

بسمه تعالی
Assignment #01
Hydrologic Modeling
Summer 1405- Due date: September 22

مدل سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل های مفهومی HYMOD و GR4J

۱- هدف پروژه

هدف اصلی این پروژه، آشنایی عملی دانشجویان با فرآیند توسعه، کالیبراسیون، ارزیابی و تحلیل عدم قطعیت مدل های مفهومی بارش-رواناب است. در این پروژه، دو مدل مفهومی بارش-رواناب:

- **HYMOD**
- **GR4J**

بر روی داده های واقعی یک حوضه آبریز در استرالیا پیاده سازی و ارزیابی خواهند شد. علاوه بر ارزیابی عملکرد مدل ها، دانشجویان باید ساختار داخلی مدل ها، متغیرهای حالت، پارامترها، شارهای آب، فرآیندهای تولید رواناب و اثر تغییر کاربری اراضی بر رفتار مدل را بررسی کنند. هدف پروژه صرفاً دستیابی به یک مقدار بالای NSE یا KGE نیست؛ بلکه دانشجو باید بتواند رفتار هیدرولوژیکی مدل و معنای نتایج حاصل از کالیبراسیون را تفسیر کند.

۲- حوضه مورد مطالعه

مشابه پروژه درس هیدروانفورماتیک، حوضه مورد مطالعه، **Wights Catchment** در کشور استرالیا خواهد بود. یکی از ویژگی های مهم حوضه **Wights**، وقوع یک تغییر عمده در کاربری اراضی (جنگل زدایی) است. پس از پاکسازی، حوضه به طور عملی به **Agricultural Land Use** تبدیل شده است. بنابراین سه دوره هیدرولوژیکی تعریف می شود:

- Period 1 — Before Clearing**
- Period 2 — Clearing Transition**
- Period 3 — After Clearing / Agricultural Period**

دوره انتقال باید به عنوان یک دوره مستقل در تحلیل ها در نظر گرفته شود.

۳- هدف اصلی پروژه

هدف مدل سازی، شبیه سازی رواناب روزانه است:

$$Q_t = f(P_t, PET_t, \dots, \theta)$$

که در آن:

- Q_t رواناب روزانه بر حسب mm/day
- P_t بارش روزانه
- PET_t بخیر-تعرق بالقوه
- θ مجموعه پارامترهای مدل

است. دو مدل HYMOD و GR4J باید با استفاده از داده های یکسان اجرا، کالیبره و ارزیابی شوند.

۴- شناخت ساختار مدل ها (Mathematical Model و Conceptual, Perceptual)

پیش از اجرای مدل ها، دانشجو باید تفاوت سه سطح زیر را توضیح دهد:

- **Perceptual Model**

برداشت فیزیکی/هیدرولوژیکی از رفتار حوضه:

- **Conceptual Model**

نمایش ساده شده سیستم با استفاده از مخازن، مسیرهای جریان و روابط مفهومی.

- **Mathematical Model**

تبدیل ساختار مفهومی به معادلات ریاضی و روابط محاسباتی.

دانشجو باید این سه سطح را برای **HYMOD** و **GR4J** توضیح دهد و تفاوت آن‌ها را مشخص کند. برای هر دو مدل، موارد زیر باید شناسایی و توضیح داده شوند:

State Variables: متغیرهایی که وضعیت فعلی سیستم هیدرولوژیکی را نشان می‌دهند.

Parameters: پارامترهایی که ساختار و رفتار مدل را کنترل می‌کنند.

Fluxes: جریان آب بین مخازن و اجزای مختلف مدل.

۵- پیاده‌سازی و اجرای HYMOD و GR4J

دانشجو باید هر دو مدل زیر را اجرا کند. ورودی‌های مدل باید مطابق ساختار مورد نیاز هر مدل تهیه شوند. در صورت استفاده از کد آماده یا کتابخانه، دانشجو باید منطق و ساختار مدل را به‌طور کامل توضیح دهد. استفاده از یک مدل به‌صورت **Black Box** بدون توضیح ساختار داخلی قابل قبول نیست.

۶- کالیبراسیون مدل

پارامترهای HYMOD و GR4J باید با استفاده از داده‌های مشاهده شده کالیبره شوند.

فرآیند کالیبراسیون باید شامل موارد زیر باشد:

۱. تعیین پارامترهای قابل کالیبراسیون

۲. تعیین محدوده هر پارامتر

۳. انتخاب تابع هدف

۴. انتخاب روش Optimization (پیشنهاد می‌شود از یک الگوریتم تکاملی مانند GA بهره برده شود).

۵. اجرای فرآیند Calibration

۶. تعیین مجموعه پارامتر بهینه

به‌صورت کلی یا در صورت استفاده از معیار خطا دانشجو باید دلیل انتخاب تابع هدف و روش بهینه‌سازی را توضیح دهد.

۷- تفکیک Validation و Calibration

داده‌ها باید به دوره‌های مجزا برای Calibration و Validation تقسیم شوند.

یک تقسیم زمانی پیشنهادی:

Calibration: 1974–1980

Validation: 1981–1985

Independent Evaluation: 1986–1990

در صورت استفاده از تقسیم‌بندی متفاوت، دلیل انتخاب آن باید در گزارش توضیح داده شود. تقسیم‌بندی داده‌ها باید زمانی باشد و ترتیب زمانی داده‌ها حفظ شود.

۸- ارزیابی عملکرد مدل (Performance Metrics)

عملکرد HYMOD و GR4J باید با استفاده از چند معیار ارزیابی شود. حداقل معیارهای زیر الزامی هستند:

NSE
KGE
RMSE
Bias / PBIAS
R²

در گزارش باید مشخص شود هر معیار چه جنبه‌ای از عملکرد مدل را اندازه‌گیری می‌کند و چرا استفاده از چند معیار ضروری است؟ ممکن است:

$$NSE^{HYMOD} > NSE^{GR4J}$$

ولی:

$$RMSE^{HYMOD} < RMSE^{GR4J}$$

باشد.

دانشجو باید توضیح دهد که چگونه چنین تفاوتی ممکن است رخ دهد و چرا ارزیابی یک مدل هیدرولوژیکی نباید بر اساس یک شاخص منفرد انجام شود.

۹- عدم قطعیت مدل (Parameter Uncertainty)

دانشجو باید مفاهیم **Equifinality** و **Parameter Uncertainty** را بررسی کند. به‌عنوان مثال، ممکن است مجموعه‌های مختلف پارامتر:

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$$

عملکرد نسبتاً مشابهی ایجاد کنند. بنابراین باید بررسی شود که آیا:

$$J(\theta_1) \approx J(\theta_2)$$

امکان‌پذیر است یا خیر. در این جا $J(\theta_1)$ مقدار تابع هدف برای مجموعه پارامترهای θ_1 می‌باشد.

همچنین، در صورتی که **Equifinality** را بصورت زیر تعریف کنیم:

مجموعه‌های متفاوتی از پارامترها ممکن است عملکرد هیدرولوژیکی مشابهی ایجاد کنند.

دانشجو باید بررسی کند که آیا چنین رفتاری در HYMOD و GR4J مشاهده می‌شود یا خیر.

۱۰- تحلیل فرآیندهای تولید رواناب (Hydrological Process Interpretation)

دانشجو باید بررسی کند که در ساختار HYMOD و GR4J، چه اجزایی رفتارهای زیر را نمایندگی می‌کنند:

- پاسخ سریع حوضه به بارش (Fast runoff)
- پاسخ با تأخیر متوسط (Intermediate response)
- پاسخ کند و طولانی‌مدت (Slow runoff / Baseflow-like response)

سپس این رفتارها با مفاهیم فیزیکی زیر مقایسه شوند:

- Overland flow
- Inter flow
- Base flow

نکته مهم درباره تفسیر اجزای مدل: دانشجو باید توجه داشته باشد که لزوماً physical process با model component معادل نیست. یعنی مثلاً یک reservoir یا routing component در یک مدل مفهومی لزوماً معادل مستقیم یک aquifer یا یک جریان زیرسطحی واقعی نیست. بنابراین دانشجو باید بین **Model-based flow component** و **Physically observed hydrological process** تفاوت قائل شود.

۱۱- اثر Clearing و تغییر کاربری اراضی

هدف اصلی این بخش بررسی و ارائه پاسخ به این سؤال است:

آیا **HYMOD** و **GR4J** می‌توانند تغییر رفتار حوضه را در نتیجه **clearing** و تبدیل آن به کاربری کشاورزی بازنمایی کنند؟

برای پاسخ به این سوال پیشنهاد می‌شود آزمایشات زیر طرح و دنبال شوند:

Experiment 1: Calibration Before Clearing

مدل‌ها را با داده‌های دوره قبل از **clearing** کالیبره کنید، سپس پارامترهای بهینه برای هر مدل را ثبت کنید، پارامترهای به‌دست‌آمده از دوره **Before** را **بدون کالیبراسیون مجدد** روی دوره بعد از **clearing** اعمال کنید، سپس عملکرد مدل را ارزیابی کنید. این آزمایش یکی از مهم‌ترین بخش‌های پروژه است.

Experiment 2: Calibration After Clearing

در مرحله بعد، مدل‌ها را به‌صورت مستقل در دوره پس از **clearing** کالیبره کنید. سپس آن‌ها را با پارامترهای قبل از **clearing** مقایسه کنید. دانشجو باید بررسی کند که θ^{after} و θ^{before} چه تفاوتی دارد. مهم: تغییر یک پارامتر نباید مستقیماً به‌عنوان اثر فیزیکی **deforestation** تفسیر شود. پارامترهای مدل‌های مفهومی معمولاً **effective parameters** هستند و ممکن است اثر ترکیبی چند فرآیند هیدرولوژیکی را نمایش دهند.

تحلیل Clearing Transition

دوره **Transition** باید به‌صورت جداگانه بررسی شود. هدف این است که مشخص شود آیا رفتار مدل در این دوره:

- مشابه **Before** است؟
 - مشابه **After** است؟
 - یا بین این دو قرار می‌گیرد؟
- این تحلیل می‌تواند شواهدی درباره **gradual hydrological regime transition** فراهم کند.

۱۲- مقایسه GR4J و HYMOD

مقایسه ساختاری: دو مدل از نظر موارد زیر مقایسه شوند:

Model structure
Number of parameters
State variables

Storage components
Fast response
Slow response
Routing structure
Calibration difficulty
Parameter uncertainty
Equifinality

مقایسه عملکردی: عملکرد دو مدل از نظر:

- NSE
 - KGE
 - R^2
 - RMSE
 - Bias
 - High-flow performance
 - Low-flow performance
- مقایسه شود.

مقایسه Robustness در برابر تغییر کاربری

یکی از پرسش‌های اصلی پروژه:

Which model is more robust to land-use change: HYMOD or GR4J?

برای پاسخ به این سؤال، دانشجو باید حداقل موارد زیر را بررسی کند:

- عملکرد مدل در دوره پیش از تغییر
- عملکرد مدل پس از تغییر
- عملکرد مدل در طول تغییر
- و تغییر پارامترهای مدل.

۱۳- خروجی‌های مورد انتظار

نمودارهای الزامی

گزارش باید حداقل شامل موارد زیر باشد:

Data

1. Rainfall time series
2. Observed discharge time series
3. Rainfall distribution
4. Discharge distribution
5. Before/After clearing comparison

Model

6. Observed vs simulated hydrograph — HYMOD
7. Observed vs simulated hydrograph — GR4J
8. Observed vs simulated scatter plot

9. Calibration performance

10. Validation performance

11. Residual/error analysis

Process

12. Model runoff components

13. Fast vs slow response

14. Hydrograph recession behavior

Land-use change

15. Before vs After performance

16. Before-calibrated model applied to After period

17. Parameter comparison Before vs After

Uncertainty

18. Parameter/ensemble uncertainty

۱۴- جداول الزامی

حداقل جداول زیر باید ارائه شوند:

Table 1 — Catchment and Data Characteristics

Table 2 — HYMOD Structure

Table 3 — GR4J Structure

Table 4 — Model Parameters and Their Hydrological Interpretation

Table 5 — Calibration Results

Table 6 — Validation Results

Table 7 — Performance Metrics

Table 8 — Before vs After Parameter Comparison

Table 9 — HYMOD vs GR4J Comparison

۱۵- پرسش‌های اصلی پروژه

گزارش نهایی باید به‌طور مشخص به پرسش‌های زیر پاسخ دهد:

- ساختار مفهومی HYMOD و GR4J چه تفاوت‌هایی دارد؟
- متغیرهای حالت، پارامترها و flux های اصلی هر مدل چه هستند؟
- تفاوت بین conceptual ، mathematical representation و perceptual در این دو مدل چیست؟
- کدام مدل راحت‌تر کالیبره می‌شود و چرا؟
- آیا یک مجموعه پارامتر یکتا وجود دارد که بهترین پاسخ مدل را تولید کند؟
- آیا Equifinality در HYMOD و GR4J مشاهده می‌شود؟
- کدام مدل بر اساس NSE ، KGE ، RMSE و Bias عملکرد بهتری دارد؟
- آیا مدلی که بهترین NSE را دارد، الزاماً بهترین مدل برای low flow و high flow نیز هست؟
- اجزای fast runoff و slow runoff در هر مدل چگونه رفتار حوضه را نمایش می‌دهند؟
- این اجزا تا چه حد می‌توانند به overland flow ، interflow و baseflow مرتبط شوند؟
- آیا پارامترهای مدل قبل و بعد از clearing تغییر می‌کنند؟
- آیا مدلی که قبل از clearing کالیبره شده است می‌تواند دوره بعد از clearing را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند؟
- کدام مدل نسبت به تغییر کاربری اراضی robust تر است؟
- آیا تغییر عملکرد مدل‌ها می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در rainfall–runoff relationship باشد؟

- محدودیت‌های استفاده از HYMOD و GR4J برای تفسیر فرآیندهای فیزیکی حوضه چیست؟

۱۶- ساختار گزارش نهایی

گزارش باید دارای ساختار زیر باشد:

1. Introduction

معرفی مدل‌سازی مفهومی بارش-رواناب و هدف پروژه.

2. Study Area and Dataset

معرفی Wights Catchment و داده‌ها.

3. Hydrological Model Representation

توضیح conceptual، mathematical representation.

4. HYMOD and GR4J

شرح ساختار، states، parameters، fluxes.

5. Methodology

شرح:

- Data preparation
- Calibration
- Optimization
- Validation
- Performance metrics
- Uncertainty analysis

6. Results

نتایج کالیبراسیون و validation.

7. Hydrological Process Analysis

تحلیل fast/slow runoff و ارتباط آن با فرآیندهای هیدرولوژیکی.

8. Land-Use Change Analysis

تحلیل Before، Transition، After Clearing.

9. Comparison of HYMOD and GR4J

مقایسه جامع دو مدل.

10. Discussion

تفسیر هیدرولوژیکی نتایج.

11. Conclusions

نتایج اصلی و پاسخ به پرسش‌های پروژه.

۱۷- الزامات فنی

دانشجویان می‌توانند از Python، MATLAB یا سایر محیط‌های محاسباتی مناسب استفاده کنند. در صورت استفاده از کد یا کتابخانه آماده، باید:

- منبع آن ذکر شود؛
- ساختار مدل توضیح داده شود؛
- پارامترها و محدوده آن‌ها مشخص شود؛
- روش کالیبراسیون توضیح داده شود؛

- نتایج قابل بازتولید باشند .
- استفاده از مدل به صورت **Black Box** و ارائه صرفاً نتایج عددی قابل قبول نیست.

❖ لینک های پیشنهادی برای کدهای پایتون:

<https://pypi.org/project/hydromodel/>
<https://github.com/KMarkert/hymod>
<https://zaul-ae.gitlab.io/lumod-docs/>
<https://github.com/amacd31/gr4j>

۱۸- خروجی نهایی

هر دانشجو باید موارد زیر را تحویل دهد:

۱. گزارش علمی پروژه
۲. کد کامل و قابل اجرا
۳. فایل داده/فرآیند آماده سازی داده
۴. نتایج Calibration
۵. نتایج Validation
۶. نتایج Uncertainty Analysis
۷. نمودارهای مورد نیاز
۸. مقایسه GR4J و HYMOD
۹. تحلیل فرآیندهای تولید رواناب
۱۰. تحلیل اثر Clearing و تغییر کاربری اراضی

۱۹- معیار کلی ارزیابی پروژه

در ارزیابی پروژه، صرفاً عملکرد عددی مدل ها ملاک نخواهد بود. دانشجو باید نشان دهد که می تواند:

یک سیستم هیدرولوژیکی واقعی را به یک مدل مفهومی تبدیل کند، ساختار مدل را درک کند، پارامترهای آن را کالیبره کند، عدم قطعیت و equifinality را تحلیل کند، عملکرد مدل را با معیارهای مختلف ارزیابی کند، خروجی مدل را از دیدگاه فرآیندهای هیدرولوژیکی تفسیر کند و محدودیت های مدل را در مواجهه با تغییر کاربری اراضی تشخیص دهد.

هدف نهایی پروژه

هدف این پروژه پاسخ به این سؤال ساده نیست که:

HYMOD بهتر است یا GR4J؟

بلکه هدف اصلی این است که دانشجو بتواند پاسخ دهد:

- How does a conceptual hydrological model represent a real catchment?
- How reliable is that representation under changing catchment conditions?

و:

در نهایت دانشجو باید بتواند نشان دهد که عملکرد عددی خوب یک مدل الزاماً به معنای بازنمایی کامل فرآیندهای واقعی حوضه نیست و تفاوت میان *hydrological realism*، *parameter uncertainty*، *model structure* و *model performance* درک کرده است.

