

## روندهای بلندمدت تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق در ناحیه‌های رویشی جنگلی کشور

پدرام عطارد

استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: attarod@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

### چکیده

تغییر اقلیم بر روند سالانه تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق بوم‌سازگان‌ها تأثیرگذار است. در پژوهش پیش‌رو، از داده‌های هواشناسی بلندمدت (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶) مربوط به ۹۶ ایستگاه هواشناسی همدیدی در پنج ناحیه رویشی جنگلی کشور شامل هیرکانی، ارسباران، زاگرس، صحارا- سندی و ایرانی- تورانی برای محاسبه تولید اولیه خالص با مدل سینتتیک و تبخیر- تعرق مرجع با روش فائو- پنمن- مانیتیت استفاده شد. آزمون من‌کنندال برای روندیابی تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق مرجع سالانه به‌کار گرفته شد. بیشترین تولید اولیه خالص در ناحیه رویشی هیرکانی (۱۰/۷ تن در هکتار در سال) و بیشینه تبخیر- تعرق سالانه در ناحیه رویشی صحارا- سندی (۲۰۹۹ میلی‌متر) برآورد شد. تولید اولیه خالص ناحیه‌های رویشی صحارا- سندی و ایرانی- تورانی بین دو تا سه تن در هکتار در سال به‌دست آمد. از ۹۶ روند سالانه تولید اولیه خالص و نیز تبخیر- تعرق در ناحیه‌های رویشی، ۲۲ روند تولید اولیه خالص (حدود ۲۳ درصد) و ۷۳ روند تبخیر- تعرق (معادل ۷۶ درصد)، معنی‌دار بودند. روندیابی تبخیر- تعرق و تولید اولیه خالص، گامی مهم برای شناخت اثر تغییر اقلیم بر کارکرد بوم‌سازگان‌ها محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمون من‌کنندال، ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، فائو- پنمن- مانیتیت، مدل سینتتیک.

### مقدمه

تولید اولیه خالص (NPP: Net Primary Production) بوم‌سازگان‌های زمینی به‌عنوان یکی از مباحث مهم پژوهشی در میان بوم‌شناسان گیاهی در جهان مورد توجه است. NPP که مقدار کربن تبدیل‌شده به زی‌توده پس از کسر تنفس گیاهان است، از منابع اصلی برای مواد غذایی بشر و نیز تولیدات چوبی و سوخت به‌شمار می‌آید. این مؤلفه می‌تواند یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی توان تولید بوم‌سازگان‌ها و ناحیه‌های رویشی جنگلی باشد (Ren et al., 2010). اقلیم، یکی از عامل‌های تعیین‌کننده پویایی بوم‌سازگان‌های زمینی است، بنابراین تغییر اقلیم به‌ویژه افزایش دما و تغییرات در

مقدار بارش و نیز شدت و فراوانی وقایع حدی اقلیمی، اثرات قابل‌توجهی بر تولید اولیه خالص بوم‌سازگان‌های زمینی دارد (Melillo et al., 1996). در واقع، بوم‌سازگان‌ها و اقلیم، اثرات متقابل بر یکدیگر دارند. این کنش‌های متقابل موجب تغییرات سپیدایی (Albedo) و نیز تغییر در پویایی چرخه کربن و جریان انرژی می‌شوند (Bonan et al., 2003; Euskirchen et al., 2009; Phillips et al., 2009). در دهه‌های اخیر، نگرانی‌ها درمورد تغییر اقلیم سبب شده است که متخصصان، نگاه دقیق‌تری به ارتباط بین چرخه‌های آب، مواد غذایی و کربن و پویایی انرژی در بوم‌سازگان‌ها داشته باشند (Sun et al., 2000). در اثر تغییر

مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر چرخه‌های آب و کربن، کمک بسزایی کند. هدف از پژوهش پیش‌رو، محاسبه تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق مرجع در پنج ناحیه رویشی ایران شامل هیرکانی، ارسباران، زاگرس، صحارا- سندی و ایرانی- تورانی و نیز روندیابی آن‌ها طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶ بود.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تولید اولیه خالص پنج ناحیه رویشی جنگل کشور با استفاده از مدل سینتتیک (Synthetic) و تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از معادله ترکیبی فائو- پنمن- مانتیت (FAO Penman Monteith) برآورد شد. سپس، روندیابی تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از آزمون ناپارامتری من‌کندال بررسی شد. بدین منظور، داده‌های هواشناسی روزانه، بلندمدت (۳۱ ساله) و قابل اطمینان ۹۶ ایستگاه هواشناسی همدیدی مستقر در پنج ناحیه رویشی شامل هیرکانی (هشت ایستگاه)، ارسباران (یک ایستگاه)، زاگرس (۱۸ ایستگاه)، صحارا- سندی (۱۸ ایستگاه) و ایرانی- تورانی (۵۱ ایستگاه) در فاصله سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶ استفاده شدند.

### نتایج

بیشترین تولید اولیه خالص در ناحیه رویشی هیرکانی (۱۰/۷ تن در هکتار در سال) و کمترین آن در ناحیه رویشی صحارا- سندی (۲/۳ تن در هکتار در سال) مشاهده شد. در مقابل، بیشینه تبخیر- تعرق سالانه متعلق به ناحیه رویشی صحارا- سندی (۲۰۹۹ میلی‌متر) و کمینه آن مربوط به ناحیه رویشی هیرکانی (۸۹۹ میلی‌متر) بود (جدول ۱). تولید اولیه خالص دو ناحیه رویشی صحارا- سندی و ایرانی- تورانی بین دو تا سه تن در هکتار در سال به دست آمد. نتایج نشان داد که تبخیر- تعرق دو ناحیه رویشی زاگرس و ایرانی- تورانی به‌طور مشابه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال است (جدول ۱).

اقلیم، رابطه‌های بین آب، دما و تابش خورشید، محدودیت‌هایی را در فعالیت‌های گیاهان جهان ایجاد کرده است که به تغییرات در روند زمانی تولید اولیه خالص منجر شده است (Nemani *et al.*, 2003).

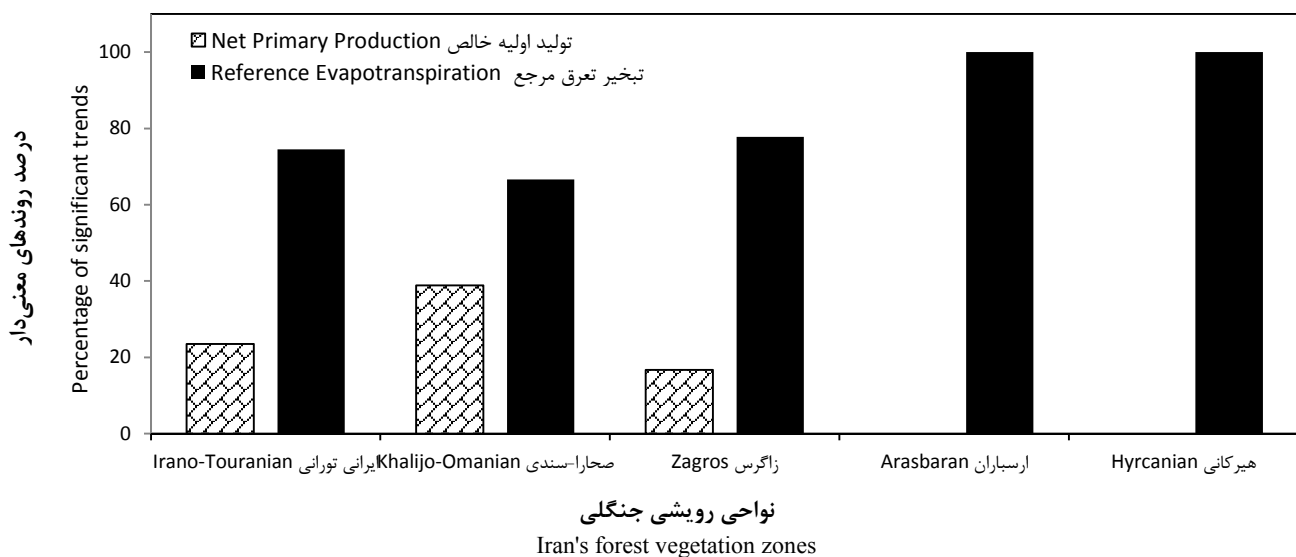
تبخیر- تعرق (ET: Evapotranspiration) به معنی از دست دادن آب از خاک و پوشش گیاهی و نیز سطح آزاد آب‌ها است. ET از عامل‌های تأثیرگذار بر آب مورد نیاز گیاهان و نیز فعالیت بوم‌سازگان‌های طبیعی و انسان‌ساخت به‌شمار می‌آید. مؤلفه‌های آب‌وهوایی مانند بارش، دما، رطوبت، ساعت‌های آفتابی و سرعت باد از عامل‌های اصلی تأثیرگذار بر تبخیر- تعرق هستند (Sabziparvar & Tabari, 2010). هرگونه تغییر در مؤلفه‌های آب‌وهوایی به دلیل گرمایش جهانی بر مقدار تبخیر- تعرق تأثیر می‌گذارد (Goyal, 2004). تغییرات جزئی در مقدار تبخیر- تعرق ممکن است پیامدهای مهمی در اقلیم‌های خشک به‌همراه داشته باشد. به‌عنوان نمونه، پنج درصد افزایش دما می‌تواند تبخیر- تعرق را تا ۳/۶ درصد در مناطق خشک افزایش دهد (Goyal, 2004). تبخیر- تعرق از سطح مرجع، بدون مشکل کمبود آب، تبخیر- تعرق گیاه مرجع یا تبخیر- تعرق مرجع (ET<sub>0</sub>: Reference Evapotranspiration) نامیده می‌شود. سطح مرجع عبارت است از چمن فرضی مرجع با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب سیدایی (آلبدو) ۰/۲۳. سطح مرجع، مشابه یک سطح چمن سبز وسیع با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و سایه‌اندازی کامل روی سطح زمین و تحت آبیاری مطلوب است (Allen *et al.*, 1998). مؤلفه‌های هواشناسی تنها عوامل مؤثر بر تبخیر- تعرق مرجع محسوب می‌شوند، بنابراین تبخیر- تعرق مرجع، یک نمایه وابسته به اقلیم است و می‌توان آن را بر مبنای داده‌های هواشناسی محاسبه کرد.

باتوجه به اینکه تبخیر- تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه آب‌شناختی و مهم‌ترین فرایند ارتباطی بین بوم‌سازگان‌ها و اقلیم است و از طرفی، تولید اولیه خالص نیز پتانسیل رویش در یک اقلیم مشخص را نشان می‌دهد، بنابراین روندیابی تبخیر- تعرق و تولید اولیه خالص بوم‌سازگان‌ها می‌تواند به

جدول ۱ - میانگین سالانه تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق مرجع در ناحیه‌های رویشی جنگلی کشور طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶

Table 1. The annual averages of net primary production and reference evapotranspiration of the Iran's forest vegetation zones during 1986 to 2017

ناحیه رویشی Vegetation zone	تولید اولیه خالص (تن در هکتار در سال) Net primary production ( $t\ ha^{-1}\ y^{-1}$ )	تبخیر- تعرق مرجع (میلی‌متر در سال) Reference evapotranspiration ( $mm\ y^{-1}$ )
هیرکانی Hyrcanian	10.7	899
ارسباران Arasbaran	4.3	1132
زاگرس Zagros	6.4	1466
صحارا- سندی Khalijo-Omanian	2.3	2099
ایرانی- تورانی Irano-Turanian	2.8	1594



شکل ۱- درصد تعداد روندهای معنی‌دار سالانه برای تولید اولیه خالص و تبخیر- تعرق مرجع سالانه در ناحیه‌های رویشی جنگلی کشور طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶

Figure 1. The percentage of the number of significant annual trends of net primary production and reference evapotranspiration of the Iran's forest vegetation zones during 1986 to 2017

زاگرس (۲۴ درصد) (۱۷ درصد) در مقایسه با ناحیه‌های رویشی صحارا- سندی (۳۹ درصد) و ایرانی- تورانی (۲۴ درصد)، کمتر بود. درصد تعداد روندهای معنی‌دار تبخیر- تعرق سه ناحیه رویشی زاگرس (۷۸ درصد)، صحارا- سندی (۶۷ درصد) و ایرانی- تورانی (۷۵ درصد) با اختلاف

مطابق آزمون آماری من‌کنندال، روند تولید اولیه خالص در هیچ‌یک از ایستگاه‌های دو ناحیه رویشی هیرکانی و ارسباران معنی‌دار نبود، درحالی‌که همه روندهای تبخیر- تعرق در این دو ناحیه معنی‌دار بودند (شکل ۱). درصد تعداد روندهای معنی‌دار تولید اولیه خالص در ناحیه رویشی

اندکی، مشابه بودند (شکل ۱). به طور کلی از ۹۶ روند سالانه تولید اولیه خالص در سطح کشور، ۲۲ روند (حدود ۲۳ درصد) معنی دار تشخیص داده شدند. تعداد روندهای معنی دار تبخیر- تعرق در سطح کشور نیز ۷۳ روند (معادل ۷۶ درصد روندها) بود.

### بحث و جمع بندی

مقایسه داده‌های برآوردی و اندازه‌گیری شده حاکی است که مدل سینتتیک می‌تواند تولید اولیه خالص و تغییرات آن در پاسخ به تغییرات آب‌وهوایی بلندمدت را برآورد کند. مرور منابع نیز نشان داد که نتایج به دست آمده از مدل سینتتیک، بسیار نزدیک به داده‌های واقعی با ضریب همبستگی تا ۰/۸۵ است (Gang et al., 2013). بیشترین (هیرکانی) و کمترین (صحارا- سندی) مقدار تولید اولیه خالص، متقارن با ناحیه‌های رویشی بود که بیشینه و کمینه مقدار بارندگی را داشتند. میانگین بارش سالانه در فاصله سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶ در ناحیه رویشی هیرکانی، ۱۲۰۶ میلی‌متر و در ناحیه رویشی صحارا- سندی ۲۱۶ میلی‌متر ثبت شد. پژوهش‌های جهانی انجام شده نیز در این راستا نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. برای نمونه، بررسی تغییرات مکانی و زمانی تولید اولیه خالص تحت تأثیر تغییر اقلیم طی سال‌های ۱۹۱۱ تا ۲۰۰۰ با استفاده از مدل سینتتیک نشان داد که تولید اولیه خالص جهانی، همبستگی مثبت و معنی‌دارتری با متوسط بارش سالانه در مقایسه با میانگین سالانه دما دارد، بنابراین بارش، مهم‌ترین عامل برای تولید پوشش گیاهی معرفی شد (Gang et al., 2013). با وجود روند افزایشی تغییر دما در کشور (Attarod et al., 2022)، تغییرات تولید اولیه خالص در طول دوره مورد مطالعه پژوهش پیش‌رو، در تعداد محدودی از ایستگاه‌ها، روند معنی‌دار افزایشی (چهار ایستگاه) یا کاهش (۱۸ ایستگاه) نشان داد. این موضوع نشان می‌دهد که روند تغییر تولید اولیه خالص، بیشتر متأثر از تغییر بارندگی است تا دما. گفتنی است که از مجموع ۹۶ روند سالانه بارش در کشور طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶، فقط ۱۹ روند (دو روند

افزایشی و ۱۷ روند کاهش) معنی‌دار بودند. در سال ۱۹۹۰، کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و نیز سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد، معادله ترکیبی فائو- پنمن- مانیتث را به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از داده‌های اقلیمی پیشنهاد کردند. نتایج پژوهش‌های انجام شده در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهند که دقت تبخیر- تعرق مرجع برآورد شده با روش فائو- پنمن- مانیتث، در مقایسه با روش‌های دیگر، به داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق لایسیمتر، نزدیک‌تر است (Attarod et al., 2015). نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که از ۹۶ روند سالانه تبخیر- تعرق مرجع در ناحیه‌های رویشی کشور، ۷۶ درصد روندها (۷۳ روند) معنی‌دار بودند (پنج روند کاهش و ۶۸ روند افزایش). دما، سرعت باد، ساعت‌های آفتابی و رطوبت نسبی از عوامل‌های اثرگذار بر مقدار تبخیر- تعرق مرجع هستند. در راستای نتایج پژوهش پیش‌رو، بررسی تغییر اقلیم در ایران نشان داد که در فاصله سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶، حدود ۸۰ درصد روندهای دما، ۶۰ درصد روندهای سرعت باد، ۵۵ درصد روندهای رطوبت نسبی و ۳۴ درصد روندهای تعداد ساعت‌های آفتابی در ایستگاه‌های هواشناسی کشور به‌طور معنی‌داری افزایشی (۱۶۴ روند) یا کاهش (۵۵ روند) بودند (Attarod et al., 2023).

علاوه بر همه عوامل تخریب در بوم‌سازگان‌های کشور، تغییر اقلیم می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های سرعت‌دهنده به تخریب در همه ناحیه‌های رویشی، ایفای نقش کند. این موضوع به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به تغییر اقلیم دارند، مهم‌تر است. زیرا تغییر اقلیم با اثر بر عامل‌های بوم‌شناختی از جمله تبخیر- تعرق و نیز تولید اولیه خالص بوم‌سازگان‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد آن‌ها دارد. روندیابی و پیش‌نگری تبخیر- تعرق و تولید اولیه خالص، گام مهمی به‌منظور شناخت اثر تغییر اقلیم بر کارکرد بوم‌سازگان‌های مختلف است.

## سیاسگزاری

منابع مالی این مقاله از محل طرح بین‌المللی شماره ۹۶۰۰۱۶۳۳ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) تأمین شده است.

## منابع مورد استفاده

- Chen, J. and Groisman, P.Y., 2013. Assessing the spatiotemporal variation in distribution, extent and NPP of terrestrial ecosystems in response to climate change from 1911 to 2000. *PloS One*, 8(11): e80394.
- Goyal, R.K., 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69(1): 1-11.
- Melillo, J.M., Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Schulze, E.D. and Sala, O.E., 1996. Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate: 447-481. In: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. and Maskell, K. (Eds.). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 588p.
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., ... and Running, S.W., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625): 1560-1563.
- Phillips, O.L., Aragão, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G., ... and Torres-Lezama, A., 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323(5919): 1344-1347.
- Ren, Z., Zhu, H., Li, R. and Liu, X., 2010. Variation in vegetation net primary productivity and its response to climate in Buryatiya Republic, Russia. *Resources Science*, 32(10): 2012-2021 (In Chinese with English summary).
- Sabziparvar, A.A. and Tabari, H. 2010. Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semiarid regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(10): 724-731.
- Sun, G., Riekerk, H. and Kornhak, L.V., 2000. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in Florida. *Wetlands*, 20(1): 101-112.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy, 326p.
- Attarod, P., Dezhban, A., Pypker, T.G., Khalighi Sigaroodi, Sh., Bayramzadeh, V., Tang, Q., Liu, X., and Soofi Mariv, H., 2023. Iran's changing climate over the past 30 years. *Russian Meteorology and Hydrology*, 48(1): 53-62.
- Attarod, P., Sadeghi, S.M.M., Fathizadeh, O., Motahari, M., Rahbari Sisakht, S., Ahmadi, M.T. and Bayramzadeh, V., 2015. Temperature- and radiation based methods against the standard FAO Penman- Monteith for estimating the reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) in Gorgan. *Journal of Forest and Wood Products*, 68(2): 359-369 (In Persian with English summary).
- Bonan, G.B., Levis, S., Sitch, S., Vertenstein, M. and Oleson, K.W., 2003. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology*, 9(11): 1543-1566.
- Euskirchen, E.S., McGuire, A.D., Chapin III, F.S., Yi, S. and Thompson, C.C., 2009. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003–2100: implications for climate feedbacks. *Ecological Applications*, 19(4): 1022-1043.
- Gang, C., Zhou, W., Li, J., Chen, Y., Mu, S., Ren, J.,

## Long-term trends of net primary production and evapotranspiration in Iran's forest vegetation zones

P. Attarod

Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran  
E-mail: attarod@ut.ac.ir

Received: 19.02.2023

Accepted: 11.03.2023

### Abstract

Climate change significantly affects net primary production (NPP) and evapotranspiration (ET). To estimate NPP and reference ET (ET<sub>0</sub>), long-term (1986-2017) meteorological data collected by 96 synoptic weather stations located in five of Iran's forest vegetation zones: Hyrcanian, Arasbaran, Zagros, Khalijo-Omanian, and Irano-Turanian were used. The synthetic model and FAO Penman-Monteith combination equation were employed for estimation. Mann-Kendall test detected annual trends of NPP and ET<sub>0</sub>. The Hyrcanian zone demonstrated the highest amount of NPP at 10.7 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, while Khalijo-Omanian displayed the highest annual ET<sub>0</sub> at 2099 mm. The NPP of Khalijo-Omanian and Irano-Turanian zones were roughly similar, ranging between 2 and 3 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>. Out of 96 observed annual trends of NPP and ET<sub>0</sub> in diverse vegetation zones, statistically significant trends were found in 22 trends (23 percent) of NPP and 73 trends (76 percent) of ET<sub>0</sub>. Understanding the impact of climate change on ecosystem function requires trending of NPP and ET.

Keywords: FAO Penman-Monteith, Mann-Kendall test, synoptic weather station, synthetic model.