مقارنة بعض المعادلات التجريبية الخاصة بتقدير التبخر–نتح المرجعي باستعمال البيانات المناخية تحت ظروف محافظة ذي قار

طالب صبر حريجة العسكري* داخل راضي نديوي** محمد عبد الله عبد الكريم**

الملخص

تم اختيار ست معادلات تجريبية لتقدير قيم التبخر نتح المرجعي (ET_o) ثلاثة منها على أساس درجات الحرارة، وثلاثة على أساس الإشعاع باستعمال البيانات المناخية لمحافظة ذي قار للعام 2012 مع اعتماد معادلة FAO Penman-Montaith [PM](2) كطريقة قياسية ، أجريت المقارنات والتقويم للمعادلات التجريبية بصيغتها الأصلية وبعد معايرتها .

كشفت النتائج إن المعادلات التجريبية جميعها قد أعطت تقديرات اقل (Underestimated) لقيم ET_o بالمقارنة مع القيمة المقدرة بواسطة معادلة PM، وأظهرت نتائج المقارنة إن إبدال الثابت الأصلي للمعادلات التجريبية بثوابت جديدة أدى إلى تحسن ورفع كفاءة المعادلات جميعها وزيادة قدرتها على إعطاء تقديرات أكثر دقة لقيم ET_o ، بينت المفاهيم الإحصائية وهي الجذر التربيعي لمربع متوسط الخطأ (RMSE) والخطأ المطلق لمعدل الانحراف (MAE) والمعامل الإجمالي المتبقي (CRM) زيادة الثقة بالمعادلات المعدلة وذلك بخفض قيمة تلك المؤشرات كما أوضح تحليل الانحدار الخطي إن التعديلات أعطت نتائجاً أفضل تمثلت بارتفاع قيم معامل التحديد (R^2) ومعامل الارتباط (r) للمعادلات الستة بعد معايرتها ، فضلا عن تغييرات ايجابية محسوسة في قيم الميل لمعادلة الارتداد الخاصة بالصيغ التجريبية جميعها.

وتميزت المعادلات التجريبية المعدلة بارتفاع قيم دليل التوافق (D) التي تراوحت بين 0.987 للمعادلة Priestley–Taylor إلى 0.999 للمعادلتين Blaney-Criddle و Hargreaves-Samani انعكس ذلك على ارتفاع قيم دليل الثقة (C) التي تراوحت بين 0.978 للمعادلة Makkink إلى 0.998 للمعادلتين Blaney–Criddle و Hargreaves-Samani كانت معادلة Blaney-Criddle الأكثر قبولاً بين المعادلات التجريبية جميعها بصيغتها الأصلية ، وازدادت قدرتها بعد المعايرة على انجاز تقديرات للمعدلات الشهرية لقيم ET_o تتفق بشكل وثيق مع القيم المحسوبة بالطريقة القياسية .

المقدمة

يمكن أن تقسم أساليب تقدير التبخر – نتح إلى طرائق هيدرولوجية (الموازنة المائية) و تحليلية مستندة على المتغيرات المناخية إضافة إلى المعادلات التجريبية التي يتم اختيارها على أساس تحليل الانحدار ويجب أن تجري عملية معايرة (Calibration) لتلك المعادلات في اغلب الأحيان وبشكل يتناسب مع المحلية لضمان الحصول على تقديرات مقبولة لقيم التبخر– نتح المرجعي .

حساب أو تقدير الاستهلاك المائي الفعلي Crop Evapotranspiration (ETc) مهم لإدارة الموارد المائية وعمليات جدولة الري للمحاصيل الزراعية ، ويمثل ETc مقدار مياه الري المستهلكة من قبل المحصول أثناء مدة زمنية محددة وتوزيعه على عدد الريات حسب متطلبات الحاجة الفعلية ، وهنالك العديد من العوامل المؤثرة في الاستهلاك المائي منها عوامل المناخ التي تشمل الطاقة الحرارية والرياح والرطوبة النسبية وطول النهار والكثافة الضوئية

* مديرية الزراعة في محافظة ذي قار – وزارة الزراعة– ذي قار العراق.
** كلية الزراعة – جامعة البصرة – البصرة، العراق.

فضلاً عن عوامل التربة، ولغرض تقدير أو تحديد ما يحتاجه المحصول من مقنن مائي **Water Requirements** للحصول على أقصى إنتاجية فلابد من معرفة أو دراسة مفردات العوامل المؤثرة في مقدار هذا المقنن، ولذا يجب تحديد مقدار الاحتياجات المائية الفعلية للمحصول الزراعي **ETc** لكي يكمل دورة حياته بصورة طبيعية التي تعتمد على دقة تقديرات التبخر– نتح المرجعي ET_o.

يعبر ET_o عن التبخر نتح من محصول مرجعي افتراضي (الحشيش أو الجت) الذي يكون منتظم النمو ومتجانس الطول بارتفاع ثابت **0.12** م و يغطى سطح التربة بالكامل ولا يعاني من نقص الماء المتيسر في موسم النمو مع معامل انعكاس **(albedo**) يساوي **0.23** ومقاومة سطحية **69** ثا م $^{-1}$ (**5**)، وهو مقياس لمقدار الطاقة المتوفرة لتبخر الماء أي انه يمثل المعدل الكامن بدون أن يأخذ بالاعتبار الماء الجاهز فعلياً للتبخر. لذلك يمثل الحدود العليا لمعدل التبخر– نتح الفعلي **(ETc)** وان نسبة معدلات **ETc/ETo** تتراوح بين **1.5 %** في أشهر الصيف وقد تصل إلى **100 %** في أشهر الشتاء (**10**).

وكذلك استعملت النسبة بين ET_o والتساقط مقياساً للجفاف في جداول عدة للتصنيف المناخي (**17**).

تعتمد الأساليب المستعملة في تقدير التبخر – نتح المرجعي على واحد أو أكثر من المتغيرات المناخية أو على بعض القياسات التي لها علاقة بتلك المتغيرات، بعض هذه الطرق تكون عالية الدقة في حين يؤمن بعضها الأخر تقديرات تقريبية .

توجد تقريباً **50** طريقة أو انموذجاً رياضياً لتقدير قيم التبخر– نتح المرجعي لكنها تعطي قيماً متباينة . وأحيانا متناقضة نتيجة لتصميمها على افتراضات مختلفة وتنوع بياناتها المطلوبة ، أو لأنها قد طورت ضمن أقاليم مناخية محددة (**6**). فقد أشار **Allen** وجماعته (**2**) إلى نتائج دراسة مفصلة لجمعية المهندسين المدنيين الأمريكية **(ASCE)** لتحليل أداء **20** معادلة بالمقارنة مع نتائج المساريب **(lysimeters)** تحت ظروف مناخية مختلفة في **11** موقعاً حول العالم قد بينت إن المعادلات التجريبية على أساس الإشعاع، أعطت نتائجاً جيدة في المناطق الرطبة عندما كانت الحركية الهوائية **(aerodynamic)** صغيرة نسبيا لكنها تميل إلى إعطاء تقديرات اقل في المناطق الجافة، بينما تتطلب المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة إجراء عملية معايرة لتحقيق نتائج مقبولة مع إمكان استثناء معادلة **Hargreaves-Samani** التي أعطت تقديرات جيدة لـ**ETo** ومتوافقة مع الطريقة القياسية.

أوصت منظمة الزراعة والأغذية الدولية **(FAO)** اعتماد صيغة **FAO Penman-Montaith** كطريقة قياسية لتقدير ET_o واستعمالها معياراً للمقارنة مع المعادلات التجريبية الأخرى المصممة للغرض نفسه، لانها الطريقة الأكثر دقة لاستنادها على أسس نظرية قوية تتمثل بالمبادئ الفيزيائية الأساس وتوازن الطاقة التي ضمنت لها الصلاحية العالمية. إلا إن العديد من المحطات المناخية في العالم لا تملك البيانات الكافية لاستعمال هذه الطريقة لذلك أجريت دراسات عديدة لتطوير النماذج الرياضية الخاصة بتقدير ET_o على أساس اقل ما يمكن من العوامل (**2**).

هنالك عدد كبير من المعادلات المقترحة لتقدير ET_o كدالة للبيانات المناخية والهيدرولوجية، إلا إن استعمال تلك المعادلات يتحدد بمدى وفرة تلك البيانات، لذا ينبغي استعمال الصيغة التجريبية التي تتلاءم مع ما متوفر من بيانات للتغلب على تلك المحددات، مع الأخذ بالاعتبار دقة وتناسق تقديراتها مع المعادلة القياسية. لذلك يهدف البحث إلى تقويم ومعايرة عدد من المعادلات التجريبية لتقدير التبخر— نتح المرجعي (ET_o) بما يتناسب مع الظروف العراقية في المنطقة الجنوبية، محافظة ذي قار وتحديد المعادلة الأكثر قدرة على تخمين قيم ET_o الشهرية والسنوية بالمقارنة مع المعادلة القياسية **FAO Penman-Montaith** واستنباط قيم جديدة للثوابت المعادلات موضوع البحث.

المواد وطرائق البحث

استعملت البيانات المناخية لمحافظة ذي قار للعام 2012 التي تضمنت درجات الحرارة والرطوبة النسبية وسرعة الرياح والإشعاع وعدد ساعات النهار الفعلية في حساب قيم التبخر – نتح . اختيرت سبع معادلات تجريبية لتقدير التبخر – نتح المرجعي تنتمي إلى ثلاثة أصناف وكما يأتي:-

المعادلات على أساس درجات الحرارة Temperature-Based Equations

معظم هذه المعادلات مبنية على أساس وجود علاقة آسية بين قيم ET_o ودرجات الحرارة وقد استنتج Thornthwaite (22) إن الصيغة العامة لتلك العلاقة يمكن أن تكون كما يأتي :-

$$ET_0 = c(T)^n ----- (1)$$

ET_o التبخر نتح المرجعي [mm day^{-1}]

C ثابت المعادلة التجريبية (لا بعدي)

n معامل يتغير بحسب الموقع والموسم (لا بعدي)

T متوسط درجة الحرارة (°م)

اختيرت ثلاث معادلات تتطلب درجات الحرارة فقط هي

أ) معادلة Blaney–Criddle [BC]

$$ET_0 = kp(0.46\,T + 8.13) ----- (2)$$

ب) معادلة Hargreaves [HS] و Samani

$$ET_0 = \sigma R_a T D^{0.5}(T + 17.8) ----(3)$$

ج)معادلة Kharrufa [K] المبينة في أدناه :

$$ET_0 = 0.34pT^{1.3} ---------- (4)$$

a معامل يعتمد على التغير الشهري في ساعات سطوع الشمس n الفعلية والمتوسط الشهري للرطوبة النسبية RHmean

k معامل الاستهلاك المائي الشهري (لا بعدي) .

T متوسط درجة حرارة الهواء [°C]

Ra الإشعاع من الفضاء الخارجي (ملم يوم$^{-1}$)

0.408 : معامل تحويل لقيمة الإشعاع الوارد من الفضاء الخارجي، وفق العلاقة التالية :

$$\text{equivalent evaporation (mm day}^{-1}) = 0.408 \times \text{Radiation(MJm}^{-2}\text{ day}^{-1})$$

P النسبة المئوية لعدد ساعات النهار الكلي أثناء مدة محددة إلى عدد ساعات النهار الإجمالية في السنة [%] (365*12)

TD الفروق اليومية بين درجة حرارة الهواء العظمى والصغرى [°C] .

σ معامل ثابت (لا بعدي)

المعادلات على أساس الإشعاع Radiation-Based Equations

تعتمد هذه المعادلات على موازنة الطاقة واغلبها مشتقة من المعادلة التالية.(Jensen *et al.*, 1990)

$$\lambda ET_0 = C_r(wRs) \; or \; \lambda ET_0 = C_r(wRn) ----(5)$$

λETo تدفق الحرارة الكامنة [MJ m^{-2} day^{-1}] .

λ الحرارة الكامنة للتبخر[MJ kg^{-1}]

C_r معامل يعتمد على الرطوبة النسبية وسرعة الرياح (لا بعدي)

w معامل يعتمد على درجة الحرارة وخطوط العرض (لا بعدي)

واستعملت ثلاث معادلات على أساس الإشعاع، هي :-

أ) معادلة [M] Makkink .

$$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \frac{RS}{\lambda} - - - - - - (6)$$

ب) معادلة [PT] Priestley –Taylor .

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \frac{Rn}{\lambda} - - - - - - (7)$$

ج)معادلة [H] Hargreaves .

$$ET_0 = 0.0135(T + 17.8) \frac{Rs}{\lambda} - - - - - - - - (8)$$

Δ انحدار منحنى الضغط البخاري [kPa]

λ الحرارة الكامنة للتبخر [MJ kg^{-1}]

γ مقدار الطاقة المطلوبة لزيادة درجة حرارة وحدة كتلة من الهواء درجة واحدة عند ضغط ثابت وهو دالة للارتفاع [kPa °C^{-1}]

Rn الإشعاع الصافي [MJ m^{-2} day^{-1}]

Rs الإشعاع الشمسي الكلي (القصير الموجة) [MJ m^{-2} day^{-1}]

المعادلات المركبة Combination Equations

التي تتطلب معرفة درجات الحرارة والرطوبة النسبية والإشعاع وسرعة الرياح ، اعتمدت المعادلة [PM] FAO Penman-Montaith (7) المذكورة في أدناه معياراً للمقارنة مع المعادلات الستة السابقة المصممة للغرض نفسه.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} - - - (9)$$

G كثافة حرارة التربة المتدفقة [°C]

es الضغط البخاري المشبع[kPa]

ea الضغط البخاري الفعلي [kPa]

es – ea نقص البخار المشبع [kPa]

u_2 سرعة الرياح على ارتفاع 2 م (م ثا$^{-1}$)

استعمل كل من معامل التحديد أو معامل القياس (R^2) ومعامل الارتباط (r) (14) والجذر التربيعي لمربع متوسط الخطأ (RMSE) والمعامل الإجمالي المتبقي (CRM) (15) والخطأ لمطلق لمعدل الانحراف (MAE) والخطأ النسبي (PE) ومعدل التقدير (Y) (23) ودليل التوافق (D) ودليل الثقة (C) (22) لغرض معرفة دقة التقديرات والدلالة على الاتجاه السائد لتقديرات الصيغة التجريبية فيما إذا كانت أعلى أو اقل من المحسوبة ودرجة الملائمة مع الصيغة القياسية .

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - \overline{E})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(E_i - \overline{E})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}}\right]^2 \quad --(10)$$

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - P_i)^2}{n}} \quad -----(11)$$

$$CRM = \frac{(\sum_{i=1}^{n} Pi - \sum_{i=1}^{n} Ei)}{\sum_{i=1}^{n} Pi} \quad ----------(12)$$

$$\mathbf{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |E_i - P_i|}{n} \quad ----------(13)$$

$$\mathbf{Percentage\ error}(\%\ Error) = 100 \times \left[\frac{(E_i - \mathrm{P_i})}{P_i}\right] \quad -----(14)$$

$$\underline{Y} = \frac{\overline{P}}{\overline{E}} \quad ----------(15)$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|E_i - \overline{P}| + |P_i - \overline{P}|)^2}\right] \quad ----------(16)$$

$$C = r \times D \quad ----------(17)$$

الفكرة الرئيسة لتطوير النماذج الرياضية الخاصة بتقدير التبخر نتح المرجعي تكون من خلال استبدال الثوابت الأصلية المستعملة في هذه الصيغ بثوابت جديدة من خلال المعايرة بواسطة ملائمة نواتج المعادلات التجريبية مع قيم التبخر نتح المحسوبة بالطريقة القياسية بمتوالية زمنية التي يمكن تحقيقها باستعمال اختبارات الامثلية **Optimization** مثل الخوارزميات **algorithms** وتحديد قيمة الثابت الجديد من خلال علاقات الارتداد المتعدد اللاخطي **The nonlinear multiple regressions** بين قيم ET_0 الشهرية للعام **2012** والعناصر المناخية (درجات الحرارة و الإشعاع و الرطوبة النسبية وسرعة الرياح والضغط البخاري) أو بعض العلاقات الخاصة مثل ارتباط التغيير في نسبة التبخر–نتح المرجعي إلى النسبة المئوية لعدد ساعات النهار الكلي أثناء مدة محددة إلى عدد ساعات النهار الإجمالية في السنة **(P)** مع التغيير في درجات الحرارة **(T)** السنوية **(ET_o/P∞T)** .

النتائج والمناقشة

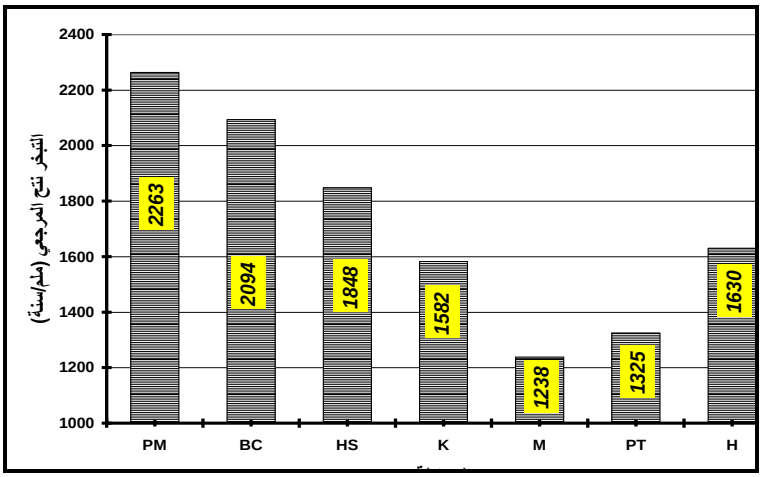
بينت نتائج مقارنة قيم ET_o المحسوبة وفق معادلة **PM** القياسية مع المعادلات الستة الأخرى ثلاث منها على أساس درجات الحرارة وثلاث أخرى على أساس الإشعاع (جدول **1**)، إن المعادلات التجريبية جميعها قد أعطت تقديرات اقل **(Underestimation)** لقيم ET_o بالمقارنة مع القيمة المقدرة بواسطة المعادلة القياسية، وتباينت القيم المقدرة بحسب نوع المعادلات ، إذ حققت المعادلتان **BC** و**HC** أعلى معدلات بلغا **5.04** و**5.71** ملم يوم$^{-1}$ ، في حين أدنى معدلاً سجل بواسطة المعادلتين **PT** ، إذ بلغتا **3.38** و**3.62** ملم يوم$^{-1}$ ، أما المعادلتان **K** و**H** فقد سجلتا قيم متوسطة بين الاثنين بلغتا **4.32** و**4.45** ملم يوم$^{-1}$. لوحظ إن هنالك اختلافات واضحة في معدلاتET_o الشهرية المعادلات جميعها التي وصلت إلى ذروتها خلال شهر تموز ، وانخفضت إلى أدنى معدلاتها في شهر كانون أول، فيما يخص لمعادلتان **HS** و **PT** وشهر كانون ثاني لبقية المعادلات، إذ تميّزتْ تلك الأشهر

بأيام غائمة عدة ورطوبة نسبية جوية عالية نسبياً مع انخفاض في قيم درجات الحرارة والإشعاع الشمسي وقلة عدد ساعات النهار الفعلية بحسب البيانات المناخية لمحافظة ذي قار للعام 2012.

جدول 1 : قيم التبخر نتح المرجعي (ملم يوم $^{-1}$) المحسوبة وفق المعادلات المختلفة تحت ظروف محافظة ذي قار

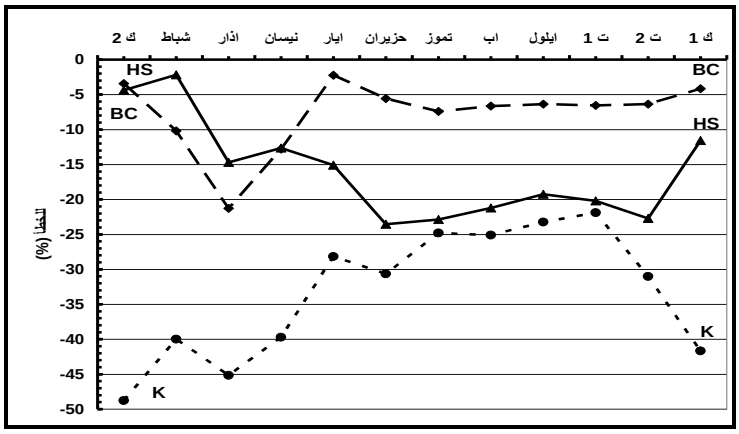
الشهر	المعادلة						
	BC	HS	K	M	PT	H	PM
كانون الثاني	1.98	1.96	1.05	1.52	1.28	1.73	2.05
شباط	2.47	2.69	1.65	2.15	2.05	2.49	2.75
آذار	3.59	3.89	2.50	2.92	3.06	3.51	4.56
نيسان	5.38	5.39	3.72	3.70	4.22	4.68	6.17
أيار	7.84	6.81	5.76	4.55	5.44	6.12	8.02
حزيران	9.34	7.56	6.86	4.87	5.81	6.76	9.89
تموز	9.75	8.12	7.92	5.13	6.05	7.25	10.53
آب	9.41	7.94	7.55	4.80	5.38	6.77	10.08
أيلول	7.78	6.71	6.38	4.11	4.20	5.64	8.31
تشرين اول	5.55	4.74	4.64	3.16	3.00	4.11	5.94
تشرين ثاني	3.38	2.79	2.49	2.10	1.74	2.55	3.61
كانون أول	2.07	1.91	1.26	1.53	1.16	1.75	2.16
المعدل السنوي	5.71	5.04	4.32	3.38	3.62	4.45	6.17
المجموع ملم سنة$^{-1}$	2094	1848	1582	1238	1325	1630	2263

انعكس التباين في المعدلات اليومية على قيم ET_o التجميعية السنوية (شكل 1)، إذ يلاحظ إن هنالك زيادة واضحة في قيم ET_o التجميعية السنوية المحسوبة وفق معادلة PM القياسية بالمقارنة مع بقية المعادلات، فقد بلغ أعلى فرقاً سنوياً مقداره 1025 ملم سنة$^{-1}$ بين المعادلتين PM وM وأدنى فرقا كان 169 ملم سنة$^{-1}$ بين معادلتي PM وBC، وازداد مقدار الفرق السنوي إلى أعلى مستوياته بين قيم ET_o المحسوبة وفق معادلة PM ونظيرتها المحسوبة باستعمال المعادلات K, BC,PT, M, H, HS أثناء الأشهر (حزيران وتموز وآب وأيلول) لتصل إلى 62 و 60 و 59 و 57 و 46 و 45 % على التوالي من إجمالي قيمة الفرق ، في حين انخفضت تلك القيم أثناء أشهر كانون أول وكانون ثاني وشباط) لتصل إلى نسبة 3 و 5 و 5 و 8 و 8 و 13 % للمعادلات الستة على التوالي.

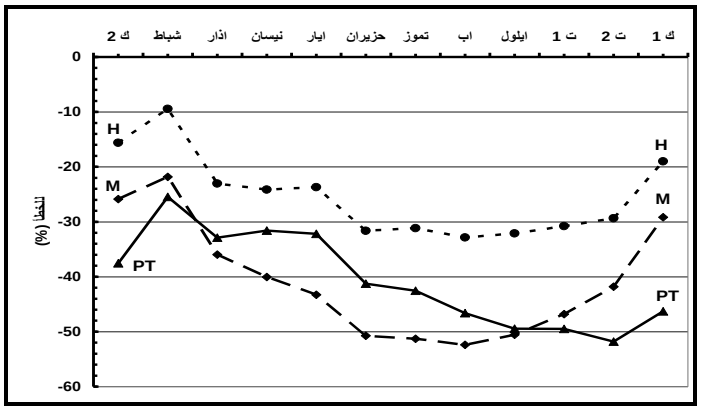


شكل1: قيم التبخر – نتح المرجعي التجميعية للعام 2012 المحسوبة وفق المعادلات التجريبية بصيغتها الأصلية في محافظة ذي قار

بين اختبار النتائج باستعمال النسبة المئوية للخطأ (**error %**) بين المعدلات الشهرية لـ ET_o المقدرة بالمعادلات التجريبية والمحسوبة بواسطة المعادلة **PM** ، إن استعمال المعادلات التجريبية بصيغتها الأصلية أنتج مجالاً واسعاً للخطأ وصل إلى **40.81–** و **40.60–** و**33.35–** و **25.24–** % عند تطبيق المعادلات **M** و **PT** و **K** و **H** ، على التوالي، وأعطت المعادلة **HS** تقديرات مقبولة – **15.87%** في حين ترتب على استعمال المعادلة **BC** الحصول على ادني مدى للخطأ بلغ **7.75–** %، اختلف سلوك المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة عند تقدير المعدلات الشهرية لقيم ET_o (شكل **2**) فعند تطبيق المعادلة **BC** توزع مجالاً **W** للخطأ بشكل متجانس تقريبا خلال كامل أشهر السنة باستثناء زيادة مفاجئة حصلت في شهر آذار، في حين كان هنالك زيادة نسبية في مجال الخطأ في أشهر الصيف عند تطبيق معادلة **HS** وجماعته ، وذلك قد يعزى بحسب **Xu** جماعته (**25**). إلى تأثير ظاهرة الانتقال الأفقي للطاقة **(advection)** الخاصة بديناميكا الهواء العالية في المدة التي تزداد فيها سرعة الرياح التي لم تأخذها المعادلة **HS** بنظر الاعتبار. بينما أخذت المعادلة **K** مساراً مغايراً، إذ تناقص فيها مجال الخطأ إلى أدنى مستوياته في المدة الممتدة من شهر أيار لغاية شهر تشري أول، وازداد إلى أعلى مستوياته في بقية أشهر السنة وبمعدل تراوح من **39.71–** إلى **48.78–**. ويظهر شكل **3** إن النسبة الأكبر من مجال الخطأ للمعادلات التجريبية على أساس الإشعاع قد حصل في الأشهر حزيران وتموز وأيلول التي تميزت بارتفاع درجات الحرارة وزيادة سرعة الرياح بحسب البيانات المناخية لمحافظة ذي قار للعام **2012** .



شكل 2: النسبة المئوية للخطأ في قيم المعدلات الشهرية لـ ET_o المقدرة بالمعادلات التجريبية HSو BC و K على أساس درجات الحرارة بصيغتها الأصلية بالمقارنة مع المعادلة PM .



شكل3 : النسبة المئوية للخطأ في قيم المعدلات الشهرية لـ ET_o المقدرة بالمعادلات التجريبية H و M و PT على أساس الإشعاع بصيغتها الأصلية بالمقارنة مع المعادلة PM .

ولإغراض التقويم الكمي فان العلاقة بين تقديرات المعادلات الستة والمعادلة القياسية قد حللت باستعمال بعض المعايير الإحصائية الهادفة لاختيار المعادلة الأكثر قدرة على تخمين قيم ET_o .

يبين الجدولان 2 و 3 إن قيم RMSE قد تدرجت من 0.545 إلى 3.314 بين المعادلتين BC وM وعلى التوالي ، ويدل هذا المعيار على تفوق نسبي للمعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة التي حصلت على اقل قيم RMSE بالمقارنة مع المعادلات التجريبية على أساس الإشعاع، في حين وصلت قيم المعيار MAE إلى 0.463 باستعمال معادلة BC مقابل 2.795 باستعمال المعادلة M ، ويبين الاتجاه العام لهذا المؤشر الإحصائي وجود أفضلية بسيطة للمعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة بينما أصبح لهذه المعادلات أفضلية واضحة عند استعمال المعامل الإجمالي المتبقي (CRM) بتسجيلها قيم قريبة نسبياً من القيمة المثالية (CRM =0) بلغت 0.081− و0.224− و0.431− للمعادلات BC وHS وK وعلى التوالي، كذلك حققت المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة ارجحية عالية عند اختبارها باستعمال دليلي التوافق والثقة، إذ اعطت ا لمعادلة BC أعلى قيمة من كلا المعيارين بلغتا 0.992 و 0.993 وعلى التوالي ، مقتربة من حدود الثقة المطلقة (C =1) ، في حين اعطت المعادلة M أدنى قيمة بلغت 0.745 و 0.735 وعلى التوالي، وعلى الرغم من التباين الواضح في قيم ET_o المقدرة بالمعادلات التجريبية المختلفة من جهة ومعادلة PM من جهة أخرى وابتعاد بعض المؤشرات الإحصائية لتلك المعادلات عن قيمها المثالية فان تحليل معادلة الارتداد الخطي الجدولان 2 و 3 تكشف عن وجود علاقة خطية ايجابية قوية، إذ إن قيم معامل الارتداد R^2 ومعامل الارتباط r للمعادلات جميعها قد بقيت مرتفعة وتراوحت بين 0.937إلى 0.993 لمعامل الارتداد، وبين0.968 إلى 0.996 لمعامل الارتباط وذلك بسبب إن المعيار الرئيس لقبول تلك الصيغ لحساب قيم ET_o يتحدد بعد ضمان تحقيقها ارتباط وثيق ومعامل ارتداد عالي مع المعادلة PM .

جدول 2: المؤشرات الإحصائية للمعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة بصيغتها الأصلية بالمقارنة مع المعادلة FAO Penman-Monteith في محافظة ذي قار

المؤشر الإحصائي	المعادلة		
	BC	HS	K
RMSE	0.545	1.387	1.991
MAE	0.463	1.131	1.860
CRM	0.081−	0.224−	0.431−
D	0.992	0.943	0.900
R^2	0.993	0.991	0.982
r	0.996	0.995	0.991
C	0.989	0.938	0.892
SLOPE	0.9485	0.7447	0.7924
INTERCEPT	0.1455	0.4454	0.5780−
معدل التقدير	0.925	0.817	0.699

وأوضحت العلاقة الخطية بين المعادلة PM وبقية المعادلات تفوق المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة ، فعند تغيير قيم ET_o المحسوبة بال معادلة PM بمقدار وحدة واحدة استجابت له المعادلات BC و K وHS بتغير مقداره 0.95، 0.79، 0.75 وحدة وعلى التوالي ، في حين استجابة له معادلات H و PT وM بتغيير مقداره 0.42, 0.55, 0.64 وحدة وعلى التوالي ، وتكشف قيمة التقاطع (Intercept) إن هنالك تباين في القيم الابتدائية لـ ET_o المحسوبة بالمعادلات التجريبية بالمقارنة مع معادلة PM، فقد بينت النتائج إن أدنى القيم

الابتدائية قد أعطيت بواسطة المعادلتين BC وPT قد بلغت 0.15, 0.20 ملم يوم $^{-1}$ وعلى التوالي وأعطت معادلة M أعلى قيمة بلغتا 0.81 ملم يوم $^{-1}$ وأخذت بقية المعادلات قيم قريبة من 0.50 ملم يوم $^{-1}$.

جدول 3: المؤشرات الإحصائية للمعادلات التجريبية على أساس الإشعاع بصيغتها الأصلية بالمقارنة مع المعادلة FAO Penman-Monteith في محافظة ذي قار

المؤشر الإحصائي	المعادلة		
	M	PT	H
RMSE	3.314	2.926	2.049
MAE	2.795	0.953	1.726
CRM	0.827−	0.708−	0.388−
D	0.745	0.796	0.878
R^2	0.973	0.937	0.988
r	0.986	0.968	0.994
C	0.735	0.771	0.872
SLOPE	0.4161	0.554	0.6421
INTERCEPT	0.8105	0.1951	0.4841
معدل التقدير	0.547	0.799	0.720

أوضحت قيم معدل التقدير (Y) وجود تقارب كبير في معدلات ET_o اليومية بين المعادلتين PM وBC وبنسبة بلغت 0.93:1.00 ملم يوم $^{-1}$ في حين انخفضت هذه النسبة إلى أدنى مستوى لها بين المعادلتين PM وM لتصل إلى 0.55:1.00 ملم يوم $^{-1}$.

كما يبين الجدولان 2 و3 إن أفضل المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة كانت المعادلة BC التي تفوقت بالمعايير الإحصائية جميعها على المعادلتين HS و K ، إما المعادلات التجريبية على أساس الإشعاع فقد تفوقت المعادلة H على المعادلتين M وPT في المعايير الإحصائية جميعها باستثناء Intercept ومعدل الفرق التي كانت فيها الأفضلية لصالح المعادلة PT ، وأظهرت المقارنات المستندة على المعايير الإحصائية بين المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة من جهة وعلى أساس الإشعاع من جهة أخرى كانت الأولى كانت أكثر كفاءة في تقدير قيم ET_o ، إذ يمكن ترتيب المعادلات بحسب كفاءة الأداء كالأتي :-

BC> HS> H> K> PT> M

وفي دراسة مفصلة رتب Jensen وجماعته (11) المعادلات المستعملة لتقدير قيم التبخر-نتح وطريقة حوض التبخر صنف A بحسب درجة الأفضلية في المناطق الجافة والمناطق الرطبة على النحو التالي:-

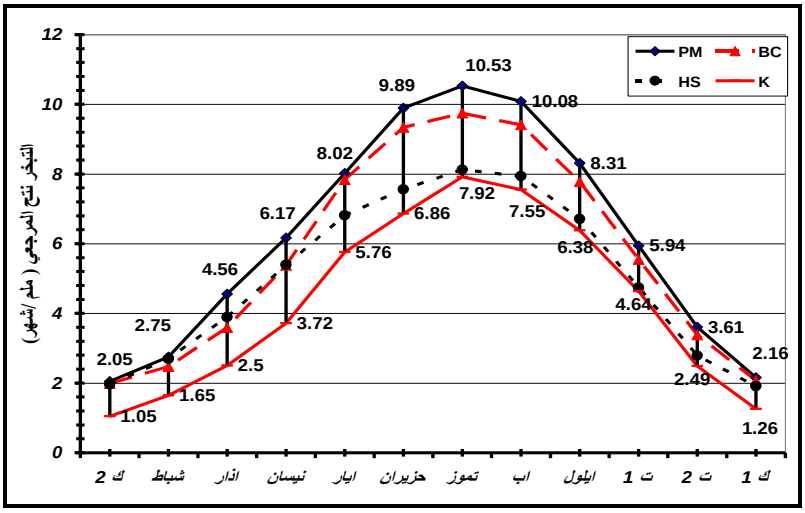
PM > PT > BC > HS > Class A pan

في حين رتب Chen وجماعته (4) المعادلات التجريبية عند تطبيقها بصيغتها الأصلية وبعد المعايرة بحسب أدائها في تايوان بالتسلسل التالي:-

H > PT > M > K> HS > BC (الصيغة الأصلية)

H > PT > M > K> BC > HS (الصيغة المعدلة)

يعزز اختلاف أداء تلك المعادلات بحسب الأهداف والمنطقة ما ذكره Hossein وجماعته (9) بعدم وجود إجماع عالمي لصلاحية أي من تلك المعادلات للأقاليم المناخية جميعها ،فضلاً عن ذلك تحتاج هذه الصيغ إلى المعايرة قبل استعمالها في جدولة الري .



شكل4: قيم التبخر– نتح المرجعي المحسوبة وفق المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة بصيغتها الأصلية بالمقارنة مع المعادلة **FAO Penman-Monteith** في محافظة ذي قار

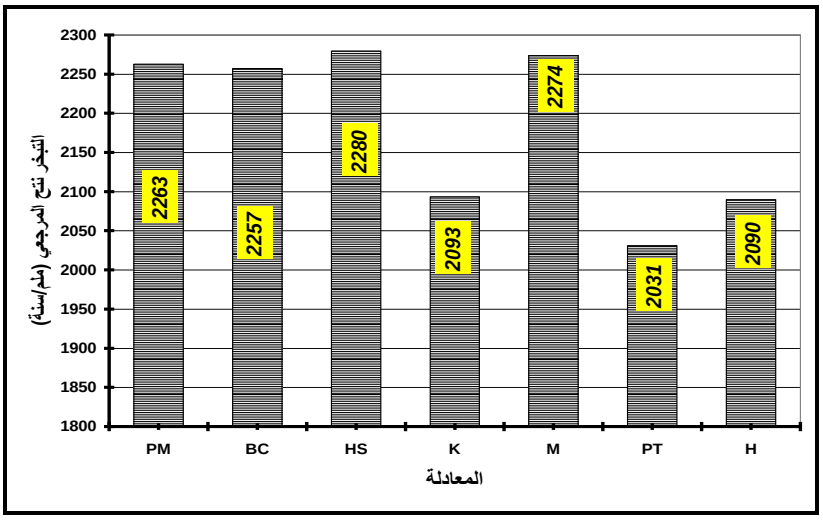
إن من أسباب الحصول على قيم مختلفة باستعمال المعادلات التجريبية بصيغتها الأصلية (شكل **4**) يرجع إلى النقص في الأسس الفيزيائية للصيغ المستعملة وإهمال معظمها لعناصر مهمة مثل سرعة الرياح والرطوبة النسبية وطبيعة التربة باستثناء المعادلة **PM** والقبول بالمعامل الثابت المقترح تحت ظروف مناخية مختلفة على الرغم من إن بعض الدراسات مثل **Xu** و **Singh** (**24**) قد بينت إن قيم الثوابت الأصلية التي تضمنتها المعادلات موضوع الدراسة قد عملت بصورة جيدة جداً في سويسرا، باستثناء المعادلة **Priestley-Taylor** التي أظهرت قيمة عالية جداً. كذلك قد تكون القيم المختلفة ناتجة عن السمات المناخية للمنطقة فيما يخص التغيرات اليومية والموسمية في درجات الحرارة التي تعود جزئياً إلى ظروف الرياح وخزن الطاقة في التربة، لذلك فان المعدلات المستعملة في تلك المعادلات قد لا تمثل المعدلات الفعلية ، فعلى سبيل المثال معدل درجة الحرارة ليوم **2013 /5/30** في محافظة ذي قار المحسوب على أساس المعدل اليومي بلغ **30.21** م^{0} في حين بلغ **31.58** م^{0} على أساس المعدل لكل **5** دقائق.

أدت معايرة الثوابت الأصلية الخاصة بالمعادلات الستة المستعملة إلى تحسين أداء تلك المعادلات في تقدير ET_o بالمقارنة مع القيم المستحصلة باستعمال المعادلة **PM** ، وأنجزت معايرة المعادلات التجريبية الستة بعد أن رتبت ثوابتها رياضيا لتلائم تقديرات المعادلة **PM** وبعدها تقليل أخطاء التقديرات بالمقارنة مع الصيغ الأصلية. فقد أتضح تأثير المعايرة من خلال تحسن المعادلات التجريبية جميعها وزيادة قدرتها على تخمين قيم ET_o بشكل يتوافق مع تقديرات المعادلة **PM** . ويبين (جدول **4**) إن معادلات **HS** و **M** و **BC** قد أنتجت أعلى معدلاً سنوياً بلغ **6.16, 6.21, 6.22** ملم يوم$^{-1}$ ،يتبعها المعادلتين **K** و**H** التي اعطت معدلتين سنوتين متطابقين تقريبا بلغتا **5.70** و **5.71** ملم يوم$^{-1}$ وعلى التوالي، في حين اعطت المعادلة **PT** ادنى معدلاً بلغ **5.54** ملم يوم$^{-1}$ ، رافق التحسن بالمعدلات السنوية بعد المعايرة تحسن مماثل في تقدير المعدلات الشهرية من أثناء زيادة التقارب مع المعدلات الشهرية المحسوبة بالطريقة القياسية ، ففي أثناء شهر الذروة (تموز) لم يتجاوز أقصى مدى اختلاف **0.98** ملم يوم$^{-1}$ بين المعادلتين **PM** و**H** .

جدول 4: قيم التبخر نتح (ملم يوم $^{-1}$) المحسوبة وفق المعادلات المختلفة في محافظة ذي قار

الشهر	المعادلة						
	BC	HS	K	M	PT	H	PM
كانون الثاني	2.24	2.29	1.52	2.40	1.68	2.12	2.05
شباط	2.81	3.13	2.38	3.39	2.70	3.05	2.75
آذار	4.14	4.53	3.60	4.59	4.03	4.29	4.56
نيسان	6.25	6.28	5.36	7.03	5.56	5.72	6.17
أيار	8.32	7.94	7.46	8.66	7.16	7.48	8.02
حزيران	9.92	9.64	8.87	9.27	9.73	8.92	9.89
تموز	10.36	10.35	10.25	9.76	10.14	9.55	10.53
آب	10.00	10.11	9.77	9.13	9.02	8.93	10.08
أيلول	8.26	8.55	8.26	7.82	7.03	7.44	8.31
تشرين الأول	5.88	6.04	6.00	6.02	5.02	5.42	5.94
تشرين الثاني	3.56	3.56	3.22	4.00	2.92	3.37	3.61
كانون الأول	2.16	2.22	1.82	2.40	1.52	2.14	2.16
المعدل السنوي	6.16	6.22	5.71	6.21	5.54	5.70	6.17
المجموع ملم سنة$^{-1}$	2257	2280	2093	2274	2031	2090	2263

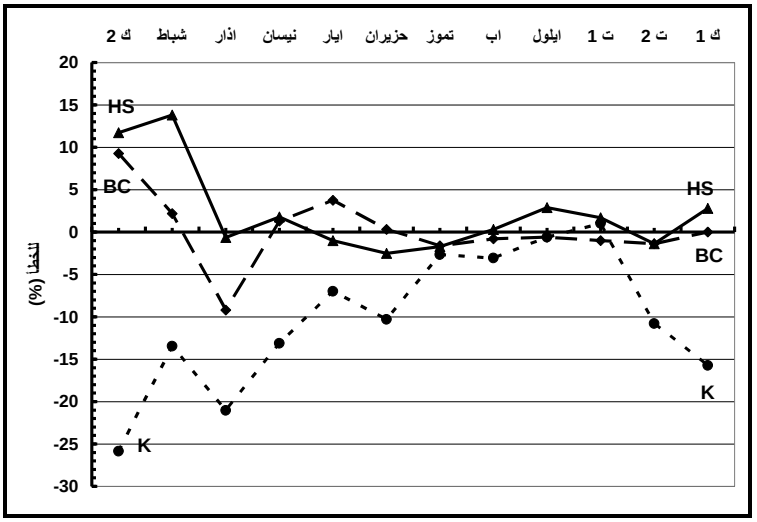
ويظهر (شكل 5) تقارب كبير في تقديرات قيم ET_o التجميعية السنوية بواسطة المعادلات المعدلة، إذ تطابقت تقديرات المعادلات M و HS و BC مع المعادلة القياسية بنسبة 100% تقريباً، في حين تطابقت تقديرات معادلات H و PT و K بالنسب 93 و 92 و 90 % وعلى التوالي .



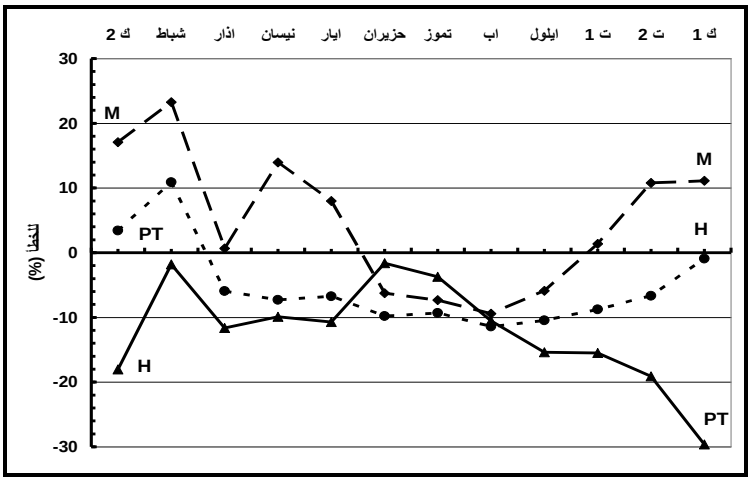
شكل5: قيم التبخر – نتح المرجعي التراكمية للعام 2012 المحسوبة وفق المعادلات التجريبية بعد معايرتها

عند مقارنة نتائج الشكلين (6 و7) مع الشكلين (2 و3) بدلالة النسبة المئوية للخطأ يتضح حصول تحسن ملحوظ في المعادلات التجريبية جميعها بعد إعادة معايرة ثوابتها الأصلية، إذ أصبح لمعادلات التجريبية جميعها القدرة على أعطاء قيم أكثر تقاربا مع قيم معادلة PM مع أقصى مجال خطا في معادلتي PT وK بلغ –12.30

و−10.22 % وعلى التوالي ، وتم الحصول على أفضل النتائج بواسطة معادلة BC مع مجال خطأ لا يتجاوز 0.18. % ، تليها المعادلات HS وM و H التي اعطت مجالاً خطأ بلغوا 2.31 و4.77 و− 5.25 % وعلى التوالي .



شكل6: النسبة المئوية للخطأ في قيم المعدلات الشهرية لـ ET_o المقدرة بالمعادلات التجريبية HS و BC و K على أساس درجات الحرارة بعد معايرتها بالمقارنة مع المعادلة PM .



شكل7: النسبة المئوية للخطأ في قيم المعدلات الشهرية لـ ET_o المقدرة بالمعادلات التجريبية H و M و PT على أساس و على أساس الإشعاع بعد معايرتها بالمقارنة مع المعادلة PM .

تشير طرائق تقويم كفاءة المعادلات التجريبية بين الصيغ الأصلية والمعدلة وفق بعض المعايير الإحصائية الجدولين (5 و6) مقابل نتائج الجدولين 2 و3 بوضوح إلى زيادة كفاءة المعادلات التجريبية جميعها بعد معايرتها كما تظهر في الشكلين 6 و7 ، إذ تبين المفاهيم الإحصائية كل من RMSE وMAE وCRM الى تحسن أداء المعادلات الستة المعدلة وازدادت الثقة بتقديراتها بالمقارنة مع صيغتها الأصلية وذلك من خلال خفض قيمة تلك المؤشرات، وقد حققت المعادلة BC أفضل المستويات بتسجيلها قيم بلغت 0.174 و 0.126 و−0.003 للمؤشرات الثلاث وعلى التوالي ، وحققت الصيغة المعدلة من المعادلة M أعلى تحسناً بالمقارنة مع صيغتها الأصلية، وذلك بخفضها قيمة المؤشرات بمقدار 2.735 و 2.290 و −0.822 وعلى التوالي ، وتراوحت حدود الانخفاض في كل من قيمة RMSE وCRM من 1.207 إلى 2.205 ومن 0.231 إلى 0.594 للمعادلتين HS وPT وعلى التوالي ، بينما تراوحت حدود الانخفاض في قيمة MAE بين0.692 إلى 1.384 للمعادلتين PT وK وعلى التوالي، تميزت المعادلات التجريبية المعدلة بارتفاع قيم دليل التوافق التي تراوحت بين 0.987 للمعادلة

PT إلى 0.999 للمعادلتين BC وHS ، انعكس ذلك على ارتفاع قيم دليل الثقة التي تراوحت بين 0.978 للمعادلة M إلى 0.998 للمعادلتين BC وHS، وحصلت المعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة بعد معايرتها على زيادة طفيفة في القيمتين D وC تراوحت بين 0.007 إلى 0.092 وبين 0.006 إلى 0.092 للمؤشرين وعلى التوالي ، في حين ازدادت قيمة هذين المؤشرين بشكل واضح في المعادلات التجريبية على أساس الإشعاع بعد معايرتها، وقد تراوحت الزيادة بين 0.110 إلى 0.245 للمؤشر D وبين 0.115 إلى 0.243 للمؤشر C .

جدول 5: المؤشرات الإحصائية للمعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة بصيغتها المعدلة بالمقارنة مع معادلة FAO Penman-Monteith في محافظة ذي قار

المؤشر الإحصائي	المعادلة		
	BC	HS	K
RMSE	0.174	0.180	0.564
MAE	0.126	0.145	0.476
CRM	0.003−	0.007	0.082−
D	0.999	0.999	0.992
R^2	0.997	0.998	0.989
r	0.998	0.999	0.995
C	0.998	0.998	0.986
SLOPE	0.9934	0.9671	1.000
INTERCEPT	0.0249	0.2487	0.466−
معدل التقدير	0.997	1.007	0.924

جدول 6: المؤشرات الإحصائية للمعادلات التجريبية على أساس الإشعاع بصيغتها المعدلة بالمقارنة مع معادلة FAO Penman-Monteith في محافظة ذي قار

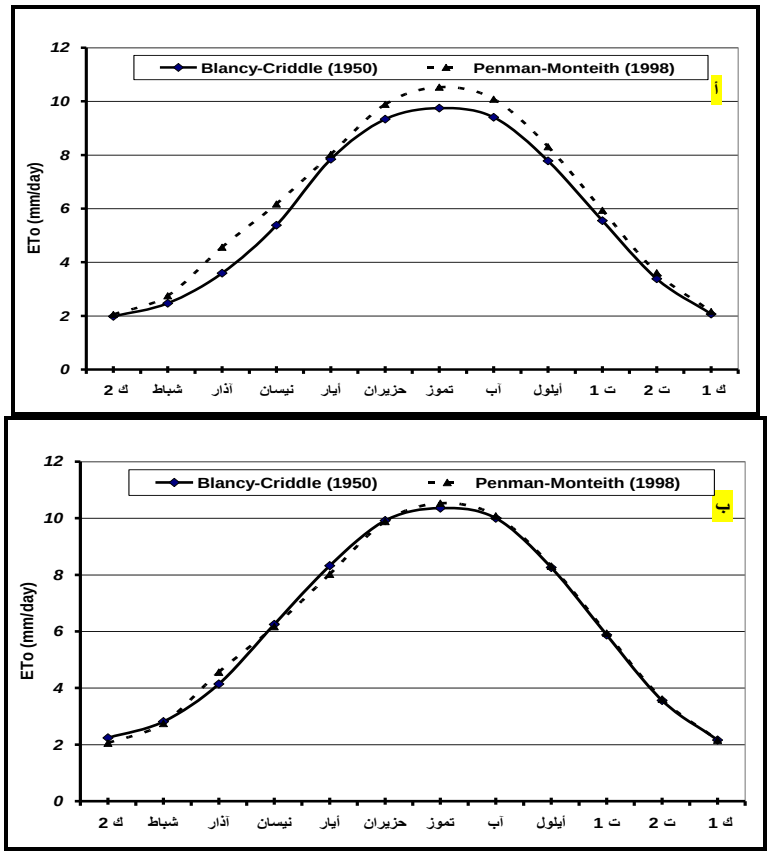
المؤشر الإحصائي	المعادلة		
	M	PT	H
RMSE	0.579	0.721	0.644
MAE	0.505	0.261	0.533
CRM	0.005	0.114−	0.077−
D	0.990	0.987	0.988
R^2	0.977	0.987	0.998
r	0.988	0.994	0.999
C	0.978	0.980	0.987
SLOPE	0.8642	0.9661	0.8615
INTERCEPT	0.8692	0.4219−	0.3834
معدل التقدير	1.005	0.932	0.924

أوضحت دراسة تحليل الانحدار إن تطبيق الصيغ التجريبية المستنبطة لأقاليم مناخية أخرى يتطلب إعادة معايرة الثوابت الأصلية، إذ أعطيت التعديلات التي أجريت على هذه المعادلات نتائج أفضل تمثلت بارتفاع قيم R^2 للمعادلات الستة بعد معايرتها ، فقد حققت المعادلة PT زيادة مقدارها 0.05 تليها المعادلة H بزيادة مقدارها 0.01 وازدادت المعادلات K وHS وBC وM بمقدار0.007 و0.007 و0.004 و0.004 ، وعلى التوالي. كما بينت قيم الميل لمعادلة الارتداد إن هنالك تغييرات ايجابية محسوسة المعادلات التجريبية جميعها ، إذ تطابق ميل المعادلة K بشكل تام مع قيمته المثالية (الانحدار=1) تليها المعادلات BC وHS وPT وM وH بمقدار0.9934 و0.9671 و0.9661 و0.8642 و0.8615 وعلى التوالي. وحققت معادلات M وPT أفضل تحسن وذلك باقترابها من قيمتها المثالية بمقدار0.4481 و0.4121 . كذلك تحسنت قيمة التقاطع لمعاملة الارتداد بشكل جيد

في أربعة من المعادلات الست، إذ انخفضت قيمة التقاطع لمعادلات BC وHS وH وK بعد معايرتها بالنسب 82 و 44 و21 و 19 % وعلى التوالي، في حين كان لعملية المعايرة تأثيرات سلبية على قيمة التقاطع لمعادلتي M وPT التي ازدادت من 0.8105 إلى 0.8692 لمعادلة M ومن 0.1951 إلى 0.4219 لمعادلة PT وبالتالي قد تشكل قيم التقاطع العالية التي صاحبت عملية المعايرة إحدى محددات استعمال الثوابت الجديدة لهاتين المعادلتين.

كشفت النتائج إن العلاقات الخطية القوية التي تميزت بها المعادلات BC وHS وK وH مع قيم الثوابت الجديدة تعد دليلاً على قدرة تلك المعادلات على حساب قيم ET_o الشهرية والسنوية بشكل أكثر تناسقا مع القيم المناظرة المحسوبة بالمعادلة القياسية ، ثم يمكن استعمالها بدرجة عالية من الكفاءة في تخمين قيم ET_o في محافظة ذي قار، في حين ما زالت قيم التقاطع العالية عاملاً محدداً لاستعمال المعادلتين M وPT للغرض نفسه.

البيانات الممثلة في شكل 8 تمثل نمط العلاقة العامة بين قيم ET_o المحسوبة وفق المعادلة القياسية من جهة والمقدرة بالمعادلات التجريبية من جهة أخرى ويبين الشكل وجود ارتباط ايجابي قوي بين الطريقتين، ف التغيرات جميعها في قيم ET_o المحسوبة وفق المعادلة القياسية رافقتها تغيرات مماثلة في تقديرات المعادلات التجريبية، إلا إن قيم المعادلات التجريبية بصيغتها الأصلية أخذت دائما مسار أسفل القيم المحسوبة وفق المعادلة القياسية، في حين تقارب مسار الطريقتين بدرجة كبيرة وصلت إلى التطابق التام أحيانا عند استعمال الثوابت الجديدة. إذ ازدادت قيم معامل الارتباط للمعادلات التجريبية جميعها بعد المعايرة لتصل إلى قيم عالية جدا تتراوح بين 0.988 إلى 0.999 مقابل من 0.968 إلى 0.996 قبل المعايرة .



شكل 8: قيم التبخر – نتح المرجعي المقدرة بالمعادلة BC بالصيغة الأصلية (أ) والصيغة المعدلة (ب) بالمقارنة مع المعادلة القياسية

كما يظهر الجدولان 5 و6 إن الاختلافات بين معدلات القيم المقدرة بواسطة كل من المعادلات التجريبية والمعادلة القياسية والمعبر عنها بمعدل التقدير انخفضت بدرجة كبيرة بعد استعمال الثوابت الجديدة ووصلت إلى حدها

الأدنى في معادلة BC بقيمة 0.997 ملم يوم$^{-1}$ في حين حدها الأقصى لم يتجاوز0.924 ملم يوم$^{-1}$ لمعادلتين K و H ، وهذا يشير إلى إن لعملية المعايرة تأثيراً كبيراً في زيادة دقة تقدير قيم ET_o ، إذ تم اختزال الاختلافات في قيم ET_o عند استعمال الثوابت الجديدة للمعادلات M و K وPT وH وHS وBC بواقع 46 و 24 و22 و 19 و 14 و 7 % وعلى التوالي بالمقارنة مع استعمال المعادلات التجريبية مع ثوابتها الأصلية .

يوضح جدول 7 إن هنالك تقارب عددي في قيم ETo المحسوبة بالمعادلات التجريبية بعد المعايرة مع القيم المحسوبة في المعادلة PM ، إذ اقتربت في بعض الأحيان من القيمة المثالية (1:1) فقد أصبحت الاختلافات في كل من المعدل اليومي بمقدار يتراوح من 0.63 + إلى−0.05 وأقصى قيمة من 0.98 إلى 0.17 وأدنى قيمة من −0.07 إلى 0.53 عن نظيرتها المقدرة بواسطة المعادلة PM مقابل من 0.46 إلى 2.79، ومن 0.78 إلى 4.48، ومن 0.07 إلى 1.00 قبل المعايرة وعلى الترتيب نفسه.

جدول 7: بعض المؤشرات الإحصائية للمعادلات التجريبية قبل المعايرة وبعدها

بعد المعايرة				قبل المعايرة				المعادلة
Mean	Max.	Min.	Range	Mean	Max.	Min.	Range	
5.70	9.55	2.12	7.43	4.45	7.25	1.73	5.52	H
5.54	10.14	1.52	8.62	3.62	6.05	1.16	4.89	PT
6.21	9.76	2.40	7.36	3.38	5.13	1.52	3.61	M
5.71	10.25	1.52	8.73	4.32	7.92	1.05	6.87	K
6.22	10.35	2.22	8.13	5.04	8.12	1.91	6.21	HS
6.16	10.36	2.16	8.20	5.71	9.75	1.98	7.77	PC
6.17	10.53	2.05	8.48	6.17	10.53	2.05	8.48	PM

جدول 8: تحليل الانحدار لمعادلة H عند قيم ثوابت مختلفة

Intercept	Slope	R^2	قيمة الثابت	نوع الثابت
0.4841	0.6421	0.9881	0.0135	الأصلي
0.3834	0.8615	0.9976	0.0178 - 0.0165	بعد المعايرة
0.5917	0.7848	0.9881	0.0165	القيمة الأدنى
0.6383	0.8466	0.9881	0.0178	القيمة الأعلى
0.6150	0.8157	0.9881	0.01715	متوسط القيمة

أجريت عملية المعايرة بواسطة زيادة قيم الثوابت الأصلية ، بسبب إن معظم هذه الثوابت قد اشتقت من دراسات نفذت في المناطق الرطبة وعند خطوط العرض العليا (12) .

تعود أسباب اعتماد ثابتين عند أعادة معايرة المعادلات التجريبية إلى إن نتائج تحاليل الانحدار بينت إن استعمال الثابت نفسه للأشهر جميعها لم يؤدي إلى تحسين معامل الارتداد وفي الوقت نفسه أدى إلى زيادة قيمة التقاطع وابتعاد الانحدار عن قيمته المثالية في جميع المعادلات،على سبيل المثال معادلة H جدول 8 .

يبين الجدولان 9 و10 إن التغييرات في قيمة الثوابت الأصلية للمعادلات M وPT وH وHS كانت قليلة خلال الأشهر الممتدة من كانون أول ولغاية أيار، بينما ارتفعت إلى أعلى قيمة لها خلال الأشهر الحارة بينما أخذت المعادلتان K وBC اتجاها مغايراً ، إذ ارتفعت قيم الثوابت في الأشهر الباردة أو المعتدلة في حين انخفض في الأشهر الحارة .

وقد تباينت قيم الثوابت المقترحة بالمقارنة مع نتائج دراسات أخرى، وأدى الموق عملاً رئيسياً في مدى التقارب أو التباعد مع تلك القيم ، إذ بينت دراسة **Tabari and Talaee (20)** إن قيمة معامل **HS** يمكن أن تتغير بين **0.0017**إلى **0.0042** بسبب تأثير سرعة الرياح والفرق بين درجات الحرارة ، واقترح **Alblewi** (**1**) قيمة **0.963** لمعامل المعادلة **M** و **1.99** لمعامل المعادلة **PT** و **0.0029** لمعامل المعادلة **HS** لغرض تطبيقها في السعودية ، وأكدت دراسة **Jensen** وجماعته (**11**) على وجوب معايرة معادلة **PT**، وان القيمة الأكثر ملائمة للمعامل الثابت تتراوح بين **1.70–1.75** في المناطق الجافة وشبه الجافة بدلاً من الثابت الأصلي.

جدول 9: قيم الثوابت للمعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة

الشهر	المعادلة					
	BC		HS		K	
	قيمة الثابت		قيمة الثابت		قيمة الثابت	
	الأصلي	بعد المعايرة	الأصلي	بعد المعايرة	الأصلي	بعد المعايرة
كانون ثاني	0.0311	0.03782	0.0023	0.00268	0.34	0.49
شباط	0.0311	0.03782	0.0023	0.00268	0.34	0.49
آذار	0.0311	0.03782	0.0023	0.00268	0.34	0.49
نيسان	0.0311	0.03782	0.0023	0.00268	0.34	0.49
أيار	0.0311	0.03348	0.0023	0.00268	0.34	0.44
حزيران	0.0311	0.03348	0.0023	0.00293	0.34	0.44
تموز	0.0311	0.03348	0.0023	0.00293	0.34	0.44
آب	0.0311	0.03348	0.0023	0.00293	0.34	0.44
أيلول	0.0311	0.03348	0.0023	0.00293	0.34	0.44
تشرين أول	0.0311	0.03348	0.0023	0.00293	0.34	0.44
تشرين ثاني	0.0311	0.03348	0.0023	0.00293	0.34	0.44
كانون الأول	0.0311	0.03348	0.0023	0.00268	0.34	0.49

جدول 10: قيم الثوابت للمعادلات التجريبية على أساس درجات الحرارة

الشهر	المعادلة					
	M		PT		H	
	قيمة الثابت		قيمة الثابت		قيمة الثابت	
	الأصلي	بعد المعايرة	الأصلي	بعد المعايرة	الأصلي	بعد المعايرة
كانون ثاني	0.61	0.96	1.26	1.66	0.0135	0.0165
شباط	0.61	0.96	1.26	1.66	0.0135	0.0165
آذار	0.61	0.96	1.26	1.66	0.0135	0.0165
نيسان	0.61	1.16	1.26	1.66	0.0135	0.0165
أيار	0.61	1.16	1.26	1.66	0.0135	0.0165
حزيران	0.61	1.16	1.26	2.11	0.0135	0.0178
تموز	0.61	1.16	1.26	2.11	0.0135	0.0178
آب	0.61	1.16	1.26	2.11	0.0135	0.0178
أيلول	0.61	1.16	1.26	2.11	0.0135	0.0178
تشرين أول	0.61	1.16	1.26	2.11	0.0135	0.0178
تشرين ثاني	0.61	1.16	1.26	2.11	0.0135	0.0178
كانون الأول	0.61	0.96	1.26	1.66	0.0135	0.0165

الاستنتاجات والتوصيات

أعطت المعادلات التجريبية بصيغتها الأصلية تقديرات لETo اقل بكثير من المعادلة PM مع وجود أفضلية للمعادلة BC التي تقاربت بشكل مقبول مع تقديرات المعادلة PM، لذا فان استعمال الصيغ الأصلية لتلك المعادلات في محافظة ذي قار قد يؤثر في الإنتاج الزراعي نتيجة تعرض المزروعات إلى الإجهاد المائي .

تحسن أداء المعادلات التجريبية جميعها وقدرت بشكل جيد قيم ETo الشهرية والسنوية بعد أبدال الثوابت الأصلية لتلك المعادلات بثوابت جديدة ، كما أثبتت المعايير الإحصائية المستعملة كأداة لاختيار الانموذج الرياضي الأكثر ملائمة إمكان اعتماد المعادلات جميعها بصيغتها المعدلة في حساب قيم التبخر –نتح المرجعي في محافظة ذي قار والمناطق القريبة منها، خصوصاً المعادلات BC و HS وK وPT التي تميزت بدقتها وقدرت بشكل جيد قيم ETo الشهرية والسنوية .

يوصى بتنفيذ برامج بحثية تهدف إلى استنباط المعادلة التجريبية لتقدير ETo تأخذ بنظر الاعتبار السمات المناخية المميزة للمنطقة وخصائص التربة .

المصادر

1- Alblewi, B. (2012) Assessment of Evapotranspiration Models under Hyper Arid Environments, In partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science in Engineering. Guelph, Ontario, Canada.

2- Allen R.; L.S. Pereira; D. Raes and M. Smith (1998). Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56, Rome, Italy, 300 pp.

3- Blaney, H.F. and W.D. Criddle (1950). "Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data". Soil Conservation Service Technical Paper no. 96., US Department of Agriculture, Washington DC, USA.

4- Chen Jin-Fa Chen; Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee and Wei- Cheng Lo (2005). Optimal comparison of empirical equations for estimating potential Evapotranspiration in Taiwan. XXXI IAHR Congress , September 11~16, 2005, Seoul, Korea, 3687-3697.

5- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt (1977). Crop Water Requirements, FAO, Irrigation and Drainage, Paper 24, 144 pp.

6- Grismer, M.E.; M. Orang; R. Snyder and R. Matyac, (2002). Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods. J. Irrigation and Drainage Engineering 128(3):180-184.

7- Hargreaves, G.H. (1975), 'Moisture availability and crop production', TRANS ASAE. 18, 980–984

8- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani (1985). Reference crop Evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1, 96-99.

9- Hossein, D.; T. Yamamoto and V. Rasiah (2004). Assessment of Evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. Agriculture Water Management, 64: 91-106.

10- **Hugo, G. Hidalgo; Daniel R. Cayan and Michael D. Dettinger (2005). Sources of Variability of Evapotranspiration in California. J. Hydrometeorology 6:3–19.**
11- **Jensen, M.E.; R.D. Burman and R.G. Allen (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements, American Society of Civil Engineers, New York.**
12- **Kellner, E. (2001). 'Surface Energy Fluxes and Control of Evapotranspiration from a Swedish Sphagnum Mire', Agricult. Forest Meteorol. 110 101–123.**
13- **Kharrufa, N.S. (1985). 'Simplified Equation for Evapotranspiration in Arid Regions, Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft 5.1, 39–47.**
14- **Krause, P.; D.P. Boyle and F. Base (2005). Comparison of different efficiency for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5, 89-97.**
15- **Loague, K. and R.E. Green (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application. J. Contam. Hydrol, 7:51 73.**
16- **Makkink, G.F. (1957). Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters. J. Institute Water Eng., 11: 277-288.**
17- **Prentice, K.C. (1990) Bioclimatic distribution of vegetation for general circulation model studies. J. Geophys. Res., 95D, 11 811–11 830.**
18- **Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor (1972). 'On the Assessment of the Surface heat Flux and Evaporation using Large-scale Parameters', Monthly Weather Review 100, 81–92.**
19- **Singh, V.P. and C.Y. Xu (1997). 'Evaluation and Generalization of 13 Equations for Determining Free Water Evaporation', Hydrol. Processes 11, 311–323.**
20- **Tabari, H. and P.H. Talaee (2011). Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference Evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. Journal of Hydrologic Engineering, 16(10), 837-845.**
21- **Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38, 55–89.**
22- **Willmott, C.J.; G.S. Akleson Davis; R.E., Feddema; J.J. Klink; K.M. Legates; D.R. Odonnell; J. and C.M. Rowe (1985). Statistic for the evaluation and comparison of models. J. Geophys. Res. 90, 8995–9005.**
23- **Willmott, C.J. (1982). Some comment on the evaluation of model performance. Bull tin of American Meteorological Society 63(11): pp.1309-1313.**
24- **Xu, C.Y. and V.P. Singh (2002). Cross comparison of empirical equations for calculating potential Evapotranspiration with data from Switzerland. Water Resources Management 16.219–197.**
25- **Xu, J.Z.; S.Z. Peng; S.H. Yang; Y.F. Luo and Y.J. Wang (2012). Predicting Daily Reference Evapotranspiration in a Humid Region of China by the Locally Calibrated Hargreaves-Samani Equation Using Weather Forecast Data. J. Agr. Sci. Tech. (2012)14: 1331-1342.**

COMPARISON OF SOME EMPIRICAL EQUATIONS FOR ESTIMATING THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION USING METEOROLOGICAL DATA IN THI-QAR PROVINCE

T.S. H. Al-Askri D.R. Naduwi M.A. Abdulah

ABSTRACT

In this study, six empirical equations were selected to estimated the reference evapotranspiration, that belonged to three categories, three temperature-based methods and three radiation-based methods under Thi-Qar Province conditions using meteorological data for 2012 of Nasiriya meteorological station and FAO Penman-Montaith (1998) which was used as reference equation. The evaluation and comparison were made based on both the original constant values involved in each equation and the recalibrated constant values.

The results showed that all equations had gave underestimations of ETo, A comparative study also shows that modifications were made by substituting recalibrated constant values for the original constant values had improved efficiency of the six equations to simulate the values of ETo were more accuracy than original equations.

The statistical criteria; root mean square Error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the coefficient of residual mass (CRM) revealed that the confidence became high in modified equations due to reducing the values of these criterions. The study of regression analysis illustrated it is necessary to make changes to the original equations when they were extrapolated to other climatic areas. The modifications achieved positive change concerning the R^2 and *r* values for the six equations, moreover the slope of the regression equations improved in the six cases. the equation modifications obtained higher values of the index of concordance (D) ranged from 0.987 for PT equation and 0.999 for BC & HS equations, For this reason, it also obtained high values of the confidence index (C) which ranged between 0.978 for M equation to 0.998 for BC & HS equations The BC equation without adjustment indicates that the best model to estimate ETo of other equations, the formulae modification of The BC equation become more able to estimate the values of the mean monthly evapotranspiration are very close to those estimated by PM.

*Agric. College – Basrah Univ. - Basrah, Iraq

**Directorate Thi-qare of Agric.- Ministry of Agric. Thi-qare-Iraq.