تألیف: شوجیونگ شین XUJIONGXIN انیستیتوی جغرافیای آکادمی علوم چین
ترجمه: سید ابوالفضل مسعودیان

بررسی آزمایشگاهی واکنش پیچیده در هماهنگی رودخانه در پایین دست مخازن

AN EXPERIMENT STUDY TO REVEAL THE RIVER CHANNEL ADJUSTMENT DOWNSTREAM FROM A RESERVOIR

Tr: S.A. Massoudian

An experimental study is described which attempts to reveal the complex response process of river channel adjustment downstream from a reservoir. A descriptive model has been established which identifies three adjustment stages. In stage I following the change of water and sediment input, the width- depth ratio of river channel (w/d) and the river channel gradient (s) both decrease, but the river channel sinuosity (r) increases. In stage II, because of feedback from the changing boundary conditions, w/d starts to increase, r decreases and the rate of gradient decrease becomes very slow. In stage III, equilibrium is reestablished, w/d, r, and s tend to constant values, and the system recovers its stable state.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

چکیده

در این مقاله مطالعه‌ای تجربی تشریح می شود که می‌کوشد پرتویی روشنگر بر فرایند پاسخ پیچیدهٔ هماهنگی رودخانه در پایین‌دست مخزن بیافکند. یک نمودار توصیفی ابداع شده است که در هماهنگی رودخانه یک روند سه مرحله‌ای را مشخص می‌کند. در مرحلهٔ نخست به دنبال تغییر میزان آب و رسوب ورودی نسبت پهنا به ژرفا w / d و شیب رودخانه s هر دو کاهش می یابند؛ اما میزان خمیدگی رودخانه r افزایش پیدا می‌کند. در مرحلهٔ دوم به موجب پس‌خور حاصل از تغییر شرایط کرانه‌ای w/d شروع به افزایش کرده، r کاهش می یابد و از سرعت کاهش شیب رودخانه بسیار کاسته می شود. در مرحلهٔ سوم باز تعادل برقرار می شود؛ w / d، r و s به مقادیر ثابتی نزدیک می شوند و سیستم حالت پایداری خود را باز می یابد.

پیشگفتار

یک شبکه رودخانه‌ای را می‌توان چونان سیستم بازی در نظر گرفت که در حالت تعادل پویاست و در آن متغیرهای وابسته‌ای چون شکل رودخانه، شیب و طرح افقی رودخانه با داده‌های میزان دبی و رسوب هماهنگ می شود. هرگاه تغییری در این داده‌ها پدید آید این سیستم با هماهنگ کردن ویژگیهای ریخت‌شناسی خود با وضعیت جدید به سرعت واکنش نشان می دهد. این درست همان چیزی است که پس از ساخت مخازن در مسیر رودها در آبراهه رخ می دهد. پس از یک رشته هماهنگی هایی که به معنای بازگشت حالت پایداری به سیستم است، تعادل جدید به دست می‌آید. هر سیستم مرکب از اجزاء مختلفی است. به محض این که تغییری در داده‌ها پدید آید برخی از اجزاء سیستم سریعاً از خود عکس‌العمل نشان داده و به دنبال آن تغییراتی را در سایر اجزاء سیستم برمی انگیزند. علاوه بر پس‌خورندگی مثبت و منفی، بین متغیرهای خود سیستم هم رابطهٔ اندرکنشی وجود دارد که فرایند هماهنگی را بسیار پیچیده می‌کند. این تغییرات را می توان همان پاسخهای نخستین و ثانوی به محرکهای محیطی دانست که هووارد Howard (1965) آنها را تشریح کرده است. این نوع فرایند را می توان پاسخ پیچیده در سیستمها نامید. Schumm هم این مفهوم را برای سیستمهای ژئومورفولوژی یکی به کاربرد و در این کار تغییرات پی در پی پیچیده‌ای که پس از پایین رفتن سطح اساس در درهٔ یک رودخانه رخ می دهد را در سال ۱۹۷۳ بخوبی توضیح داد. پتس petts در سال ۱۹۷۹ پاسخ پیچیدهٔ مورفولوژی رودخانه در برابر ساختن مخزن در مسیر رود را با استفاده از اطلاعات مربوط به انواع مخازن مطالعه کرد. (1985) چین Chien به منظورهای دیگری پاسخ هماهنگی رودخانه در برابر مخازن بالا رود را توضیح داد و در این مورد برای چین قواعدی به دست آورد. در این مقاله می‌کوشیم تا با استفاده از مفهوم پاسخ پیچیده به عنوان مفسر مطالعه آزمایشگاهی خود فرایند هماهنگی را در پایین دست مخازن توضیح دهیم.

طرح کلی آزمایش

آزمایشها بر روی مدلی به ابعاد ۳۰ × ۴/۵ متر در آزمایشگاه ژئومورفولوژی رودخانه‌ای انستیتوی جغرافیائی آکادمی علوم چین انجام گرفت. این آزمایش بر روی مدلی با بستر

پویش‌پذیر انجام گرفت تا فرایند هماهنگی رودهای پریش و سرگردان و پررسوب را در برابر ساختن سد شبیه‌سازی کند. این گونه رودها در شمال چین فراوانند. این آزمایش بر روی یک مدل مقیاسی انجام نشد و رود خاصی را به عنوان الگوی اصلی برنگرفتیم؛ بلکه مورفولوژی عمومی و ویژگیهای متحول رودهای سرگردان و پریش را شبیه‌سازی کردیم. پس این شبیه‌سازی کیفی است نه کمی. آزمایش بر روی رودهای مدل، برای تحقیق دربارهٔ الگوی رودخانه‌ها در چین بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققان چینی این نوع آزمایش‌ها را «آزمایش بر روی مدل خام» می نامند. دو طرف فلوم با دو ریل آهنی افقی بسته شده است. بین ریلها یک پل متحرک نصب شده بود که روی آن یک سنجه و یک دستگاه اندازه‌گیری ریز وجود داشت. این پل با نیروی برق در طول ریلها حرکت می‌کرد و به وسیلهٔ آن اندازه‌گیریهای سه‌بعدی مورفولوژی رودخانه مدل انجام می‌گرفت. یک پمپ آب را در رودخانهٔ مدل به گردش درمی‌آورد و رسوب هم در دهانه رودخانه به آن افزوده می شد. بیست مقطع عرضی روی مدل تعبیه شد که بین مقاطع مجاور یک متر فاصله وجود داشت. در طرح این مدل از دو معیار پیروی شده بود.

۱) یکنواختی رژیم جریان که جریان زیر آستانه و آشفته را در رود مدل تضمین می‌کرد. ۲) سرعت جریان از سرعت آستانهٔ لازم برای غوطه‌ور شدن مواد بستر و کرانه‌های رودخانهٔ مدل بیشتر بود. آزمایش شامل دو بخش بود: نخست آزمایشِ تشکیل آبراهه که در این بخش یک رود مدل پریش و سرگردان شکل گرفت و بخش دوم معرف تخلیهٔ مقدار ثابتی آب صاف بود که وضع رسوب و آب جاری را در پایین دست مخازن شبیه‌سازی می‌کرد.

برای مدل از ماسه طبیعی، ولی برای شبیه‌سازی از ساختار کرانهٔ یک رودخانه واقعی استفاده شد. کرانه‌ها در دو لایه ساخته شد. قطر میانهٔ دانه‌های لایهٔ رویی ۰/۰۹ میلی‌متر و قطر میانهٔ دانه‌های لایهٔ زیرین ۰/۲۵ میلی‌متر بود. این روش شبیه کاری بود که شوم و جین schamm و Jin در آزمایشی که برای شبیه‌سازی خمیده رودها انجام دادند از آن استفاده کردند. شیب طولی لایهٔ رویی و زیری به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۸ بود و در نتیجه همانند کرانهٔ رودهای طبیعی که قطر لایهٔ ریزبافت رویی آنها به طرف پایاب افزایش می یابد ضخامت لایهٔ رویی زیادتر می شد. رود مدل همه‌جا بستر خود را در لایه ماسه‌ای زیری حفر می‌کرد و مواد چسبنده لایه رویی بخش بلندتر کرانه رودخانه را تشکیل می دادند.

میزان سیلت- رس نسبت به مواد دیگر کرانه در طول رودخانهٔ مدل تغییر می‌کرد و این امکان را فراهم می ساخت که اثر تغییر مکان در میزان مقاومت کرانه های رودخانه در برابر فرسایش را بررسی کنیم؛ اما چون توجه ما در این تحقیق معطوف به بررسی تغییر زمانی شکل کرانه رودخانه بود تغییرات مکانی مورفولوژی این نوع کرانه ها را به بحثی دیگر واگذاشتیم. رودخانه مستقیم اولیه شیبی برابر ۰/۰۰۷ داشت و دارای مقطعی ذوزنقه‌ای بود (پهنای کرانه و بستر رودخانه به ترتیب ۲۱ و ۷ سانتی متر و شیب عرضی مدل ۱: ۱ بود). چون شبیه سازی فرایند سیل در مقیاس زمانی واقعی آسان نبود با تخلیهٔ مقدار ثابتی آب و میزان فراوانی رسوب مسأله شبیه سازی یک رودخانه پریش و سرگردان را حل کردیم. میزان تخلیهٔ آب را در مرز ۳/۵ لیتر در ثانیه نگه داشتیم و بار رسوب از ۲۵ کیلوگرم در ساعت به ۷۰ کیلوگرم در ساعت افزایش یافت که باعث تجمع ۱/۹۰ تا ۵/۵۶ کیلوگرم بر متر مکعب رسوب در دهانه رودخانه شد. طی ۳۰ ساعتی که صرف تشکیل آبراهه شد یک رودخانه پریش و سرگردان پدید آمد. این رودخانه بستری کم عمق و عریض داشت و طرح افقی آن تقریباً صاف و همراه با نهشته های میان رودخانه ای ناپایدار بود و خط القعر آن به سرعت تغییر مکان می داد.

در بخش دوم این آزمایش میزان دبی را ثابت نگه داشتیم اما رسوبی به رود اضافه نکردیم. دلیل انجام چنین کاری آن بود که در بیشتر مخازن چین که نه به منظور آبیاری بلکه برای تولید نیروی الکتریکی ساخته شده بودند میانگین میزان تخلیه سالانه پیش و پس از ساختن سدها تغییر چندانی نشان نمی داد. برای نمونه میانگین دبی سالانه رود Hanjiang که طویلترین سرشاخه رود Yangtze است پیش و پس از ساختن سد Danjiangkou به ترتیب ۱۷۴۰ متر مکعب در ثانیه و ۱۶۱۰ متر مکعب در ثانیه بوده است که تنها کاهشی حدود ۸/۱ درصد را نشان می دهد. پس از تغییر رژیم رسوب رودخانه، آب زلالی که به طور ثابت تخلیه می شد اندک اندک به شست و ساب بستر رودخانهٔ مدل پرداخت. این فرایند شبیه همان چیزی است که پس از ساختن مخازن در رودخانه های واقعی رخ می دهد. یک رشته تغییرات هم در درهٔ رود پدید می آید که در همین مقاله توصیف و تشریح خواهد شد.

شاخصهای کمّی توضیح دهنده سیستم رودخانه در پایین دست مخازن

شاخصهای زیر برای بیان ویژگیهای رودخانه ها در پایین دست، مخازن تعریف می شوند:

شاخص‌های شرایط کرانه‌ای: از مقایسه شاخصهای مختلفی که مبین مقاومت کناره‌های رودخانه در برابر فرسایش می باشند و تا کنون گزارش شده‌اند، چنین به دست می آید که:

۱) ارائه هر شاخص برای مقاومت رودخانه در برابر فرسایش باید بر رابطهٔ میان مقاومت مواد کرانه‌های رودخانه و تنش برشی آب جاری بر کرانه‌ها استوار باشد.

۲) به علت تفاوت مکانیزم حرکت مواد در بستر و کرانه‌های رودخانه با هم منطقی و لازم است که میان شاخصهای مقاومت بهتر و کرانه فرق بگذاریم. مواد بستر رودخانه آنگاه به حرکت درمی‌آید که تنش برشی جریان از تنش برشی آستانهٔ آنها بیشتر باشد؛ در حالی‌که در مورد مواد کرانه‌ها لغزش و ریزش ثقلی هم نقش مهمی دارد. افزون بر این یک شاخص هم برای مقاومت نهشته‌های گوژکرانه در برابر فرسایش می خواهیم؛ چون نهشته‌های گوژکرانه سهم زیادی در فرایند هماهنگی در پایین دست مخازن دارند و مابعداً این موضوع را تشریح خواهیم کرد.

شاخص مقاومت کرانه: Schumm(1960) در تحقیق معروف خود چنین مطرح می سازد که: میزان سیلت-رس موجود در کرانه‌های رودخانه M را می توان به عنوان شاخصی برای بیان مقاومت کرانه در برابر فرسایش بکار برد. با استفاده از داده‌هایی که Dunn در سال ۱۹۵۹ با روش تجربی به دست آورد، نگارنده این سطور حداکثر تنش برشی آستانه (Tc به کیلوگرم بر متر مربع) را با درصد سیلت- رس موجود در مواد فرسایشی M در رابطه گذاشته و معادلهٔ تجربی زیر را به دست آورده است:

$$Tc = 0.0221M^{1.005} \qquad (r=0.965)$$

توان M به یک نزدیک است و این مبین آن است که حداکثر تنش برشی آستانه با میزان سیلت- رس متناسب است و منطقاً این یکی می تواند برای مشخص کردن آن دیگری به کار رود. براساس تحقیقی که Lane(1955) در مورد حداکثر تنش برشی آب جاری بر روی بستر و کرانه‌های رودخانه انجام داده حداکثر تنش برشی وارد بر کرانه برابر 0.76rds و بر روی بستر برابر rds می باشد. r گرانی ویژه آب، d ژرفای آب و S شیب رودخانه است. در تحقیق Lane ضریب تنش برشی وارد بر کرانه، به شیب کرانه رودخانه بستگی دارد و حداکثر به ۰/۷۶ می رسد. برای نزدیکی روشها ما هم برای بیان نیرویی که آب جاری بر کرانه‌ها وارد می‌کند همان ضریب ۰/۷۶ را اختیار می‌کنیم. اگر ما مقاومت کرانه

رودخانه در برابر فرسایش را با نسبت تنش برشی آستانهٔ مواد کرانه به حداکثر تنش برشی آب جاری تعریف کنیم خواهیم داشت:

$$Kw=M/(0.76\ rds)$$

Kw شاخص مقاومت کرانه در برابر فرسایش خواهد بود. در این تحقیق M به درصد و d به سانتی متر است.

شاخص مقاومت بستر: عموم محققین قبول دارند که تنش برشی آستانه رسوبات فاقد چسبندگی با نماد اندازه دانه ها D متناسب است. از تقسیم اندازه دانه ها بر تنش برشی وارد بر بستر رودخانه داریم:

$$Kb=D/(rds)$$

و با حذف r عدد حاصل بدون بُعد خواهد شد:

$$Kb=D/ds$$

حاصل این عبارت شاخص مقاومت بستر رودخانه در تحقیق ماست و ما قطر میانه D50 را به عنوان نماد اندازه دانه ها در نظر گرفتیم.

شاخص مقاومت نسبی: مواد کرانه به مواد بستر رودخانه: چون شکل مقطع رودخانه به تفاوت میان فرسایش پذیری مواد کرانه و بستر رودخانه بستگی دارد برای این منظور باید شاخصی ارائه دهیم. بسادگی می توان این شاخص را چنین نوشت: $Kr=kw/kb$

با حذف مقادیر مساوی داریم: $kr=M/D$

هرگاه مواد کرانه رودخانه همگن نباشند برای محاسبهٔ اثر ساختمان کرانه رودخانه ضریب شیب کرانه رودخانه m به این شاخص اضافه می شود. در این جا $m=ctg\theta$ و θ زاویه شیب کرانه رودخانه است. علت این است که هرچه مقاومت کرانه رودخانه در برابر فرسایش بیشتر باشد کرانه ها پرشیبتر برجای می مانند. به این دلیل m می تواند بازتاب اثر ساختمان کرانه رودخانه بر روی مقاومت این کرانه ها باشد و می توانیم این شاخص را چنین بازنویسی کنیم:

$$Kr= M/(D50.m)$$

شاخص مقاومت نهشته های گوژکرانه: به همین گونه این شاخص را می توان چنین نوشت:

$$Kp=Mp/tp$$

در این فرمول Mp برابر است با درصد سیلت- رس موجود در نهشته های گوژکرانه که می توان از آن برای مشخص کردن تنش برشی آستانهٔ آن بهره گرفت و Tp برابر است با تنش برشی جریان آب بر روی نهشته های گوژکرانه. چون تنش برشی جریان بر روی نهشته های گوژکرانه بسرعت تغییر می‌کند و اندازه گیری آن دشوار است Mp را به تقریب برابر با مقاومت نهشته های گوژکرانه گرفتیم.

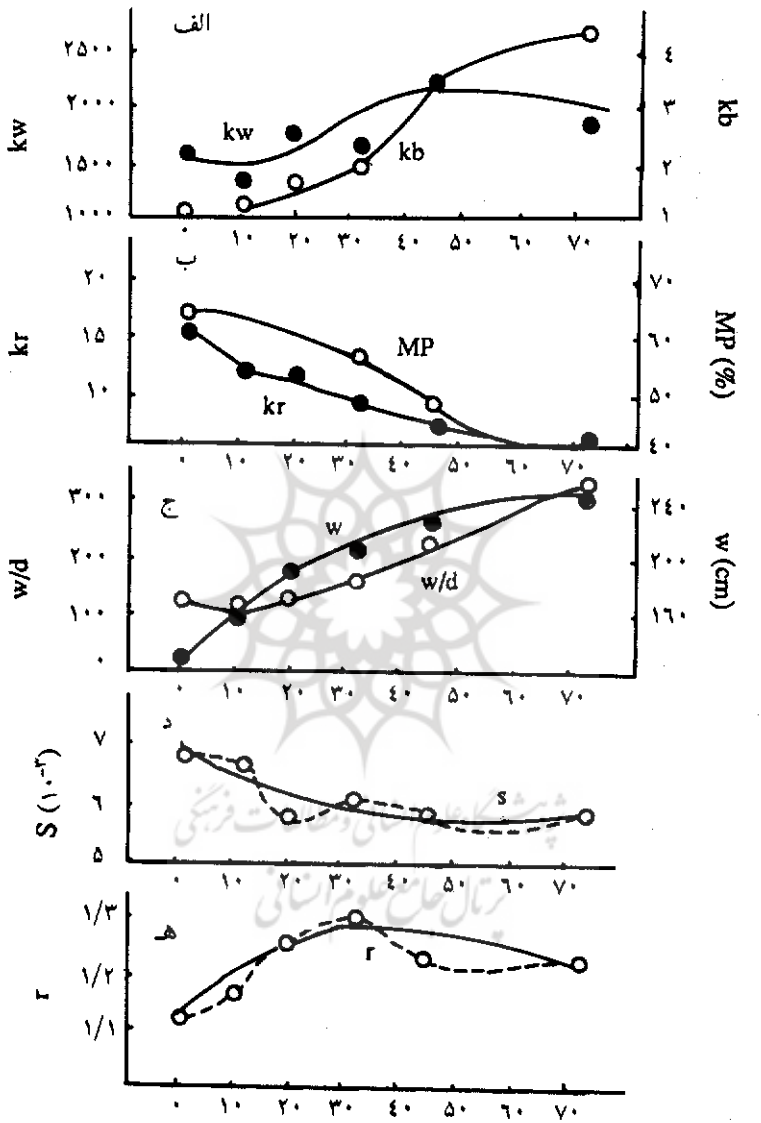
شاخص های هندسی رودخانه: در این تحقیق ما از شاخصهای زیر استفاده کرده ایم:

۱) شیب رودخانه s ۲) نسبت پهنا به ژرفای رودخانه w/d ۳) شاخص خمیدگی r.

واکنش پیچیده رودخانه در پایین دست مخازن

مقادیر همهٔ شاخصهای بالا را برای زمانی که جریان آب صاف آغاز شد در نمودار(۱) رسم کرده ایم. این نمودارها آشکارا نشان می دهند که چگونه سیستم نسبت به تغییر داده ها در پایین دست مخازن واکنش نشان می دهد.

رودخانه پس از تغییر داده ها نخست با کاهش آرام نسبت پهنا به ژرفا، کاهش شیب و افزایش شاخص خمیدگی از خود واکنش نشان داد. علت آن است که بستر رودخانه کنده شده و نهشته های میان رودخانه ای یا رُفته و یا به کناره های رودخانه رانده شدند که این امر خود منجر به افزایش طول رودخانه می شود. در عین حال مقادیر شاخصها که بیانگر شرایط کرانه ای است در طول زمان تغییر یافتند (به نمودارهای(۱ الف)و(۱ ب)بنگرید). یک فرایند بازدارنده باعث شد در حالی‌که بسترسائی آب صاف موجب کاهش شیب رودخانه می شد اندازهٔ ذرات بستر رودخانه افزایش یابد. در نتیجه شاخص مقاومت بستر Kb افزایش یافت. تغییرات زمانی میزان مقاومت کرانه در برابر فرسایش Kw فرایند نسبةً پیچیده ای بود؛ یعنی نخست کاهش و پس از آن باز افزایش یافت. چون میزان سیلت- رس کرانه M خیلی کم تغییر می‌کند این فرایند عمدةً بازتاب روند تغییرات زمانی تنش برشی جریان بر روی کرانه بود. نخست به موجب افزایش بلندی آب که خود از حفر بستر رودخانه ناشی می شود تنش برشی جریان افزایش یافت. وقتی بستر رودخانه پهن شد و پس از آن شیب رودخانه کاهش یافت (دنبالهٔ مقاله را بنگرید) تنش برشی جریان کاهش یافت. به علت افزایشی D50 میزان مقاومت نسبی Kr در طول زمان کاهش یافت در حالی‌که M و m



نمودار شماره یک: مدت شست و ساب به وسیلهٔ آب صاف به ساعت T

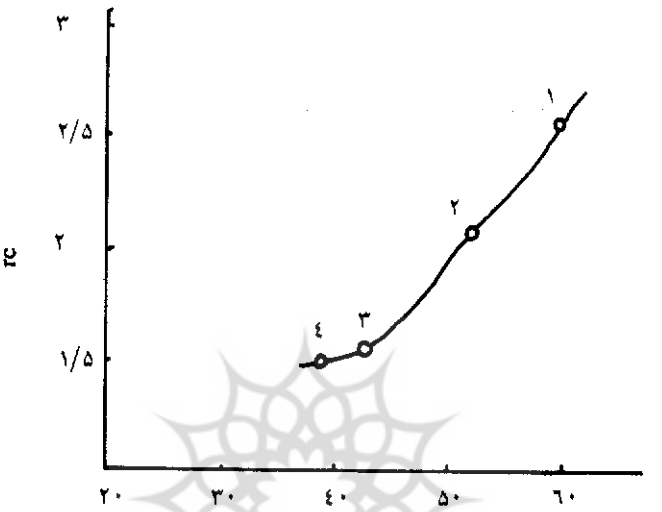
تغییرات ناچیزی از خود نشان دادند.

تغییرات شرایط کرانه ای نسبت به فرایند هماهنگی رودخانه به عنوان پس‌خور عمل

می‌کرد و درنتیجه از شدت بسترسائی کاسته شد؛ اما فرسایش کرانه رودخانه که درقالب پهن شدن بستر رودخانه خود را نشان می دهد تشدید شد (نمودار ۱ ج). وقتی میزان پهن شدن رودخانه از میزان بسترسائی پیشی گرفت شاهد روندی معکوس بودیم؛ یعنی نسبت پهنا به ژرفا رو به افزایش گذاشت.

واکنشهای مشابهی در هماهنگی طرح افقی رودخانه دیده شد. وقتی آب صاف به دهانه رود مدل رسید میزان رسوب آن برای تشکیل نهشته های گوژکرانه بسنده نبود. همراه با عقب‌نشینی کاوکرانه به آرامی نهشته های گوژکرانه نوی، که ارتفاع کمتر و مواد درشت دانه‌تر مشخصهٔ آن نسبت به نهشته های گوژکرانه پیشین بود، تشکیل می شد. این موضوع به مفهوم کاهش مقاومت نهشته های گوژکرانه Mp در برابر فرسایش است (نمودار ۱ ب) و پیدایش تند شیبهای چندی را بر روی نهشته های گوژکرانه دیده می شد. همراه با افزایش طول چم های رودخانه شیب کاهش یافت و مقاومت در برابر جریان آب که از شکل مار پیچی رودخانه ناشی می شد افزایش یافت. بنابراین سرعت جریان کاهش یافت و سطح ایستابی بالا آمد. این وضع باعث افزایش میزان آبی که توسط این تندشیب کوچک منحرف می شد گردید و درنتیجه تندشیب بزرگتر شد. این روند به نوبهٔ خود میزان آبی که در دام می افتاد را افزایش داد. افزون بر این شیب عمومی رودخانه از شیب این تندشیب کمتر بود و درنتیجه تندشیب خیلی سریع تکوین می یافت تا سرانجام میانهٔ نهشته های گوژکرانه از راه تند شیب شکافته شد و رود میان‌بر زد. و بدین‌ترتیب شاخص خمیدگی بشدت کاهش یافت. فرایند فوق‌الذکر بارها رخ داد. اندکی پس از تشکیل مسیر جدید چم دیگری در آن به وجود آمد. همیشه کرانه قدیمی جای گوژکرانه را می‌گرفت؛ زیرا طرف دیگر رودخانه فرسایش‌پذیرتر بود و به طور طبیعی کار کاوکرانه را انجام می داد (درواقع این کرانه پیش از آخرین میان‌بر محل تشکیل نهشته های گوژکرانه بوده است). وقتی این چم و نهشته های گوژکرانه تا حدی تکوین می یافتند دوباره میان‌بر رُخ می داد. همچنانکه میزان مقاومت نهشته های گوژکرانه در برابر فرسایش به مرور زمان کاهش می یافت (نمودار ۱ ب) میزان شاخص خمیدگی آستانه چم های پس از میان‌بر rc هم به مرور زمان کاهش می یافت. برای نمونه بر روی نهشته های گوژکرانهٔ واقع بین مقاطع ٤ و ٦ در بخش وسطای رودخانهٔ مدل در مجموع چهار بار میان‌بر انجام گرفت و هربار میزان rc کاهش می یافت. براساس این چهار میان‌بر نموداری برای rc و Mp رسم شده است (نمودار شماره ۲). میان‌برها

جلوی خمیدگی بیشتر رودخانه را گرفته و پس از رسیدن شاخص خمیدگی به حداکثر آن را تا حد بسیار زیادی کاهش می دادند (نمودار ۱ هـ).



نمودار شماره ۲

عامل دیگری که جلوی خمیدگی رودخانه را می‌گیرد پهن شدن بستر رودخانه است (۱ ج). این عامل رودخانه را کم‌ژرفاتر و پهنتر کرده و جریانات عرضی را ضعیفتر می‌کند. علاوه بر این نسبت پهنا به ژرفای بیشتر به معنای بالا رفتن احتمال تشکیل نهشته های میان رودخانه ای و بنابراین شاخص خمیدگی کمتر است. از داده های رودخانه های آبرفتی چین معلوم شده که افزایش پهنای رودخانه یک «پیچانرود» را به رودخانه پریشی تبدیل می‌کند که دبی لبالبی آن ثابت است (Xu 1985).

(نمودار ۱ د) با وجود نوسانهای ثانوی نشان می دهد که شیب رودخانه با گذشت زمان به‌طورکلی روبه کاهش می‌گذارد؛ اما مکانیزم پس‌خور فوق‌الذکر هم بر این فرایند تأثیر می‌گذارد. در ابتدای فرایند هماهنگی، شاخص مقاومت بستر پایین بود و بنابراین بستر به راحتی حفر می شد. به علاوه افزایش خمیدگی رودخانه هم موجب کاهش شیب رودخانه می شد. بنابراین سرعت کاهش شیب رودخانه بسیار بالا بود. وقتی لایه بازدارنده‌ای بتدریج

بر سطح بستر رودخانه تکوین یافت مقاومت بستر رودخانه Kb تا حد زیادی افزایش یافت. در عین حال افزایش فرسایش کرانه، رسوبات بیشتری را در اختیار رود می‌گذارد که باعث کاهش بیشتر توان شست و ساب آن می شود. به علاوه کوتاه شدن طول رودخانه بر اثر میان‌بر در این مرحله می تواند کاهش شیب را تا حدی جبران کند؛ بنابراین سرعت کاهش شیب بسیار کند شد. سرانجام رود به حالت تعادل جدیدی نزدیک می شود. به دلیل ورود آب صاف بدون رسوب شرایط تعادل را می توان چنین در نظر گرفت:

۱) تنش برشی آب جاری بر روی بستر برابر است با تنش برشی آستانهٔ مواد بستر رودخانه.

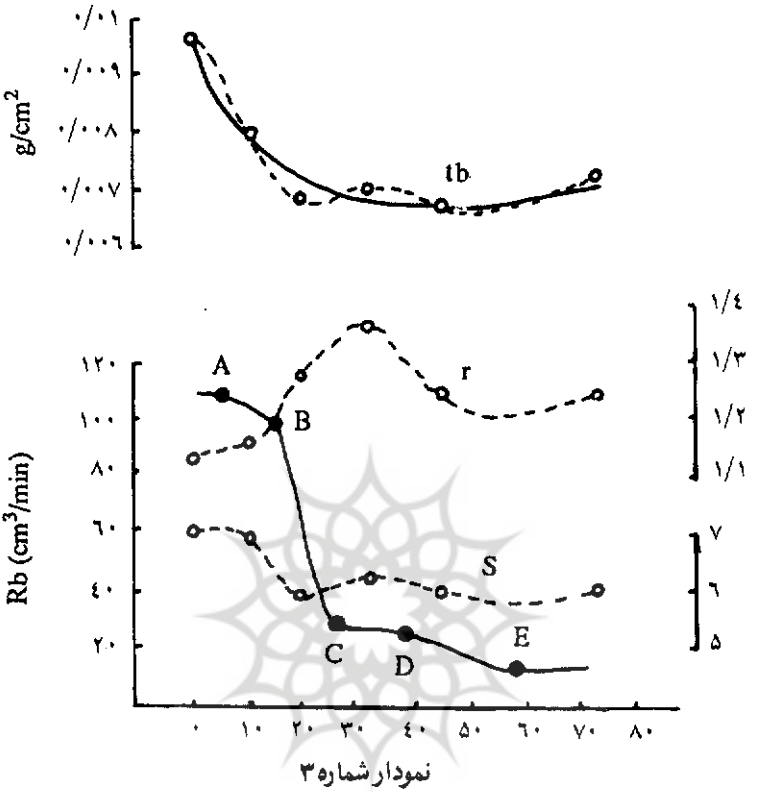
۲) تنش برشی آب جاری بر روی کرانه برابر است با تنش برشی آستانهٔ مواد کرانهٔ رودخانه. برای ساده‌گی کار فرض شده که در این مرحله در رودخانه هیچ رسوبی حمل نمی شود. مسأله نخست شرط تعادل در جهت طولی و مسأله دوم شرط تعادل در جهت عرضی رودخانه است. به موازات تکوین لایهٔ بازدارنده تنش برشی آستانهٔ مواد بستر رودخانه زیادتر شد. در همین حال تنش برشی وارد بر بستر به علت کاهش شیب رودخانه کاهش یافت. هرگاه این تنش با تنش برشی آستانه برابر شود رودخانه در جهت طولی به تعادل می رسد. هرچند تنش برشی آستانهٔ مواد کرانه تغییرات اندکی از خود نشان داد اما تنش برشی وارد بر کرانه رودخانه به موجب کاهش شیب و ژرفای رودخانه کاهش قابل‌توجهی یافت. پس این دو تنش برشی هم می توانند باهم برابر شوند و از این لحظه است که سیستم وارد حالت پایدار جدیدی می شود. از مقایسهٔ تغییرات زمانی پهنای رودخانه W با مقاومت کرانه در برابر فرسایش Kw هم می توانیم شاهد یک پس خورندگی منفی که نقش مهمی در هماهنگی پهنای رودخانه دارد باشیم. افزایش پهنای رودخانه به موجب کاهش تنش برشی جریان بر کرانه شد و بنابراین میزان Kw افزایش یافت. افزایش Kw به نوبهٔ خود باعث کاهش فرسایش کرانه و پهن شدن رودخانه شد.

طرح افقی رودخانه هم به حالت پایدار جدیدی رسید. همچنان که در نمودار شماره(۲) نشان داده شده شاخص خمیدگی آستانهٔ چم های پس از میان‌بر را می توان به عنوان تابع مقاومت نهشته های گوژکرانه Mp درنظر گرفت. وقتی هماهنگی انجام گرفت میزان سیلت- رس نهشته های گوژکرانه کاهش می یابد و به حد ثابتی می رسد و در نتیجه میزان rc هم به حد ثابتی نزدیک می شود. بنابراین میزان خمیدگی رودخانه به طورکلی در

یک دوره متوسط زمانی به حد ثابتی نزدیک می شود.

نوسان‌های ثانوی در فرایند هماهنگی

Hery(1979) درمطالعه‌ای که پیرامون هماهنگی رودخانه انجام داد یک مدل پویای فرایند- پاسخ بنا نهاد و گفت: نوسان خفیفی که از تغییر میزان رسوب ورودی سرچشمه می‌گیرد ممکن است یکی از مشخصه‌های فرایند هماهنگی باشد. این پدیده در آزمایش ما نیز خودرا نشان داد. باتوجه به نمودارهای (۱ د) و (۱ هـ) درک این نکته که نوسانهای ثانوی بر روند کلی هماهنگی شیب و چم‌های رودخانه حاکمیت داشته‌اند مشکل نیست. این نوسانها که با خطوط نقطه‌چین نشان داده شده‌اند را می توان به وسیلهٔ اندرکنش میان متغیرهای سیستم رودخانه در پایین دست مخازن توضیح داد. تغییرات زمانی تنش برشی جریان بر بستر رودخانه مدل tb و تغییرات زمانی میزان رسوب حاصل از فرسایش مواد کرانه Rb روند یکسانی را نشان دادند؛ یعنی میزان Rb به موازات افزایش تنش برشی جریان افزایش یافت. به نظر می رسد که بتوان وجود نوسانهای ثانوی در هماهنگی شیب و چم‌های رودخانه را به تغییر میزان رسوب حاصل از فرسایش مواد کرانه نسبت داد. در نمودار شماره(۳) مقدار Rb از نقطهٔ A تا B در حد بالایی مانده و رود برای حمل رسوب حاصل از فرسایش مواد کرانه ناچار به صرف انرژی زیادی است. در نتیجه نرخ کاهش شیب باید کند باشد. از نقطهٔ B تا C کاهش شدیدی در مقدار Rb قابل مشاهده است. در پاسخ به این وضع رود برای همپایی با کاهش رسوب حاصل از فرسایش مواد کرانه مصرف انرژی خود را تا حد زیادی پایین می آورد. این امر باعث تند شدن نرخ کاهش شیب می شود. از C تا D میزان Rb باز به کندی کاهش می یابد و در پی آن نرخ کاهش شیب هم کند می شود و شیب S حتی اندکی هم افزایش می یابد. از نقطهٔ D به بعد میزان رسوب حاصل از فرسایش مواد کرانه بسیار کم می شود که البته بر شیب اثر ناچیزی می‌گذارد. تغییرات زمانی Rb بر هماهنگی و خمیدگی رودخانه هم اثر می‌گذارد. از A تا B که رسوب حاصل از فرسایش مواد کرانه بسیار بالاست رودخانه برای حمل این بار نیاز به شیب نسبةً تندی دارد. این امر افزایش طول رودخانه را محدود کرده و بنابراین باعث کند شدن نرخ افزایش خمیدگی رودخانه شد. از B تا C مقدار Rb بشدت کاهش یافت و در پی آن نرخ افزایش خمیدگی رودخانه بسیار تندتر شد. از C به بعد میان‌برهای متوالی رخ



نمودار شماره ۳

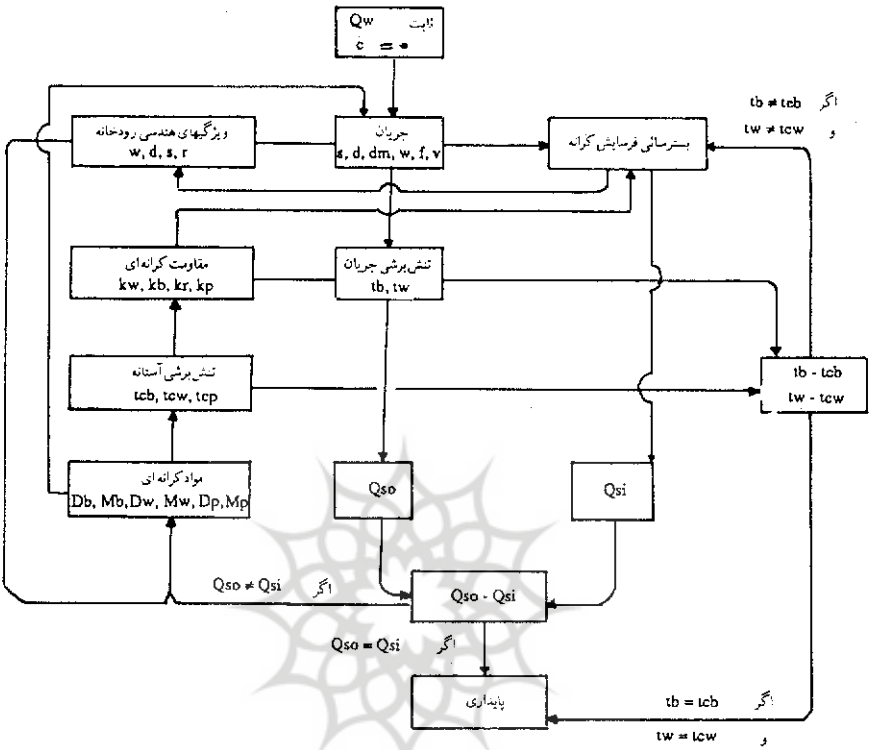
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

دادند که بر خمیدگی رودخانه غلبه کردند و اثر میزان رسوب را تحت‌الشعاع قرار دادند.

از مقایسهٔ نوسانهای ثانوی tb با نوسانهای ثانوی S آشکار می شود که این نوسانها کم و بیش به طور هـمـزمان رخ می دهنـد. ایـن بدان معناسـت که شیب بـه نـوبهٔ خود بر فـرایـند فرسایش کرانه اثر گذاشـته و بنابراین از طریـق تنش برشی جریان، بر میزان رسوب حاصل از فرسایش کرانه ها هم تأثیر گذارده. این مکانیزم پس خور در فرایند هماهنگی نقش مهمی ایفا می‌کند.

مدل توصیفی پاسخ پیچیده در هماهنگی رودخانه در پایین دست مخزن

توجه به تحـلیلی که گـذشت نشان می دهد کـه اندرکنش میان مـتغیرها در یک سیستم رودخانه‌ای بسیار پـیچیده است. Hery (1979) این اندرکنش ها را به وسیلهٔ نمودار جریانی



نمودار شماره ٤

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

فرایند- پاسخ که بر معادلات پیوستگی، مقاومت جریان و حمل رسوب متکی است بخوبی توضیح داده است. این نمودار از داده‌های متغیر رودخانه در پایین دست مخزن آغاز می شود که می توان آنها را بدین ترتیب خلاصه کرد:

ثابت = QW = دبی ۰ = C = تراکم رسوب

ما اندرکنشهای میان متغیرها را در نمودار شماره(٤) نشان داده‌ایم.

در این نمودار می توان چگونگی انجام پس‌خور و چگونگی انجام هماهنگی در رودخانه در جهت رسیدن به حالت پایداری جدید را دید. در این نمودار وضعیت تعادل حمل رسوب که با عبارت، : Qso=Qsi بیان شده به واسطهٔ کاهش مستمر Qso و Qsi و در نهایت نزدیک شدن آنها به صفر نشان داده شده است. اما این نمودار نمی تواند تمامی فرایند پاسخ پیچیدهٔ متغیرهای ژئومورفولوژیکی را با متغیرهای مستقلی که در این مقاله توضیح داده

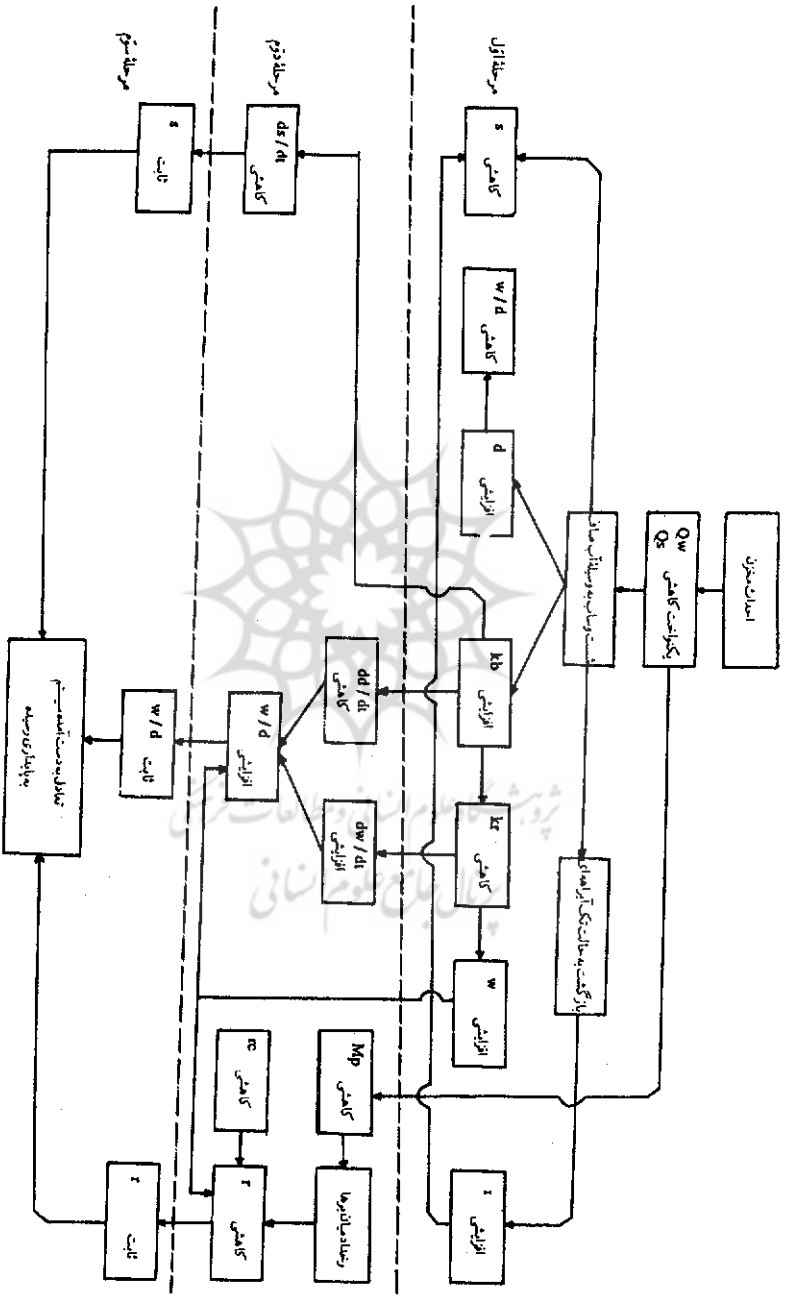
شد نشان دهد. ما به عنوان مکمل نمودار(٤) نمودار دیگری را ابداع کرده‌ایم تا مراحل مختلف فرایند هماهنگی رودخانه را نشان دهیم. این نمودار را می توان یک نمودار توصیفی تلخیص شده برای بیان واکنش پیچیده در هماهنگی رودخانه در پایین دست مخزن تلقی کرد (نمودار شماره ۵). در هماهنگی رودخانه در پایین دست مخزن روابط متقابل عناصر سیستم با هم و پس خور میانی آنها باعث ایجاد پاسخ پیچیده می شود و آن را کنترل می‌کند. مکانیزم پس خور سیستم را به راه پیچیده‌ای می‌کشاند؛ اما سرانجام آن را به حالت پایدار جدیدی نزدیک می سازد. بر مبنای این روند پیچیده هماهنگی در پایین دست مخزن به سه مرحله بخش می شود:

مرحلهٔ نخست: به موجب تغییر وضعیت داده‌ها w/d کاهش، s کاهش و r افزایش یابد.

مرحلهٔ دوم: به علت پس خورناشی از تغییر شرایط کرانه‌ای یک روند معکوس بروز می‌کند؛ یعنی w/d افزایش و r کاهش می یابد و سرعت کاهش شیب بسیار کند می شود.

مرحلهٔ سوم: تعادل دوباره برقرار می شود و w/d ، r و s مقادیر ثابتی پیدا می‌کنند که به معنای وارد شدن سیستم به یک حالت پایدار جدید است.

امید است این نمودار توصیفی ما را در درک بهتر تغییرات رودخانه در پایین دست مخزن یاری کند. در چین تحقیقات زیادی در این زمینه منتشر شده اما متأسفانه در مورد گرایش کلی هماهنگی رودخانه پس از احداث مخزن اختلاف نظرها شدید است و این اختلاف نظرها گاه دربارهٔ یک رودخانه معین هم وجود دارد. در شمال چین اغلب رودها به علت فرسایش شدید در حوضه بار رسوبی بالایی دارند و الگوی رودخانه‌ای پریش اما ناپایدار در این منطقه بیشتر دیده می شود. وقتی روی چنین رودهایی سد می زنند ما مجبور می شویم برای دستیابی به چگونگی ارزیابی جهت تغییرات رودخانه تحقیق جدیدی انجام دهیم. یک نظر آن است که بسترسائی هماهنگی رودخانه را هدایت می‌کند و از نظر الگو رودخانه به یک پیچانرود تبدیل می شود، نظر دیگر آن است که علاوه بر بسترسائی پهن شدن بستر نیز هماهنگی رودخانه را هدایت می‌کند و از نظر الگو رودخانه پریش و ناپایدار می ماند. تغییراتی که در Yellow river در پایین دست سد Samenxia طی سالهای ۱۹٦۰ تا ۱۹٦٤ رخ داده نظریه اول را تأیید می‌کند. در این دوره زمانی از مخزن آب صاف



نمودار شمارهٔ ۵

به رودخانه ریخته می شد. بعدها از سد تنها به عنوان سیل گیر استفاده شد و این بدان‌معناست که باز بار رسوبی زیادی می توانست از سد بگذرد. اما تغییرات رودخانه Yongdinghe در پایین دست سد Guating نظر دوم را تأیید می‌کند. از دیدگاه پاسخ پیچیده‌ای که در این مطالعه تشریح شد این دو نظر را می توان با هم سازگار ساخت. به علت اختلاف محیط طبیعی و اختلاف شرایط کرانه‌ای رودخانه‌ها با هم دوام مراحل فوق‌الذکر در رودخانه‌های مختلف با هم فرق می‌کند. برای نمونه در رودخانه زرد (Yellow river) که مواد کرانه آن ریزبافت و قطر میانه ذرات آن ۰/۰۵۷ تا ۰/۰۹ میلی متر است مرحلهٔ اول طولانیتر بود به طوری که گرایش کلی به بسترسائی را می شد در آن دید. از سوی دیگر مواد بستر رودخانه Yongdinghe درشت‌دانه هستند و قطر میانه ذرات آن ۱ تا ۲/۰ میلی متر است و یک لایه قلوه‌سنگی کف بستر آن گسترده شده بنابراین فرایند بازدارنده خیلی زود تکوین یافت و مرحلهٔ اول کوتاهتر بود. پس از آن مرحلهٔ دوم آغاز شد که گرایش کلی به پهن شدن رودخانه را نشان می داد. از دیدگاه پاسخ پیچیده در تمام مراحل هماهنگی یک گرایش خاص وجود ندارد. هرگاه گرایش رودخانه به سوی افزایش خمیدگی آن باشد نباید با اطمینان ادعا کرد که رودخانه به یک پیچانرود تبدیل خواهد شد؛ چون ممکن است باز از خمیدگی رودخانه کاسته شود. این که رودخانه به یک پیچانرود تبدیل خواهد شد یا نه بستگی به خمیدگی رودخانه در مرحلهٔ سوم دارد.

با استفاده از مفهوم پاسخ پیچیده در هماهنگی رودخانه در پایین دست مخزن می توان تغییرات رودخانه در مراحل مختلف را به‌طورکلی پیش‌بینی کرد. بنابراین می توان خود را پیشاپیش با اقدامات ضروری تطبیق داد. مثلاً در مرحلهٔ اول هماهنگی گرایش رودخانه به سوی بسترسائی است. این امر باید مردم را متوجه اهمیت حفاظت کرانه‌ها کند. وقتی رودخانه به سوی پهن شدن می رود ویرانی غیرموجهی پدید می‌آید. اگر ما پدیدهٔ پاسخ پیچیده را درک کنیم می‌توانیم جلوی این نوع ویرانیها را بگیریم.

سپاسگزاری

از دوست عزیز آقای عباس رفسنجانی که از یاری های ایشان برخوردار بوده‌ام سپاسگزاری می نمایم. با وجود تلاش فراوان بی شک این اثر خالی از خطا نیست. مترجم سپاس های فراوان خود را پیشاپیش عرضهٔ دوستانی می‌کند که این خطاها را گوشزد نمایند.