

طراحی و اجرای یک مدل ترمودینامیکی به منظور پیش‌بینی دمای حداقل ناشی از تجمع هوای سرد در مناطق کوهستانی (مطالعه موردی در ارتفاعات دربند تهران)

محمد صادق غضنفری مقدم - محمد موسوی بایگی* - سید حسین ثنایی نژاد^۱

تاریخ دریافت: ۸۶/۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۰/۱۰

چکیده

در مناطق کوهستانی وضعیت توپوگرافی زمین عامل ایجاد دماهای پایین می‌باشد. سرما زدگی در این مناطق از نوع تشعشعی بوده و در دره‌ها به اوج خود می‌رسد. در طول شب با سرد شدن ارتفاعات در اثر تابش طول موج بلند، هوای سرد نزدیک زمین بعلت سنگینی به سمت پایین شیب حرکت می‌نماید. این نوع جریان، جریان باد کاتابولیک^۲ نام دارد. (۱) در نتیجه این فرآیند، گودال‌های یخ‌بندان (چاله یخبندان) در این مناطق شکل می‌گیرد. بر اساس قوانین تابشی می‌توان میزان تابش طول موج بلند از سطح زمین را در هر نقطه با داشتن خصوصیات آن محاسبه کرد. در این میان با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۳ منطقه می‌توان به مدل سازی حرکت جریان‌های همرفتی در منطقه پرداخت. نهایتاً با داشتن اطلاعات دشت که از نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی به دست می‌آید، می‌توان میزان کاهش دما را در دره‌ها و مناطق کوهستانی را به دست آورد. به منظور بررسی دینامیکی این موضوع و کمی کردن مقدار افت دما و همچنین پیش‌بینی دمای حداقل برای ترسیم نقشه هم‌دمای حداقل (MTPM^۴) مدلی با همین نام تدوین شد. نتایج حاصل از این مدل و مقایسه آن‌ها با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده در منطقه ارتفاعات دربند واقع در شمال تهران روند گرادبان دمای حداقل را به خوبی نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: جریان کاتابولیک، دمای حداقل، چاله یخبندان، مناطق کوهستانی، مدل‌های ترمودینامیکی

مقدمه

همچنین پیش‌بینی این دماها برای جلوگیری از صدمات احتمالی بسیار حائز اهمیت است. مواردی نظیر بیلان انرژی تشعشعی، بیلان انرژی خاک، شرایط جوی، خصوصیات زمین (نوع خاک، رنگ خاک، شیب زمین، توپوگرافی، نزدیکی به مخازن گرمایی و دوری و نزدیکی به آب‌ها)، وضعیت پوشش ابر و... در ایجاد دماهای حداقل و حداکثر مؤثرند. (۱) در این میان دمای حداقل یک پارامتر مهم هواشناسی است که می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد.

دمای لحظه‌ای هر منطقه متأثر از پارامترهای زیادی است. تعیین دما به‌ویژه دماهای حداقل و حداکثر برای مناطق مختلف نقش اساسی در تعیین الگوی کشت آن منطقه دارد.

۱- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول : Email: mousavib@ferdowsi.um.ac.ir

2 - Katabolic wind

3 - Digital Elevation Model

4 - Minimum Temperature Prediction Model

یوچانگ و همکاران (U.Chung et.al, 2004) به منظور پیش‌بینی و ترسیم خطوط هم‌دمای حداقل در مناطق کوهستانی، مدلی را با در نظر گرفتن تجمع هوای سرد و خصوصیات توپوگرافی به دست آوردند (۱۰).

مواد و روش‌ها

مدل پیش‌بینی دمای حداقل در مناطق کوهستانی با استفاده از کامپایلر ویژوال بیسیک^۱ برنامه نویسی و اجرا شده و در نهایت به صورت یک نرم‌افزار تدوین شده است. نرم افزار پشتیبان این مدل دارای ۶ منوی اصلی و ۲۱ زیر منو است که کاربر می‌تواند اطلاعات لازم را به وسیله آن وارد نموده و اقدام به اجرای مدل نماید. (شکل ۱) طرح شماتیک لایه‌های ورودی، پردازش و خروجی مدل را نشان می‌دهد. یک از ضروریات اجرای مدل وجود DEM منطقه مورد مطالعه است که به عنوان ورودی اصلی به مدل داده می‌شود و برای شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه و حل روابط در هر خانه (سلول) از شبکه که مبنای کار مدل می‌باشد، وجود آن الزامی است.

مدل دمای حداقل را از رابطه برونت محاسبه می‌نماید (۲).

$$T = T_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{Re}{\delta_c \sqrt{K}} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

در این رابطه مقدار T_1 دمای محیط در لحظه غروب آفتاب، R_e مقدار تابش مؤثر در هنگام غروب و t نیز مدت زمان سرد شدن شبانه تا رسیدن به دمای حداقل می‌باشد. با تعیین ضرایب ثابت $\delta_c \sqrt{K}$ توسط اندازه‌گیری‌های فیزیکی و از جداول، تغییرات حرارت به عنوان تابعی از زمان بیان می‌شود. پس از آن که مقدار دمای حداقل نقطه اوج تخمین زده شد، مقدار دمای حداقل سایر نقاط با داشتن اطلاعات

همچنین تعیین مناطق با حداقل دمای یکسان و تهیه نقشه هم‌دما برای مناطق مختلف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و کاربرد فراوانی خواهد داشت. این مهم در مناطق کوهستانی اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا می‌کند. چرا که وضعیت ویژه‌ای که توپوگرافی زمین ایجاد می‌کند، باعث پیچیدگی‌های خاصی می‌شود که ایجاد دماهای حداقل متفاوتی را در پی دارد. تعیین دمای حداقل به ویژه به منظور پیش‌بینی سرمازدگی (منطقه‌ای و محلی) و کاهش خسارات آن در مناطق کوهستانی مستلزم درک و شناخت کامل ساز و کارهای انتقال گرما و روش‌های مختلف سرمایه‌ش است.

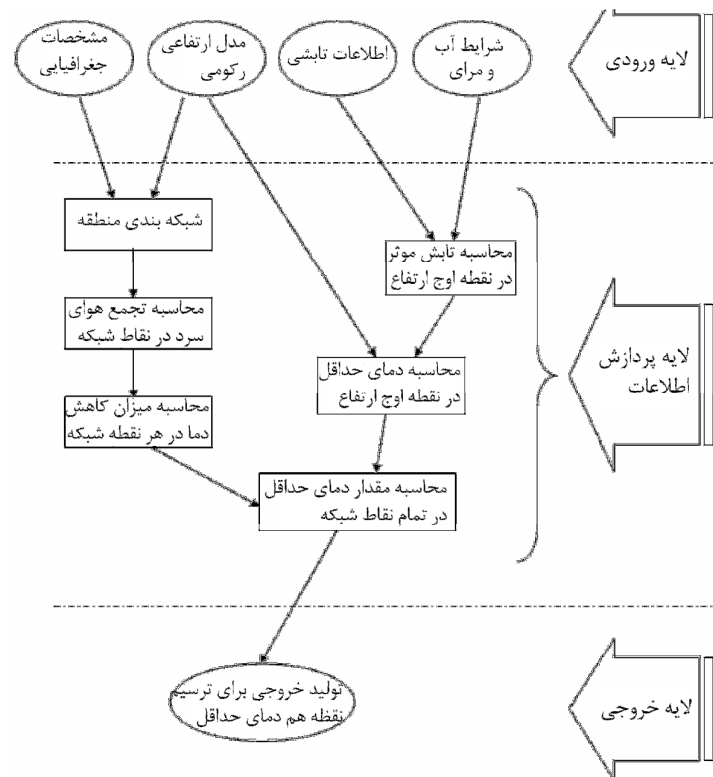
تورنتون (۹) از روش‌های درون‌یابی بین ایستگاه‌های هم‌جوار برای تهیه نقشه‌های دمای حداقل در مناطق کوهستانی استفاده کرد. (۹) بلاستند (۳) و همچنین جرویس و استوارت (۶) نیز از روش‌های مشابهی برای این منظور استفاده کردند. در این روش‌ها نقش فاصله ایستگاه‌های اندازه‌گیری به عنوان عامل مؤثر در نظر گرفته شده بودند.

داسون و مارکس برای در نظر گرفتن ارتفاع از مدل درون‌یابی مکانی با شرکت دادن لپس ریت در معادلات استفاده کرد (۴). نالدر و وین یز کار مشابهی انجام دادند (۷). بلاستند و همکاران نشان دادند که لپس ریت با زمان در فصل، در طول روز و حتی به صورت ساعتی تغییر می‌کند. همچنین یان و همکاران نشان دادند که اگر لپس ریت را در معادلات درون‌یابی ثابت فرض کنیم، مقادیر میانگین دما بیشتر از مقدار واقعی به دست می‌آیند (۱۱).

جرویس و استوارت با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS اقدام به شناسایی محلی دره‌های زهکشی در انگلستان نمودند. اقدامات آن‌ها در زمینه یافتن رابطه‌ای کاربردی، بین زهکشی هوای سرد و حداقل درجه حرارت معطوف شده بود.

شروع مدل می‌باشد.

رقومی ارتفاعی و تجمع هوای سرد تعیین می‌شود. در اصل محاسبه دمای حداقل در اوج اولین گام پیش‌بینی و نقطه



(شکل ۱) - طرح شماتیک لایه‌های ورودی، پردازش و خروجی مدل MTPM

بنابراین مدل تعادلی را بین ورودی و خروجی و تجمع هوای سرد پدید می‌آورد و بر اساس ورودی و خروجی اقدام به محاسبه تجمع می‌نماید. در گام دوم، مدل برای هر نقطه جهت و شیب را در چهار طرف مشخص می‌کند. این عمل با استفاده از ΔX در جهت x و ΔY در جهت Y و با داشتن مقدار اختلاف ارتفاع ΔZ میسر می‌باشد. در این میان به صورت پیش‌فرض شیب‌های مثبت به عنوان خروجی هر نقطه و شیب منفی به عنوان ورودی شناخته می‌شوند. به این ترتیب میزان ورودی و خروجی در هر خانه از شبکه مشخص می‌شود. در سومین گام مدل با تخصیص مقدار ارتفاع اولیه لایه وارونگی دمایی به هر خانه از شبکه شروع به حل معادلات در هر نقطه با توجه به ورودی‌ها و

پس از ورود مدل رقومی ارتفاعی (DEM) مدل MTPM اقدام به پردازش اطلاعات می‌نماید. در اولین گام، مرزها حذف می‌شوند. حذف مرزها به این دلیل انجام می‌شود که خارج از این محدوده‌ها برای مدل تعریف نشده و بنابراین هرگونه محاسبه‌ای موجب خطا می‌شود. بنابراین مدل نمی‌تواند برای نقاط مرزی معادلات را حل نماید. لذا این نقاط حذف شده و تنها داده‌های آن برای حل معادلات در نقاط مجاور مورد استفاده مدل قرار می‌گیرد. با این شرایط دو سطر و دو ستون از اول و آخر شبکه حذف می‌شود.

بر اساس معادلات پایستگی ماده و انرژی، ورودی به هر نقطه برابر با تجمع ماده به علاوه خروجی از آن نقطه می‌باشد.

از طرفی قانون هیدرواستاتیک می تواند تغییرات فشار را با تغییرات ارتفاع نشان دهد (۵).

$$\frac{dP}{dZ} = -\rho g \quad (6)$$

همچنین اگر قانون گازها نیز در معادلات اعمال شود؛

$$P = \rho RT \quad (7)$$

در نهایت قانون اول ترمودینامیک را می توان به شکل رابطه زیر نوشت (۸).

$$dT = -\frac{g}{C_p} dZ + \frac{1}{C_p} dQ \quad (8)$$

مدل MTPM با استفاده از رابطه فوق تغییرات دما را در دو جهت ΔX و ΔY به دست می آورد. ترم اول رابطه بیانگر تغییرات دما ناشی از افتاهنگ عمودی دما می باشد. ترم دوم نیز تغییرات گرمایی که بر روی دما تأثیر گذارند را محاسبه می نماید. تغییرات گرمایی می تواند متأثر از گرمایش ناشی از عوامل چگالش ۲، تابش ۳ و تلاطم ۴ باشد (۸). در این مدل که اساس آن وارونگی در اثر تابش است، بنابر قانون اول ترمودینامیک در شرایط هم فشار، تغییرات گرمایی بسته هوا با میزان تجمع هوای سرد ارتباط مستقیم پیدا می کند.

$$dQ \propto -dH \quad (9)$$

علامت منفی به این معنا است که هرچه تجمع هوای سرد در یک نقطه بیشتر باشد، کاهش انرژی داخلی در نتیجه کاهش انرژی گرمایی را در پی خواهد داشت.

بنابراین مدل برای هر نقطه دو ترم را برای کاهش دما محاسبه خواهد کرد. مقدار تغییرات ناشی از کاهش انرژی داخلی در دو جهت در بعد افق محاسبه می شود. لذا تغییرات دما ناشی از اعمال تغییرات در هر دو جهت خواهد بود.

در نهایت پس از محاسبه دمای حداقل در نقطه اوج ارتفاعی و مقدار کاهش دمای هر نقطه از شبکه منطقه، مدل

خروجی ها و مشخصات نقاط مجاور می نماید. این عمل برای تمام نقاط شبکه تا آنجا انجام می گیرد که در تمام نقاط مقدار تجمع هوای سرد (ΔH) با اعمال تمامی شیبها از بیشترین ارتفاع به کمترین محاسبه شود. در واقع مدل ترتیبی را برای نقاط شبکه انتخاب می کند که تأثیر حرکت هوای سرد برای همه نقاط با توجه به نقطه قبلی اعمال شود. در نهایت ΔH برای هر نقطه از شبکه معرف میزان تجمع هوای سرد می باشد.

مهمترین روابط در مدل مربوط به میزان کاهش دما در هر نقطه می باشد. با توجه به این که نقطه اوج از نظر ارتفاعی دارای ورودی نمی باشد، بنابراین فرض اولیه مدل برای این نقطه، عدم تجمع هوای سرد و در نتیجه عدم کاهش دمای ناشی از این عامل می باشد.

پس از تخمین دمای حداقل در نقطه اوج ارتفاعی و با دانستن مقدار ΔH که معرف تجمع هوای سرد می باشد، مدل اقدام به محاسبه ΔT یا میزان کاهش دما می نماید. بر این اساس مدل از روابط ترمودینامیک^۱ برای محاسبه ΔT سود می برد. بر اساس روابط بقاء انرژی یا معادله انرژی، مجموع گرمایی که بسته هوا جذب می کند، dq ، و کاری که بر روی بسته انجام می گیرد، dw ، برابر با تغییرات انرژی داخلی آن می باشد، dE (۱۰).

$$dE = dq + dw \quad (2)$$

با در نظر گرفتن قانون ژول (۵)

$$dE = C_v dT \quad (3)$$

و رابطه مایر (۵)

$$R = C_p - C_v \quad (4)$$

برای بسته هوا به جرم واحد رابطه زیر به دست می آید.

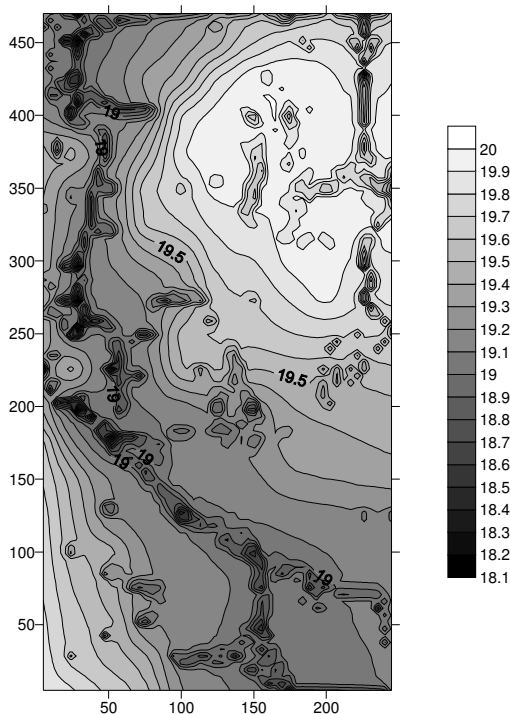
این رابطه قانون اول ترمودینامیک می باشد (۵).

$$dT = \frac{R}{C_p} \cdot \frac{T}{P} dP + \frac{1}{C_p} dQ \quad (5)$$

2 - Condensation
3 - Radiation
4 - Turbulent

1 - Thermodynamic

تأیید روند آن‌ها را ایفا نمایند. محل نصب ایستگاه‌ها به گونه‌ای انتخاب گردید که همه آن‌ها تقریباً بر روی یک خط و در جهت شیب در ارتفاعات مختلف قرار گیرند. تراکم ایستگاه‌ها نیز به گونه‌ای بود که در مناطقی که تجمع هوای سرد رخ می‌دهد، ایستگاه‌ها به هم نزدیک تر باشند. ارتفاع دقیق و موقعیت همه ایستگاه‌ها با استفاده از GPS ۱ دستی (e-trex) تعیین شد.



شکل ۲: نقشه هم‌دمای حداقل (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)

نتایج

پس از دیدبانی‌های انجام شده، شرایط اولیه برای ورود به مدل جمع‌آوری شد. سرانجام کلیه مراحل طی شد و مدل اجرا گردید. اطلاعات مربوط به هفت روز از دوره اندازه‌گیری وارد مدل شد و سپس نتایج با دیدبانی‌های میدانی مقایسه شدند.

برای تمامی نقاط از روی دمای حداقل نقطه قبلی و کاهش دمای همان نقطه مقدار دمای حداقل را در آن نقطه محاسبه می‌کند.

$$T_i = T_{i-1} + \Delta T_i \quad (10)$$

مدل در پایان فایل خروجی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که شامل مختصات افقی، ارتفاعی و دمای حداقل از هر نقطه از منطقه می‌باشد. با استفاده از این مدل می‌توان نقشه خطوط هم‌دمای حداقل منطقه را رسم نمود.

منطقه مورد مطالعه

به منظور آزمون صحت مدل، منطقه کوهستانی در شمال تهران در ارتفاعات دربند، بین امامزاده داوود و ارتفاعات اوسون انتخاب شد. طول جغرافیایی منطقه مورد مطالعه $051^{\circ}25' E$ بوده و دارای عرض جغرافیایی $35^{\circ}50' N$ می‌باشد. مساحت این منطقه 137500 مترمربع می‌باشد. دره مورد مطالعه دارای شیب عمومی جنوبی می‌باشد که اختلاف تراز پایین‌ترین نقطه (تراز 1777 متر از سطح دریا) و بالاترین قسمت آن (تراز 2320 متر از سطح دریا) 543 متر می‌باشد. برای دیده‌بانی در نقاط مختلف دره از 6 ایستگاه استفاده شد. 4 ایستگاه مجهز به دماسنج دیجیتال و 2 ایستگاه مجهز به دماسنج جیوه‌ای حداقل - حداکثر بوده که نقاط ارتفاعی مختلفی را در دره پوشش می‌دادند. ایستگاه‌های دیجیتال در واقع دماسنج‌های دیجیتال مجهز به دیتالوگر بوده که با حساسیت 0.1 درجه سانتی‌گراد دما را در بازه‌های مختلف برداشت نموده و در حافظه خود ثبت می‌کردند.

ایستگاه‌های دماسنجی جیوه‌ای، با دقت 1 درجه سانتی‌گراد به صورت ترکیبی با ایستگاه‌های دیجیتال مستقر شده بودند تا هم تعداد ایستگاه‌ها در حد مطلوبی باشند و هم به نوعی نقش کنترل صحت داده‌های ایستگاه‌های دیجیتال و

(جدول ۱) - مشخصات ایستگاه‌های دماسنجی در منطقه مورد مطالعه

شماره ایستگاه	نوع ایستگاه	تراز ارتفاعی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	دیجیتال	۱۹۵۷	E 051°25'23.8"	N 35°50'13.6"
۲	دیجیتال	۲۰۳۰	E 051°25'19.9"	N 35°50'27.3"
۳	جیوه ای	۲۰۸۰	E 051°25'19.2"	N 35°50'33.8"
۴	دیجیتال	۲۱۶۷	E 051°25'14.8"	N 35°50'38.5"
۵	جیوه ای	۲۲۲۷	E 051°25'14.8"	N 35°50'42.4"
۶	دیجیتال	۲۳۰۵	E 051°25'14.8"	N 35°50'47.2"

(جدول ۲) - دماهای حاصل از اجرای مدل و مشاهده شده (درجه سلسیوس)

شماره	روز اول		روز دوم		روز سوم		روز چهارم		روز پنجم		روز ششم		روز هفتم	
	$T_{min} = 23$		$T_{min} = 23$		$T_{min} = 24$		$T_{min} = 25$		$T_{min} = 21$		$T_{min} = 22$		$T_{min} = 22$	
	T_M	T_a	T_M	T_a	T_M	T_a	T_M	T_a	T_M	T_a	T_M	T_a	T_M	T_a
۱	19.5	18.8	19.5	18.5	19.4	19.7	19.7	19.8	18.8	18.3	18.9	18.4	18.9	18.5
۲	19.94	20	19.94	19.8	19.6	20.1	19.8	20.2	19.1	19.5	19.2	19.5	19.2	19.4
۳	19.89	20	19.89	20	20	20.2	20	20.3	18.9	19.5	19	19.5	19	19.5
۴	19	19.3	19	19	19	20.8	22	20.9	18.5	18.7	18.8	18.8	18.8	18.8
۵	19.2	20	19.2	20	21	19.4	22	19.6	18.9	19.5	19.8	20	20	19.8
۶	19.8	20	19.8	20.2	21	20	22	20.1	19.8	19.7	20	19.9	20	20

نتایج و بحث

۳- داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه اول نشان می‌دهد

که دمای به‌دست آمده از مدل خیلی بیشتر است. برای مثال در روز اول دمای مشاهده شده ۱۸/۸ درجه سانتی‌گراد بوده، در شرایطی که این مقدار ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد توسط مدل به‌دست آمده است. بررسی وضعیت و محل ایستگاه این نکته را مشخص می‌نماید که وجود رطوبت و نزدیکی به رودخانه می‌تواند تأثیر زیادی بر دمای محیط گذاشته که جا دارد این پارامتر نیز به مدل‌ها وارد شود.

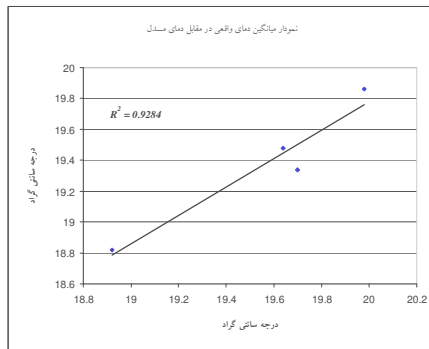
۴- ایستگاه پنجم از روند سایر ایستگاه‌ها تبعیت نمی‌کند. این مسئله وقتی جدی‌تر می‌شود که دمای مدل نیز با دمای مشاهده شده در ایستگاه تفاوت زیادی دارد. در

۱- همان گونه که در جداول و نقشه‌های خروجی مشخص می‌باشد، مدل به خوبی روند دما را با توجه به ارتفاع و توپوگرافی پیش‌بینی کرده است.

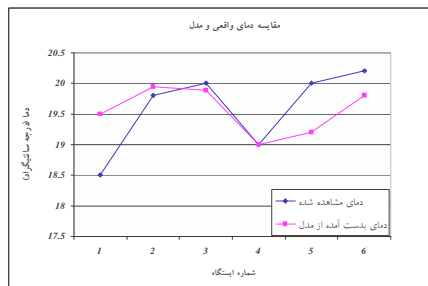
۲- با مقایسه دو ایستگاه اول و ششم که اختلاف تراز ۴۳۰ متر از هم دارند، به خوبی می‌توان تأثیر تجمع هوای سرد بر کاهش دما را درک کرد. چرا که اگر تنها اختلاف ارتفاع را در نظر بگیریم، با توجه به افتاهنگ عمودی، به دلیل تراز پایین‌تر ایستگاه اول باید حداقل ۳ درجه گرم‌تر از ایستگاه ششم باشد. اما دما در ایستگاه اول نزدیک به ۱/۵ درجه کمتر از ایستگاه آخر می‌باشد.

مطلوب برای تشکیل آن (عدم وزش باد بیش از ۱ متر بر ثانیه، صاف بودن آسمان و تابش روزانه خورشید به میزان ۹ مگاژول در روز). (۸).

۶- رگرسیون خطی بین میانگین دمای مشاهده شده ایستگاه‌ها و دمای به دست آمده از مدل در گام اول همبستگی خوبی نشان نمی‌دهد. در این میان مقدار R^2 برای آن بسیار کم می‌باشد (۰/۳). اما با حذف وضعیت‌های نامطلوب (روزهای ابری و ایستگاه‌های غیر استاندارد)، وضعیت به مراتب بهتر شده و مقدار R^2 برابر با ۰/۹۳ می‌شود.



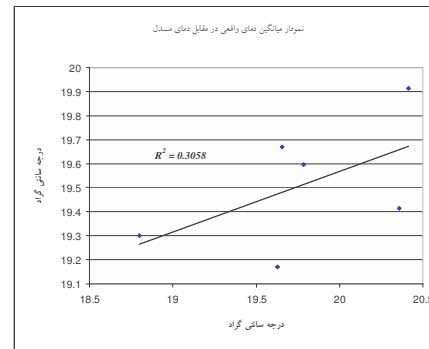
(شکل ۴) - نمودار دمای واقعی در مقابل دمای مدل بعد از حذف ایستگاه‌ها و شرایط ویژه (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



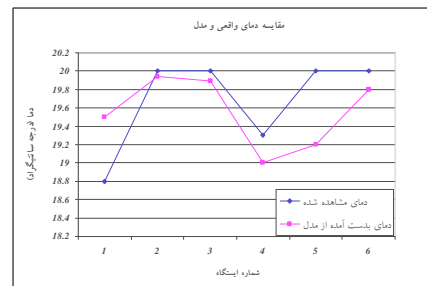
(شکل ۶) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز دوم (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)

توجیح این مسئله وجود باد پناه را می‌توان علت دمای بیش از حد انتظار ایستگاه دانست. این عامل با سد کردن جریان‌ات، مانع عبور و تجمع آن‌ها در پایین دست می‌شود. اما چون مقیاس این باد پناه در مقیاس مدل نمی‌باشد، لذا مدل تأثیر آن را نمی‌تواند اعمال نماید.

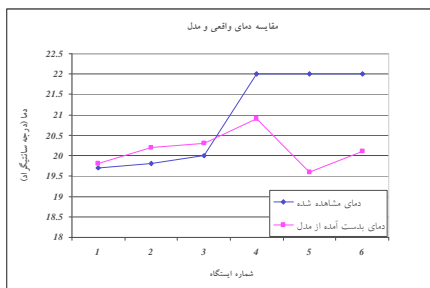
۵- در روزهای سوم و چهارم به دلیل ابری بودن آسمان شب، وارونگی دمایی ناشی از تابش بوجود نیامده و در نتیجه ماه‌های مشاهده شده با مدل تطبیق ندارد. این مسئله نباید فراموش شود که اساس تجمع هوای سرد، وارونگی تابشی در شب است. بنابراین وجود شرایط



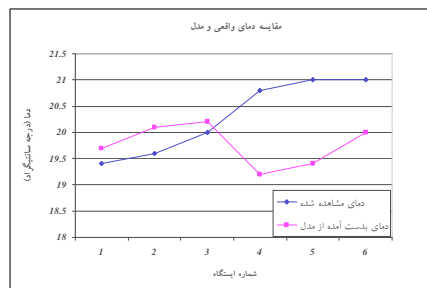
(شکل ۳) - نمودار دمای واقعی در مقابل دمای مدل قبل از حذف ایستگاه‌ها و شرایط ویژه (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



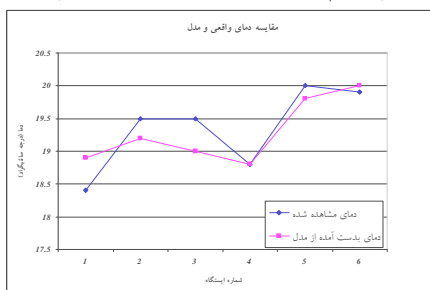
(شکل ۵) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز اول (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



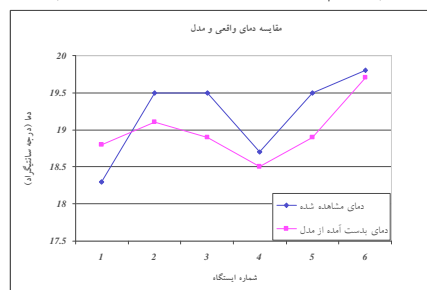
(شکل ۸) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز چهارم (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



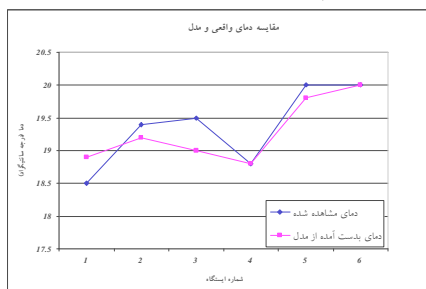
(شکل ۷) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز سوم (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



(شکل ۱۰) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز ششم (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



(شکل ۹) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز پنجم (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)



(شکل ۱۱) - نمودار مقایسه دمای واقعی و مدل روز هفتم (ترسیم شده با استفاده از خروجی منطقه)

منابع

- ۱- میرمحمدی میبدی، سیدعلی محمد، ۱۳۴۱- مدیریت تنش های سرما و یخزدگی گیاهان زراعی و باغی، تالیف: علی محمد میرمحمدی با همکاری سعید ترکش. / اصفهان، جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲
- ۲- وزیری، بهروز، هواشناسی فیزیکی، نویسنده: R.Trochon و J.Rouleau، ترجمه: وزیری، بهروز/ تهران، سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۶۵
- 3- Bolstad, P.V., Swift, L., Collins, F., Regniere, J., 1998. Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains. Agric. For. Meteorol. 91,161-176

- 4- Dodson, R. and Marks, D., 1997. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Clim. Res.* 8 1, pp. 1–20.
- 5- Holton, J.R. *An Introduction to Dynamic Meteorology* 3rd edition. Academic Press, San Diego, 1992.
- 6- Jarvis, C.H., Stuart, N., 2001. A comparison among strategies for interpolating maximum and minimum daily air temperatures. Part I: The selection of ‘‘Guiding’’ topographic and land cover variables. *J. Appl. Meteorol.* 40, 1060–1074.
- 7- Nalder, I.A., Wein, R.W., 1998. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agric. For. Meteorol.* 92, 211–225.
- 8- Roland B. Stull, *Meteorology Today for Scientist and Engineers*. West Publishing co. 1995.
- 9- Thornton, P.E., Running, S.W., White, M.A., 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J. Hydrol.* 190, 214–251.
- 10- U. Chung, H.H. Seo, K.H. Hwang, B.S. Hwang, J. Choi, J.T. Lee, J.I. Yun, 2006. Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential. *Agric. For. Meteorol.* 137, 15–24.
- 11- Yun, J.I., Choi, J., Ahn, J.H., 2001. Seasonal trend of elevation effect on daily air temperature in Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 3, 96–104 (in Korean with English abstract).

Developing a thermodynamic model to predict minimum temperature due to cold air accumulation over a complex terrain (A case study: North Mountains of Tehran)

M.S. Ghazanfari – M.Mousavi-Baygi* - H. Sanaeinejad¹

Abstract

Topography is the most important parameter which produces minimum temperatures in complex terrain. Radiative inversion occurs in the mountains and produces radiative freezing. When the land surface is cooled, a boundary layer forms. Since cold air is heavier than warm air, therefore, it flows toward the down slope, which is named Katabolic flow. When Katabolic flows are formed, cold air accumulates in the valleys and thereafter in places which do not have a good drainage of air. Based on thermodynamic equations a model was developed to consider the accumulation of cold air in each point of a complex terrain. Minimum temperature prediction model (MTPM) was developed and used to predict the minimum temperature in complex terrains. This thermodynamic model uses digital elevation model to produce minimum temperature maps. Running MTPM for North Mountains of Tehran showed a good correlation between modeled and actual minimum temperatures.

Key words: Katabolic flow, Minimum temperature, Freezing ponds, Complex terrain, Thermodynamic models

*- Corresponding author Email: mousavib@ferdowsi.um.ac.ir

1 - Contribution from College of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad