

بررسی آزمایشگاهی هیدروگراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی

مجتبی زاهد^۱ و سید محمد علی زمردیان^{۲*}

چکیده

یکی از ساده‌ترین راهکارهایی که می‌تواند در راستای اهداف کنترل سیلاب استفاده شود، سدهای تأخیری پاره‌سنگی یا سنگریزه‌ای است. نیاز به حداقل امکانات، تکنولوژی و هزینه از مزایای عمده سدهای تأخیری پاره‌سنگی است. برای یافتن ضخامت بهینه آزمایش‌هایی در آزمایشگاه صحرایی بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز با سنگ دانه‌هایی به قطر متوسط $D_{50}=5$ ، $D_{50}=7/5$ و $D_{50}=10$ سانتیمتر صورت گرفت و روابطی میان ضخامت سدها و دبی خروجی و قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: سد پاره‌سنگی، کنترل سیلاب، هیدروگراف.

ارجاع: زاهد م. و زمردیان س.م.ع. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی هیدروگراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۸): ۸۸-۸۱

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب دانشگاه شیراز

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه شیراز

* نویسنده مسئول: mzomorod@shirazu.ac.ir

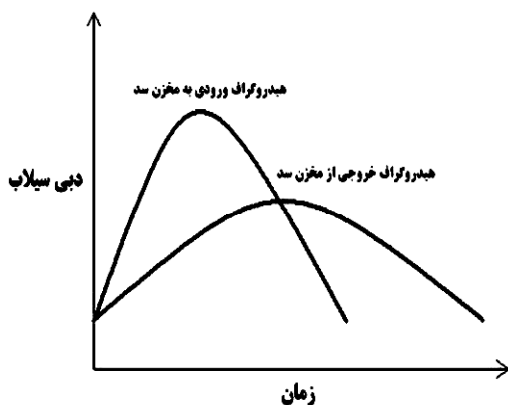
تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۸

مقدمه

سنگ‌ها به چند دلیل عمده همواره در مسائل مهندسی مدنظر قرار دارند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: وزن برای پایداری، تخلخل برای زهکشی، زبری برای افت انرژی، در دسترس بودن حتی در دورترین نقاط و هزینه اندک آن در مقایسه با قطعات ساخته شده با دیگر مصالح می‌باشد.

از مزایای عمده سدهای پاره‌سنگی در کنترل سیلاب می‌توان به سرعت ساخت بالا، عدم نیاز به نیروی متخصص و ماهر اشاره کرد در ضمن این نوع سدها با تخلیه آرام آب نقش مهمی در تغذیه سفره‌های آب زیر زمینی ایفا می‌کنند. سدهای کنترل سیلاب تنها در زمانی کارایی لازم را دارند که مخزن این سدها خالی باشند. در صورتی که سدهای پاره‌سنگی به دلیل تخلخل موجود خود به خود خالی شود، کارایی لازم در زمان وقوع سیلاب را خواهند داشت و نهایتاً مهم‌ترین مساله، مساله رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کنترل سیلاب به دلیل حمل رسوبات توسط سیلاب است، که این سدها می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که رسوبات را با اندازه‌های معین از خود عبور دهند. در صورتی که در مخازن سدهای کنترل سیلاب رسوبات ته‌نشین شوند به حجم مرده مخزن اضافه می‌کنند و باعث عدم کارایی این مخازن در زمان مهار سیلاب می‌شود. این نوع سدها برخلاف سدهای متعارف نفوذپذیر هستند، یعنی آب می‌تواند از داخل یا حتی از روی آن عبور کند و در این صورت با ذخیره شدن بخشی از حجم روان‌آب در مخزن سد و تخلیه تدریجی آن از دبی اوج سیلاب بکاهد و زمان تداوم سیلاب را بیافزاید. عملکرد هیدرولیکی چنین سازه‌ای به‌خوبی در شکل ۱ دیده می‌شود (میراب‌زاده، ۱۳۷۵). می‌توان دبی عبوری را با توجه به مشخصات سنگ‌دانه‌ها و ابعاد سد چنان تنظیم نمود، که دبی پایین‌دست زیانبار نباشد. اگر چه با استفاده از گابیون سازه‌های مشابهی بنا شده، بررسی‌ها نشان می‌دهد، از سازه‌های پاره‌سنگی و یا سنگریزه‌ای تاکنون در کشور کمتر استفاده شده است و آیین‌نامه‌های لازم برای طراحی این سازه‌ها تدوین نشده است. در این تحقیق سعی شده با اجرای یک‌سری آزمایش روابطی

کاربردی براساس قطر متوسط سنگ دانه‌ها و دیگر عوامل تعیین کننده تهیه شود و نهایتاً رابطه‌ای برای تعیین ضخامت بهینه این نوع سدها براساس پارامترهای مختلف بررسی شده ارائه گردد.



شکل ۱- تأثیر سدهای پاره‌سنگی در کاهش دبی اوج سیلاب و افزایش زمان تداوم سیلاب

اصطلاح مصالح سنگدانه^۱ را که در قسمت‌های مختلف این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد، براساس تعریف لپس (۱۹۷۳) عبارتند از هر نوع قطعات سنگی شکسته شده، متراکم غیر چسبنده که دانه‌بندی آن‌ها:

- شامل قطعاتی است که قطر آن‌ها عمدتاً بیش از ۱۲/۵ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) است.
- بیش از ۱۰ درصد وزنی مصالح از الک نمره ۴ (استاندارد آمریکایی) عبور نمی‌کند.

ملاحظه می‌شود که این تعریف شامل سنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی از جمله شن، قلوه‌سنگ، تخته سنگ و سنگ‌های معدنی در تمامی اندازه‌ها می‌شود.

ملاحظات تئوری

جریان در محیط ریزدانه

در مصالح ریزدانه جریان آرام، سرعت جریان و عدد رینولدز کوچک هستند. در چنین جریانی عامل مؤثر در مقاومت محیط در برابر عبور سیال، نیروی لزجت است و می‌توان از نیروی اینرسی صرف نظر کرد. افت بار در مصالح ریز دانه به‌طور خطی و متناسب با سرعت ظاهری

استوکس را با روش آنالیز ابعادی و با فرض سیال غیرقابل تراکم بدون بعد کردند که نتیجه آن به صورت معادله زیر بیان شد:

$$i = \frac{\mu}{\rho g k} V + \frac{1}{g \sqrt{ck}} V^2 \quad (3)$$

در معادله فوق پارامترها به شکل زیر تعریف شده‌اند: μ لزجت سیال [$ML^{-1}T^{-1}$], ρ = جرم مخصوص مواد محیط متخلخل [ML^{-3}], k برحسب d نفوذپذیری ذاتی را بیان می‌کند [L^2], g شتاب ثقل [LT^{-2}], $k = cd^2$, که d قطر متوسط ذرات [L] و c ضریبی که خصوصیات هندسی محیط را بیان می‌کند.

مؤلفین مذکور که با روش فوق صحت معادله دو مجهولی را از لحاظ نظری بررسی و تأیید کرده‌اند، معتقدند که برخی کمیت‌ها را نظیر c و d نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. در حقیقت شاید بتوان گفت با وجود تأیید تئوریک رابطه فوق توسط بسیاری از محققین، مشکل قابل توجه در استفاده از روابط فوق تعیین ضرایب a و b است.

۲- معادله نمایی جریان

معادله نمایی جریان توسط پرونی (۱۸۰۴) به دست آمد و توسط جیگر (۱۹۶۵) ارائه شد:

$$i = aV^b \quad (4)$$

از جمله کسانی که از معادله فوق استفاده کردند می‌توان به ویلکینز (۱۹۵۶)، پارکین (۱۹۶۳)، دوگان (۱۹۶۶)، جانسون (۱۹۶۹)، و لپس (۱۹۷۳) اشاره کرد. معادله فوق به صورت دیگری نیز بیان می‌شود:

$$V = ai^b \quad (5)$$

که در آن a و b مقادیر ثابتی هستند که به سیستم واحدهای به کار برده شده و خصوصیات محیط سنگی و سیال بستگی دارند. برای جریان آرام و مصالح ریز دانه مشخص شده است که مقدار عددی b برابر ۱ است. مسلم است که با افزایش سرعت و عدد رینولدز تأثیر اینرسی بیشتر می‌شود و توان سرعت افزایش می‌یابد.

از نظر مقایسه با روابط افت بار برای جریان در لوله‌ها، منطقی است تصور شود، در حالت جریان کاملاً متلاطم این مقدار به ۲ هم می‌رسد، زیرا همانطور که معلوم است

تغییر می‌کند. داری در این زمینه معادله زیر را پیشنهاد کرده است:

$$V = ki \quad (1)$$

که در آن: V سرعت ظاهری [LT^{-1}], i گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد) و k ضریب نفوذپذیری یا ضریب قابلیت هدایت هیدرولیکی که بیانگر سهولت جریان آب در محیط متخلخل است [LT^{-1}], که دارای بعد سرعت است و به مشخصات محیط متخلخل و سیال بستگی دارد.

جریان در محیط درشت دانه

برای مصالح درشت دانه، رابطه مربوط به جریان آرام معتبر نیست و افت بار با توان‌های بیشتر از یک سرعت متناسب است. در ادامه این بحث تحقیقاتی که در این مورد صورت گرفته است و نتایجی که حاصل شده است ارائه می‌شود. به طور کلی معادلات ارائه شده را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد که عبارتند از:

۱- فرمول دو جمله‌ای یا فورشه‌ایمر

در حقیقت می‌توان پذیرفت که افت بار در محیط‌های متخلخل متفاوت با توجه به ابعاد سنگدانه‌ها و شکل آن‌ها و در نتیجه سرعت جریان و عدد رینولدز، از معادلات متفاوتی به دست می‌آید. واضح است که با افزایش سرعت جریان، نیروی اینرسی نقش مهم‌تری در افت بار خواهد داشت (زنگ و گریگ، ۲۰۰۶). در این صورت مسلم است که افت بار علاوه بر این که به لزجت بستگی دارد، به نیروی اینرسی هم وابسته می‌شود. استدلال فوق منجر به ارائه معادله‌ای توسط فورشه‌ایمر شد، که به نام خود او به فرمول فورشه‌ایمر معروف است. این معادله به صورت زیر است:

$$i = aV + bV^2 \quad (2)$$

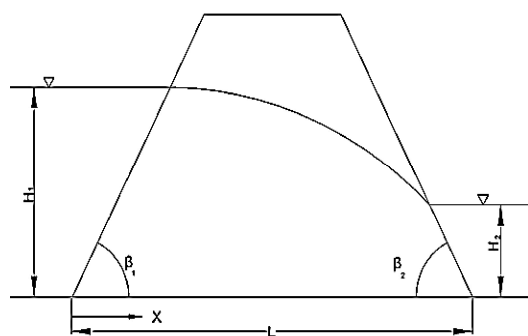
ضرایب a و b به خصوصیات فیزیکی سیال و محیط متخلخل، مانند شکل و اندازه سنگ‌ها و ویسکوزیته و چگالی سیال بستگی دارند. محققین زیادی ضمن پذیرش رابطه دو جمله‌ای برای افت بار در محیط‌های متخلخل درشت دانه آن را مورد بررسی قرار دادند از آن جمله می‌توان به وارد (۱۹۶۴)، آدریان (۱۹۶۵) و احمد و سونادا (۱۹۶۹) اشاره کرد. احمد و سونادا معادله ناویر-

$$f = a Re^b \quad (7)$$

$$f = \frac{a'}{Re} + b' \quad (8)$$

که در آن‌ها: f ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ و Re عدد رینولدز و a, b, a', b' ضرایبی هستند که تابعی از خصوصیات سیال و ذرات سنگی می‌باشند.

لی و همکاران (۱۹۶۸) معادله زیر را پیشنهاد کردند: بر این اساس سامانی و شایان‌نژاد (۱۳۸۱) با ارائه مدل زیر برای روندیابی سیل درون مخازن سدهای پاره‌سنگی و با داشتن ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست سد میزان دبی عبوری جریان را محاسبه کردند (شکل ۲).



شکل ۲- شکل شماتیک سد پاره‌سنگی

$$Q^2 - \frac{M_1}{2M_2}(H_1^2 - H_2^2) + \frac{bM_1}{M_2^2}(H_1 - H_2) - \frac{b^2M_1}{M_2^2}Ln \frac{M_2H_1 + b}{M_2H_2 + b} = 0 \quad (12)$$

$$M_1 = \frac{2g(d - \sigma)W^2}{D} \quad (13)$$

$$D = L - 0.7H_1 \cot \beta_1 \quad (14)$$

$$M_2 = \frac{a'Wv}{Q(d - \sigma)} \quad (15)$$

و در آن: w عرض سد $[L]$ و β_1 زاویه شیب بالادست سد با افق.

افت بار در لوله‌ها با بار سرعت یعنی $\frac{V^2}{2g}$ متناسب است.

ویلکینز عبور جریان آب از درون سازه سنگریز را بررسی و ۵ اندازه مختلف از سنگ‌دانه‌ها از ۰.۷۵ تا ۳ اینچ را مورد آزمایش قرار داد. نمونه‌ها تا حد امکان یکنواخت و تمیز بودند.

مقادیری که برای b به دست آورد با مقادیر دیگر محققین بسیار نزدیک بود، اما ویلکینز مسأله را ساده بیان نکرد و معادله زیر را پیشنهاد کرد:

$$V_v = C \eta^\alpha m^b I^n \quad (6)$$

که در آن: V_v متوسط سرعت آب درون خلل و فرج است $[LT^{-1}]$ ، (معادل با سرعت تخلیه تقسیم بر تخلخل)، C فاکتور شکل مرکب، η لزجت آب، m متوسط شعاع هیدرولیکی خلل و فرج، ویلکینز m را برابر $\frac{d}{10}$ ، برای $2 \leq d \leq 4$ متر فرض کرد $[L]$. a و b و C و α ثابت‌های تجربی هستند.

۳- معادلات مربوط به ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ و عدد رینولدز

در محیط‌های سنگ دانه‌ای به علت آشفته بودن جریان نمی‌توان از معادله داریسی استفاده کرد. در چنین محیط‌هایی روابط بین ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ و عدد رینولدز در تعیین معادله دبی - اشل استفاده می‌شود. معادلات مذکور عمدتاً به دو صورت کسری و نمایی زیر می‌باشند:

که در آن d برابر $4R_h$ در نظر گرفته می‌شود. و بنا به تعریف R_h :

$$f = 8.75 Re^{-0.17} \quad (9)$$

$$R_h = \frac{e}{A_{vs}} \quad (10)$$

e نسبت پوکی و A_{vs} اندازه سطح ذرات بر واحد حجم است $[L^{-1}]$. از طرفی

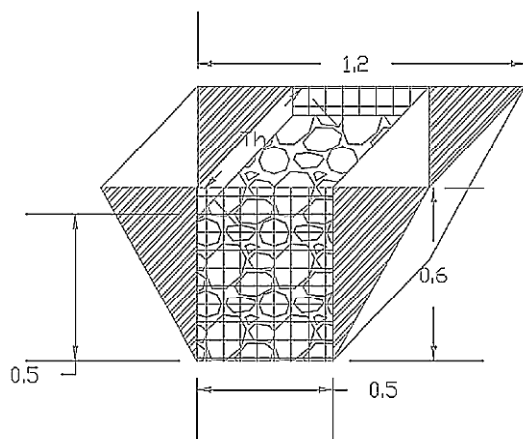
$$Re = \frac{VR_h}{nv} \quad (11)$$

که در آن: Q دبی جریان $[L^3/T]$ ، H_1 و H_2 به ترتیب اعماق بالادست و پایین‌دست سد $[L]$ و M_1 و M_2 ضریب که:

مواد و روش‌ها

به‌اندازه کافی بزرگ بودند تا تأثیر آن‌ها بر جریان آب عبوری قابل چشم‌پوشی باشد ($2/5 \times 2/5$ سانتی‌متر). در این آزمایش‌ها ارتفاع سازه به‌عنوان پارامتر ثابتی در نظر گرفته شده و به نحوی انتخاب شد که جریان آب از روی سازه عبور نکند. لازم به ذکر است که در این آزمایش‌ها هدف به‌دست آوردن ضخامت بهینه سدها جهت طراحی ابعاد این نوع سدها است و پایداری آن‌ها با استفاده از روش‌های موجود باید بررسی شود.

مزیت عمده این تحقیق نسبت به تحقیقات مشابه این است که در آزمایش‌ها از شرایط جریان غیر ماندگار استفاده شده، همچنین سعی شده تا حد امکان آزمایش‌ها همانند شرایط طبیعی شبیه‌سازی شود.



شکل ۳- تصویر شماتیک از ابعاد سید ساخته شده



شکل ۴- سید ساخته شده با ضخامت مختلف

داده‌های موجود در این تحقیق در آزمایشگاه صحرایی بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز و در یک کانال دوزنقه‌ای بتونی و با شیب بدنه ۱:۱ و عرض کف ۰/۵ متر و عمق ۰/۶ متر در یک بازه ۱۵ متری صورت گرفت و برای اندازه‌گیری دبی خروجی در انتهای آن یک سرریز لبه تیز ۹۰ درجه استاندارد استرالیا تعبیه شد. برای تغذیه کانال از یک مخزن به حجم ۰/۷ مترمکعب که توسط یک دریچه فلزی کشویی از کانال اصلی جدا می‌شد، استفاده شد. دبی آب ورودی حدود ۲/۵ تا ۳ لیتر برثانیه قرائت شد (شکل ۳).

به‌طور کلی آزمایش‌ها به‌گونه‌ای انجام گرفت که سیلابی در کانال شبیه‌سازی شود. برای این منظور پس از پر کردن مخزن بالادست و ثابت شدن جریان آب در کانال و قرار دادن سدها در جای تعیین شده آب موجود در مخزن به‌طور ناگهانی با بالا آوردن دریچه کشویی به داخل کانال رها می‌شد. سپس عمق آب در بالادست، پایین‌دست و پشت سرریز در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه قرائت می‌شد. این قرائت‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که دبی آب به دبی پایه جریان ($2/5$ تا 3 لیتر در ثانیه) برسد. با توجه به این که ضخامت این سدها یکی از پارامترهای تعیین کننده و مهم در طراحی‌ها است، سعی شد که این پارامتر به حداقل کاهش یابد. چرا که با کاهش این پارامتر هزینه‌های انتقال و تهیه مصالح به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل لازم بود ابتدا آزمایش‌هایی براساس تئوری‌های موجود و تحقیقاتی که در گذشته صورت گرفته طراحی و اجرا شود. لذا ابتدا سنگ‌دانه‌های تهیه شده با قطر متوسط $D_{50}=5$ ، $D_{50}=7/5$ و $D_{50}=10$ سانتیمتر را درون سبدهایی به ضخامت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر به‌طور تصادفی ریخته (شکل ۴) سپس شروع به انجام آزمایش شد. داده‌ها و نتایج حاصل از انجام این آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

قابل ذکر است که دلیل استفاده از سید توری در انجام این آزمایش‌ها به این خاطر است که بتوان در آن ضخامت سدها را به‌طور ثابت و بدون تغییر نگه داشت. البته شبکه توری‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

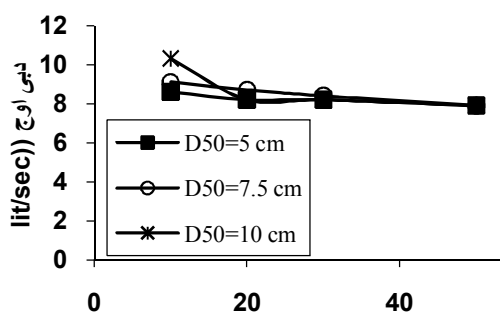
جدول ۱- مشخصات هیدروگراف ورودی و خروجی از یک سد

قطر متوسط سنگ دانه‌ها (cm)	ضخامت سد (cm)	دبی اوج (lit./sec)	زمان اوج (sec)	زمان کل (sec)	حداکثر عمق آب پشت سد (cm)
بدون سنگ دانه	-	۱۴/۸	۱۶/۵	۳۰۰	-
۵	۱۰	۸/۶	۳۳	۷۹۰	۲۳/۵
۷/۵	۲۰	۸/۲	۳۵	۸۱۰	۲۵
	۳۰	۸/۲	۳۶	۸۴۰	۲۵/۵
	۵۰	۷/۹	۴۱	۹۰۰	۲۶/۵
	۱۰	۹/۱	۳۰	۶۵۰	۲۲/۸
	۲۰	۸/۷	۳۲	۷۱۰	۲۲
	۳۰	۸/۴	۳۳	۷۵۰	۲۳/۳
	۵۰	۷/۹	۳۵	۷۵۰	۲۳/۶
	۱۰	۱۰/۳	۳۰	۶۲۰	۲۲/۲
	۲۰	۸/۲	۳۲	۶۳۰	۲۲/۲
	۳۰	۸/۲	۳۸	۶۹۰	۲۲/۴
	۵۰	۷/۹	۴۰	۷۵۰	۲۲/۷

نتایج و بحث

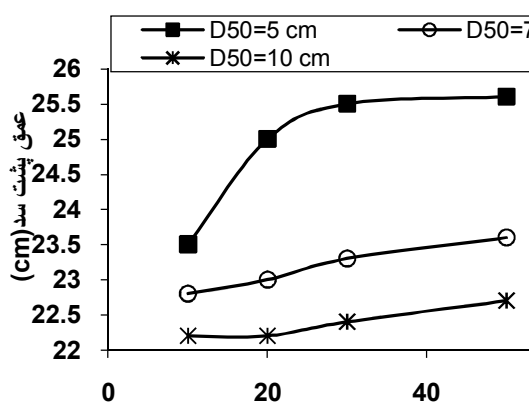
با توجه به داده‌ها و جدول ۱ مشاهده می‌شود که با کوچک‌تر شدن قطر متوسط سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده سدها از مقدار دبی اوج کاسته می‌شود. بنابراین با ریزتر شدن قطر متوسط سنگ‌دانه‌های سدها، که نتیجه آن ریزتر شدن خلل و فرج بین آن‌هاست، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه سنگ‌دانه‌ها نیز عامل مهمی در طراحی‌ها است و رابطه مستقیمی با کاهش دبی در زمان اوج سیلاب دارد. که می‌توان از این عامل در جهت کاهش دبی اوج سیلاب به میزان لازم در زمان سیلاب استفاده کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش اندازه قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها، زمان اوج سیلاب نیز افزایش می‌یابد (حداکثر تا ۲/۵ برابر) که با توجه به رابطه پیوستگی جریان این نیز منطقی به نظر می‌رسد که با کاهش دبی، زمان افزایش یابد. زیرا در این مرحله باید حجم معینی از آب با دبی کمتر از یک مقطع با اندازه ثابت عبور کند که نشان‌دهنده رابطه معکوس زمان اوج سیلاب و قطر متوسط سنگ‌دانه‌های سد است. پدیده فوق برای زمان کل هیدروگراف نیز صادق است، یعنی با کاهش اندازه سنگ‌دانه‌های مورد استفاده مشاهده می‌شود که زمان کل هیدروگراف در

ضخامت‌های بهینه (دو برابر قطر سنگ‌دانه‌ها) حدود ۹٪ افزایش نشان می‌دهد، که نشانگر رابطه معکوس قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها و زمان کل هیدروگراف است. در رابطه با ضخامت سد با دبی اوج سیلاب می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به آزمایش‌ها و نتایج به‌دست آمده، با افزایش ضخامت سدها دبی اوج سیلاب نیز کاهش می‌یابد (در بعضی موارد تا ۵۰ درصد) تا جایی که با افزایش ضخامت مشاهده می‌شود که دبی اوج در تمام سدها با سنگ‌دانه‌های متفاوت به سمت یک مقدار ثابت همگرا می‌شود و عملاً تأثیری بر دبی اوج سیلاب خروجی نداشته و یا اثر آن بسیار ناچیز می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- رابطه ضخامت سد و دبی اوج هیدروگراف با سنگ دانه‌های به قطر متوسط متفاوت

در رابطه با ضخامت سدها و عمق آب پشت سد نیز همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط ریزتر یعنی $D_{50}=5$ سانتی‌متر تأثیر بیشتری بر عمق آب پشت سد دارد و عمق آب جمع شده پشت سد با این قطر سنگ‌دانه، از تمام دانه‌بندی‌ها بیشتر است و سیر صعودی سریع‌تری را طی می‌کند و سپس به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. در رابطه سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط $D_{50}=7/5$ و $D_{50}=10$ سانتی‌متر چنین به‌نظر می‌رسد که سیر صعودی آن‌ها با شیب کمتری صورت می‌گیرد که نشانگر عدم تأثیر افزایش ضخامت بیش از حد بر عمق آب جمع شده پشت سد می‌باشد.



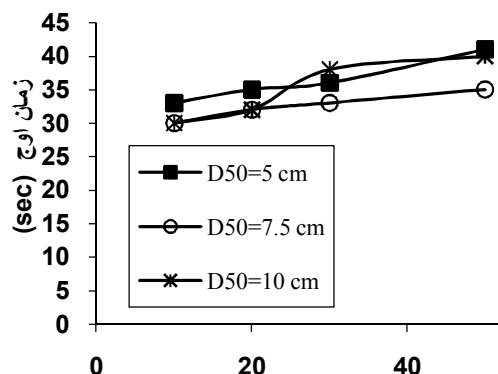
شکل ۸- رابطه ضخامت سد و عمق آب پشت سد با سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط متفاوت

نتیجه‌گیری

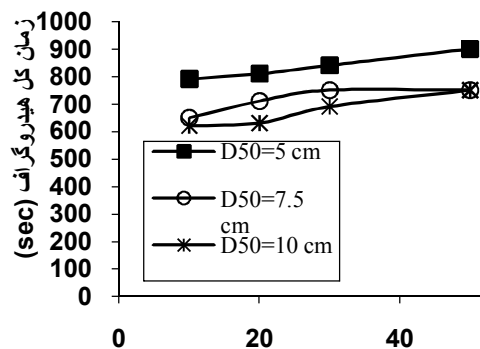
با توجه به هیدروگراف‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها، این نتیجه به‌دست آمد که بهترین ضخامت محاسبه شده دو برابر قطر متوسط سنگ‌دانه‌های به‌کار رفته است، چرا که در آن زمان هیدروگراف و دبی اوج هیدروگراف به کمترین مقدار خود می‌رسند و همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود افزایش ضخامت بیش از حد تأثیری بر هیدروگراف خروجی از سازه ندارد. لازم به ذکر است که در این مقاله مبانی هیدرولیکی طرح سازه مدنظر قرار گرفته است و بحث پایداری سازه باید در تحقیقات بعدی مدنظر قرار گیرد. البته ممکن است در ضخامت‌های بیشتر مقادیر کمتری

کاهش دبی بر اثر افزایش ضخامت را می‌توان بر اثر استهلاک انرژی سیلاب برای عبور از خلل و فرج سد پاره‌سنگی و همچنین نشانگر رابطه معکوس ضخامت سد با دبی اوج سیلاب دانست.

در رابطه با زمان اوج سیلاب و زمان کل سیلاب مشاهده می‌شود (شکل‌های ۶ و ۷) که با افزایش ضخامت سدها زمان اوج و زمان کل سیلاب نیز بین ۸ تا ۱۸٪ افزایش یافته و نشانگر رابطه مستقیم ضخامت سد با این دو عامل می‌باشد که این نیز با توجه به رابطه پیوستگی جریان قابل توجیه است. البته در ضخامت‌های زیاد مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت سد عملاً تأثیری بر زمان هیدروگراف خروجی از سازه ندارد. در بررسی‌های انجام شده مشاهده می‌شود که ظناً تأثیر وجود این سازه بر افزایش زمان سیلاب بین ۵۲ تا ۶۲٪ می‌باشد.



شکل ۶- رابطه ضخامت سد و زمان اوج هیدروگراف با سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط متفاوت



شکل ۷- رابطه ضخامت سد و زمان کل هیدروگراف با سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط متفاوت

- 4- Henderson F. M. 1966. Open Channel Flow. New York, Macmillan Publishing Co. Inc. 522pp.
- 5- Herrera N. M. and Felton G. K. 1991. Hydraulics of flow through a Rockfill Dam using sediment free water. Trans. of ASCE, 34(3): 871-875
- 6- Leps T. M. 1973. Flow through Rockfill. Embankment-Dam Engineering Casagrande
- 7- Samani J. M. V. Samani H. M. V. Shayannejad M. 2004. Reservoir routing with outflow through Rockfill dams. Journal of Hydraulic Research 42(4): 435-439.
- 8- Michalewicz Z. 1992. Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs. New York. Springer.
- 9- Stephensen D. 1979. Rockfill in Hydraulic Engineering. Elsevier Scientific Pub., Amsterdam, the Netherlands.
- 10- Stephensen D. 1979. Rockfill in Hydraulic Engineering. Elsevier Scientific Pub., Amsterdam, the Netherlands.
- 11- Ward J. K. 1964. Turbulent flow in porous media. Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(5): 1 – 12.
- 12- Wilkins J. K. 1956. Flow of water through Rockfill and its application to the design of dams. Proceedings of the second Australian New Zealand Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering:141-149
- 13- Zeng Z. and Grigg R. 2006. A criterion for non-Darcy flow in porous media. Transport in porous media. 63: 57-69.

از دبی اوج مشاهده شود ولی هم‌زمان، زمان هیدروگراف نیز افزایش می‌یابد که با توجه به اهداف ذکر شده و این که مطلوب‌ترین حالت زمانی است که تمام موارد در بهترین حالت (ضخامت، زمان تخلیه، دبی اوج، عمق بالادست و پایین‌دست هم‌زمان کمترین مقادیر خود دارا باشند) باشند.

منابع

- ۱- سامانی ج. و شایان‌نژاد م. ۱۳۸۱. ارائه معادله دبی اشل برای سدهای پاره‌سنگی به‌منظور تأخیر در سیلاب. ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۶۱-۱۳۶۵.
- ۲- میرابزاده م. ۱۳۷۵. میزان تراوایی سدهای تأخیری پاره‌سنگی و کنترل سیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران، ۱-۱۰.
- 3- Adrian D. D. 1965. Turbulent flow in porous media. Proc. Paper 4304. Journal of Hydraulic Division, ASCE 91 (3): 321-323.
- 4- Ahmad N. and Sunada D.K. 1965. Non linear flow in porous media. Hydraulic Division, Proc. of the ASCE 95 (6): 1848-1857.
- 5- Forchheimer P. H. 1901. Wasserbewegung durch Boden. Zeitschrift dse vereinst Deutscher Ingenieure, 49:1736 – 1749 and 50:1781 – 1788..