دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده کشاورزی

گروه علوم و مهندسی خاک

هیدرولوژی

تهیه و تنظیم
حیدر غفاری

فصل پنجم – تبخیر و تعرق

۵-۱- مقدمه

تبخیر پدیده‌ای است که بوسیله آن آب یا یخ به گاز تبدیل می‌شود. تبدیل یخ به بخار را تصعید می‌گویند. در این پدیده آزاد شدن مولکول های آب و وارد شدن آنها در اتمسفر اتفاق می افتد. در طبیعت انتشار بخار آب از یک سطح مرطوب یا سطح آزاد آب (اعم از حالت مایع یا جامد) در درجه حرارتی پایین تر از نقطه جوش آب هم اتفاق می افتد.

تعرق یک پدیده فیزیولوژیکی است و به گیاه مربوط می شود. با توجه به اینکه قسمتی از آبهای مربوط به بارش در خاک نفوذ می کند و سپس توسط ریشه گیاهان جذب و به صورت تعرق به هوا برمی‌گردد، در هیدرولوژی برای حوزه آبریز تبخیروتعرق را با هم بررسی می کنند و به آن تبخیر و تعرق (Evapotranspiration) می‌گویند.

تبخیر و تعرق جزء اصلی سیکل هیدرولوژی در حوزه آبریز است و به عوامل متعددی بستگی دارد که عبارتند از:

- درجه حرارت هوا و آب
- تابش نور خورشید
- رطوبت هوا
- سرعت جریان باد
- فشار هوا
- ارتفاع از سطح دریای آزاد
- وجود نمک‌های محلول در آب

مقدار تبخیر و تعرق در اطراف خط استوا حداکثر و در قطبین حداقل و گاهی به صفر می‌رسد.

تبخیر از سطح خاک مرطوب در یک هوای یکسان کمتر از تبخیر از سطح آزاد آب است. هر اندازه خاک سنگین تر (از نظر بافت) باشد مقدار تبخیر با گذشت زمان کمتر می‌شود.

تبخیر پدیده فیزیکی است که در سطح آزاد آب و خاک صورت می گیرد. تعرق پدیده ای است که آب را از طریق اندامهایی در ریشه گیاه از خاک جذب و سپس از طریق آوندهای موجود در ساقه به برگ‌ها و نهایتا به صورت تعرق در سطح روزنه‌های موجود در برگ‌ها خارج می-کند. در اثر تعرق مقدار آب در سلول‌های گیاهی در سطح برگ‌ها کم می‌شود و باعث افزایش نیروی مکش در گیاه می‌شود. در ریشه گیاه آب از خاک جذب شده و سلول به سلول منتقل می‌شود. این نیرو باعث می‌شود که آب در جهت مخالف نیروی ثقل حرکت کند. این نیرو را پتانسیل آب در سلول گیاهی می‌گویند و از رابطه (۵-۱) حساب می‌شود.

$$\Psi = O + P + Z \qquad (۱-۵)$$

که در آن Ψ مجموع پتانسیل آب در گیاه، O پتانسیل اسمزی و P پتانسیل فشار دیواره‌های سلول گیاه و Z نیروی ثقل است.

۵-۲- تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی

تبخیر و تعرق پتانسیل وقتی اتفاق می افتد که رطوبت کافی چه از طریق خاک و چه از طریق بارش و در همه زمان در اختیار گیاه باشد تا عمل تبخیر از سطح آزاد و یا تعرق از طریق گیاه صورت گیرد.

تبخیر و تعرق واقعی مقدار تبخیر و تعرقی است که بصورت واقعی از سطح آب و یا از گیاه در شرایط واقعی اتفاق میافتد.

۵-۴- اندازه گیری تبخیر

اندازه‌گیری تبخیر به طور مرسوم توسط تشتک تبخیر و از جمله تشتک کلاس A (شکل ۵-۱) و نوع کالورادو (شکل ۵-۲)صورت می‌گیرد.

برای تبدیل مقدار تبخیر از سطح آزاد از روی آمار تشتک تبخیر از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$E = K(E_{pan}) \qquad (۵-۲)$$

که در آن E تبخیر از سطح آزاد مثل دریاچه و سطح مخزن، (E_{pan}) تبخیر از سطح تشتک و K یک ضریب ثابت به نام ضریب تشت است که برای کلاس A حدود ۰/۵۸ تا ۰/۷۸ و به طور متوسط ۰/۷۵ می باشد. این ضریب در ماه‌های مختلف تغییر می‌کند.

۵-۴- اندازه گیری تبخیر و تعرق

اندازه‌گیری تعرق بطور مستقل کار ساده‌ای نیست و تفکیک آن از تبخیر بسیار مشکل است به همین منظور مجموع این دو را باهم اندازه-گیری می‌کنند. برای اندازه گیری تبخیر و تعرق از روش لایسیمتری(Lysimeter) استفاده می‌شود. یک لایسیمتر ممکن است از یک گلدان ساده تا دستگاه های کامل و با ابزار دقیق تشکیل شود. دقیق‌ترین نوع آن لایسیمتر وزنی است که بوسیله آن مقدار آبی که بصورت تبخیر و تعرق از مجموع خاک و گیاه و یا لایسیمتر خارج می‌شود، از طریق مقایسه توزین مقادیر قبل و بعد بدست می آید

۵-۵- روش های برآورد تبخیر از سطح آزاد آب

برآورد مقدار تبخیر از سطح آزاد آب به عنوان یک مؤلفه مهم در سیکل هیدرولوژی است که بایستی در محاسبات هیدرولوژیکی انجام شود. چندین روش برای برآورد تبخیر از سطح آزاد ارائه شده است.

۵-۵-۱- روش بیلان آب

این روش بخصوص در مورد دریاچه سدها و یا مخازن و برکه‌ها که سایر عوامل معادله بیلان قابل اندازه‌گیری است بکار می‌رود. رابطه بیلان به صورت زیر قبلا بیان شده است.

$$E = P + (I - O) - \Delta S \qquad (۳-۴)$$

که در آن E مقدار تبخیر، P بارش، I ورودی به دریاچه یا مخزن، O خروجی از دریاچه یا مخزن (بصورت خروجی مستقیم و یا نشت و نفوذ) و ΔS تغییرات حجم آب در مخزن در دوره زمانی مورد محاسبه مثل سال، ماه، هفته و روز می‌باشد.

۵-۵-۲- روش بیلان انرژی

انرژی که در سطح زمین صرف تبخیر می‌شود، بخشی از تابش خالص خورشید (Rn) می‌باشد که تفاضل بین تابش‌های ورودی و خروجی از سطح زمین است یعنی :

$$R_n = R_s - R_{rs} - R_{lw} \quad (۴-۵)$$

که در آن R_s تابش ورودی، R_{rs} تابش منعکس شده توسط سطح زمین با طول موج کوتاه و R_{lw} مقدار تابش خالص خروجی از سطح زمین با طول موج بلند است. اگر α ضریب آلبیدو باشد در این صورت مقدار تابش خالص (Rn) به صورت زیر است:

$$R_{rs} = \alpha R_s \quad (۵-۵)$$

$$R_n = R_s - R_s(\alpha) - R_{lw}$$

$$R_n = R_s(1-\alpha) - R_{lw}$$

در مورد این رابطه و ضرایب انعکاس (آلبیدو) در مناطق و سطوح مختلف در فصل دوم مطالبی ارائه شده است. مثلا ضرایب انعکاس در مناطق نیمه کویری ۰/۲۵، کویری شنی ۰/۳۷، پوشش گیاهی زراعی ۰/۲۳ و برای سطح آب ۰/۷ می‌باشد.

مقدار R_n از طریق جدول (۵-۲) برحسب عرض جغرافیایی و برای ماه‌های مختلف سال استخراج می‌شود. در صورتیکه مقدار R_n معلوم شد آنگاه مقدار تبخیر از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E = \frac{R_n}{\rho_w . L_V} \quad (۶-۵)$$

در این رابطه E تبخیر (Cm در روز)، Rn تابش ورودی خالص (کالری بر سانتی‌مترمربع در روز)، ρw دانسیته آب (گرم بر سانتیمترمکعب) و LV گرمای نهان تبخیر (کالری بر گرم) است و از رابطه (۵-۷) برای دمای آب(t) برحسب سانتی گراد بدست می آید.

$$L_V = 597.3 - 0.564t \quad (۷-۵)$$

روابط دیگری به صورت (۵-۸) و (۵-۹) ممکن است در روش بیلان انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

$$R_s = R_a(0.803 - 0.340C - 0.458C^2) \quad (۸-۵)$$

که در آن R_a تابش خورشیدی در ماه مورد نظر که از جدول (۴-۲) استخراج می‌شود. R_a مربوط به بالای جو و قبل از ورود به داخل جو است. C متوسط ماهانه درجه ابری (ابرناکی)، R_s متوسط روزانه تابش ورودی به سطح زمین در ماه مورد نظر است.

$$R_s = R_a(0.23 + 0.48\frac{n}{N}) \quad (۹-۵)$$

که در آن n تعداد ساعات آفتابی مورد انتظار در طول ماه مورد نظر است که بستگی به عرض جغرافیایی و ماه مربوطه داشته و از جدول استخراج می‌شود. N تعداد ساعات آفتابی مشاهده شده در ماه مورد نظر در محل است.

مقدار تابشی که با طول موج بلند از سطح زمین صاتع می شود از رابطه کلی زیر بدست می آید.

$$R_{lw} = e_m \delta T^4 \quad (۱۰-۵)$$

که در آن δ ضریب اسفان-بولتزمن[۱] و T درجه حرارت هوا در ارتفاع ۲ متری بر حسب درجه کلوین

$$R_{lw} = \delta T^4 (0.56 - 0.08\sqrt{e})(0.1 + 0.9\frac{n}{N}) \qquad (۱۱-۵)$$

در رابطه بالا نیز δ ضریب اسفان- بولتزمن، T درجه حرارت هوا در ارتفاع ۲ متری بر حسب درجه کلوین، e فشار بخار آب در هوا (میلی بار) و n, N هم که قبلا تعریف شده‌اند. اگر بجای نسبت n/N از C و بجای دمای هوا از دمای سطح آب (T_s) استفاده شود رابطه بالا به صورت زیر خواهد شد.

$$R_{lw} = \delta T_s^4 (0.51 - 0.66\sqrt{e})(0.1 + 0.9C) \qquad (۱۲-۵)$$

مثال۵-۱- : مقدار تبخیر از سطح دریاچه‌ای را در یک روز معین (۸ اوت) که دمای هوا ۳۰ درجه سانتیگراد و چگالی آب یک گرم بر سانتی متر مکعب بوده در شرایط جغرافیایی با عرض جغرافیایی۴۰ درجه شمالی و شرایط اقلیمی با درجه ابری ۴۰ درصد، رطوبت نسبی ۶۰ درصد، دمای هوا در ارتفاع ۲ متری ۳۰ درجه سانتی گراد و دمای سطح آب ۲۰ درجه سانتیگراد و ضریب بازتاب ۷ درصد قرار دارد. مقدار تبخیر روزانه از سطح آب را حساب کنید.

حل مسئله:

۱. استخراج مقدار R_a برای ۴۰ درجه شمالی از جدول (۵-۲) . توجه این جدول متوسط ماهانه دهد که معادل ۸۴۳ می باشد و عدد ۸۷۰ برای روز هشتم این ماه است که از جدول کامل دیگری استخراج شده است.

$$R_a = 870 Cal/Cm^2.day$$

۲. محاسبه تابش خورشید

$$R_s = R_a(0.803 - 0.340C - 0.458C^2)$$

$$R_s = 870(0.803 - 0.34(0.4) - 0.458(0.4^2)) = 516.5 Cal/Cm^{-2}day^{-1}$$

۳. محاسبه بازتاب طول موج کوتاه

$$R_{rs} = \alpha R_s = 0.07 \times 516.5 = 36.2 calcm^{-2}day^{-1}$$

۴. محاسبه تابش از سطح زمین

$$R_{lw} = \delta T_s^4 (0.51 + 0.66\sqrt{e})(0.1 + 0.9C)$$

$$\delta = 1.17 \times 10^{-7} Cal.Cm^{-2}K^{-4}d^{-1}$$

دمای سطح آب به درجه کلوین

$$T_s = 273 + 20 = 293$$

دمای هوا به درجه کلوین

$$T_2 = 273 + 30 = 303$$

فشار بخار هوا

$$e = es \times Rh$$

از روی جدول(۵-۳) برای دمای ۳۰ درجه مقدار e_s (فشار بخار اشباع) معادل ۴۲/۴ میلی بار استخراج می‌شود.

$$e = 42.4 \times (0.6) = 25.4mb$$

$$R_{lw} = 14.4 CalCm^{-2}day^{-1}$$

محاسبه تابش خالص

$$R_n = R_s - R_{rs} - R_{lw}$$

$$R_n = 516.5 - 36.2 - 14.4 = 465.9 CalCm^{-2}day^{-1}$$

۵. محاسبه گرمای نهان تبخیر

$$L_u = 597.3 - 0.56t$$

$$L_u = 597.3 - 0.56(30) = 580.5 Cal.g^{-1}$$

۶ محاسبه تبخیر

$$E = \frac{R_n(\text{cal.Cm}^{-2}.\text{K}^{-4}.\text{day}^{-1})}{\rho_w(g.cm^{-3}) \times L_v(cal.g^{-1})} = cm/day$$

$$E = \frac{465.9}{1(580.5)} = 0.8 Cm/day$$

$$E = 0.8 \times 10 = 8 mm/day$$

۵-۵-۴- فرمول‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب

روابط زیادی توسط دانشمندان برای برآورد مقدار تبخیر از سطح آزاد آب با استفاده از پارامترهای هواشناسی ارائه شده است. این روابط اصولا بر اساس کمبود رطوبت یا کمبود فشار بخار آب و یا بطور غیرمستقیم اطلاعات دما و باد و یا تشعشع می‌باشد. به چند مورد از این فرمول‌ها در زیر اشاره شده است.

۵-۵-۴-۱- معادله دالتون[1]

دالتون در سال ۱۸۰۲ رابطه زیر را برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب ارائه نموده است.

$$E = B(e_s - e_a) \qquad (۱۳-۴)$$

که در آن E تبخیر، es فشار بخار اشباع، ea فشار بخار هوا و B ضریبی است که بستگی به زمان و مکان دارد. این معادله بر اساس تئوری انتقال بخار آب می باشد.

$$B = \frac{0.622 K^2 \rho_a V_2}{P.\rho_w [\ln(\frac{Z_2}{Z_0})]^2} \qquad (۱۳-۵)$$

که در آن

K ضریب انتشار آشفته که برای سرعت های اندازه گیری شده در ارتفاع ۲ متر معادل ۰/۴ در نظر گرفته می شود.

ρa دانسیته هوا و ρw دانسته آب (Kg/m3)، V_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s)، Z_0 ارتفاع زبری سطح

Z_2 ارتفاع و P= فشار هوا است.

۵-۵-۴-۲- فرمول مایر[2]

$$E = (1 + \frac{U}{16}) \times C \times (e_s - e_a) \qquad (۱۴-۵)$$

U سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (km/h)، esو ea فشار بخار اشباع و هوا بر حسب میلی متر جیوه، C ضریبی است که برای دریاچه عمیق ۰/۳۶ و برای دریاچه کم عمق ۰/۵ است. E بر حسب میلی متر در روز است.

---

[1] Dalton
[2] Meyer

۶-۴ تبخیر از سطح برف

تبخیر از سطوح پوشیده از برف به دلیل دمای بسیار پائین محیط، انعکاس شدید تابش از سطح سفید برف و بالا بودن رطوبت نسبی هوا بسیار اندک است بهمین دلیل در مطالعات هیدرولوژی معمولاً از آن صرف نظر می‌شود. با این وجود در آزمایشگاههای تحقیقات برف و یخ، روشها و معادله‌های تجربی زیادی برای تخمین تبخیر از سطح برف ارائه شده است که از جمله معادله زیر است.

$$E = (0.18 + 0.098\, U_{10})(e_s - e_d) \qquad (۱۹-۶)$$

در این فرمول E تبخیر از سطح برف بر حسب میلی‌متر در روز، U_{10} سرعت متوسط باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین برحسب متر در ثانیه، e_s فشار بخار اشباع در سطح برف به ازاء متوسط دمای روزانه بر حسب میلی‌بار (mb) و e_d فشار واقعی بخار آب در ارتفاع ۲ متری از سطح برف برحسب میلی‌بار (mb) می‌باشد.

جدول ۵-۲ مقدار R_a در نیم کره شمالی و جنوبی و خط استوا بر حسب (gcal/cm2/day)

ماهها / عرض جغرافیائی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	جمع سالانه
90 شمالی NORTHERN	0.0	0.0	55	518	903	1077	944	605	136	0	0	0	3540
80	0.0	3	143	518	875	1060	930	600	219	17	0	0	3660
60	86	234	424	687	866	983	892	714	494	258	113	55	4850
40	358	538	663	847	930	1001	941	843	719	528	397	318	6750
20	631	795	821	914	912	947	912	887	856	740	666	599	8070
خط استوا EQUATOR	844	963	878	876	803	803	792	820	891	866	873	829	8540
20	970	1020	832	737	608	580	588	680	820	892	986	978	8070
40	998	963	686	515	358	308	333	453	648	817	994	1033	6750
60	947	802	459	240	95	50	77	187	403	648	920	1013	4850
80	981	649	181	9	0	0	0	0	113	459	917	1094	3660
90 جنوبی SOUTHERN	995	656	92	0	0	0	0	0	30	447	932	1110	3540

جدول ۵-۴- فشار بخار اشباع (e_s) بر حسب میلی بار با استفاده از درجه حرارت خشک بر حسب سانتی‌گراد

درجه حرارت C°	e_s میلی‌بار	درجه حرارت C°	e_s میلی‌بار	درجه حرارت C°	e_s میلی‌بار	درجه حرارت C°	e_s میلی‌بار
0	6.1	10	12.3	20	23.4	30	42.4
1	6.6	11	13.1	21	24.9	31	44.9
2	7.1	12	14.0	22	26.4	32	47.6
3	7.6	13	15.0	23	28.1	33	50.3
4	8.1	14	16.1	24	29.8	34	53.2
5	8.7	15	17.0	25	31.7	35	56.2
6	9.3	16	18.2	26	33.6	36	59.4
7	10.0	17	19.4	27	35.7	37	62.8
8	10.7	18	20.6	28	37.8	38	66.3
9	11.5	19	22.0	29	40.1	39	69.9

جدول ۶-۲ حداکثر ساعات آفتابی ممکن (N) در ماههای مختلف برای عرضهای جغرافیایی مختلف

عرض جغرافیایی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
50 °N	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.6	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	15.6	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

۶-۵ تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه

تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه در حوضه‌ها که آن را با نام تبخیر-تعرق توصیف کردیم یکی از پیچیده‌ترین فرایندها در چرخه هیدرولوژی است. زیرا علاوه بر عوامل مؤثر بر تبخیر که در بخشهای قبل ذکر شد عوامل دیگری مانند رطوبت خاک، درصد پوشش گیاهی و نوع گیاه نیز بر آن مؤثر است و چون این عوامل در طول زمان ثابت نیستند بهمین دلیل مقدار تبخیر - تعرق نیز متناسب با آن متغیر می‌باشد. تبخیر-تعرق در محاسبات هیدرولوژی از دو جهت حائزاهمیت است. یکی محاسبه تلفات آب در حوضه‌های آبریز و دیگری برآورد نیاز آبیاری در طرحهایی که آب مهار شده در سازه‌های هیدرولیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۶-۵-۱ تبخیر-تعرق واقعی

تبخیر- تعرق واقعی به مجموعه تبخیر از سطح خاک و تعرق توسط پوشش گیاهی در شرایط طبیعی اطلاق می‌شود. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی بسیار مشکل و عملاً غیر قابل اجراست. حتی در صورت‌انجام نیز نمی‌توان به نتایج حاصله اطمینان داشت. در ایستگاههای تحقیقاتی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی از دستگاههایی به‌نام لایسی‌متر (lysimeter) استفاده می‌شود.

تورک براساس تجربیات خود و نتایج حاصله از مطالعات دیگر محققان فرمولی را پیشنهاد نمود که بوسیلهٔ آن می‌توان تبخیر - تعرق واقعی سالانه را در یک حوضهٔ آبریز تخمین زد. این فرمول به‌صورت زیر است:

$$E = \frac{P}{[0.90 + (P/I)^2]^{0.5}} \qquad (۶-۲۰)$$

در این فرمول:

E- تبخیر واقعی سالانه برحسب میلی‌متر

P- بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر

I- عامل مربوط به دمای متوسط سالانه هوا است که مقدار آن برابر است با

$$I = 300 + 25\,T + 0.05\,T^3 \qquad (۶-۲۱)$$

T- متوسط درجهٔ حرارت سالانه برحسب °C

۶-۵-۲ تبخیر-تعرق پتانسیل

نظر به اینکه فرمول‌های تبخیر-تعرق واقعی معمولاً به نتایج مطلوبی منتهی نمی‌شوند و استفاده از لایسی‌متر نیز در تمام شرایط امکان‌پذیر نیست. در هیدرولوژی بجای تبخیر-تعرق واقعی توان تبخیر-تعرق منطقه را تخمین می‌زنند که آن را تبخیر-تعرق پتانسیل می‌گویند. روشهای غیرمستقیم و متعددی برای این منظور پیش‌بینی شده است که معادله‌های تجربی تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) از جمله آنهاست. **تبخیر- تعرق پتانسیل** حداکثر مقدار تبخیر- تعرقی است که در یک وضعیت آب و هوایی مشخص در صورتی که محدودیتی از نظر آب وجود نداشته باشد از یک پوشش کامل گیاهی مانند چمن صورت می‌گیرد. بسیاری از طبقه‌بندیهای اقلیمی بجای استفاده از تبخیر-تعرق واقعی بر مبنای مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشند.

در هیدرولوژی برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل چند روش عمده مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از روش‌های **ترنت‌وایت** (Thornthwaite) ، **پنمن، لاری- جانسون** و **جنسن - هیز.**

روش پنمن در سال ۱۹۴۸ **پنمن** (Penman) دانشمند انگلیسی از ترکیب معادلات انرژی و آیرودینامیک فرمولی را برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) پیشنهاد نمود که بعداً فرمول او توسط عده زیادی از متخصصان هیدرولوژی و آب و خاک مورد استفاده و حک و اصلاح قرار گرفت که نامهای مختلفی بخودگرفت مانند روش **پنمن - رایت** (Penman-Right)، روش **پنمن - فائو** (Penman-FAO) ، **پنمن - کیمبرلی** (Penman-Kimberly) ، **پنمن - مونتیت** (Penman-Monteith) و غیره که شرح تمامی آنها بدلیل طولانی بودن مطلب امکان‌پذیر نیست و ما در اینجا فقط به ذکر روش پنمن - فائو که کاربرد زیادتری دارد می‌پردازیم. برای محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل به روش پنمن فائو از معادله زیر استفاده می‌شود :

$$PET = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (0.27)(1.0 + 0.01\ U_2)(e_o - e_d)\right] \qquad (۲۷-۶)$$

همانطور که مشاهده می‌شود در روش پنمن - فائو برای تعیین تبخیر - تعرق می‌بایست پارامترهای نسبتاً زیادی در دست باشد که در زیر برخی از روشهایی که می‌توان براساس آنها اجزای معادله مذکور را تخمین زد ذکر شده است. بعضی از این پارامترها با عدد و برخی دیگر بصورت فرمول توصیف شده‌اند. هرچند این فرمول‌ها و اعداد تجربی هستند ولی از دقت کافی برخوردارند. این پارامترها عبارتند از :

الف - Δ یا شیب منحنی فشار بخار آب $[\Delta(mb/^{\circ}C)]$ نسبت به درجه حرارت.

با داشتن مقدار دمای هوا می‌توان Δ را از معادله زیر بدست آورد.

$$\Delta = 2.00(0.00738\ T_{mean} + 0.8072)^7 - 0.00116 \qquad (۲۸-۶)$$

که در آن:

T_{mean} = میانگین دمای هوا در دوره زمانی موردنظر، °C می‌باشد

ب ـ γ یا ضریب رطوبتی، سایکرومتریک (γ (mb/°C)

ضریب رطوبتی رابطه بین کمبود فشاربخار آب با تفاوت دمای تر و خشک است. از نظر کاربردی مقدار γ برابر است با:

$$\gamma = 1.6134 \frac{P}{L} \qquad (۲۹-۶)$$

که P فشار هوا و L گرمای نهان تبخیر است. برحسب تجربه مقادیر P و L عبارتند از:

$$P = 1013 - 0.1055(E) \qquad (۳۰-۶)$$

$$L = 2500.78 - 1.3601\, T_{mean} \qquad (۳۱-۶)$$

که در آنها:

P = فشار هوا برحسب میلی‌بار، mb

L = گرمای نهان تبخیر، KJ/Kg

E = ارتفاع از سطح دریا، m

T_{mean} = درجه حرارت هوا (متوسط)، °C

ج ـ فشار بخار اشباع، (بر حسب میلی‌بار) e_s

فشاربخار اشباع تابعی از درجه حرارت است این تابع بصورت زیر توصیف شده است:

$$e_s = 33.8639[(0.00738T_{mean} + 0.8072)^8 - 0.000019(1.8T_{mean} + 48) + 0.001316] \qquad (۳۲-۶)$$

که T_{mean} میانگین دمای هوا برحسب سانتی‌گراد است.

د ـ تابش خالص (R_n (mm/d)

مقدار تابش خالص برابر است با:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_b \qquad (۳۳-۶)$$

α = آلبیدو (ضریب بازتاب تابش خورشید) که در فرمول پنمن ـ FAO مقدار آن ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

R_s = تابش ورودی خورشید با طول موج کوتاه که می‌توان آن را از معادله ۶-۹ بدست آورد.

R_b = تابش خروجی از زمین بصورت طول موج بلند.

مقدار R_s از معادله زیر نیز بدست می‌آید.

$$R_s = \left(a + b\frac{n}{N}\right)R_{so} \qquad (۳۴-۶)$$

مقادیر a و b ضرایب محلی هستند که برای هر منطقه باید محاسبه شوند. بطور متوسط $a = 0.35$ و $b = 0.61$ در نظر گرفته می‌شوند. لذا:

$$R_s = \left(0.35 + 0.61\frac{n}{N}\right)R_{so} \qquad (۳۵-۶)$$

که در آن:

n = تعداد ساعات واقعی آفتاب در روز.

N = حداکثر ساعات آفتابی ممکن در روزکه مقادیر آن برای ماههای مختلف سال و عرضهای جغرافیایی متفاوت در جدول ۶-۲ داده شده است.

R_{so} = حداکثر ممکن تابش ورودی خورشید به سطح زمین در هوای صاف بدون ابر که مقادیر آن برای ماهها و عرضهای جغرافیایی مختلف در جدول ۶-۶ داده شده است. مقدار R_{so} حدوداً ۷۵ درصد مقدار تابش خورشیدی در بالای اتمسفر (اعداد جدول ۶-۱) است.

مقدار تابش R_b (تابش خروجی از سطح زمین بصورت طول موج بلند) از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$R_b = \left(a\frac{R_s}{R_{so}} - b\right)R_{bo} \qquad (۳۶-۶)$$

a و b برای هر محل می‌بایست برآورد شوند، امّا بطور تقریبی مقادیر آنها به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۲ می‌باشند.

$$R_{bo} = \varepsilon\sigma(T_{max}^4 + T_{min}^4)/2 \qquad (۳۷-۶)$$

در این فرمول‌ها:

R_{bo} = تابش خروجی خالص $KJ/m^2(d)$

σ = ضریب ثابت استفان-بولتزمن $4.8995 \times 10^{-3}\ J/m^2.d.K^4$

T_{max} = حد اکثر دمای هوا، درجه کلوین $(K = °C + 273)$

T_{min} = حداقل دمای هوا، درجه کلوین $(K = °C + 273)$

ε = ضریب تابش سطح که مقدار آن برابر است با:

$$\varepsilon = -0.02 + 0.261\exp[-7.77 \times 10^{-4}(T_{mean})^2] \qquad (۳۸-۶)$$

که در آن T_{mean} متوسط درجه حرارت می‌باشد، °C.

هـ ـ کمبود فشار بخار ($e_s - e_d$ برحسب میلی‌بار، mb)

e_s از معادله ۶-۳۲ محاسبه شده وسپس e_d از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$e_d = e_s(RH_{mean}/100) \qquad (۳۹-۶)$$

سپس با داشتن e_s و e_d مقدار $e_s - e_d$ محاسبه می‌شود.

و ـ سرعت باد در طول ساعات روز در ارتفاع ۲ متری

این پارامتر با توجه به نسبت سرعت باد در روز به شب بدست می‌آید. اگر سرعت باد در ارتفاع ۲ متری در دست نبود از معادله $U_{2m} = U_z[\,2.0 / Z\,]^{0.15}$ استفاده می‌شود در این‌صورت با داشتن سرعت باد در ارتفاع Z سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بدست می‌آید.

۶-۵-۳ تبخیر-تعرق گیاه مرجع

براساس روشهای استاندارد موجود برای محاسبه نیاز آبی در طرحهای آب بجای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل مفهوم دیگری به نام *تبخیر-تعرق گیاه مرجع* (reference crop) بکار می‌رود که با علامت اختصاری ET_o نشان داده می‌شود. اصطلاح گیاه مرجع که ابتدا توسط پنمن و سپس پروت (Pruitt) و همکاران وی در هنگام تهیه دستورالعمل معروف به FAO-24 برای تخمین نیاز آبی گیاهان بکار برده شده بصورت زیر تعریف شده است. «تبخیر و تعرق از یک سطح فرضی پوشیده شدهٔ کامل از چمن کوتاه به ارتفاع ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر که وسعت آن بسیار زیاد باشد و بدون آنکه دارای آفات یا بیماری باشد در وضعیتی که در محدودیت آبی از نظر مصرف قرار نداشته باشد، فعالانه رشد داشته باشد» گرچه ابتدا فقط گیاه مرجع چمن تعریف شده بود اما سپس فرمول‌های دیگری با توجه به گیاه مرجع یونجه (روش پنمن ـ رایت) یا گیاه مرجع فرضی (روش پنمن ـ مونتیت) نیز برای محاسبه ET_o ارائه گردید.

در حال حاضر حداقل ۲۰ روش عمده برای محاسبه ET_o وجود دارد که براساس مقایسه نتایج حاصله از آنها با نتایج بدست آمده از دستگاههای لایسی‌متر وزنی دقیق در ۱۱ نوع شرایط آب و هوائی مختلف در سطح دنیا برخی از آنها از نظر مطابقت با مقادیر واقعی در اولویت قرار دارند. در بررسی مقایسه‌ای روش موسوم به *فائو - پنمن ـ مونتیت* چه در شرایط آب و هوایی خشک و چه در شرایط آب و هوایی مرطوب در ردیف اول قرار دارد. بهمین دلیل سازمان فائو روش مذکور را بعنوان استاندارد برای محاسبه نیاز آبی گیاهان معرفی نموده و نرم‌افزار مربوط به محاسبات آن را تحت عنوان CROPWAT دراختیار قرار داده‌است. که بر اساس روش موسوم به فائو-پنمن-مونتیت می‌باشد. روش دیگری که در محاسبه ET_o درطرحهای هیدرولوژی از آن استفاده می‌شود روش *بلانی ـ کریدل اصلاح شده* توسط سازمان فائو (FAO-Blaney-Criddle) است که به دلیل ساده بودن و اینکه نیاز به داده‌های کمتری دارد هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخصوص اینکه روش مذکور برای مناطق خشک مطلوب می‌باشد. روش موسوم به *هارگریوز* (Hargreaves) نیز که در آن فقط به داده‌های دما نیاز می‌باشد از روش‌های دیگر محاسبه تبخیر-تعریق گیاه مرجع است. فرمول پنمن-فائو مقدار تبخیر- تعرق را در مناطق مرطوب حدوداً ۳۵ درصد و در مناطق خشک ۸ درصد بیشتر از واقعیت بدست می‌دهد حال آنکه فرمول بلانی کریدل (FAO) برای مناطق خشک تقریباً با واقعیت منطبق است اما در مناطق مرطوب ۱۶ درصد بیش از واقعیت برآورد می‌کند. روش فائو - پنمن ـ مونتیت در مناطق خشک یک درصد کمتر از واقعیت و در مناطق مرطوب ۴ درصد بیشتر از واقعیت برآورد می‌کند. روش ترنت‌وایت چه در مناطق مرطوب (۴ درصد) و چه در مناطق خشک (۳۷ درصد) کمتر از واقعیت مقدار تبخیر- تعرق را بدست می‌دهد. نظر به اهمیت روشهای بلانی ـ کریدل و هارگریوز در اینجا به تشریح این روش‌ها می‌پردازیم:

روش بلانی ـ کریدل یکی از قدیم‌ترین روشهای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل روش بلانی - کریدل است که بعداً فرمول پیشنهادی آنها توسط پروت (Pruitt) از اساتید سابق دانشگاه کالیفرنیا مورد واسنجی قرارگرفت و برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن بصورت زیر ارائه شد.

$$ET_o = a + b\,[P(0.46T + 8.13)] \qquad (۴۶-۶)$$

ET_o = تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) برحسب میلی‌متر در روز (mm/d)

P = ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که بصورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰)

T = متوسط ماهانه درجه حرارت، °C

a و b = ضرایب اقلیمی

مقادیر P برای ماهها و عرضهای جغرافیایی مختلف در جدول ۶-۷ داده شده است. مثلاً مطابق این جدول اگر منطقه در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی واقع شده باشد برای ماه سپتامبر مقدار P برابر ۰/۲۸ است.

ضرایب a و b بستگی به حداقل رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، نسبت ساعات واقعی آفتاب (n) به حداکثر ممکن ساعات آفتابی (N) یعنی n/N و سرعت باد در روز (U_{day}) دارد. به عبارت دیگر a و b ضرایب اصلاحی روش بلانی - کریدل برای حداقل رطوبت هوا، تابش آفتاب و سرعت باد می‌باشند. در ایستگاههای هواشناسی RH_{min} از روی دماسنجهای تر و خشک تعیین می‌گردد. ساعات واقعی آفتاب در طول روز (n) توسط آفتاب نگار اندازه‌گیری می‌شود و مقدار N در هر نقطه بستگی به عرض جغرافیایی داشته که مقادیر آن برای ماههای مختلف در جدول ۶-۲ مشاهده می‌گردد.

مقادیر a و b را می‌توان از معادله‌های زیر بدست آورد:

$$a = 0.0043\,(RH_{min}) - \frac{n}{N} - 1.41 \qquad (۴۷-۶)$$

$$b = 0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07(n/N) + 0.066(U_{day}) - 0.006(RH_{min})\frac{n}{N} - 0.0006(RH_{min})(U_{day}) \qquad (۴۸-۶)$$

در این فرمول‌ها n تعداد ساعات واقعی آفتاب، N حداکثر ساعات ممکن تابش آفتاب، RH_{min} حداقل رطوبت نسبی (درصد) و U_{day} سرعت باد در طول روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر در ثانیه) است. چنانچه آمار اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع دیگری مثلاً Z در اختیار باشد برای استفاده در فرمول لازم است سرعت باد در ارتفاع Z به سرعت باد در ارتفاع ۲ متری تبدیل شود برای این منظور از فرمول تجربی زیر که در بخشهای قبل توضیح داده شد (معادله ۳-۱۱) استفاده می‌شود.

$$U_{2m} = U_z [\ 2.0 / Z\ ]^{0.15} \qquad (۴۹-۶)$$

در فرمول فوق :

Z = ارتفاعی است که سرعت باد در آن اندازه‌گیری شده است

U_{2m} = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری

U_z = سرعت باد در ارتفاع Z می‌باشد.

جدول ۶-۷ متوسط روزانه درصد ساعت روشنایی نسبت به کل ساعات روشنایی سال در ماههای مختلف (ضریب P برای استفاده در فرمول بلانی کریدل ـ FAO)

عرض جغرافیایی شمالی (درجه)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
60°	.15	.20	.26	.32	.38	.41	.40	.34	.28	.22	.17	.13
58	.16	.21	.26	.32	.37	.40	.39	.34	.28	.23	.18	.15
56	.17	.21	.26	.32	.36	.39	.38	.33	.28	.23	.18	.16
54	.18	.22	.26	.31	.36	.38	.37	.33	.28	.23	.19	.17
52	.19	.22	.27	.31	.35	.37	.36	.33	.28	.24	.20	.17
50	.19	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.20	.18
48	.20	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.21	.19
46	.20	.23	.27	.30	.34	.35	.34	.32	.28	.24	.21	.20
44	.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.20
42	.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
40	22	.24	.27	.30	.32	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
35	.23	.25	.27	.29	.31	.32	.32	.30	.28	.25	.23	.22
30	.24	.25	.27	.29	.31	.32	.31	.30	.28	.26	.24	.23
25	.24	.26	.27	.29	.30	.31	.31	.29	.28	.26	.25	.24
20	.25	.26	.27	.28	.29	.30	.30	.29	.28	.26	.25	.25
15	.26	.26	.27	.28	.29	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
10	.26	.27	.27	.28	.28	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.26
5	.27	.27	.27	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.27	.27	.27
0	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27