حل معادلات فوق از بسته نرم افزاری MODFLOW نسخه ۵/۱ که به کمک سازمان زمین شناسی آمریکا^۱ توسط هارباگ و مکدونالد (۱۹۸۸)، توسعه داده شده است، استفاده گردید (۹).

داده های ورودی به مدل MODFLOW شامل سه جزء اصلی، اطلاعات شبکه، پارامترهای مدل و بسته های تنش ها می باشد. اطلاعات شبکه شامل تعداد شبکه ها و لایه ها، نوع لایه آبدار، تعیین ارتفاع بالا و پایین هر لایه و تعیین نوع سلول های شبکه (فعال، غیر فعال، ثابت) است. در مدل عددی مذکور شبکه تفاضل های محدود حاوی ۴۳ ردیف، ۸۰ ستون و ۹ لایه است. لایه آبدار از نوع آزاد می باشد. ارتفاع بالا و پایین هر لایه بر اساس شیب کف و شیب سطح لایه آبدار در مدل فیزیکی تعیین شده است. برای شبیه سازی

^۱ - USGS

بررسی قرار گرفت. خطای مشاهده شده در مقدار بیلان آبی ۰/۰۰ درصد بود. صحت‌سنجی مدل عددی عبارت است از اثبات صحت و قابلیت پیش بینی مدل در محدودیت‌های قابل قبولی از آزمونهای مستقل از داده‌های واسنجی. در این تحقیق با نمونه‌های مستقل توسط آزمایش‌های انجام شده در مدل فیزیکی، مدل عددی صحت‌سنجی شد. مدل عددی شبیه‌سازی شده سد زیرزمینی ۴۳۰۰ بار در گستره وسیعی از شرایط و عوامل تأثیرگذار اجرا گردید.

برای تعیین پارامترهای مؤثر بر ارتفاع آب در روی سدهای زیرزمینی و تحلیل آن‌ها، از تحلیل گرافیکی نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و مدل عددی استفاده شده است.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج مدل فیزیکی و عددی نشان می‌دهد که میانگین خطای نسبی مشاهده شده مدل عددی ۱/۵۳٪ (حداکثر خطای مشاهده شده ۲/۲٪ و حداقل ۱٪) می‌باشد. این شرایط حاکی از آن است که مدل دارای صحت و قابلیت پیش‌بینی مناسبی برای ارایه نتایج می‌باشد.

شکل ۳ تغییرات ارتفاع آب روی سد زیرزمینی بر اثر تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار را برای شرایط مندرج در شکل نشان می‌دهد. براساس این شکل ارتفاع آب روی سد (H) با ضریب هدایت هیدرولیکی لایه

آبدار (K_{aq}) دارای رابطه:

هیدروژئولوژیک که نتایج به دست آمده از آن‌ها به صورت بسیار نزدیکی بر اندازه‌گیری‌های بار هیدرولیکی و جریان‌های صحرائی برازش دارد، پیدا می‌شود. برای واسنجی مدل می‌توان از روش سعی و خطا و نیز از روش خودکار استفاده کرد. واسنجی سعی و خطا اولین فناوری می‌باشد که در مدل‌سازی آب زیرزمینی بکار گرفته شده است. واسنجی خودکار فن آوری جدیدی است که برای به حداقل رساندن عدم قطعیت‌های مرتبط با ذهنیت استفاده کننده از مدل، بسط یافته است.

در مدل MODFLOW واسنجی خودکار بوسیله بسته نرم افزار PEST که یکی از زیر برنامه های بسیار مناسب برای تخمین پارامترها است و توسط دوهرتی، بربر و وایت (۱۹۹۴)، (۲) ایجاد گردیده است، انجام گرفت. در این تحقیق واسنجی مدل بوسیله مدل PEST انجام شده است. داده‌های ورودی به مدل PEST برای کالیبراسیون مدل MODFLOW شامل ضریب هدایت هیدرولیکی (K)، آمار سطح آب در پیزومترها (h) و چاه شماره ۱ می‌باشند. این پارامتر براساس کاهش حداقل مجموع مربعات انحرافات (LSD) بین مقادیر سطح آب محاسباتی و اندازه‌گیری شده محاسبه گردید. مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی واسنجی شده با مقدار اندازه‌گیری شده آن در آزمایش بار ثابت ۱/۳٪ تفاوت داشت. مدل عددی پس از کالیبراسیون توسط PEST با بیلان آبی نیز مورد

بر اثر تغییرات شیب کف لایه آبدار برای شرایط مندرج در شکل را نشان می‌دهد. براساس نتایج ارتفاع آب روی سد (H) با شیب کف لایه آبدار (S_0) دارای رابطه:

$$H = 11/381 e^{0.0333S_0} \quad (7)$$

است. افزایش شیب کف لایه آبدار از ۱٪ به ۱۰٪ (+۹۰٪) باعث افزایش ارتفاع آب روی سد از ۱۱/۵ به ۱۲ سانتی‌متر (۴٪ افزایش) شده است. این مسأله بیانگر تغییرات بسیار کم ارتفاع آب روی سد بر اثر تغییرات شیب کف لایه آبدار است.

شکل ۶ تغییرات ارتفاع آب روی سد بر اثر تغییرات ضخامت تاج سد زیرزمینی برای شرایط مندرج در شکل را نشان می‌دهد. میان ارتفاع آب روی سد (H) و ضخامت سد زیرزمینی (T_{dam}) رابطه:

$$H = 2/2434 \ln(T_{dam}) + 9/2535 \quad (8)$$

برقرار است. در شرایط مبنا با افزایش ضخامت در مدل از ۱/۵ به ۵ سانتی‌متر (+۳۳۳٪)، ارتفاع آب روی سد زیرزمینی از ۱۰/۲ به ۱۲/۹ سانتی‌متر (+۲۷٪) افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت سد زیرزمینی باعث کاهش شیب هیدرولیکی جریان عبوری از روی سد شده و در نتیجه افزایش ارتفاع آب روی سد زیرزمینی می‌گردد. بایستی توجه داشت که تأثیر عامل ضخامت سد زیرزمینی بر ارتفاع آب روی سد فقط در محدوده کاربردی آن (۱/۵ تا ۳ متر) مورد توجه قرار گیرد.

شکل ۷ تغییرات ارتفاع آب روی سد بر اثر

$$H = 29/09 K_{aq}^{-0.2227} \quad (5)$$

است. در شرایط مبنا با افزایش K_{aq} از ۱۵/۲ به ۷۳/۵ متر در روز (+۴۸۳٪)، ارتفاع آب روی سد زیرزمینی از ۱۴/۶ به ۱۱/۶ سانتی‌متر (-۲۱٪) کاهش می‌یابد. در همین شرایط با کاهش K_{aq} به ۵/۵ متر در روز (-۶۴٪) ارتفاع آب روی سد از ۲۱/۴ سانتی‌متر (+۴۷٪) اضافه می‌شود. مشاهده می‌شود که هرچه مقدار هدایت هیدرولیکی لایه آبدار کاهش یابد، تغییرات ارتفاع آب روی سد زیرزمینی نسبت به آن بیشتر می‌گردد. این امر به دلیل کندتر شدن سرعت حرکت آب در خاک و کاهش شیب هیدرولیکی می‌باشد.

شکل ۴ تغییرات ارتفاع آب روی سد زیرزمینی بر اثر تغییرات دبی عبوری از روی سد را برای شرایط مندرج در شکل نشان می‌دهد. براساس این نتایج رابطه ارتفاع آب روی سد (H) با دبی عبوری (Q_{in}) بشرح زیر است:

$$H = 10/24 e^{0.3243Q} \quad (6)$$

در شرایط مبنا با افزایش دبی عبوری از روی سد از ۱ به ۱/۵ متر مکعب در روز (+۵۰٪)، ارتفاع آب روی سد از ۱۴/۶ به ۱۸/۸ سانتی‌متر (+۲۹٪) اضافه می‌شود. در همین شرایط افزایش دبی از ۱ به ۲/۵ متر مکعب در روز (+۱۵۰٪)، ارتفاع آب روی سد از ۱۴/۶ به ۲۶/۳ (+۸۰٪) اضافه می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که افزایش دبی عبوری باعث افزایش ارتفاع آب روی سد زیرزمینی به صورت غیرخطی شده است.

شکل ۵ تغییرات ارتفاع آب روی سد زیرزمینی

(۱۰)

$$H = -0.0003H_0^3 + 0.029H_0^2 - 0.488H_0 + 15.792$$

است. افزایش سطح ایستابی اولیه تحت شرایط مبنا از ۱۵ به ۵۰ سانتی متر (+۰/۳۳۳) سبب ۶۶٪ افزایش ارتفاع آب روی سد (۱۴ به ۲۳/۳ سانتی متر) شده است. افزایش ارتفاع سطح ایستابی اولیه سبب کاهش اختلاف ارتفاع آب دو طرف سد شده و این امر سبب کاهش شیب هیدرولیکی و افزایش ارتفاع آب روی سد زمینی شده است.

تحلیل‌های فوق نشان می‌دهد که مهمترین عوامل مؤثر بر ارتفاع سطح ایستابی روی سدهای زیرزمینی به ترتیب دبی، ارتفاع سد، سطح ایستابی اولیه، هدایت هیدرولیکی لایه آبدار، ضخامت سد و شیب کف لایه آبدار می‌باشند. به این ترتیب، با شناخت عوامل مؤثر و تحلیل آماری و گرافیکی نتایج ۲۰۶ آزمایش بر روی مدل فیزیکی و بر مبنای نتایج حاصله از ۴۳۰۰ مرتبه اجرای مدل عددی، یک روش برای محاسبه ارتفاع سطح ایستابی بر روی سد زیرزمینی استخراج گردیده است. نتایج گرافیکی این روش در اشکال ۱۰ تا ۱۴ ارایه شده است. براساس این روش برای محاسبه ارتفاع آب روی سد زیرزمینی H، می‌توان از رابطه (۱۱) $H=S_*F$ استفاده نمود که در آن S ضریب مربوط به عوامل دبی (S_q)، هدایت هیدرولیکی لایه آبدار (S_k)، ضخامت سد (S_T)، شیب کف لایه آبدار S_s میباشد و از رابطه (۱۲) $S=S_q*S_k*S_T*S_s$ بدست می‌آید و F تابعی از

تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی بدنه سد برای شرایط مندرج در شکل را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی بدنه سد زیرزمینی در مدل عددی از ضرایب هیدرولیکی رس 10^{-7} ، بتن پلاستیک 10^{-10} ، بتن معمولی 10^{-6} و سپر فلزی 10^{-12} متر بر ثانیه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مصالح فوق باعث هیچگونه تغییر محسوسی در ارتفاع آب روی سد زیرزمینی نمی‌گردد. این امر به دلیل نشت بسیار کم آب از بدنه سد برای مصالح مذکور می‌باشد.

شکل ۸ تغییرات ارتفاع آب روی سد بر اثر تغییرات ارتفاع سد زیرزمینی برای شرایط مندرج در شکل را نشان می‌دهد. براساس آن رابطه ارتفاع آب روی سد (H) با ارتفاع سد زیرزمینی (H_{dam}) عبارتست از:

$$H = 12.126 \ln(H_{dam}) + 71.47 \quad (9)$$

افزایش ارتفاع سد تحت شرایط مبنا از ۵۰ به ۹۰ سانتی متر (+۰/۸۰) باعث کاهش ارتفاع آب روی سد از ۲۴/۴ به ۱۴ سانتی متر (-۰/۳۴/۶) شده است. افزایش ارتفاع سد باعث افزایش اختلاف ارتفاع سطح آب در دو طرف سد شده و این امر باعث افزایش شیب هیدرولیکی روی سد زیرزمینی و کاهش ارتفاع آب روی سد می‌گردد.

شکل ۹ تغییرات ارتفاع آب روی سد بر اثر تغییرات ارتفاع سطح ایستابی اولیه برای شرایط مندرج در شکل را نشان می‌دهد. براساس این شکل ارتفاع آب روی سد (H) با سطح ایستابی اولیه (H_0) دارای رابطه:

هیدرولیکی (Sk) مطابق جدول ۳ می‌باشد. واحد ضریب هدایت هیدرولیکی در روابط فوق بر حسب متر در روز می‌باشد و محدوده کاربرد آن از هدایت هیدرولیکی ۰/۶۲ تا ۱۱۹ متر بر روز می‌باشد.

شکل ۱۳ ضریب تصحیح مربوط به ضخامت سد زیرزمینی را نشان می‌دهد. بر مبنای این شکل روابط ضریب تصحیح ضخامت سد زیرزمینی به قرار زیر است:

واحد ضخامت سد زیرزمینی در روابط فوق بر حسب متر است. محدوده کاربرد آن از ۰/۷۵m تا ۲/۵m می‌باشد.

شکل ۱۴ ضریب تصحیح مربوط به شیب کف لایه آبدار مخزن سد زیرزمینی را نشان می‌دهد. براساس این شکل ضریب تصحیح شیب کف مطابق جدول ۳ می‌باشد.

نسبت ارتفاع سد به سطح ایستابی اولیه می‌باشد و از رابطه:

$$F = 2/0.632(H_{dam}/H_0)^{-0.3791} \quad (13)$$

محاسبه می‌شود. شکل ۱۰ رابطه گرافیکی تابع F را نشان می‌دهد. محدوده کاربرد F، در نسبت‌های ارتفاع سد به سطح ایستابی اولیه ۱/۵ الی ۴/۵ می‌باشد. مقدار تابع F برای $H_{dam}/H_0 = 1/5$ ، $1/8$ متر و برای $H_{dam}/H_0 = 4/5$ ، $1/2$ متر است. برای مقادیر بزرگتر از ۵ تابع F ثابت و دارای مقدار $1/18$ است.

شکل ۱۱ ضریب تصحیح مربوط به دبی (Sq) را نشان می‌دهد. براساس این شکل، ضریب تصحیح دبی (Sq) به شرح جدول ۲ می‌باشد.

واحد دبی در این روابط متر مکعب بر روز بر متر می‌باشد و محدوده کاربرد آن از دبی ۰/۵ تا $17/2$ متر مربع در روز می‌باشد.

شکل ۱۲ ضریب تصحیح مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار را نشان می‌دهد. براساس آن روابط ضریب تصحیح هدایت

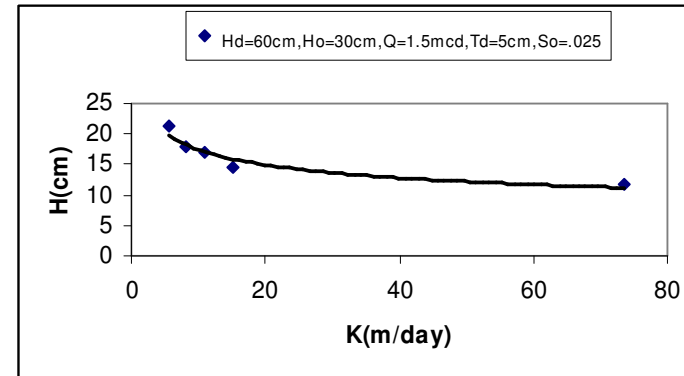
جدول ۳- ضریب تصحیح هدایت هیدرولیکی

رابطه ریاضی	K_x/K_y
$Ln(K_{aq}) + 1/3286$ $S_k = -0/1614$	۱
$Ln(K_{aq}) + 1/4595$ $S_k = -0/1905$	۵
$Ln(K_{aq}) + 1/5613$ $S_k = -0/2043$	۱۰

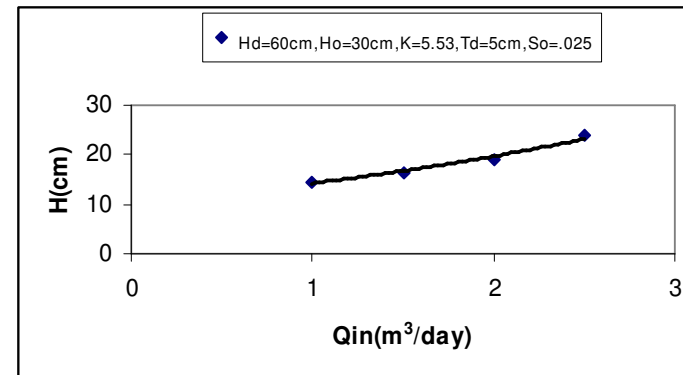
جدول ۲- ضریب تصحیح دبی

رابطه ریاضی	H_{dam}/H_0
$q_{in}^{0/2802}$ $S_q = 0/7188$	۱/۵
$q_{in}^{0/3628}$ $S_q = 0/6985$	۲/۵
$q^{0/3651}$ $S_q = 0/6789$	۳/۵
$q^{0/3505}$ $S_q = 0/6632$	۴/۵

شکل ۳- رابطه ارتفاع آب روی سد و ضریب هدایت هیدرولیکی



شکل ۴- رابطه ارتفاع آب روی سد و دبی عبوری در واحد عرض



شکل ۵- رابطه ارتفاع آب روی سد و شیب کف لایه آبدار

جدول ۴- ضریب تصحیح ضخامت سد زیرزمینی

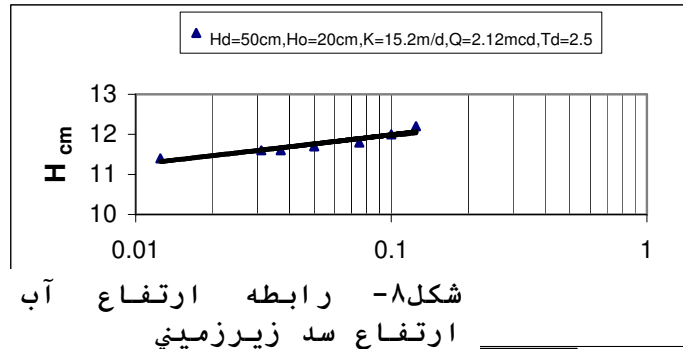
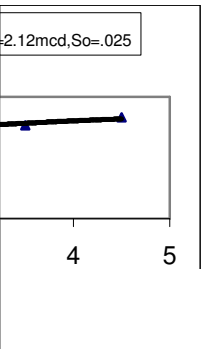
رابطه ریاضی	H _{dam} /H ₀
$Ln(T_{dam}) + 0.9322$	۱/۵
$S_T = 0.1173$	
$Ln(T_{dam}) + 0.9477$	۲/۵
$S_T = 0.1923$	
$Ln(T_{dam}) + 0.9555$	۳/۵
$S_T = 0.2187$	
$Ln(T_{dam}) + 0.9665$	۴/۵
$S_T = 0.283$	

جدول شماره ۵- ضریب تصحیح شیب کف لایه آبدار

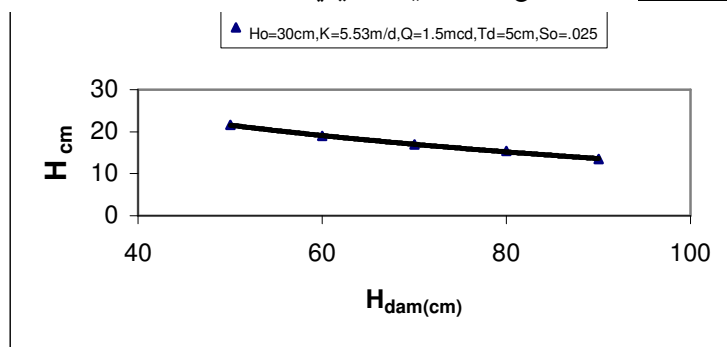
رابطه ریاضی	H _{dam} /H ₀
$S_s = 0.9979e^{0.2875S_0}$	۱/۵
$S_s = 0.9977e^{0.2747S_0}$	۲/۵
$S_s = 0.9975e^{0.2306S_0}$	۳/۵
$S_s = 0.9973e^{0.1863S_0}$	۴/۵

محدوده کاربرد روابط فوق از ۱٪ تا ۱۰٪ می باشد.

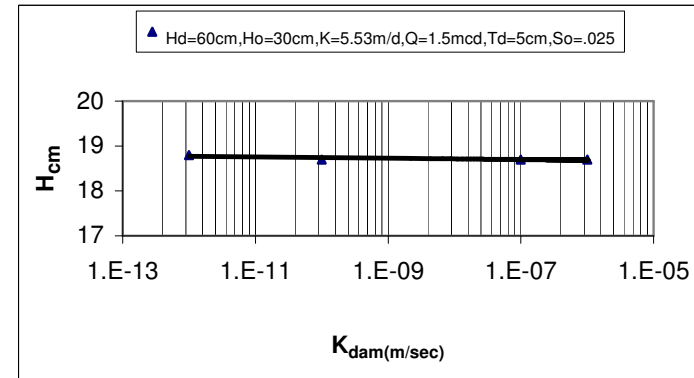
شکل ۶- رابطه ارتفاع آب روی سد و ضخامت سد زیرزمینی



شکل ۸- رابطه ارتفاع آب روی سد و ارتفاع سد زیرزمینی

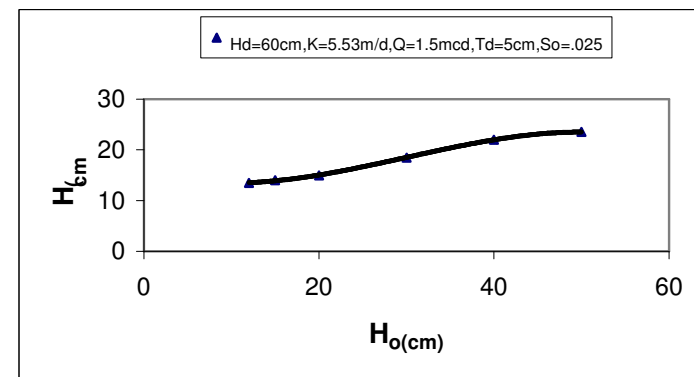
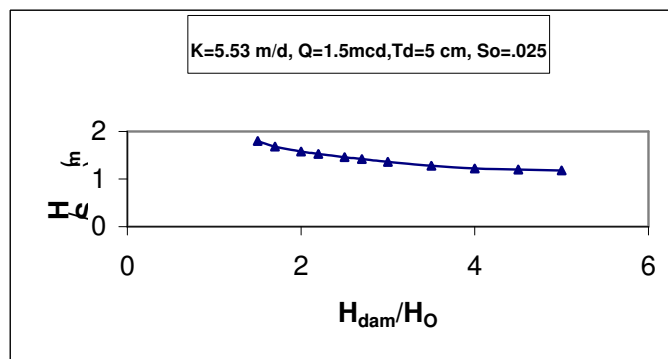


شکل ۷- رابطه ارتفاع آب روی سد و



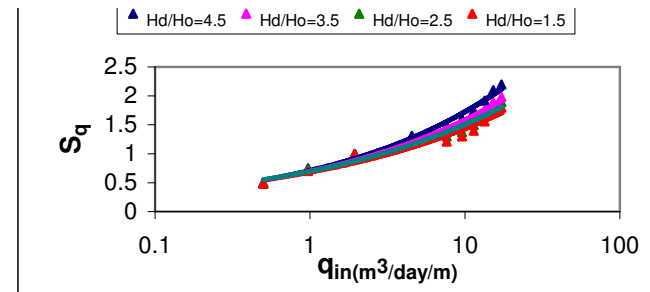
شکل ۹- رابطه ارتفاع آب روی سد و سطح ایستابی اولیه

شکل ۱۰- رابطه گرافیکی ارتفاع بر روی سد زیرزمینی با نسبت ارتفاع سد به سطح ایستابی

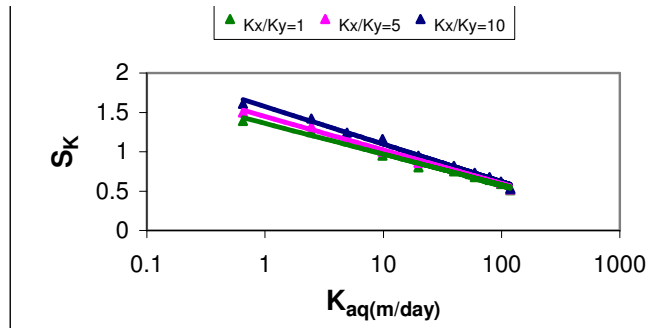


طیاری، ا. تحلیل عوامل مؤثر بر ارتفاع آب در سدهای

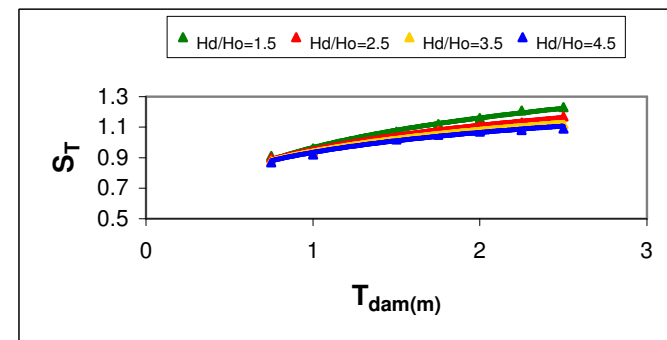
شکل ۱۱- ضریب تصحیح مربوط به دبی



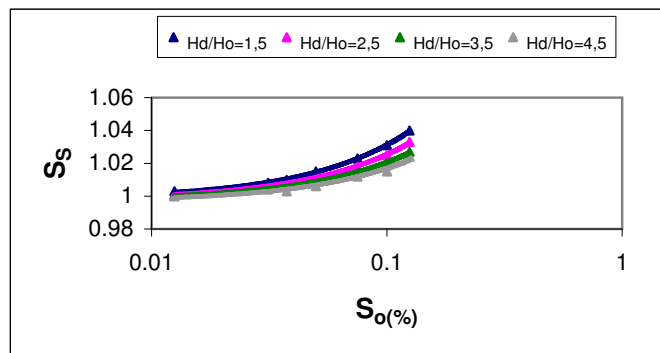
شکل ۱۲- ضریب تصحیح مربوط به هدایت هندسه لایه آبدار



شکل ۱۳- ضریب تصحیح مربوط به ضخامت تاج سد زیرزمینی



شکل ۱۴- ضریب تصحیح مربوط به شیب کف لایه آبدار



منابع

- ۱- امینی زاده، م. ۱۳۷۹. مطالعات احداث سد زیرزمینی در منطقه اندوهجرد شهداد کرمان. مدیریت آبخیزداری جهاد کشاورزی استان کرمان.
- 2- Doherty, J., L. Brebber, P. White. 1994. PEST- Model Independent parameter Estimation. User's Manual, Watermark computing Australia. pp: 55-73.
- 3- Gupta, A. 1999. Assessment of ground water potential with underground dam in phuket Island Thailand., <http://www.iwra.siu.edu/pdf/Gupta.pdf>.
- 4- Hubbert, M. K. 1987. Darcy's law: its physical theory and application to entrapment of oil and gas, in History of Geophysics. Vol. 3, 1-26, C.S. Gillmor, Series Editor, AGU, Washington, D.C.
- 5- Hansen G., A. Nilsson. 1986. Groundwater dams for rural water supplies in developing countries. Ground water, Vol. 24, No.4, July- August 1986, Pp. 497-506.
- 6- Jinno, K., Y. Ru, K. Nakagawa and T. Hosokawa. 1996. Evaluation of subsurface Dam for prevention of seawater Intrusion. In Lee S-C, Hiew K-L and ong.
- 7- Larsson, I., K. Ceder wall, K. 1980. Underground storage of water in natural and artificial openings in hard rocks in developing countries. Rockstore 80, International symposium for Environmental protection, low-cost storage and Energy Savings, Stockholm, June 23-27, 1980. 6 Pp.
- 8- Matsuo, S. 1975. Underground dams for control groundwater. Publication No. 117 de L'Association Internationale des sciences Hydrologiques. Symposium de Tokyo (December, 1975).
- 9- McDonald, M. G. A. W. Harbaugh. 1988. A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground – water flow Model. Techniques of water – Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, US Government printing office, Washington, D.C.
- 10- Skibitzke, H. E., R. R. Bennet, J. A. da costa, D. D. Lewis and T. J. Maddock. 1961. Symposium on history of development of water supply in an aridarea in southwestern united stats- salt River valley, Arizona. In: Groundwater in arid zones, symposium of Athens, 1961. Vol.2, Int.Assoc. Sci. Hydrology pub.; pp. 706-742.
- 11- Sugio, S., K. Nakada and D. W. Urish. 1989. Subsurface seawater Intrusion Barrier Analysis. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113, No.6, Pp.767-779.