

دراسة تغير المعدلات الفصلية والسنوية لكميات التبخر نتح الكامن Potential evapotranspiration في بعض المناطق الداخلية في سوريا خلال الفترة 1975-2005

د. ميشيل سكاف*

م. حنان عبود**

(تاريخ الإيداع 2021/ 5/ 25 . قبل للنشر في 2021/ 9/ 15)

□ ملخص □

يعد التبخر نتح مكوناً أساسياً في الدورة الهيدرولوجية ويلعب دوراً بالغ الأهمية في ميزان الطاقة لسطح الأرض وله أهمية كبيرة بالنسبة للإنتاج الزراعي والبيئة. تم استخدام علاقة بنمان مونتيه (Penman –FAO 56) لحساب القيم الفصلية والسنوية لكميات التبخر نتح الكامن، اعتماداً على القيم الشهرية لدرجات الحرارة العظمى والصغرى والرطوبة النسبية للهواء وسرعة الرياح ومدة السطوح الشمسي في ثلاث محطات (القامشلي -دير الزور- تدمر) في سوريا خلال الأعوام 1975-2005.

استخدمت خطوط الاتجاه واختبار مان كندال Mann- Kendall test إضافة إلى تحليل نقطة التغير من أجل تقدير اتجاه وقيمة التغير والتحقق من معنويته وفترة حدوثه في قيم التبخر نتح الكامن على المستوى الفصلي والسنوي.

أظهرت النتائج وجود اتجاه واضح نحو تناقص قيم ETp في المناطق الثلاث، حيث تراجعت القيم السنوية ب مقدار 19,5% و 16,7% و 21,8% في القامشلي ودير الزور وتدمر على التوالي، وذلك بسبب الاتجاه الواضح نحو التناقص في قيم ETp خلال جميع الفصول وخصوصاً الصيف والخريف.
الكلمات المفتاحية: تغير المناخ - التبخر نتح الكامن - بنمان فاو 56- سوريا

* دكتور _ قسم الحراج والبيئة _ كلية الزراعة _ جامعة تشرين _ اللاذقية _ سورية .

** مهندسة _ قسم العلوم الأساسية _ كلية الزراعة _ جامعة تشرين _ اللاذقية _ سورية .

Study of changes in mean seasonal and annual amounts of potential evapotranspiration in some interior Syrian regions during the period 1975-2005

Dr. Michael Skaf *
Eng.Hanan Abdo **

(Received 25 / 5/ 2021 . Accepted 15 / 9 / 2021)

□ ABSTRACT □

Evapotranspiration is a major component of the water cycle and play a key role in surface energy balance and has significant agricultural and ecological implications. Penman- Monteith equation (Penman-FAO56) was applied using monthly meteorological data for maximum and minimum temperatures, relative humidity, wind speed, and sunlight duration to evaluate potential evapotranspiration (ETp) at seasonal and annual timescales for three stations (Alqamishli – Deir ezzor- Palmyra) located in interior Syrian regions during the period 1975-2005.

Trends with Mann – Kendall test and point change analysis were used to detect significant changes in ETp values at annual and seasonal time scales and to determine year of change.

Results showed significant negative trends in annual ETp values in the three regions. ETp amount was decreased by 19.5 %, 16.7 % and 21.8 % in Alqamishli, Deir ezzor and Palmyra respectively related to significant decreasing tendency in seasonal time series of ETp in all stations especially in summer and fall.

Keywords: climate change - ETp - Penman FAO56 - Syria

* PHD in meteorology, climatology and agrometeorology- forestry & Ecology department - Agriculture Faculty- Tishreen University- Lattakia, Syria.

** Engineer- Basic Sciences Department- Agriculture Faculty- Tishreen University- Lattakia, Syria.

مقدمة

يعد التبخر نتح (ET) Evapotranspiration أحد أهم مكونات النظام المناخي، فهو يربط بين ميزان الطاقة لسطح الأرض والميزان المائي [1] كما يؤثر في عمليات التبادل البيو كيميائي بين الوسط الحيوي والغلاف الجوي [2-4] وبما أن بخار الماء يعد غاز الدفيئة الرئيسي في الغلاف الجوي [5] فإن التبخر نتح يلعب دوراً بالغ الأهمية في تنظيم ميزان الطاقة لسطح الأرض، وبالتالي في تحديد درجات الحرارة لهذا السطح. من جهة أخرى يعيد التبخر نتح أكثر من 60% من كميات الهطل السنوية مرة أخرى إلى الغلاف الجوي، الأمر الذي يؤمن استمرار دورة الماء في الطبيعة [6,7]، وبالتالي توفر المياه في مختلف أرجاء اليابسة [8-11].

يعد التقدير الدقيق لكميات التبخر نتح الكامن (ETp) Potential Evapotranspiration، والتي تعبر عن القدرة التبخرية للغلاف الجوي، في غاية الأهمية بالنسبة لمجال واسع من التطبيقات العلمية والعملية، أهمها الدراسات المناخية [2,12,13]، وضبط عمليات الري [14-21]، ومراقبة الحوادث المناخية المتطرفة [22,23] إضافة إلى تقديم المعلومات الضرورية لإدارة الموارد المائية بالشكل الذي يؤمن الاحتياجات المتنامية لمختلف القطاعات المتنافسة على المياه [24-26].

يتوقع أن يصبح توفر الماء عاملاً محدداً للغاية بالنسبة للتطور الاقتصادي [27,28]. فمع تزايد أعداد السكان وتزايد الطلب على المياه فإن هذا المورد سيصبح أكثر ندرة. كذلك فإن تغير المناخ يمكن أن يعزز نقص المياه، إذ يتوقع أن يؤدي التسخين إلى تزايد معدلات التبخر نتح وبالتالي تزايد الجفاف [10,29,30]، وخصوصاً في المناطق التي تعاني أصلاً من ندرة المياه [31-33].

أهمية البحث وأهدافه:

يلاحظ من كل ما تقدم أهمية التقدير الدقيق لكميات التبخر نتح الكامن وتغيراتها المكانية والزمنية بالنسبة لأي منطقة، مما يسمح بالتقدير الدقيق لتوفر المياه في المستقبل، ويساعد على الإدارة المثلى للموارد المائية، وتنظيم عمليات الري، ومواجهة حوادث الجفاف، وإدارة الموارد الطبيعية بما يحقق التنمية المستدامة. لذلك فقد تركزت أهداف البحث في حساب القيم الفصلية والسنوية لكميات التبخر نتح الكامن وتقدير اتجاه وقيمة التغير في معدلاتها خلال الفترة 1975-2005 في ثلاث محطات داخلية في سوريا تمثل مناطق مناخية مختلفة وتتركز فيها مختلف الزراعات البعلية والمروية والمراعي الطبيعية.

مواد البحث وطرائقه:

تم استخدام قيم العناصر الميترولوجية الشهرية لثلاث محطات (القامشلي -دير الزور - تدمر) تمتلك سلسلة رصد مستمرة لمتوسطات درجات الحرارة العظمى والصغرى والرطوبة النسبية للهواء ومدة السطوع الشمسي وسرعة الرياح للفترة 1975-2005 والجدول (1) يبين احداثيات المحطات المختارة.

جدول(1) احداثيات المحطات المختارة في الدراسة (عن بيانات المديرية العامة للأرصاد الجوية السورية)
استخدمت علاقة Penman- Monteith (Penman – FAO56) لحساب قيم ETP الشهرية [14]،
للتقدير الدقيق لكميات التبخر نتح الكامن ETP الفصلية والسنوية لكل عام هيدرولوجي من فترة الدراسة، حسب
المعادلة:

المحطة	خط الطول	خط العرض	الارتفاع عن سطح البحر (م)	التصنيف المناخي
القامشلي	41° 13'	37° 03'	467	شبه جافة
دير الزور	40° 9'	35° 20'	204	شديدة الجفاف
تدمر	38° 18'	34° 33'	404	شديدة الجفاف

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

حيث:

Rn: صافي الإشعاع الشمسي عند سطح المحصول (ميغا جول/م²/يوم)

G: تدفق حرارة التربة (ميغا جول/م²/يوم)

T: متوسط درجة الحرارة اليومية عند ارتفاع 2 م (م)

U2: سرعة الرياح عند ارتفاع 2 م (م/ثا)

es: ضغط بخار الماء المشبع (كيلو باسكال)

ea: ضغط بخار الماء الحقيقي (كيلو باسكال)

(es-ea): فرق الإشباع (كيلو باسكال)

Δ: ميل منحنى ضغط بخار الماء (كيلو باسكال لكل درجة مئوية)

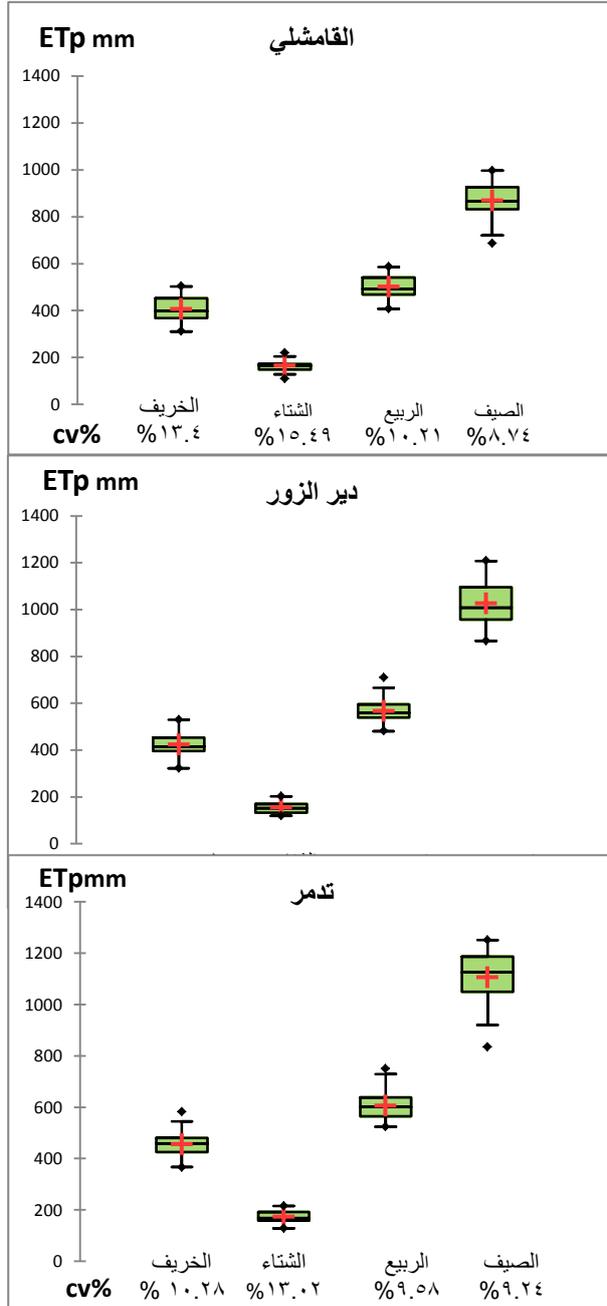
γ: ثابت البسيكرومتر

تم استخدام مخططات الصندوق Box-plots من أجل دراسة أهم الخصائص الإحصائية لكميات ETP الفصلية كما تم حساب معامل الاختلاف Coefficient of variation (CV %) لتقدير التباين بين المواسم بالنسبة لكل عام ولكل فصل.

استخدمت خطوط الاتجاه Trends من أجل تحديد اتجاه وقيمة التغير في كميات التبخر نتح السنوية والفصلية. وتم التحقق من معنوية التغير باستخدام اختبار مان كندال Mann-Kendall test. تم تحديد فترة حدوث التغير Point of change من خلال الدمج بين مفهوم المجموع التراكمي Cumulative sum والمقارنة bootstrapping [34] لتحديد مقدار الانزياح في السلسلة الزمنية لكميات التبخر نتح الكامن السنوية والفصلية مع تحديد فترة حدوثه.

النتائج والمناقشة:

1- الخصائص الإحصائية لكميات التبخر نتح الفصلية والسنوية في مناطق الدراسة:



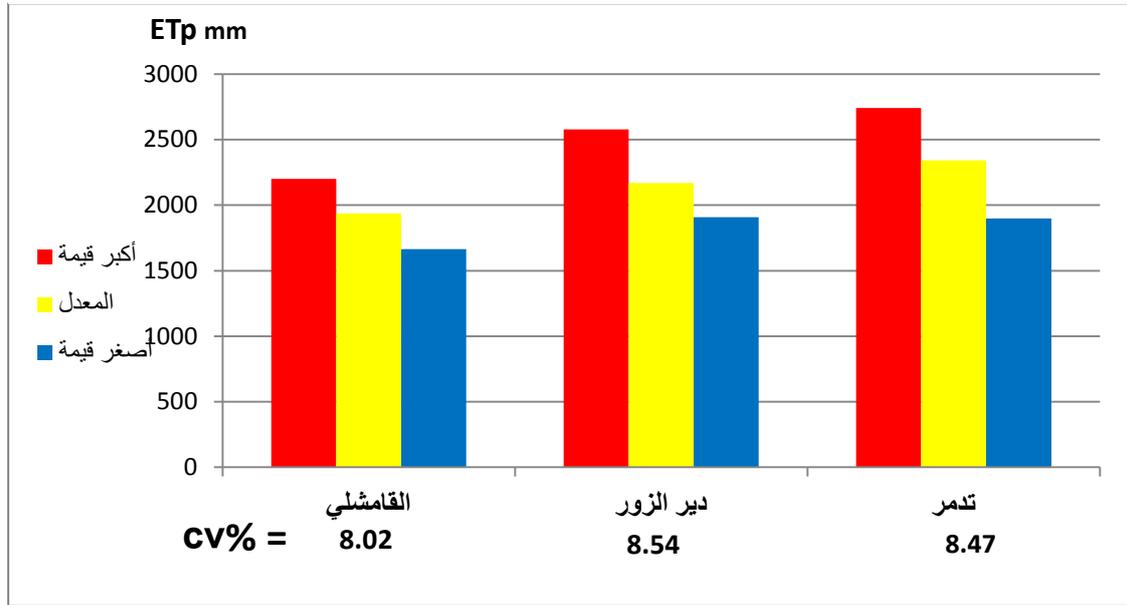
بين الشكل (1) أهم الخصائص الاحصائية لكميات التبخر نتح الكامن الفصلية والمحسوبة لفترة الدراسة 1975-2005م، ومنه يلاحظ وجود مسار حاد وواضح لتوزيع هذه القيم خلال الفصول المختلفة وبشكل معاكس لتوزيع كميات الهطل، حيث أن كميات التبخر نتح المرتفعة للغاية خلال فصل الصيف تتوافق مع الفصل الجاف، وهذا يخلق ظروفاً قاسية للغاية بالنسبة للغطاء النباتي الطبيعي ويحتم توفر عمليات الري من أجل نجاح المحاصيل الصيفية. ويلاحظ أن معدلات التبخر نتح كانت كالتالي فصل الصيف-الربيع-الخريف-الشتاء وهذا الأمر له أهمية كبيرة بالنسبة لمخزون التربة من الماء المتاح إذ أن أكبر كميات هطل والتي تسجل في فصل الشتاء تتوافق مع أدنى معدلات لقيم التبخر نتح الكامن.

بالمقابل نلاحظ أن معامل التباين خلال فصل الشتاء هو الأعلى وذلك بسبب التباين بين المواسم في درجات الحرارة والرطوبة ومدة السطوع الشمسي، بينما تكون قيمة معامل التباين

الشكل (1) أهم الخصائص الاحصائية لكميات التبخر نتح الكامن الفصلية والمحسوبة للفترة 1975-2005 في مناطق الدراسة.

إن ارتفاع قيم ETP خلال الفترة الدافئة من العام وخصوصاً خلال فصل الصيف ينعكس على ارتفاع كبير للغاية لقيم ETP السنوية والتي وصلت كمعدل إلى 2340.8 مم في تدمر و 2167.9 مم في دير الزور و 1937.8 مم في القامشلي مع ملاحظة أن أدنى القيم قاربت 1900 مم في كل من تدمر ودير الزور وتجاوزت 1650 مم في القامشلي أما أعلى القيم فقد تجاوزت 2700 مم في تدمر و 2550 مم في دير الزور و 2200 مم في القامشلي كما هو مبين في الشكل (2). وهنا نلاحظ على الرغم من التفاوت الواضح بين القيم خلال المواسم المختلفة فإن معامل التباين محدود للغاية ويقل عن 10% في المحطات الثلاث، وهذا يعود إلى ارتفاع قيم المعدل في جميع مناطق الدراسة.

الشكل (2) المعدلات السنوية لقيم التبخر نتح الكامن ETP وأهم خصائصها الإحصائية المحسوبة للفترة 1975-2005 في مناطق الدراسة.



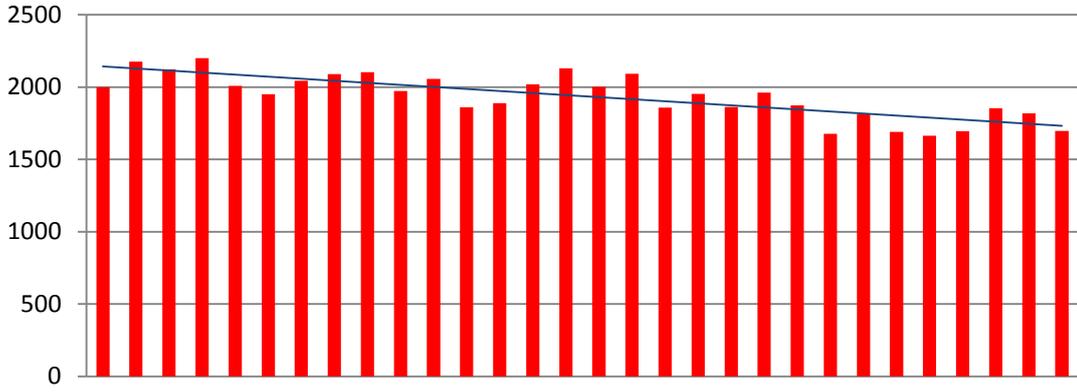
١

2 - تغير المعدلات الفصلية والسنوية لكميات التبخر نتح الكامن في مناطق الدراسة:

بين الشكل (3) تغير القيم السنوية لكميات التبخر نتح الكامن خلال المواسم الممتدة من عام 1975 حتى عام 2005 مع الاتجاه العام للتغير، حيث يلاحظ وجود تناقص حاد ومعنوي في المعدلات السنوية لقيم التبخر نتح الكامن في جميع المحطات (الجدول 2)، وذلك بسبب تراجع قيم ETP خلال جميع الفصول وخصوصاً فصلي الصيف والخريف، وكان التغير معنوياً خلال جميع الفصول ما عدا فصل الربيع في دير الزور على الرغم من حدة التناقص في القيمة. من جهة أخرى نلاحظ أن أكبر مقدار لتغير القيم السنوية كان في تدمر إذ بلغت قيمة التناقص 192.7 مم لكل عقد تلتها القامشلي بقيمة 140.9 مم لكل عقد ومن ثم دير الزور 132.7 مم لكل عقد. وذلك بسبب التناقص الكبير للغاية في فصل الصيف في هذه المنطقة والذي تجاوزت قيمته مجموع التناقص لباقي الفصول.

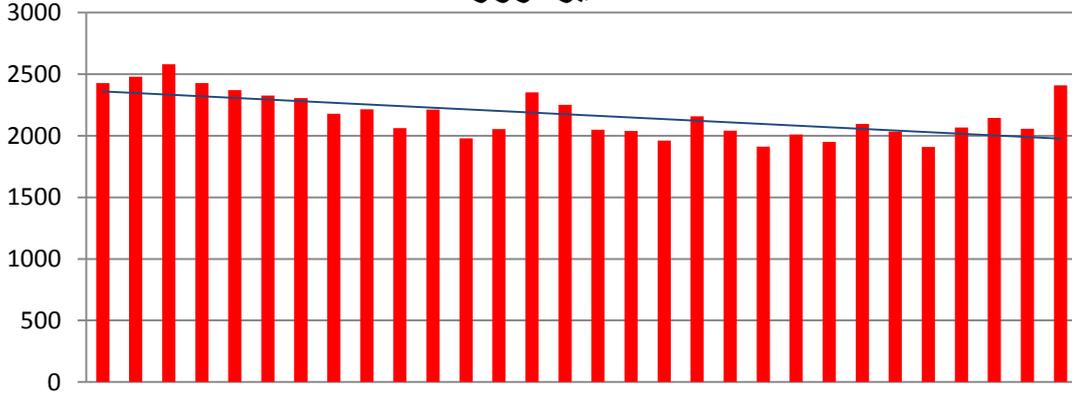
ETp mm

القامشلي



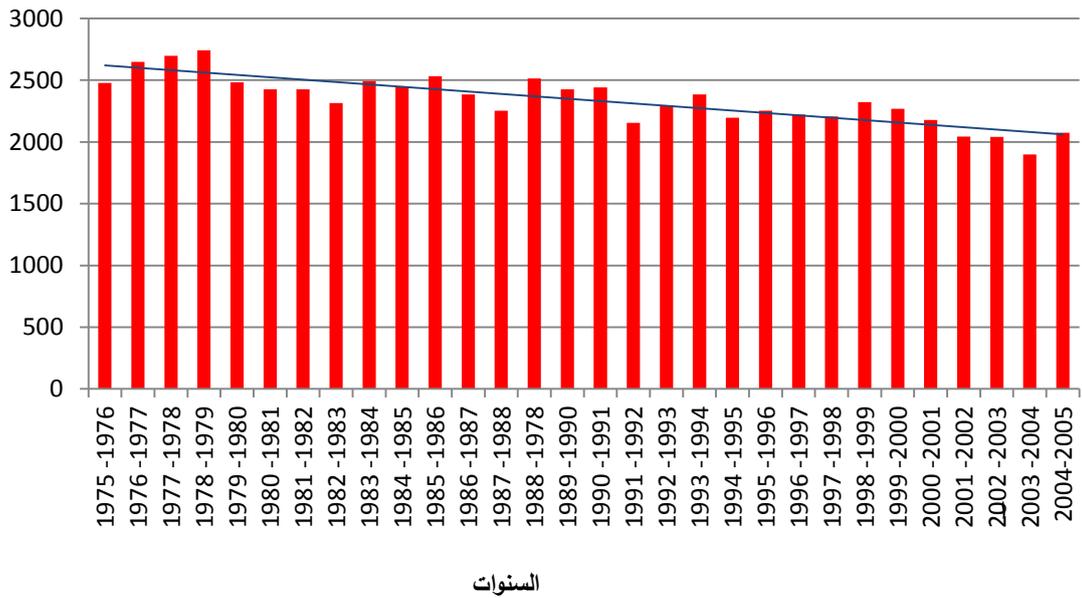
ETp mm

دير الزور



ETp mm

تدمر



السنوات

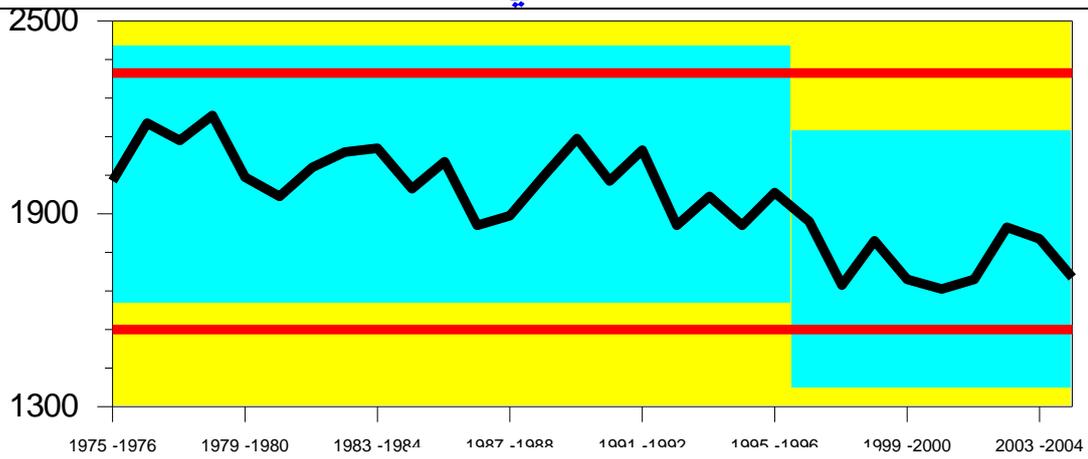
الشكل (3) تغير كميات التبخر نتج الكامن بين المواسم الممتدة من عام 1975 حتى عام 2005 في مناطق الدراسة.

جدول (2) اتجاه وقيمة التغير في المعدلات الفصلية والسنوية لكميات ETp في مناطق الدراسة خلال الفترة 1975-2005.

معنوية التغير	قيمة التغير / مم		الفترة	المحطة
	لكامل فترة الدراسة	لكل عقد		
**	-118.077	-39.359	خريف	القامشلي
**	-44.886	-1.4962	شتاء	
*	-90.375	-30.125	ربيع	
***	-169.65	-56.55	صيف	
***	-422.97	-140.99	العام	
**	-128.046	-42.682	خريف	
**	-43.041	-14.347	شتاء	
لا توجد	-59.781	-19.927	ربيع	
***	-167.319	-55.773	صيف	
***	-398.16	-132.72	العام	
***	-113.553	-37.851	خريف	تدمر
**	-46.188	-15.396	شتاء	
**	-111.12	-37.04	ربيع	
***	-306.06	-102.02	صيف	
***	-578.31	-192.77	العام	

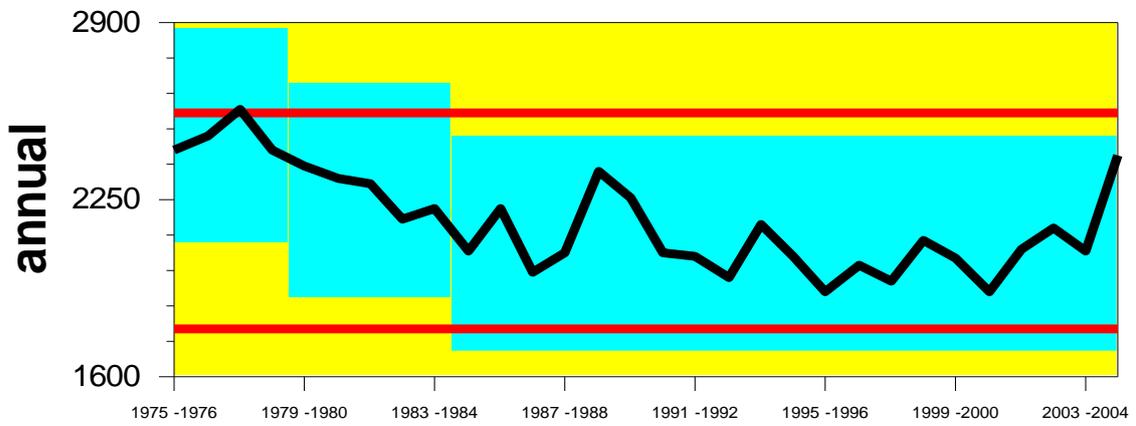
*: التغير المعنوي عند مستوى 0.05 ** عند مستوى 0.01 *** عند مستوى 0.001

يبين الشكل (4) فترات حدوث الانزياح نحو التناقص في القيم السنوية لكميات التبخر نتج الكامن حيث نلاحظ أن الانزياح حدث في القامشلي خلال الموسم 1996-1997 وفي دير الزور خلال الموسم 1982-1983 أما في تدمر فقد حدث الانزياح خلال ثلاث مواسم وجميعها باتجاه التناقص وهي (1979-1980، 1991-1992، 2001-2002).

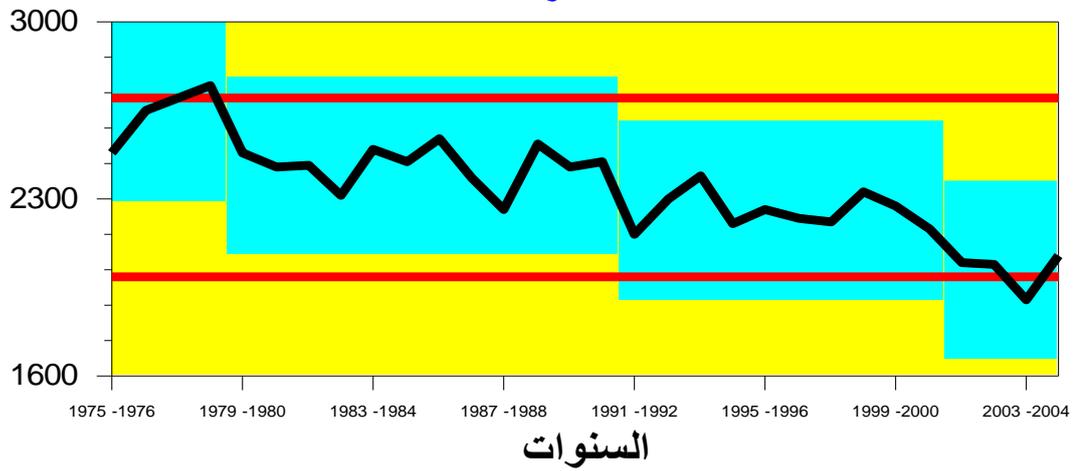


دير الزور

Plot of annual



تدمر



الشكل (4) فترات حدوث الانزياح في المعدلات السنوية لكميات التبخر نتج الكامن في مناطق الدراسة خلال الفترة 2005-1975

جدول (3) فترات حدوث الانزياح ومستوى التغير في المعدلات الفصلية لكميات ETP في مناطق الدراسة خلال الفترة 1975-2005

المحطة	الفترة	نقطة التغير	مجال الثقة	مستوى الثقة	من	إلى	مستوى التغير
	الخريف	1993-1994	(1989-1990,1996-1997)	99%	434.83	361.29	
	الشتاء	1991-1992	(1983-1984,1996-1997)	99%	178.07	148.16	1
القاملشي	الربيع	1995-1996	(1991-1992,1996-1997)	99%	522.63	443.04	3
		2002-2003	(1998-1999,2002-2003)	95%	443.04	484.53	
	الصيف	1992-1993	(1988-1978,1998-1999)	98%	908.25	815.53	
	الخريف	1982-1983	(1982-1983,1983-1984)	100%	492.93	422.31	3
		1991-1992	(1987-1988,2003-2004)	99%	422.31	387.75	
دير الزور	الشتاء	1990-1991	(1986-1987,1992-1993)	100%	169.77	137.5	
	الصيف	1982-1983	(1982-1983,1986-1987)	100%	1142.6	989.57	
	الخريف	1979-1980	(1979-1980,1980-1981)	97%	534.85	460.99	
		1994-1995	(1991-1992,1999-2000)	97%	460.99	418.24	6
تدمر	الشتاء	1990-1991	(1983-1984,1993-1994)	100%	187.27	160.14	4
	الربيع	1991-1992	(1981-1982,1995-1996)	99%	636.06	571.14	2
	الصيف	1979-1980	(1979-1980,1986-1987)	90%	1234	1158.4	4
		1991-1992	(1989-1990,1994-1995)	99%	1158.4	1062.7	6
		2001-2002	(2001-2002,2002-2003)	99%	1062.7	925.33	

تؤكد اتجاهات وقيم التغير المدرجة في الجدول (3) النتائج السابقة الواردة في الجدول (2) بالنسبة لمنحى التغير في كميات التبخر نتح الفصلية والسنوية. وتشير إلى أن هذا الانزياح في القيم السنوية ناتج عن الانزياح الحاد والواضح في قيم التبخر نتح الكامن في المحطات الثلاث خلال جميع الفصول (باستثناء فصل الربيع في دير الزور)، وخصوصاً فصل الصيف. حيث نلاحظ أن الانزياح الحاصل في فصل الصيف في كل من دير الزور وتدمر كان السبب الرئيسي لحدوث الانزياح السنوي خلال نفس الفترة، فقد انزلت قيم ETP السنوية في الموسم 1983-1982 في دير الزور والتي شهدت انزياحاً في قيم ETP فصل الصيف. كذلك انزلت القيم السنوية في تدمر خلال نفس المواسم التي شهدت انزياحاً خلال فصل الصيف في هذه المنطقة. تتفق النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث مع العديد من الدراسات حول تناقص كل من معدلات التبخر من الأحواض والتبخر نتح الكامن في مناطق مناخية مختلفة من العالم. فعلى الرغم من التوقعات بزيادة معدلات التبخر نتح الكامن في ظل التسخين العالمي Global warning [35]، فإن العديد من الدراسات تشير إلى تراجع هذه المعدلات على الرغم من ارتفاع درجات الحرارة [42-3613] وقد أطلق كل من Roderick و Farquhar عام 2002 على هذا التناقص اسم الظاهرة المتناقضة [43]. وبينما أشارت بعض الأبحاث إلى أن تراجع كل من شدة الإشعاع الشمسي و مدة السطوع تعد من أهم العوامل المؤثرة في هذا التناقص [44,45]، فإن بعض الدراسات الأخرى أشارت إلى الدور الواضح لتراجع سرعة الرياح [46]، في حين أكدت أبحاث أخرى على أن لكلا العاملين تأثير واضح في تناقص معدلات التبخر والتبخر نتح الكامن [40,46,47] أما دراسة Gong وأخرون عام 2006 فقد أظهرت الدور الواضح لتزايد رطوبة الهواء في هذا

التراجع [48]. وأخيراً فإن دراسة Fan وأخرون عام 2016 في الصين أشارت إلى أنه على الرغم من ارتفاع درجات الحرارة فإن التناقص في سرعة الرياح ومدة السطوح الشمسي والتزايد في رطوبة الهواء كانت وراء التراجع في معدلات التبخر نتح الكامن [13].

إن قيم التبخر نتح الكامن يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار بالنسبة لأبحاث الجفاف، وذلك لأن هذه القيم يمكن أن تلعب دوراً بالغ الأهمية في تعزيز قسوة الجفاف أو تخفيف حدته تبعاً للظروف المرافقة لكل حادثة [49,50]. كذلك فإن الخصائص المكانية والزمانية لقيم التبخر نتح الكامن يجب أن تكون الأساس الذي تعتمد عليه خطط إدارة الموارد المائية ومشاريع الري في مختلف المناطق. تؤكد عشرات الأبحاث في مختلف مناطق العالم وعلى مختلف أنواع النباتات على الدور الواضح لزيادة تركيز CO₂ في زيادة إنتاجية الكتلة الحية من خلال تزايد كفاءة استخدام الماء Water use efficiency (WUE) وزيادة القدرة على مقاومة الإجهاد المائي وخاصة بالنسبة لمجموعة نباتات C3 التي تنتمي إليها معظم أنواع المزروعات [51-53]. لذلك فإن هذا التناقص في معدلات التبخر نتح الكامن وبالتوافق مع التأثيرات الايجابية لارتفاع تراكيز ثاني أكسيد الكربون، والتي أصبحت موضع اهتمام الباحثين سواء بالنسبة لدراسات القحولة، أو بالنسبة لنماذج التنبؤ، يمكن أن يخفف من التأثيرات السلبية لتغير المناخ [54-55].

الاستنتاجات:

- 1- تبين من نتائج الدراسة أن المعدلات السنوية لكميات التبخر نتح الكامن المحسوبة للفترة 1975-2005 مرتفعة للغاية في جميع مناطق الدراسة، الامر الذي ينعكس على وجود عجز مائي مستمر في هذه المناطق.
- 2- أظهرت نتائج البحث أن قيم ETP لفصل الصيف مرتفعة للغاية في جميع المحطات.
- 3- بينت نتائج البحث وجود تراجع حاد ومعنوي في المعدلات السنوية لقيم التبخر نتح الكامن والذي يعود إلى التناقص الحاد في معدلات ETP لجميع الفصول خاصة فصل الصيف.
- 4- أكدت نتائج البحث على وجود انزياح واضح نحو تناقص المعدلات السنوية لقيم ETP في المحطات الثلاث إلا أن فترة حدوث الانزياح تباينت بين المناطق.

المقترحات:

- 1- إن الارتفاع الكبير في معدلات ETP لفصل الصيف يحتم ضرورة توفر مياه الري من أجل الزراعات الصيفية إضافة إلى الحاجة إلى الري التكميلي خلال فصل الربيع في المواسم الجافة بسبب ارتفاع معدلات ETP خلال هذا الفصل أيضاً.
- 2- ضرورة التعمق في دراسة كميات التبخر نتح الكامن على مستوى الفترات العشرية واليومية في مختلف مناطق القطر، والتي يمكن أن تكون بالغة الأهمية من أجل التقدير الدقيق للاحتياجات المائية للمحاصيل الاستراتيجية، ومن أجل تقدير ظروف الجفاف خلال مراحل التطور المختلفة.
- 3- التوسع في دراسة معدلات ETP على مختلف المقاييس الزمنية ولمختلف مناطق القطر في ظل التغيرات المناخية الراهنة وتحديد العناصر الأكثر تأثيراً في التغير بالنسبة لكل منطقة وخلال مختلف الفترات من العام.

References

المراجع

1. Fisher JB, Tu KP, Baldocchi DD. (2008). *Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites*, Remote Sens Environ 112(3):901–919.
2. Dolman AJ, De Jeu R. (2010). Evaporation in focus, Nat Geosci 3(5):296–296.
3. Wang K, Dickinson RE. (2012). *A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability*, Rev Geophys 50: RG2005.
4. Xiao J, Chen J, Davis KJ, Reichstein M. (2012). *Advances in upscaling of eddy covariance measurements of carbon and water fluxes*, J Geophys Res 117: G00J01.
5. Held IM, Soden BJ. (2000). *Water vapor feedback and global warming*, Annu Rev Energy Environ 25:441–475.
6. Seneviratne SI et al. (2010). *Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate, a review*. Earth Sci Rev 99:125–161.
7. Schlesinger, W.H.; Jasechko, S(2014),. *Transpiration in the global water cycle*. Agric. For. Meteorol. 189–190, 115–117.
8. Vörösmarty CJ, Federer CA, Schloss AL. (1998). *Potential evaporation functions compared on U.S. watersheds: possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling*, J Hydrol 207(3–4): 147–169.
9. Miralles DG, De Jeu RAM, Gash JH, Holmes TRH, Dolman AJ. (2011). *Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale*, Hydrol Earth Syst Sci 15(3):967–981.
10. Kumar S, Lawrence DM, Dirmeyer PA, Sheffield J. (2014). *Less reliable water availability in the 21st century climate projections*, Earth's Future 2:152–160.
11. Wang, W.H.; Huang, Y.; Liu, T. (2018). *Optimized Redistribution of Water Resources in the Kaidu-Kongque River Basin*. Arid Zone Res. 5, 1030–1039.
12. Katul, G. G., Oren, R., Manzano, S., Higgins, C., and Parlange, M.B.(2012). *Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system*, Rev.Geophys., 50, RG3002.
13. Fan, J., Wu, L., Zhang, F., Xiang, Y., Zheng, J. (2016). *Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956–2015*, Journal of Hydrology.
14. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration, Guideline for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper no, 56, Rome, Italy, 326 pp.*
15. Schultz, B. and De Wrachien, D. (2002). *Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century*, Irrig. Drain. Sci.,51, 311–327.

16. Gonzalez-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., and Li, F. (2009). *A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration*, Agr. Forest Meteorol, 149, 1843–1853.
17. Gordon, L. J., Finlayson, C., and Falkenmark, M. (2010). *Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services*, Agr. Water Manage., 97, 512–519.
18. Wang, M.; Yang, Q.; Zheng, J.H.; Liu, Z.H. (2016). *Spatial and Temporal Distribution of Water Requirement of Cotton in Xinjiang from 1963 to 2012*. Acta Ecologica Sinica 36, 4122–4130.
19. Mahmoud, S.H., Gan, T.Y. (2019). *Irrigation water management in arid regions of Middle East: assessing spatio-temporal variation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques and meteorological data*. Agric. Water Manag. 212, 35–47.
20. Rawat, K.S.; Singh, S.K.; Bala, A.; Szabó, S.(2019). *Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment*. Agric. Water Manag. 213, 922–933.
21. Rahimzadegan, M.; Janani, A. (2019). *Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery*. Agric. Water Manag. 217, 383–390.
22. Anderson, M. C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J. R., and Kustas, W. P.(2011). *Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States*. Climate, 15, 2025–2044.
23. Otkin, J. A., Anderson, M. C., Hain, C., Svoboda, M., Johnson, D., Mueller, R., Tadess, T., Wardlow, B., and Brown, J. (2016). *Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought*, Agr. Forest Meteorol., 218–219, 230–242.
24. Abdelghani, C., Hoedjes, J. C. B., Rodriguez, J.-C., Watts, C. J., Garatuza, J., Jacob, F., and Kerr, Y. H. (2008). *Using remotely sensed data to estimate area-averaged daily surface fluxes over a semiarid mixed agricultural land*, Agr. Forest Meteorol., 148, 330–342.
25. Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A., and Kustas, W. P. (2012). *Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources*, Remote Sens. Environ., 122, 56–65.
26. Sun, H.; Yang, Y.; Wu, R.; Gui, D.; Xue, J.; Liu, Y.; Yan, D. (2019). *Improving Estimation of Cropland Evapotranspiration by the Bayesian Model Averaging Method with Surface Energy Balance Models*. Atmosphere 10, E188.
27. Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C.A., Liermann, C. R., and Davies, P. M. (2010). *Global threats to human water security and river biodiversity*, Nature, 467, 555–561.
28. Dinar, A.; Tieu, A.; Huynh, H. (2019). *Water scarcity impacts on global food production*. Glob. Food Secur. 23, 212–226.
29. Douville H, Ribes A, Decharme B, Alkama R, Sheffield J. (2012). *Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration*, Nat Clim Chang 3:59–62.

30. Zhang, X.; Qin, W.; Chen, S.; Shao, L.; Sun, H. (2017). *Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades—A case study in the North China Plain*. *Agric. Water Manag.* 179, 47–54.
31. Dorigo WJR, Chung D, Parinussa R, Liu Y, Wagner W, Fernández-Prieto D (2012) *Evaluating global trends (1988–2010) in harmonized multi-satellite surface soil moisture*, *Geophys Res Lett* 39: L18.
32. Liu Y, Zhuang Q, Chen M, Tchepakova N, Pan Z et al. (2013). *Response of evapotranspiration and water availability to changing climate and land cover on the Mongolian Plateau during the 21st century*, *Global Planet Chang* 108:85–99.
33. Wen, Y.; Shang, S.; Yang, J. (2017). *Optimization of irrigation scheduling for spring wheat with mulching and limited irrigation water in an arid climate*. *Agric. Water Manag.* 192, 33–44.
34. Taylor, W.A. (2000). *Change-point analysis: A powerful new tool for detection changes*.
35. Goyal R. (2004) *Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India)*. *Agric Water Manag* 69(1):1–11.
36. Peterson, T.C., Golubev, V.S., Groisman, P.Y., 1995. *Evaporation losing its strength*. *Nature*.377 (6551) (687–588).
37. Thomas A. (2000). *Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China*. *Int J Climatol* 20(4):381–396.
38. Roderick ML, Farquhar GD (2004). *Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002*. *Int J Climatol* 24(9):1077–1090.
39. Chen S, Liu Y, Thomas A (2006). *Climatic change on the Tibetan Plateau: potential evapotranspiration trends from 1961–2000*. *Clim Chang* 76(3–4):291–319.
40. Wang Y, Jiang T, Bothe O, Fraedrich K (2007). *Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin*. *Theor Appl Climatol* 90(1–2):13–23.
41. Suat I, Kabenge I, Skaggs KE, Mutiibwa D. (2012). *Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, central Nebraska–USA*. *J Hydrol* 420–421:228–244.
42. Song F, Zhou T, Qian Y (2014). *Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models*. *Geophys Res Lett* 41:596–603.
43. Roderick, M.L.; Farquhar. G.D (2002). *The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years.*, *Science* 298, 1410–1411.
44. Stanhill G, Cohen S (2001). *Global dimming: a review of the evidence for*

- a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences.*
Agric for Meteorol 107(4):255–278.
45. Wild M (2014). *Global dimming and brightening.* Glob Environ Chang: 39–47.
46. Gao G, Chen D, Ren G, Chen Y, Liao Y (2006). *Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956–2000.* J Geogr Sci 16(1):3–12.
47. Song Z, Zhang H, Snyder R, Anderson F, Chen F (2009). *Distribution and trends in reference evapotranspiration in the North China Plain.* J Irrig Drain Eng. 136(4):240–247.
48. Gong L, Xu C, Chen D, Halldin S, Chen YD (2006). *Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin.* J Hydrol 329(3): 620–629.
49. Dai A, Zhao T, Chen J. (2018) *Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective.* Curr Clim Chang Reports 4:301–312
50. Vicente-Serrano SM, McVicar TR, Miralles DG et al. (2020). *Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change.* Wiley Interdiscip Rev Clim Chang 11.e 632.
51. Ainsworth EA. (2008). *Rice production in a changing climate: a metaanalysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentrations.* Global Change Biology 14, 1642–1650.
52. Keenan, T.F.; Hollinger, D.Y.; Bohrer, G.; Dragoni, D.; Munger, J.W.; Schmid, H.P.; Richardson, A.D. (2013) *Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise.* Nature, 499, 324–327.
53. Kimball B.A. (2016). *Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N, and temperature.* Current Opinion in Plant Biology, 31, 36–43.
54. k, M. L., Greve, P. & Farquhar, G. D. *On the assessment of aridity with changes in atmospheric CO₂.* Wat. Resour. Res. 51, 5450–5463 (2015).
55. Yang, Y., Roderick, M. L., Zhang, S., McVicar, T. R., & Donohue, R. J. (2019). *Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections.* Nature Climate Change, 9(1), 44–48.