

آب‌شناسی تصادفی

آب‌شناسی تصادفی

گوناگون و مدیریت آب و طرح‌های مهندسی (الگوهای عرضه آب، نیروگاه‌های برقی، نظام‌های آبیاری و محافظت از سیلابها، سدها و غیره) است که متغیرهای آب‌شناختی به عنوان نمایشگر بخشی از ورودیها برای آنهاست؛ دیگران آن را عمدتاً به عنوان نظریه تصادفی چرخه آب‌شناختی می‌دانند (درباره این نظر، در [۱۰] بحث شده است).

تاریخچه

انگیزه پیدایش آب‌شناسی تصادفی تعارض بین عدم امکان پیش‌بینی واقعی جریان آب برای دوره‌های زمانی طولانی در آینده (ماهها، سالها) و اهمیت آگاهی از جریان آب آینده است که برای طراحی بی‌خطر پلها بر روی رودخانه‌ها، آب‌بندهایی که از آب‌گرفتگی زمینهای کم ارتفاع محافظت کنند، و برای برنامه‌ریزی عرضه مکفی آب و تأسیسات برقی ضروری است.

نخستین نتیجه، معرفی توزیعهای احتمال متغیرهای آب‌شناختی از طریق تحلیل فراوانیها بود که برای اولین بار در مورد نرخهای ماکسیمم جریان به کار بسته شد (مثلاً، مفهوم «سیل ۱۰۰ ساله») از روی تابع توزیع تجمعی* ماکسیمم جریانهای سالانه به عنوان ماکسیمم سالانه‌ای که دارای احتمال تجاوز ۱٪ است، تعریف شد) و سپس در مورد نرخهای متوسط جریان و شدتهای بارش در فاصله‌های زمانی (معمولاً ساعت، روز، ماه یا سال) به کار رفت. کاربردهای آب‌شناختی تحلیل فراوانی و سایر فنون آماری که ترتیب دنباله‌ای مشاهدات مربوط به متغیری مفروض را نادیده می‌گیرند، اغلب آب‌شناسی آماری*

علم آب‌شناسی، به معنایی وسیع، با آبهای زمین، رخداد، گردش و توزیع آنها، خواص فیزیکی و شیمیایی و اثر متقابل آنها با محیط، شامل همه صورتهای حیات سر و کار دارد. ولی اندیشه آب‌شناسی تصادفی* از مفهوم اختصاصیتر و معمولتر مفهوم آب‌شناسی به عنوان علمی که به جنبه‌های کمی فرایندهایی می‌پردازد که حاکم بر خالی شدن تدریجی و دوباره پر شدن منابع آب خشکیهای زمین هستند، نتیجه می‌شود. این فرایندها چرخه آب‌شناختی را تشکیل می‌دهند و شامل بارش، تبخیر و تعریق، تراوش و نشست، جریانهای زیرزمینی و رواناب سطحی است که مهمترین مؤلفه آن جریانهای آبی است. جنبه‌های کمی آنها متضمن توصیفهای ریاضی رفتار متغیرهای ذیربط چون نرخ بده جریانهای آبی Q (به متر مکعب در ثانیه) یا شدت بارش P (به میلیمتر در ساعت) در زمان t و / یا مکان و رابطه‌های متقابل آنهاست.

نظر غالب این است که هرگاه برخی متغیرها یا پارامترهای موجود در صورت‌بندیهای ریاضی فرایندهای آب‌شناختی به عنوان صفت‌های* متغیر (یا متغیرهای تصادفی*) تعریف شوند، این صورت‌بندیها متعلق به مبحث آب‌شناسی تصادفی‌اند. گرچه، این تعریف چندان یکنواخت نیست. برخی نویسندگان معنای آن را به صورت‌بندیهای جریان آب در قالب فرایند تصادفی* و حتی به نمایش جریان آب به صورت فرایند تصادفی، محدود می‌کنند [۸]. برخی معتقدند که آب‌شناسی تصادفی صرفاً پرداختن به مشخصه‌های آماری متغیرهای آب‌شناختی به منظور کمی کردن مخاطره یا قابلیت اعتماد مربوط به پروژه‌های

خوانده می‌شود. این اصطلاح به عنوان مترادفی برای آب‌شناسی تصادفی نیز به کار می‌رود.

گام بعدی وارد کردن ترتیب دنباله‌ای مشاهدات در تحلیلها بود. این کار نخستین بار در مورد سری جریانهای آبی برای طرّاحی ظرفیت ذخیره‌سازی مخزنی به کار رفت که قرار بود خروجی پیوسته‌ای («خروجی ایمن»، «خروجی هدف» و ...) را در دوره‌ی زمانی مفروضی تحویل دهد. ریپل [۱۶] در همان سال ۱۸۸۳ متوجه شد که روش معاصر محاسبه‌ی ذخیره‌ی مورد نیاز (به عنوان کمبودی که تحت فرمول «خروجی هدف» مفروض در خشکترین سال سوابق موجود، حاصل خواهد شد) غلط است، زیرا پشت سر هم قرار گرفتن چند سال خشک کمتر می‌تواند منجر به کمبود جمعی بزرگتری شود. این اتفاق اهمیت ترتیب دنباله‌ای جریانهای سالانه را در طرّاحی ذخیره‌سازی محرز ساخت و در سال ۱۹۱۴، هی‌زن [۷] (مبدع کاغذ احتمال*) را به برآورد «احتمال سال خشک» (سالی که در آن مخزنی که خروجی هدف معینی را فراهم می‌کند خالی شده، و در عرضه‌ی آب خلل ایجاد شود؛ مقالات جدید در نظریه‌ی ذخیره‌سازی به جای سال خشک از اصطلاح سال شکست استفاده می‌کنند) از روی سوابق طولانی داده‌های تاریخی استاندارد شده‌ی حاصل از جریانهای آبی رودخانه‌های متعدد که به طور دلخواه مرتب شده بودند، رهنمون گردید. این کار موجب آغاز دو خط توسعه شد که طرّاحی مخازن ذخیره‌سازی را هدف گرفته بودند: (۱) مدل‌سازی تصادفی سری جریانهایی که به عنوان جریانهای ورودی مخزن به کار می‌روند. (۲) مدل‌های تصادفی مخازن ذخیره‌سازی.

نخستین مسیر در دهه ۱۹۲۰ با تولید جریانهای سالانه‌ی مصنوعی به عنوان یک سری تصادفی که از توزیع جریانهای متوسط سالانه به کمک نمونه‌گیری بدون جایگذاری ساخته شدند، شروع شد. این مفهوم از سوی حرفه‌ی مهندسی با سوءظن پذیرفته شد و برای تقریباً سه دهه مسکوت باقی ماند. در دهه ۱۹۵۰ با اختراع رایانه‌ی رقمی توجه به آن دوباره جان گرفت؛ معرفی مبحث تولید سری از طریق نمونه‌گیری با جایگذاری متعلق به این دوره است. مسیر دوم در دهه ۱۹۳۰ شروع شد و تا پایان دهه ۱۹۵۰ شیوه‌های متعددی را برای برآورد احتمال ذخیره‌سازی از طریق احتمال‌های انتقال وضعیّت ذخیره‌سازی ایجاد کرد. این نتایج اخیر از توزیع احتمال جریانهای سالانه (که از سوابق آماری جریانهای گذشته برآورد شده بودند) و یک قاعده‌ی انتخابی بده‌آب با فرض استقلال جریانهای سالانه به دست آمده بود و بعداً همین نتایج برای جریانهای

سالانه‌ای که به طور پیاپی همبسته‌اند، مطرح شدند. مثال کلاسیک برای حالت استقلال، همان مدل موران^۱ برای تقریب گسسته‌ی توزیع ذخیره‌سازی مانا در مخزنی متناهی به کمک بردار m - بعدی

$$P = pP$$

است، که در اینجا p ماتریس $m \times m$ از احتمال‌های انتقال است [۱۱، ۱۳]. نظریه‌ی تصادفی مخزنهای ذخیره‌سازی به یک نظام ریاضی مستقل گسترش یافته است که به جای کاربردهای آب‌شناسی، بیشتر بر استخراج نتایج صریح تأکید دارد، نیز ن. ک. سد، نظریه.

سالهای دهه ۱۹۶۰ توجهی زیاد به ساختار احتمالاتی وابستگی دنباله‌ای سریهای زمانی و همراه با آن تحلیل سریهای زمانی* [۹]، یعنی کاربرد خود همبستگی، تحلیل طیفی* و تحلیل دامنه‌ی انحرافهای جمعی از میانگین را به ارمان آورد (که در دهه ۱۹۵۰ با کارهای هریست^۲ شروع شده بود ن. ک. ۱۰ و ۱۲). این فنون عمدتاً در مورد میانگینهای سالانه، ماهانه و روزانه جریانها به کار گرفته شدند و بعدها به بارش و سایر متغیرهای آب‌شناختی گسترش یافتند [۶، ۱۷، ۱۸]. تحلیل سریهای زمانی، مدل‌های تصادفی برای تولید سریهای مصنوعی را به صورتی معنی‌دار بهبود بخشید، بدین معنا که به جای آنکه از درجه‌ی بالایی از اختیاری بودن قبلی آنها در انتخاب ساختار دنباله‌ای استفاده شود، از انتخاب مبتنی بر آمارهای معنی‌دار حاصل از داده‌های گذشته استفاده شد. حفظ این آمارها در دنباله‌های تولید شده تنها هدف مدل و تنها ملاک رسایی آن بود. این نوع مدل‌های آب‌شناختی تصادفی عملیاتی^۳ (تجویزی، تجربی) هستند. تنها هدف آنها نمایش عدم حتمیّت موجود در داده‌های آب‌شناسی به صورتی است که برای کمی نمودن تقریبی انواع مخاطرات آب‌شناختی مناسب‌اند (ن. ک. تصمیم، نظریه). ساختار تصادفی این مدل‌ها دارای هیچ مفهوم آب‌شناختی ذاتی نیست؛ بلکه اساساً فرمول‌هایی برای درون‌یابی آماری* داده‌های آب‌شناختی هستند و عمل برون‌یابی (مثلاً، برای تولید سری مصنوعی طولانی‌تر از سری تاریخی مربوطه، یا برای برآورد احتمال پیشامدهای نادری که بسیار دورتر از دامنه‌ی مشاهدات موجود هستند)، هیچ توجهی آب‌شناختی ندارد.

مدل‌های آب‌شناختی تصادفی عملیاتی معمولاً به

^۱ Moran
^۲ Hurst

^۳ Operational Stochastic Hydrologic Models

مدلهایی با حافظه کوتاه مدت و مدلهایی با حافظه درازمدت تقسیم می‌شوند. مثالی از مدل‌های با حافظه کوتاه مدت، مدل موسوم به مدل توماس - فایرینگ^۱ برای سری جریان متوسط ماهانه (یا فصلی) است،

$$x_{i,j} = \mu_j + \rho_j \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} (x_{i-1,j-1} - \mu_{j-1}) + \epsilon_i \sigma_j (1 - \rho_j)^{1/2},$$

که در آن i شماره ترتیب جریان x ، نماد j تعداد ماههای موجود در هر دوره سالانه، μ_j و σ_j به ترتیب، میانگین و انحراف معیار جریان متوسط x_j در ماه (فصل) j ام؛ ρ_j ضریب همبستگی بین جریانهای x_j و x_{j-1} ؛ و $\{\epsilon_i\}$ دنباله استاندارد شده مستقلی از توزیعی مفروض هستند [۵، ۱۲].
مثالی از مدل‌های با حافظه بلندمدت (که در ایجاد مصنوعی سری سالانه کاربرد دارد)، نوفه گاوسی* کسری گسسته است [۱۲، ۱۴] که متغیرهای آن به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$x_t = (H - 0.5) \sum_{u=t-M}^{t-1} (t-u)^{H-1/5} \epsilon_u,$$

که در آن M ثابتی برای حافظه است که مشابه با مرتبه فرایندهای میانگین متحرک است، ϵ_u متغیری گاوسی با میانگین صفر و واریانس واحد و H ضریب هرست* است (در سریهای آب‌شناختی: $0.5 < H < 1$).

مدلهای با حافظه کوتاه مدت و مدل‌های با حافظه بلندمدت، به مدل‌های چندمتغیره تعمیم یافته‌اند که قادر به تولید سریهای مصنوعی همزمان از چند متغیر آب‌شناختی هستند. (برای مثال، جریانهای آبی در چند ایستگاه اندازه‌گیری در طول یک یا چند رودخانه در حوزه‌ای معین یا سریهای بارش و رواناب، و غیره) به قسمی که در عین حال همبستگیهای متقابل، سوابق تاریخی داده‌ها را حفظ می‌کنند [۱۲، ۱۵].

در خلال نیمه اول دهه ۱۹۷۰، مجموعه مدل‌های آب‌شناختی تصادفی عملیاتی با معرفی نوفه گاوسی کسری سریع (ن. ک. حرکت‌های براونی کسری)، نوفه ناگاوسی کسری، مدل‌های خط شکسته و رده جدید مدل‌های میانگین متحرک اتورگرسیو* (ARMA) و مدل‌های میانگین متحرک جمع‌بسته اتورگرسیو* (ARIMA)، غنیتر گردید [۱، ۱۲]. معرفی تحلیل سیستمها* سزاوار توجهی خاص است، همین گونه است مفهوم تابع انتقال* که به طور دنباله‌ای تبدیل یک سری آب‌شناختی به سری دیگر (برای مثال سری بارش به سری رواناب) را ممکن ساخت. تابع

^۱ Thomas-Fiering

انتقال به عنوان تعمیمی از رگرسیون، بعد زمان را در مدل وارد می‌کند. این کار میدان عمل آب‌شناسی تصادفی را از شبیه‌سازی* به پیش‌بینی سریهای زمانی آب‌شناسی در زمان واقعی* گسترش داد. در حالی که مدل‌های تابع انتقال تصادفی در درجه اول برای مدل‌سازی وابستگی بین آن دسته از متغیرهای آب‌شناختی که به طور علی به هم مربوط‌اند، به کار رفته‌اند، با وجود این آنها مدل‌های عملیاتی بدون ارزش آب‌شناختی ذاتی هستند.

نیمه دوم دهه ۱۹۷۰ شاهد معرفی بسیاری از فنون ریاضی جدید بود. برای مثال تحلیل مداخله*، پالایه کالمن*، کریگیدن*، مدل‌سازی پیشامد - پایه، رگرسیون ستیغی* و تحلیل خوشه‌ای از این جمله بودند. ابداعی مهم و جدید، معرفی فرایندهای زمانی - مکانی* تصادفی و نظریه میدانهای تصادفی* بود که در طراحی و تحلیل شبکه‌های آب‌شناختی و مدل‌بندی فرایندهای دارای توزیعهای ناحیه‌ای چون بارش، سطوح آبهای زیرزمینی، پوشش برف و نیرو به کار بسته شده‌اند؛ به طور سنتی با این فرایندها مانند فرایندهای نقطه‌ای* در مراکز اندازه‌گیری مربوط رفتار شده است. تحلیل مکانی - زمانی تعمیمی از مدل‌سازی چند مرکزی است.

دهه ۱۹۷۰، به علاوه شاهد ظهور نظریه آب‌شناسی تصادفی فیزیکی - پایه بود که می‌کوشد خواص تصادفی یک متغیر تصادفی مفروض آب‌شناختی (مثلاً، رواناب) را از خواص تصادفی عامل‌های علی آن (بارش، تبخیر، تعریق، و غیره) و سازوکارهای فیزیکی حاکم بر تبدیل، استخراج کند. نمونه‌ای قدیمی از چنین مدلی، مدل ذخیره‌سازی تصادفی است که در آن خواص فرایند ذخیره‌سازی (توزیع احتمال، ساختار دنباله‌ای) از خواص جریانهای ورودی با استفاده از قاعده بده‌ای که نمایشگر ساز و کار عملیاتی مخزن است، به دست می‌آید. این مدل برای مثال می‌تواند به عنوان نمایشی ابتدایی از حوزه آبرگیر رودخانه به کار رود، به شرط آنکه مخزن توسط حوزه، ورودی مخزن با بارش (تصادفی)، و قاعده بده با معادله (های) پویایی که حرکت آب در حوزه آبرگیر را توصیف می‌کند، مشخص شوند. خروجی مدل، رواناب حوزه آبرگیر است که خواص تصادفی آن، تابعی از خواص فرایند بارش و پارامترهای حوزه آبرگیر و قاعده بده است.

برای مثال [۱۰]، اگر بارش (پس از کم کردن تبخیر و سایر آبهای از دست رفته) سری تصادفی $x_t = 1, 2, \dots$ با میانگین $\mu(X)$ ، واریانس $\sigma^2(X)$ ، و ضریب چولگی $\gamma(X)$ باشد، و اگر معادله پویای حوزه آبرگیر را بتوان با قاعده بده خطی $y_t = as_t$ نمایش داد، که در آن y و s به

از این داده‌ها، برآورد ضریب‌های رگرسیونی،
 $\beta_j = \rho_j \sigma_j / \sigma_{j-1}$, $j = 1, 2, \dots, 12$ عبارت‌اند از

$$\begin{array}{ll} \beta_1 = 0/520 & \beta_2 = 0/865 \\ \beta_3 = 1/769 & \beta_4 = 0/405 \\ \beta_5 = 0/403 & \beta_6 = -0/022 \\ \beta_7 = 0/763 & \beta_8 = 0/999 \\ \beta_9 = 0/729 & \beta_{10} = 0/093 \\ \beta_{11} = 0/053 & \beta_{12} = 0/681 \end{array}$$

و مقادیر انحراف استاندارد شرطی، $\sigma_{j|j-1}$
 $\sigma_j(1 - \rho_j^2)^{1/2}$ عبارت‌اند از

$$\begin{array}{ll} \sigma_{1|1} = 3/192 & \sigma_{2|1} = 2/089 \\ \sigma_{3|2} = 23/184 & \sigma_{4|2} = 5/994 \\ \sigma_{5|4} = 8/959 & \sigma_{6|5} = 23/939 \\ \sigma_{7|6} = 54/753 & \sigma_{8|7} = 103/617 \\ \sigma_{9|8} = 171/888 & \sigma_{10|9} = 66/982 \\ \sigma_{11|10} = 3/905 & \sigma_{12|11} = 3/546 \end{array}$$

که در نتیجه مدل، متشکل از ۱۲ معادله، زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} x_{i,1} &= 15/70 + 0/520(x_{i-1,12} - 18/01) \\ &\quad + 3/192 \epsilon_i \\ x_{i+1,2} &= 13/62 + 0/865(x_{i,1} - 15/70) \\ &\quad + 2/089 \epsilon_{i+1} \\ x_{i+2,3} &= 26/21 + 1/769(x_{i+1,2} - 13/62) \\ &\quad + 23/184 \epsilon_{i+2} \\ x_{i+3,4} &= 22/25 + 0/405(x_{i+2,3} - 26/21) \\ &\quad + 5/994 \epsilon_{i+3} \\ &\quad \vdots \\ x_{i+11,12} &= 18/01 + 0/681(x_{i+10,11} - 20/84) \\ &\quad + 3/546 \epsilon_{i+11} \end{aligned}$$

مثلاً اگر جریان تولید شده برای ماه دسامبر از سال سوم (یعنی، جمله ۳۶ ام) از یک دنباله مصنوعی برابر با $x_{36,12} = 18/01$ باشد و چهار جمله بعدی انحرافهای تصادفی برابر باشند با $\epsilon_{37} = 2/289$, $\epsilon_{38} = -0/445$, $\epsilon_{39} = -1/238$, $\epsilon_{40} = -0/841$... آنگاه جریانهای تولید شده برای ژانویه، فوریه و مارس سال چهارم، به ترتیب برابر با $19/0$, $7/0$ و $9/4$ خواهند شد.

مرجعها

[1] Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1970). *Time Series Analysis*. Holden-Day, San Francisco.

(کتاب درسی کلاسیکی دربارهٔ ARMA، ARIMA و مدل‌های تابع انتقال؛ بسیار خواندنی.)

ترتیب رواناب و ذخیرهٔ حوزهٔ آبیگیر و a ثابتی در فاصلهٔ $0 < a < 1$ است، آنگاه رواناب، فرایند اتورگرسیو مرتبهٔ اولی است با تابع خود همبستگی

$$\begin{aligned} \rho_{yy}(t) &= \left(\frac{1}{a+1}\right)^t, \\ \mu(Y) &= \mu(X), \\ \sigma^2(Y) &= \frac{a}{a+2} \sigma^2(X), \end{aligned}$$

و ضریب چولگی

$$\gamma(Y) = \frac{a^{1/2}(a+2)^{3/2}}{a^2+3a+3} \gamma(X).$$

مدلهای آب‌شناختی تصادفی فیزیک - پایه با پیچیدگی بیشتر (مثلاً، براساس تقریب موج جنبشی در معادلهٔ اندازهٔ حرکت، مخازن ذخیره‌سازی با قاعده‌های بده غیرخطی، چند مخزن پشت سرهم، ن. ک. مراجع ۳، ۴ و ۱۰) برای محاسبهٔ توزیعهای احتمال ماکسیمم بده‌های سالانه و محصول آب سالانه، برای توصیف ممکن از پدیدهٔ هرسرست، چولگی منفی توزیعهای احتمال جریانهای آبی مشاهده شده در برخی رودخانه‌ها، و برای مسائل آب‌شناختی دیگر پیشنهاد شده‌اند.

مثال عددی برای مدل توماس - فایرینگ

مثال زیر از کلارک [۲] برگرفته شده است. میانگین جریانهای ماهانه، مقادیر انحراف استاندارد جریانهای ماهانه، و ضریبهای همبستگی بین جریان ماهانه با جریان ماه قبل، در یک ایستگاه اندازه‌گیری بر روی رودخانه‌ای در اتیوپی، از سوابق ثبتی گذشته به شرح جدول ۱، برآورد شده‌اند.

جدول ۱

ماه	j	میانگین ($m^3 \times 10^6$)	انحراف استاندارد ($m^3 \times 10^6$)	ضریب همبستگی
ژانویه	۱	۱۵/۷۰	۴/۱۴	۰/۶۳۷
فوریه	۲	۱۳/۶۲	۴/۱۵	۰/۸۶۴
مارس	۳	۲۶/۲۱	۲۴/۳۲	۰/۳۰۲
آوریل	۴	۲۲/۲۵	۱۱/۵۲	۰/۸۵۴
مه	۵	۲۳/۰۳	۱۰/۰۹	۰/۴۶۰
ژوئن	۶	۳۷/۵۴	۲۳/۹۴	-۰/۰۰۹
ژوئیه	۷	۲۰۶/۰۹	۵۷/۷۱	۰/۳۱۶
اوت	۸	۶۱۹/۶۰	۱۱۸/۵۶	۰/۴۸۶
سپتامبر	۹	۳۷۱/۶۲	۱۹۲/۳۷	۰/۴۴۹
اکتبر	۱۰	۹۲/۴۵	۶۹/۳۳	۰/۲۵۸
نوامبر	۱۱	۲۰/۸۴	۵/۳۴	۰/۶۸۲
دسامبر	۱۲	۱۸/۰۱	۵/۰۸	۰/۷۱۶

- (مروری عالی بر مدل‌سازی تصادفی سربهای زمانی جریانهای آبی، با تأکید بر ساختار ریاضی مدلها. مرجعهای بسیار زیاد.)
- [2] Clarke, R. T. (1973). *Mathematical Models in Hydrology*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- (مروری بسیار دقیق و روشن از مدل‌های آب‌شناختی تصادفی و غیرقطعی (به استثنای مدل‌های ذخیره‌سازی)؛ حاوی مثال‌های عددی حل شده، شرح برنامه‌های فورترن و مرجعهاست.)
- [3] Eagleson, P. S. (1972). *Water Resour. Res.* **8**, 878-897.
- [4] Eagleson, P. S. (1978). *Water Resour. Res.* **14**, 705-776.
- [5] Fiering, M. B. (1967). *Streamflow Synthesis*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- (مبادی عقلی مدل‌بندی آب‌شناختی تصادفی عملیاتی را عرضه می‌کند، به صورتی مقدماتی و بسیار خواندنی مدل‌های اتورگرسیو را برای سری رواناب و کاربردهایی از مسئله ذخیره‌سازی بیان می‌کند.)
- [6] Freeze, R. A. (1979). *Water Resour. Res.*, **16**, 391-408.
- [7] Hazen, A. (1914). *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, **77**, 1539-1640.
- [8] Kartvelishvili, N. A. (1976). *Soviet Hydrology: Selected Papers*, **15**, 110-113.
- (شرحی مختصر و غیر ریاضی از رئوس مطالب آب‌شناسی تصادفی در اتحاد جماهیر شوروی سابق، بدون مرجع.)
- [9] Kisiel, C. C. (1969). *Adv. Hydrosci.*, **5**, 1-119.
- (شرحی مفصل و عالی (در سطحی متوسط) از رئوس مطالب تحلیل سربهای زمانی داده‌های آب‌شناختی با تأکید بر خودهمبستگی و تحلیل طیفی. مرجعهای بسیار زیاد.)
- [10] Klemesš, V. (1978). *Adv. Hydrosci.*, **11**, 285-356.
- (مروری بر آب‌شناسی تصادفی بر فیزیک - پایه، مرجعهای بسیار زیاد.)
- [11] Klemesš, V. (1981). *Adv. Hydrosci.*, **12**, 79-141.
- (مروری بر نظریه ذخیره‌سازی تصادفی کاربردی. مرجعهای بسیار زیاد.)
- [12] Lawrence, A. J. and Kottegoda, N. T. (1977). *J. R. Statist. Soc. A*, **140** (Pt. 1), 1-47.
- [13] Lloyd, E. H. (1967). *Adv. Hydrosci.* **4**, 281-339.
- (توصیف ریاضی دقیق ولی نسبتاً ساده‌ای از رویکردهای نظری و عددی به نظریه تصادفی ذخیره‌سازی را به دست می‌دهد. مرجعهای بسیار.)
- [14] Mandelbrot, B. (1977). *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman, San Francisco.
- (شرحی بسیار خواندنی و عالی از زرده فرایندهای تصادفی که معروف به نوفه‌ها و حرکت‌های کسری هستند. مرجعهای بسیار زیاد.)
- [15] Matalas, N. C. (1967). *Water Resour. Res.*, **3**, 937-945.
- [16] Rippl, W. (1883). *Proc. Inst. Civil Eng.*, **71**, 270-278.
- [17] Todorovic, P. and Woolhiser, D. A. (1974). *J. Appl. Meteorol.*, **14**, 17-24.
- [18] Todorovic, P. and Zelenasic, E. (1970). *Water Resour. Res.*, **6**, 1641-1648.

کتابشناسی

برای آشنایی با دستاوردهای اخیر در آب‌شناسی تصادفی به مجلات زیر مراجعه کنید:

Water Resources Research, Journal of Hydrology, Journal of Hydrological Sciences, Advances in Water Resources.

Chin. C.-L., ed., (1978). *Applications of Kalman Filter to Hydrology, Hydraulics and Water Resources*. Department of Civil Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pa.

Chow, V. T., (1978). *Adv. Hydrosci.*, **11**, 1-93.

(مقاله‌ای مروری راجع به مدل‌سازی تصادفی سیستم‌های حوزه آبخیز)

Fiering, M. B. and Jackson, B. B. (1971). *Synthetic Streamflows*. American Geophysical Union, Washington, D. C.

(کتابدستی جامعی که حاوی نظریه پایه، مثالهای عددی و فهرست بسیاری از برنامه‌های کامپیوتری فورترن است.)

Svanidze, G. G. (1980). *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colo.

(ترجمه‌ای از اصل روسی (که در ۱۹۷۷ به روسی چاپ شده است). خلاصه‌ای جامع از فنون مورد استفاده در اتحاد جماهیر شوروی سابق که برخی از آنها چندان در غرب شناخته شده نیستند. مرجعهای متعدد)

Yevjevich, V. (1972). *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colo.

(شرح مقدماتی مفاهیم پایه‌ای، حاوی بسیاری کاربردهای مهندسی)

Yevjevich, V. (1972). *Stochastic Processes in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colo.

(شرح مقدماتی مفاهیم پایه‌ای، با بسیاری از کاربردهای مهندسی. قویاً متکی بر تحقیقاتی است که تحت نظارت مؤلف انجام شده است.)

(میانگین متحرک جمع‌بسته اتورگرسیو، مدل‌های سد، نظریه

حرکتهای براوننی کسری

جغرافیا، آمار در

ضریب هرست

کریگیدن

ذخیره‌سازی، نظریه

سریهای زمانی

تغییر وضع هوا، آمار در

ن: وی. کله‌میش^۱

م: سیامک نوریلچی

کتاب دستی مقدماتی برای طراحان مدل‌های جریانهای آبی اتورگرسیو عملیاتی به منظور تولید کامپیوتری سریهای زمانی (با مثالهای عددی)

Kartvelishvili, N. A. (1969). *Theory of Stochastic Processes in Hydrology and River Runoff Regulation*. Israel Program for Scientific Translations

(در وزارت بازرگانی واشنگتن دی سی موجود است.) یک شرح ریاضی دقیق؛ نظریه ذخیره‌سازی (تحت عنوان تنظیم رواناب رودخانه ذکر شده) که به زبان معادله‌های انتگرالی عرضه شده است. ارجاعهای زیاد به منابع روسی.]

Kartvelishvili, N. A. (1975). *Stochastic Hydrology*. Gidrometeoizdat, Leningrad (به روسی).

(شرح ریاضی دقیقی از جنبه‌های تصادفی فرایند جریان آب با بحثی مفصل از توزیعهای متغیرهای آب‌شناختی، دوره‌ای بودن، و جریانهای ماکسیمم. ارجاعهای متعدد به منابع روسی.)

Klemeš, V. (1974). *Water Resour. Res.* **10**, 675-688.

(نقدی بر مدل‌های آب‌شناختی تصادفی با حافظه دراز مدت)

Kottegoda, N. T. (1980). *Stochastic Water Resources Technology*. Macmillan. London.

(کتاب درسی جامعی درباره تحلیل سریهای زمانی آب‌شناختی، تحلیل‌های آماری؛ مدل‌بندی تصادفی؛ نظریه ذخیره‌سازی تصادفی، تحلیل سیستمها، و نظریه تصمیم. مثالها و مرجعهای بسیار زیاد)

Mandelbrot, B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, San Francisco.

(تجدید چاپ بسط‌یافته مندل بروت [۱۴])

Mandelbrot, B. and Wallis, J. R. (1968). *Water Resour. Res.* **4**, 909-918.

(شریحی توجیهی بر مدل‌های آب‌شناختی تصادفی عملیاتی با حافظه دراز مدت. برای مرجعهای کامل و مرور آنها ن. ک. لاورنس و کانه‌گودا [۱۲])

Muzylev, S. V., Prival'skiy, V. E. and Ratkovich, D. Ya. (1982). *Stochastic Models in Engineering Hydrology*. Nauka, Moscow (به روسی).

(شریحی مختصر از فنون مدل‌سازی آب‌شناختی تصادفی با تأکید بر نوسانهای سطح آب دریاچه‌ها. مرجعهای بسیار زیاد).

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. and Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications, Littleton, Colo.