نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیستم، شماره ۵۸، پاییز ۹۹

کاربرد تجزیه علیت در تعیین پارامترهای هواشناسی غالب بر تبخیر- تعرق گیاه مرجع در آذربایجان غربی

دریافت مقاله: ۹۷/۸/۵ **پذیرش نهایی**: ۹۷/۱۲/۱۸

صفحات: ۱۸۰-۱۶۳

یعقوب دین‌پژوه: دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
Email: Dinpashoh@yahoo.com
معصومه فروغی: دانشجوی دکترای آب و هواشناسی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران.[1]
Email: M.forughi3@gmail.com

چکیده

تبخیر- تعرق گیاه مرجع یکی از مهم‌ترین مولفه‌های هیدرولوژیکی بوده و تخمین مناسب آن در پژوهش‌های بیلان، مدیریت منابع آب و بهبود مصرف آن در بخش کشاورزی کاربرد دارد. در این مطالعه به بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 در استان آذربایجان‌غربی با استفاده از تجزیه علیت پرداخته شد. بدین منظور از داده‌های هواشناسی ماهانه ایستگاه سینوپتیک استان آذربایجان غربی با بیش از ۲۰ سال آمار، استفاده شد. جهت برآورد ET_0، از فرمول فائو- پنمن- مانتیث استفاده گردید. در ادامه مقدار ET_0 با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه خطی نیز تخمین زده شد. سپس به منظور ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MEA)، ضریب ناش-ساتکلیف (NSH) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید. آنگاه ضریب همبستگی بین ET_0 و هر یک از پارامترهای هواشناسی به‌دست آمد. سپس میزان اثرات مستقیم و غیرمستقیم هر یک از پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 با استفاده از روش تجزیه علیت محاسبه شد. جذر میانگین مربعات خطا در مهم‌ترین پارامترهای ورودی به مدل گام به گام مابین ۰/۰۶ و ۰/۱۶، میانگین قدرمطلق خطا بین ۰/۰۴ و ۰/۱۲، ضریب ناش-ساتکلیف بین ۰/۹۰ و ۰/۹۹ و ضریب تعیین بین ۰/۸۹ و ۰/۹۸، به‌دست آمد. سرعت باد در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، همبستگی معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) با ET_0 نشان داد. نتایج تجزیه علیت مشخص نمود که بیشترین مقدار اثر مستقیم پارامترهای هواشناسی بر ET_0، در همه ایستگاه‌ها، متعلق به سرعت باد بوده که مقدار آن برای ایستگاه-های ارومیه؛ ۰/۸۵، پیرانشهر؛ ۰/۹۹، تکاب؛ ۰/۹۷، خوی؛ ۰/۹۰، سردشت؛ ۱/۰۶، ماکو؛ ۰/۶۴ و مهاباد؛ ۰/۷۸ حاصل شد.

کلید واژگان: آذربایجان‌غربی، تبخیر- تعرق گیاه مرجع، تجزیه علیت، پارامترهای هواشناسی، رگرسیون گام به گام

---

۱. **نویسنده مسئول**: دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه‌یزی و علوم محیطی، گروه آب‌وهواشناسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

مقدمه

تبخیر- تعرق، که شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق از روزنه های برگ ها در گیاهان می‌باشد جزء مهمی از چرخه آب در طبیعت است که تخمین دقیق آن نقش مهمی در مدیریت صحیح منابع آب مناطق مختلف دارد. در واقع، تبخیر- تعرق پدیده‌ی هیدرولوژیکی چند بعدی است که تحت تاثیر چندین متغیر عمل می‌کند. به-طور کلی، متغیرهایی که در فرایند تبخیر- تعرق اثر می‌گذارند؛ بارندگی، سرعت باد، تابش خورشیدی، فشار سطحی، ساعات آفتابی، ابرناکی، ادوکسیون[1] (انتقال افقی گرما)، پوشش زمین، خصوصیات خاک، گیاه و مقدار آب می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۳۸۹). تبخیر- تعرق از یک سطح گیاه چمن سبز، بدون کمبود آب و هرگونه آفت و بیماری‌های گیاهی، اصطلاحا بنام تبخیر- تعرق گیاه مرجع یا بطور ساده تبخیر- تعرق مرجع[2] (ET_0) نامیده می‌شود. گیاه مرجع، عبارت است از چمن سبز با ارتفاع ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر و مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر که دارای ضریب بازتابش ۰/۲۳ باشد. در این شرایط، نباید گیاه با کمبود آب در خاک و یا آفت مواجه باشد. برای گیاه مرجع یونجه نیز تعریف مشابهی ارائه شده که در آن ارتفاع گیاه ۲۰ سانتیمتر درنظر گرفته می‌شود (آلن و پریرا[3]، ۱۹۹۸). مقدار ET_0 در هر منطقه، بازتاب شرایط اقلیمی آن منطقه است و تحت تأثیر برخی از پارامترهای اقلیمی نظیر ساعات آفتابی، درجه حرارت، سرعت باد، رطوبت و غیره قرار دارد. بنابراین، بررسی دقیق اجزای چرخه آب، بدون در نظر گرفتن ET_0 (به‌عنوان رکن اصلی محاسبه نیاز آبی گیاهان)، امکان‌پذیر نیست (گویال[4]، ۲۰۰۴ و دین پژوه، ۲۰۰۶). لدلانی[5] و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه و پیش‌بینی ET_0 در الجزایر با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند، نتایج به دست آمده نشان داد که هر دومدل بکارگرفته شده در پیش بینی ET_0، از کارایی بالایی برخوردارند. تخمین دقیق (ET_0) برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاهان مختلف و تخمین نیاز آبی آنها از اهمیت زیادی برخوردار است و به‌طور گسترده برای تخمین آب مورد نیاز آبیاری استفاده می‌شود (استرانگری[6] و همکاران، ۲۰۱۴) .هرگونه برنامه‌ریزی منابع آبی در آینده، بدون در نظرگرفتن تأثیر تغییراقلیم بر تبخیر-تعرق و نیاز آبی گیاهان ناقص خواهد بود (برزگری و ملکی‌نژاد، ۱۳۹۵). ماهیدا و پاتل[7] (۲۰۱۵) تاثیر پارامترهای اقلیمی بر روی ET_0 را با استفاده از رگرسیون‌خطی چندگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ایشان جهت تعیین ET_0 از روش فائو-پنمن-مانتیث[8] (FAO-56-PM) استفاده کردند. در روش MLR مقدار ET_0 به‌عنوان متغیر پیش‌بینی و حداکثر درجه‌حرارت، ساعات‌آفتابی، رطوبت‌نسبی و سرعت‌باد (به‌عنوان متغیرهای مستقل برای پیدا کردن متغیرهای مهم) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه ایشان، درجه‌حرارت به‌عنوان عامل غالب در برآورد مقدار ET_0 شناخته شد، ولی رطوبت نسبی در پیش‌بینی ET_0 در منطقه مورد مطالعه نقش چندان مهمی نداشته و به

[1] - Advection
[2] - Reference Evapotranspiration (ET_0)
[3]- Allen & Pereira
[4]- Goyal
[5] - Ladlani
[6] - Stagnari
[7]- Mahida & Patel
[8]- FAO Penman- Monteith

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

مدل وارد نشد. خدکار[1] و همکاران (۲۰۱۶)، به مطالعه و تخمین ET_0 با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه پرداختند، نتایج نشان داد که همه انواع رگرسیون خطی چندگانه، نتایج قابل قبولی برای تخمین ET_0 برای ایستگاه دوهه ارائه داد. خینگ[2] و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه ET_0 در جنوب چین طی دوره آماری ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۰ پرداختند. ایشان در مطالعه خود از روش‌های FAO-56-PM، تجزیه علیت[3] و مدل BP استفاده کردند. نتایج نشان داد که در جنوب چین براساس تئوری تجزیه علیت، ساعات آفتابی با ضریب همبستگی ۰/۸۳۵۷ و ضریب مسیر ۰/۵۵۵۹، اثر قوی‌تری بر ET_0 داشته و حداقل درجه حرارت هوا و رطوبت نسبی در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. مانیکوماری و ویوندهینی[4] (۲۰۱۶) به پیش‌بینی ET_0 با استفاده از مدل رگرسیونی MLR پرداختند و نتایج به‌دست آمده را با ET_0 به‌دست آمده از FAO-56-PM مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که مقادیر ET_0 به‌دست آمده از مدل‌ها با مقادیر بدست آمده از FAO-56-PM دارای ارتباط نزدیکی می‌باشد. مقدار ضریب تعیین در مطالعه ذکر شده R^2=۰/۹۸ می‌باشد که نشانگر ارتباط نزدیک مقادیر مشاهداتی و به‌دست آمده از مدل است. لیو[5] و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه ET_0 در جنوب چین پرداخته و با استفاده از روش تجزیه علیت اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی موثر در ET_0 را مشخص نمودند. ایشان جهت تخمین ET_0 از روش FAO-PM56 استفاده نموده و سپس نتیجه را با روش‌های هارگریوز سامانی و پرستلی تیلور مورد مقایسه قرار دادند. در پژوهش مذکور، برای ارزیابی عملکرد مدل‌های (ANN, WNN)، از جذر میانگین مربعات خطا[6] (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا[7] (MAE)، متوسط درصد خطای مطلق[8] (MAPE)، ناش-ساتکلیف (NSH) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است. مقدار به‌دست آمده برای جذر میانگین مربعات خطا ۰/۳۲ میلی‌متر، برای متوسط درصد خطای مطلق ۵/۵ درصد و برای آماره ناش-ساتکلیف ۰/۹ به‌دست آمد. ایشان دریافتند که این مدل‌ها را می‌توان حتی با دقت بالاتر در مناطق دیگر به کار برد. ژانگ[9] و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تجزیه‌علیت به بررسی عوامل موثر در ET_0 پرداختند. نتایج نشان داد که درجه حرارت محیط و تابش خورشیدی بیشترین اثر مستقیم را بر ET_0 دارد که از این بین، تاثیر درجه حرارت در افزایش ET_0 بیشتر از تابش خورشیدی می‌باشد.

گرچه در ایران مطالعات زیادی روی ET_0 شامل روند تغییرات آن، واسنجی روش‌های تخمین ET_0، مقایسه‌ی روش‌های مختلف تجربی با مدل FAO 56-PM (یا اندازه‌گیری مستقیم از لایستیمتر) انجام شده است، ولی تاکنون مطالعه‌ای مبنی بر یافتن رابطه علت و معلولی بین پارامترهای هواشناسی و ET_0 انجام نشده است. جهانبخش‌اصل و همکاران (۱۳۸۰) با استفاده از روش‌های ترکیبی، دمایی، تابشی و همبستگی چندگانه و رطوبتی به برآورد ET_0 در شهر تبریز پرداخته و نتایج به‌دست آمده را با روش تشتک تبخیر مورد مقایسه قرار

[1] - Khdkar
[2]- Xing
[3] -Path Analysis
[4] - Manikumari and Vinodhini
[5] - Liu
[6]- Root-mean-square error
[7]- Mean Absolute Error
[8]- Mean Absolute Percentage Error
[9]- Zhang

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

دادند. نتایج نشان داد که روش هارگریوز نسبت به سایر روش‌ها تطابق بهتری با روش تشت تبخیر دارد. سیفی و همکاران (۱۳۸۹) به برآورد ET_0 با استفاده از مدل ترکیبی MLR و تحلیل مولفه‌های اقلیمی طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۶ در ایستگاه کرمان پرداختند و برای ارزیابی عملکرد مدل از آماره‌های RMSE و MAE استفاده کردند. نتایج نشان داد که متغیرهای شدت تابش، رطوبت نسبی، دمای حداکثر و ساعات آفتابی بیشترین تاثیر را در فرایند ET_0 دارند و مقادیر ضریب همبستگی روش‌های ترکیبی MLR-PCA و MLR براساس مبنای مقایسه‌ای FAO-56-PM در مرحله آزمون، به‌ترتیب ۰/۸۲۰ و۰/۸۴۰ گزارش شده است.

در زمینه استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه گام به گام مطالعاتی صورت گرفته است. محمودی و علیجانی (۱۳۹۲) از روش رگرسیونی گام به گام در تخمین بارش‌های سالانه و فصلی استان کردستان بهره گرفتند. ایشان معنی‌داری متغیرهای طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌ها را در مدل بررسی کردند. جعفری و همکاران (۱۳۹۴) روش مذکور را با به‌کار بردن یک مطالعه موردی در ایستگاه مراغه برای تخمین تبخیر از تشت با توجه به متغیرهای وابسته (هواشناسی) به‌تفصیل شرح داده و کاربردهای آن را در زمینه هیدرولوژی و هیدرومتئورولوژی اشاره کردند. جعفری و دین‌پژوه (۱۳۹۵) به مطالعه کاربرد مدل رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون چندمتغیره تیغه‌ای در برآورد تبخیر از تشت در ایستگاه تبریز پرداختند. ایشان نشان دادند که روش‌های رگرسیونی از توانایی زیادی در تخمین از تبخیر ایستگاه تبریز برخوردار می‌باشند.

مرور پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که تاکنون به‌طور جامع اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی روی میزان ET_0 ایستگاه‌های مختلف ایران به‌ویژه استان آذربایجان غربی مطالعه نشده است. هرچند از روش تجزیه علیت در سایر زمینه‌های کشاورزی مانند زراعت و دامپروری استفاده شده است، ولیکن در زمینه ارتباط پارامترهای هواشناسی با ET_0 به روش تجزیه علیت، مطالعات در سطح جهانی نیز بسیار محدود و انگشت‌شمار می‌باشد. استفاده از این روش، برای اولین بار در مطالعات اقلیمی یا هیدرولوژیکی نوآوری مطالعه حاضر محسوب می‌شود. به‌همین دلیل، هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی روی ET_0 با استفاده از روش تجزیه‌علیت (تحلیل مسیر) می‌باشد. در این پژوهش برای تخمین ET_0 از روش FAO 56-PM استفاده شد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان غربی دارای مساحت ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع است که در عرض جغرافیائی ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیائی ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و۲۳ دقیقه شرقی در شمال‌غربی ایران قرار گرفته است. در این مطالعه، برای تخمین ET_0 با روش FAO-56 PM (آلن و پروت[1]، ۱۹۹۱) از پارامترهای هواشناسی شامل: میانگین حداقل درجه حرارت هوا (T_{max})، میانگین حداکثر درجه حرارت هوا (T_{max})، میانگین حداقل رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، میانگین حداکثر رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، میانگین سرعت باد (U) و تعداد ساعات آفتابی واقعی (n) به صورت ماهانه استفاده شد. جدول(۱)، مشخصات

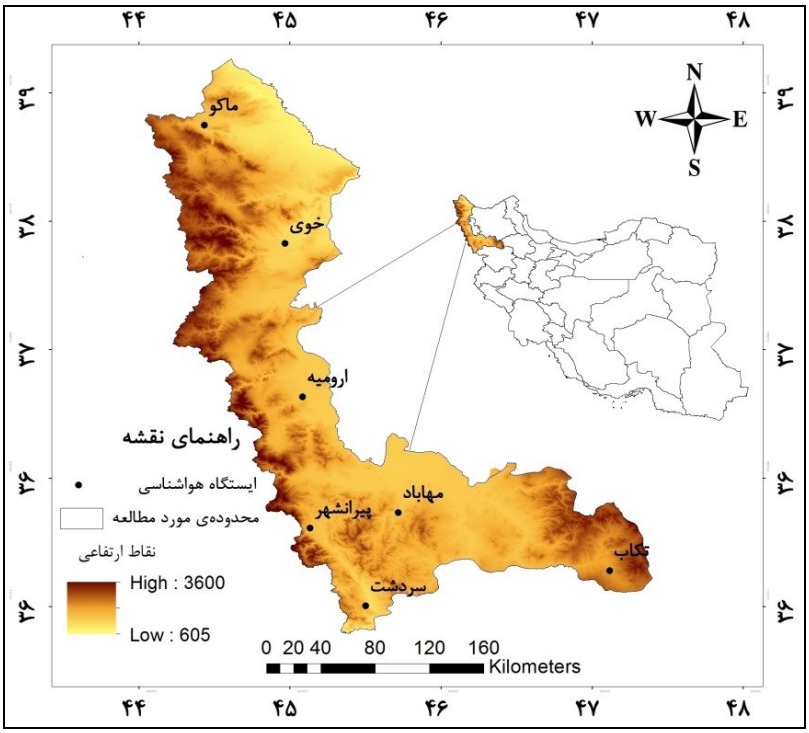
[1]- Allen & Pruitt

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

ایستگاه‌های هواشناسی منتخب و طول دوره آماری آن‌ها و شکل(۱)، موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها را بر روی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول(۱). مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در استان آذربایجان غربی.

ردیف	ایستگاه	دوره آماری	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی		طول جغرافیایی	
				دقیقه	درجه	دقیقه	درجه
۱	ارومیه	۲۰۱۵- ۱۹۸۰	۱۳۱۵/۹	۳۲	۳۷	۵	۴۵
۲	پیرانشهر	۲۰۱۵- ۱۹۸۷	۱۴۵۵	۴۰	۳۶	۸	۴۵
۳	تکاب	۲۰۱۵- ۱۹۸۶	۱۷۶۵	۲۳	۳۶	۷	۴۷
۴	خوی	۲۰۱۵- ۱۹۸۵	۱۱۰۳	۳۳	۳۸	۵۸	۴۴
۵	سردشت	۲۰۱۵- ۱۹۹۶	۱۶۷۰	۹	۳۶	۳۰	۴۵
۶	ماکو	۲۰۱۵- ۱۹۸۶	۱۴۱۱/۳	۲۰	۳۹	۲۶	۴۴
۷	مهاباد	۲۰۱۵- ۱۹۸۵	۱۳۸۵	۴۶	۳۶	۴۳	۴۵



شکل(۱). موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در منطقه‌ی مورد مطالعه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

مدل رگرسیون خطی چندگانه[1] (MLR)

ارتباط خطی بین متغیرهای مستقل $X_1, X_2, \ldots, X_n$ و متغیر Y در مدل رگرسیون چندگانه خطی به شرح رابطه(۱) می‌باشد:

$$Y= a_0+a_1x_1+ a_2x_2+ \ldots + a_nx_n+e$$ رابطه (۱)

در رابطه(۱)، a_0 عرض از مبدا و $a_1, a_2, \ldots, a_n$ ضرایب رگرسیونی و e میزان خطا می‌باشند (بالان[2] و همکاران، ۱۹۹۵).

مدل رگرسیون چندگانه خطی در حالت ماتریسی به‌شرح رابطه(۲) نوشته می‌شود:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$ رابطه(۲)

در رابطه‌ی (۲)، β: بردار ضرایب رگرسیون، ε: ماتریس خطای برازش، Y: بردار نظیر متغیر وابسته و X: ماتریس متغیرهای مستقل می‌باشند که به شرح رابطه(۳) تعریف می‌شوند:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_n \\ Y_n \\ . \\ . \\ . \\ Y_n \end{bmatrix}$$ رابطه(۳)

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & . & . & . & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & . & . & . & x_{2p} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & . & . & . & x_{np} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ . \\ . \\ . \\ \beta_p \end{bmatrix} \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ . \\ . \\ . \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

حل رابطه (۲) برحسب بردار β با استفاده از رابطه ماتریسی(۴) انجام شد:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}(X'Y)$$ رابطه(۴)

در رابطه‌ی (۴): X': ترانهاده ماتریس X است. برای محاسبه معکوس ماتریس $(X'X)$، لازم است دترمینان عبارت فوق صفر نگردد. در این مطالعه مدل رگرسیون خطی برای متغیرهای مشاهداتی مورد استفاده قرار گرفت.

1- Multiple Liner Regression
2 -Balan

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

تجزیه علیت[1]

تجزیه علیت برای اولین بار در سال ۱۹۲۱ توسط رایت ارائه شد. امروزه این روش به‌طور گسترده‌ای در مطالعات کشاورزی و تقاضای انرژی برای آشکار کردن اثرات مستقیم و غیرمستقیم بین برخی ویژگی‌های موثر بر پارامتر وابسته استفاده می‌شود (یو[2] و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶)، با این حال، مطالعات کمی در مورد استفاده از این روش جهت بررسی عوامل موثر بر ET_0 وجود دارد. تجزیه علیت (تحلیل مسیر) یکی از انواع تحلیل‌های آماری چندگانه برای مطالعه‌ی روابط بین متغیرها می‌باشد. براساس این تحلیل می‌توان به-میزان تاثیر متغیرهای مستقل (مستقیم و غیرمستقیم) روی متغیر وابسته پی برد (کای[3] و همکاران، ۲۰۰۸). در این روش ضرایب همبستگی (بین دو صفت) به اجزایی که اثرات مستقیم و غیرمستقیم را اندازه‌گیری می-کنند، تفکیک می‌گردد (زکی‌زاده[4] و همکاران، ۲۰۱۰). در اثر مستقیم، اثر هر پارامتر هواشناسی بر تبخیر-تعرق گیاه مرجع بصورت مستقیم محاسبه می‌گردد، در اثر غیرمستقیم اثر هر پارامتر هواشناسی از طریق تاثیر سایر پارامترها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. به عبارت بهتر اثر مستقیم در رابطه با میزان همبستگی موجود فیمابین متغیر وابسته (در مطالعه حاضر: تبخیر-تعرق) با یک متغیر مستقل مانند رطوبت نسبی هوا می‌باشد. اثر غیرمستقیم میزان همبستگی موجود بین متغیر وابسته (در این مطالعه تبخیر-تعرق) با متغیر مستقل رطوبت نسبی هوا از طریق مسیر دیگر (غیر از مسیر اصلی) می‌باشد. مثلا تغییر در میزان پارامتر دیگر هواشناسی (مانند دمای هوا) خود موجب تغییر در رطوبت نسبی هوا شده و در نتیجه، بطور غیرمستقیم تغییر در میزان دمای هوا با اثر بر میزان رطوبت نسبی هوا موجب تغییر در مقدار تبخیر- تعرق می شود. میزان تاثیر غیرمستقیم در رابطه با میزان همبستگی جزئی موجود بین دو پارامتر دمای هوا و رطوبت نسبی هوا است. یعنی بخشی از افزایش تبخیر-تعرق ناشی از اثر این افزایش دما بر کاستن از میزان رطوبت نسبی هوا و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق باید در نظر گرفته شود، تجزیه علیت می‌تواند اثرات مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای مستقل را بر روی متغیر وابسته بطور کمی معین کند. در مطالعه‌ی حاضر، متغیر وابسته مقدار ET_0 در ماه اوت (گرمترین ماه سال) و متغیرهای مستقل شامل پارامترهای (T_{max}، T_{min}، RH_{max}، RH_{min}، U و n) در نظر گرفته شدند.

ضریب علیت[5]

نوعی تجزیـه‌ی رگرسـیون جزئـی و استاندارد شده است که بی‌بعد بوده و ضریب روابط علت و معلولی را برای متغیرها توصیف می‌کند، همچنین این ضریب، همبستگی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل را در نظر می‌گیرد (کای و همکاران، ۲۰۰۸).

---

[1] - Path analysis
[2] -Yu
[3]- Cai
[4] - Zakizadeh
[5] - Path Coefficient

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

برای یک سامانه همبسته با یک متغیر وابسته به‌نام y (مانند ET_0 در این مطالعه) و n متغیر مستقل به‌نام x_i (i=1,2,…,n)، رابطه(۵) در نظر گرفته شد (خینگ[1] و همکاران، ۲۰۱۶) :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n$$ رابطه(۵)

برای تعیین ضرایب مسیر P_{yx_i} $(i = 1,2,\cdots,n)$ دستگاه n معادله n مجهولی به‌شرح رابطه(۶) تشکیل گردید. پس از جایگزاری مقادیر ضرایب همبستگی جزئی ساده متغیرهای مستقل با همدیگر ($r_{i,j}$) در ماتریس مربعی n×n و مقادیر ضرایب همبستگی جزئی ساده بین هر یک از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته (r_{yx_i}) در بردار n×1 (طرف راست تساوی) مقادیر مجهولات (یا ضرایب مسیر یا p_{yx_i}) بدست آمد.

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_nx_1} & \cdots & r_{x_1x_n} \\ r_{x_2x_1} & 1 & \cdots & r_{x_1x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_nx_1} & r_{x_nx_2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} P_{yx_1} \\ P_{yx_2} \\ \vdots \\ P_{yx_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1y} \\ r_{x_2y} \\ \vdots \\ r_{x_ny} \end{bmatrix}$$ رابطه(۶)

که در رابطه(۶): $r_{x_ix_j}$ ضریب همبستگی ساده بین دو متغیر مستقل x_i و x_j بوده و P_{yx_i} ضرایب مسیر می‌باشند که از رابطه(۷) برآورد شد:

$$P_{yx_i} = b_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}, \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$ رابطه(۷)

در رابطه(۷) : b_i $(i = 1,2,\cdots,n)$: ضرایب رگرسیون خطی جزئی y نسبت به x_i (ضرایب رابطه ۱) می‌باشند. در رابطه‌ی(۲)، σ_{x_i} و σ_y به‌ترتیب، انحراف معیار سری‌های نظیر x_i و y می‌باشند (به‌عنوان مثال: σ_{x_1} انحراف معیار اولین متغیر مستقل هواشناسی می‌باشد و σ_y انحراف معیار مقادیر ET_0 در ماه اوت می‌باشد). P_{yx_i} عبارت است از اثر مستقیم ضریب مسیر x_i روی y و نیز حاصلضرب $r_{x_ix_j}$ در P_{yx_i} را می‌توان برای توصیف ضریب علیت غیرمستقیم x_i از طریق x_j برای y استفاده کرد. لازم به ذکر است که برای استفاده از رابطه(۳) لازم است ابتدا مقادیر b_i $(i = 1,2,\cdots,n)$ با روش MLR رابطه(۵) بدست آید. آنگاه به‌ازای b های بدست آمده مقادیر P_{yx_i} را حساب کرد. هر دو روش، یعنی حل دستگاه معادلات (به‌شکل ماتریسی) در رابطه(۶) و استفاده از فرمول رابطه(۷) در نهایت به یک جواب منتهی می‌شوند. واضح است چنانچه ماتریس مربعی ضرایب همبستگی جزئی با درایه‌های $r_{x_ix_j}$ منفرد باشد (یعنی دترمینان آن صفر باشد) در این صورت ماتریس ذکر شده در رابطه(۲)، عکس نخواهد داشت، در صورت برخورد با چنین شرایطی اثرات مستقیم متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته (ET_0) با استفاده از رابطه(۳) به‌دست آمد (خینگ و همکاران، ۲۰۱۶). روش تجزیه علیت تحت شرایطی که ذکر می‌شود، قابل کاربرد است:

۱- رابطه بین متغیرهای مستقل به همدیگر پیچیده و تعداد آن‌ها نسبتا زیاد باشد.

[1] -Xing

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

۲- برخی از متغیرهای مستقل هواشناسی اثر غیرمستقیم (از طریق دیگر متغیرهای مستقل یا پارامترهای هواشناسی دیگر) بر روی متغیر وابسته (ET_0) داشته باشند، ولی اندرکنش بین متغیرهای مستقل برهمدیگر غیرقابل اغماض باشد. بنابراین، هر متغیر هواشناسی هم دارای اثر مستقیم روی ET_0 می‌باشد و هم از طریق متغیرهای دیگر اثر غیرمستقیم بر آن دارد. اثرات مستقیم با استفاده از تجزیه علیت با ضرایب مسیر (P_{yx_i}) قابل تشخیص است.

در این مطالعه، نه‌تنها اثرات همه‌ی پارامترهای هواشناسی روی متغیر وابسته (ET_0) محاسبه شد، بلکه با روش تجزیه علیت، اندرکنش متغیرهای مستقل هواشناسی با یکدیگر (که غیرقابل چشم‌پوشی است) لحاظ گردید و اثرات غیرمستقیم هر پارامتر هواشناسی از طریق پارامتر هواشناسی دیگر بر مقدار ET_0 بدست آمد. در مطالعه-ی حاضر، ماه اوت به عنوان نماینده گرمترین ماه سال جهت بررسی انتخاب شد. ابتدا جهت برآورد ET_0، از فرمول FAO-56-PM استفاده شد. در ادامه، مقدار ET_0 با استفاده از رگرسیون گام به گام نیز تخمین زده شد. در روش گام به گام، برای برآورد ET_0، از پارامترهای ورودی به مدل رگرسیون گام به گام استفاده شد. سپس ضریب همبستگی[1] (r_{yx_i}) بین ET_0 و هر یک از پارامترهای هواشناسی به دست آمد، در ادامه تاثیر اثرات مستقیم (P) و غیرمستقیم هر یک از پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 با استفاده از روش تجزیه علیت محاسبه شد و در نهایت مقدار نرخ سهم مشارکت[2] R_{dc} هر یک از پارامترهای هواشناسی روی ET_0 بدست آمد. برای محاسبه‌ی نرخ سهم مشارکت (R_{dc}^i) پارامتر i ام در مقدار ET_0 از رابطه(۸) استفاده شد:

$$R_{dc}^i = r_i P_i$$ رابطه(۸)

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون گام به گام از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ضریب ناش-ساتکلیف (NSH) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید. فرمول‌های روابط استفاده شده برای این آماره‌ها عبارتند از:

جذر میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(E_i - C_i)^2}$$ رابطه(۹)

میانگین قدرمطلق خطا (MAE):

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}|E_i - C_i|$$ رابطه(۱۰)

ضریب تعیین (R^2) (لیو و همکاران، ۲۰۱۶):

[1] - Correlation Coefficient
[2] - Decision Contribution Rates

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{M}(C_i-\hat{C})(E_i-\hat{E})]^2}{\sum_{i=1}^{M}(C_i-\hat{C})^2\sum_{i=1}^{n}(E_i-\hat{E})^2}$$ رابطه(۱۱)

ضریب ناش- ساتکلیف (NSH):

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{M}(C_i-E_i)^2}{\sum_{i=1}^{M}(C_i-\hat{C})^2}$$ رابطه(۱۲)

در روابط(۹-۱۲):

M: تعداد داده‌ها، C_i: مقدار تبخیر– تعرق به‌دست آمده از فرمول FAO- 56- PM (میلی‌متر بر روز)، $\hat{C}$: میانگین مقدار تبخیر- تعرق بدست آمده از فرمول FAO-56-P (میلی‌متر بر روز)، E_i : مقدار تبخیر– تعرق تخمین زده شده از مدل رگرسیون چندگانه خطی (میلی‌متر بر روز) و $\hat{E}$: میانگین مقدار تبخیر- تعرق تخمین زده شده از مدل رگرسیون چندگانه خطی (میلی‌متر بر روز) می‌باشد (لیو و همکاران[1]، ۲۰۱۶).

در این مطالعه، واحد مقادیر RMSE و MAE میلی‌متر بر روز و R^2 بی‌بعد می‌باشد. هرچه R^2 به یک نزدیک شود، عملکرد مدل خوب ارزیابی می‌گردد در این شرایط، معمولا مقادیر RMSE و MAE به سمت صفر میل می‌کند. مقدار ضریب ناش-ساتکلیف مابین منهای بی‌نهایت و ۱ می‌باشد. اگر این آماره به یک نزدیک باشد عملکرد مدل خوب بوده و معمولا در این شرایط میزان آماره‌های خطا (RMSE و MAE) پایین خواهد بود. (بانژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

نتایج

جدول(۱) نتایج ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون گام به گام برای ماه اوت که به‌عنوان نماینده ماه گرم انتخاب شد است را برای ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. همانگونه که از جدول مشخص است؛ در ایستگاه‌های ارومیه، پیرانشهر، تکاب، خوی، سردشت و مهاباد، سرعت باد به‌عنوان اولین پارامتر مهم ورودی به مدل بوده و در ایستگاه ماکو RH_{max} به‌عنوان اولین پارامتر ورودی به مدل بودند. معلوم شد از بین شش پارامتر هواشناسی موثر بر ET_0 در ایستگاه ارومیه دو پارامتر، در ایستگاه خوی سه پارامتر و در سایر ایستگاه‌ها چهار پارامتر در مدل MLR معنی‌دار بودند. پارامتر T_{max} در تمامی ایستگاه‌ها (بجز ایستگاه‌های ارومیه و سردشت) یکی از پارامترهای ورودی به مدل MLR بود. پارامتر ذکر شده در ایستگاه‌های پیرانشهر، تکاب، خوی و مهاباد، دومین پارامتر و در ایستگاه ماکو به‌عنوان آخرین پارامتر ورودی به مدل شناخته شد. پارامتر RH_{max} در ماکو به‌عنوان اولین پارامتر ورودی به مدل و در ایستگاه مهاباد به عنوان آخرین پارامتر ورودی شناخته شد، پارامتر RH_{min} در ایستگاه‌های پیرانشهر، تکاب و سردشت به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی به مدل بشمار می‌رود، پارامتر T_{min} در ایستگاه ارومیه به‌عنوان دومین و در سردشت به‌عنوان سومین پارامتر موثر شناخته شد، درحالی‌که در بقیه-ی ایستگاه‌ها از سوی مدل به عنوان پارامتر غیرمهم شناخته شده و از مدل حذف گردیده است. پارامتر n در همه ایستگاه‌ها (بجز ارومیه) به‌عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر ET_0 در مدل شناخته شد. مقدار آماره R^2 در بین ایستگاه‌ها از حداقل ۰/۹۰ در ایستگاه ارومیه تا حداکثر ۰/۹۹ میلی‌متر در روز در ایستگاه‌های خوی و

[1]- Liu et al

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

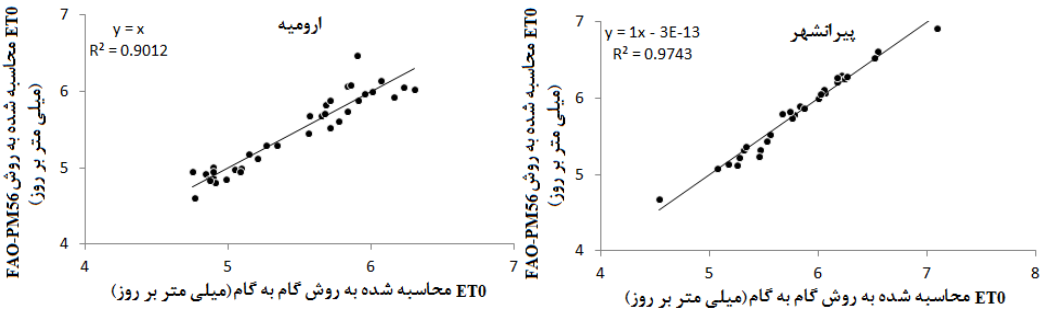
سردشت تغییر می‌کند. مقدار RMSE نیز از حداقل ۰/۰۶ در ایستگاه‌های تکاب، ماکو و مهاباد تا ۰/۱۶ میلی‌متر در روز در ایستگاه ارومیه تغییر می‌کند. آماره NSH در بین ایستگاه‌ها، از حداقل ۰/۸۹ در ایستگاه ارومیه تا حداکثر ۰/۹۹ در ایستگاه‌های تکاب و سردشت تغییر می‌کند و در نهایت MAE از حداقل ۰/۰۴ در ایستگاه ماکو تا حداکثر ۰/۱۲ در ایستگاه ارومیه تغییر می‌کند. با توجه به جدول(۲)، مقدار R^2 و NSH مقادیر بالایی به خود اختصاص داده‌اند و مقادیر RMSE و MAE به سمت صفر میل کرده‌اند که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل در تخمین ET_0 می‌باشد.

نمودارهای مربوط به شکل(۲) نمودار نقاط پراکنش مقادیر ET_0 مشاهداتی را در مقابل مقادیر حاصل از مدل رگرسیونی گام به گام را نشان می‌دهد. به‌طوری که از این شکل می‌توان استنباط کرد در ایستگاه‌های مورد مطالعه پراکنش نقاط حول خط روند می‌باشد و این نشانگر این است که مقدار تبخیر مشاهداتی با مقدار مشاهداتی تفاوت محسوسی نشان نمی‌دهد.

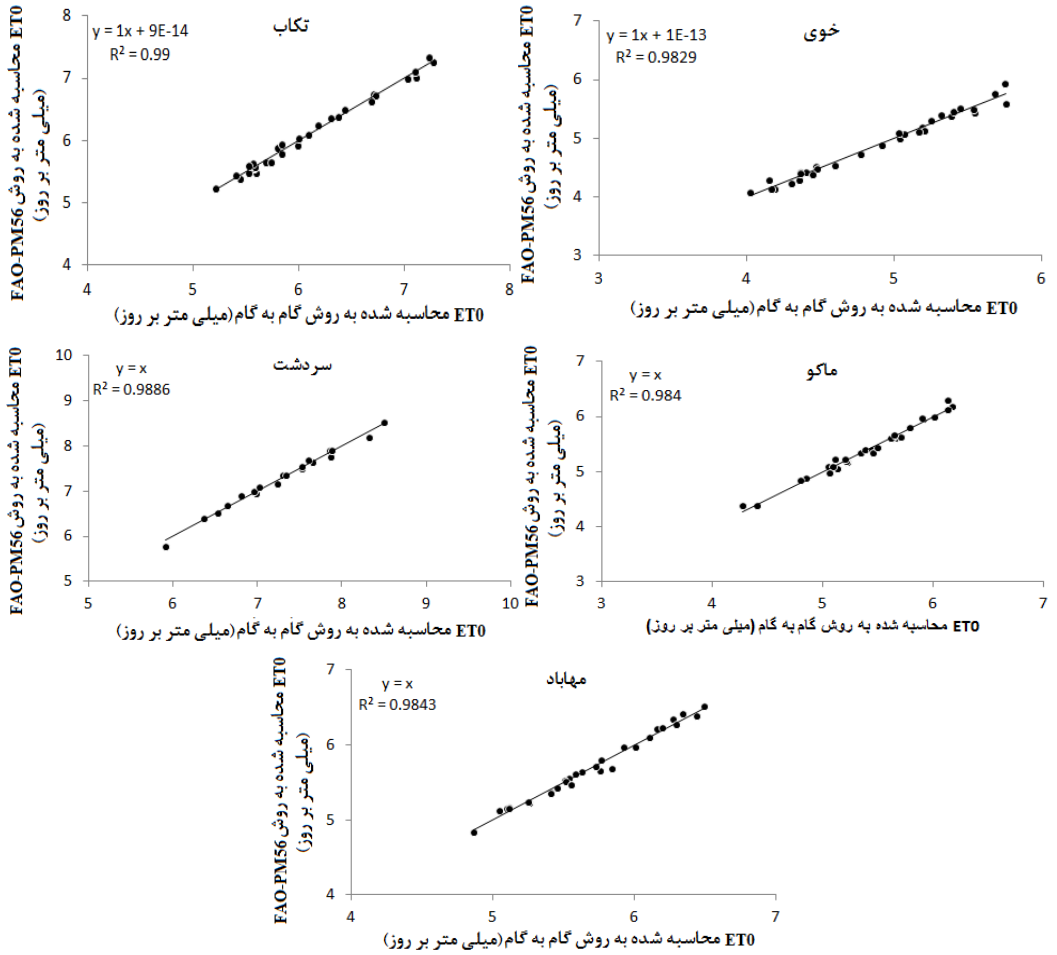
در مطالعه حاضر از شش پارامتر هواشناسی مذکور، جهت تخمین اثرات مستقیم هر پارامتر روی ET_0 استفاده شد. تعیین اثرات مستقیم هر پارامتر بر روی ET_0 بسیار دشوار است. لذا در این مواقع می‌توان از تجزیه‌علیت به عنوان یک روش موثر جهت مشخص نمودن اثرات مستقیم و غیرمستقیم هر پارامتر روی ET_0 استفاده کرد.

جدول(۲) ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون خطی به روش گام به گام.

ردیف	ایستگاه	پارامترهای ورودی به ترتیب از چپ به راست	RMSE (mm)	MAE (mm)	R^2	NSH	Cumulative Rdc
۱	ارومیه	U, T_{min}.	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۸۴
۲	پیرانشهر	U, T_{max},RH_{min}, n.	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۱/۰۱
۳	تکاب	U, T_{max}, n, RH_{min}.	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷
۴	خوی	U, T_{max}, n.	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۵
۵	سردشت	U, RH_{min}, t_{min},n.	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۱
۶	ماکو	RH_{max}, U, n, T_{max}.	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۸۶
۷	مهاباد	U, T_{max},n,RH_{max}	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۰۳



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]



شکل(۲). نمودارهای نقاط پراکنش ET_0 محاسبه شده به روش گام به گام (میلی‌متر بر روز) و محاسبه شده به روش فائو-پنمن مانتیث ۵۶ (میلی‌متر بر روز) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ماه اوت.

جدول(۳) ماتریس ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل با یکدیگر در ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. در حالت کلی همه‌ی متغیرهای اقلیمی روی ET_0 اثر می‌گذارند که مقدار این اثر می‌تواند مثبت یا منفی بوده و از متغیری به متغیر دیگر متفاوت باشد. به‌طوری که از جدول(۲) می‌توان استنباط کرد، بیشترین ضریب همبستگی برای متغیر T_{max} به طور مثال در ایستگاه ارومیه متعلق به RH_{min} (معادل، ۰/۶۷-) می‌باشد، بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درجه حرارت هوا مقدار رطوبت نسبی آن کاهش می‌یابد. پس از متغیر RH_{min}، متغیر ساعات آفتابی بیشترین همبستگی مثبت (۰/۴۶) با متغیر T_{max} را دارد. کمترین مقدار ضریب همبستگی بین T_{max} و متغیرهای هواشناسی متعلق به پارامتر حداکثر رطوبت نسبی (۰/۳۶-) می‌باشد. بیشترین و کمترین ضرایب همبستگی برای متغیر حداکثر رطوبت نسبی بترتیب متعلق به پارامترهای حداقل رطوبت نسبی (۰/۶۳) و سرعت باد (۰/۲۴) می‌باشند. همچنین بیشترین و کمترین ضرایب همبستگی برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

متغیر سرعت باد متعلق به پارامترهای حداکثر درجه حرارت هوا (۰/۳۷) و حداقل درجه حرارت هوا (۰/۰۱-) می‌باشند. همانطور که از جدول(۲) مشاهده می‌شود، کمترین همبستگی پارامترهای هواشناسی در اکثر ایستگاه‌ها ، مربوط به پارامترهای ساعات آفتابی و سرعت باد می‌باشند. بنابراین می‌توان دریافت که در ماه اوت در ایستگاه‌های مورد مطالعه، ساعات آفتابی و سرعت باد همبستگی نسبتا کمتری با متغیرهای هواشناسی (در مقایسه با دیگر متغیرها) دارند.

جدول(۳). ضریب همبستگی متغیرهای مستقل با یکدیگر در ایستگاه های مورد مطالعه.

نام ایستگاه	پارامترهای هواشناسی	T_{max}	T_{min}	Rh_{min}	Rh_{max}	U	n
ارومیه	T_{max}	۱/۰۰	۰/۴۲	-۰/۶۷	-۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۴۶
	T_{min}	۰/۴۲	۱/۰۰	-۰/۲۰	-۰/۴۳	-۰/۰۱	۰/۰۸
	Rh_{min}	-۰/۶۷	-۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۶۳	-۰/۲۲	-۰/۵۹
	Rh_{max}	-۰/۳۶	-۰/۴۳	۰/۶۳	۱/۰۰	۰/۲۳	-۰/۴۰
	U	۰/۳۷	-۰/۰۱	-۰/۲۲	۰/۲۳	۱/۰۰	۰/۰۷
	N	۰/۴۶	۰/۰۸	-۰/۵۹	-۰/۴۰	۰/۰۷	۱/۰۰
پیرانشهر	T_{max}	۱/۰۰	۰/۶۶	-۰/۶۴	-۰/۵۵	-۰/۱۳	۰/۱۵
	T_{min}	۰/۶۶	۱/۰۰	-۰/۴۳	-۰/۴۲	۰/۰۷	-۰/۲۹
	Rh_{min}	-۰/۶۴	-۰/۴۳	۱/۰۰	۰/۸۸	۰/۱۴	-۰/۱۷
	Rh_{max}	-۰/۵۵	-۰/۴۲	۰/۸۸	۱/۰۰	-۰/۱۸	-۰/۰۴
	U	-۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۱۴	-۰/۱۸	۱/۰۰	-۰/۱۰
	N	۰/۱۵	-۰/۲۹	-۰/۱۷	-۰/۰۴	-۰/۱۰	۱/۰۰
تکاب	T_{max}	۱/۰۰	۰/۵۱	-۰/۳۲	-۰/۵۷	۰/۱۴	۰/۲۵
	T_{min}	۰/۵۱	۱/۰۰	-۰/۱۱	-۰/۲۰	۰/۲۸	-۰/۴۵
	Rh_{min}	-۰/۳۲	-۰/۱۱	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۰۵	-۰/۰۹
	Rh_{max}	-۰/۵۷	-۰/۲۰	۰/۷۵	۱/۰۰	۰/۰۶	-۰/۱۷
	U	۰/۱۴	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۱/۰۰	-۰/۳۱
	N	۰/۲۵	-۰/۴۵	-۰/۰۹	-۰/۱۷	-۰/۳۱	۱/۰۰
خوی	T_{max}	۱/۰۰	۰/۸۲	-۰/۷۹	-۰/۷۶	۰/۴۱	۰/۰۸
	T_{min}	۰/۸۲	۱/۰۰	-۰/۶۹	-۰/۷۱	۰/۶۳	-۰/۰۹
	Rh_{min}	-۰/۷۹	-۰/۶۹	۱/۰۰	۰/۹۵	-۰/۵۶	۰/۰۵
	Rh_{max}	-۰/۷۶	-۰/۷۱	۰/۹۵	۱/۰۰	-۰/۵۸	۰/۰۲
	U	۰/۴۱	۰/۶۳	-۰/۵۶	-۰/۵۸	۱/۰۰	-۰/۲۶
	N	۰/۰۸	-۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۲۶	۱/۰۰
سردشت	T_{max}	۱/۰۰	۰/۹۳	-۰/۶۱	-۰/۳۷	-۰/۳۱	-۰/۶۸
	T_{min}	۰/۹۳	۱/۰۰	-۰/۶۵	-۰/۵۵	-۰/۳۲	-۰/۶۵
	Rh_{min}	-۰/۶۱	-۰/۶۵	۱/۰۰	۰/۴۰	۰/۰۶	۰/۳۱
	Rh_{max}	-۰/۳۷	-۰/۵۵	۰/۴۰	۱/۰۰	۰/۴۶	۰/۲۲
	U	-۰/۳۱	-۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۴۶	۱/۰۰	-۰/۰۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

	N	-۰/۶۸	-۰/۶۵	۰/۳۱	۰/۲۲	-۰/۰۱	۱/۰۰
ماکو	T_{max}	۱/۰۰	۰/۹۳	-۰/۷۳	-۰/۸۲	۰/۵۳	۰/۱۳
	T_{min}	۰/۹۳	۱/۰۰	-۰/۶۴	-۰/۷۲	۰/۴۶	۰/۱۵
	Rh_{min}	-۰/۷۳	-۰/۶۴	۱/۰۰	۰/۸۹	-۰/۵۴	-۰/۱۸
	Rh_{max}	-۰/۸۲	-۰/۷۲	۰/۸۹	۱/۰۰	-۰/۶۲	-۰/۱۸
	U	۰/۵۳	۰/۴۶	-۰/۵۴	-۰/۶۲	۱/۰۰	-۰/۳۰
	N	۰/۱۳	۰/۱۵	-۰/۱۸	-۰/۱۸	-۰/۳۰	۱/۰۰
مهاباد	T_{max}	۱/۰۰	۰/۷۲	-۰/۷۰	-۰/۷۶	-۰/۰۱	-۰/۰۸
	T_{min}	۰/۷۲	۱/۰۰	-۰/۵۵	-۰/۷۷	۰/۳۳	-۰/۱۷
	Rh_{min}	-۰/۷۰	-۰/۵۵	۱/۰۰	۰/۸۳	۰/۰۲	-۰/۰۳
	Rh_{max}	-۰/۷۶	-۰/۷۷	۰/۸۳	۱/۰۰	-۰/۱۸	-۰/۱۱
	U	-۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۰۲	-۰/۱۸	۱/۰۰	۰/۱۷
	N	-۰/۰۸	-۰/۱۷	-۰/۰۳	-۰/۱۱	۰/۱۷	۱/۰۰

نتایج حاصل از تجزیه‌ی علیت پارامترهای هواشناسی با ET_0 در جدول(۴) نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، سرعت باد در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین همبستگی با ET_0 را دارا می‌باشد. نتایج حاصل، تا حدودی مغایر با نتایج به دست آمده توسط خینگ و همکاران (۲۰۱۶) می‌باشد. در مطالعه‌ی ایشان، پارامتر ساعات آفتابی بیشترین ضریب همبستگی مثبت با ET_0 را دارا می‌باشند، در حالی که در مطالعه‌ی حاضر سرعت باد دارای بیشترین ضریب همبستگی مثبت با ET_0 است. همچنین در پژوهش ایشان پارامتر حداکثر درجه حرارت هوا به عنوان دومین پارامتر مهم معرفی شده است که همبستگی بالایی با ET_0 دارد. در تحقیق حاضر نیز در ۴ ایستگاه، پارامتر حداکثر درجه حرارت هوا به عنوان دومین پارامتر مهم مطرح است. در مطالعه‌ی لیو و همکاران (۲۰۱۶)، پارامتر ساعات آفتابی، بیشترین ضریب همبستگی مثبت با ET_0 را دارا می-باشد که کاملا مغایر با یافته‌های تحقیق حاضر می‌باشد. در تحقیق ایشان نیز حداکثر درجه حرارت هوا به عنوان دومین پارامتر مهم شناخته شده است که با ET_0 همبستگی مثبت معنی‌داری دارد. در تحقیق خینگ و همکاران (۲۰۱۶) و لیو و همکاران (۲۰۱۶) پارامتر سرعت باد کمترین میزان ضریب همبستگی با ET_0 را به خود اختصاص داده است، در حالیکه در تحقیق حاضر پارامتر ذکر شده بیشترین میزان ضریب همبستگی با ET_0 را به خود اختصاص می‌دهد.

بیشترین مقدار P (اثر مستقیم پارامترهای هواشناسی بر ET_0) در همه‌ایستگاه‌ها متعلق به سرعت باد می‌باشد که مقدار آن برای ایستگاه ارومیه؛ ۰/۸۵، ایستگاه پیرانشهر؛ ۰/۹۹، ایستگاه تکاب؛ ۰/۹۷ ، ایستگاه خوی؛ ۰/۹۰، ایستگاه سردشت؛ ۱/۰۶؛ ایستگاه ماکو؛ ۰/۶۴ و ایستگاه مهاباد؛ ۰/۷۸ می‌باشد. در مطالعات لیو و همکاران (۲۰۱۶) بیشترین مقدار اثر مستقیم مربوط به پارامتر ساعات آفتابی می‌باشد که با نتایج حاضر در پژوهش حاضر متفاوت است. همچنین در مطالعه‌ی ایشان پارامتر حداکثر درجه حرارت هوا تاثیر مستقیم کمتری بر میزان ET_0 را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، تنها در ایستگاه ارومیه پارامتر حداکثر درجه حرارت هوا اثر مستقیم کمتری بر ET_0 را نشان داد. R_{dc}، یکی از شاخص‌های مهم تجزیه‌ی علیت می‌باشد که سهم اثر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

مستقیم هر یک از پارامترهای هواشناسی روی ET_0 را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر پارامتر سرعت باد بیشترین میزان R_{dc} را به خود اختصاص داده است، بنابراین می‌توان ادعا کرد که پارامتر سرعت باد بیشترین سهم را در میزان ET_0 در منطقه‌ی مورد مطالعه به خود اختصاص داده است.

جدول(۴). اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 در ایستگاه‌های موری مطالعه.

ایستگاه	پارامترهای هواشناسی	r (ضریب همبستگی)	P (اثر مستقیم)	اثرات غیرمستقیم						Rdc
				T_{max}	T_{min}	RH_{min}	RH_{max}	U	n	
ارومیه	T_{max}	۰/۵۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۰۴	۰/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۳
	T_{min}	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۰۲	-۰/۰۵	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۶
	Rh_{min}	-۰/۳۲	-۰/۱۲	-۰/۰۳	-۰/۰۵	-۰/۱۲	۰/۰۷	-۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۴
	Rh_{max}	۰/۱۱	۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۱۱	-۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۱
	U	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۸۵	۰/۰۰	۰/۷۸
	N	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۷	-۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰
پیرانشهر	T_{max}	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۱۷	-۰/۰۶	-۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۵
	T_{min}	۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۱۲	-۰/۰۵	۰/۰۷	-۰/۰۳	۰/۰۲
	Rh_{min}	-۰/۲۰	-۰/۲۷	-۰/۱۳	-۰/۰۳	-۰/۲۷	۰/۱۰	۰/۱۴	-۰/۰۲	۰/۰۵
	Rh_{max}	-۰/۴۵	۰/۱۱	-۰/۱۱	-۰/۰۳	-۰/۲۴	۰/۱۱	-۰/۱۸	۰/۰۰	-۰/۰۵
	U	۰/۹۱	۰/۹۹	-۰/۰۳	۰/۰۰	-۰/۰۴	-۰/۰۲	۰/۹۹	-۰/۰۱	۰/۹۰
	N	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۳	-۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۰	-۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۰
تکاب	T_{max}	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۶
	T_{min}	۰/۳۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۷	-۰/۱۰	۰/۰۱
	Rh_{min}	-۰/۱۷	-۰/۰۹	-۰/۰۵	۰/۰۰	-۰/۰۹	-۰/۰۵	۰/۰۵	-۰/۰۲	۰/۰۲
	Rh_{max}	-۰/۲۱	-۰/۰۷	-۰/۰۸	-۰/۰۱	-۰/۰۷	-۰/۰۷	۰/۰۶	-۰/۰۴	۰/۰۱
	U	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۷	-۰/۰۷	۰/۹۰
	N	-۰/۰۵	۰/۲۱	۰/۰۴	-۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۳۰	۰/۲۱	-۰/۰۱
خوی	T_{max}	۰/۵۸	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۰۶	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۳۷	۰/۰۱	۰/۱۰
	T_{min}	۰/۷۴	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۷	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۵۶	-۰/۰۱	۰/۰۵
	Rh_{min}	-۰/۶۵	۰/۰۱	-۰/۱۳	-۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۵۱	۰/۰۱	-۰/۰۱
	Rh_{max}	-۰/۶۷	۰/۰۱	-۰/۱۳	-۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۵۳	۰/۰۰	-۰/۰۱
	U	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۰۷	۰/۰۴	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۹۰	-۰/۰۴	۰/۸۷
	N	-۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	-۰/۲۴	۰/۱۴	-۰/۰۱
سردشت	T_{max}	-۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۱	-۰/۳۲	-۰/۰۸	-۰/۰۲
	T_{min}	-۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۳۴	-۰/۰۸	-۰/۰۱
	Rh_{min}	-۰/۱۲	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۱
	Rh_{max}	۰/۳۵	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۳	۰/۴۸	۰/۰۳	-۰/۰۱
	U	۰/۹۷	۱/۰۶	-۰/۰۴	-۰/۰۳	۰/۰۰	-۰/۰۱	۱/۰۶	۰/۰۰	۱/۰۳
	N	-۰/۰۶	۰/۱۲	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۱۲	-۰/۰۱
ماکو	T_{max}	۰/۸۰	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۰۳	۰/۱۰
	T_{min}	۰/۷۳	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۰۷
	Rh_{min}	-۰/۸۰	-۰/۰۸	-۰/۰۹	-۰/۰۶	-۰/۰۸	-۰/۱۸	-۰/۳۵	-۰/۰۴	۰/۰۶
	Rh_{max}	-۰/۸۸	-۰/۲۱	-۰/۱۰	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۲۱	-۰/۴۰	-۰/۰۴	۰/۱۸
	U	۰/۸۶	۰/۶۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۶۴	-۰/۰۶	۰/۵۶
	N	۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	-۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۰۲
مهاباد	T_{max}	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۳	-۰/۰۵	-۰/۰۲	۰/۱۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۱۲
	T_{min}	۰/۵۳	-۰/۰۷	۰/۲۴	-۰/۰۷	-۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲۸	-۰/۰۳	-۰/۰۴

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

	Rh_{min}	-۰/۲۹	۰/۰۲	-۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۰۲	-۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۰	-۰/۰۱
	Rh_{max}	-۰/۵۱	-۰/۱۶	-۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۰۲	-۰/۱۶	-۰/۱۶	-۰/۰۲	۰/۰۸
	U	۰/۹۰	۰/۸۷	۰/۰۰	-۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۸۷	۰/۰۳	۰/۷۸
	N	۰/۳۲	۰/۱۷	-۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۰۵

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از تجزیه علیت، اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 در هفت ایستگاه منتخب در استان آذربایجان غربی در ماه اوت (نماینده‌ی گرمترین ماه سال) بدست آمد و پس از تجزیه و تحلیل آن، نتایج زیر عبارتند از:

۱- با استفاده از مدل رگرسیون گام به گام مشخص شد که در تمامی ایستگاه‌ها (بجز ماکو) پارامتر سرعت باد مهم‌ترین پارامتر ورودی به مدل می‌باشد و در ایستگاه ماکو پارامتر حداکثر رطوبت نسبی به عنوان مهم‌ترین پارامتر ورودی به مدل شناخته شد. پارامتر حداقل دمای هوا در تمامی ایستگاه‌ها (بجز ارومیه و سردشت) به عنوان بی‌تاثیرترین پارامتر از طریق مدل MLR شناخته شد. از نتایج ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی مشخص شد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه، روش مذکور از کارایی بالایی در تخمین میزان ET_0 برخوردار می‌باشد.

۲- بر اساس نتایج حاصل از تجزیه‌ی علیت مشخص شد که در همه‌ی ایستگاه‌ها پارامتر سرعت باد بیشترین اثر مستقیم بر ET_0 را دارا می‌باشد. همچنین با محاسبه‌ی R_{dc} نیز پارامتر ذکر شده بیشترین سهم را در میزان ET_0 نشان می‌دهد.

۳- با استفاده از نتایج حاصل از ضریب همبستگی (r_{yx_i}) بین پارامترهای هواشناسی و ET_0 مشخص شد که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، پارامتر هواشناسی سرعت باد، از بیشترین همبستگی مثبت در سطح معنی‌داری یک درصد با ET_0 دارا می‌باشد.

منابع

بانژاد، حسین؛ کمالی، مهسا؛ امیرمرادی، کیمیا؛ علیایی، احسان. (۱۳۹۲). **تخمین برخی پارامترهای کیفی رودخانه‌ها با استفاده از مدل هیبرید شبکه‌های عصبی- موجکی (منطقه‌ی مطالعاتی: رودخانه جاجرود تهران و قره‌سو کرمانشاه)**. مجله سلامت و محیط، انجمن علمی بهداشت محیط ایران، ۶ (۲): ۲۹۴-۲۷۷.

برزگری، فاطمه و ملکی‌نژاد، حسین. (۱۳۹۵). **بررسی نیاز آبی بخش کشاورزی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت یزد- اردکان)**. مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۴): ۹۵-۸۵.

جعفری، مجید و دین‌پژوه، یعقوب. (۱۳۹۵). **ارزیابی مدل رگرسیون چندمتغیره تیغه‌ای در برآورد تبخیر از تشت**. نشریه علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰ (۱): ۹۷-۸۳.

جعفری، مجید؛ دین‌پژوه، یعقوب و اسدی اسماعیل (۱۳۹۴). **آشنایی با رگرسیون خطی چندگانه و استفاده از آن در شبیه سازی مقادیر تبخیر روزانه تشت**. آب و توسعه پایدار، ۲(۲): ۵۶-۴۷.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]

[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

جهانبخش‌اصل، سعید؛ موحددانش، علی‌اصغر؛ مولوی، احد. (۱۳۸۰). **تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر – تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز**. مجله دانش کشاورزی، ۱۱(۱): ۶۶-۵۱.

سیفی، اکرم؛ میرلطفی، سید مجید؛ و ریاحی، حسین. (۱۳۸۹). **توسعه مدل ترکیبی رگرسیون چندگانه – تحلیل مولفه‌ها و عامل‌های اصلی (MLR-PCA) در پیش‌بینی تبخیر - تعرق مرجع؛ مطالعه موردی: ایستگاه کرمان**. نشریه آب و خاک، ۲۴ (۶): ۱۱۹۶-۱۱۸۶.

محمودی، پیمان؛ علیجانی، بهلول. (۱۳۹۲). **مدل‌بندی رابطه بارشهای سالانه و فصلی با عوامل زمین اقلیم در کردستان**. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۳ (۳۱): ۱۱۲-۹۳.

نوری، روح‌الله؛ اشرفی، خسرو؛ اژدرپور، ابولفضل. (۱۳۸۷). **مقایسه کاربرد روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره براساس تحلیل مولفه‌های اصلی برای پیش‌بینی غلظت میانگین روزانه کربن مونوکسید: بررسی موردی شهر تهران**. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۴ (۱): ۱۵۲-۱۳۵.

Allen, R.G, Pruitt, W.O., (1991), **FAO-24 reference evapotranspiration factors**. J. Irrig. and Drain. Eng, ASCE 117(5):758-773.

Allen, RG., Pereira, LS., Raes, D. and Smith, M., (1998), **Crop Evapotranspiration: Guideline for computing crop requirements FAO irrigation and drainage paper**. No. 56, FAO Rome, Italy.

Balan, B., Mohaghegh, S., Ameri, S., (1995). **State- of- art- in permeability determination from well log data: Part 1- A comparative study.** Model Development, SPE Technical Report 30978:17-25.

Cai, J., Liu, Y., Xu, D., Shi, B., (2008), **Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory.** J. Hydraul., Eng., 39 (1): 83–90.

Dinpashoh, Y., (2006), **Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran.** Agricultural Water Management. 84(1-2): 123-129.

Goyal, R.K., (2004), **Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India)**. Agricultural Water Management, 69:1–11.

Khdkar, D.D., Singh, P.K., Bhakar, S.R., Kothari, M., Jain, H.K., Mudgal, V.D., (2016), **Modeling of Reference Evapotranspiration using Regression Techniques.** International Journal of Agriculture Sciences, 8 (26): 3529-3532.

Ladlani, I., Hauichi, L., Dhemili, L., Hedden, S., Blouze, K, (2012). **Estimation of Daily Reference Evapotranspiration in North of Algeria using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and Multiple Liner Regression (MLR) Models: A Comparative Study**, Arab. J Sci Eng, 39:5959-5969.

Liu, Y., Yu, M., Ma, X., Xing, X., (2016), **Estimating models for reference evapotranspiration with core meteorological parameters via path analysis.** Hydrology Research, 48 (6): 1-15.

Mahida, H.R., Patel, V.N., (2015), **Impact of Climatological Parameters on Reference Crop Evapotranspiration Using Multiple Linear Regression Analysis**, SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE), 2(1): 22-25.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]

Manikumari, N., Vinodhini, G., (2016) **Regression Models for Predicting Reference Evapotranspiration, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, 38(3): 134-139.

Stagnari, F., Galieni, A., Speca, S., Cafiero, G., Pisante, M., (2014). **Effects of straw mulch on growth and yield of durum wheat during transition to conservation agriculture in Mediterranean environment**, Field Crop Res, 167, 51–63.

Talebnejad, R., Sepaskhah, A.R., (2015), **Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter**, Agric, Water Manage, 148, 177–188.

Xing, X., Liu, Y., Zhao, W.G., Kang, D.G., Yu, M., Ma, X., (2016), **Determination of dominant weather parameters on reference evapotranspiration by path analysis theory**, Computers and Electronics in Agriculture, 120: 10-16.

Yu, S.W., Zhu, K.J., Zhang, X., (2012) **Energy demand projection of China using a path-coefficient analysis and PSO-GA approach**, Engerg. Convers, Manage, 53 (1):142–153.

Zakizadeh, M., Esmaeilzadeh Moghaddam, M., Kahrizi, D., (2010), **Study on genetic variation and relationship between plant characteristics and grain yield in long spike bread wheat (Triticum aestivum L.) genotypes using multivariate analysis**. Iranian Journal of Crop Science, 12: 18-30.

Zhang, B.Z., Xu, D., Liu, Y., Li, F.S., Cai, J.B., Du, L.J., (2016), **Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in north China**, Agric., Forest Meteorol., 216: 1–12.

Zhang, X.S., Yan, Y., Hu, Zh., H., (2017) **Using Path Analysis to Identify Impacting Factors of Evapotranspiration at Different Time Scales in Farmland**, Chinese Journal of Agrometeorology, 38(4):201-210.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5]
[DOI: 10.29252/jgs.20.58.163]